

*Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de
concreto hidráulico*

**Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en
mezclas de concreto hidráulico**



Por:

Anyi Marcela Rodríguez Sánchez

María Paula Tibabuzo Jiménez

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Villavicencio**

2019

*Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de
concreto hidráulico*

Proyecto de Investigación

**Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en
mezclas de concreto hidráulico**

Por:

Anyi Marcela Rodríguez Sánchez

María Paula Tibabuzo Jiménez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de **Ingeniero(a) Civil**

Aprobado por:

Ing. Emiro Andrés Lozano Pérez, Esp. Estructuras

Director

Ing. Oscar Fabian Barreto Chitiva, Esp. Estructurales, Mgc Estructuras

Codirector

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Villavicencio

2019

AUTORIDADES ACADÉMICAS

FRAY JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O. P.

Rector General

FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

FRAY JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

FRAY FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

ING. JHON JAIRO GIL PELÁEZ, PH.D.

Decano Facultad de Ingeniería Civil

DEDICATORIA

Este logro va dedicado especialmente a dos personas, mi padre quien a pesar de su ausencia, vivirá por siempre en mi corazón, y mi madre quien es todo en mi vida, y como un ejemplo de vida estarán *presentes* en el transcurrir de los días.

Papá, eres el recuerdo vivo de esa persona que ame tanto y que ya no tengo. Como dijo Héctor Abad “me duele tener que escribir para alguien que no me podrá leer y sé que estarías orgulloso de lo que he logrado”. Es la Carta a una sombra. Mamá, eres mi mayor ejemplo de vida, te admiro profundamente. Cada logro en mi vida es por ustedes.

El amor infinito que nos une, jamás nos separara.

María Paula Tibabuzo Jiménez

Dedico este proyecto principalmente a Dios y a mi hermosa madre que estuvo apoyándome en tiempos alegres y difíciles en mi trayectoria por la vida, llenándome de amor y motivos para ser el gran orgullo de aquella mujer valerosa y exitosa.

Anyi Marcela Rodríguez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos la sabiduría y el empeño para el desarrollo de este proyecto, a los Ingenieros Oscar Barreto y Emiro Lozano, por su guía, paciencia y compromiso, lo que nos permitió tener la orientación adecuada en el desarrollo de este proyecto. Así mismo agradecemos por su confianza, lo que nos ayudó a desarrollar este proyecto con mayor entrega y disposición.

A nuestros padres quienes nos apoyan incondicionalmente, por su motivación en momentos difíciles, por la fuerza y energía que nos permite crecer como personas y futuros profesionales.

Finalmente, a todas las personas que de alguna forma contribuyeron en el desarrollo de este proyecto. A todos ellos, muchas gracias.

RESUMEN

La investigación planteó el uso de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) procesado en plantas arroceras de los Llanos Orientales Colombianos, como suplemento de una parte en peso del cemento, en mezclas de concreto hidráulico, con el fin de determinar las propiedades mecánicas y físicas, como: resistencia a la compresión, asentamiento, módulo de elasticidad, relación de Poisson y análisis de la microestructura del concreto hidráulico. Los datos se obtuvieron experimentalmente a través de los ensayos de laboratorio establecidos por las Normas Técnicas Colombianas vigentes.

Como resultado, se determinó que la adecuada quema de la cascarilla de arroz produce ceniza con un porcentaje de sílice importante, el cual es un elemento que tiene buena actividad puzolánica, efectivo para la formación de compuestos cementicios que permiten el aumento de la resistencia a la compresión del concreto fraguado. Además, dado que la región de los llanos orientales tiene los mayores tamaños de unidades de producción arroceras (UPA) y de cultivo por agricultor del país [1] esta investigación planteo el estudio de una solución al problema ambiental y logístico que se presenta a la hora de disponer de manera inadecuada la Cascarilla que se extrae del Paddy, esto, a través de su uso en el mejoramiento de la calidad del concreto hidráulico, considerado como uno de los materiales importantes en la industria de la construcción.

Palabras Clave: *Ceniza de cascarilla de arroz, concreto hidráulico, sílice, elementos puzolánicos, resistencia a la compresión.*

ABSTRACT

The investigation raised the use of rice husk ash (CCA) processed in rice plants of the llanos orientales colombianos, as a supplement of a part by weight of the cement, in mixtures of hydraulic concrete, in order to determine the properties Mechanical and physical, such as: resistance to compression, settlement, modulus of elasticity, Poisson relation and analysis of the microstructure of hydraulic concrete. The data were obtained experimentally through the laboratory tests established by the current Colombian technical standards.

The proper burning of the rice husk produces an ash with a possible percentage of important silica, which is an element that has good puzolanica activity, effective for the formation of cementitious compounds that increase the resistance to the Compression of the hardened concrete. And, given that the eastern plains region has the largest sizes of units of rice production (UPA) and crop per farmer in the country, this research approach the study of a solution to the environmental problems and logistical support that occurs at the time of having adequately the husk which is extracted from the paddy, through its use in the improvement of the quality of the hydraulic concrete, which is the most important material in the construction industry.

Key words: *Rice husk ash, hydraulic concrete, silica, pozzolanic elements, resistance to compression.*

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
TABLA DE CONTENIDO	8
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE ILUSTRACIONES	12
LISTA DE GRÁFICAS	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Motivación y Formulación Del Problema	14
1.2 Finalidad	15
1.2.1. Objetivo General	15
1.2.2. Objetivo Específicos	15
1.3 Aportes del Trabajo	16
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA	17
2.1. Marco Teórico	17
2.2. Marco conceptual	23
2.3. Estado del Arte	26

2.4. Conclusión del Capítulo	29
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	30
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	57
5.1. Conclusiones	57
5.2. Trabajos Futuros y Recomendaciones	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proceso de industrialización del arroz	21
Tabla 2. Diseño experimental	30
Tabla 3. Materias primas e insumos	31
Tabla 4. Propiedades a evaluar	35
Tabla 5. Resistencia a la compresión	36
Tabla 6. Curva granulométrica del cemento y la CCA.....	39
Tabla 7. Caracterización física de la CCA	41
Tabla 8. Composición química de la CCA	42
Tabla 9. Consistencia del cemento	43
Tabla 10. Granulometría agregado grueso	43
Tabla 11. Granulometría agregado fino.....	44
Tabla 12. Proporciones diseño de mezcla	46
Tabla 13. Diseño de mezcla patrón sin CCA.....	46
Tabla 14. Diseño de mezcla con 3% de CCA.....	46
Tabla 15. Diseño de mezcla con 5% de CCA.....	47
Tabla 16. Diseño de mezcla con 10% de CCA.....	47
Tabla 17. Diseño de mezcla con 15% de CCA.....	47
Tabla 18. Asentamiento	48
Tabla 19. Resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.....	49

*Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de
concreto hidráulico*

Tabla 20. Resistencia a los 7 días de curado	51
Tabla 21. Resistencia a los 14 días de curado	52
Tabla 22. Resistencia a los 28 días de curado	53
Tabla 23. Relación de Poisson sin CCA.....	54
Tabla 24. Relación de Poisson con 3% CCA	54
Tabla 25. Relación de Poisson con 5% CCA	55
Tabla 26. Relación de Poisson con 10% CCA	55
Tabla 27. Relación de Poisson con 15% CCA	55
Tabla 28. Módulo de elasticidad.....	56

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapas seccionales de producción de arroz	23
Ilustración 2. Cemento Portland	24
Ilustración 3. Ceniza de cascarilla de arroz	25
Ilustración 4. Ensayos	26
Ilustración 5. Resultados de ensayos	27
Ilustración 6. Curva granulometría de la CCA	28
Ilustración 7. Molienda de la ceniza de cascarilla de arroz	31
Ilustración 8. Caracterización del agregado grueso	32
Ilustración 9. Pesaje de materiales	33
Ilustración 10. Proceso de mezclado	33
Ilustración 11. Golpes en cada capa para cada cilindro	34
Ilustración 12. Muestras de concreto hidráulico	34
Ilustración 13. Cilindro de concreto hidráulico	37
Ilustración 14. Falla del cilindro	37

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva granulométrica del cemento y la CCA.....	40
Gráfica 2. Granulometría agregado grueso.....	44
Gráfica 3. Granulometría agregado fino.....	45
Gráfica 4. Comparativo de la resistencia obtenida por cada muestra.....	50
Gráfica 5. Resistencia de las nuestras falladas a los 7 días de curado.....	51
Gráfica 6. Resistencia de las muestras falladas a los 14 días de curado	52
Gráfica 7. Resistencia de las muestras falladas a los 28 días de curado	53

1. INTRODUCCIÓN

El Meta es el tercer productor de arroz en Colombia [1], con una producción estimada para el 2015 que puede superar las 200.000 ton/año [2]. “La cascarilla de arroz, constituye aproximadamente el 20% en peso del grano de arroz, y es separado en el proceso de pilado formándose verdaderas montañas de cascarilla al costado de los molinos, lo que ocasiona problemas de espacio por la acumulación de este desecho” [3], siendo poco sostenible su tratamiento y disposición final. De aquí la importancia de emplear esta como alternativa de aprovechamiento, ya que es evidente la gran oferta en la industria arroceras y su difícil biodegradación representa un problema considerable para el ambiente [4].

En su aprovechamiento, el potencial industrial se ha enfocado en generar alternativas como: combustible y generador de gas, uso constructivo, camas para cría de aves, compost y abonos agrícolas [5]. Dentro de la combustión es empleado en esta industria para generar energía en los hornos y llevar procesos de secado debido a su alto poder calorífico [6]. Esta cascarilla al quemarse genera aproximadamente 17,8% de ceniza rica en Sílice (94,5%) [7], lo que permite su implementación en la industria de la construcción como en la elaboración de concreto.

Como alternativa, se evaluó la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico, a fin de correlacionar los datos de la mezcla normalizada y adicionada, determinando el patrón de mezcla más efectivo y su posibilidad de ser empleado en la industria de la construcción.

1.1 Motivación y Formulación Del Problema

Para el 2006 se estimaba una producción de concreto de 1.7×10^6 ton/año. Todo ello gracias a la abundancia de sus materias primas y la versatilidad que presenta para ser usado en muchos sistemas estructurales [8]. La utilización de estas materias primas presenta desventajas en la resistencia final y el tiempo de fraguado del concreto, por lo que se

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

adicionan minerales que suplan las falencias mencionadas. El cemento, contiene elementos puzolánicos, que suelen ser material silíceo y aluminoso que no agrega valor cementicio. Dentro del grupo de estos materiales, los más utilizados son las cenizas volantes, producto de la combustión de carbón en las centrales de energía térmica, entre otros [9].

“Dada la composición química de la ceniza que se obtiene como producto de la combustión de la cascarilla de arroz, esta también ha sido utilizada como elemento puzolánico en la fabricación de cementos y concretos” [10].

