

UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA  
Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ**

**COMO SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN  
LA PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ÁRIDOS  
DE COMPOSICION MAYORMENTE SEDIMENTARIO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: CARLOS GUILLERMO CABEZA**

**KEVIN FERNANDO PALMA GALLEGOS**

**DIRECTOR: ING. FRANCISCO JOSÉ DARQUEA CÓRDOVA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ COMO SUSTITUCION  
PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN LA PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS  
CON ÁRIDOS DE COMPOSICION MAYORMENTE SEDIMENTARIO

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: CARLOS GUILLERMO CABEZA ILLESCAS**

**KEVIN FERNANDO PALMA GALLEGOS**

**DIRECTOR: ING. FRANCISCO JOSÉ DARQUEA CÓRDOVA**

**CUENCA – ECUADOR**

**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

**DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Carlos Guillermo Cabeza Illescas y Kevin Fernando Palma Gallegos portadores de las cédulas de ciudadanía N° 0106913940 y 0107065260. Declaramos ser autores de la obra: "APLICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ COMO SUSTITUCION PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN LA PRODUCCION DE MEZCLAS ASFALTICAS CON ARIDOS DE COMPOSICION MAYORMENTE SEDIMENTARIO", sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

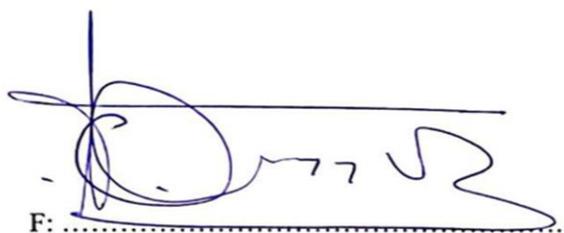
Cuenca, 20 de marzo de 2024

  
F: .....  
Carlos Guillermo Cabeza Illescas  
0106913940

  
F: .....  
Kevin Fernando Palma Gallegos  
0107065260

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS**

Yo, Francisco José Darquea Córdova, certifico que el presente trabajo de titulación fue ejecutado por los estudiantes Carlos Guillermo Cabeza Illescas y Kevin Fernando Palma Gallegos bajo mi dirección.



F: .....  
**Ing. Francisco José Darquea Córdova**  
**0103784179**

## DEDICATORIA

No hay nada que no se pueda lograr con esfuerzo, dedicación y el apoyo de las personas que te quieren. Por tal motivo, quiero agradecer ante todo a Dios, por ser la luz y mi guía en este duro pero gratificante camino. De la misma manera, quiero dar las gracias a mis padres, Dany Cabeza y Cecilia Illescas, por todo su amor incondicional, apoyo y cariño para poder sobrepasar cada una de las etapas. A mis abuelitos Martha, Carlos, Birmania y Washington, por todas esas palabras de aliento y de cariño en los mejores y peores momentos de mi vida. A mis hermanos Paola, Ángel y Kevin, les agradezco por aguantar conmigo los peores momentos. Finalmente, a todos mis amigos y compañeros, quienes me acompañaron en este camino, por su apoyo, por sus consejos y por compartir conmigo este viaje.

Carlos Cabeza

El presente trabajo es una dedicatoria a Dios quien me ayudo a salir adelante en momentos difíciles; a mis padres Erwin Palma e Ibeth Gallegos quienes me han brindado la oportunidad de seguir con mis estudios y alcanzar este gran logro a lo largo de los años; a mi hermana Nicole que día a día trato de ser un buen ejemplo para ella; a mis abuelitos Luisa y Julio Cesar que de igual manera me han apoyado durante toda la carrera y siempre han estado pendiente de mí; a Israel, Camila y Carlos que son tres personas muy especiales en mi vida y siempre me han aconsejado buscando el mejor futuro para mí. Finalmente, a familiares y amigos que nunca me han dejado solo y me han brindado palabras de apoyo para lograr cumplir mi sueño.

Kevin Palma

## AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a Dios quien ha sido el que nunca nos ha dejado solo en este largo camino, pero tan valioso al mismo tiempo, de igual manera a nuestros familiares y amigos por brindarnos su tiempo y apoyo incondicional durante toda nuestra carrera universitaria. Se agradece cada granito brindado para obtener el mejor futuro.

A nuestra casa de estudio la Universidad Católica de Cuenca, especialmente a la facultad de Ingeniería Industria y Construcción, a todos los profesores, queremos extender nuestro agradecimiento más sincero por habernos brindado todo su conocimiento y enseñanzas de vida.

Finalmente agradecer a nuestro tutor el Ingeniero Francisco Darquea el cual con el apoyo de los Ingenieros Juan Monje y Marco González, quienes nos han mostrado el camino por el cual llevamos a cabo la tesis y nos orientaron para culminar la misma de la mejor manera.

A la Ingeniera MGs Paola Delgado queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento por su invaluable apoyo y guía durante el proceso de titulación. Su paciencia, dedicación y conocimiento fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

## RESUMEN

En la actualidad, nos enfrentamos a problemas de contaminación ambiental debido a la generación excesiva de productos y materiales a través de procesos industriales. Por lo tanto, en este estudio, se plantea la idea de utilizar la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como sustituto del mineral "Filler".

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de la ceniza de cascarilla de arroz como material reemplazante del mineral "Filler", dentro de una mezcla asfáltica en unión de los áridos de composición mayormente sedimentaria. Es por eso que, para llevar a cabo este trabajo se empleará el método Marshall, bajo los parámetros establecidos por el MTOP.

Se realizaron mezclas con diferentes porcentajes de contenido de asfalto: 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5% (es decir un total de 45 briquetas), en donde se usaron mezclas de materiales con un 50% de finos y 50% de gruesos; 60% grueso y 40% finos, 55% de finos y 45% de gruesos, resultando esta última dosificación la más favorable para determinar que el porcentaje óptimo de asfalto a usar es del 6%.

A continuación, con el porcentaje óptimo de asfalto del diseño patrón, se incorporó CCA en sustitución del "Filler", en proporciones (20%, 40%, 60%, 80% y 100%). Con un total de 15 briquetas, adicionando CCA.

El principal resultado obtenido es que el porcentaje óptimo de asfalto es del 6% y a su vez un 20% de CCA.

*Palabras clave:* asfalto, agregados, áridos sedimentarios, ceniza de cascarilla de arroz, mezclas asfálticas.

## ABSTRACT

Currently, there are environmental pollution issues to face due to the excessive generation of products and materials through industrial processes. Therefore, this study proposes using rice husk ash (RHA) as a substitute for the mineral Filler.

This work aims to analyze rice husk ash's behavior as a replacement material for the mineral filler in an asphalt mixture in conjunction with aggregates primarily of sedimentary composition. The Marshall method will be employed under parameters established by the Ministry of Transport and Public Works (MTOPE by its Spanish acronym) to accomplish this.

Mixtures were prepared with different asphalt content percentages: 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, and 6.5% (a total of 45 briquettes), using materials with 50% fines and 50% coarse mix, 60% coarse and 40% fines, 55% fines and 45% coarse; with the latter dosage proving to be the most favorable in determining that the optimum asphalt percentage to use is 6%.

Next, with the optimal asphalt percentage from the standard design, RHA was incorporated as a substitute for filler in proportions of 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%. A total of 15 briquettes were prepared with added RHA.

The main result is that the optimal asphalt percentage is 6%, with an additional 20% RHA.

*Keywords:* asphalt, aggregates, sedimentary aggregates, rice husk ash, asphalt mixtures.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

.....	3
.....	4
DEDICATORIA .....	5
AGRADECIMIENTO .....	6
RESUMEN .....	7
ABSTRACT.....	8
CAPITULO I .....	15
INTRODUCCIÓN .....	15
1.1. Formulación del Problema .....	15
1.2. Delimitación del Problema.....	16
1.3. Objetivos .....	17
1.3.1. General.....	17
1.3.2. Específicos.....	17
1.4. Justificación.....	17
CAPITULO II.....	19
ESTADO DEL ARTE.....	19
MARCO TEÓRICO.....	25
2.1. Mezclas Asfálticas.....	25
2.2. Material de las mezclas asfálticas en caliente .....	28
2.2.3. Ceniza de Cascarilla de arroz (CCA).....	31
2.2.3.1. Obtención de la (CCA) .....	32
2.3. Parámetros Generales de los Áridos.....	33
2.4. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas .....	36
2.5. Método empleado para el diseño de mezclas asfálticas .....	40

	10
2.5.1. Método Marshall .....	40
CAPITULO III.....	43
METODOLOGÍA.....	43
3.1. Caracterización de los agregados .....	43
3.1.1. Granulometría de los agregados.....	43
3.1.2. Peso específico del agregado.....	50
3.1.3. Curva de Fuller .....	52
3.1.3. Elaboración de briquetas .....	61
3.1.4. Ensayos de las briquetas elaboradas .....	65
3.2. Diseño de la mezcla asfáltica con adición de CCA.....	69
3.2.1. Elaboración de briquetas con adición de CCA .....	70
CAPITULO IV.....	71
RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	71
4.1. Resultados de la mezcla sin CCA .....	71
4.2. Resultados de la mezcla con CCA .....	78
4.3. Análisis del 20% de CCA obtenido - % que cumple todos los parámetros .....	92
4.3.1. Estabilidad.....	92
4.3.2. Flujo.....	93
4.3.3. Porcentaje de vacíos con aire .....	94
4.3.4. Porcentaje de vacíos con agregado mineral .....	95
4.3.5. Porcentaje de vacíos con asfalto incluido.....	96
CONCLUSIONES .....	98
RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFIA .....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Resumen revisión bibliográfica .....	20
<b>Tabla 2</b> Ficha Técnica Asfalto AC-20 .....	29
<b>Tabla 3</b> Propiedades Químicas de la CCA.....	33
<b>Tabla 4</b> Rangos Granulométricos para Pavimentos .....	34
<b>Tabla 5</b> Granulometría de 3/4" .....	44
<b>Tabla 6</b> Granulometría de 3/8" .....	45
<b>Tabla 7</b> Granulometría de la Arena.....	47
<b>Tabla 8</b> Granulometría de la llenante mineral Filler .....	48
<b>Tabla 9</b> Granulometría del CCA .....	50
<b>Tabla 10</b> Peso específico para el material de 3/8" .....	50
<b>Tabla 11</b> Peso específico para el material de 3/4" .....	51
<b>Tabla 12</b> Peso específico para el material de Arena .....	51
<b>Tabla 13</b> Peso específico para el mineral Filler .....	51
<b>Tabla 14</b> Análisis Curva de Fuller .....	53
<b>Tabla 15</b> Porcentajes de Corrección del Material .....	55
<b>Tabla 16</b> Valores de Agregados Corregidos .....	57
<b>Tabla 17</b> Pesos Óptimos y cantidades de material para la Mezcla Asfáltica .....	60
<b>Tabla 18</b> Pesos Óptimos para la Mezcla Asfáltica.....	60
<b>Tabla 19</b> Criterios de la MTOP .....	63

<b>Tabla 20</b> Criterios de la MTOP .....	64
<b>Tabla 21</b> Resultados Briquetas Ensayadas .....	72
<b>Tabla 22</b> Resultados Briquetas Ensayadas .....	73
<b>Tabla 23</b> Tabla General de Datos .....	75
<b>Tabla 24</b> Tabla Resumen .....	76
<b>Tabla 25</b> Mezcla Asfáltica con 4.5% de Asfalto AC - 20 .....	77
<b>Tabla 26</b> Mezcla Asfáltica con 5% de Asfalto AC - 20 .....	77
<b>Tabla 27</b> Mezcla Asfáltica con 5.5% de Asfalto AC - 20 .....	77
<b>Tabla 28</b> Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 .....	78
<b>Tabla 29</b> Mezcla Asfáltica con 6.5% de Asfalto AC - 20 .....	78
<b>Tabla 30.</b> Resultados briquetas Ensayadas .....	79
<b>Tabla 31</b> Resultados Ensayo Bulk .....	80
<b>Tabla 32</b> Tabla Resumen .....	82
<b>Tabla 33</b> Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 20% de CCA .....	90
<b>Tabla 34</b> Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 40% de CCA .....	90
<b>Tabla 35</b> Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 60% de CCA .....	91
<b>Tabla 36</b> Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 80% de CCA .....	91
<b>Tabla 37</b> Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 100% de CCA .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Mapa de Ubicación del Cantón Santa Isabel.....	31
<b>Figura 2.</b> Moldes de Briquetas.....	41
<b>Figura 3.</b> Maquinaria Marshall .....	41
<b>Figura 4.</b> Equipo para Baño María.....	42
<b>Figura 5</b> Curva granulométrica del material 3/4" .....	45
<b>Figura 6.</b> Curva granulométrica del material 3/8" .....	46
<b>Figura 7.</b> Curva granulométrica de la Arena.....	48
<b>Figura 8.</b> Curva granulométrica del llenante mineral Filler.....	49
<b>Figura 9.</b> Curvas de Fuller .....	54
<b>Figura 10.</b> Curvas de Corrección .....	55
<b>Figura 11.</b> Curvas de Comparación .....	58
<b>Figura 12.</b> Moldes de Briquetas.....	61
<b>Figura 13.</b> Mezcla Asfáltica.....	62
<b>Figura 14.</b> Martillo y Base de Compactación .....	64
<b>Figura 15.</b> Briquetas.....	65
<b>Figura 16.</b> Equipo de flotabilidad para el ensayo Bulk.....	66
<b>Figura 17.</b> Equipo de flotabilidad para el ensayo Bulk.....	66
<b>Figura 18.</b> Briqueta Ensayada.....	67
<b>Figura 19.</b> Mezcla Asfáltica.....	68
<b>Figura 20.</b> Ensayo Rice.....	68
<b>Figura 21.</b> Muestra después del Ensayo Rice .....	69
<b>Figura 22</b> Resultados de Estabilidad vs Porcentajes de Asfalto .....	84
<b>Figura 23</b> Resultados de Flujo vs Porcentajes de Asfalto.....	84

<b>Figura 24</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con asfalto incluido vs Porcentajes de Asfalto.....	85
<b>Figura 25</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con agregado mineral vs Porcentajes de Asfalto.....	85
<b>Figura 26</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con aire vs Porcentajes de Asfalto .....	86
<b>Figura 27</b> Resultados de Estabilidad vs Porcentaje de CCA .....	87
<b>Figura 28</b> Resultados de Flujo vs Porcentaje de CCA.....	87
<b>Figura 29</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con asfalto incluido vs Porcentaje de CCA .....	88
<b>Figura 30</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con agregado mineral vs Porcentaje de CCA .....	88
<b>Figura 31</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con aire vs Porcentaje de CCA.....	89
<b>Figura 32</b> Resultados de Estabilidad.....	93
<b>Figura 33</b> Resultados de Flujo .....	94
<b>Figura 34</b> Resultados de Porcentajes de vacíos con aire .....	95
<b>Figura 35</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con agregado mineral .....	96
<b>Figura 36</b> Resultados de Porcentaje de vacíos con asfalto incluido .....	97

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

#### **1.1. Formulación del Problema**

Cuando se habla de infraestructura vial no solo se habla de un conjunto de vías que unen dos lugares, también hace referencia a actividades como es el comercio y la activación económica que se genera a través de vías de comunicación adecuadas. Un componente importante de la infraestructura vial es el pavimento y su estructura, es por eso que con el pasar de los años se han desarrollado distintos sistemas viales para mejorar su durabilidad sin sacrificar sus costos. Por otro lado, para la producción de pavimentos, se usan agregados minerales de distintos tipos que son comercializados en el mercado de la construcción como materia prima.

Las regulaciones ambientales, la escasa disponibilidad de canteras con material que cumpla las características mecánicas exigidas para su uso como agregado mineral y las grandes distancias de acarreo del material, representan algunos de los múltiples inconvenientes que encontramos al momento de emprender en proyectos relacionados a la infraestructura vial, de ahí la necesidad de buscar nuevas alternativas que nos permitan disponer de los recursos necesarios.

Según Quito & Ortiz, (2023) en nuestro medio, particularmente en la provincia del Azuay, se dispone principalmente de dos grandes fuentes de materiales áridos: Por un lado, tenemos los de la cuenca del río Paute que se caracterizan por tener una litología de tipo principalmente volcánica, y por otro lado tenemos los agregados pétreos que provienen de la cuenca del río Jubones que se caracterizan por tener principalmente un origen sedimentario. La tesis se enfocará en los materiales de la cuenca del río Jubones, que por sus características mecánicas son menos apetecidos en el sector de la construcción, lo que conlleva a que el costo de la adquisición de la materia prima sea menor.

De otras investigaciones realizadas se ha desprendido que la aplicación de la Ceniza de Cascarilla de Arroz CCA, en la confección de hormigones, ha generado una mejora significativa en la resistencia, particularmente cuando ha sido aplicada a mezclas con agregados de origen sedimentario, considerando además que la CCA es un sub producto en la producción arroceras que viene generando problemas ambientales en cuanto a su disposición final. (Figuerola & Navas, 2019)

## **1.2. Delimitación del Problema**

Esta investigación se enfoca en el uso de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como sustituto de agregados finos en mezclas asfálticas. La CCA es un residuo que deja la producción de arroz.

