

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ EN
LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETOS SIMPLES**

OBED ANGULO ZABALA

JUAN DAVID VIERA RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CÓRDOBA

2019

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ EN
LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETOS SIMPLES**

OBED ANGULO ZABALA

JUAN DAVID VIERA RODRÍGUEZ

Director:

Ing. YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA, M.Sc.

Co – Director:

Ing. JIMY UNFRIED SILGADO, PhD.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CÓRDOBA

2019

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA

Director

JORGE MARIO MENDOZA

Jurado

ARNOLD MARTÍNEZ

Jurado

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado principalmente a Dios por acompañarme durante mi carrera y permitirme culminar de forma exitosa este proyecto de vida.

A mis padres Wilder Viera y Elizabeth Rodríguez por su maravillosa educación y el apoyo infinito que siempre me demostraron. A mi hermana Paulina por ayudarme y luchar a mi lado. A mi tío Eris por creer en mí y su apoyo incondicional. A mis abuelos Juan y Andrés, que a pesar de perderlos a temprana edad sé que me cuidan y me guían. A mi amiga Marly por ayudarme en los momentos difíciles, a mis amigos y compañeros. Gracias por creer en este sueño.

Juan David Viera Rodríguez

Primeramente le dedico este proyecto a Dios, por permitirme culminar con éxito esta etapa de mi vida, seguidamente se lo dedico a mi madre y a mi padre, Eneida Zabala Benítez y Teófilo Angulo Ramos, a mi tías, Cielo, Nuris, Celia y Luz Elis Zabala, a mis hermanos y prima, Ovier Angulo, Oraine Angulo y Odeisis Zabala por acompañarme en este reto, que fue de mucha importancia para mí, y por ultimo a mis amigos y compañeros de la carrera que de una u otra forma contribuyeron a que hoy en día consiguiera este logro.

Obed Angulo Zabala

AGRADECIMIENTOS

Dios gracias por otorgarnos la sabiduría para llegar al final del camino y permitirnos alcanzar este nuevo logro.

A nuestros padres por el acompañamiento que siempre fue fuente de superación, a nuestros compañeros y maestros por el apoyo y sus consejos.

Al ingeniero Yahir González Doria por regalarnos su tiempo, guía y consejo para culminar este proyecto. Al ingeniero Luis Armando Espitia Sanjuán por su excelente disposición y carisma a la hora de colaborarnos en el laboratorio de materiales y procesos. A los jefes de taller, ingenieros Marco Osorio y Jaime Villada por su colaboración e interés.

A nuestras familias por el apoyo durante todo este tiempo, para llegar a obtener el título de Ingeniero Mecánico.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se realizó un estudio del comportamiento del concreto, con un diseño de mezcla de 17, 23 MPa; evaluando su densidad y la resistencia a la compresión, al reemplazar porcentajes en volumen de cemento Tipo I por 10, 20 y 30 % de ceniza de cascarilla de arroz (RHA), la cual es quemada en el proceso industrial de la arrocería INCOARROZ ubicada a las afueras de la ciudad de Montería del departamento de Córdoba, se realizó la caracterización de la ceniza y se encontró que posee un contenido de Oxido de Sílice de un 89,20%, un tamaño de partícula máximo encontrado de 155,28 μ m y un porcentaje de 25,4% de sílice amorfa. las probetas se ensayaron bajo la norma ASTM C39/C39M (2014) creando grupos de muestras con edades de curado de 7, 14 y 28 días. se compararon los resultados obtenidos con los valores de resistencia a la compresión realizados a probetas sin adición del desecho agrícola. Luego de realizar los ensayos se encontró que la resistencia a la compresión de las probetas con mayor contenido de RHA fue disminuyendo de manera gradual, con respecto a las probetas de control, obteniendo la menor caída en el grupo con 10% de ceniza de cascarilla de arroz; se observó que la densidad de la mezcla de 1 m³ de concreto disminuyó con respecto a cada porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz, para el caso de 30% de RHA el peso de la mezcla descendió en un 9,10% que equivalen a 205 kg, cuando el peso de la mezcla sin adición de ceniza es de 2256 kg.

Palabras claves: cascarilla de arroz, resistencia a la compresión, ceniza de cascarilla de arroz (RHA).

ABSTRACT

In this research work a study of the behavior of concrete resistance was carried out, with a mix design for a ultimate resistance of 17, 23 MPa. evaluating its density and compressive strength, replacing volume percentages of Type I cement with 10, 20 and 30% rice husk ash (RHA), which is burned in the industrial process of the INCOARROZ rice cooker located on the outskirts of the city of Montería in the department of Córdoba, the ash characterization was performed and it was found that it has a silica oxide content of 89.20%, a maximum particle size found of 155.28 μm and a percentage of 25.4% amorphous silica, The specimens were tested under ASTM C39 / C39M (2014) creating groups of samples with curing ages of 7, 14 and 28 days, the results obtained were compared with the values of compressive strength performed on specimens without the addition of agricultural waste. After performing the aforementioned tests, it was found that the compressive strength of the specimens with the highest RHA content gradually decreased, with respect to the control specimens, obtaining the lowest drop in the group with 10% rice husk ash; it was observed that the density of the mixture of 1 m^3 of concrete decreased with respect to each percentage of rice husk ash, in the case of 30% RHA, the weight of the mixture decreased by 9.10%, equivalent to 205 kg, when the weight of the mixture without the addition of ash is 2256 kg.

Keywords: rice husk, compressive strength, rice husk ash (RHA).

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	17
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GENERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. REVISIÓN LITERARIA	21
3.1. CONCRETO	21
3.1.1. Componentes del concreto.....	22
3.1.1.1. Cemento.....	22
3.1.1.1.1. Cemento Portland.....	22
3.1.1.2. Grava y Arena.....	23
3.1.1.3. Agua.....	24
3.2. CASCARILLA DE ARROZ	22
3.2.1. Ceniza de Cascarilla de Arroz - Rice Husk Asch (RHA).....	25
3.2.2. Reacción puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz.....	27
3.3. CONCRETOS CON PORCENTAJE DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ	28
4. METODOLOGÍA	33
4.1. OBTENCIÓN, DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ	33
4.1.1. Obtención de la ceniza de cascarilla de arroz.....	33

4.1.2.	Determinación de la densidad.....	34
4.1.3.	Ensayos de caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz y el cemento.....	37
4.2.	DISEÑO DE EXPERIMENTO.....	38
4.3.	ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	43
4.3.1.	Material para la preparación del concreto y diseño de mezclas.....	46
4.3.2.	Fabricación de las probetas de concreto para realizar los ensayos de compresión.....	48
4.4.	ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO CON Y SIN ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	51
4.5.	ENSAYO DE COMPRESIÓN EN PROBETAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	52
4.6.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	54
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
5.1.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	56
5.2.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Y EL CEMENTO USADO.....	57
5.3.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	62
5.3.1.	Resultados del análisis granulométrico del agregado fino y grueso en el concreto.....	62

5.3.2.	Fabricación de las probetas de concreto para realizar los ensayos de compresión.....	64
5.4.	ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO CON Y SIN ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	69
5.5.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS PROBETAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	72
5.5.1.	Efecto de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a compresión de concretos.....	75
5.5.2.	Análisis de falla en las probetas de concreto ensayadas en resistencia a compresión.....	79
5.6.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR EL MÉTODO DE VARIANZAS (ANOVA).....	82
6.	CONCLUSIONES	91
7.	RECOMENDACIONES	92
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
9.	ANEXOS	97

LISTADO DE ANEXOS

- A1: Densidad de todas las probetas de concreto sometidas al ensayo de compresión
- A2: Granulometría de la arena del Rio Sinú utilizada para la fabricación de las probetas de concreto con adición de RHA.
- A3: Cálculo granulométrico del tamaño máximo nominal de la grava del rio Sinú usada en la fabricación de las probetas de concreto con adición de RHA.
- A4: Densidad promedio de las probetas sometidas a compresión a las tres edades de curado
- A5: Resistencia a la compresión de cada una de las probetas ensayadas
- A6: Resistencia a la compresión promedio para las 3 edades de curado
- A7: Curva de resistencia a compresión como función del porcentaje de volumen de RHA, adicionado a la mezcla de concreto para 7 Y 14 días de curado.

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 3.1. Propiedades físicas y químicas de la RHA.
- Tabla 4.1: Densidad relativa del agua a diferentes temperaturas.
- Tabla 4.2. Técnicas e información necesarias para la caracterización de los materiales.
- Tabla 4.3: Análisis de varianza para el modelo de efectos fijos de clasificación en un sentido.
- Tabla 4.4: Valores de resistencia a la compresión para diferentes edades de curado.
- Tabla 4.5: Variables necesarias para hallar el número de réplicas para el experimento.

Tabla 4.6: Variación del porcentaje en volumen de cemento y ceniza de cascarilla de arroz incorporado a la mezcla en la fabricación de las probetas.

Tabla 4.7: Total de probetas con adición de RHA fabricadas para ensayo a compresión.

Tabla 4.8: Edades y tolerancia de ensayos según norma ASTM C39 2014

Tabla 5.1: Densidad obtenida y teórica de la RHA.

Tabla 5.2: Composición química del cemento obtenida por fluorescencia.

Tabla 5.3: Composición química de la RHA por el método de fluorescencia

Tabla 5.4: Propiedades del agregado grueso, agregado fino, cemento, y agua utilizado para la realización de probetas de concreto.

Tabla 5.5: Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Tabla 5.6: Cantidad y proporciones de materiales empleados para obtener 1 m^3 de concreto con resistencia última de 2500 psi (relación agua/cemento de 0,65) y el porcentaje en masa.

Tabla 5.7: Porcentaje de RHA añadida frente al porcentaje de reducción en la densidad de las probetas de concreto.

Tabla 5.8: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

Tabla 5.9: Porcentaje de resistencia a compresión alcanzado por las probetas con adición de RHA respecto a la resistencia de diseño a los 28 días de curado.

Tabla 5.10: Medias de la resistencia a la compresión para 7 días de curado en MPa.

Tabla 5.11: Análisis de varianza de Microsoft Excel para resistencia a compresión de 7 días de curado.

Tabla 5.12: Diferencias de las medias de cada grupo entre sí para 7 días de curado.

Tabla 5.13: Resistencia a compresión para 14 días de curado (MPa).

Tabla 5.14: Análisis de varianza de Microsoft Excel para resistencia a compresión de 14 días de curado.

Tabla 5.15: Diferencias de las medias de cada grupo entre sí para 14 días de curado.

Tabla 5.16: Resistencia a compresión para 14 días de curado (MPa).

Tabla 5.17: Análisis de varianza de Microsoft Excel para resistencia a compresión de 28 días de curado.

Tabla 5.18: Diferencias de las medias de cada grupo entre sí para 28 días de curado.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 4.1: A) Pirómetro óptico. B) Medición de la temperatura con pirómetro óptico. C) Horno incinerador industrial SuperBrix modelo TEO IV 3000. D) Lugar de almacenamiento de la RHA en planta.

Figura 4.2. a) Picnómetro 50ml b) Balanza OHAUS-Pioneer, con capacidad máxima de 210 g y resolución de 0,0001 g.

Figura 4.3: a) Vaciado de la muestra. b) Muestra con la ceniza incorporada.

Figura 4.4: Variables de influencia del experimento.

Figura 4.5: Curvas características de operación para el análisis de varianza del modelo de efectos fijos.

Figura 4.6: Agregados grueso y fino utilizados para la preparación de concreto.

Figura 4.7: Moldes cilíndricos en PVC usados en la fabricación de las probetas.

Figura 4.8: Herramientas (palaustre, llana y varilla de acero) utilizadas durante el desarrollo del proyecto.

Figura 4.9: Máquina universal de ensayos MTS Criterion modelo 45, con capacidad máxima de carga de 300 kN.

Figura 5.1: Difractograma de rayos x de la RHA.

Figura 5.2: Morfología de la RHA por microscopia electrónica de barrido.

Figura 5.3: Curva granulométrica del agregado fino usado en la fabricación de las probetas de concreto con RHA.

Figura 5.4: Curva granulométrica del agregado grueso usado en la fabricación de las probetas de concreto con RHA.

Figura 5.5: Curvas de requerimientos de agua de mezclado.

Figura 5.6: Curvas de resistencia a la compresión y la relación a/c.

Figura 5.7: Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (b/b_0).

Figura 5.8: Proceso de mezclado de los agregados del concreto con adición de RHA.

Figura 5.9: Proceso de fabricación de las probetas, desmonte y curado.

Figura 5.10: Grafica de la densidad de las probetas de concreto en función del porcentaje en volumen de RHA adicionada.

Figura 5.11. Densidad para 28 días de curado en las diferentes mezclas de concreto con adición de RHA.

Figura 5.12: Valores promedio de resistencia a compresión para la muestra de control y las diferentes probetas de concreto con adición de RHA para 3, 7 y 28 días de curado.

Figura 5.13: Curva de resistencia a compresión como función del porcentaje de volumen de RHA, adicionado a la mezcla de concreto para 28 días de curado.

Figura 5.14: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para las probetas de concreto con diferentes porcentajes de RHA.

Figura 5.15: Falla tipo 2, presentada en una probeta con 10% de adición de ceniza.

Figura 5.16: Falla tipo 3, presentada en una probeta con 20% de adición de ceniza

Figura 5.17: Falla tipo 4, presentada en una probeta con 30% de adición de ceniza.