El arroz aún sigue siendo uno de los cultivos más importantes de la región de la Orinoquia y según la Federación Nacional de Arroceros, Villavicencio - Meta es un gran productor de arroz en la industria. Su producción genera residuos orgánicos como los tallos, hojas y cascaras. Estas últimas pueden ser utilizadas como biocombustible a través de su quema en hornos. Dentro de los productos de la combustión se encuentra la Ceniza de Cascarilla Arroz (CCA), la cual, dependiendo de la temperatura y las condiciones de quemado, posee un contenido de Óxido de Silicio (SiO_2), lo que permitió ser reemplazado de forma parcial en el cemento para una mezcla de concreto estructural.

1.2 Finalidad

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la ceniza de cascarilla de arroz cultivado en la región de los llanos orientales como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico.

1.2.2. Objetivo Específicos

- *Obtener las propiedades fisicoquímicas de la ceniza de cascarilla de arroz.*
- *Elaborar el diseño de mezcla para la muestra patrón y la muestra*

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico suplementada con ceniza de cascarilla de arroz.

- *Determinar las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico normalizado y con adición de ceniza de cascarilla de arroz.*

1.3 Aportes del Trabajo

Principalmente el desarrollo de este proyecto contribuye a la disminución de la contaminación ambiental, ya que la ceniza de cascarilla de arroz en la mayoría de los molinos de Villavicencio-Meta no son adecuadamente manejados, de ahí la aplicación de esta investigación, lograr beneficiar a la misma población y al sector de la construcción, para que la región de los llanos orientales pueda emplear alternativas en la fabricación de concretos amigables con el ambiente, sin que se vea afectada la resistencia del mismo, por ello la importancia de analizar el comportamiento e impacto que este tendría para la ciudad de estudio, y corroborar si ¿ el uso de la ceniza de cascarilla de arroz en Villavicencio- Meta mejora las propiedades mecánicas y físicas del concreto?.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA

2.1. Marco Teórico

El concreto es la mezcla de un material aglutinante (normalmente Cemento Portland hidráulico), unos materiales de relleno (agregados gruesos y finos), agua y dependiendo de la aplicación, también aditivos. Dicha mezcla al endurecerse forma un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [11].

El Cemento Portland es una mezcla de varios compuestos, dentro de los cuales, alrededor de un 75% son el silicato tricálcico (Ca_3SiO_5) y el silicato dicálcico beta ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$), los cuales al reaccionar con una cantidad limitada de agua generan silicato cálcico hidratado ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$), una pasta que al cabo de cierto tiempo se endurece (Brunauer, 1962), y que al ser complementada con agregados (finos: arena y gruesos: grava) da como resultado el concreto (también llamado hormigón). Sin embargo, otro producto de la hidratación del cemento es el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o cal hidratada, que no es un elemento cementicio y por lo tanto no contribuye a la resistencia o durabilidad del concreto, mientras que su carbonatación y lixiviación sí pueden producir problemas de degradación [12].

Las materias primas con que se elabora el cemento son: Caliza que es una piedra que se obtiene de la explosión de rocas en las minas, arcilla que proviene de la descomposición de minerales de aluminio y yeso que se extrae de una piedra natural mediante hidratación y por último la puzolana [13].

Estos elementos puzolánicos, que son, según la definición de la American Society for Testing and Materials ASTM: “un material silíceo y aluminoso que por sí mismo posee poco o ningún valor cementicio, pero que, en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, a temperatura ambiente para formar componentes con propiedades cementicias” [14]. Dentro del grupo de estos materiales, los más utilizados son las cenizas volantes.

Dada la composición química de la ceniza que se obtiene como producto de la combustión de la cascarilla de arroz, ha sido utilizada como elemento puzolánico en la fabricación de

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico
cementos y concretos [10]. La Ceniza de Cáscara De Arroz sometida a una temperatura de 400°C, logra una calcinación del 93% de Óxido de Sílice, por ello al reaccionar con el óxido de sílice se produce hidróxido de calcio que, como se especificó arriba, si es un elemento cementicio, lo cual contribuye a una mejora en la resistencia del concreto.

Reacciones más importantes que produce el cemento para su elaboración:

La reacción química del concreto con la ceniza de cascarilla de arroz (cca)

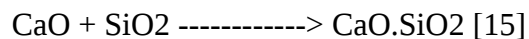
En silicato cálcico hidratado se convierte en el cemento una vez que interactúe con el agua, sin embargo, químicamente el cemento contiene un porcentaje de cal que no aporta ningún valor cementicio, por el contrario, disminuye la resistencia.

Al utilizar la ceniza de cascarilla de arroz como puzolana, este si aporta una mayor resistencia ya que los elementos puzolánicos que reaccionan con la cal, químicamente se dan así:



Con base en la anterior reacción lo que se quiere lograr es que el óxido de silicio reaccione con la cal + agua para producir silicato cálcico hidratado que es lo que produce el concreto. Por ello la cca le aportaría mayor resistencia y un menor peso específico.

Reacción química de la obtención del silicato cálcico:



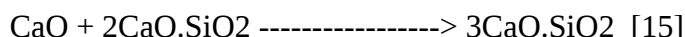
“El silicato tricíclico es uno de los elementos más importantes que constituye al cemento, lo que no es favorable, es que es muy costoso. Las propiedades que aporta son mayor resistencia y un endurecimiento más rápido. Sin embargo, este vota mucho calor de hidratación” [15].

Reacción silicato tricálcico:

El silicato tricálcico es uno de los elementos más importantes que constituye al cemento, lo

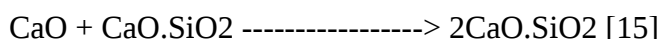
Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

que no es favorable, es que es muy costoso. Las propiedades que aporta son mayor resistencia y un endurecimiento más rápido. Sin embargo este vota mucho calor de hidratación [15]



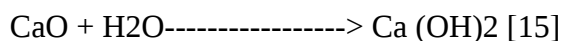
Reacción silicato dicálcico:

El silicato dicálcico presenta menos calor que el tricálcico, por ello le confiere propiedades al cemento tales como mayor resistencia y un endurecimiento progresivo de tal manera que al final llegue a tener la misma resistencia que el tricálcico [15].



Reacción óxido de calcio libre (Hidratación del óxido de calcio):

Al momento de la hidratación produce un aumento de volumen en el sólido lo cual no es muy favorable porque puede ocasionar tensiones internas que pueden quebrar, deteriorar un tipo de estructura [15]



Dada la composición química de la ceniza que se obtiene como producto de la combustión de la cascarilla de arroz, ha sido utilizada como elemento puzolánico en la fabricación de cementos y concretos [10]. La Ceniza de Cáscara De Arroz sometida a una temperatura de 400°C, logra una calcinación del 93% de Óxido de Sílice, por ello al reaccionar con el óxido de sílice se produce hidróxido de calcio que, como se especificó arriba, si es un elemento cementicio, lo cual contribuye a una mejora en la resistencia del concreto.

El arroz en los Llanos Orientales y en el Meta:

El arroz es uno de los cultivos más importantes en el sector agroindustrial de los llanos orientales. El rendimiento que se ha obtenido en el año 2010 en el Meta del paddy (arroz con cascarilla) ha sido de 4,66 toneladas en riego y 4,60 toneladas en secano. El rendimiento de paddy para la región de los llanos orientales ha sido de 4,75 toneladas en paddy seco y para

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

riego 4,49, es decir que el Meta está entre uno de los mayores productores de arroz del país, lo que hace que sea influyente con respecto a las demás industrias arroceras de los diferentes departamentos de la región [16].

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

Tabla 1. Proceso de industrialización del arroz

CUADRO 1. PROCESO DE INDUSTRIALIZACION DEL ARROZ.			
PROCESO	MATERIALES	ENERGÍA	DESECHOS
1. Recibido	Energía eléctrica para báscula	Energía eléctrica para báscula	Emisiones de los camiones
	Camiones		
2. Descarga	Silo subterráneo	Camiones	Impurezas: piedras, animales.
	Rejilla		
	Clasificadora		
3. Prelimpieza	Prelimpiadoras	Eléctrica	Paja, piedras, insectos.
	Zarandas		
	Aire		
	Banda Horizontal		
4. Limpieza	Limpiadoras	Eléctrica	Paja, hebras, arroz vano.
	Zarandas Finas		
	Aire		
5. Secado	Silos de secado	Eléctrica para los ventiladores y capacidad calorífica de los materiales.	Cascarilla, semiquemada, carbón utilizado.
	Ventiladores		
	Cascarilla de arroz		
	Aire		
6. Almacenamiento	Silos	Eléctrica	Material particulado, polvillo.
	Elevadores		
7. Descascarado	Descascarador	Eléctrica	Cascarilla, paddy verde, arroz rojo, arroz vano.
	Rodillos		
	Elevadores		
8. Separación	Zarandas	Eléctrica	NA
	Rejillas finas		
9. Blanqueo	Blanqueadoras de abrasión	Eléctrica	Arroz partido, harina de arroz.
	Rodillos		
10. Pulido	Pulidora	Eléctrica	Arroz cristal, harina de arroz.
	Rodillos		
	Banda transportadora		
11. Clasificación tamaño	Zarandas	Eléctrica	Arroz partido
	Rejillas finas		
12. Clasificación color	Clasificadora	Eléctrica	Arroz yesado
	Banda Transportadora		
13. Empaquetado	Empaquetadoras	Eléctrica	Bolsas defectuosas y emisiones.
	Bolsas		
	Elevador		
	Camiones		