Los agregados finos son un componente esencial de las mezclas asfálticas, pero su escasez es un problema creciente en muchas partes del mundo, incluyendo la provincia del Azuay, Ecuador. La CCA podría ayudar a mitigar la escasez de agregados y reducir los costos de construcción. Quito & Ortiz, (2023)

Para evaluar el uso de la CCA en mezclas asfálticas, se realizaron pruebas Marshall que consisten en determinar la estabilidad, flujo, relación de vacíos, pesos específicos con diferentes porcentajes de CCA. Los resultados mostraron que la CCA puede ser utilizada como un sustituto parcial de los agregados finos sin afectar negativamente sus propiedades. El porcentaje óptimo de CCA depende del tipo de agregado utilizado y de la cantidad de asfalto óptimo.

Los resultados de esta investigación sugieren que la CCA es una alternativa viable para el uso como sustituto de agregados finos en mezclas asfálticas. Sin embargo, se necesitan más estudios para determinar el uso óptimo de la CCA en mezclas asfálticas y evaluar su impacto ambiental.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Estudiar el comportamiento de las mezclas asfálticas con agregados de origen sedimentario al incorporar Ceniza de Cascarilla de Arroz.

#### **1.3.2. Específicos**

Caracterizar de forma física y mecánica los áridos empleados.

Determinar el porcentaje óptimo de asfalto para un diseño patrón con el método Marshall.

Determinar un porcentaje óptimo de sustitución de la Ceniza de Cascarilla de Arroz por el agregado fino incorporado.

Analizar e interpretar los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio para determinar el funcionamiento y comportamiento de la mezcla asfáltica con el uso de CCA.

### **1.4. Justificación**

Hablando específicamente de la actividad agro-industrial del arroz a nivel mundial que ronda una producción anual de 731 millones de toneladas de paja de arroz y alrededor de 113 millones de cascara de arroz. Cedeño et al., (2021) . Lo cual ha hecho que ciertas industrias busquen la manera más rápida y económica de desalojar este material, provocando una gran contaminación al medio ambiente y a su vez fuertes multas hacia los propietarios que ronda entre los \$1700.

Por otro lado, los agregados pétreos son materiales indispensables dentro de la industria de la construcción. Sin embargo, en la actualidad la escasez de este material es un problema que cada vez se vuelve más notorio en diferentes partes del mundo, incluyendo la provincia del Azuay, Ecuador. Quito & Ortiz, (2023).

Esta escasez se debe a ciertos factores como el agotamiento de recursos, regulaciones ambientales, demanda en crecimiento, entre otros. Como consecuencia, la obtención ciertos agregados como el polvo de piedra o Filler, se está convirtiendo en una tarea difícil de realizar. Es por eso, que en este trabajo se analizan varios parámetros como la contaminación del medio ambiente, la falta de materia prima para la industria de la construcción, economía circular, para de esa manera juntarlos y buscar una solución. Cedeño et al., (2021), la cual es adicionar la ceniza cascarilla de arroz dentro del proceso de mezclas asfálticas y conseguir ciertas ventajas de esta adición como se indica a continuación.

***Reducción de los costos de construcción.*** \_ La CCA es un material más económico que los agregados pétreos. Su uso puede beneficiar en la reducción de costo de construcción de carreteras, bases y subbases. Behak & Núñez, (2008).

***Reducción de la escasez de materiales.*** \_ La CCA siendo un subproducto de la producción de arroz la cual es abundante, ayuda a disminuir el uso de materia prima común como los agregados pétreos.

***Mejoras en las propiedades mecánicas.*** \_ Dentro de las mezclas asfálticas el uso de CCA puede ayudar a prolongar la vida útil de este, aumentando la resistencia al desgaste y su durabilidad. Behak & Núñez, (2008).

Con estos antecedentes se plantea investigar el comportamiento del hormigón asfáltico producido con agregado mineral de origen sedimentario, incorporándole la CCA, y de esta manera enfrentar dos problemas importantes: Primero promover el uso de rocas sedimentarias en la construcción como primera opción y segundo, dar una disposición final y de utilidad a la CCA. (Albarracín et al., 2023).

## **CAPITULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

A lo largo de los años los pavimentos asfálticos han desempeñado un papel elemental dentro de la infraestructura vial moderna, por ende, se ha convertido en un componente esencial en la construcción y mantenimiento de carreteras. De tal manera que se deben tener en cuenta ciertos aspectos o características como la resistencia a la intemperie, durabilidad y su capacidad para soportar cargas pesadas y ser considerado como material para la pavimentación de carreteras en todo el mundo.

En otras palabras, los pavimentos asfálticos son cruciales para garantizar la comodidad y seguridad de los usuarios que hacen uso de las carreteras, ya que hacen parte principal de la calidad del viaje. Debido a lo que a lo largo de décadas los pavimentos asfálticos han sido objeto de desarrollos e investigaciones continuas, buscando mejoras en la formulación de mezclas asfálticas hasta los avances en diferentes técnicas para su construcción y mantenimiento, ya que los desafíos a los que se enfrenta un pavimento asfáltico son cambiantes y crecientes demandas de la sociedad. Padilla Rodríguez, (2005).

A continuación, en la tabla 1 se da a conocer distintas investigaciones referentes:

**Tabla 1**  
*Resumen revisión bibliográfica*

INVESTIGACIÓN	AUTOR	MÉTODO O UTILIZADO	RESULTADO S
Elaboración y Caracterización de Ladrillos Elaborados con Adición de Cáscara de Arroz Calcinada	(Sánchez- Vásquez et al., 2021)	NTP 399.601 para ladrillos de concreto	En conclusión, se puede decir que la sustitución del 5% por ceniza de cascarilla de arroz mostró potencial para producir ladrillos de cemento según los parámetros establecidos en la NTP-399.601.
Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cascarilla de arroz y cal potencialmente útil en pavimentos.	(Behak & Núñez, 2008)	AASHTO T193-81	Se observó un importante aumento del CBR de la mezcla de suelo con 20% de CCA y 10% de cal, con 28 días de cura, respecto al del suelo natural. El valor de CBR obtenido para la

ESTUDIO DEL  
USO DEL ASFALTO DE  
RECICLAJE DE  
HORMIGÓN COMO  
CAPA DE SUELO

(Klamt et  
al., 2018)

Método  
Marshall

mezcla fue de 25%, lo que permite afirmar que el material así producido podría ser empleado como capa de subbase de pavimentos.

Los resultados indican que la mejor composición de los materiales estaba compuesta por un 80% de material molido y un 20% de polvo de piedra, que contenía adiciones de 5% de cemento y 5% de sílice de la cáscara del arroz. Por lo tanto, esta mezcla tiene las mejores prestaciones técnicas y medioambientales, ya

			que reutiliza los residuos de la propia pavimentación y también de la producción de arroz.
<p>APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ COMO SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN DE ORIGEN ÍGNEO</p>	<p>(Quito &amp; Ortiz, 2023)</p>	<p>Método Marshall</p>	<p>Los resultados obtenidos indican que el uso de CCA como sustituto parcial del llenante mineral filler en mezclas asfálticas es beneficioso.</p>
<p>MANUAL DE LABORATORIO PARA LOS ENSAYOS DE VÍAS Y PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA PARTE I</p>	<p>(CÓRDOVA &amp; CORNEJO, 2019)</p>	<p>Método Marshall</p>	<p>Los valores de estabilidad en el diseño de una mezcla fría disminuyen en comparación con datos obtenidos del diseño de una mezcla asfáltica en caliente.</p>

<p>DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES ÁRIDOS PROVENIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE Y JUBONES Y SU INCIDENCIA EN LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.</p>	<p>Darquea, (2017).</p>	<p>Método Marshall</p>	<p>Mediante el ensayo Marshall, para una dosificación del 6.80%, la mezcla asfáltica se mantiene dentro de los parámetros exigidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.</p>
<p>DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE INCORPORANDO CAUCHO TRITURADO DE NEUMÁTICO RECICLADO</p>	<p>(Chamba &amp; Benavides, 2019)</p>	<p>Método Marshall</p>	<p>La Rigidez Marshall en la mezcla modificada se va reduciendo ya que aumenta el porcentaje de vacíos, considerando de esta manera que la mezcla con valores mayores a 1% de GCR no puede</p>

---

ser utilizada como una  
capa de rodadura.

---

*Nota:* Fuente: Autores

## MARCO TEÓRICO

El método Marshall es un método de diseño de mezclas asfálticas que fue desarrollado por Bruce Marshall, del departamento de carreteras en Mississippi, a fines de la década de 1930 hasta los inicios de la década de 1940, el método toma fuerza en 1943 donde fue utilizado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos a partir de la segunda guerra mundial fue adaptado para su uso en carreteras, el método tiene como finalidad determinar el porcentaje óptimo de asfalto con una combinación específica de agregados determinada. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

Este análisis busca identificar los parámetros que influyen en su rendimiento y determinar las medidas necesarias para su mantenimiento o rehabilitación, entre los parámetros a buscar como el Volumen de Vacíos (Vv), Volumen de Agregado Mineral (VAM), Volumen de Asfalto efectivo (Vae), Vacíos llenos con asfalto (VFA), Densidad Marshall (Bulk), Estabilidad, Flujo, Gravedad Especifica Bulk (Gmb), Rice (Gmm), Gravedad Especifica Efectiva de los agregados (Gse), Porcentaje en Volumen de Agregado vs Volumen Total (Vagre), Gravedad Especifica del Asfalto (Gasf) y Gravedad Especifica Bulk de la mezcla asfáltica (Gsb).

### 2.1. Mezclas Asfálticas

En primer lugar, las mezclas asfálticas o también conocidas como mezclas bituminosas, cumplen con un papel importante dentro de la infraestructura vial, siendo así el componente principal de las carreteras y vías del mundo, brindando superficies resistentes y duraderas para la movilidad de los usuarios.

Después se debe tener claro que la ingeniería de mezclas asfálticas ha evolucionado significativamente a lo largo de los años, con el fin de conseguir pavimentos más duraderos, seguros y respetuosos con el medio ambiente.

De acuerdo con (Padilla Rodríguez, 2005) las mezclas asfálticas pueden clasificarse de acuerdo a sus parámetros los cuales pueden ser varios:

**Por Fracciones de agregado pétreo empleado:**

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

**Por la Temperatura de puesta en obra:**

Mezclas Asfálticas en caliente. \_ son asfaltos fabricados a elevadas temperaturas, en un promedio de 150 grados centígrados, es importante también calentar los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con estos.

Mezclas Asfáltica en frío. \_ las mezclas asfálticas en frío son una alternativa a las mezclas tradicionales en caliente que se utilizan para la construcción y reparación de pavimentos. Se caracterizan por no requerir calentamiento durante su producción y aplicación, lo que ofrece diversas ventajas ambientales y económicas, la misma genera una reducción en las emisiones también genera un menor consumo de energía, facilidad en la aplicación y versatilidad. Obando & Zamora, (2009).

**Por la proporción de Vacíos en la mezcla:**

Este es uno de los parámetros más importantes ya que sirve para evitar las deformaciones plásticas al ser sometido al paso de cargas y de las variaciones térmicas.

Mezclas Cerradas o Densas: Proporción de vacíos inferior al 6%.

Mezclas Semicerradas: Proporción de vacíos entre el 6% y el 10%.

Mezclas Abiertas Proporción de vacíos mayor al 12%.

Mezclas Porosas o Drenantes: Proporción de vacíos mayor al 20%.

**Por el tamaño máximo del agregado:**

Mezclas Gruesas: tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10mm.

Mezclas Finas: también denominadas micro aglomerados, están conformadas por un árido fino incluyendo polvo mineral y ligante asfáltico.

**Por la Estructura del agregado pétreo:**

Mezcla con esqueleto mineral: esqueleto mineral resistente, notable rozamiento interno de los agregados,

Mezcla sin esqueleto mineral: no poseen esqueleto mineral resistente, su resistencia es debido a la cohesión de la masilla.

**Por la Granulometría:**

Mezclas Continuas: Cantidad bien distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo.

Mezclas Discontinuas: cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo.

Poner qué tipo de mezcla asfáltica se va a usar.

Para la presente investigación, se va a elaborar una mezcla asfáltica cerrada de agregados pétreos naturales por proceso de trituración, haciendo uso de las mezclas asfálticas en caliente, con material pétreo grueso con una granulometría en mezclas continuas.

## **2.2. Material de las mezclas asfálticas en caliente**

### **2.2.1. Ligante Bituminoso**

También conocido como asfalto o betún, es un material de característica principal viscoso el cual actúa como aglutinante que une los agregados en la mezcla. Este puede ser de distintos tipos, como asfalto AC-20, AC-30, entre otros el cual es seleccionado dependiendo las condiciones climáticas, Albarracín et al., (2023).

Para este caso se empleará asfalto AC-20, en donde, “AC” quiere decir Cemento Asfáltico y “20” indica la viscosidad del asfalto a una temperatura de 140°C.

#### **2.2.1.1. Tipo de Ligante Bituminoso (Asfalto)**

**Asfalto.** \_ El betún asfáltico empleado es producido en la refinería de Esmeraldas, y cumple con las siguientes características.

**Tabla 2**  
*Ficha Técnica Asfalto AC-20*

<b>CEMENTO ASFÁLTICO PRO-ROAD AC-20</b>		
CARACTERÍSTICA / PARÁMETRO	AC-20	
	Min.	Max.
Viscosidad absoluta 60°C (P)	1600	2400
Viscosidad cinemática 135°C (cSt)	300	-
Solubilidad en Tricloroetileno %	99	-
Punto de inflamación mediante copa abierta Cleveland °C	232	-
Gravedad Específica a 25°C/25°C [77°F/77°F]	Reportar	
Índice de Penetración	-1.5	1
Ensayo sobre el residuo, luego de la prueba de acondicionamiento en la película delgada rotatoria. (ASTM D2872)		
Pérdida de masa por calentamiento	-	1
Viscosidad absoluta 60°C (Pa-s)	-	8000
Ductilidad (25°C, 5mm / min) cm	50	-

*Nota:* Tabla obtenida de Construmatica, (2012)

### **2.2.2. Agregados Pétreos**

Las rocas se pueden clasificar en distintas categorías, ya sean ígneas, sedimentarias o metamórficas, en función de los procesos que influyen en su formación. En el caso de las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos, que son partículas de roca, minerales o materia orgánica que se transportan por el agua, el viento o el hielo. Los sedimentos se depositan en las cuencas sedimentarias, que son áreas deprimidas de la superficie terrestre u oceánica. Las rocas sedimentarias son importantes para los seres humanos porque proporcionan recursos naturales como minerales, petróleo y gas natural, Cardona Moncada et al., (2023).

### **2.2.2.1. Tipos de Agregados Pétreos**

De acuerdo con Padilla Rodríguez, (2005) el tipo de petróleo agregado se puede determinar en función de su origen y del método utilizado para su preparación. Se pueden clasificar en los siguientes grupos:

**Agregados Naturales:** Estos agregados provienen de fuentes naturales los cuales son materiales granulares de origen rocoso los cuales tienen una textura redondeada, no presentan adherencia sin haber sufrido ninguna transformación industrial, Figueroa & Navas, (2019).

**Agregados de Trituración:** Se obtiene mediante la trituración de diversas rocas de cantera o de los tamaños rechazados de los agregados naturales. Esta categoría incluye todos los materiales extraídos de canteras que cumplen con las propiedades físicas requeridas, Figueroa & Navas, (2019).

**Agregados Artificiales:** Estos agregados provienen de procesos industriales, como escorias específicas o materiales recuperados de demoliciones, que son aptos para su uso y reciclaje, Figueroa & Navas, (2019).

**Agregados Marginales:** Los agregados marginales abarcan aquellos materiales que no cumplen con las especificaciones actuales, Figueroa & Navas, (2019).

Con base en lo expuesto anteriormente el tipo de material a emplear en este estudio será de origen sedimentario proveniente de las minas de Huascachaca, ubicadas en el cantón Santa Isabel de la provincia del Azuay, Ecuador, se encuentran dentro de la Cordillera Occidental de los Andes, Figura 1. La formación geológica de la zona está compuesta por rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico Superior y Paleógeno, Darquea, (2017).

Cabe indicar que para la presente investigación se utilizaron tamaños específicos de agregados que se muestran a continuación:

Agregado Pétreo 3/4”.