1. INTRODUCCIÓN

La producción mundial de Arroz durante el año 2017 fue en promedio de 759,6 millones de toneladas (FAO 2018). Según DANE por medio del censo de la federación nacional de arroceros (FEDEARROZ), en el País en el año 2016 se registró una producción total aproximada de 2.971.971 toneladas de arroz. La producción en el departamento de Córdoba con respecto al país fue del 1,6%, con una producción total promedio de 47 551.6 toneladas de Arroz en el año 2016. La federación nacional de arroceros comparó los resultados del anterior censo en el año 2007, donde se produjo un crecimiento del 45,6% en la producción de Arroz.

Entre un 20 y un 30% del grano de arroz queda como cascarilla o biomasa residual (Siddique et al. 2015) y un 20% de esta después de su incineración se transforma en ceniza “Rice Husk Ash” (RHA) por sus siglas en inglés (Anwar et al., 2001); así, solo en el departamento de Córdoba en el año 2016, se tendrían 2.375 toneladas de RHA. Cuando la cáscara de arroz es quemada a cielo abierto, no existe un control de dicha quema y la ceniza resulta compuesta mayormente por sílice cristalina con una concentración entre 80-85% (Siddique et al. 2015). Esta sílice cristalina contamina el aire y puede ser causante de la enfermedad conocida como silicosis, además de producir modificaciones del genoma y cáncer (Rodríguez de Sensale et al., 2013). En muchos escenarios el desecho producto de la molienda del grano es quemado de forma controlada en hornos o calderas para el aprovechamiento de su poder calorífico, produciendo gases de efecto invernadero.

Por otro lado, la producción mundial de cemento en el año 2016 según ASOCEM fue aproximadamente 4.129 millones de toneladas, esto denota un elevado y sostenido

crecimiento en el impacto que se genera sobre el medio ambiente (Oficemen, 2006), Ya que la producción de cemento genera toneladas de residuos, consideradas potenciales contaminantes y pueden causar grandes problemas de salud tanto en humanos como animales (Favier et al., 2013).en la fabricación de Clinker debido al proceso de calcinación, la industria del cemento es también un gran emisor de CO_2 , contribuyendo con un 5% del total de emisiones globales en dióxido de carbono que provienen directamente de la combustión de combustibles fósiles y del calcinado de la piedra caliza en la mezcla cruda (Hendriks, 2003).

La construcción en el departamento de Córdoba ha venido creciendo exponencialmente y en la ciudad de Montería su capital, aún más. Según cifras de la curaduría urbana durante los años 2013 y 2014, se expidieron un aproximado de 1421 permisos para nuevas construcciones. El área urbana de la ciudad crece en promedio 2% por persona cada año, lo que significa que el tamaño de la ciudad se triplicara para el año 2040 (García 2014) y por lo tanto, una demanda alta en el consumo de materiales de construcción.

En los últimos años se han venido realizando estudios con biomásas residuales en concretos, como es el caso de Saeid Hesami, S. A. (2014), donde produjeron concreto permeable mediante el análisis de propiedades físicas, químicas y mecánicas con la adición de ceniza de cascarilla de Arroz, en el cual observaron que el uso de la RHA, como un reemplazo parcial de cemento aumenta la resistencia a la compresión y la fuerza normal del concreto, las cuales dependen de las propiedades puzolánicas de la ceniza usada.

Muthukrishnan et al (2019) investigaron el uso del tratamiento térmico a la ceniza de cascarilla de Arroz (RHA) para obtener cenizas con propiedades físicas y químicas

mejoradas, para reducir el contenido de cemento en el mortero en un 20% en peso, se encontró que la adición de ceniza de combustión controlada mejora significativamente la resistencia debido al efecto de curado interno, la RHA de combustión no controlada muestra características de material de baja resistencia.

Vieira et al. (2019) analizaron el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto de alta resistencia con ceniza de cascarilla de arroz, evaluando principalmente la importancia del tamaño de partícula del RHA, la estructura porosa y el porcentaje de ceniza. el tamaño de partícula más fino aumento la resistencia a la compresión a los 28 días, y las partículas gruesas disminuyeron la resistencia a la compresión, debido a que hubo una disminución en la densidad de empaquetamiento de las partículas.

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de la ceniza de cascarilla de Arroz en la resistencia a la compresión de concretos simples. En este orden de ideas, lo que se plantea es reemplazar porcentajes en volumen de cemento por ceniza de cascarilla de Arroz, ya que la RHA es un material altamente puzolánico y amorfo (Tashima et al., 2004), ideal para llevar a cabo la reacción puzolana que se genera en las mezclas de concreto, con el fin de reducir los impactos ambientales causados por la producción de cementos y hacer uso de la RHA producto de la quema de la cascarilla de Arroz.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a la compresión de concretos simples.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la ceniza de cascarilla de Arroz usando difracción de rayos x, fluorescencia de rayos x y microscopia electrónica de barrido.
- Realizar el diseño de mezcla acorde a la norma ASTM C33 (2014) para granulometría de los agregados.
- Fabricar las probetas bajo la norma ASTM-C31/C31M (2014) teniendo en cuenta la variación de los porcentajes en volumen de cemento y ceniza de cascarilla de Arroz.
- Realizar ensayos de resistencia a la compresión bajo la norma ASTM C39/C39M (2014).

3. REVISIÓN LITERARIA

3.1. Concreto

El concreto es un material muy parecido a una piedra debido a que se obtiene por una mezcla hecha cuidadosamente con proporciones de cemento (usualmente Portland), agregados como la arena, grava, agua y aire. (Cachay, 2003).

Esta mezcla crea una pasta de fácil manipulación para lograr dimensiones que se necesiten. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Las principales características que se deben tener en cuenta del concreto son la consistencia de la pasta o también llamado grado de fluidez del material en estado fresco, el cual se refleja en la manejabilidad de la mezcla, su docilidad, asentamiento y otros. Estos conceptos engloban la posibilidad de colocar el concreto con mayor o menor facilidad en donde se quiera. La segunda característica de mayor relevancia es el grado de endurecimiento y la resistencia que será capaz de adquirir el concreto.

La manera de medir la fluidez es por ensayos que evalúan la plasticidad de la mezcla y la resistencia mecánica de compresión y tracción, obtenida se medirá por ensayos que se deben realizar a probetas normalizada. El concreto se utiliza comúnmente en elementos estructurales de edificaciones como muros, cerramientos, columnas, vigas, represas, acueductos, pavimento, adoquines, canales, túneles, y muchas aplicaciones más. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2014)

3.1.1. Componentes del concreto

3.1.1.1. Cemento

El cemento es un material compuesto de piedra caliza y arcillas con propiedades de adherencia y cohesión, que se utiliza para la realización de diferentes productos como el concreto, hormigón, y los morteros. Debido a que este produce el fraguado y el endurecimiento que es de gran importancia para obtener estructuras estables, al entrar en contacto químico con el agua y demás agregados como la grava y la arena, las cuales, se necesitan para las estructuras en la construcción, dando lugar a productos con resistencia mecánicas considerables; sobre todo la resistencia a la compresión. (Crespo & Salamanca Ozuna, 2006)

3.1.1.1.1. Cemento Portland

El cemento Portland se compone por un material finamente pulverizado de color grisáceo llamado Clinker, conformado por calizas que proporcionan la Cal (C_aO), las arcillas y los equitos que proveen el Óxido de Silicio (SiO_2) y la alúmina u Oxido de Aluminio (Al_2O_3) respectivamente. Estos materiales se muelen, se mezclan y se funden en hornos para luego ser nuevamente molidos y así obtener el Clinker. Existen diferentes tipos de cemento Portland que son especificados en la norma ASTM C-150-94 que son:

TIPO 1: Se usa de manera general sin ninguna propiedad que le dé algo especial.

TIPO 2: Posee algo de resistencia al ataque de los sulfatos, con calor de hidratación moderada.

TIPO 3: Adquiere una resistencia a temprana edad y un elevado calor de hidratación.

TIPO 4: Es de bajo calor de hidratación.

TIPO 5: Posee una alta resistencia al ataque de los sulfatos.

3.1.1.2. Grava y Arena

Los agregados en el concreto son de mucha importancia, ya que estos representan el 70% al 85% del peso total de la pasta, por esta razón las propiedades de los inertes (como pueden ser llamados), resulta importante en la calidad final que se pueda obtener en la mezcla, por tanto, el desarrollo de ciertas características del concreto como la trabajabilidad, la adherencia con la pasta, la exigencia del porcentaje de cemento necesario y las resistencias mecánicas; pueden ser influenciadas por las características que tengan los agregados. Suele considerarse dos grupos de agregados definidos por la granulometría de cada uno; el primero está formada de partículas muy finas denominadas arena, provienen de yacimientos que pueden encontrarse lejos de flujos de agua, pero que pudieron alguna vez ser caudales de ríos o afluentes como lagos en anteriores eras geológicas; sin embargo, es común que se tomen de sitios cercanos a los lagos, riachuelos entre otros. El otro conformada por granos grandes, que pueden ser trozos de roca triturada o granos naturales redondeados definidos debido al movimiento de las aguas y el arrastre de estos granos; este tipo de agregados son fraccionados por el tamaño que presenta la partícula y suelen ser llamados por esas diferencias como piedra picada, grava, gravilla, canto rodado, y chancada. (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2014)

Las gravas que son de mayor tamaño poseen más de 4,76 milímetros de diámetro y las arenas que son de menor tamaño están entre 0,074 y 4,76 milímetros de diámetro. Estos agregados son utilizados en la fabricación de ladrillos, morteros (argamasas), cemento, concreto (hormigón), enlucido, estuco, tendido, materiales para pavimentos y otros materiales para la construcción.

3.1.1.3. Agua

El papel del agua en la elaboración del concreto es de suma importancia, ya que la ésta permite la hidratación del cemento y hace la mezcla manejable. La cantidad utilizada en relación Agua Cemento (A/C) depende de la manejabilidad y las resistencias finales de este. La cantidad de agua que se requiere para la hidratación se encuentra entre el 25% y 30% de la masa del cemento (Rivera, 2010)

3.2. Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz es la capa delgada de color amarillento que recubre el grano de arroz, se convierte en un desperdicio agrícola generado en el proceso de molienda del arroz; se ha encontrado que la cascarilla pasa de 5% a 30% de sílice en peso, mostrando que el contenido de sílice en la ceniza de este producto orgánico puede ser alto, ya que, la sílice se refleja en material inorgánico como lo es la ceniza. Debido a que el arroz es uno de los alimentos más populares y abundantes en el mundo, la producción de la cascarilla se puede estimar en $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales; la producción se concentra en Asia, principalmente en China, esta zona consume el 80% de la producción mundial, seguido de Medio Oriente y Latinoamérica, siendo los países Brasil, Perú y Colombia los que poseen mayor número de hectáreas sembradas de este cereal. En Colombia se encuentran 176 000 hectáreas sembradas con una producción estimada en 2,6 millones de toneladas de arroz como cosecha. El uso de la cascarilla de arroz en la industria es básicamente en aplicaciones como combustibles sólidos, camas y alimentos concentrados para animales, material para abonos, insumos para construcción y productos de compostaje. Se dice que la cascarilla de arroz es rica en dióxido

de sílice, el cual es el componente que se encuentra en el cemento tradicional. (Gaviria, Rengifo, Velásquez, Yanguas, & Salazar, 2018).