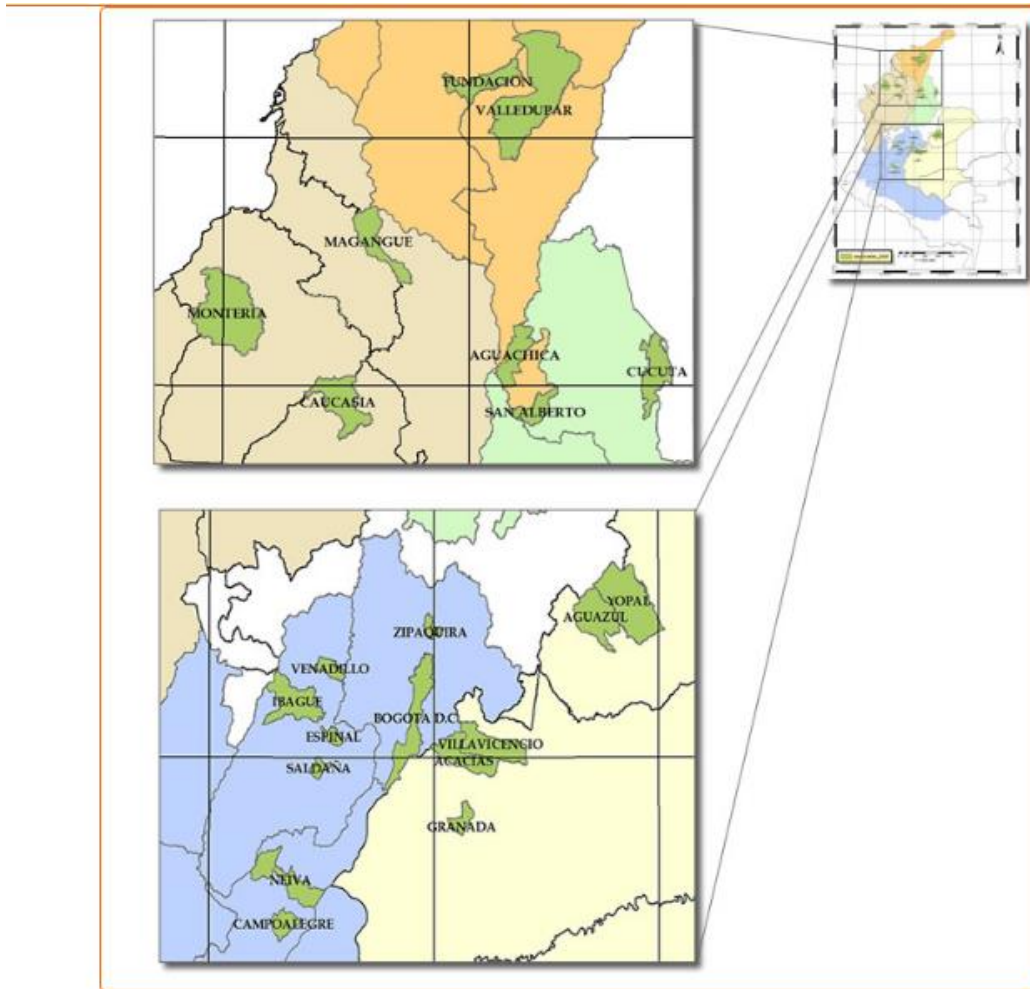
Fuente: Improarroz, 2013

2.1.1. Proceso de industrialización del Arroz

De acuerdo al cuadro anterior, se muestra el proceso de industrialización del arroz, en él se pueden observar trece etapas, las cuales se deben llevar a cabo para lograr el producto terminado que es el arroz empaquetado en bolsas, así como los materiales empleados en cada una, los recursos energéticos necesarios para llevarlas a cabo, en general la electricidad y capacidad calorífica; por último, los desechos que se producen, dentro de los cuales está por supuesto la cascarilla de arroz.

En el descascarado, se emplea la cascarilla de arroz como fuente calórica de combustión. Sin embargo, solamente se utiliza un 12% de esta producción para el proceso y el 88% restante para otros usos. Villavicencio se considera un gran productor de arroz, ya que así lo muestra la Federación Nacional de Arroceros, como se observa en la siguiente ilustración:

Ilustración 1. Mapas seccionales de producción de arroz



Fuente: Federación Nacional de Arroceros, 2011

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Concreto

El concreto es la mezcla de un material aglutinante (normalmente Cemento Portland hidráulico), unos materiales de relleno (agregados gruesos y finos), agua y dependiendo de la aplicación, también aditivos. Dicha mezcla al endurecerse forma un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [11].

2.2.2. Cemento

El Cemento Portland es una mezcla de varios compuestos, dentro de los cuales, alrededor de un 75% son el silicato tricíclico (Ca_3SiO_5) y el silicato dicálcico beta ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$), los cuales al reaccionar con una cantidad limitada de agua generan silicato cálcico hidratado ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$), una pasta que al cabo de cierto tiempo se endurece [12], y que al ser complementada con agregados (finos: arena y gruesos: grava) da como resultado el concreto (también llamado hormigón). Sin embargo, otro producto de la hidratación del cemento es el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o cal hidratada, que no es un elemento cementicio y por lo tanto no contribuye a la resistencia o durabilidad del concreto, mientras que su carbonatación y lixiviación sí pueden producir problemas de degradación.

Ilustración 2. Cemento Portland



Fuente: UNAD, 2018

2.2.3. Elementos puzolánicos

Estos elementos puzolánicos, que son, según la definición de la American Society for Testing and Materials ASTM: “un material silíceo y aluminoso que por sí mismo posee poco o ningún valor cementicio, pero que, en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, a temperatura ambiente para formar componentes con propiedades cementicias” [14]. Dentro del grupo de estos materiales, los más utilizados son las cenizas volantes.

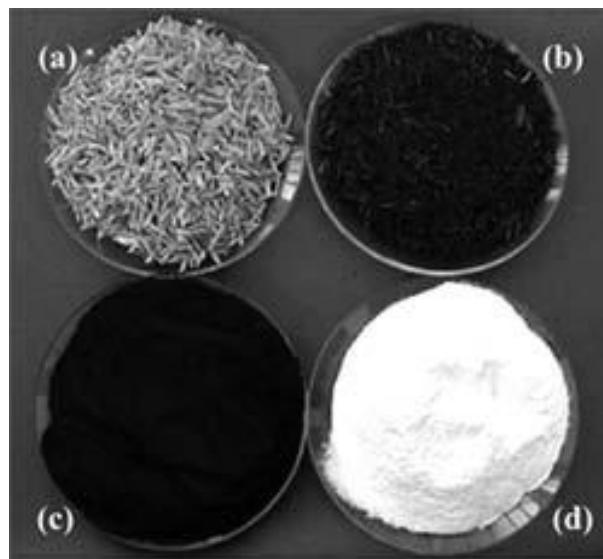
Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

Dada la composición química de la ceniza que se obtiene como producto de la combustión de la cascarilla de arroz, ha sido utilizada como elemento puzolánico en la fabricación de cementos y concretos [10]. La Ceniza de Cáscara De Arroz sometida a una temperatura de 400°C, logra una calcinación del 93% de Óxido de Sílice, por ello al reaccionar con el óxido de sílice se produce hidróxido de calcio que, como se especificó arriba, si es un elemento cementicio, lo cual contribuye a una mejora en la resistencia del concreto.

2.2.4. Ceniza de cascarilla de arroz (cca)

La CCA puede llegar a contener más del 90% de sílice. Por esto que la obtención de un gran porcentaje de sílice amorfa reacciona con el hidróxido de calcio producto de las reacciones del cemento, de tal modo que se convierta en silicato de calcio hidratado y así mejore las propiedades mecánicas del concreto [17].

Ilustración 3. Ceniza de cascarilla de arroz



Fuente: Green earth aerogels, 2018

2.3. Estado del Arte

Como referentes en el desarrollo de la investigación, se ha realizado un seguimiento a los proyectos enfocados en el uso y potencial de la ceniza de cascarilla de arroz en la construcción, siendo este un subproducto no aprovechado en la industria arroceras.

Es así, en la Escuela superior politécnica del litoral de Ecuador realizan el uso de sílice en hormigones de alto desempeño, básicamente se busca una reacción química del dióxido de sílice el cual está contenido en la puzolana con el Clinker que contiene el cemento, con el fin de activar la hidratación del concreto [18].

Para ello inician con los ensayos que serán aplicados al hormigón adicionado, los cuales se muestran en la siguiente ilustración.

Ilustración 4. Ensayos

Prueba	Tipo de esfuerzo	Relación
Slump	Gravedad	Relacionada al esfuerzo de fluencia
Esfera de Kelly	Presión por penetración	Relacionada al esfuerzo de fluencia
Prueba de Vicat	Presión por penetración	Relacionada al esfuerzo de fluencia
K-slump	Gravedad	Relacionada a la segregación
Viscometro	Gravedad	Relacionada a la viscosidad
Prueba de Ve-Be	Por vibración	Para hormigones con alto esfuerzo de fluencia

Fuente: Allauca Luis, 2009.

Es importante resaltar que la resistencia mecánica depende de la velocidad de hidratación de las partículas de Clinker portland y del tipo, contenido y finura de la puzolana, en este ámbito

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

de la construcción se han desarrollado tendencias de superar resistencias de $f'c$: 70 mpa para una edad de diseño mayor a los 28 días, es decir de 56 o 90 días para el uso de superestructuras [18].

Los porcentajes manejados para la adición varían del 5 al 15 % del peso del cemento, para un concreto de 25 mpa con adición de micro sílice y otro normalizado donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Ilustración 5. Resultados de ensayos

Datos	Sin microsilíce		Con microsilíce	
Peso (gr)	284	282	293	301
Área (cm ²)	27,56	27,04	27,56	27,04
Carga (kg)	9.650	11.350	17.250	15.000
Esfuerzo (kg/cm ²)	350	420	626	555
Esfuerzo promedio (kg/cm ²)	385		591	

Fuente: Allauca Luis, 2009

De lo cual se analiza que hay un incremento en la resistencia del 53 %, sin embargo, se concluye que en la resistencia a la compresión en edades iniciales es menor a la dosificación patrón, pero a los 60 días aumenta la resistencia de la muestra adicionada con respecto a la mezcla patrón, entre más tiempo se exponga la muestra este tendrá mayor resistencia a la que inicialmente tuvo, suceso que no se prolonga con una mezcla normalizada, puesto que esta queda en equilibrio [18].

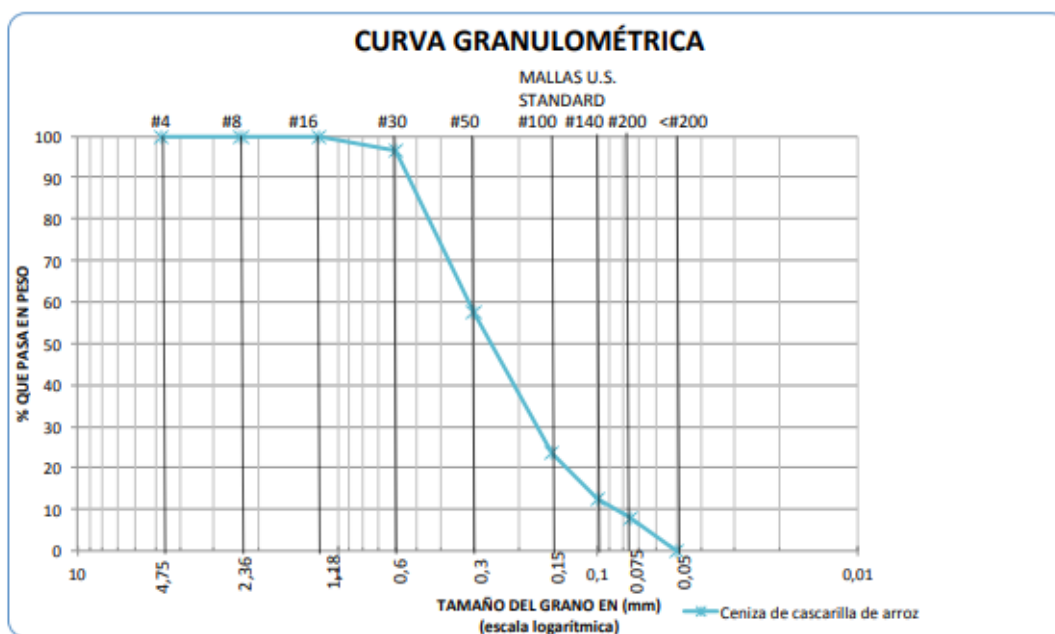
En otras investigaciones dedicadas a obtener el mayor contenido de óxido de sílice posible, se encuentra el proyecto: la evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz, en la fabricación de cemento portland puzolánico tipo IP, de la cual se obtuvo una puzolana con un alto contenido de óxido de sílice el cual fue de 81,90%, también se realizaron otras especificaciones importantes como % de humedad de 9,36%, se emplearon temperaturas de 400° C a 700°C de forma experimental, en un lapso de 1 a 2 horas se obtuvieron los

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

porcentajes con altos contenidos de sílice, finalmente se define que es viable la elaboración de cementos portland con % de ceniza de cascarilla de arroz mayores al 20%, ya que la resistencia del cemento fue mayor una vez adicionada[19].