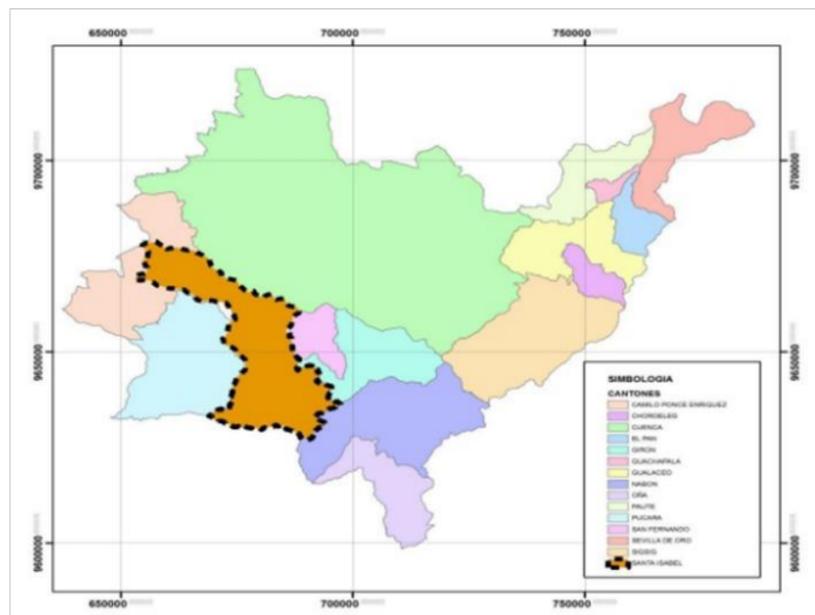
Agregado Pétreo 3/8”.

Arena.

Polvo de Piedra (Filler).

### Figura 1

Mapa de Ubicación del Cantón Santa Isabel



Nota: Fuente: Darquea, (2017).

**2.2.2.2. Agregado Pétreo Empleado.** \_ En el caso del agregado pétreo, se seleccionó el material proveniente de la cuenca alta del río Jubones, en el cantón Santa Isabel de la Provincia del Azuay, más específicamente del sector de Huascachaca, esto debido a que para esta investigación busca estudiar los materiales que cuentan con un alto contenido que provienen de una roca de tipo sedimentario.

### 2.2.3. Ceniza de Cascarilla de arroz (CCA)

Según Alvarado et al., (n.d.) La cascarilla de arroz es un subproducto generado del proceso de molienda del grano de arroz de los campos de cultivo. El estudio del CCA es crucial

debido a su considerable impacto en la contaminación ambiental. Si no se utiliza de manera adecuada, puede generar sustancias tóxicas y perjudiciales como la sílice de cristalina y pesticidas a largo plazo.

### **2.2.3.1. Obtención de la (CCA)**

Una de las agroindustrias más representativas en el Ecuador es el procesamiento de la cascarilla de arroz. Según Alfredo Cedeño-Palacios III et al., (2021) el cultivo de arroz es el cuarto con mayor producción al nivel del Ecuador, de tal manera que al año se cosechan 1.6 millones de toneladas de arroz, generando un 20% de la cascarilla de arroz.

La cascarilla de arroz tiene aproximadamente un 15-20% de ceniza de sílice, por lo que no se aprovechan como alimentación en los animales y por ende son depositados en los botaderos. El alto impacto ambiental que produce la cascarilla de arroz es de interés en múltiples investigaciones, con el objetivo de actuar inmediatamente en lo que refiere a su disposición final, Alfredo Cedeño-Palacios III et al., (2021).

En el Ecuador las zonas destacadas por el cultivo de arroz se las encuentran en Milagro, en la provincia del Guayas, Babahoyo y demás provincias de los Ríos. La cascarilla de arroz es incinerada a una temperatura de 500°C y 700°C para lograr una transformación de material orgánico a inorgánico. Boanerges, (2011).

El proceso de obtención puede realizarse de diferentes maneras, en este caso se utilizó el método de incineración, para después triturlarla en un molino mecánico y finalmente ser tamizada a través de la malla N°200 (0.075mm).

A continuación, en la tabla 3 se dan a conocer las propiedades químicas de la CCA.

**Tabla 3**  
*Propiedades Químicas de la CCA*

ELEMENTO	COMPOSICION %
(K <sub>2</sub> O) Oxido de Potasio	1,1
(Na <sub>2</sub> O) Oxido de Sodio	0,78
(CaO) Oxido de Calcio	0,25
(MgO) Oxido de Magnesio	0,23
(SO <sub>4</sub> ) Oxido de Sulfatos	1,13
(SiO <sub>2</sub> ) Oxido de Sílice	96,51
Total	100

Nota: Tabla obtenida de (Dialnet-AnalisisComparativoDeLasCaracteristicasFisicoquimi-4784298)

### 2.3. Parámetros Generales de los Áridos

El diseño de mezclas asfálticas requiere un conocimiento profundo de las propiedades de los agregados pétreos empleados. Entre estas propiedades, el tamaño y el peso específico son fundamentales. Para determinarlas, se realizan diversos ensayos.

Ensayos:

- ✓ Análisis granulométrico.
- ✓ Peso específico de las partículas sólidas.
- ✓ Absorción de agua.
- ✓ Porcentaje de vacíos.

#### Granulometría de los Áridos

Fundamentalmente la granulometría de los materiales áridos es un parámetro principal dentro de los materiales de construcción, la cual estudia la distribución de los distintos tamaños de partículas de los agregados. Este ensayo es de gran importancia para los distintos proyectos de la ingeniería civil como cimentaciones, carreteras, represas y construcciones en general ASTM C136.

A continuación, se presenta una tabla con los rangos granulométricos adecuados para pavimentos, normados por el Ministerio de transporte y obras públicas.

**Tabla 4**  
*Rangos Granulométricos para Pavimentos*

<i>Abertura Tamiz</i>	<i>Abertura Tamiz en mm</i>	<i>Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada</i>			
		$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	Nº4
1"	25.40	100	-	-	-
$\frac{3}{4}$ "	19.00	90-100	100	-	-
$\frac{1}{2}$ "	12.70	-	90-100	100	-
$\frac{3}{8}$ "	9.50	56-80	-	90-100	100
Nº4	4.75	35-65	44-74	55-85	80-100
Nº8	2.36	23-49	28-58	32-67	65-100
Nº16	1.18	-	-	-	40-80
Nº30	0.60	-	-	-	25-65
Nº50	0.30	5-19	5-21	7-23	7-40
Nº100	0.15	-	-	-	3-20
Nº200	0.08	2-8	2-10	2-10	2-10

*Nota:* Fuente: Norma Ecuatoriana Vial, (2013)

### **Gravedad Específica o Peso Específico de los Agregados**

Según la MTOP la estructura física de los materiales pétreos se define a través de su densidad, porosidad y su capacidad de permitir el paso de aire.

Tanto en materiales pétreos naturales, como las rocas, como en materiales artificiales, como el mortero, el hormigón y el ladrillo, se componen de una mezcla de uno o más minerales. En esta composición, es común que haya espacios vacíos, que se manifiestan como poros y

fisuras. Estos espacios vacíos representan un componente esencial en términos de petrografía en una roca, ya que, en gran medida, tanto su volumen como su distribución influyen en las propiedades, la usabilidad y la resistencia a las alteraciones o la durabilidad, especialmente cuando se emplean con fines ornamentales, Camacho, (2010).

### **Gravedad Específica Seca Bulk**

Relación entre el peso en el aire de un volumen igual en agua destilada y el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado, a una misma temperatura.

Esta excluye todos los poros de agua absorbidos en una muestra. Chamba Fátima & Benavidez Jonathan, (2019).

### **Gravedad Específica Aparente**

“La Gravedad Específica Aparente excluye el agua absorbida de los poros y espacios capilares, que se llenarían al ser saturada en agua la muestra.” Chamba Fátima & Benavidez Jonathan, (2019).

### **Gravedad Específica Efectiva**

“La Gravedad Específica Efectiva excluye el volumen de cemento asfáltico absorbido por los poros y espacios capilares de la muestra. Esta propiedad se la determina mediante los ensayos:” (Chamba Fátima & Benavidez Jonathan, 2019).

Agregado grueso (retenido tamiz N°4): mediante el ensayo “Determinación de Gravedad Específica y Absorción del Agregado (ASTM C 128)”.(Chamba Fátima & Benavidez Jonathan, 2019).

Agregado Fino (pasante tamiz N°4) mediante el ensayo “Determinación de Gravedad Específica y Absorción de los Agregados (ASTM C 128)”.(Chamba Fátima & Benavidez Jonathan, 2019).

#### **2.4. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas**

Existen varias propiedades las cuales contribuyen en una buena calidad de pavimentos de mezcla en caliente. Dentro de las cuales se incluyen la estabilidad, la impermeabilidad, la durabilidad, la flexibilidad, la trabajabilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. Chamba Fátima & Benavidez Jonathan, (2019).

**Estabilidad.** \_ La estabilidad de un pavimento asfáltico se refiere a su aptitud para soportar cargas de tráfico sin sufrir desplazamientos o deformaciones significativas, Bastidas & Ortiz, 2016; Figueroa & Navas, (2019).

**Impermeabilidad.** \_ La impermeabilidad de un pavimento se refiere a su capacidad para prevenir la infiltración de aire y agua en su estructura a través de ella.

**Durabilidad.** \_ La durabilidad de un pavimento se define como su capacidad para mantener su integridad frente a diversos factores, como la descomposición de los agregados, modificaciones en las propiedades del asfalto (tales como la polimerización y oxidación), y la separación de las capas de asfalto, Quito & Ortiz, (2023).

**Flexibilidad.** \_ La flexibilidad de un pavimento asfáltico se refiere a su aptitud para adaptarse a los movimientos y asentamientos gradualmente, sin experimentar grietas, en respuesta a las condiciones de la subrasante, Quito & Ortiz, (2023).

**Trabajabilidad.** \_ La trabajabilidad se define como una propiedad de un material que lo hace fácil manipular.

**Resistencia a la fatiga.** \_ La resistencia a la fatiga de un pavimento se refiere a su capacidad para soportar flexiones repetidas causadas por las cargas del tráfico.

**Resistencia al deslizamiento.** \_ La resistencia al deslizamiento se refiere a la capacidad de una superficie de pavimento para reducir al mínimo el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, especialmente cuando la superficie está mojada, Bastidas & Ortiz, 2016; Figueroa & Navas, (2019).

**Gravedad específica del Asfalto (G<sub>sf</sub>):** La gravedad específica del asfalto es una medida de su densidad relativa al agua. Se define como la relación entre la masa de un volumen de asfalto y la masa del mismo volumen de agua a una temperatura específica, generalmente 25°C. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica (G<sub>sb</sub>):** La gravedad específica Bulk (GSB) de la mezcla asfáltica es una medida de su densidad en términos de masa por unidad de volumen, incluyendo los vacíos entre las partículas. Se calcula como la relación entre la masa de una muestra de la mezcla asfáltica y la masa del mismo volumen de agua a una temperatura específica, generalmente 25°C. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Peso de la probeta seca en el aire W<sub>a</sub>:** es el peso de la muestra después de ser secada en un desecador o en un horno a una temperatura específica. Se utiliza para determinar la cantidad de agua presente en la muestra. Quito & Ortiz, (2023).

**Peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca W<sub>ss</sub>:** El peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca (W<sub>ss</sub>) es una medida utilizada en diversos ensayos de materiales, como los ensayos de suelos y de agregados. Se refiere al peso de la probeta después de haber sido saturada con agua y luego secada superficialmente para eliminar el exceso de agua. Quito & Ortiz, (2023).

**Peso de la probeta en el agua  $W_w$ :** El peso de la probeta en el agua ( $W_w$ ) es una medida utilizada en diversos ensayos de materiales, como los ensayos de suelos y de agregados. Se refiere al peso de la probeta cuando está sumergida en agua. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Gravedad específica Bulk ( $G_{mb}$ ):** La gravedad específica Bulk ( $G_{mb}$ ) es una medida de la densidad de una muestra de material, incluyendo los vacíos entre las partículas. Se calcula como la relación entre la masa seca de la muestra y el volumen total que ocupa, incluyendo los vacíos. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Gravedad específica teórica máxima  $G_{mm}$ :** La gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) es una medida de la densidad máxima que puede alcanzar un material granular, como el asfalto o los agregados pétreos, sin considerar la presencia de vacíos. Se calcula como la relación entre la masa de las partículas sólidas del material y el volumen total que ocupan esas partículas si se compactaran perfectamente sin espacios vacíos. Quito & Ortiz, (2023).

**Gravedad específica efectiva de los agregados ( $G_{se}$ ):** La gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ) de los agregados es una medida de la densidad de las partículas sólidas de los agregados, considerando la absorción de agua por los poros y microfisuras del material. Se calcula como la relación entre la masa seca de las partículas sólidas y el volumen total que ocupan esas partículas después de saturarlas con agua y eliminar el aire atrapado. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Porcentaje en volumen de agregado vs volumen total ( $V_{agre}$ ):** El porcentaje en volumen de agregado vs volumen total ( $V_{agre}$ ) es una medida de la cantidad de agregado que se encuentra en un volumen total de concreto o mortero. Se calcula como la relación entre el volumen de agregado y el volumen total de la mezcla, expresada como un porcentaje. Quito & Ortiz, (2023).

**Porcentaje de vacíos del aire ( $V_v$ ):** El porcentaje de vacíos de aire ( $V_v$ ) es una medida de la cantidad de aire atrapado en una mezcla de concreto o mortero, expresado como un porcentaje del volumen total de la mezcla. Se calcula como la relación entre el volumen de aire atrapado y el volumen total de la mezcla. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Volumen asfalto efectivo ( $V_{ae}$ ):** El volumen asfalto efectivo ( $V_{ae}$ ) es una medida del volumen de asfalto que realmente recubre las partículas de agregado en una mezcla asfáltica, excluyendo el asfalto que se absorbe por los poros del agregado o que se encuentra en los vacíos de la mezcla. Quito & Ortiz, (2023).

**Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ( $V_{AM}$ ):** El porcentaje de vacíos en el agregado mineral ( $V_{AM}$ ) es una medida del espacio vacío entre las partículas de un agregado granular, expresado como un porcentaje del volumen total del material. Se calcula como la relación entre el volumen de los vacíos y el volumen total del agregado. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

**Porcentaje de vacíos llenos de asfalto ( $V_{FA}$ ):** El porcentaje de vacíos llenos de asfalto ( $V_{FA}$ ) es una medida del porcentaje de los vacíos en una mezcla asfáltica que están llenos de asfalto, excluyendo el asfalto absorbido por los poros del agregado. Se calcula como la relación entre el volumen de asfalto que llena los vacíos y el volumen total de vacíos en la mezcla, expresado como un porcentaje. CÓRDOVA & CORNEJO, (2019).

## **2.5. Método empleado para el diseño de mezclas asfálticas**

### ***2.5.1. Método Marshall***

El método Marshall es un procedimiento ampliamente utilizado en ingeniería de pavimentos para diseñar mezclas asfálticas. Fue desarrollado por Bruce Marshall en la década de 1930 y es considerado uno de los métodos de diseño de mezclas asfálticas más tradicionales y establecidos.

En el proceso de diseño según el método Marshall, se seleccionan los agregados pétreos y se establece una proporción adecuada con el asfalto. Luego, se compacta con una muestra de la mezcla en una prensa Marshall bajo condiciones controladas de temperatura y compactación. Se mide la densidad máxima y se determina la estabilidad y flujo de la muestra compactada. Anguas et al., (2004).

El objetivo es encontrar una combinación de asfalto y agregados que proporciona la máxima densidad y estabilidad de la mezcla, lo que garantiza la resistencia a la deformación y la durabilidad del pavimento.

En la figura 2, se pueden observar los cilindros ocupados para la formación de cada briqueta con la mezcla asfáltica lista.

**Figura 2.**  
*Moldes de Briquetas*



*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 3, se puede observar el equipo Marshall, ayudando con la obtención de varios parámetros del asfalto como estabilidad y flujo.

**Figura 3.**  
*Maquinaria Marshall*



*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 4, se puede observar el equipo de Baño María, ayudando a que las briquetas consigan la temperatura adecuada.

**Figura 4.**  
*Equipo para Baño María*



*Nota:* Fuente: Autores

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

Para poder alcanzar los objetivos planteados, es necesario lograr diferentes resultados de ensayos obtenidos en el laboratorio con sus respectivos procedimientos y cálculos. Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) las pruebas realizadas se abordarán tanto a los materiales pétreos como las muestras de las diferentes proporciones de asfalto (4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%).

Después de realizar los primeros ensayos como son la granulometría y el peso específico de cada agregado, se proceden a elaborar las muestras de las briquetas sin CCA para hallar el porcentaje óptimo de asfalto; con el porcentaje óptimo de asfalto se reemplaza el mineral “Filler” por la CCA con sus respectivas proporciones (20%, 40%, 60%, 80% y 100%). Se utilizará el libro “Ensayos para pavimentos, guía para la ejecución e interpretación de resultados” del Ingeniero Fernando Sánchez Sabogal.

Finalmente, con el proceso ya realizado y los resultados obtenidos, se facilitará una serie de datos que ayuden y determinen el comportamiento de las mezclas asfálticas reemplazando el mineral “Filler” por la CCA.

### **3.1. Caracterización de los agregados**

#### ***3.1.1. Granulometría de los agregados***

Según la MTO bajo la normativa NTE INEN 003:2014 se determinó las granulometrías de los diferentes tipos de materiales para saber cómo es el comportamiento de cada uno como es: el peso retenido, el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa, entre otros. Las Granulometrías y curvas granulométricas mostradas en las tablas 7, 8, 9, 10 y 11.