3.2.1. Ceniza de Cascarilla de Arroz - Rice Husk Ash (RHA)

La ceniza de la cascarilla de arroz es un subproducto que se presenta en el proceso de molienda del arroz en la industria, se dice que el 20% de los 500 millones de toneladas de arroz que se producen en el mundo se convierte en la cascarilla que es utilizada como aprovechamiento energético para el secado del grano y el sancochado en los hornos del mismo; el porcentaje de ceniza obtenido de la quema de la cascarilla es de un 20% a un 30%, la eliminación de la ceniza se hace dificultosa, pues, el porcentaje de sílice contenido en esta ceniza es alto, esto hace que la resistencia a la descomposición natural también lo sea. La combustión controlada de la cascarilla, es uno de los factores que mejoran el uso de este material para otros procesos como la obtención de materia puzolánica que pueda servir para aplicaciones con cemento, ya que si la ceniza es quemada a temperaturas inferiores a 500° C y 850° C produce una ignición incompleta que conlleva a que queden partículas de carbono que no se quemó, reduciendo la actividad puzolánica de la ceniza producida, además, que debido a su densidad relativamente baja las partículas de RHA se transportan fácilmente por el aire lo que lleva a una contaminación del medio ambiente. (Muthukrishnan, Gupta, & Wei Kua, 2019) Por esta razón la temperatura de combustión debe encontrarse entre 500° C y 850° C, ya que, el porcentaje de sílice, la reducción del contenido de carbono, la estructura de la sílice que contiene la RHA, la finura, la pérdida por ignición, y el crecimiento de la carga y la actividad puzolánica dependen de su técnica de incineración, temperatura y tiempo de combustión. (Noaman, Karim, & Islam, 2019). Las principales propiedades de la RHA se muestran a continuación en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades físicas y químicas de la RHA

<i>Chemical properties</i>									
<i>Constituent</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>Loss on ignition</i>
<i>Mehta (1992)</i>	87.2	0.15	0.16	0.55	0.35	0.24	1.12	3.68	8.55
<i>Zhang et al. (1996)</i>	87.3	0.15	0.16	0.55	0.35	0.24	1.12	3.68	8.55
<i>Bui et al. (2005)</i>	86.98	0.84	0.73	1.40	0.57	0.11	2.46	-----	5.14
<i>Physical properties</i>	<i>Specific Gravity ($\frac{g}{cm^3}$)</i>		<i>Mean particle size (um)</i>				<i>Fineness: Passing 45 um (%)</i>		
<i>Mehta (1992)</i>	2.06		-----				99		
<i>Zhang et al. (1996)</i>	2.06		-----				99		
<i>Bui et al. (2005)</i>	2.10		7.4				-----		

Fuente: Alireza et al. (2010)

3.2.2. Reacción puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz

La reactividad alta puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz (RHA), depende en gran medida de la cantidad de sílice amorfa que esta posea, para que esto se llegue a dar, la quema debe ser controlada entre 500°C y 700°C, la ceniza que se obtendrá será en su mayoría amorfa; si se quema a 900°C se convertiría en ceniza cristalina inerte insuficiente para la reacción puzolánica. Además, la finura del tamaño de la partícula también incide en la reacción puzolánica del RHA, se dice que la partícula debe tener un tamaño inferior a 8 µm con el propósito de que al momento de realizar la pasta, la partícula ocupe los espacios vacíos pequeños que queden, aumentar la densidad y reducir la porosidad de la mezcla. La RHA que contiene mayor cantidad de carbono residual debido a que en su quema sufrió de

combustión incompleta son menos reactivos, de color oscuro y con mucha porosidad que hace que se necesite mayor cantidad a la hora de preparar la pasta. (Adesina & Olutoge, 2019)

Sin embargo, para que RHA se comporte de manera puzolánica se necesita que contenga Hidróxido de Calcio (CH), dado que la hidratación del cemento debe tener una cantidad específica de este componente para producir Minerales Cementosos (C-S-H) óptimos. Entonces, para obtener más CH se debe pensar en la mezcla con el RHA la cal, que esencialmente contiene CH, ya que, la sílice amorfa de la ceniza de la cascarilla de arroz reacciona con la cal de mejor forma que las de forma cristalina. De algunos datos de resultados de la reacción entre el RHA y el CH indica que la cantidad de CH por el 30% de ceniza en la pasta de cemento comienza a disminuir después de 3 días y por 91 días lo alcanza casi en cero, mientras que, en la pasta de control del experimento mencionado es considerablemente ampliada con el tiempo de hidratación que esta tenga, esto indica que la adición de puzolana disminuye el CH formado por la reacción puzolánica como tal, produce más C-S-H que puede mejorar la fuerza y la durabilidad del hormigón. Alireza et al (2010).

3.3. Concretos con porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz

Salas et al. (1986) realizaron estudios para producir con cierta precisión y en condiciones controlables suficiente ceniza de cascarilla de arroz para la realización de ensayos en morteros y hormigones. La ceniza estudiada presenta un peso específico de $2,05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ y una densidad aparente de $0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ para el peso específico. Se fija el peso específico de las puzolanas entre $2,10$ a $2,40 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. El peso específico y la densidad aparente de la ceniza revisten importancia en las posibilidades de su utilización como adición activa al cemento y

al hormigón por su influencia en la densidad de los mismos, lo cual hace variar sus condiciones de empleo y expendio.

Jauberthiea et al. (2003) Evaluaron las propiedades de la sílice de cascarilla de arroz en cementos ligeros. Se muestra que la sílice amorfa se encuentra en la cáscara del arroz que tiene un efecto beneficioso sobre durabilidad de concretos ligeros, tienen el efecto de mejorar la resistencia del material y Mejora ciertas características de peso ligero del hormigón.

Estudios reportan la evolución de la fuerza y las propiedades fisicoquímicas de morteros ligeros que contienen cenizas de cáscaras del arroz. Estas se conservan a temperatura del aire ambiente y 50% de humedad relativa (RH) o 20 y 95% RH. Lo que permite el estudio del efecto puzolánico y la durabilidad del efecto de la RHA, en cementos ligeros. Las propiedades físicas de las muestras al final del período de prueba, la densidad, Módulo Young, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, Las fuerzas de resistencia a la flexión del 95% RH muestra que son inferiores al 50% RH, mientras que sus fuerzas compresivas son más altas, los especímenes almacenados en un 50% RH muestra un módulo elástico más dúctil en flexión y compresión. Se puede observar que en la resistencia a la flexión la fuerza es mayor para el 50% RH y que hay una leve prolongación de la zona plástica después de rendimiento.

Chagas et al. (2008) emplearon la ceniza de cascarilla de arroz como material suplementario en cementos, para la mejora en propiedades físico-químicas, mecánicas y de durabilidad de hormigones y concretos. El uso de reactivo RHA como material complementario en el cemento puede conducir a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono causado por la producción cemento.

Ramezaniapour et al. (2009) Discutieron las propiedades de los hormigones con la incorporación de cenizas de cascarilla de arroz. Existen ciertos componentes que potencialmente puede mejorar la reactividad puzolánica de las propiedades del hormigón. Uno de los más frecuentes es la cáscara del arroz, ya que está disponible en grandes cantidades y contiene una gran cantidad de sílice. Vale la pena mencionar que el uso de RHA en concreto puede conducir a la trabajabilidad mejorada, calor reducido, la permeabilidad reducida, y fuerza mayor a edades más tempranas. Dependiendo del método de producción, la utilización de ceniza de cascarilla de arroz como un material puzolánico en cemento y hormigón proporciona varias ventajas, tales como mejorar la resistencia y propiedades de durabilidad.

Alireza et al. (2010) Analizaron el efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en las propiedades del mortero y el concreto, observaron que el uso de RHA en concreto ha sido asociado con: Aumento de fuerzas compresivas y flexurales, permeabilidad reducida, mayor resistencia al ataque químico, mayor durabilidad, reduce los efectos de la reactividad álcali-sílice, presenta una reducida contracción debido a partículas de embalaje, haciendo concretos densos y aumenta la trabajabilidad del hormigón.

Saeid Hesami, S. A. (2014). Produjeron concreto permeable, mediante el análisis de propiedades físicas, químicas y mecánicas con la adición de ceniza de cascarilla de arroz, observaron que el uso de la RHA, como un reemplazo parcial de cemento, aumenta la resistencia a la compresión, fuerza normal del concreto y su valor óptimo esta entre un 10% y 30%. Diversos estudios han sugerido agregar el 10% de RHA como porcentaje óptimo para lograr la máxima resistencia a la compresión. Sin embargo, estas diferencias dependen en

gran medida en las propiedades puzolánicas. Por lo tanto, se sugiere un rango óptimo de 10 – 15% de adición.

Mastali et al. (2016) estudiaron La resistencia al impacto y las propiedades mecánicas del hormigón armado reforzado con fibra de vidrio reciclado (GFRP), los especímenes fueron reforzados con GFRP reciclado en tres grupos, incluyendo fracciones de volumen de fibra de 0,25%, 0,75% y 1,25%. Los resultados del estudio mostraron que la adición de fibras de vidrio recicladas da como resultado la mejora de la resistencia al impacto y las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante reforzado con fibra de vidrio.

Vieira et al. (2019) analizaron el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto de alta resistencia con ceniza de cascarilla de arroz (RHA) evaluando principalmente la importancia del tamaño de partícula del RHA, la estructura porosa y el porcentaje de ceniza, utilizando isoterma de absorción N_2 y evaluando su efecto sobre la hidratación por medio de calorimetría isotérmica; observaron que los poros de RHA actuaron como un agente de curado interno debido a que la cinética de hidratación de la pasta mejoró, el volumen de masa disminuyó e influyó a una disminución de la condición puzolánica de pasta, en el momento de la molienda, el tamaño de partícula más fino que quedó aumentó la resistencia a la compresión a los 28 días, a los 91 el reemplazo empleado adicionado con el tamaño de la partícula fino evidenció un aumento de la resistencia a la compresión y se demostró que las partículas gruesas disminuyeron la resistencia a la compresión a los 28 días, debido a que hubo una disminución en la densidad de empaquetamiento de las partículas.

Adesina et al. (2019) realizaron un estudio de la mezcla de ceniza de cascarilla de arroz (RHA) con cal para reemplazar el cemento convencional en porcentajes para la construcción

de concreto y así, observar las propiedades estructurales del hormigón; encontrando que la reacción puzolánica mejora con la presencia de la cal, mejorando a su vez la resistencia del hormigón, la mezcla RHA con cal puede servir como una alternativa para el reemplazo de porcentaje de cemento convencional en concreto, hasta en un 25% de reemplazo de cemento, aunque el desarrollo temprano de la fuerza se vio afectada por la lixiviación de la cal. Noaman et al (2019) estudiaron el efecto puzolánico (PE) y el efecto de relleno (FE) de la ceniza de la cascarilla del arroz (RHA) en la estructura del hormigón de ladrillo agregado (BAC) y sus propiedades mecánicas: reemplazando RHA por cemento con porcentajes de 0-25%, dando como resultado que la resistencia a la compresión de BAC debido al efecto de relleno disminuye de un 58,56%-94,62% en comparación con el efecto puzolánico de RHA para un reemplazo de cemento del 10%-25%, mientras que con el 15% de reemplazo se evidenció la máxima resistencia a la compresión debido al efecto puzolánico de RHA; se encontró que BAC con 10%-20% muestra una microestructura densa y homogénea, que demuestra que la inclusión de RHA como reemplazo parcial del cemento posee un efecto puzolánico de importancia.

Muthukrishnan et al (2019) investigaron el uso del tratamiento térmico a la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) para obtener cenizas con propiedades físicas y químicas mejoradas, para reducir el contenido de cemento en el mortero en un 20% en peso, además, de la combinación de biochar de cascarilla de arroz (RHB); se encontró que la adición de RHB mejora significativamente la resistencia debido al efecto de curado interno, la RHA de combustión no controlada muestra características de material de baja resistencia, la combinación de RHA Y RHB elimina la contracción autógena por un periodo interesante, y que el RHA de grado industrial presenta un mejor rendimiento general que otras formas.

4. METODOLOGÍA

4.1. Obtención, determinación de la densidad y ensayos de caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz.

4.1.1. obtención de la ceniza de cascarilla de arroz (RHA).

Para este trabajo se usó ceniza de cascarilla de arroz proveniente de la producción arroceras del departamento de Córdoba. La cual se obtiene del proceso de quemado en un horno incinerador industrial SuperBrix modelo TEO IV 3000 de la serie 24085 – 25 del año 2016 (ver figura 4.1C) que se usa para el secado de las piscinas de arroz. El horno es de propiedad de la empresa Incoarroz Ltda. ubicada en la ciudad de Montería Córdoba, en el kilómetro 6 vía al municipio de Cereté. La incineración de la cascarilla se realiza bajo condiciones de presión atmosférica con temperaturas que oscilan entre los 720°C y 760°C como se muestra en la figura 4.1.A. La temperatura fue medida usando el pirómetro óptico del laboratorio de materiales y procesos del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba (ver figura 4.1B). La muestra fue obtenida un día soleado en el horario de las 10 de la mañana, estando en operación el horno y las muestras fueron empacadas directamente de la zona de desecho, en bolsas plásticas para no ser contaminadas (ver figura 4.1D).



Figura 4.1: A) Pirómetro óptico. B) Medición de la temperatura con pirómetro óptico. C) Horno incinerador industrial SuperBrix modelo TEO IV 3000. D) Lugar de almacenamiento de la RHA en planta.

Fuente: Autores.

4.1.2. Determinación de la densidad.

Para la determinación de la densidad relativa de la ceniza de cascarilla de arroz se hizo uso de la norma UNE 103-302-94 “Determinación de la densidad relativa de materiales particulados y suelos” para llevar a cabo este proceso fueron necesarios los siguientes materiales: Picnómetros de Gay-Lussac de 50 ml, Balanza de precisión 0.001 g, Agua

destilada y muestra de RHA. Este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de química general de la universidad de Córdoba.

Para determinar la densidad relativa con respecto a la del agua a la temperatura del ensayo (G_T) se hizo uso de la ecuación 4.1.

$$G_T = \frac{M_3 - M_2}{(M_3 - M_2) + (M_1 - M_4)} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde las masas mostradas son calculadas en el laboratorio haciendo uso del picnómetro en cuatro pasos como sigue:

- En este paso se llenó el picnómetro con agua destilada hasta la marca, se introduce el cuello verticalmente con un movimiento rápido para que el agua ascienda por el capilar del cuello (ver figura 4.2a) una vez que el cuello esté bien encajado, se enrasó el picnómetro retirando el exceso de agua y se procedió a pesar en la balanza de sensibilidad 0.001 g (ver figura 4.2b). Esta masa es M_1 .