Entre otros aspectos, el proyecto uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo potencial parcial del cemento en la fabricación de hormigones convencionales del Ecuador desarrolla algo característico e importante que aún no ha sido mencionado, es la importancia de realizar la curva granulométrica de la CCA, mostrada en la ilustración 6.

Ilustración 6. Curva granulometría de la CCA



Fuente: Doménica, 2017

De lo cual se puede describir que de la ceniza empleada la gran parte quedó en el tamiz N° 50 y 100, sin embargo, se recomienda que la ceniza esté en el rango de un tamaño < a 0,075 mm para que pueda reaccionar efectivamente con el cemento, formando propiedades cementantes, para lo cual se realizó un proceso de molienda en seco hasta lograr el tamaño ideal, el cual es el % que pase por el tamiz N° 200 [20].

Por otra parte, se obtuvo en la sustitución del 10% de CCA la mejor resistencia a la compresión a los 28 días de curado con respecto al concreto normalizado, dando como resultado un aumento del 16%, también se muestra que hasta un 15% de adición no afecta la resistencia final, lo que no sucedió con la adición de 25% esta muestra solo logró una resistencia de 22.8 Mpa, puesto que debido al aumento de agua la proporción de CCA fue mayor [20].

2.4. Conclusión del Capítulo

De las investigaciones realizadas se concluye que efectivamente del subproducto ceniza de cascarilla de arroz se obtienen altos contenidos de óxido de silicio lo que permite reaccionar con el cemento, aportando a las propiedades cementantes y a la hidratación del cemento, pese a sus componentes químicos y físicos, cabe mencionar que los resultados varían dependiendo del país, ciudad y molino, puesto que el manejo y proceso que se da es diferente, ya que en algunos porcentajes es mayor la resistencia.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la ejecución del proyecto se trabajó una metodología con herramientas cuantitativas, para determinar algunas características físicas-mecánicas del concreto hidráulico normal y con adición de CCA, basado en la observación, análisis e interpretación de las variables obtenidas.

3.1. Tipo de Investigación

- Diseño Experimental

Se realizaron pruebas reemplazo, donde los factores de incidencia estarán controlados durante el proceso. Este diseño se explica en la tabla 2.

Tabla 2. Diseño experimental

FACTOR	Ceniza de cascarilla de arroz (CCA).
PORCENTAJES DE CCA	M1: 0% M2:3% M3:5% M4:10% M5:15%
REPLICAS	3 muestras por cada edad de curado, 3 muestras por porcentaje suplementado de CCA (3%, 5%, 10% y 15%) y 3 muestras patrón para cada una de las edades.
UNIDADES EXPERIMENTALES	45 muestras (36 muestras de concreto hidráulico con CCA y 9 de concreto hidráulico normal).
VARIABLES DE RESPUESTA	Resistencia a la compresión, asentamiento, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Fuente: Autores, 2018

3.2. Materiales

Se usaron las materias primas descritas en la tabla 3. Teniendo en cuenta el lugar de procedencia.

Tabla 3. Materias primas e insumos

<i>Materia prima</i>	<i>Marca del producto</i>	<i>Proveedor</i>
CCA	No aplica	Molino cereales del llano
Cemento	Argos	Ferretería la 15
Arena	Rio Guayuriba	Ferretería la 15
Grava	Rio Guayuriba	Ferretería la 15
Agua	No aplica	Laboratorio NHSQ

Fuente: Autores, 2018

3.3. Análisis de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

Objetivo: Obtener las propiedades físico – químicas de la ceniza de cascarilla de arroz.

Actividades

- Se realizó visita al molino Cereales del llano ubicado en Villavicencio-Meta.
- Se recolectó las muestras, seguidamente se inicia el proceso de molienda de la CCA en el molinete mostrado a continuación:

Ilustración 7. Molienda de la ceniza de cascarilla de arroz



Fuente: Autores, 2019

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

- Durante 24 horas se colocó la CCA en el horno de secado a una temperatura constante de 180°C.
- Se realizó el tamizado de la CCA hasta que la partícula quedara del mismo tamaño que la del cemento, tamiz # 60.
- Se analizó las propiedades físico – químicas contenidas en la muestra de CCA.

Resultados esperados: Caracterización de la CCA.

3.4. Ensayo experimental

Objetivo: Elaborar el diseño de mezcla para la muestra patrón y la muestra suplementada con ceniza de cascarilla de arroz.

Actividades

- Basado en el estudio Ismail, Muhammad shoiaib; Waliuddin,A.M, 1996, se decide experimentalmente realizar las pruebas con la adición de CCA como reemplazo en el cemento en porcentajes del 3%, 5%, 10% y 15%.
- Se realiza la caracterización de los materiales para la elaboración del diseño de mezcla, de acuerdo a la guía: laboratorio de materiales de la construcción de la Universidad de Sucre.
- Seguidamente se muestra registro fotográfico de la caracterización de materiales:

Ilustración 8. Caracterización del agregado grueso



Fuente: Autores, 2019

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

- Con base en la caracterización de materiales, se realizó el diseño de mezcla por el método A.C.I.
- Mediante el diseño de mezcla se ajustan los porcentajes de los materiales utilizados para la dosificación del concreto hidráulico con resistencia 3000 psi, con cilindros de 4" de diámetro y 8" de altura.
- Ejecución del diseño de mezcla: se pesan los materiales según las cantidades especificadas en el diseño.

Ilustración 9. Pesaje de materiales



Fuente: Autores, 2019

- Se hace uso de la mezcladora, para un mejor resultado de mezclado y compactación de la mezcla.

Ilustración 10. Proceso de mezclado



Fuente: Autores, 2019

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

- Se realizan los respectivos golpes en cada capa para cada cilindro mostrado en la **ilustración 11**, posteriormente tener las 9 muestras para cada diseño de mezcla tal y como se observa en la **ilustración 12**.

Ilustración 11. Golpes en cada capa para cada cilindro



Fuente: Autores, 2019

Ilustración 12. Muestras de concreto hidráulico



Fuente: Autores, 2019

Objetivo: Determinar las propiedades físico–mecánicas del concreto hidráulico normalizado y con adición de ceniza de cascarilla de arroz.

- Las variables en el ensayo experimental de tipo cuantitativo, se observan en la **tabla 4**.

Tabla 4. Propiedades a evaluar

Métodos		
Cilindros	Compresión	Asentamiento
		Resistencia última a la compresión
		Relación de Poisson
		Módulo de elasticidad

Fuente: Autores, 2018

Determinación del asentamiento

“Establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto en la obra y en el laboratorio, la muestra de concreto del cual se obtienen los especímenes se realizó de acuerdo a la norma técnica colombiana 454. El asentamiento se anotó en mm con aproximación a 5 mm” [21] y se determina de la siguiente forma:

Ecuación 1

$$\text{Asentamiento} = 305 - h \text{ en mm después de asentado el concreto}$$

Actividades

- Se realizaron 4 mezclas de concreto con adición de CCA y la mezcla convencional.
- Se vaciaron las mezclas de concreto en las probetas.
- Se realizó el desencofrado de los cilindros.

Curado del concreto

El procedimiento ideal para mantener el concreto saturado, o tan saturado como sea posible, con el fin de garantizar una correcta hidratación de los materiales cementantes, es la inundación (inmersión) total de la pieza terminada de concreto en agua. Se realizó el mismo proceso de curado para todas las muestras de concreto.

Actividades

- Una vez desencofrado los cilindros se procedió a la inmersión en las piscinas de curado.

Determinación de la resistencia ultima a la compresión

“Este método de ensayo es usado para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos preparados y curados de acuerdo con las practicas NTC 550, NTC 1377, NTC 504, NTC 3708 y los métodos de ensayo NTC 3658 y ASTM C873” [22]

En la **tabla 5** se muestra la cantidad de cilindros empleados para la muestra patrón y la muestra adicionada con su respectivo porcentaje.

Tabla 5. Resistencia a la compresión

NTC 673. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto hidráulico					
No. Cilindros	Patrón (0%)	CCA (3%)	CCA (5%)	CCA (10%)	CCA (15%)
7 días	3	3	3	3	3
14 días	3	3	3	3	3
28 días	3	3	3	3	3
Total Cilindros	45				

Fuente: Autores, 2019

Actividades

- Proceso de alistamiento del cilindro antes de fallarlo:

Ilustración 13. Cilindro de concreto hidráulico



Fuente: Autores, 2019

- Una vez cumplido el periodo de 7 – 14 – 28 días se procedió a fallar cada cilindro registrando la resistencia obtenida.

Ilustración 14. Falla del cilindro



Fuente: Autores, 2019

Resultados esperados: Documento de resultados de las resistencias alcanzadas.

Relación de Poisson y Módulo de Elasticidad

De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 4025, método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión, se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma mediante la combinación del compresómetro y extensómetro.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.Resultados caracterización física de la ceniza de cascarilla de arroz

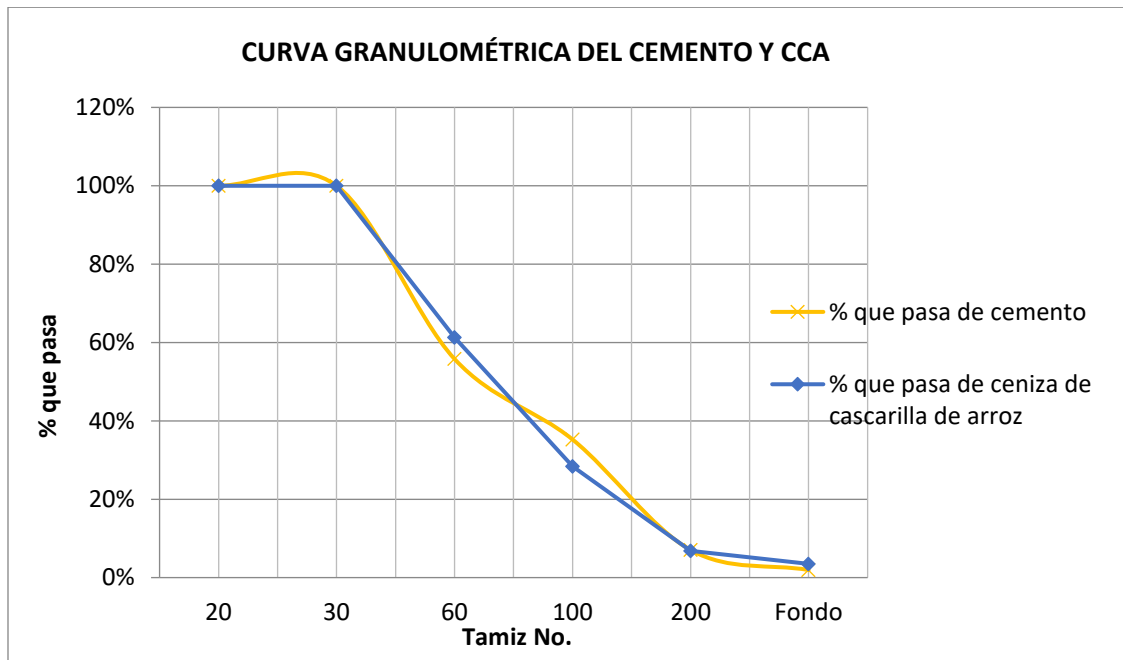
Se obtuvo los resultados de las propiedades físicas de la ceniza de cascarilla de arroz. Las curvas granulométricas obtenidas para la ceniza de cascarilla de arroz y el cemento se observan en la siguiente grafica1. Se determinó que la ceniza de cascarilla de arroz necesitaba un ajuste en la granulometría para que sea similar a la del cemento y así preparar las mezclas de concreto del ensayo.