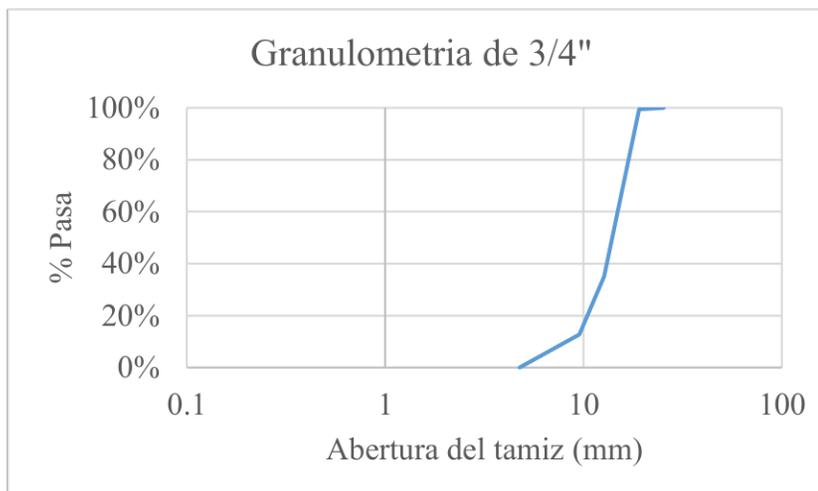
**Tabla 5**  
*Granulometría de 3/4"*

<b>Granulometría de 3/4"</b>					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)	Peso retenido Acumulado (gramos)	% Retenido	% Pasa
3"	76,2				
2 1/2"	63,5				
2"	50,8				
1 1/2"	38,1				
1"	25,4			0,00%	100,00%
3/4"	19,1	62	62	0,52%	99,48%
1/2"	12,7	7709	7771	64,84%	35,16%
3/8"	9,52	2688	10459	87,27%	12,73%
N°4	4,76	1526	11985	100,00%	0,00%
Fondo		15			
Total		11985			

*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 5 se muestra la curva granulométrica del material 3/4" obtenido con los valores de la tabla 7.

**Figura 5**  
Curva granulométrica del material 3/4"



Nota: Fuente: Autores

**Tabla 6**  
Granulometría de 3/8"

**Granulometría de 3/8"**

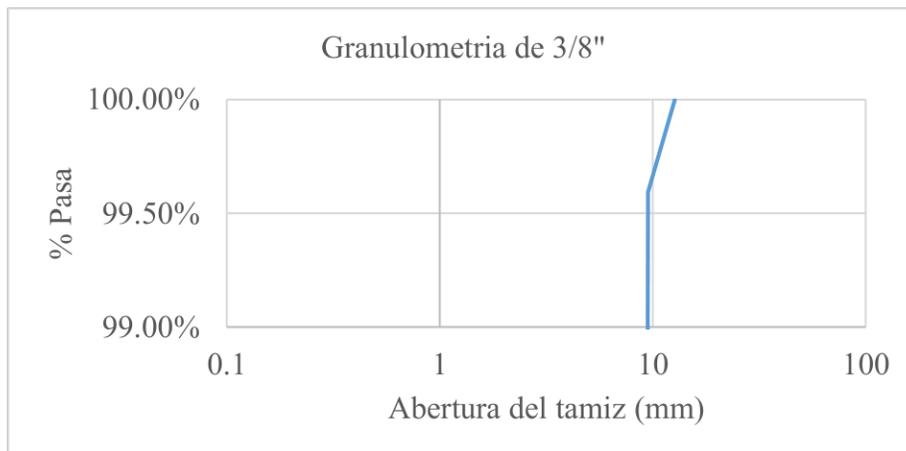
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)	Peso retenido Acumulado (gramos)	% Retenido	% Pasa
3"	76,2				
2 1/2"	63,5				
2"	50,8				
1 1/2"	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7			0,00%	100,00%
3/8"	9,52	47	47	0,41%	99,594%
Nº4	4,76	11533,5	11580,5	100,00%	0,000%
Fondo		403,5			
Total		11580,5			

Nota: Fuente: Autores

En la figura 6 se muestra la curva granulométrica del material 3/8" obtenido con los valores de la tabla 8.

**Figura 6.**

*Curva granulométrica del material 3/8"*



*Nota:* Fuente: Autores

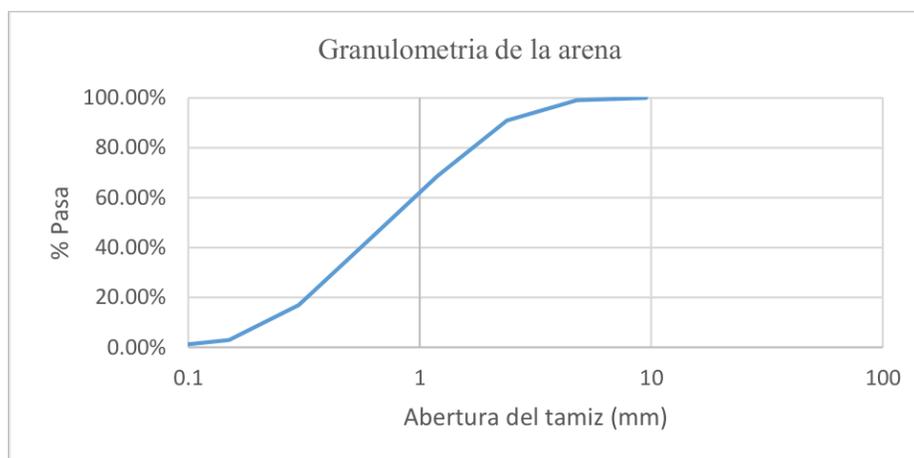
**Tabla 7**  
*Granulometría de la Arena*

<b>Granulometría de la Arena</b>					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)	Peso retenido Acumulado (gramos)	% Retenido	% Pasa
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52			0,00%	100,00%
N°4	4,76	5,2	5,2	0,88%	99,12%
N°8	2,38	49	54,2	9,13%	90,87%
N°16	1,19	132,3	186,5	31,41%	68,59%
N°30	0,58	159,7	346,2	58,30%	41,70%
N°50	0,3	147,2	493,4	83,09%	16,91%
N°100	0,15	82,6	576	97,00%	3,00%
N°200	0,075	17,8	593,8	100,00%	0,00%
	Fondo	5,3			
	Total	593,8			

*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 7 se muestra la curva granulométrica de la arena obtenido con los valores de la tabla 9.

**Figura 7.**  
*Curva granulométrica de la Arena*



*Nota:* Fuente: Autores

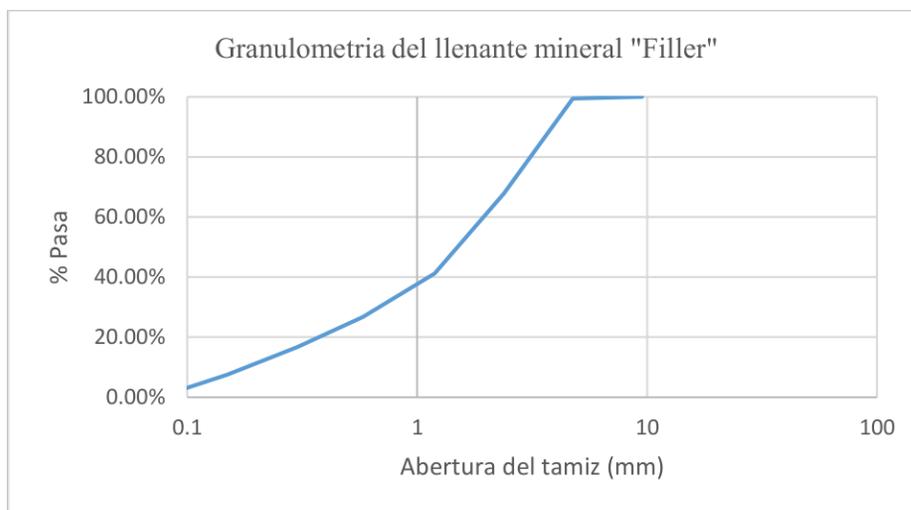
**Tabla 8**  
*Granulometría de la llenante mineral Filler*

Granulometría de la llenante mineral "Filler"					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)	Peso retenido Acumulado (gramos)	% Retenido	% Pasa
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52			0,00%	100,00%
N°4	4,76	3,4	3,4	0,61%	99,39%
N°8	2,38	175,6	179	32,16%	67,84%
N°16	1,19	148,3	327,3	58,80%	41,20%
N°30	0,58	80,6	407,9	73,28%	26,72%
N°50	0,3	56	463,9	83,35%	16,65%
N°100	0,15	50,8	514,7	92,47%	7,53%
N°200	0,075	41,9	556,6	100,00%	0,00%
Fondo		41,7			
Total		556,6			

*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 8 se muestra la curva granulométrica del llenante mineral filler obtenido con los valores de la tabla 10.

**Figura 8.**  
*Curva granulométrica del llenante mineral Filler*



*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 9**  
*Granulometría del CCA*

<b>Granulometría del CCA</b>					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)	Peso retenido Acumulado (gramos)	% Retenido	% Pasa
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52				
N°4	4,76				
N°8	2,38				
N°16	1,19				
N°30	0,58				
N°50	0,3				
N°100	0,15				
N°200	0,075	0	0	0%	100%
	Fondo	600			
	Total	0			

*Nota:* Fuente: Autores

### **3.1.2. Peso específico del agregado**

Después de realizar la granulometría de cada material, se determina el peso específico de los agregados según ASTM C127-22, cuyo propósito en la ingeniería civil es describir la densidad de los materiales pétreos para diseñar mezclas de concreto y asfalto cumpliendo con los requisitos y obteniendo las propiedades deseadas. A continuación, se presentan el peso específico del material 3/8", 3/4", arena y llenante mineral Filler:

**Tabla 10**  
*Peso específico para el material de 3/8"*

<b>Peso específico para el material de 3/8"</b>	
Peso Específico Seco	2,570
Peso Específico Saturado Superficialmente Seco	2,631
Peso Específico Aparente	2,805

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 11***Peso específico para el material de 3/4"*

<b>Peso específico para el material de 3/4</b>	
Peso Específico Seco	2,527
Peso Específico Saturado	2,599
Superficialmente Seco	
Peso Específico Aparente	2,804

*Nota:* Fuente: Autores**Tabla 12***Peso específico para el material de Arena*

<b>Peso específico para el material de Arena</b>	
Peso Específico Seco	2,388
Peso Específico Saturado	2,488
Superficialmente Seco	
Peso Específico Aparente	2,762

*Nota:* Fuente: Autores**Tabla 13***Peso específico para el mineral Filler*

<b>Peso específico para el mineral "Filler"</b>	
Peso Específico Seco	2,488
Peso Específico Saturado	2,571
Superficialmente Seco	
Peso Específico Aparente	2,801

*Nota:* Fuente: Autores

### 3.1.3. Curva de Fuller

La curva de Fuller, también conocida como curva granulométrica ideal, es una herramienta gráfica que se utiliza para evaluar la distribución del tamaño de las partículas en un material granular, como los agregados utilizados en la construcción de pavimentos.

Para encontrar la curva de Fuller para cualquier tamaño máximo de agregado, se usa la fórmula 1:

Formula 1: Curva de Fuller

$$p = 100 * \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

p= porcentaje que pasa por cada tamiz.

d= abertura (diámetro) de cada tamiz.

D= tamaño máximo (diámetro) del árido.

Este método también denominado ajuste por tanteos sucesivos, consiste en la obtención de porcentajes iniciales y con ellos obtener la mezcla del árido, la cual se compara con la curva óptima a la que desea ajustar.

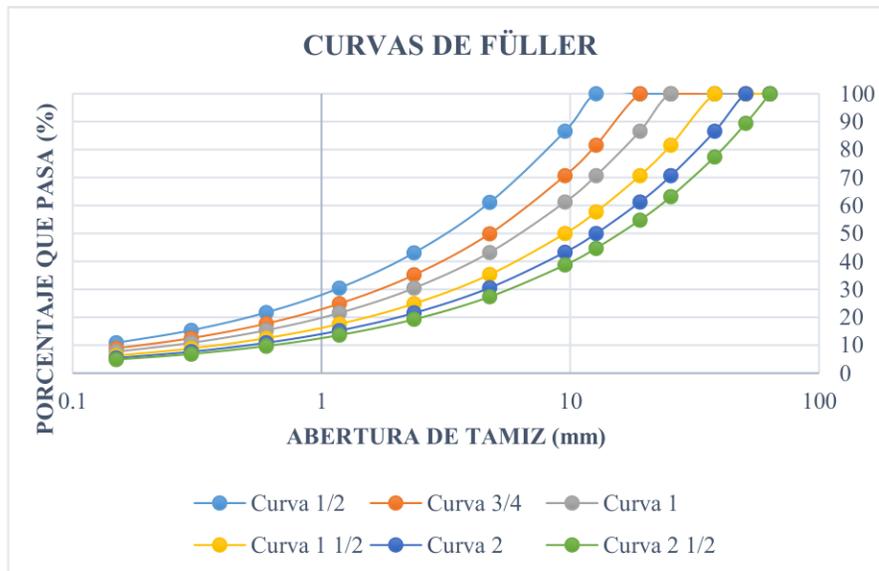
A continuación, en la tabla 16 se presenta la curva de Fuller creadas a partir de la Fórmula 1, para los distintos tamaños máximos.

**Tabla 14**  
*Análisis Curva de Fuller*

CURVA DE FULLER								
mm	d pulg	D (TAMAÑO MÁXIMO)						
		1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	
		<b>12.7</b>	<b>19.05</b>	<b>25.4</b>	<b>38.1</b>	<b>50.8</b>	<b>63.5</b>	
63.5	2 1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
50.8	2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	89.44
38.1	1 1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	86.60	77.46
25.4	1"	100.00	100.00	100.00	81.65	70.71	63.25	63.25
19.05	3/4"	100.00	100.00	86.60	70.71	61.24	54.77	54.77
12.7	1/2"	100.00	81.65	70.71	57.74	50.00	44.72	44.72
9.525	3/8"	86.60	70.71	61.24	50.00	43.30	38.73	38.73
4.75	N°4	61.16	49.93	43.24	35.31	30.58	27.35	27.35
2.36	N°8	43.11	35.20	30.48	24.89	21.55	19.28	19.28
1.18	N°16	30.48	24.89	21.55	17.60	15.24	13.63	13.63
0.6	N°30	21.74	17.75	15.37	12.55	10.87	9.72	9.72
0.3	N°50	15.37	12.55	10.87	8.87	7.68	6.87	6.87
0.15	N°100	10.87	8.87	7.68	6.27	5.43	4.86	4.86
0.075	N°200	7.68	6.27	5.43	4.44	3.84	3.44	3.44

*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 9.**  
*Curvas de Fuller*

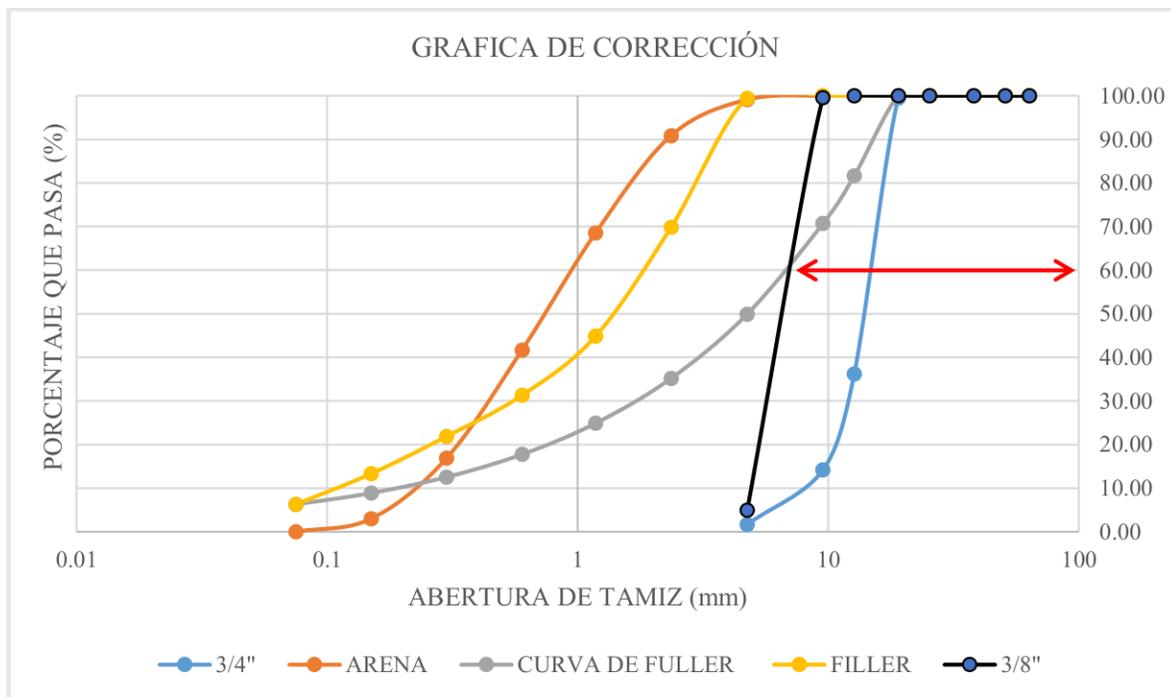


*Nota:* Fuente: Autores

Una vez se obtiene la curva de Fuller del agregado  $\frac{3}{4}$ " que corresponde al mayor tamaño empleado en el diseño de asfalto, se procede a analizar las curvas granulométricas de cada agregado ( $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", Arena, Filler) trazando líneas rectas entre el límite superior de agregado más fino con el límite inferior del agregado más grueso respectivamente.