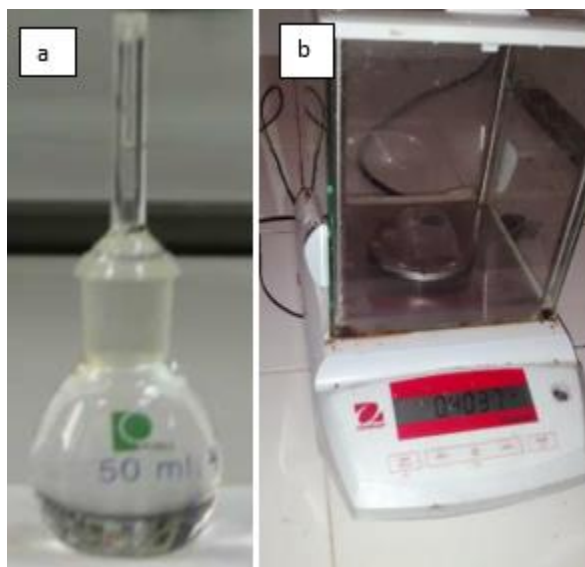


Figura 4.2. a) Picnómetro 50ml b) Balanza OHAUS-Pioneer, con capacidad máxima de 210 g y resolución de 0,0001 g

Fuente: Laboratorio de química general de la universidad de Córdoba

- Determinación de M_2 . Para determinar esta masa se retiró el cuello del picnómetro y se vació el agua aproximadamente hasta la mitad. se secó y se pesó sin colocar el cuello. Esta es la masa M_2 .
- Determinación de M_3 . Esta masa es la del picnómetro sin cuello, medio lleno de agua y con la muestra de ceniza dentro; tal como se muestra en la figura 4.3. Para esto se pesaron 10g de muestra de ceniza.

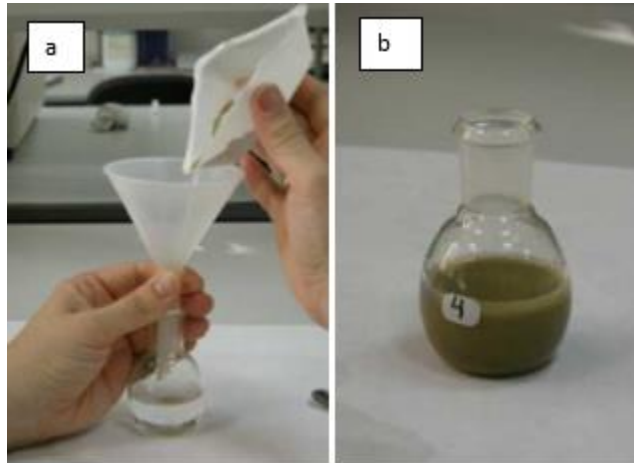


Figura 4.3: a) Vaciado de la muestra. b) Muestra con la ceniza incorporada.

Fuente: Autores

- Determinación de M_4 . Se colocó el cuello y se enrasó nuevamente el picnómetro introduciendo el agua restante por el capilar de cuello. Una vez libre de burbujas y enrasado, se seca el picnómetro y se pesa en la balanza para determinar M_4 .

La densidad relativa (G) es a 20°C (Ecuación 4.2), por lo que para calcularla hay que multiplicar G_T por la densidad del agua a la temperatura T del ensayo, (ver Tabla 4.1) y dividir por la densidad del agua a 20°C .

$$G = G_T \frac{D_{H_2O}(T)}{D_{H_2O}(20^\circ\text{C})} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Tabla 4.1: Densidad relativa del agua a diferentes temperaturas.

T (°C)	D_{H_2O} (g/cm ³)
15	0,999099
16	0,998943
17	0,998774
18	0,998595
19	0,998405
20	0,998203
21	0,997992
22	0,997770
23	0,997538
24	0,997296
25	0,997044
26	0,996783

Fuente: Laboratorio química general universidad de córdoba.

Cabe resaltar que este procedimiento se llevó a cabo un total de tres veces.

4.1.3. Ensayos para caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz y el cemento usado

Para la caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz y el cemento se envió una muestra a los laboratorios de la Universidad de Antioquia en Medellín para un análisis químico por difracción de rayos x (DRX) y fluorescencia de rayos x (XRF), mas análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM), los procedimientos para la determinación de estas propiedades se muestran en la tabla 4.2. La caracterización se hizo con el único fin de tener conocimiento sobre las propiedades específicas de la ceniza obtenida de la cascarilla del producto de la producción de arroz del departamento de Córdoba y así poder comparar con otros posibles estudios realizados en otras zonas geográficas.

Tabla 4.2. Técnicas e información necesarias para la caracterización de los materiales

Técnica	Información obtenida
Difracción / fluorescencia de rayos X	Identificación de fases presentes, estructura cristalina, tamaño de partícula y composición química
Microscopía electrónica de barrido (SEM)	Características de la superficie, forma y tamaño de las partículas, composición, cantidad relativa de las partículas
Densidad (principio de Arquímedes)	Determinación de la densidad
Finura (tamizado)	Determinación de la granulometría de los agregados

Fuente: Autores.

4.2. Diseño de experimento.

Teniendo en cuenta que la variable más importante para el experimento es el porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz, se ha diseñado un experimento estadístico de un solo factor (Montgomery and Runger, 2006). para verificar el efecto de esta variable sobre la resistencia a la compresión del concreto.

El modelo experimental para este trabajo es un diseño completamente aleatorizado, se realizó haciendo uso de un diseño de experimento factorial con un factor; ya que, solo interesa conocer la influencia que tiene la variable porcentaje de ceniza de cascarilla arroz en la respuesta. El modelo experimental se puede resumir en la figura 4.4.

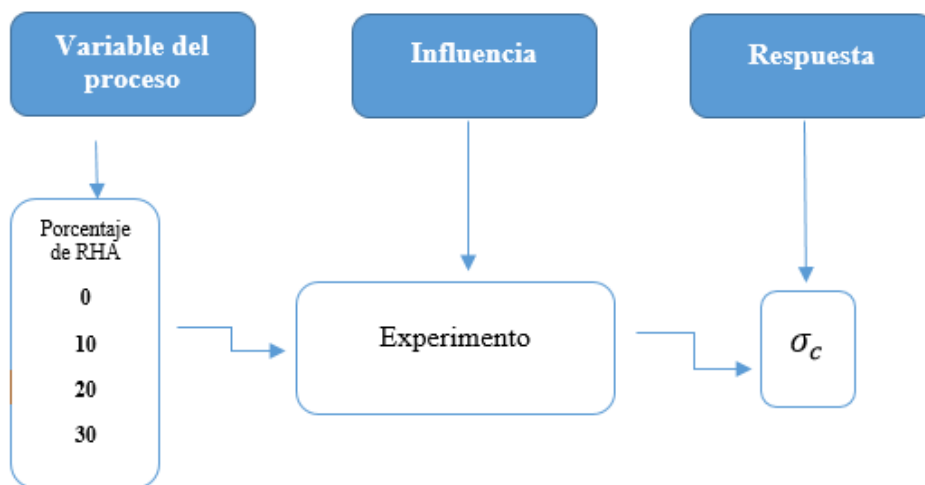


Figura 4.4: Variable de influencia.

Fuente: Autores.

Se espera calcular un número de réplicas con las cuales el experimento sea confiable, para ello, se tuvo en cuenta una investigación previa, similar a lo que se pretende realizar en este proyecto, se usaron los resultados de resistencia a la compresión obtenidos bajo diferentes variaciones de edad de curado y variación de porcentaje de RHA, con los valores de la resistencia a la compresión obtenidos de la literatura y haciendo uso de la herramienta Microsoft Excel, se calcula el número de réplicas a realizar para el experimento de manera que se tenga una confiabilidad en el experimento superior al 90%.

La ecuación 4.3 define la variabilidad para el modelo de un solo factor del parámetro Φ

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau^2}{a\sigma^2} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

n: es el número de réplicas deseado para que el experimento tenga éxito, el cual se eligió de forma iterativa como se dijo anteriormente para obtener una confiabilidad mayor al 90%.

σ : es la desviación estándar.

a: número de tratamientos a los cuales se les aplicara el experimento

τ : es un parámetro de no centralidad

Como la prioridad del experimento es el efecto del porcentaje de cenizas adicionado a la mezcla, se acepta la hipótesis nula H_0 pues nos garantiza que no existe un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión con la inclusión de RHA.

Teniendo en cuenta que se busca obtener un error tipo II con un nivel de confianza $\alpha = 0,05$ como valor de significancia mostrado en la figura 4.5. donde se determina la probabilidad de aceptación de la hipótesis β .

Tabla 4.3: Análisis de varianza para el modelo de efectos fijos de clasificación en un sentido.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F_0
Entre tratamientos	$SS_{tratamientos}$	$a - 1$	$MS_{tratamientos}$	$F_0 = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E}$
Error (dentro de los tratamientos)	SS_E	$N - a$	MS_E	
Total	SS_T	$N - 1$		

Fuente: Montgomery and Runger, (2006).

Del análisis de varianza para el modelo de un solo factor de Montgomery que se muestra en la tabla 4.3 se deduce que:

$$V_1 = a - 1 \qquad V_2 = (N - a) = a(n - 1) \qquad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde V_1 y V_2 son los grados de libertad necesarios para hallar β , que es la probabilidad de aceptación de la hipótesis que se muestra en la figura 4.5 dentro de cualquier tratamiento hay n replicas que proporcionan $n - 1$ grados de libertad para el error con los cuales se estima el error experimental.

La desviación estándar se calcula usando los valores representados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valores de resistencia a la compresión para diferentes edades de curado.

Información bibliográfica

% RHA	EDAD DE CURADO (DIAS)				
	7	14	28	90	Media fila
0	27,2	32,3	37,1	38,3	33,73
5	27,6	34,2	40	43,3	36,28
10	28	35,3	41,3	44,8	37,35
15	29,3	36	41,8	45,7	38,20
20	29,7	39,3	42,5	46	39,38
25	28,7	36,1	38,8	43	36,65
30	27,4	33,5	37,6	38,7	34,30
35	25,7	31,1	35,1	37,2	32,28
Media columna	27,95	34,725	39,275	42,125	36,02

Fuente: (Ganesan et al., 2008).

El número de réplicas escogido por iteración es $n=5$, para un numero de tratamientos $a = 4$ por cada porcentaje de adición de RHA. Con estos valores se hace el cálculo de las variables descritas en la tabla 4.5 usando las respectivas ecuaciones antes mencionadas.

Tabla 4.5: Variables necesarias para hallar el número de réplicas para el experimento.

Variables	Valores
n	5
a	4
σ	5,98
V_1	3
V_2	16
Φ^2	5,98
Φ	2,44

Fuente: Autores.

Con los valores registrados en la tabla 4.5 hacemos uso de la figura 4.5 para hallar β .

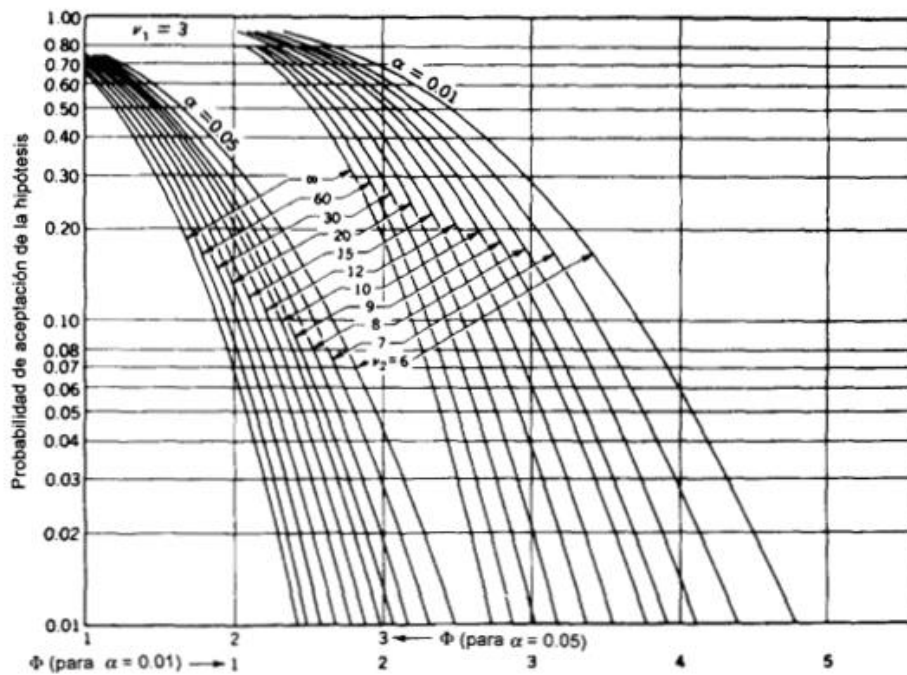


Figura 4.5: Curvas características de operación para el análisis de varianza del modelo de efectos fijos.

Fuente: Montgomery and Runger (2006)

Con $\beta = 0,03$ se obtiene una potencia $1-\beta = 0.97$ es decir, un nivel de confianza o de aceptación del 97% para el experimento, lo cual indica que $n=5$ réplicas arrojarían buenos resultados para el trabajo.

4.3. Elaboración de probetas de concreto para ensayos de compresión

Para fabricar las probetas se tienen en cuenta normas específicas como la ASTM C33 (2014) “Standard Specification for Concrete Aggregates”, las cuales dan los lineamientos a seguir en la fabricación de las probetas para el ensayo de compresión. considerando los porcentajes en volumen de cemento, la arena como agregado fino y la grava para la consolidación del concreto. En la determinación de los porcentajes en volumen, se considera la densidad de los materiales del cemento y la RHA, ya que se pretende reemplazar cantidades significativas de estos materiales para evaluar la resistencia, para esto se hace uso de la ecuación de la densidad (Ecuación 4.5), se halla un equivalente para la masa de cada material. Es decir, se toma una variación gradual de la cantidad de cemento y RHA aplicados a la mezcla donde las sumas de ambos porcentajes es 100%, para garantizar la conformación y la reacción de las mezclas.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde:

m = masa del agregado.