Tabla 6. Curva granulométrica del cemento y la CCA

CURVA GRANULOMÉTRICA DEL CEMENTO Y LA CCA		
	CEMENTO	CCA
TAMIZ No.	% QUE PASA	% QUE PASA
20	100%	100%
30	100%	100%
60	55,78%	61,30%
100	35,24%	28,40%
200	7,04%	6,80%
Fondo	1,94%	3,50%

Fuente: Autores, 2019

Gráfica 1. Curva granulométrica del cemento y la CCA



Fuente: Autores, 2019

La distribución granulométrica tiene incidencia directa en la trabajabilidad de la mezcla, razón por la cual se ajusta la granulometría de la ceniza de cascarilla de arroz, como se verifica en la gráfica 1. Así mismo en la **tabla 6**, se observa que el mayor porcentaje retenido del cemento es en el tamiz número 60, por lo tanto se realizó el ajuste de la granulometría de la CCA.

Los resultados de la caracterización física se muestran en la **tabla 7**; en cuanto al porcentaje de humedad se obtienen valores reducidos, dado que previamente se realizó el secado en la mufla a una temperatura constante de 180°C durante 24 horas. Para la densidad y masa unitaria, tanto suelta como compacta, se evidencia un valor alto debido a que es un material de más fácil compactación y mayor porosidad.

Tabla 7. Caracterización física de la CCA

Propiedad física	Ceniza de cascarilla de arroz
Humedad (%)	0,80
Densidad (g/cm ³)	3,44
Masa unitaria suelta (g/cm ³)	0,327
Masa unitaria compacta (g/cm ³)	0,399
% vacíos en agregado suelto	1,02
% vacíos en agregado compactado	0,95

Fuente: Molino cereales del llano, 2018

Propiedades como densidad, masa unitaria compacta y masa unitaria suelta son menores, en relación con otras investigaciones en las que también se hace caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz [24], esto debido al ajuste granulométrico realizado. El porcentaje de vacíos, tanto en estado suelto como compacto, es evidentemente bajo, debido nuevamente a que la ceniza es un material poroso.

4.2.Resultados caracterización química de la ceniza de cascarilla de arroz

En la **tabla 8** se describe la composición química de la ceniza de cascarilla de arroz.

Tabla 8. Composición química de la CCA

	Porcentaje en masa
Componente	Ceniza de cascarilla de arroz
SiO ₂	80,3
Al ₂ O ₃	0,75
Fe ₂ O ₃	0,02
CaO	0,71

Fuente: Molino cereales del llano, 2018

Teniendo en cuenta las investigaciones consultadas en el desarrollo del trabajo, se determinó que la muestra de estudio proveniente del molino cereales del llano contiene alto porcentaje de dióxido de Silicio, lo cual permite continuar con la investigación para saber si este mejora la resistencia del concreto.

Los porcentajes de los demás componentes mencionados en la **tabla 8** no generan una influencia determinante en el concreto hidráulico.

4.3. Resultados ensayo experimental

Caracterización de los materiales

Se caracterizaron los materiales utilizando los siguientes métodos:

- El ensayo para obtener la finura del cemento hidráulico mostró una F= 35%, es decir, la finura del cemento expresada como el % que pasa por el tamiz #100.
- En el ensayo de la densidad del cemento, se obtuvo 3,10 gr/cm³, lo cual es muy cerca a la densidad estándar 3,15 gr/cm³.
- En el ensayo de la consistencia normal del cemento hidráulico para una muestra de 650 gr de cemento se obtuvieron los siguientes resultados:

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

Tabla 9. Consistencia del cemento

240 ml agua	230 ml agua	220 ml agua	210 ml agua	200 ml agua
24 mm	22 mm	15 mm	12 mm	8,5 mm

Fuente: Autores, 2019

Se realizó la granulometría del agregado grueso, donde se obtuvo el mayor porcentaje acumulado en el tamiz 3/4" y se puede observar en la **gráfica 2**.

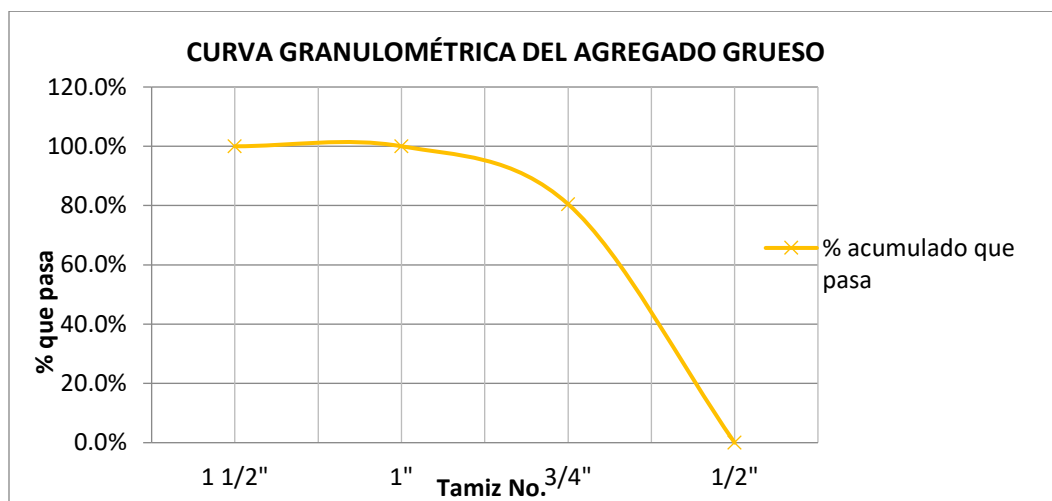
Tabla 10. Granulometría agregado grueso

Abertura (cm)	Serie de tamices	Material retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% acumulado que pasa
3,81	1 1/2"	0	0%	0%	100,0%
2,54	1"	0	0%	0%	100,0%
1,91	3/4"	195	19,5%	19,5%	80,5%
1,27	1/2"	805	80,5%	100,0%	0,0%

Fuente: Autores, 2019

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

Gráfica 2. Granulometría agregado grueso



Fuente: Autores, 2019

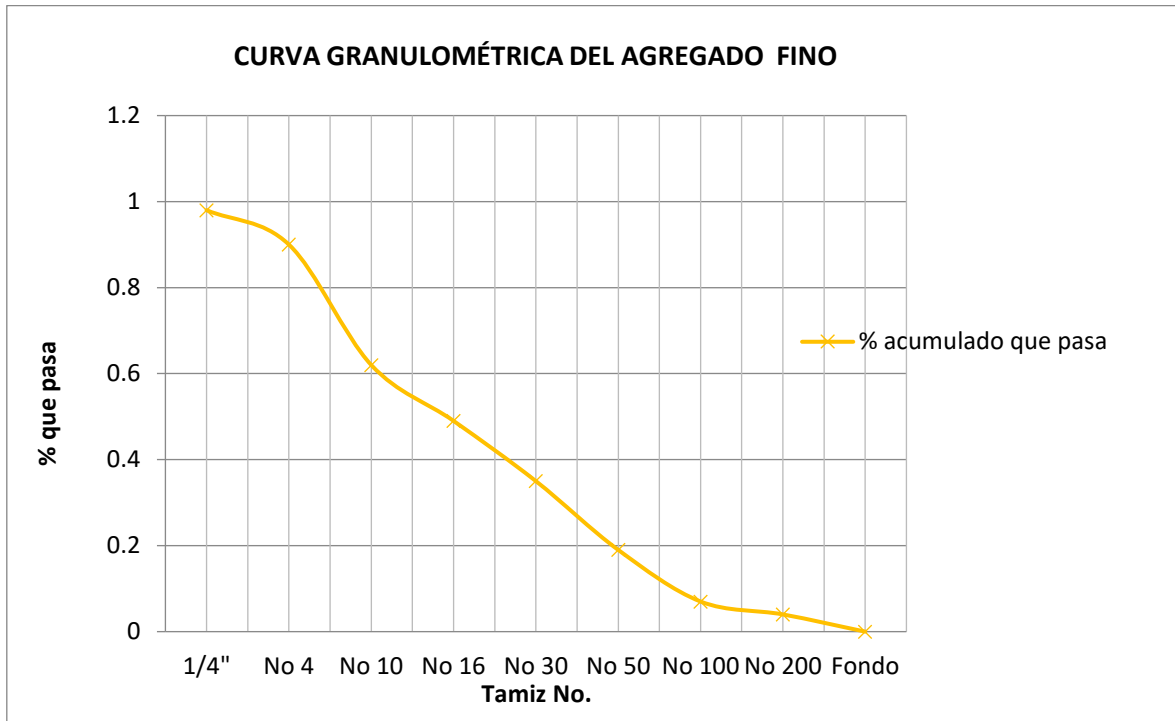
De la misma manera se realizó la granulometría del agregado fino, el cual se observa en la siguiente tabla y gráfica:

Tabla 11. Granulometría agregado fino

Granulometría de los agregados- Agregado fino					
Abertura (mm)	Serie de tamices	Material retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% acumulado que pasa
6,35	1/4"	10	2%	2%	98,0%
4,76	No 4	40	8%	10%	90,0%
2	No 10	140	28%	38,0%	62,0%
1,19	No 16	65	13%	51,0%	49,0%
0,595	No 30	70	14%	65,0%	35,0%
0,297	No 50	80	16%	81,0%	19,0%
0,149	No 100	60	12%	93,0%	7,0%
0,074	No 200	15	3%	96,0%	4,0%
Fondo	Fondo	20	4%	100,0%	0,0%

Fuente: Autores, 2019

Gráfica 3. Granulometría agregado fino



Fuente: Autores, 2019

En el ensayo para determinar el contenido total de humedad de los agregados, después de haberse colocado en el horno durante 24 horas, se obtuvo para el agregado fino un porcentaje de humedad del 12% y para el agregado grueso 0,70%.