En el punto de intersección de las líneas con la curva de Fuller, se proyecta una recta perpendicular al eje "Y", en donde se obtienen los porcentajes de los distintos materiales que formaran parte de la mezcla asfáltica, figura 10.

**Figura 10.**  
*Curvas de Corrección*



*Nota:* Fuente: Autores

Luego de ejecutar el procedimiento gráfico para la determinación de los materiales que van a formar parte de la mezcla asfáltica, en la tabla 17 presentamos los porcentajes de gravas, arenas y filler.

**Tabla 15**  
*Porcentajes de Corrección del Material*

<b>% de Corrección</b>	
%3/4	0.2
%3/8	0.25
%Filler	0.08
%Arena	0.47
	1

*Nota:* Fuente: Autores

A continuación, en la tabla 18 se procede a calcular cual es la cantidad optima de cada agregado para ajustar la curva granulométrica a la curva de Fuller.

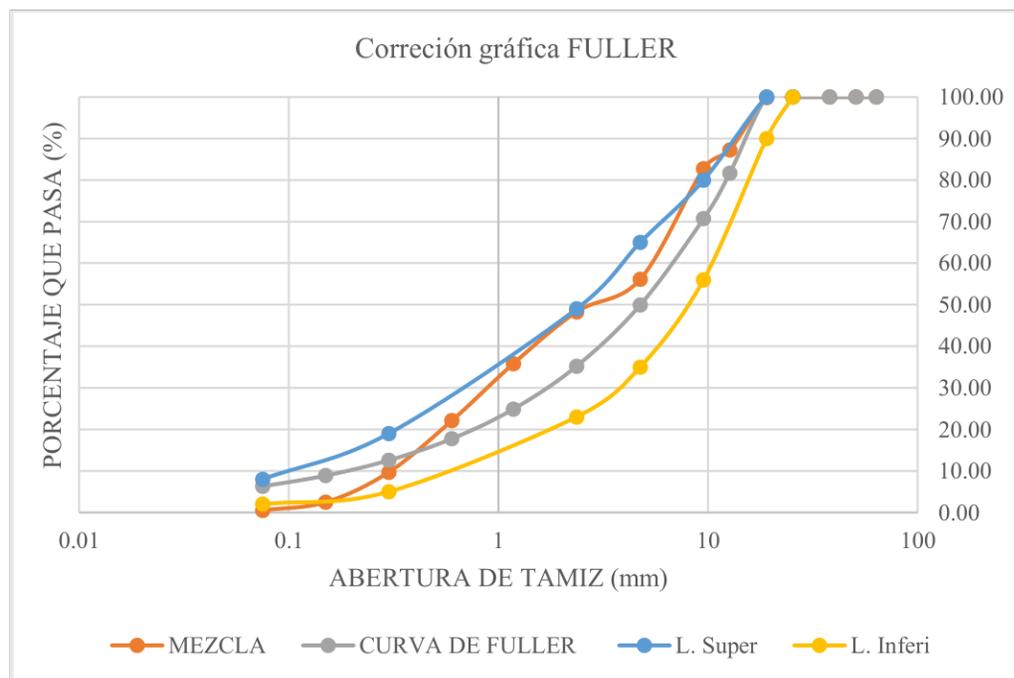
**Tabla 16***Valores de Agregados Corregidos*

<b>TAMIZ</b>		<b>3/4"</b>	<b>3/8"</b>	<b>Arena</b>	<b>Filler</b>	<b>CORRECCIÓN</b>	<b>%</b>	<b>%RETEN.</b>	<b>3/4</b>	
<b>mm</b>	<b>pulg</b>	<b>% PASA</b>	<b>% PASA</b>	<b>% PASA</b>	<b>% PASA</b>				<b>RETEN. ACUM</b>	<b>LIMITE SUPERIOR</b>
63,5	2 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00		
50,8	2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00		
38,1	1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00		
25,4	1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	100	100
19,05	3/4"	99,49	100,00	100,00	100,00	99,90	0,10	0,10	100	90
12,7	1/2"	36,25	100,00	100,00	100,00	87,25	12,75	12,65		
9,525	3/8"	14,19	99,61	100,00	100,00	82,74	17,26	4,51	80	56
4,75	N°4	1,67	4,99	99,12	99,43	56,13	43,87	26,62	65	35
2,36	N°8	0	0	90,87	69,86	48,30	51,70	7,83	49	23
1,18	N°16	0	0	68,59	44,88	35,83	64,17	12,47		
0,6	N°30	0	0	41,70	31,31	22,10	77,90	13,73		
0,3	N°50	0	0	16,91	21,88	9,70	90,30	12,41	19	5
0,15	N°100	0	0	3,00	13,32	2,47	97,53	7,22		
0,075	N°200	0	0	0,00	6,26	0,50	99,50	1,97	8	2

*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 11 se presenta la combinación de las proporciones de los materiales y se encuentran conjuntamente dibujados con la curva de Fuller y las curvas de los límites máximos y mínimos obtenidos de la normativa MTOP que fueron presentados anteriormente en la figura 4. El objetivo de esta grafica es que la curva de mezcla o combinación de los agregados se superponga a la curva de Fuller, siendo esta situación de difícil cumplimiento, pero se garantiza que la misma este al menos dentro de los limites mencionados anteriormente.

**Figura 11.**  
*Curvas de Comparación*



*Nota:* Fuente: Autores

En caso de que el primer tanteo no exista un adecuado ajuste, se irá modificando la tabla de porcentaje de corrección hasta que las gráficas se superpongan.

### Contenido de Asfalto

Una vez obtenidos los porcentajes de los materiales a través del método de Fuller, se procede al cálculo del porcentaje de contenido de asfalto por medio de la siguiente fórmula 2, Quito & Ortiz, (2023).

Formula 2: Porcentaje de asfalto en peso

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

Donde:

P= % del Asfalto en peso.

M= coeficiente del tráfico (3.75-4.25).

S= superficie específica de los áridos.

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f$$

Donde:

G= % material retenido en el T. 3/8”.

g= % material que pasa T. 3/8” y retiene en el T. N °4.

A= % material que pasa T. N °4 y retiene en el T. N °50.

a= % material que pasa T. N °50 y retiene en el T. N °200.

f= % material que pasa T. N °200.

Con lo que se obtiene un p de 5%.

$$S = 0.17 * 0.22 + 0.33 * 0.23 + 2.30 * 0.45 + 12 * 0.09 + 135 * 0.01$$

$$S = 3.55$$

El valor expresado anteriormente da a conocer el posible punto de partida del uso de porcentaje de asfalto.

### Cantidad de Materiales

A continuación, se presenta la tabla 18 con cada una de las cantidades necesarias para la conformación de un asfalto con los distintos porcentajes que se ajuste a la curva de Fuller.

Por otro lado, en la tabla 19 se presentan los pesos óptimos con el porcentaje de asfalto de 6% y 6.5%.

**Tabla 17**

*Pesos Óptimos y cantidades de material para la Mezcla Asfáltica*

CANTIDADES DE MATERIAL					
PESO POR BRIQUETA		1200 g			
% Asfalto	Peso Asfalto (g)	Peso 3/4 (g)	Peso 3/8 (g)	Peso Filler (g)	Arena (g)
4,5	54	229,20	286,50	91,68	538,62
5	60	228,00	285,00	91,20	535,80
5,5	66	226,80	283,50	90,72	532,98
6	72	225,60	282,00	90,24	530,16
6,5	78	224,40	280,50	89,76	527,34

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 18**

*Pesos Óptimos para la Mezcla Asfáltica*

Total		1200g		1200g	
Total- Asfalto		1128		1122	
% de Asfalto		6%		6.50%	
Unidades		g	%	g	%
%Asfalto		72.0	6.0	78.0	6.5
%3/4	0.2	225.60	18.8	224.4	18.7
%3/8	0.25	282	23.5	280.5	23.375
%Filler	0.08	90.24	7.52	89.76	7.48
%Arena	0.47	530.16	44.18	527.34	43.945

*Nota:* Fuente: Autores

### 3.1.3. Elaboración de briquetas

Según lo determina la normativa ASTM D1559 aplicada para un tráfico medio, la cual sirve para la elaboración de briquetas para el ensayo Marshall, inscrita como “Método de prueba estándar para la resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall”.

Este método necesita de un equipo que tenga un molde de compactación especial de 10.16 cm de diámetro por 6.35 cm de altura y un martillo de compactación con zapata circular de 6.35 cm y 2.22 cm de diámetro. Adicionalmente se requieren unidades de bandejas, tamices, guantes, balanzas, entre otros.

En la figura 12 y 13 se muestran los moldes en los cuales se compactarán los materiales mezclados con asfalto después de alcanzar una temperatura de 180°.

**Figura 12.**  
*Moldes de Briquetas*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 13.**  
*Mezcla Asfáltica*



*Nota:* Fuente: Autores

El método Marshall es eficiente por lo que según la MTOP señala que hay que tener en cuenta los siguientes aspectos, mostrados en las tablas 19 y 20 para un tráfico medio.

En la tabla 20 se utilizará el tipo de mezcla A, que según la MTOP la cataloga de granulometría densa y para pavimentos de alto tránsito, como carreteras y autopistas.

**Tabla 19**  
*Crterios de la MTOP*

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>CRITERIOS MARSHALL</b>								
<b>No. De Golpes/Cara</b>	75		75		50		50	
<b>Estabilidad (libras)</b>	2200	-	1800	-	1200	-	1000	2400
<b>Flujo (pulgada/100)</b>	8	14	8	14	8	16	8	16
<b>Capa de rodadura</b>	3	5	3	5	3	5	3	5
<b>% de vacíos en mezcla</b>								
<b>Capa intermedia</b>	3	8	3	8	3	8	3	8
<b>Capa de Base</b>	3	9	3	9	3	9	3	9
<b>% Vacíos agregados</b>					VER TABLA 405-5.5			
<b>Relación filler/betún</b>	0.8	1.2	0.8	1.2				
<b>%</b>	70	-	70	-				
<b>Capa de rodadura</b>								
<b>Estabilidad retenida luego 7 días en agua</b>								
<b>temperatura ambiente</b>								
<b>Intermedia o base</b>	60	-	60	-				

*Nota:* La figura es tomada de (MPR\_Chimborazo\_Cumanda\_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002)

**Tabla 20**  
*Crterios de la MTOP*

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>VAM. Mínimo (%)</b>
A	16
B	15
C, D	14
E	13

*Nota:* La tabla fue obtenida de (MPR\_Chimborazo\_Cumanda\_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002)

En la figura 14 se muestra el martillo y base de compactación, que una vez colocados los moldes y la mezcla asfáltica, se procede a compactar la mezcla asfáltica con un total de 50 golpes por cada cara de acuerdo a lo indicado en la tabla 19.

**Figura 14.**  
*Martillo y Base de Compactación*



*Nota:* Fuente: Autores

En la figura 15 se muestran las briquetas elaboradas para pasar a un proceso de enfriamiento.

**Figura 15.**  
*Briquetas*



*Nota:* Fuente: Autores

### ***3.1.4. Ensayos de las briquetas elaboradas***

#### **3.1.4.1. Ensayo Bulk**

De acuerdo a las normativas ASTM D1188 Y ASTM D2726, las cuales determinan el peso específico volumétrico en una probeta como la relación entre el volumen total y el peso de la probeta en el aire, incluyendo los espacios vacíos permeables.

**Figura 16.**

*Equipo de flotabilidad para el ensayo Bulk*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 17.**

*Equipo de flotabilidad para el ensayo Bulk*



*Nota:* Fuente: Autores

Para el peso específico Bulk es necesario hacer uso de la siguiente formula:

$$\text{Peso Especifico} = \frac{D}{F - E}$$

Donde:

D= Peso de la muestra seca en el aire

F= Peso en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco (SSS)

E= Peso de la muestra en el agua

#### **3.1.4.2. Ensayo Baño María**

El ensayo de baño maría, también conocido como ensayo de curado por inmersión en agua, es un método utilizado para evaluar la resistencia a la humedad de los pavimentos asfálticos. Se basa en la inmersión de probetas de pavimento en agua a una temperatura constante durante un período de tiempo determinado, Figura 3. Quito & Ortiz, (2023).

#### **3.1.4.3. Ensayo Marshall para Flujo y Estabilidad**

De la misma forma, siguiendo los parámetros de la norma ASTM D1559, inscrita como como “Método de prueba estándar para la resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall”, usada para determinar parámetros de flujo y estabilidad arrojados de manera automática por el equipo Marshall expuestos en la figura 2 y figura 3, además sirve para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto.

#### **Figura 18.**

*Briqueta Ensayada*



*Nota:* Fuente: Autores

#### 3.1.4.4. Método Rice para el peso específico máximo medido

El método desarrollado por James Rice, sirve para determinar el porcentaje de asfalto absorbido por los agregados y además determina el volumen real de vacíos con aire que tendrá la muestra cuando este compactada, el método se rige bajo la norma ASTM D2041.

**Figura 19.**  
*Mezcla Asfáltica*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 20.**  
*Ensayo Rice*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 21.***Muestra después del Ensayo Rice**Nota:* Fuente: Autores

$$\text{Peso Específico} = \frac{A}{A - (E - D)}$$

Donde:

A= Peso de la muestra

E= Peso de la muestra + picnómetro + agua

D= Peso del picnómetro + agua

**3.2. Diseño de la mezcla asfáltica con adición de CCA**

Una vez realizados todos los ensayos oportunos a las briquetas y luego de haber analizado los datos arrojados, se determinó que la mejor mezcla asfáltica es aquella que cuenta con un 6% de asfalto y una combinación de agregados de 55% de materiales finos y 45% de materiales gruesos.

Tras un análisis exhaustivo de la información bibliográfica y de los resultados de las pruebas realizadas en las briquetas, se ha determinado que la alternativa óptima es la sustitución del filler o material de relleno mineral por CCA; con el fin de cumplir los objetivos planteados al inicio de la presente investigación.

### ***3.2.1. Elaboración de briquetas con adición de CCA***

Cabe recalcar que para la elaboración de briquetas con CCA, se utiliza el mismo procedimiento descrito en los numerales 3.1.3 y 3.1.4, con la única variación que se sustituye el Filler por CCA en los siguientes porcentajes 20%, 40%, 60%, 80%, 100%.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Después de seguir la metodología para determinar las diferentes propiedades físicas y mecánicas de las briquetas realizadas con la cascarilla de arroz y sin la misma, se procede a ejecutar un análisis comparativo explicado a continuación:

#### **4.1. Resultados de la mezcla sin CCA**

A continuación, se presenta un resumen con todos los parámetros obtenidos en cada ensayo y con cada porcentaje de asfalto, en la tabla 21 encontramos las dimensiones de cada briqueta y porcentaje de asfalto utilizado, en la tabla 22 se muestran algunos resultados de los ensayos Rice para obtener la gravedad específica y finalmente en la tabla 23 se visualiza la estabilidad y el flujo que son los parámetros que más influyen en las propiedades de las briquetas.

**Tabla 21**  
*Resultados Briquetas Ensayadas*

Briqueta N°	% Asfalto	Gravedad específica del Asfalto (Gasf)	Gravedad específica de la mezcla asfáltica (Gsb)	Diam. (cm)	Altura. (cm)	Vol. (cm)	Wa	Wss	Ww	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)
1				10,2	7,9	645,53	1301,00	1319,00	703,00	2,112
2	4,50	1,01	2,47	10,2	7,2	588,33	1205,50	1222,00	653,00	2,119
3				10,2	7,2	588,33	1197,50	1208,00	653,00	2,158
Promedio										<b>2,129</b>
1				10,25	7,1	585,86	1203,00	1213,00	657,00	2,164
2	5,00	1,01	2,47	10,2	7,1	580,16	1201,50	1215,00	658,00	2,157
3				10,2	7	571,99	1207,00	1215,00	656,00	2,159
Promedio										<b>2,160</b>
1				10,2	7,1	580,16	1195,50	1209,00	659,00	2,174
2	5,50	1,01	2,47	10,2	7	571,99	1203,00	1213,00	655,00	2,156
3				10,2	7,2	588,33	1197,50	1206,00	656,00	2,177
Promedio										<b>2,169</b>
1				10,2	7,1	580,16	1193,10	1201,30	655,00	2,184
2	6,00	1,01	2,47	10,2	7,1	580,16	1194,80	1204,50	652,00	2,163
3				10,2	7	571,99	1211,50	1211,50	662,00	2,205
Promedio										<b>2,184</b>
1				10,2	7	571,99	1201,50	1209,30	651,00	2,152
2	6,50	1,01	2,47	10,2	7,1	580,16	1197,60	1201,50	660,00	2,212
3				10,2	7	571,99	1200,00	1207,80	656,00	2,175
Promedio										<b>2,179</b>

*Nota:* Fuente: Autores

Donde:

Wa: Peso de la probeta seca en el aire

Ww: Peso de la probeta en el agua

Wss: Peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca (SSS).