ρ = densidad media

V = volumen deseado

En lo concerniente a las probetas, se fabrica una probeta de concreto que sirve como referencia a partir de la mezcla de cemento, arena, grava y agua, que está enmarcada en la

norma ASTM C33 (2014). Además, se construirá un grupo de probetas de concreto donde se utiliza el mismo procedimiento que en la probeta de control, pero agregando RHA, en los cuales el porcentaje en masa de cemento y ceniza se varían teniendo en cuenta diferentes relaciones, que se muestran en la tabla 4.6.

Los porcentajes en volumen se realizan con base en revisiones bibliográficas, destacando el estudio desarrollado por Ganesan, Rajagopal, Thangavel (2008), entre otros.

Tabla 4.6: Variación del porcentaje en volumen de cemento y ceniza de cascarilla de arroz incorporado a la mezcla en la fabricación de las probetas.

Probetas		% de cemento	% de RHA
<i>Probeta (control)</i>	0	100	0
<i>Pb1</i>		90	10
<i>Pb2</i>		80	20
<i>Pb 3</i>		70	30

Fuente: Autores.

Las probetas se hicieron según la norma ASTM C31 “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field”, en la cual las dimensiones ya están establecidas. El número total de réplicas para cada muestra de concreto, se determina teniendo en cuenta el diseño de experimento realizado anteriormente y el cual arrojó un valor de 5 probetas, para obtener el menor porcentaje de error en la realización de los ensayos. En este orden, se construyen cinco probetas de concreto para cada una de las nomenclaturas descritas en la tabla 4.6, para un total de 60 probetas.

En la tabla 4.7 se observa el número total de probetas de control elaboradas, la distribución de las muestras de concreto con adición de ceniza de cascarilla de arroz para cada día de curado, el porcentaje en volumen de RHA y la cantidad total de muestras fabricadas para llevar a cabo los ensayos de compresión.

Tabla 4.7: Total de probetas con adición de RHA fabricadas para ensayo a compresión.

Probetas	Porcentaje de cemento (%)	porcentaje de RHA (%)	Número de probetas para 7 días de curado	Número de probetas para 14 días de curado	Número de probetas para 28 días de curado	Total probetas fabricadas por porcentaje de RHA
Probeta 0 (control)	100	0	5	5	5	15
Pb1	90	10	5	5	5	15
Pb2	80	20	5	5	5	15
Pb3	70	30	5	5	5	15
Total de probetas fabricadas por edad de curado	0	0	20	20	20	60

Fuente: Autores.

Los ensayos de compresión se hacen de acuerdo a la norma ASTM C39 2014, descrita en la tabla 4.8, para las edades de curado de 7, 14 y 28 días y estas se desmontan a las 24 horas.

Tabla 4.8: Edades y tolerancia de ensayos según norma ASTM C39 2014

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	± 0,5 h o 2,1 %
3 días	2 h o 2,8 %
7 días	6 h o 3,6 %
28 días	20 h o 3,0 %
90 días	2 d o 2,2 %

Fuente: Norma ASTM C39 2014

4.3.1. Material para la preparación del concreto y diseño de mezclas

Para la elaboración de las probetas de concreto se utilizan los siguientes materiales: como agregado grueso grava y como agregado fino, arena natural del río Sinú extraída en el barrio Mocarí de la ciudad de Montería, los cuales según la (UPME 2014) son los más utilizados en la construcción en la región del Departamento de Córdoba. Se usa agua potable del sistema de acueducto de la ciudad teniendo en cuenta que es agua sin impurezas y de calidad, y por último se adquiere cemento Gris Portland tipo I de uso general fabricado por la empresa Argos S.A. Que se obtiene en las tiendas de distribución de la capital cordobesa. En la figura 4.6 se muestran los agregados utilizados en el desarrollo de este trabajo.



Figura 4.6: Agregados grueso y fino utilizados para la preparación de concreto

Fuente: Autores.

Para la fabricación de las probetas de concreto, se realiza un análisis granulométrico a los agregados gruesos y finos en el laboratorio de suelos del Ingeniero Robinson Martínez

Sandoval ubicado en la calle 41 No 14C-04 B/ La Floresta Montería, bajo los lineamientos de la Norma ASTM C33 (2014). El análisis granulométrico es necesario para conocer el módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso, que se necesita para realizar los cálculos del diseño de mezclas para la resistencia del concreto.

Se hace un diseño de mezcla del concreto para una resistencia última a la compresión de 28 días de curado de 2500 psi lo cual equivale a tener 17,23 MPa, resistencia sugerida para vigas, columnas y muros armados, según el procedimiento descrito por ASOCRETO (2010). Según la norma ASTM C33 (2014) los límites establecidos para el módulo de finura (MF) deben estar en el rango de $2,30 \leq MF \leq 3,10$. Para el tamaño máximo nominal (TMN) se establece que debe estar limitado por unas dimensiones máximas de 2 pulgadas (50,8mm).

Debido a que la piedra y la arena cumplieron con la granulometría de la norma ASTM C33 (2014) se usa el método ACI 2011 para dosificar la arena y la grava. Con el asentimiento empleado y el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso se elige la cantidad de agua de mezclado. Con la resistencia requerida de 2500 psi (17,23 MPa) equivalente a (175 kg/cm²) y concreto sin contenido de aire se obtiene la relación de agua/cemento y se calcula la cantidad de cemento.

Posteriormente, teniendo en cuenta el TMN y el módulo de finura se obtiene interpolando la relación de volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino ($\frac{b}{b_0}$). Con los valores según las propiedades de densidad seca (MUC) y la densidad específica aparente de la grava (dg) que

se muestran más adelante, y de acuerdo con la ecuación 4.6 se obtiene el volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino (b_0).

$$b_0 = \frac{MUC}{d_g} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Luego se calcula la cantidad en volumen de grava necesaria para un metro cúbico de concreto de acuerdo con la ecuación 4.7

$$B = \frac{b}{b_0} * b_0 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde,

B: Cantidad en volumen de grava para un metro cúbico de concreto.

$\frac{b}{b_0}$: Volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino.

MUC: Masa unitaria grava río densidad seca.

d_g : densidad específica aparente.

La cantidad de arena es el porcentaje que falte al sumar cada uno de los agregados encontrados para un metro cúbico de concreto y todas las cantidades encontradas son las necesarias para preparar un metro cúbico de concreto.

4.3.2. Fabricación de las probetas de concreto para realizar los ensayos de compresión.

Para la fabricación de los moldes cilíndricos de concreto se considera la norma ASTM C31 (2014). Teniendo en cuenta el diseño de mezcla anterior, se calculan los agregados necesarios

para llenar cinco cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto. Los cilindros usados son de fabricación propia los cuales son construidos en material plástico PVC (ver figura 4.7) adquirido en las ferreterías de la ciudad de montería. Con los moldes a la mano en un lugar plano se procede a realizar con una pala la mezcla de la grava y la arena. Seguidamente se agrega el porcentaje de cemento, para luego realizar el proceso de mezclado y por último se añade la cantidad de agua requerida, estos materiales se mezclaron hasta obtener un concreto homogéneo y con una consistencia plástica.



Figura 4.7: Moldes cilíndricos en PVC usados en la fabricación de las probetas.

Fuente: Autores.

Las superficies de los cilindros son cubiertas con aceite mineral para motores cuatro tiempos 20W50 usado, tal como se muestra en la figura 4.7 esto para evitar que la mezcla de concreto se adhiera a las paredes de los moldes al momento del vaciado, fraguado y secado del concreto. Los moldes cilíndricos son llenados según la norma, con la mezcla de concreto

previamente preparada en tres capas y para cada capa se aplicaron 25 apisonados con una varilla de acero de punta redondeada, además con la misma se golpea el molde 15 veces en la superficie externa para cerrar los orificios dejados durante el apisonado y liberar las burbujas de aire atrapadas en la mezcla, logrando el asentamiento necesario para el concreto. Una vez hecho este proceso, se enrasa la superficie con una llana retirando el exceso de concreto. Las herramientas antes mencionadas se pueden observar en la figura 4.8



Figura 4.8: Herramientas (palaustre, llana y varilla de acero) utilizadas durante la preparación y desarrollo de las probetas.

Fuente: Autores.

Transcurridas 24 horas se retiran los moldes y las probetas se sumergen en agua para llevar a cabo el proceso de curado de 7, 14 y 28 días respectivamente.

4.4. Análisis de densidad de las probetas de concreto con y sin adición de ceniza de cascarilla de arroz.

Justo antes de llevar a cabo los ensayos de compresión, se hace un análisis de densidad a las probetas de concreto comparándolas con las probetas de control. Para esto se determina la longitud y diámetro de cada probeta usando un calibrador pie de rey del laboratorio de materiales y procesos, al igual que una balanza con capacidad máxima de carga de 30 kg para determinar la masa de cada probeta de concreto. La masa de cada una de las probetas se puede ver en el anexo A1, así como también su volumen y densidades. Para calcular el volumen de las probetas de compresión se usa la ecuación 4.8

$$V_p = \frac{\pi}{4} D^2 h \quad \text{Ecuacion 4.8}$$

Donde

V_p : *volumen de la probeta de concreto*

D: diámetro de la probeta (100mm)

h: longitud de la probeta (200mm)

Una vez determinado el volumen se realiza el cálculo de la densidad del concreto teniendo en cuenta el volumen de cada probeta, después se procede a realizar el análisis de comparación de las densidades de todas las probetas de control, respecto a las que tienen adición de ceniza. Se emplea la ecuación 4.9 para determinar la densidad de las probetas.

$$d_p = \frac{m_p}{V_p} \quad \text{Ecuacion 4.9}$$

Donde:

d_p : densidad de la probeta

m_p : masa de cada probeta

V_p : volumen de la probeta

4.5. ensayo de compresión en probetas de concreto con adición de ceniza de cascarilla de arroz

Los ensayos de compresión en probetas de concreto con adición de ceniza de cascarilla de arroz se realizan en el laboratorio de materiales y procesos del programa de ingeniería mecánica de la universidad de Córdoba, en la maquina universal de ensayos MTS Criterion modelo 45, con capacidad máxima de carga de 300 kN, la cual se muestra en la figura 4.9.

Los ensayos de compresión se realizan bajo la norma ASTM C39/C39M (2014) con una velocidad de ensayo de $0,24 \pm 0,035$ MPa/s (0,03mm/s). Se ensayan 5 probetas para cada nomenclatura mostrada en la tabla 4.6, para edades de curado de 7, 14 y 28 días respectivamente. los ensayos son suspendidos cuando se alcanza en cada probeta una fractura visible, el valor obtenido es la carga máxima encontrada para cada ensayo. La resistencia a compresión de la probeta (σ), se calcula dividiendo la carga máxima (F_{max}) entre el área de la sección transversal de la probeta (A), como se muestra en la ecuación 4.10. Los resultados se analizan teniendo en cuenta el esfuerzo último (σ) (resistencia a la compresión), el porcentaje de ceniza incluida y el tipo de falla.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Ecuacion 4.10}$$



Figura 4.9: Máquina universal de ensayos MTS Criterion modelo 45, con capacidad máxima de carga de 300 kN.

Fuente: Autores.

4.6. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

para realizar un mejor análisis de los resultados obtenidos en el experimento, se utiliza el método de la Prueba Estadística de Análisis de Varianza (ANOVA), y la Prueba de Tukey, que se aplica para estudiar variables cuantitativas, con datos divididos en más de dos

grupos que contienen información; con el propósito de verificar el comportamiento de los valores medios que se obtienen en el experimento de la resistencia a la compresión, los cuales, son los valores reales que determinan la variable de interés para el proyecto. Por esa razón se opta por este método, que une diferentes grupos de información, como el porcentaje de RHA que se reemplaza por cemento y las tres edades de curado 7,14 y 28 días, con el fin de obtener resultados con un mínimo de porcentaje de error, disminuyendo el error tipo I del que se habló anteriormente y que permita realizar conclusiones confiables.

Este análisis se hace para determinar la diferencia que existe entre los datos, y permite inferir cuan alejados se encuentra cada grupo de información con respecto al otro, dándonos la posibilidad de verificar y analizarlos con observaciones múltiples. Esta prueba exige tres suposiciones para poder realizarla de la mejor manera, se debe tener una distribución normal en los grupos de análisis, tener una homogeneidad en las varianzas de cada grupo, y que estos sean independientes, se formulan entonces a partir de la dispersión de las medias la hipótesis nula(H_0), que nos determina si las resistencias(variable a medir), son iguales para todos los grupos, y la hipótesis alterna(H_a), que nos muestra que existe diferencia significativa en las medias en uno o más grupos e identificar por medio de la prueba de Tukey en donde influye la diferencia. Ronald E. (2012). Para obtener los resultados se utiliza la herramienta computacional Microsoft Excel (2010), para tabular los datos cuantitativos que se obtienen en el estudio experimental; este programa tabula los valores de la resistencia a la compresión que arroja el ensayo destructivo descrito en la norma ASTM C39 (2014), y así, observar los cambios en la resistencia de compresión a partir de las variables que se estudian.