Seguidamente se determinó la densidad con un valor de 2,30 gr/cm³ y la absorción del agregado grueso con 0,86%.

Así mismo se determinó la densidad del agregado fino con un valor de 2,5 gr/cm³ y la absorción con un 0,5%.

Con base en la caracterización de materiales, se realizó el diseño de mezcla, obteniéndose las siguientes proporciones:

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

Tabla 12. Proporciones diseño de mezcla

Cemento:	1	
Agregado fino seco:	2,89	
Agregado grueso seco:	1,98	
Agua de Diseño:	27,0	lt / saco

Fuente: Autores, 2019

De la misma manera, se determinó el diseño de mezcla para cada muestra de estudio, la cual se observa a continuación:

Tabla 13. Diseño de mezcla patrón sin CCA

<i>Diseño de mezcla patrón %</i>		
<i>Cemento</i>	<i>5,184</i>	<i>kg</i>
<i>grava</i>	<i>10,278</i>	<i>kg</i>
<i>Arena</i>	<i>15,012</i>	<i>kg</i>
<i>Agua</i>	<i>2,799</i>	<i>Lt</i>
<i>Ceniza</i>	<i>0</i>	<i>kg</i>

Fuente: Autores, 2018

Tabla 14. Diseño de mezcla con 3% de CCA

<i>Diseño de mezcla con CCA 3%</i>		
<i>Cemento</i>	<i>5,0285</i>	<i>kg</i>
<i>grava</i>	<i>10,278</i>	<i>kg</i>
<i>Arena</i>	<i>15,012</i>	<i>kg</i>
<i>Agua</i>	<i>2,799</i>	<i>Lt</i>
<i>Ceniza</i>	<i>0,1555</i>	<i>kg</i>

Fuente: Autores, 2018

Tabla 15. Diseño de mezcla con 5% de CCA

<i>Diseño de mezcla con CCA 5%</i>		
<i>Cemento</i>	<i>4,925</i>	<i>kg</i>
<i>grava</i>	<i>10,278</i>	<i>kg</i>
<i>Arena</i>	<i>15,012</i>	<i>kg</i>
<i>Agua</i>	<i>2,799</i>	<i>Lt</i>
<i>Ceniza</i>	<i>0,2592</i>	<i>kg</i>

Fuente: Autores, 2018

Tabla 16. Diseño de mezcla con 10% de CCA

<i>Diseño de mezcla con CCA 10%</i>		
<i>Cemento</i>	<i>4,6656</i>	<i>kg</i>
<i>grava</i>	<i>10,278</i>	<i>kg</i>
<i>Arena</i>	<i>15,012</i>	<i>kg</i>
<i>Agua</i>	<i>2,799</i>	<i>Lt</i>
<i>Ceniza</i>	<i>0,1555</i>	<i>kg</i>

Fuente: Autores, 2018

Tabla 17. Diseño de mezcla con 15% de CCA

<i>Diseño de mezcla con CCA 15%</i>		
<i>Cemento</i>	<i>4,4064</i>	<i>kg</i>
<i>grava</i>	<i>10,278</i>	<i>kg</i>
<i>Arena</i>	<i>15,012</i>	<i>kg</i>
<i>Agua</i>	<i>2,799</i>	<i>Lt</i>
<i>Ceniza</i>	<i>0,7776</i>	<i>kg</i>

Fuente: Autores, 2018

4.3.1. Asentamiento

Los resultados obtenidos del asentamiento mostraron en las mezclas M1, M2 y M3 la misma consistencia, esto no quiere decir que tengan la misma manejabilidad. Se encuentran al límite del rango de 50-100 mm y el rango de 100-150mm, por lo que se observa una mezcla al límite de la consistencia media plástica y húmeda.

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

En M3 y M4 disminuye la consistencia, se encuentra entre un rango de 50-100 mm con una consistencia media (plástica).

Tabla 18. Asentamiento

Descripción de la muestra	Asentamiento (cm)
M1	10,16
M2	10,16
M3	10,16
M4	8,89
M5	5,08

Fuente: Autores, 2019

4.3.2. Comparación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto convencional con cilindros de concreto con adición ceniza

En este ensayo se realizó la comparación de los resultados de los 4 tipos de muestras de los cilindros que contienen ceniza con respecto a los cilindros de concreto convencional, a los 7, 14 y 28 días, donde se obtuvieron los siguientes datos:

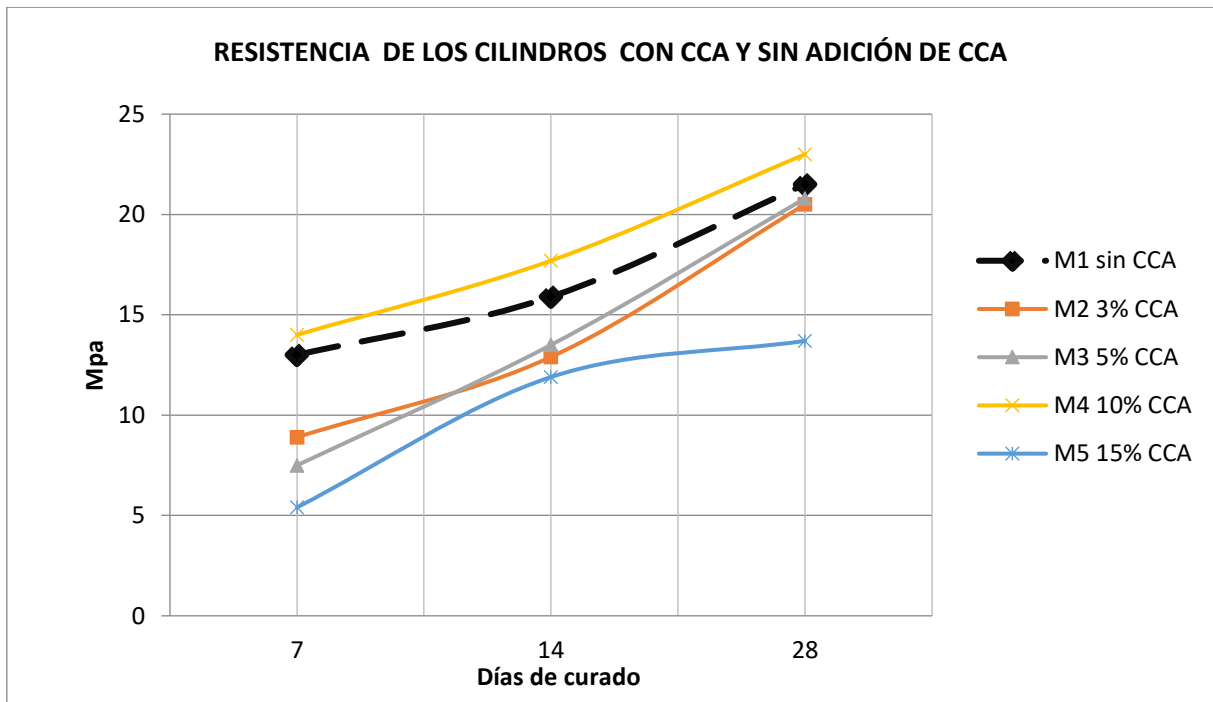
Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

Tabla 19. Resistencia a la compresión de los cilindros de concreto

Descripción de la muestra	Días de curado	Resistencia promedio	
		PSI	Mpa
Diseño de mezcla sin ceniza	7	1857	13,0
	14	2488	15,9
	28	3074	21,5
Diseño de mezcla con 3% de ceniza	7	1268	8,9
	14	1852	12,9
	28	2932	20,5
Diseño de mezcla con 5% de ceniza	7	1066	7,5
	14	1930	13,5
	28	2972	20,8
Diseño de mezcla con 10% de ceniza	7	2000	14
	14	2537	17,7
	28	3286	23
Diseño de mezcla con 15% de ceniza	7	766	5,4
	14	1700	11,9
	28	1957	13,7

Fuente: Autores, 2019

Gráfica 4. Comparativo de la resistencia obtenida por cada muestra



Fuente: Autores, 2019

Las Resistencias de los cilindros con el 3% y 5% de suplemento de CCA, muestran que tanto a los 7, 14 y 28 días, sus valores son significativamente menores que los obtenidos por los cilindros de concreto convencional. La resistencia obtenida por las muestras suplementadas en el 10% de CCA, superan la resistencia de la muestra convencional, donde se evidencia que la CCA aporta resistencia al concreto. La muestra en la que se suplementó el 15% de CCA, presenta un comportamiento menor en relación a la mezcla convencional, dado que al aumentar la cantidad de CCA aumenta la absorción de agua de la mezcla y dificulta su trabajabilidad causando una alta relación de vacíos entre los agregados gruesos y disminución de la resistencia.

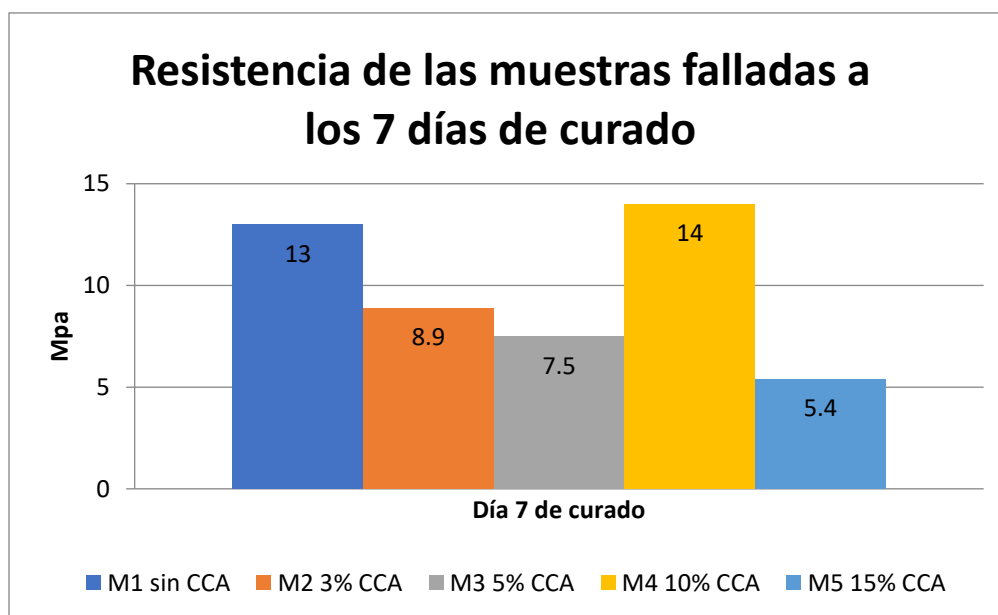
Se analizó el comparativo de las muestras falladas a los 7 días de curado, dando como resultado los siguientes datos:

Tabla 20. Resistencia a los 7 días de curado

Descripción de la muestra	Días de curado	Resistencia promedio	
		PSI	Mpa
Diseño de mezcla sin ceniza	7	1857	13,0
Diseño de mezcla con 3% de ceniza	7	1268	8,9
Diseño de mezcla con 5% de ceniza	7	1066	7,5
Diseño de mezcla con 10% de ceniza	7	2000	14
Diseño de mezcla con 15% de ceniza	7	766	5,4

Fuente: Autores, 2019

Gráfica 5. Resistencia de las muestras falladas a los 7 días de curado



Fuente: Autores, 2019

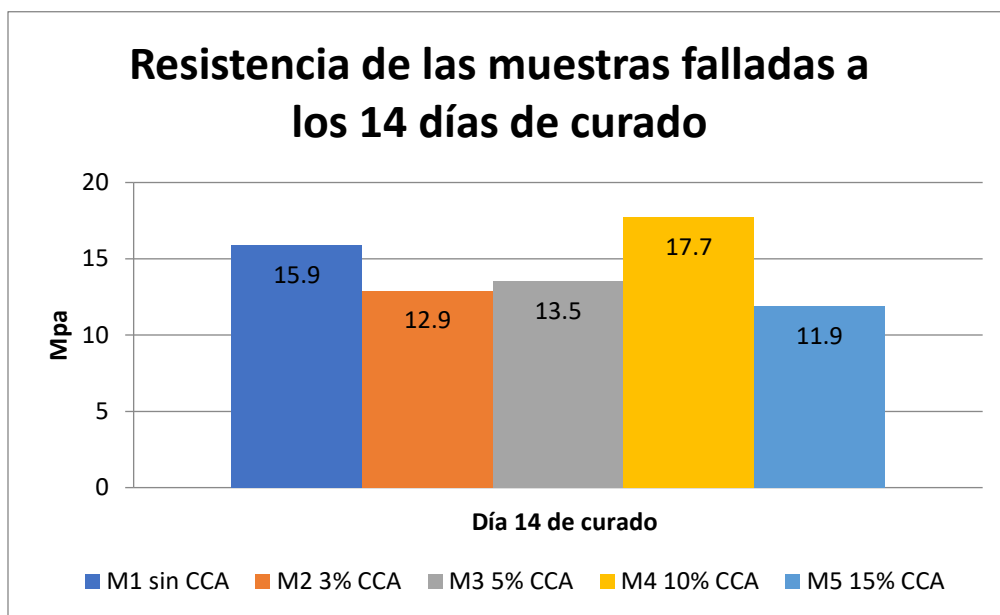
En la tabla 19 se identificó que en esta edad de curado los porcentajes del 3%, 5% y 15% no alcanzan la resistencia óptima, con una diferencia porcentual del 32%, 43% y 59% respectivamente. El porcentaje del 10%, supera la resistencia óptima en un 8%.

Tabla 21. Resistencia a los **14 días** de curado

Descripción de la muestra	Días de curado	Resistencia promedio	
		PSI	Mpa
Diseño de mezcla sin ceniza	14	2488	15,9
Diseño de mezcla con 3% de ceniza	14	1852	12,9
Diseño de mezcla con 5% de ceniza	14	1930	13,5
Diseño de mezcla con 10% de ceniza	14	2537	17,7
Diseño de mezcla con 15% de ceniza	14	1700	11,9

Fuente: Autores, 2019

Gráfica 6. Resistencia de las muestras falladas a los **14 días** de curado



Fuente: Autores, 2019

En la tabla 20, se observa que a los 14 días de curado los porcentajes del 3%, 5% y 15% no alcanzan la resistencia óptima, con una diferencia porcentual del 26%, 23% y 32% respectivamente. Se evidencia un aumento en la resistencia con respecto a las muestras falladas a los 7 días de curado debido a que no siguen las mismas proporciones de porcentualidad, demostrando que el tiempo de curado incide en la resistencia del concreto.

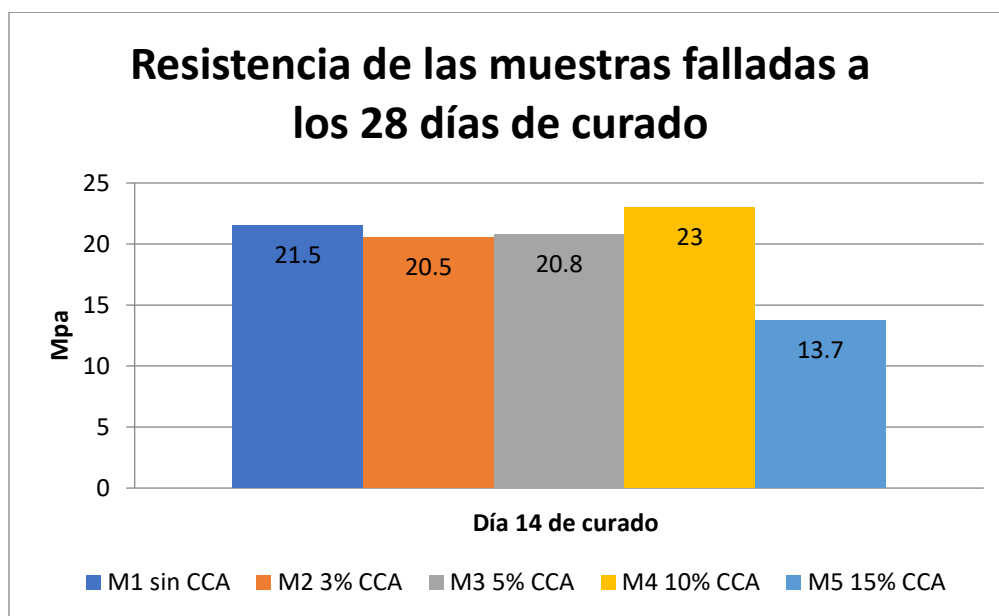
El porcentaje del 10% sigue superando la resistencia del concreto.

Tabla 22. Resistencia a los **28 días** de curado

Descripción de la muestra	Días de curado	Resistencia promedio	
		PSI	Mpa
Diseño de mezcla sin ceniza	28	3074	21,5
Diseño de mezcla con 3% de ceniza	28	2932	20,5
Diseño de mezcla con 5% de ceniza	28	2972	20,8
Diseño de mezcla con 10% de ceniza	28	3286	23
Diseño de mezcla con 15% de ceniza	28	1957	13,7

Fuente: Autores, 2019

Gráfica 7. Resistencia de las muestras falladas a los **28 días** de curado



Fuente: Autores, 2019

En la tabla 21, se observa que a los 28 días de curado los porcentajes del 3%, 5% y 15% no alcanzan la resistencia de 21 Mpa, sin embargo la diferencia es inferior al 5% (2% y 1% respectivamente). Reiteradamente se observa que a mayor tiempo de curado aumenta la

resistencia. El porcentaje del 10% supera los 21 Mpa en un 10%.

Relación de Poisson y Módulo de Elasticidad

Utilizando el extensómetro se obtienen los siguientes resultados, donde se observan los tiempos tomados y su respectiva deformación vertical y horizontal, para obtener la relación de Poisson.

Tabla 23. Relación de Poisson sin CCA

Relación de Poisson				
Tiempo	Esfuerzo	Deformación vertical	Deformación horizontal	
T (seg)	Mpa	Ev(mm)	Eh (mm)	Eh/Ev
25	8,55	0,02	0	0
30	9,12	0,028	0,001	0,0357
40	10,3	0,036	0,001	0,0278
50	12,09	0,044	0,001	0,0227
60	14,62	0,057	0,001	0,0175

Fuente: Autores, 2019

Tabla 24. Relación de Poisson con 3% CCA

Relación de Poisson 3% CCA				
Tiempo	Esfuerzo	Deformación vertical	Deformación horizontal	
T (seg)	Mpa	Ev(mm)	Eh (mm)	Eh/Ev
25	8,68	0,003	0	0
30	9,15	0,007	0,001	0,1429
40	10,44	0,012	0,001	0,0833
50	12,22	0,033	0,001	0,0303
60	14,74	0,035	0,002	0,0571

Fuente: Autores, 2019

Tabla 25. Relación de Poisson con 5% CCA

Relación de Poisson 5% CCA				
Tiempo	Esfuerzo	Deformación vertical	Deformación horizontal	
T (seg)	Mpa	Ev(mm)	Eh (mm)	Eh/Ev
25	7,52	0,012	0	0
30	8,86	0,017	0,001	0,0588
40	9,24	0,028	0,001	0,0357
50	9,95	0,032	0,002	0,0625
60	10,47	0,034	0,003	0,0882

Tabla 26. Relación de Poisson con 10% CCA

Relación de Poisson 10% CCA				
Tiempo	Esfuerzo	Deformación vertical	Deformación horizontal	
T (seg)	Mpa	Ev(mm)	Eh (mm)	Eh/Ev
25	7,52	0,007	0	0
30	8,86	0,011	0,001	0,0909
40	9,24	0,019	0,001	0,0526
50	9,95	0,022	0,002	0,0909
60	10,47	0,031	0,003	0,0968

Tabla 27. Relación de Poisson con 15% CCA

Relación de Poisson 15% CCA				
Tiempo	Esfuerzo	Deformación vertical	Deformación horizontal	
T (seg)	Mpa	Ev(mm)	Eh (mm)	Eh/Ev
25	5,23	0,005	0,001	0
30	6,89	0,012	0,001	0,0833
40	5,46	0,021	0,002	0,0952
50	7,79	0,023	0,003	0,1304
60	8,21	0,031	0,007	0,2258

Fuente: Autores, 2019

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

En los resultados obtenidos se observa que, las deformaciones verticales aumentan en todas las muestras cilíndricas, las horizontales aumentan en la prueba con el 15% de ceniza de cascarilla de arroz, aun así, los resultados no son los absolutos para determinar la relación de Poisson ya que se realizaron con un esfuerzo máximo del 60% de la resistencia última, esta corresponde a los 7 días del curado del concreto, por lo que se requiere un mayor estudio para dar una mayor veracidad al determinar la relación de Poisson.

El módulo de elasticidad obtenida con el compresómetro utilizando un esfuerzo **0,45 f_c** y un **ε₄₅**, esto con base en la gráfica de mecánica de fractura del concreto, encontrándose en energía elástica, los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 27.