En la tabla 21, se puede observar que la gravedad específica Bulk es proporcional al porcentaje de asfalto, es decir, mientras mayor sea la cantidad de asfalto, mayor será la densidad de la mezcla asfáltica.

En la tabla 22 se muestran los resultados obtenidos después de realizar el ensayo Rice, el cual consiste en determinar los diferentes pesos efectivos de la mezcla asfáltica sin considerar sus espacios vacíos.

**Tabla 22**  
*Resultados Briquetas Ensayadas*

<b>Masa de la muestra en el aire (g) A</b>	<b>Masa de tazón + agua (g) B</b>	<b>Masa de tazón + agua + MUESTRA (g) C</b>	<b>Gravedad Específica Teórica Máxima "RICE" (Gmm)</b>	<b>Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse)</b>	<b>Gravedad específica teórica máxima para diversos contenidos de asfalto (Gmm)</b>
1397,00	8673,50	9505,50	2,4726	2,3169	2,4705
1399,50	8673,50	9495,00	2,4213	2,2509	2,4187
1394,00	8673,50	9474,00	2,3488	2,1654	2,3456
1390,00	8673,50	9461,00	2,3071	2,1095	2,3033
1400,00	8673,50	9450,00	2,2454	2,0353	2,2409

*Nota:* Fuente: Autores

Analizando la tabla 22 se puede determinar que la Gravedad Especifica del material es inversamente proporcional al porcentaje de asfalto, es decir a mayor cantidad de asfalto existe menos densidad en la mezcla asfáltica sin contar con la presencia de vacíos.

En la tabla 23 se puede observar que mientras más contenido de asfalto exista, la estabilidad y flujo aumentan, es decir, que a mayor cantidad de asfalto mayor será la capacidad de la deformación permanente bajo la acción de una carga.

**Tabla 23**  
*Tabla General de Datos*

PROPIEDADES VOLUMETRICAS					ESTABILIDAD				FLUJO		
Porcentaje en volumen de agregado vs volumen total (Vagre)	Porcentaje de vacíos del aire (Vv)	Volumen de Asfalto Efectivo (Vae)	Porcentaje de vacíos en el Agregado Minera (VAM)	Porcentaje de vacíos llenos con Asfalto (VFA)	Carga Maquina KN	Error de maquina KN	Carga KN	Carga Lb	Carga Corregida Lb	Flujo en (mm)	Flujo (1/100")
82,44%	13,88%	3,68%	17,56%	20,95%	10,34	0,27	10,07	2263,83	1720,51	2,18	9
					8,37	0,3	8,07	1814,21	1469,51	2,05	8
					8,74	0,28	8,46	1901,88	1540,53	2,03	8
								<b>1576,85</b>			<b>8,33333333</b>
83,19%	10,79%	6,02%	16,81%	35,80%	9,23	0,29	8,94	2009,79	1668,13	3,56	14
					8,07	0,34	7,73	1737,77	1442,35	3,24	13
					9,61	0,22	9,39	2110,96	1815,42	3,16	12
								<b>1641,97</b>			<b>13</b>
83,09%	7,66%	9,25%	16,91%	54,71%	10,50	0,23	10,27	2308,79	1916,29	3,89	15
					9,85	0,23	9,62	2162,66	1859,89	3,54	14
					9,14	0,28	8,86	1991,81	1613,36	3,79	15
								<b>1796,52</b>			<b>14,6666667</b>
83,22%	4%	11,44%	16,78%	68,15%	11,74	0,4	11,34	2549,33	2115,95	3,73	15
					11,51	0,26	11,25	2529,10	2099,15	4,07	16
					12,53	0,24	12,29	2762,90	2376,10	3,89	15
								<b>2197,07</b>			<b>15,33333333</b>
82,61%	2,94%	14,45%	17,39%	83,11%	11,34	0,22	11,12	2499,88	2149,89	4,03	16
					14,01	0,22	13,79	3100,12	2573,10	4,11	16
					12,45	0,32	12,13	2726,93	2345,16	4,09	16
								<b>2356,05</b>			<b>16</b>

*Nota:* Fuente: Autores

En la tabla 24 se encontrará un resumen de todos los parámetros obtenidos anteriormente, en las tablas 21, 22 y 23.

**Tabla 24**  
*Tabla Resumen*

<b>% DE ASFALTO</b>	<b>Densidad "BULK"</b>	<b>Vv</b>	<b>VAM</b>	<b>VFA</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Flujo</b>
4,50	2,129	13,88%	17,56%	20,95%	1576,85	8,33333333
5,00	2,160	10,79%	16,81%	35,80%	1641,97	13
5,50	2,169	7,66%	16,91%	54,71%	1796,52	14,66666667
6,00	2,184	4%	16,78%	68,15%	2197,07	15,33333333
6,50	2,179	2,94%	17,39%	83,11%	2356,05	16

*Nota:* Fuente: Autores

Los parámetros obtenidos en la tabla 24 son de gran ayuda para poder clasificar y tener presentes las observaciones que deben cumplir las mezclas asfálticas según la MTOP.

En las tablas 25, 26, 27, 28 y 29 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos mencionados anteriormente para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, los cuales están siendo comparados con las especificaciones dadas por la MTOP; con el fin de conocer el porcentaje óptimo de asfalto a usar.

**Tabla 25**  
*Mezcla Asfáltica con 4.5% de Asfalto AC - 20*

<b>%4,5 de Cemento Asfáltico AC - 20</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	1576,85	No cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	8,33	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	13,88	No cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	17,56	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	20,95	Cumple	No cumple

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 26**  
*Mezcla Asfáltica con 5% de Asfalto AC - 20*

<b>%5 de Cemento Asfáltico AC - 20</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	1641,97	Cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	13	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	10,79	No cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	16,81	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	35,8	Cumple	No cumple

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 27**  
*Mezcla Asfáltica con 5.5% de Asfalto AC - 20*

<b>%5,5 de Cemento Asfáltico AC - 20</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	1796,52	Cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	14,66	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	7,66	No cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	16,91	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	54,71	Cumple	No cumple

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 28**  
Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20

<b>%6 de Cemento Asfáltico AC - 20</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	2197,07	Cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	15,33	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	5	Cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	16,78	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	68,15	Cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 29**  
Mezcla Asfáltica con 6.5% de Asfalto AC - 20

<b>%6,5 de Cemento Asfáltico AC - 20</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	2356,05	No cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	16	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	3	Cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	17,39	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	83,11	No cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores

A través de las comparaciones que se realizan mediante el uso de la normativa MTOP, se puede evidenciar que el porcentaje óptimo de asfalto a usar en el diseño de mezclas es del 6%.

#### **4.2. Resultados de la mezcla con CCA**

Con el porcentaje óptimo de asfalto del 6% que fue obtenido anteriormente, se procede a la confección y evaluación de briquetas con el uso de CCA la cual es reemplaza por la llenante mineral Filler en porcentajes del 20%, 40%, 60%, 80%, 100%.

Gracias a los rangos y parámetros obtenidos de la MTOP se realiza la siguiente comparación:

A continuación, se presenta un resumen con todos los parámetros obtenidos en cada ensayo con cada porcentaje de asfalto y CCA, Tablas 30, 31 y 32.

**Tabla 30.**  
*Resultados briquetas Ensayadas*

Briqueta N°	% Asfalto	Gravedad específica del Asfalto (Gasf)	Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica (Gsb)	Diam. (cm)	Altura. (cm)	Vol. (cm)	Wa	Wss	Ww	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)
1				10.3	7.2	599.92	1200.00	1119.00	628.00	2.444
2	6.00	1.02	2.46	10.25	7.1	585.86	1202.00	1208.00	640.00	2.116
3	(20% CCA)			10.35	7.15	601.56	1192.00	1199.00	623.00	2.069
										<b>2.210</b>
1				10.2	7.35	600.59	1194.50	1200.00	612.00	2.031
2	6.00	1.02	2.46	10.2	7.5	612.85	1196.00	1202.00	596.00	1.974
3	(40% CCA)			10.25	7.5	618.87	1203.50	1208.00	613.00	2.023
										<b>2.009</b>
1				10.2	7.7	629.19	1174.50	1177.00	571.00	1.938
2	6.00	1.02	2.46	10.2	7.8	637.36	1195.50	1196.00	571.00	1.913
3	(60% CCA)			10.2	7.7	629.19	1189.50	1195.00	569.00	1.900
										<b>1.917</b>
1				10.2	7.1	580.16	1084.00	1090.00	490.00	1.807
2	6.00	1.02	2.46	10.25	7.9	651.88	1178.00	1186.00	543.00	1.832
3	(80% CCA)			10.2	7.9	645.53	1146.50	1150.00	527.00	1.840
										<b>1.826</b>
1				10.2	8.1	661.87	1129.00	1133.00	497.00	1.775
2	6.00	1.02	2.46	10.3	8.1	674.92	1157.00	1162.00	512.00	1.780
3	(100% CCA)			10.1	8	640.95	1119.50	1127.00	490.00	1.757
										<b>1.771</b>

*Nota:* Fuente: Autores

En la tabla 30, se puede observar que la gravedad específica Bulk es inversamente proporcional al porcentaje de CCA, es decir, mientras mayor sea la cantidad de CCA, menor será la densidad de la mezcla asfáltica.

En la tabla 31 se muestran los resultados obtenidos después de realizar el ensayo Rice, el cual consiste en determinar los diferentes pesos mostrados en la misma.

**Tabla 31**  
*Resultados Ensayo Bulk*

<b>Masa de la muestra en el aire (g) A</b>	<b>Masa de tazón + agua (g) B</b>	<b>Masa de tazón + agua+MUESTRA (g) C</b>	<b>Gravedad Especifica Teórica Máxima "RICE" (Gmm)</b>	<b>Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse)</b>	<b>Gravedad específica teórica máxima para diversos contenidos de asfalto (Gmm)</b>
1405.00	8673.50	9450.00	2.2355	2.0427	2.2317
1400.00	8673.50	9390.00	2.0483	1.8667	2.0445
1400.00	8673.50	9360.00	1.9622	1.7858	1.9584
1400.00	8673.50	9346.00	1.9244	1.7503	1.9207
1400.00	8673.50	9333.00	1.8906	1.7185	1.8869

*Nota:* Fuente: Autores

Analizando la tabla 31 se puede determinar que la Gravedad Especifica del material es inversamente proporcional al porcentaje de CCA, es decir a mayor cantidad de CCA existe menos densidad en la mezcla asfáltica sin contar con la presencia de vacíos.

**Tabla 32**  
*Tabla Resumen*

PROPIEDADES VOLUMETRICAS					ESTABILIDAD				FLUJO		
Porcenta je en volumen de agregado vs volumen total (Vagre)	Porcenta je de vacíos del aire (Vv)	Volume n de Asfalto Efectiv o (Vae)	Porcenta je de Vacíos en el Agregad o Minera (VAM)	Porcenta je de vacíos llenos con Asfalto (VFA)	Carga Maquin a Kn	Error de maquin a Kn	Carg a Kn	Carga Lb	Carga Corregid a Lb	Flujo en (mm)	Flujo (1/100")
					10.77	0.268	10.50	2360.9 4	2360.94	4.3	17
84.28%	3.10%	14.57%	15.72%	70.5%	14.33	0.375	13.96	3137.2 1	2678.42	4	16
					12.20	0.37	11.83	2659.4 9	2245.54	3.6	14
									<b>2428.30</b>		<b>15.666666 7</b>
					13.62	0.237	13.38	3008.6 2	2423.44	4.54	18
76.63%	1.91%	21.46%	23.37%	91.85%	11.72	0.406	11.31	2543.4 9	1969.91	3.86	15
					8.76	0.42	8.34	1874.9 1	1452.10	3.32	13
									<b>1948.48</b>		<b>15.333333 3</b>
73.11%	2.30%	24.59%	26.89%	91.44%	8.45	0.276	8.17	1837.5 9	1340.70	4.98	20
					9.67	0.343	9.33	2096.7 9	1478.81	4.95	19

					7.59	0.367	7.22	1623.8	1184.72	5.07	20
								0			
									<b>1334.74</b>		<b>19.666666</b>
					4.28	0.29	3.99	896.99	765.81	5.48	22
69.66%	5.10%	25.25%	30.34%	83.21%	6.59	0.224	6.37	1431.1	972.47	6	24
								3			
					6.33	0.222	6.11	1373.1	933.06	5.9	23
								3			
									<b>890.45</b>		<b>23</b>
					6.82	0.232	6.59	1481.0	922.84	6.8	27
								4			
67.54%	6.33%	26.13%	32.46%	80.49%	7.76	0.231	7.53	1692.5	1054.65	5.5	22
								9			
					5.24	0.21	5.03	1130.7	737.47	5.3	21
								9			
									<b>904.98</b>		<b>23.333333</b>
											<b>3</b>

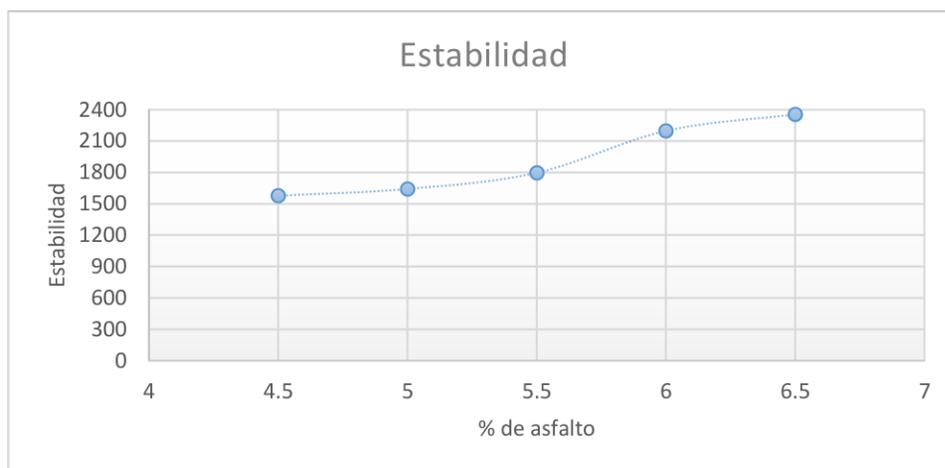
*Nota:* Fuente: Autores

En la tabla 32 se puede observar que mientras a mayor contenido de CCA, la estabilidad y flujo aumentan, es decir, que a mayor cantidad de CCA mayor será la capacidad de deformación permanente bajo la acción de una carga.

En las figuras 22, 23, 24, 25, 26, se determinó el comportamiento de cada una de las propiedades como lo son, estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos con asfalto incluido, porcentaje de vacíos con agregado mineral y porcentaje de vacíos con aire frente a los diferentes porcentajes de asfalto utilizados sin CCA.