Si el valor de la Probabilidad es mayor al Nivel de Significancia N_s se acepta la hipótesis nula H_0 ; si el valor de la Probabilidad es menor al valor del Nivel de Significancia N_s se acepta la hipótesis alterna H_a y debemos utilizar la prueba de Tukey para encontrar los grupos en donde se presenta la diferencia significativa. Se hizo necesario encontrar los parámetros que definen la prueba Tukey para realizar los respectivos análisis, estos parámetros son:

$$HSD = M * \sqrt{Mse/n} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Dónde:

HSD: Diferencia Honestamente Significativa

M: Multiplicador obtenido en la tabla de Tukey

Mse: Cuadrado del Error Medio

n: Tamaño de muestra en los grupos

El Mse se define por la división de los valores de que se encontraron en la tabla de varianzas de Microsoft Excel como suma de cuadrados y grados de libertad dentro de los grupos.

$$Mse = \frac{\text{suma de cuadrados}}{\text{grados de libertad}} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

5. ANALISIS DE RESULTADOS.

5.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

Los resultados del cálculo de densidad relativa de la ceniza de cascarilla de arroz los obtenemos usando la Ecuación 4.1 de la sección 4 del documento. Donde los valores de las masas en gramos son:

$$M_1 = 80,4432 \text{ gr}$$

$$M_2 = 48,2967 \text{ gr}$$

$$M_3 = 51,0923 \text{ gr}$$

$$M_4 = 81,9163 \text{ gr}$$

$$G_T = \frac{51,0923 - 48,2967}{(51,0923 - 48,2967) + (80,4432 - 81,9163)}$$

$$G_T = 2,1140$$

Utilizando la ecuación 4.2 la densidad relativa es:

$$G = (2,1140) \frac{0,997296}{0,998203}$$

$$G = 2,11 \text{ gr}$$

De este modo se obtiene una densidad de la ceniza de cascarilla de arroz de $2,11 \text{ gr/cm}^3$

En la tabla 5.1 se muestran algunas densidades teóricas de la ceniza de cascarilla de arroz con la densidad obtenida en el laboratorio.

Tabla 5.1: densidad obtenida y teóricas de la RHA.

Muestra	Densidad teórica (gr/cm^3)	Densidad obtenida (gr/cm^3)	Fuente bibliográfica
1	2.06	X	Mehta (1992)
2	2.10	X	Bui et al. (2005)
3	2,15	X	Pedro E. (2015)
4	X	2.11	Autores (2019)

Fuente: Autores.

La variación entre las densidades puede obedecer a la incineración de la cascarilla ya que, este proceso puede variar de muchas formas, por ejemplo, la temperatura de quemado y la presión en el horno.

5.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Y EL CEMENTO USADO

Como se menciona en la sección 4 del documento para la elaboración de las probetas de concreto para ensayo de compresión, se usa cemento Portland tipo I de uso general de la empresa Argos. El cemento usado fue sometido a un estudio por fluorescencia de rayos x para determinar su composición, los resultados de este estudio se pueden ver en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Composición química del cemento obtenida por fluorescencia.

Componente	% en peso	Componente	% en peso
<i>CaO</i>	64,29	<i>K₂O</i>	0,366
<i>SiO₂</i>	9,580	<i>P₂O₅</i>	0,166
<i>Al₂O₃</i>	2,980	<i>TiO₂</i>	0,135
<i>Fe₂O₃</i>	2,470	<i>SrO</i>	0,0482
<i>SO₃</i>	2,410	<i>BaO</i>	0,0367
<i>MgO</i>	1,270	<i>LOI</i>	16,140

Fuente: Laboratorio de Espectrometría-Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia

Igualmente, para llevar a cabo el experimento se usa ceniza de cascarilla de arroz, la cual su composición química se hizo a través de la técnica de fluorescencia de rayos x que se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Composición química de la RHA por el método de fluorescencia.

Componente	% en peso	Componente	% en peso
<i>SiO₂</i>	89.20	<i>Fe₂O₃</i>	0,147
<i>K₂O</i>	1,760	<i>SO₃</i>	0,0415
<i>P₂O₅</i>	1,160	<i>BaO</i>	0,0400
<i>CaO</i>	0,630	<i>TiO₂</i>	0,0169
<i>Al₂O₃</i>	0,619	<i>CuO</i>	0,0132
<i>MgO</i>	0,610	<i>ZnO</i>	0,0100
<i>MnO</i>	0,206	<i>LOI</i>	5,5000

Fuente: Laboratorio de Espectrometría-Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia

Se observa en la tabla la composición química resultante de la RHA, donde se muestra un porcentaje de Sílice en peso de 89,20%, muy similar a otros estudios como es el caso de Hwang Chao-Lung (2011) que obtuvieron un porcentaje de sílice del 91%. Además, al hacer un comparativo con estas tablas los valores de los demás componentes encontrados son muy similares, como por ejemplo el CaO con 0,630 y 0,39% respectivamente.

La caracterización mineralógica de la RHA se hizo mediante difracción de rayos x (DRX), donde se obtuvo el difractograma mostrado en la figura 5.1 en el cual se observan picos usuales de Sílice semicristalina conocida como cristobalita.

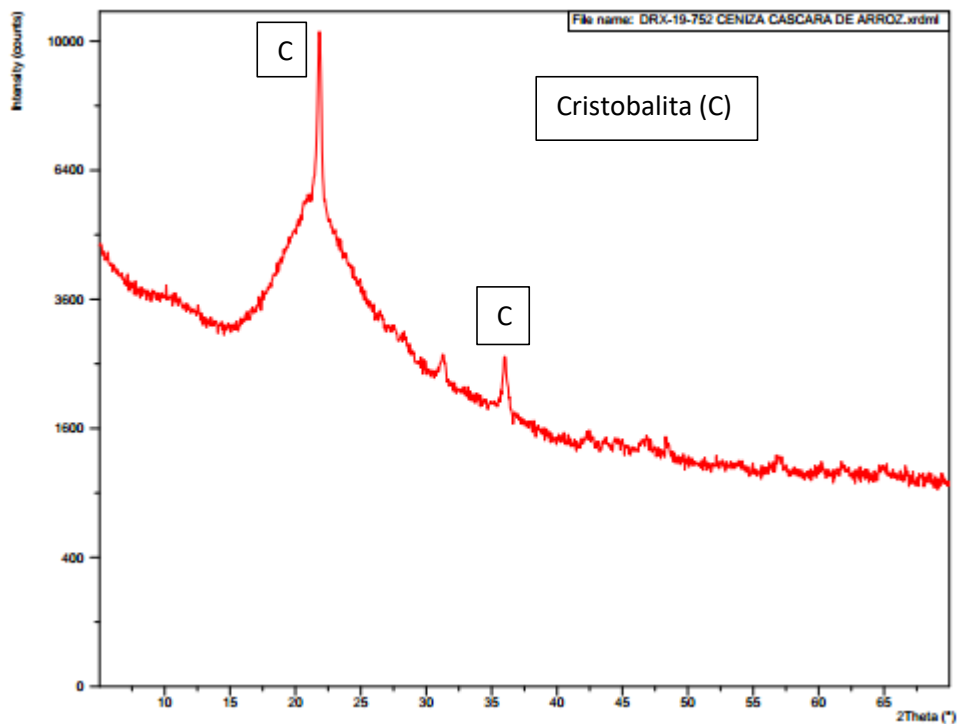


Figura 5.1: Difractograma de rayos x de la RHA.

Fuente: Laboratorio de materiales y catálisis- Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia

La cristobalita afecta la puzolanidad porque carece de porosidad y no tiene propiedades reaccionantes, mientras que la sílice cuando se encuentra en estado amorfo garantiza una mejor reacción con los hidróxidos presentes en la mezcla, más exactamente con el hidróxido de calcio del cemento, formando uniones con características más resistentes. K. Ganesan (2008).

Usando el método patente de Metha se encontró que el porcentaje de sílice amorfa de la RHA es en promedio de 25,4%, valor que puede ser resultado de una deficiente combustión de la cascarilla de arroz. Salas A. (2008). Este porcentaje de sílice amorfa da cuenta de la baja reacción puzolánica de la ceniza usada, y una consecuencia de esto puede ser las temperaturas que se alcanzaron en el horno con un mínimo de 726°C. donde, temperaturas superiores a 700°C hacen que la ceniza empiece a sufrir transformaciones de amorfa a cristalina. Rawaid Khan (2012).

Para observar la morfología de la RHA usada en esta investigación, se consideró la microscopia electrónica de barrido (MEB) que se puede ver en la figura 5.2, donde se observa que la temperatura de quemado pudo haber causado transformaciones en sílice cristalina, pues en la figura se evidencia que las partículas presentan baja porosidad, ya que se pueden ver superficies bastantes lisas típicas de estas, cuando la temperatura asciende fuera de los rangos mencionados.

Al observar las imágenes del SEM se pueden notar tamaños de partícula de 155,28 μm aproximadamente, las cuales son muy parecidas a las dimensiones de la arena utilizada. Esto da una idea de que la ceniza usada por el tamaño que presenta ciertas partículas, en un gran porcentaje no se pueden considerar como puzolanas.

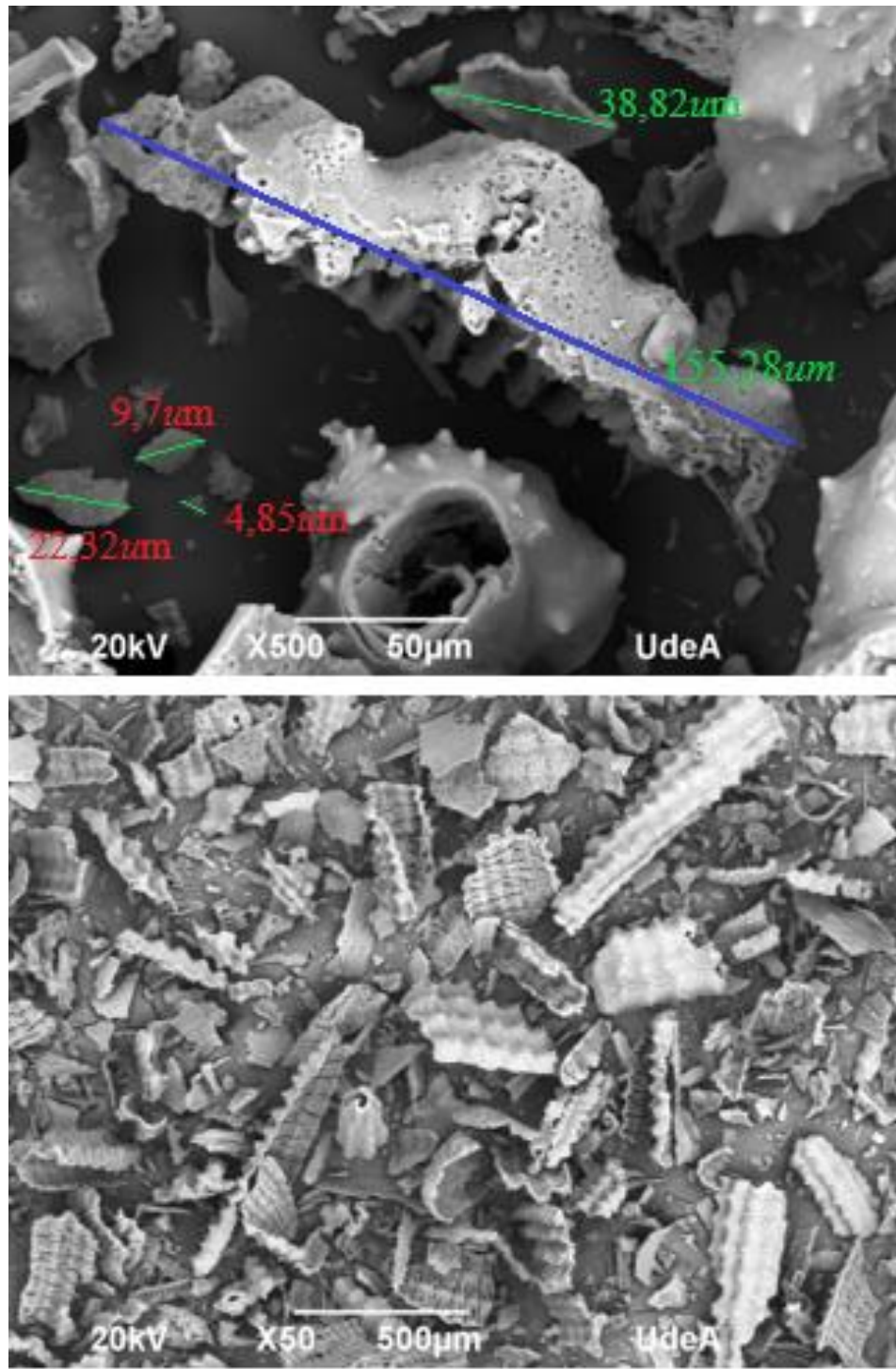


Figura 5.2: Morfología de la RHA por microscopía electrónica de barrido.

Fuente: Centro de microscopía avanzada-Universidad de Antioquia

5.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.