Tabla 28. Módulo de elasticidad

Módulo de Elasticidad	
Ec	70329,13
Ec 3%	7176389
Ec 5%	722398,534
Ec 10%	802507
Ec 15%	100194,402

Fuente: Autores, 2019

El módulo del concreto convencional es Ec: 70329,2 con relación a esto se muestra que el módulo aumenta con relación al porcentaje de suplemento de ceniza de cascarilla de arroz.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

La evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz cultivada en la región de los llanos orientales, sin ningún proceso de quema, utilizada como suplemento en mezclas de concreto hidráulico, se enfoca en el comportamiento de la propiedades físicas y mecánicas ante la reacción de la ceniza de cascarilla de arroz en el concreto, de manera que se da cumplimiento al objetivo general de la investigación, dando paso a los siguientes objetivos específicos concluyentes:

La ceniza de cascarilla de arroz contiene óxido de silicio, obtenido de un proceso de calcinación el cual no tiene ningún control de quema, este presenta material puzolánico lo que hace que al suplementarse en el cemento y agua reaccionen químicamente.

La ceniza de cascarilla de arroz utilizada en la investigación, carece de un proceso previo de secado y tamizado. Debido a las condiciones de granulometría y humedad del cemento se verifica la importancia del control en el proceso de alistamiento de la ceniza, siendo necesario realizar el proceso de molienda, tamizado y secado, con el fin de que sus partículas tengan el mismo tamaño del cemento y puedan reaccionar químicamente.

Las muestras suplementadas del 3% y 5% por CCA, presentan resistencia inferior a la muestra patrón con una diferencia del 2% y el 1% respectivamente. La manejabilidad de la mezcla no se dificulta y los cilindros no muestran inclusión de aire.

Del contenido de cemento de la mezcla de hormigón, se reemplazó en un 10% de la ceniza de cascarilla de arroz obteniéndose que, a las edades que se ensayan usualmente las probetas de concreto (7, 14 y 28 días), la resistencia mostrada genera un aumento del 10% en la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla patrón. Las muestras no presentan porosidad y permite la trabajabilidad de la misma, a diferencia de la mezcla del 15% presenta

una alta inclusión de aire en el espécimen.

En la determinación de la relación de Poisson y módulo de elasticidad se observa que el contenido de ceniza de cascarilla de arroz afecta la elasticidad del concreto, respecto a la prueba con el 10% donde, se obtiene la mayor resistencia, se muestra un aumento de elasticidad del 9% por encima del concreto convencional.

En la prueba con el 15%, se comprueba que supera más del 50% de la elasticidad del concreto convencional, esto se hace visible debido a la inclusión de aire de la probeta y del fisuramiento presente en la muestra.

5.2. Trabajos Futuros y Recomendaciones

En el desarrollo del presente estudio, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Realizar más probetas para tener una mejor determinación probabilística con diferentes proporciones, que permita analizar de mejor manera la trabajabilidad de la mezcla, hasta encontrar la dosificación idónea, teniendo en cuenta la incidencia del concreto expuesto a propiedades físicas: módulo de elasticidad y relación de Poisson.
- Profundizar más en el estudio y comportamiento del curado, es decir, ampliando la edad del curado.
- Los resultados obtenidos no garantizan el uso estructural, por lo que se requiere realizar más estudios que profundicen en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, analizando en más detalle los porcentajes donde aumenta la resistencia y afecta la elasticidad del concreto, en específico la relación de Poisson y módulo de elasticidad, requiere una mayor evaluación para que los resultados sean más concluyentes.

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

- Realizar un número mayor de probetas para tener una mejor determinación probabilística con diferentes proporciones, que permita analizar de mejor manera la trabajabilidad de la mezcla, hasta encontrar la dosificación idónea, teniendo en cuenta la incidencia del concreto expuesto a propiedades físicas: módulo de elasticidad y relación de Poisson.
- En la determinación de la relación de Poisson y módulo de elasticidad debido a la disponibilidad del extensómetro y compresómetro sólo se realizó a los cilindros en la edad de 7 días de curado, lo cual no es lo recomendable, ya que debe hacerse a los 28 días cuando el concreto alcanza su mayor resistencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DANE, «4° Censo nacional arrocero 2016,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/censo-nacional-arrocero/presentacion-4to-censo-nacional-arrocero-2016.pdf>. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [2] MinAgricultura, «AGRONET,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [3] Gutierrez R, 1998 Citado por Jaider Sierra, «Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia,» Sincelejo, 2009.
- [4] M. A. Novoa Galeano, L. D. Becerra León y M. P. Vásquez Piñeros, «Rice husk ash and its effect on adhesive mortars,» Bogotá, 2016.
- [5] Jaider Sierra Aguilar, «Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia,» Sincelejo, 2009.
- [6] Luis Alberto Toscano Morales, «Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa,» Guayaquil, 2009.
- [7] Varón Camargo Javier, «Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz,» El hombre y la maquina, Cali, 2005.
- [8] E. Gartner, «Industrially interesting approaches to “low-CO 2” cements,» *Cement and Concrete research*, vol. 34, n° 9, pp. 1489-1498, 2004.
- [9] B. B. Sabir, S. Wild y J. Bai, «Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete:

- Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico a review,*» *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, nº 6, pp. 441-454, 2001.
- [10] Ismail, Muhammad shoiaib; Waliuddin,A.M, «Costruction and Building Materials,» pp. 521-526, 1996.
- [11] J. G. Jurado Sarria, D. Sanchez de Guzman, J. D. Osorio Redondo y J. R. Niño Hernández, *Tecnología del Concreto*, Tercera ed., vol. 1, Bogotá: Asocreto, 2010.
- [12] S. Brunauer, «Tobermorite Gel - The Heart of Concrete,» *American Scientist*, vol. 50, nº 1, pp. 210 - 229, 1962.
- [13] A. Latorre Cañón, *La Industria del Cemento en Colombia*, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- [14] C. ASTM, *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*, 1998.
- [15] J. Ruiz Hidalgo, «Componentes y Procesos Químicos del Cemento,» 18 Mayo 2009. [En línea]. Available: http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_18/JAVIER_RUIZ_2.pdf.
- [16] Federación Nacional de Arroceros, Fedearroz, «Dinámica del Sector Arrocerero de los Llanos Orientales de Colombia,» Produmedios, Bogota, D.C, 2011.
- [17] R. Robayo y S. Vasto, «Comportamiento Mecánico de un Concreto Fluido Adicionado con Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA) y Reforzado con Fibras de Acero.,» *Revista de la construcción (scielo)*, vol. 12, nº 2, Noviembre 2013.
- [18] A. L. H. L. J. Allauca Luis, «Uso de sílica en hormigones de alto desempeño,» *Escuela superior politécnica del litoral*, 2009.
- [19] P. S. T. Puma Vera Rodolfo, «Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz, en la fabricación de cemento portland puzolánico tipo IP,» *Universidad nacional de abad del cusco*, 2014.

- [20] M. T. A. Doménica, «Uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de hormigones convencionales del ecuador,» *Universidad san francisco de Quito* , 18 Mayo 2017.
- [21] Norma técnica Colombiana, «Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto,» ICONTEC, Bogotá, 1992.
- [22] Norma Técnica Colombiana, «NTC 673, Concretos de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto,» ICONTEC, Bogotá, 2010.
- [23] Norma técnica Colombiana, «NTC 4025, Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión,» ICONTEC, Bogotá, 2006.
- [24] Fuentes N, Fragozo O, Vizcanio L, «Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural,» *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, 2015.
- [25] Rendón D, Ospina M, Mejía R, «Evaluación de la sílice obtenida de un subproducto industrial en pastas y morteros de cemento portland,» *Revista Informador Técnico*, 2009.
- [26] Karim M, Zain M, Jamil M, Islam M, «Strength of Mortar and Concrete as Influenced by Rice Husk Ash,» *World Applied Sciences Journal*, 2012.
- [27] Serrano T, Borrachero M, Monzó J, Payá J, , «Morteros aligerados con cascarilla de arroz: Diseño de mezclas y evaluación de propiedades.,» *Dyna*, 2012.
- [28] Hincapie A, Aguja E, «Agregado reciclado para morteros,» *Revista Universidad EAFIT*, Medellin, 2003.

Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico

ANEXOS

ANEXO A

Diseño de mezcla

DISEÑO DE MEZCLAS USANDO EL MÉTODO DEL COMITÉ 211 DEL ACI			
Fecha de Diseño :			
Realizado por :		A.R.M.R./W.R.C.C.	
Chequeado por :		Laboratorio de Ensayo de Materiales - UNC	
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES A USAR PARA LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO			
Cantera de donde se extraen los materiales :		RIO GUAYURIBA	
CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO			
Resistencia a la compresión especificada del Concreto (f'c)		210	kg / cm ²
Desviación estándar de antiguos ensayos realizados en esta Cantera (σ)		20	kg / cm ²
Resistencia promedio a la compresión del Concreto (f'cr)		237	kg / cm ²
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES			
AGREGADO FINO		AGREGADO GRUESO	
Peso específico de masa :	2,5	Tamaño máximo nominal (Pulg.) :	3/4
Absorción (%) :	0,50	Peso seco compactado (kg / m ³) :	1649,00
Contenido de Humedad (%) :	12,00	Peso específico de masa :	2,30
Módulo de finura :	2,40	Absorción (%) :	0,86
		Contenido de Humedad (%) :	0,70
CEMENTO		AGUA	
Tipo de Cemento Portland a usar :	ASTM Tipo 1 "sol"		
Peso Específico :	3,10		
DISEÑO DE MEZCLA			
Selección del Asentamiento :		Tipo de consistencia : Plástica	
		Asentamiento : 3 " a 4 "	
Tipo de Concreto a diseñar :		Concreto con aire incorporado	
Volumen unitario de Agua :		180,00	lt / m ³
Contenido de aire total :		4,00	%
Relación Agua / Cemento :		0,54	
Factor cemento :		Factor Cemento =	333,00 Kg / m ³
		Factor Cemento =	7,8 Bolsas / m ³
Contenido de Agregado Grueso	Agregado Grueso Seco Compactado por Unidad de Volumen del Concreto :		0,4 m ³
	Peso del Agregado Grueso :		659,6 Kg / m ³
Cálculo de los Volúmenes Absolutos de los materiales		Cemento :	0,107 m ³
		Agua :	0,18 m ³
		Aire :	0,040 m ³
		Agregado Grueso :	0,287 m ³
		Suma de Volúmenes :	0,614 m ³
Contenido de Agregado Fino		Volumen Absoluto de Agregado Fino	0,386 m ³
		Peso del Agregado Fino seco	964 Kg / m ³
Cantidad de materiales a ser empleados como valores de diseño po m3.		Cemento :	333,00 Kg / m ³
		Agua de diseño :	180,00 lt / m ³
		Agregado Fino seco :	964,00 Kg / m ³
		Agregado Grueso seco :	660,00 Kg / m ³
Cantidad de materiales en peso seco que se necesitan en una tanda de un saco de Cemento.		Cemento :	50,00 Kg / saco
		Agua de diseño :	27,03 lt / saco
		Agregado Fino seco :	144,74 Kg / saco
		Agregado Grueso seco :	99,10 Kg / saco
Proporción en peso de los materiales sin ser corregidos por Humedad del Agregado		Cemento :	1
		Agregado fino seco :	2,89
		Agregado grueso seco :	1,98
		Agua de Diseño :	27,0 lt / saco