**Figura 22**

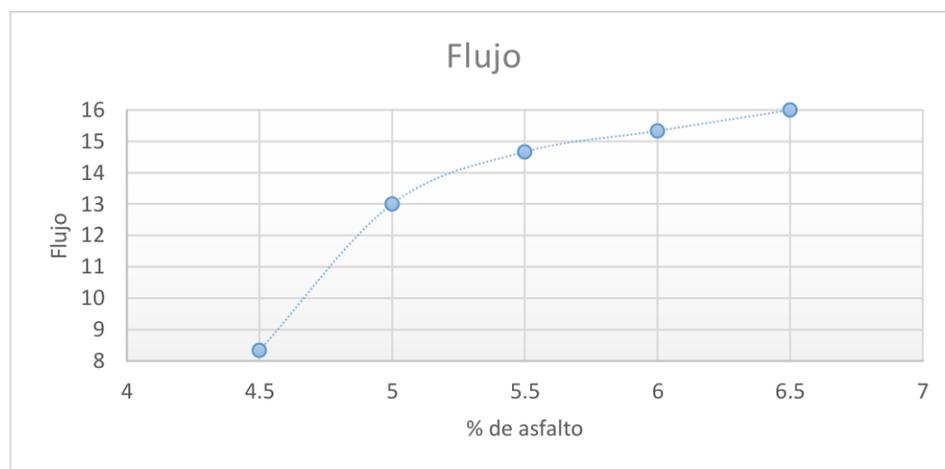
*Resultados de Estabilidad vs Porcentajes de Asfalto*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 23**

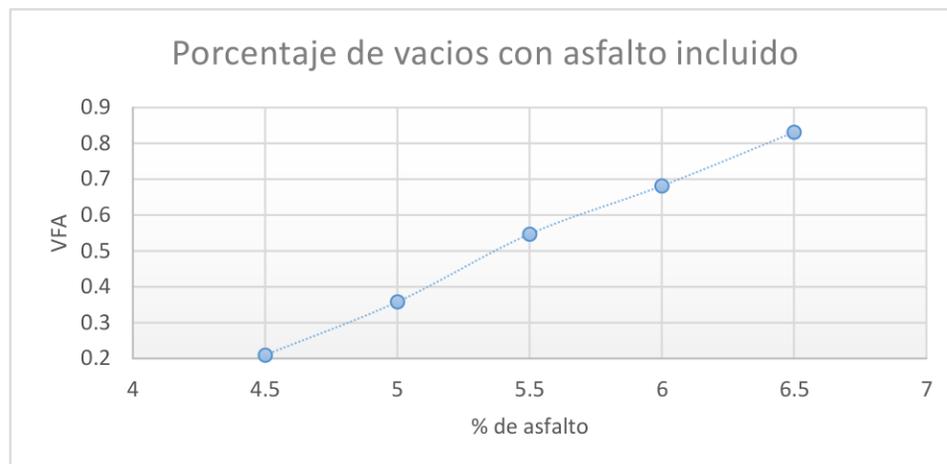
*Resultados de Flujo vs Porcentajes de Asfalto*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 24**

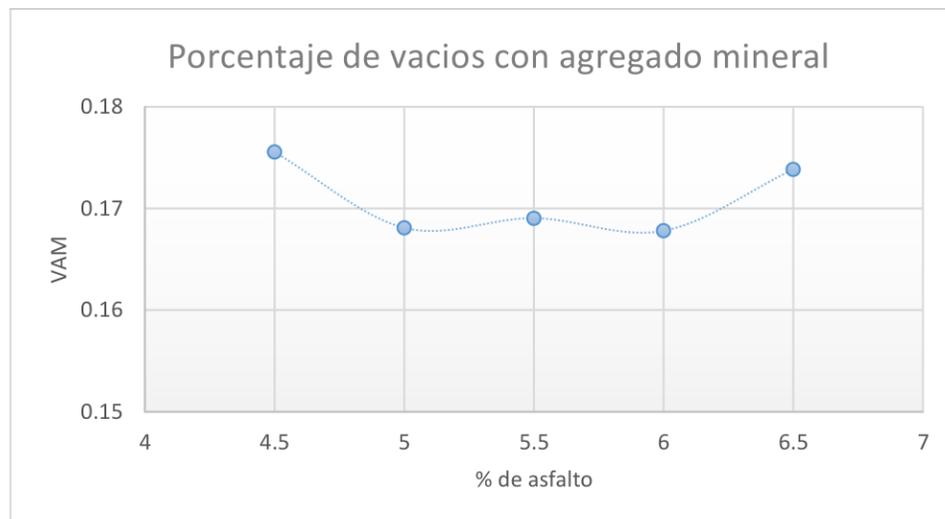
*Resultados de Porcentaje de vacíos con asfalto incluido vs Porcentajes de Asfalto*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 25**

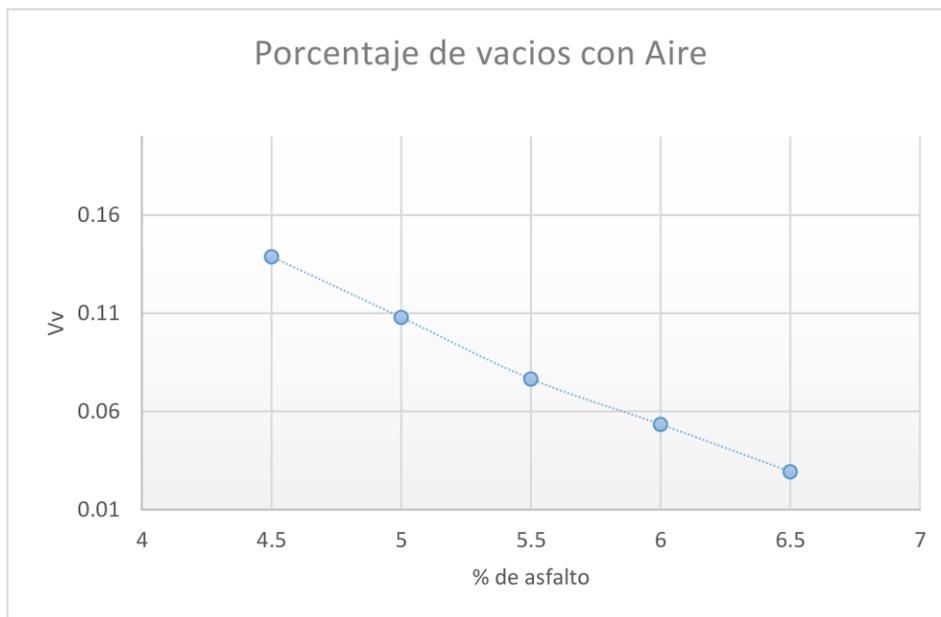
*Resultados de Porcentaje de vacíos con agregado mineral vs Porcentajes de Asfalto*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 26**

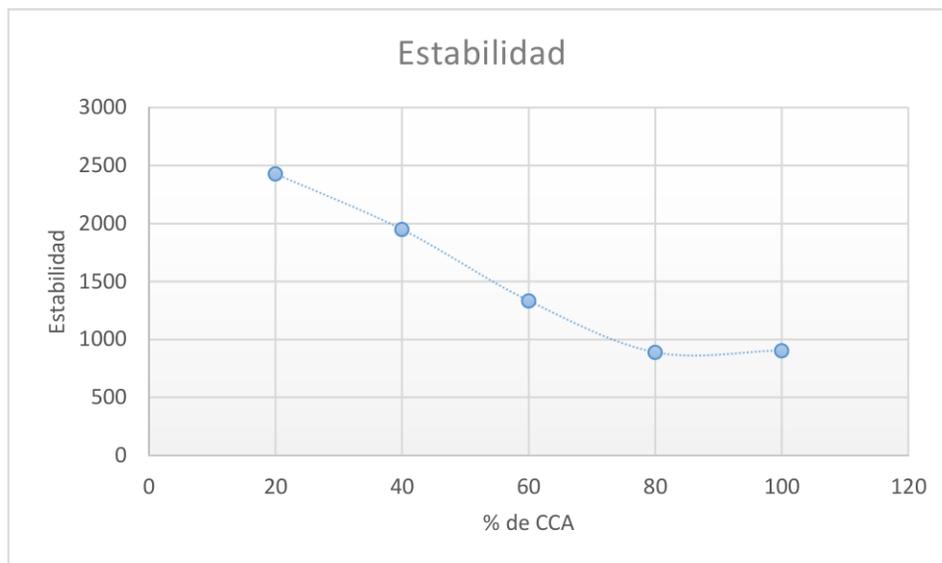
*Resultados de Porcentaje de vacíos con aire vs Porcentajes de Asfalto*



*Nota:* Fuente: Autores

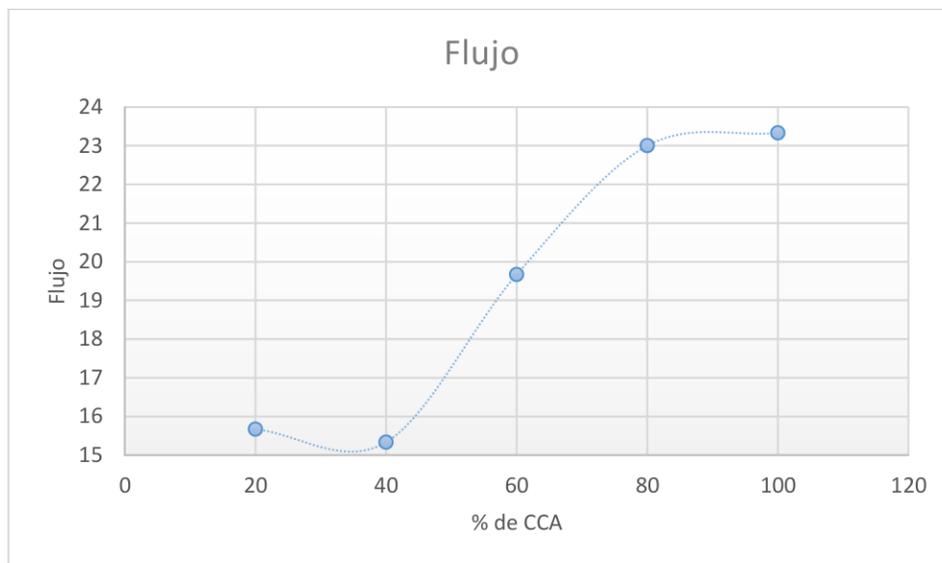
Por otro lado, en las figuras 27, 28, 29, 30 y 31 se determinan de igual manera las propiedades señaladas anteriormente con la excepción que ahora se encuentran frente a los diferentes porcentajes de CCA.

**Figura 27**  
*Resultados de Estabilidad vs Porcentaje de CCA*



*Nota:* Fuente: Autores

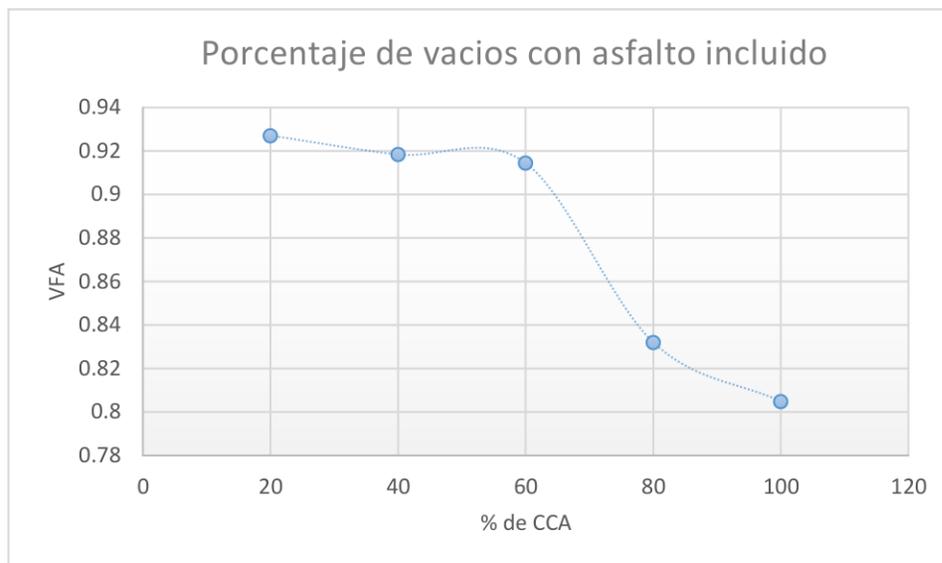
**Figura 28**  
*Resultados de Flujo vs Porcentaje de CCA*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 29**

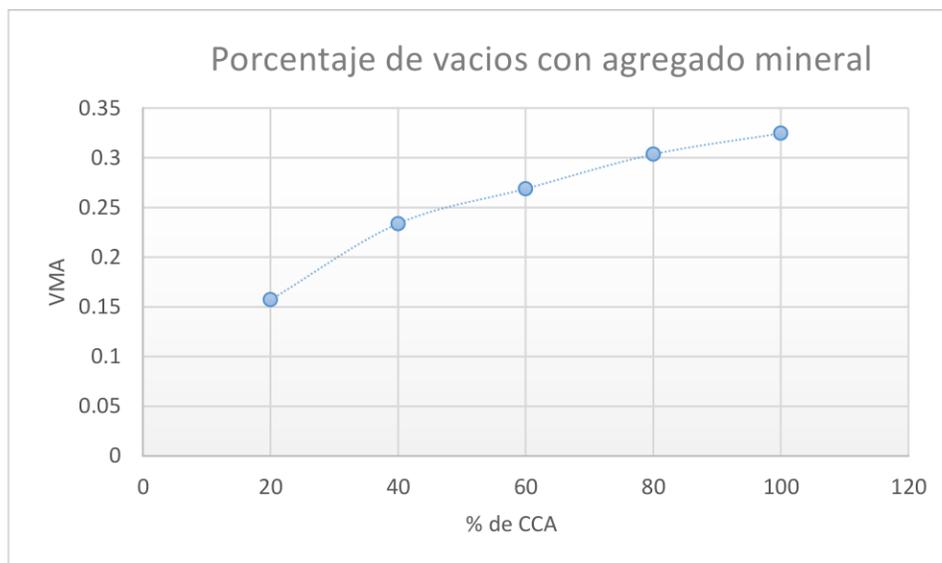
*Resultados de Porcentaje de vacíos con asfalto incluido vs Porcentaje de CCA*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 30**

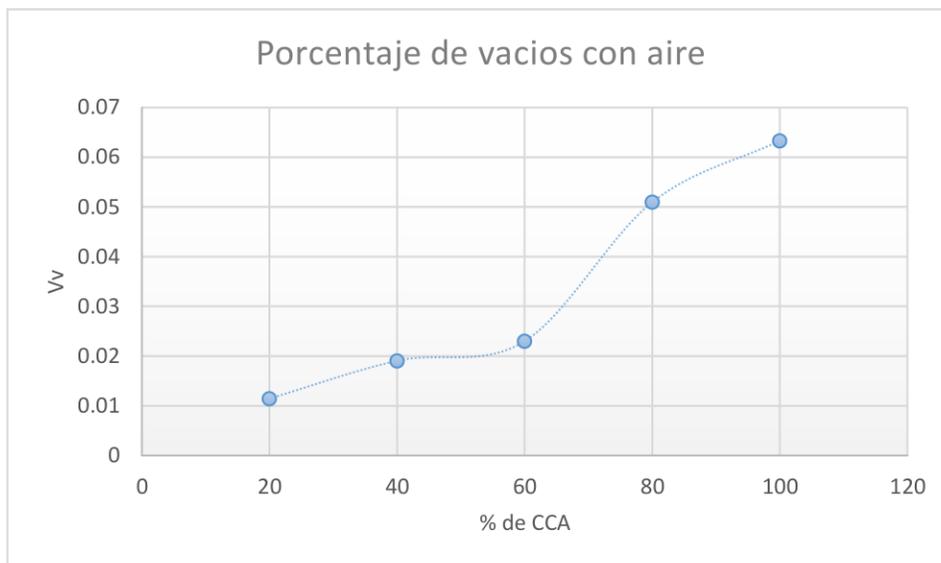
*Resultados de Porcentaje de vacíos con agregado mineral vs Porcentaje de CCA*



*Nota:* Fuente: Autores

**Figura 31**

*Resultados de Porcentaje de vacíos con aire vs Porcentaje de CCA*



*Nota:* Fuente: Autores

Una vez realizada la tabulación y obtenidos los parámetros se puede notar que al reemplazar con un 20% de CCA los parámetros impuestos por la MTOP si se cumplen lo que da a entender que utilizando CCA en reemplazo de la llenante mineral Filler, mejoraron las propiedades y se cumplieron los requisitos correspondientes.

En las tablas 33, 34, 35, 36 y 37 se muestran que porcentaje de CCA adicionando Cemento Asfáltico cumple con las especificaciones dadas por la MTOP.

**Tabla 33***Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 20% de CCA*

<b>%6 de Cemento Asfáltico AC - 20 con 20% de CCA</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	2428.3	Cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	15.66	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	3.1	Cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	15.72	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	70.5	Cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores**Tabla 34***Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 40% de CCA*

<b>%6 de Cemento Asfáltico AC - 20 con 40% de CCA</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	1948.48	Cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	15.33	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	1.91	Cumple	No cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	23.37	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	91.85	No cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 35***Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 60% de CCA*

<b>%6 de Cemento Asfáltico AC - 20 con 60% de CCA</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	1334.74	Cumple	Cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	19.66	No cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	2.3	Cumple	No cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	26.89	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	91.44	No cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores**Tabla 36***Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 80% de CCA*

<b>%6 de Cemento Asfáltico AC - 20 con 80% de CCA</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	890.45	Cumple	No cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	23	No cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	5.1	No cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	30.34	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	83.21	No cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores

**Tabla 37***Mezcla Asfáltica con 6% de Asfalto AC - 20 y 100% de CCA*

<b>%6 de Cemento Asfáltico AC - 20 con 100% de CCA</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Lectura de datos</b>	<b>Observaciones (Max)</b>	<b>Observaciones (Min)</b>
<b>Estabilidad (kN)</b>	1200 lb (min)	904.98	No cumple	No cumple
<b>Flujo (mm)</b>	8 - 16 (pulg/100)	23.33	No cumple	Cumple
<b>% Vacíos con aire</b>	3 - 5 %	6	No cumple	Cumple
<b>% de vacíos en el agregado mineral (Vam)</b>	13 % min	32.46	Cumple	Cumple
<b>% Vacíos llenos de asfalto (Vfa)</b>	65 - 75 %	80.49	No cumple	Cumple

*Nota:* Fuente: Autores

#### **4.3. Análisis del 20% de CCA obtenido - % que cumple todos los parámetros**

Análisis de resultados de los diferentes parámetros impuestos por la MTOP con los porcentajes óptimos de CCA y Cemento Asfáltico, mostrados en las Figuras 32, 33, 34, 35 y 36.

##### **4.3.1. Estabilidad**

La estabilidad es uno de los parámetros más importantes, ya que, se enfoca directamente en la durabilidad y el rendimiento en las carreteras de pavimentos. Los ensayos de laboratorio que ayudaron a obtener los resultados, permiten dar a conocer que sin CCA se obtuvo un valor de 2197.07lb, por otro lado, al aplicar el 20% de CCA tenemos valores de 2428.3lb aumentando la capacidad de las propiedades.