5.3.1. Resultados del análisis granulométrico del agregado fino y grueso en el concreto

En la figura 5.3 se puede ver la curva granulométrica para el agregado fino (arena) utilizado en la elaboración de las probetas, podemos observar que los valores de tamaño de partícula y el porcentaje de arena que pasa por los tamices se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C33 (2014), cumpliendo así con los requerimientos necesarios para elaborar la mezcla de concreto. El módulo de finura encontrado fue de 2.87, con este módulo, el tipo de arena se puede clasificar como arena gruesa (ASOCRETO 2010).



Figura 5.3: Curva granulométrica del agregado fino usado en la fabricación de las probetas de concreto con RHA.

Fuente: Autores.

En la figura 5.4 se puede observar la curva granulométrica del agregado grueso (grava) utilizado en la preparación del concreto. En el proceso granulométrico de la grava se puede observar que el 100 % de este material pasó por el tamiz 1 ½ pulgadas (38,1 mm) y en el

tamiz de 1 pulgada (25,4 mm) el porcentaje retenido fue de 6,76 %, por lo que el tamaño máximo nominal de la grava es 1 ½ pulgada (38,1 mm).



Figura 5.4: Curva granulométrica del agregado grueso usado en la fabricación de las probetas de concreto con RHA.

Fuente: Autores.

El procedimiento para la obtención del módulo de finura de la arena y el tamaño máximo nominal de la grava se puede ver en los anexos A2 y A3 respectivamente. La tabla 5.4 muestra las propiedades del agregado fino, agregado grueso, el agua y el cemento usados en la fabricación de las probetas de concreto con adición de RHA.

Tabla 5.4: Propiedades del agregado grueso, agregado fino, cemento y agua usados para la realización de probetas de concreto.

Material	Propiedad	Valor kg/m³
Grava	Densidad seca	1696
Grava	Densidad específica aparente	2622
Arena	Densidad seca	1601
Arena	Densidad específica aparente	2573
Cemento	Densidad específica aparente	3100
Agua	Densidad específica aparente	1000

Fuente: Causil y Guzmán (2016)

5.3.2. Fabricación de las probetas de concreto para realizar los ensayos de compresión

Con el tamaño máximo nominal de 1 ½ pulgada (38,1mm) del agregado grueso y un asentamiento seleccionado de 7 cm para la elaboración de la mezcla, se busca la cantidad necesaria de agua para un metro cubico de concreto de acuerdo con la figura 5.5, que concierne a $170\text{kg}/\text{m}^2$.

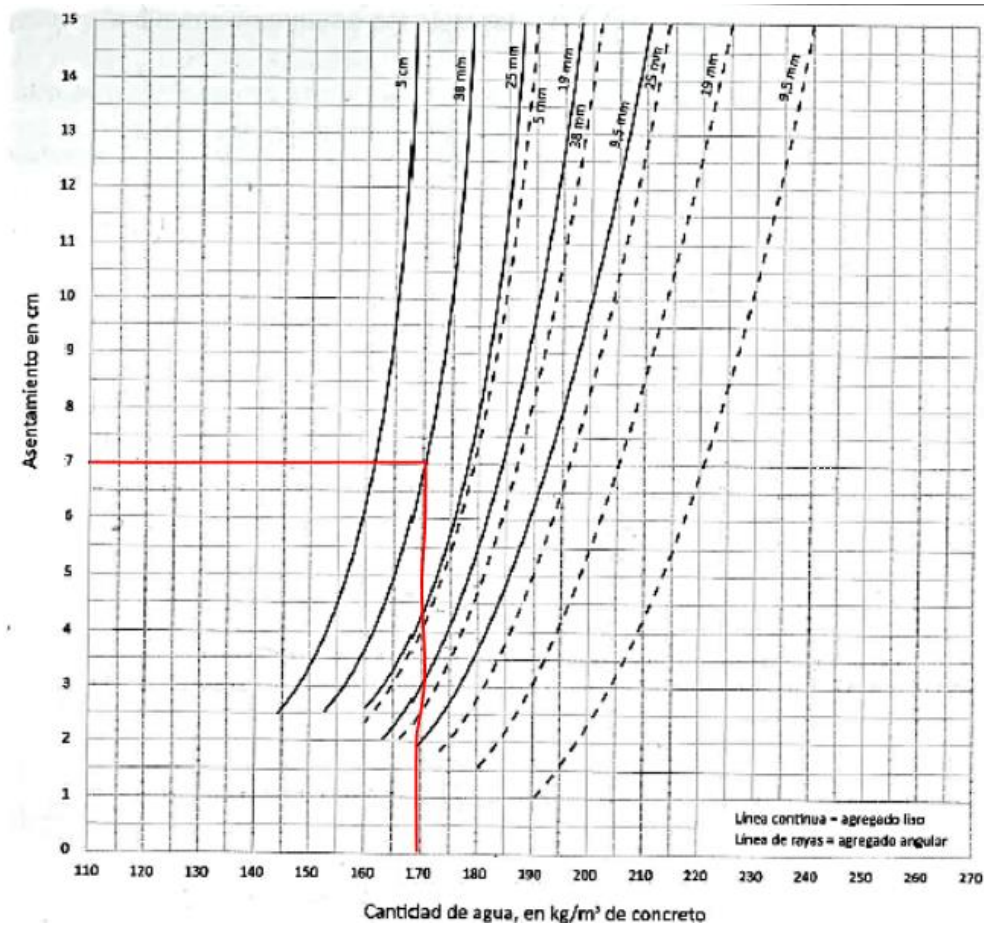


Figura 5.5: Curvas de requerimientos de agua de mezclado.

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición

Para la resistencia de diseño requerida de 2500 psi (175 kg/cm^2), concreto sin contenido de aire se obtiene una relación agua/cemento de 0,65 según la figura 5.6.

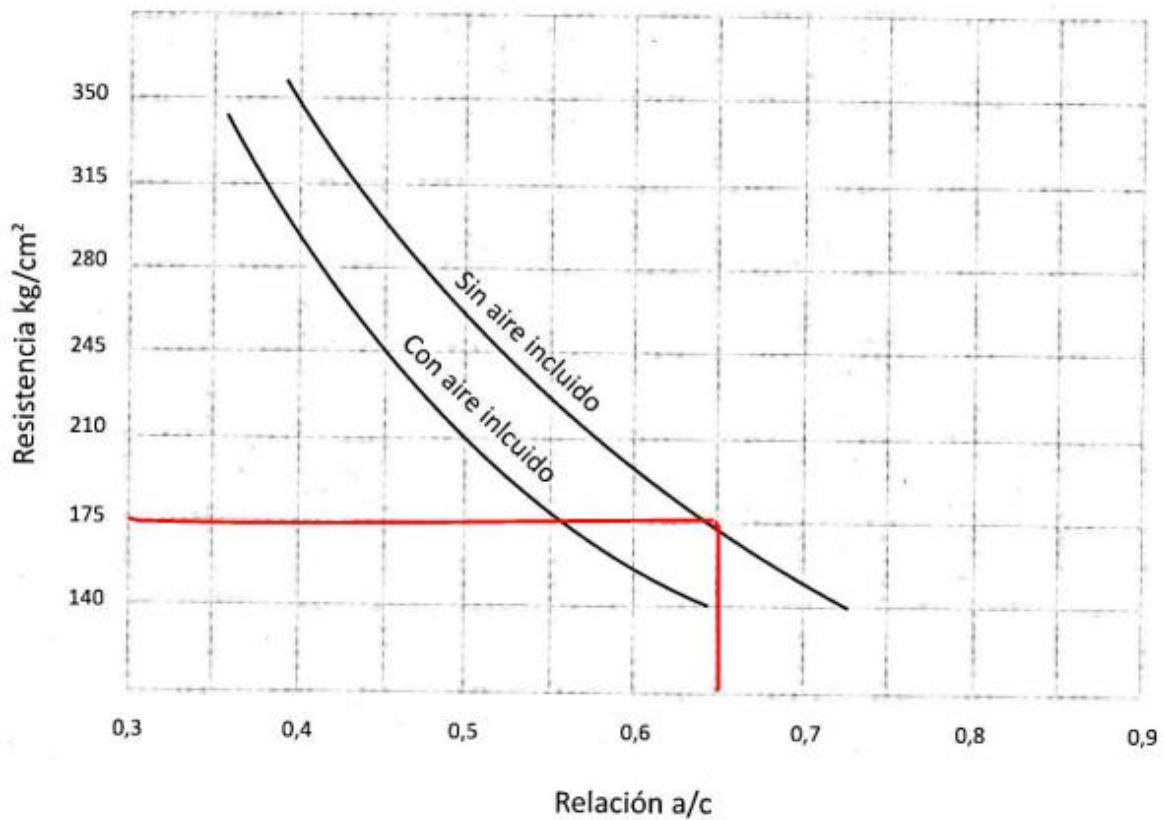


Figura 5.6: Curvas de resistencia a la compresión y la relación a/c

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición

Se obtiene la cantidad de cemento requerido para un metro cúbico de concreto.

$$0,65 = \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}}$$

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Agua}}{0,65} = \frac{170 \text{ kg/m}^3}{0,65} = 262 \text{ kg/m}^3$$

Así entonces, se necesitan 262 kg de cemento para un metro cubico de concreto. Con el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino, en la tabla 5.5 se obtiene por interpolación que la relación: $b/b_0 = 0,703$

Tabla 5.5: Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (b/b₀)

MÁXIMO TAMAÑO NOMINAL DE AGREGADOS		VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO SECADO EN EL HORNO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE CONCRETO PARA DIFERENTES MÓDULOS DE FINURA DE AGREGADO FINO			
		MÓDULO DE FINURA			
PULGADAS	mm	2,40	2,60	2,80	3,00
3/8	9,51	0,50	0,48	0,46	0,44
1/2	12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4	19,1	0,66	0,64	0,62	0,60
1	25,4	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2	38,1	0,75	0,73	0,71	0,69
2	50,8	0,78	0,76	0,74	0,72
3	76,1	0,82	0,80	0,78	0,76
6	152,4	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

De acuerdo a la ecuación 4.4 tenemos:

$$b_0 = \frac{1696 \text{ kg/m}^3}{2622 \text{ kg/m}^3} = 0,647$$

Luego se calcula la cantidad en volumen de grava necesaria para un metro cubico de concreto de acuerdo con la ecuación 4.5.

$$B = \frac{b}{b_0} * b_0 = (0,703)(0,647) \qquad B = 0,4548 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

El volumen requerido de cemento es:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{262 \text{ kg}}{3100 \text{ kg/m}^3} = 0,084 \text{ m}^3$$

Se calcula el volumen requerido de agua:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{170\text{kg}}{1000\text{kg}/\text{m}^3} = 0,17\text{m}^3$$

Con la información anterior, se calcula la masa requerida de la grava:

$$m = \rho * v = \left(\frac{2622\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0,4548\text{m}^3) = 1192,48 \text{ kg}$$

La masa requerida para la arena se obtiene haciendo una suma algebraica de los volúmenes anteriores y la cantidad faltante para llegar al metro cubico será el volumen necesario, en este orden de ideas se necesitan $0,3\text{m}^3$ de arena.

$$m = \rho * v = \left(\frac{2573\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0,3\text{m}^3) = 771,9 \text{ kg}$$

Finalmente en la tabla 5.6 se observan las cantidades de los agregados para obtener un metro cúbico de concreto (m^3) con la resistencia de diseño de 2500 psi (17,23 MPa) y relación agua/cemento de 0,65, más el porcentaje en masa de cada uno de los agregados.

Tabla 5.6: Cantidad y proporciones de materiales empleados para obtener 1 m^3 de concreto con resistencia ultima de 2500 psi (relación agua/cemento de 0,65) y el porcentaje en masa.

Material	Masa (kg)	Densidad (kg/m³)	Volumen (m³)	Porcentaje en masa (%)
Grava	1192,48	2622	0,45	49,76
Arena	771,9	2573	0,3	32,21
Cemento	262	3100	0,08	10,93
Agua	170	1000	0,17	7,1

Fuente: Autores.

En la elaboración de la mezcla de concreto con adición de ceniza de cascarilla de arroz, se encontró que a mayor porcentaje de RHA aumentaba la trabajabilidad del concreto y el esfuerzo físico requerido para efectuar el proceso de mezclado aumentaba significativamente, además de que la mezcla necesitaba mayor cantidad de agua para obtener la mezcla pastosa y plástica que se requiere para un buen asentamiento, como se puede ver en la figura 5.8. por lo que se concluyó que la ceniza tiene la característica de absorber mayor cantidad de agua.



Figura 5.8: Proceso de mezclado de los agregados del concreto con adición de RHA.

Fuente: Autores.

En la figura 5.8 se puede observar en la imagen de la izquierda los agregados del concreto aun sin el proceso de mezclado y en la imagen derecha la mezcla con el contenido de agua calculado, donde es notoria la falta de mayor cantidad de agua para tener la mezcla necesaria, con las características de manejo, plasticidad y humedad para proceder con la preparación de las probetas.

En la figura 5.9 se muestran imágenes del proceso de fabricación de las probetas de concreto, el desmonte de las mismas y el proceso de curado en agua.



Figura 5.9: Proceso de fabricación de las probetas, desmonte y curado en agua.

Fuente: Autores.

5.4. ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO CON Y SIN ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

En la figura 5.10 se puede apreciar el comportamiento de la densidad del concreto con respecto al porcentaje de RHA adicionada a la mezcla. En la gráfica se puede ver claramente las reducciones en la densidad de las probetas de concreto a medida que aumenta el porcentaje en volumen de ceniza de cascarilla de arroz.