**Figura 32**  
*Resultados de Estabilidad*

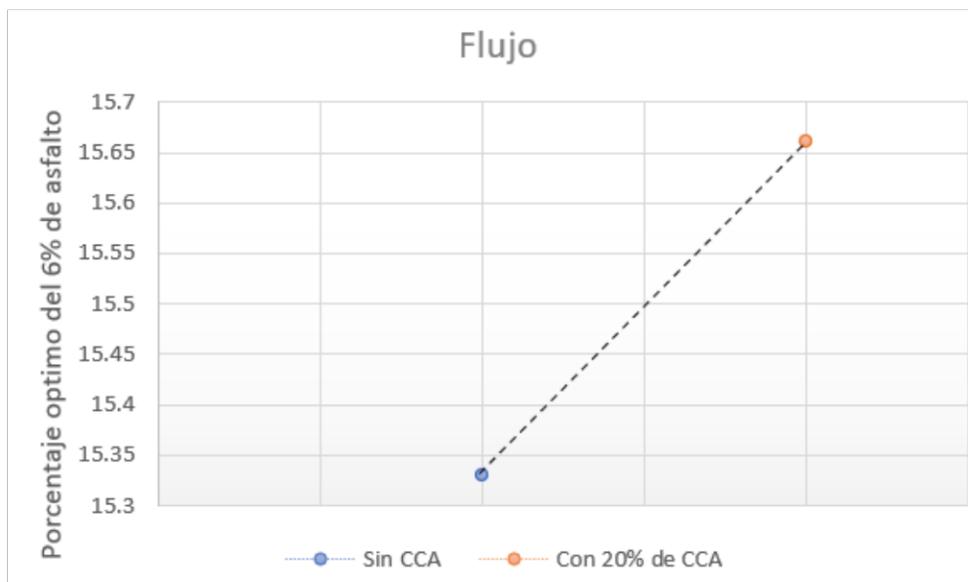


*Nota:* Fuente: Autores

#### **4.3.2. Flujo**

El flujo al referirse a la capacidad de una mezcla asfáltica para deformarse bajo cargas y altas temperaturas es el parámetro que más cuidado se le debe tener, por eso en la muestra que no tiene CCA se obtuvo un valor de 15.33 in/100, mientras que al reemplazar con 20% de CCA los valores aumentaron, consiguiendo valores de 15.66 in/100.

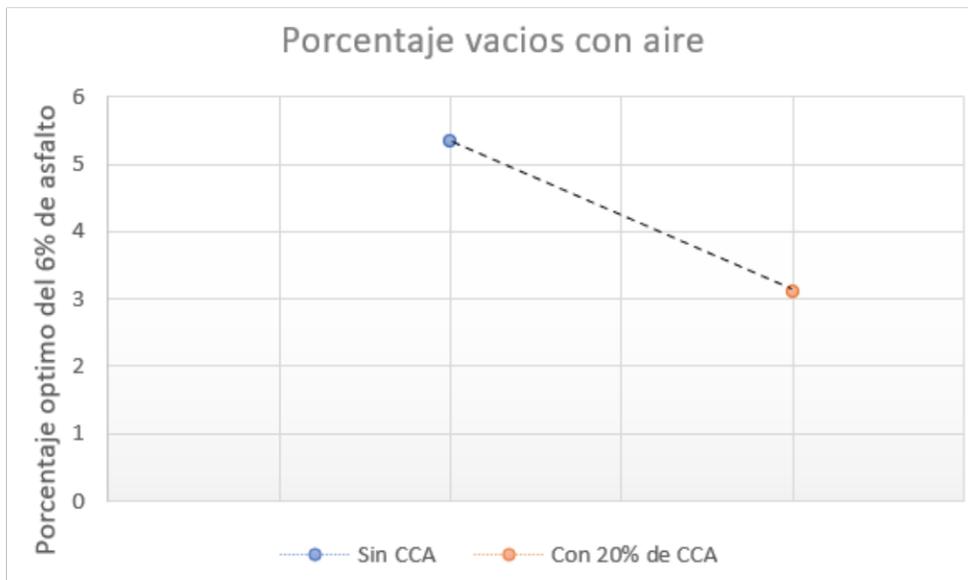
**Figura 33**  
*Resultados de Flujo*



*Nota:* Fuente: Autores

#### **4.3.3. Porcentaje de vacíos con aire**

El porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas, a menudo referido como la porosidad, es un parámetro importante para evaluar la calidad y el rendimiento en una mezcla asfáltica y los valores son los siguientes 5.34% sin CCA, 3.1% con 20 % de CCA y 6% de asfalto óptimo.

**Figura 34***Resultados de Porcentajes de vacíos con aire*

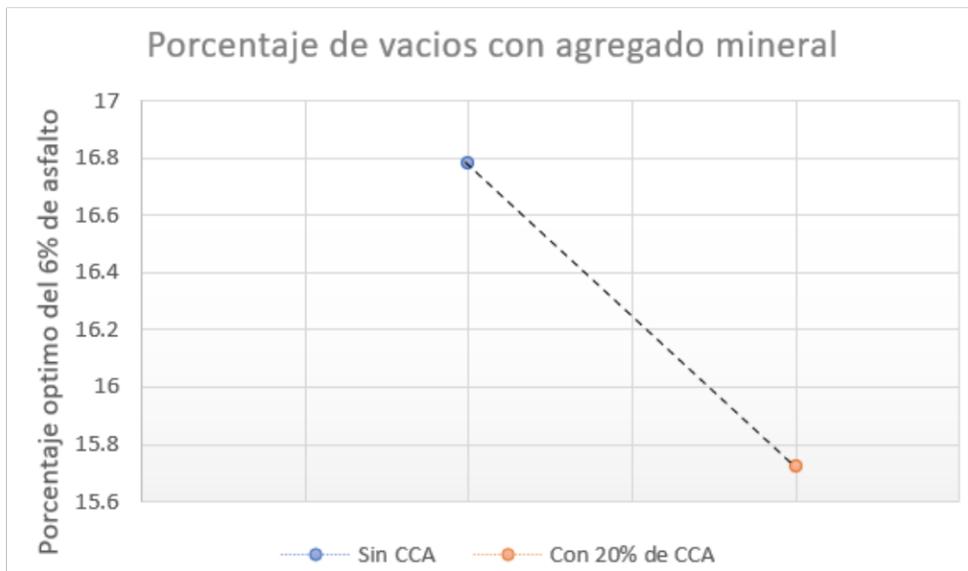
*Nota:* Fuente: Autores

#### **4.3.4. Porcentaje de vacíos con agregado mineral**

Este parámetro en mezclas asfálticas se refiere a la cantidad de espacio vacío en la mezcla asfáltica que está ocupado por agregados minerales como la grava, entre otros. Está directamente relacionado con la calidad y rendimiento de la superficie y los valores obtenidos son 16.78% sin CCA, 15.72% con el remplazante.

**Figura 35**

*Resultados de Porcentaje de vacíos con agregado mineral*



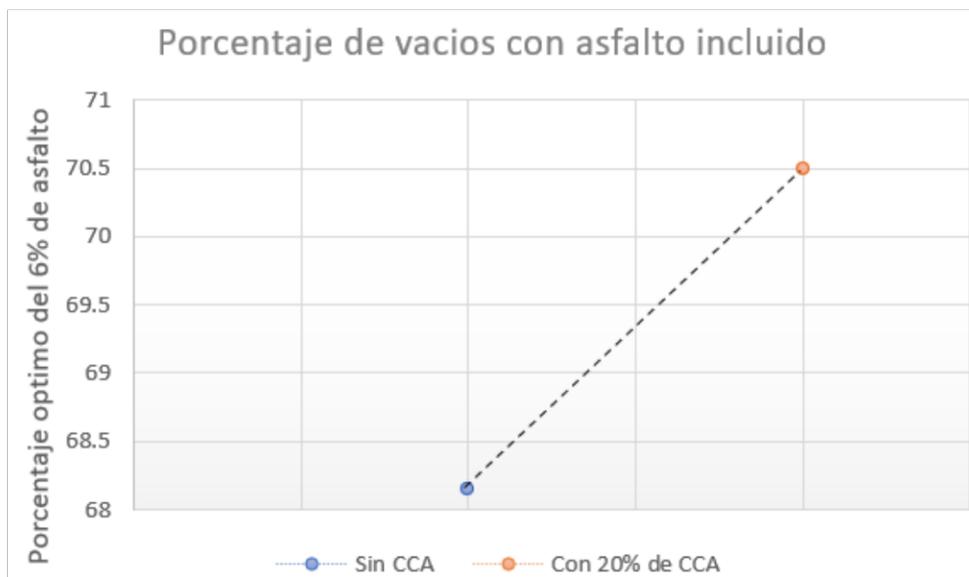
*Nota:* Fuente: Autores

#### **4.3.5. Porcentaje de vacíos con asfalto incluido**

En mezclas asfálticas se refiere a la proporción de espacio vacío ocupado por el asfalto, de tal manera que ayude a verificar la densidad y calidad de manera que tenga un impacto directo en la durabilidad y rendimiento. Los valores obtenidos son 68.15% sin CCA, 70.5% con el remplazante.

**Figura 36**

*Resultados de Porcentaje de vacíos con asfalto incluido*



*Nota:* Fuente: Autores

## CONCLUSIONES

Se fabricaron briquetas con diferentes porcentajes (4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%) de cemento asfáltico AC-20, siguiendo los parámetros establecidos por la MTOP. En el cual se evaluó la estabilidad, el flujo, el porcentaje de vacíos con aires, el porcentaje de vacíos con agregado y el porcentaje de vacíos llenos de asfalto. Los resultados determinaron que la muestra adecuada contiene un 6% de cemento asfáltico AC-20. Consecuentemente esta muestra ayudara a realizar las comparaciones con los porcentajes de CCA.

Para diseñar mezclas asfálticas óptimas que incluyan CCA (ceniza de cascarillas de arroz) como sustituto de Filler mineral o polvo de piedra, se realizaron pruebas con diferentes porcentajes de sustitución: 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Los resultados de los ensayos pertinentes determinados por el MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Ecuador) mostraron que una sustitución del 20% de CCA cumple con los parámetros de porcentaje de vacíos con aire, porcentaje de vacíos con agregado, porcentaje de vacíos llenos de asfalto, flujo y estabilidad. Por lo tanto, se concluye que es adecuado adicionar un 20% de CCA dentro de la mezcla asfáltica.

En conclusión, el proyecto de titulación sugiere que la adición de CCA como sustituto parcial del relleno mineral en mezclas asfálticas modificadas es beneficiosa. Los resultados muestran que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico es del 6%, y que la sustitución efectiva del relleno mineral por CCA puede ser del 20%.

Analizando los datos arrojados por las muestras se puede evidenciar que las briquetas que cuentan con adición de CCA mejoran en cuanto a sus propiedades mecánicas, ya que al analizar la estabilidad siendo uno de los parámetros más importantes esta relación aumento de 2197.07 lb

a 2428.3 lb adicionando un 20% de CCA. Por otro lado, la relación de vacíos con agregado mineral disminuye de 16.78% sin CCA a 15.72% adicionando CCA.

La adición de CCA a una mezcla mejora la estabilidad y el flujo de la misma. La estabilidad aumenta porque el CCA aumenta la resistencia de la mezcla. De igual manera los parámetros del flujo al adicionar el CCA se mantienen dentro de los parámetros permitidos por la normativa.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar briquetas con un contenido que este en el rango de 5.8%, 5.9%, 6%, 6.1%, 6.2% de cemento asfáltico para las pruebas de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos con aire, porcentaje de vacíos con agregado y porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

Se recomienda adicionar un 18%, 19%, 20%, 21%, 22% de CCA dentro de las mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades mecánicas y de comportamiento.

Es importante seleccionar cuidadosamente la ceniza de cascarilla, ya que su origen puede contener contaminantes. Por lo tanto, es necesario tamizarla cuidadosamente para obtener el tamaño de grano necesario para garantizar su pureza.

El estudio de la cascarilla de arroz tiene el potencial de contribuir al desarrollo sostenible, al proporcionar una solución al problema de residuos agroindustriales y al generar nuevos productos y servicios, por ende, se recomienda hacer un estudio minucioso de la CCA para entender de mejor manera su comportamiento y propiedades.

## BIBLIOGRAFIA

Albarracín, E., Jinsop, B., & Sarango, M. C. (2023). “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO CON ÁRIDOS PROVENIENTES DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAUTE Y JUBONES INCORPORANDO ADITIVO HIPERPLASTIFICANTE DESARROLLO.”

Alfredo Cedeño-Palacios III, C., Eduardo Alcívar-Cedeño, U. I., & Alejandra Zambrano-Zambrano, G. I. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa Use of rice husk (*Oryza sativa*) for the production of cellulose fibres Uso de casca de arroz (*Oryza sativa*) para obtenção de fibras de celulose Cienciasde naturales Artículo de revisión. 6, 415–437.  
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2572>

Alvarado, J. 1, Vega-Baudrit, P. 2, J 3, & Porras M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos.

Anguas, P., Delgado, H., José, A., Gómez, A., Sergio, L., Romero, A., Alonso, H., & Orta, A. (2004). ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Bastidas, P., & Ortiz, G. (2016). Comportamiento de la ceniza de la cascarilla de arroz en las propiedades físico-mecánicas en mezclas de hormigón estándar.

Behak, L., & Núñez, W. P. (2008). Characterization of a material comprised of sandy soil, rice husk ash and potentially useful lime in pavements | Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. *Revista Ingenieria de Construccion*, 23(1), 34–41.

- Boanerges, D. (2011). DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ PARA EMPLERARLO EN PROYECTOS DE VIVIENDA DE BAJO COSTO.
- Camacho, E. (2010). “COMPORTAMIENTO DE PRODUCTOS CONSOLIDANTES APLICADOS A PIEDRAS IMPREGNADAS DE SALES SOLUBLES. CAMBIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y RESPUESTA A LOS FACTORES DE DETERIORO.”
- Cardona Moncada, V. H., López Lara, T., Horta Rangel, J. M., Hernández Zaragoza, J. B., Cardona-Moncada, V. H., López-Lara, T., Horta-Rangel, J. M., & Hernández-Zaragoza, J. B. (2023). Estabilidad y flujo en una mezcla asfáltica con sustitución parcial en el agregado pétreo por desechos de toba volcánica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2023.24.1.003>
- Cedeño, A., Cedeño, E., & Zambrano, A. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa Use of rice husk (*Oryza sativa*) for the production of cellulose fibres Uso de casca de arroz (*Oryza sativa*) para obtenção de fibras de celulose *Ciencias de naturales* Artículo de revisión. 6, 415–437. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2572>
- Chamba, F., & Benavides, J. (2019). DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE INCORPORANDO CAUCHO TRITURADO DE NEUMÁTICO RECICLADO.
- Chamba Fátima, & Benavidez Jonathan. (2019). UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA INGENIERÍA CIVIL. UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA INGENIERÍA CIVIL.

- CÓRDOVA, M., & CORNEJO, C. (2019). MANUAL DE LABORATORIO PARA LOS ENSAYOS DE VÍAS Y PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA PARTE I.
- Darquea, F. (2017). DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES ÁRIDOS PROVENIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE Y JUBONES Y SU INCIDENCIA EN LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.
- Figuroa, S., & Navas, L. (2019). Caracterización de los Agregados y Propiedades Físico – Mecánicas para uso del Laboratorio de hormigones.
- Klamt, R. A., Fontoura, P. R., Budny, J., & Dos Santos, F. F. (2018). Estudo da Utilização da Reciclagem de Concreto Asfáltico como Camada de Pavimento. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 7(3). <https://doi.org/10.5585/geas.v7i3.782>
- Norma Ecuatoriana Vial. (2013). MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE VOLUMEN No 3 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES.
- Obando, S., & Zamora, D. M. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones.
- Padilla Rodríguez, A. (2005). MEZCLAS ASFÁLTICAS.
- Quito, J., & Ortiz, E. (2023). APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCAILLA DE ARROZ COMO SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN DE ORIGEN ÍGNEO.
- Sánchez-Vásquez, E., Leiva-Piedra, J.-L., Monteza-Arbulú, C.-A., Sánchez-Vásquez, E., Leiva-Piedra, J.-L., & Monteza-Arbulú, C.-A. (2021). Elaboración y caracterización de ladrillos

con adición de cáscara de arroz calcinado. Revista Facultad de Ingeniería, 30(57), e13031.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v30.n57.2021.13031>

**AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Nosotros, Carlos Guillermo Cabeza Illescas y Kevin Fernando Palma Gallegos portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 0106913940 y 0107065260. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “APLICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ COMO SUSTITUCION PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN LA PRODUCCION DE MEZCLAS ASFALTICAS CON ARIDOS DE COMPOSICION MAYORMENTE SEDIMENTARIO” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de marzo de 2024

F:   
.....  
Carlos Guillermo Cabeza Illescas  
0106913940

F:   
.....  
Kevin Fernando Palma Gallegos  
0107065260