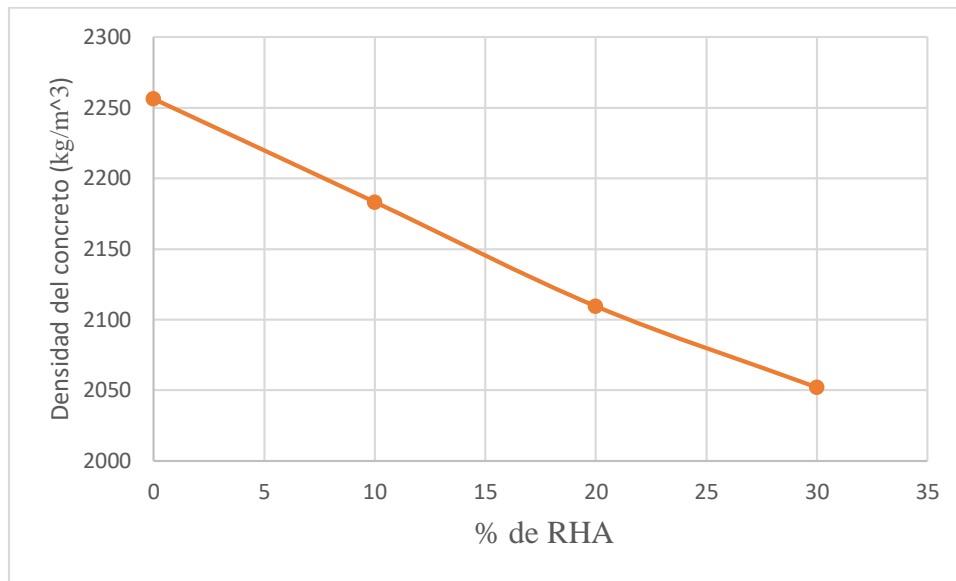


Figura 5.10: Gráfica de la densidad de las probetas de concreto en función del porcentaje en volumen de RHA adicionada.

Fuente: Autores.

En la tabla 5.7 se describe el porcentaje de RHA añadida, el porcentaje de reducción en la densidad y la reducción en masa que se tendría para un metro cubico de concreto en cada una de las probetas. En esta tabla se aprecia una reducción en peso de hasta 205 kg para las probetas con 30% de adición, lo cual es un punto a favor a tener en cuenta en los resultados de la investigación.

Tabla 5.7: Porcentaje de RHA añadida frente al porcentaje de reducción en la densidad de las probetas de concreto.

Porcentaje de RHA añadida (%)	Porcentaje de reducción en la densidad (%)	Reducción en masa para 1m ³ de concreto (kg)
0	0	0
10	3,23	73
20	6,50	147
30	9,10	205

Fuente: Autores.

En la figura 5.11 se observa una relación del porcentaje de cenizas con la variación de la densidad de las probetas. Se puede apreciar que a mayor porcentaje de RHA hay una leve disminución en la densidad, ya que existe una reducción en el volumen de cemento con respecto al volumen de la ceniza al tener estos dos materiales diferentes densidades. Resultados bastante parecidos se obtuvieron en el trabajo desarrollado por Ganesan, K; Rajagopal, K; Thangavel, K; (2008).

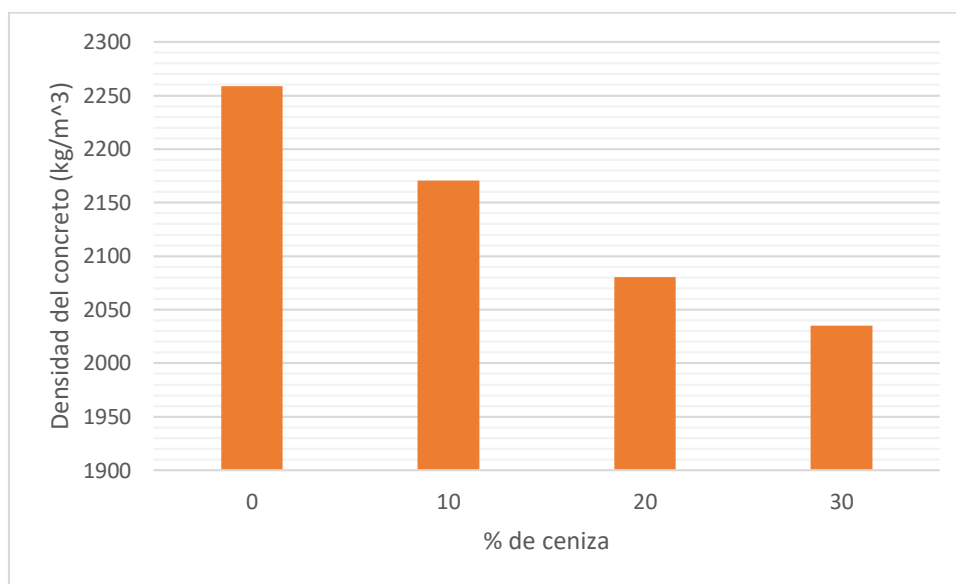


Figura 5.11. Densidad para 28 días de curado en las diferentes mezclas de concreto con adición de RHA.

Fuente: Autores.

Haciendo un análisis de las gráficas de densidad anteriores podemos visualizar que con la adición de 30 % de RHA en las probetas de concreto, se observó una mayor disminución en la densidad de las probetas la cual fue de $204,32 \text{ kg/m}^3$, esto se debe en gran parte a la menor densidad que presenta la ceniza de cascarilla de arroz. Esta reducción en la densidad del concreto significa que para cada metro cubico de concreto el peso disminuirá

significativamente, lo cual ya es un logro, además de que también habrá un ahorro de materiales en la construcción de estructuras y obras civiles.

5.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS PROBETAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

Las probetas de concreto para 28 días de curado, como son las de control y las que tienen adiciones de RHA de 10%, 20% y 30% respectivamente se muestran en la tabla 5.8. Donde las muestras de control tuvieron valores de resistencia a compresión similares a las diseñadas en el experimento para 2500 psi (17,23 MPa). Y las de prueba con adiciones de RHA disminuyeron de forma considerable a medida que aumentaba la cantidad por volumen de ceniza agregada.

Tabla 5.8: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

Probetas	Resistencia a la compresión (MPa)
Control	18,34
10% RHA	10,64
20% RHA	7,75
30% RHA	4,68

Fuente: Autores.

En los anexos A5 y A6 respectivamente se pueden hallar todos los valores de resultados de resistencia a compresión de cada probeta ensayada, así como los valores promedio de resistencia a compresión para cada mezcla a las tres edades de curado mencionadas.

La figura 5.12 muestra todos los valores promedio de resistencia a compresión de las muestras de control y las probetas de concreto con adición de RHA una vez cumplido los 3, 7 y 28 días de curado.

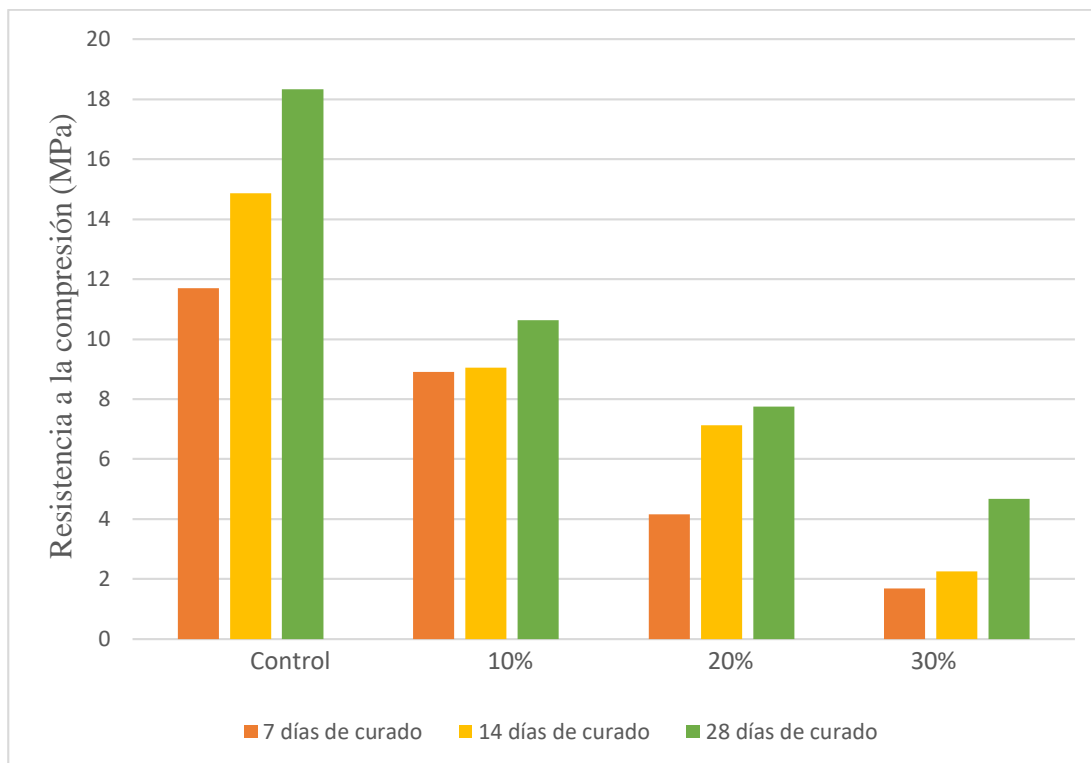


Figura 5.12: Valores promedio de resistencia a compresión para la muestra de control y las diferentes probetas de concreto con adición de RHA para 3, 7 y 28 días de curado.

Fuente: Autores.

En esta figura además se puede observar que, a mayores porcentajes de ceniza agregadas a la mezcla de concreto, menores son los valores de resistencia a compresión alcanzadas. de igual forma se encontró que en todas las mezclas, al aumentar la edad de curado de las probetas, aumentaba la resistencia a compresión de estas. En ese orden, estos comportamientos durante el proceso de curado de las probetas cumplen con las características especificadas por ASOCRETO (2010). Como es el caso, si hallamos los valores promedio de resistencia a la compresión de cada edad de curado, encontramos que para 7 días el promedio

fue de 57,8 % y para 14 días de 75 %, en comparación con los 28 días de curado, donde las probetas obtienen la resistencia para la cual fueron diseñadas.

En la figura 5.13. se evidencia un comportamiento de la resistencia a compresión de las probetas, en función del porcentaje de RHA incorporada en la mezcla de concreto para 28 días de curado. Se puede apreciar que a mayor cantidad de adición de ceniza la resistencia máxima a compresión tiende a disminuir. La grafica en mención nos dice que al incorporar un 10 % de ceniza se obtiene una mayor resistencia a compresión del concreto, aun cuando ninguna de las muestras con adición alcanza o supera las muestras de control. Las curvas de resistencia a compresión para las edades de curado de 7 y 14 días respecto al porcentaje de RHA, se pueden visualizar en el anexo A7 del documento.

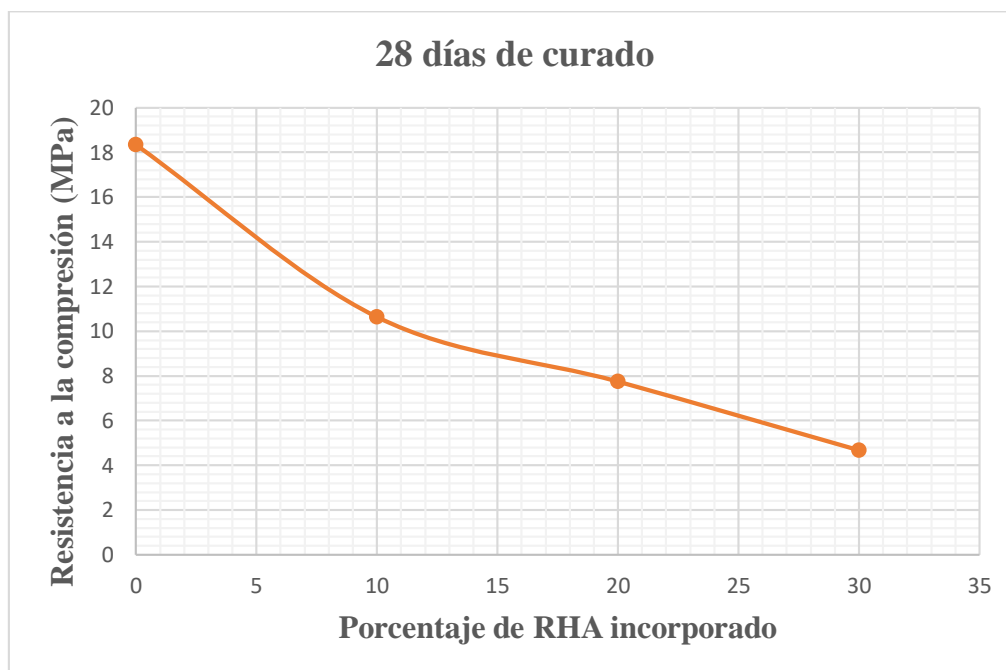


Figura 5.13: Curva de resistencia a compresión como función del porcentaje de volumen de RHA, adicionado a la mezcla de concreto para 28 días de curado.

Fuente: Autores.

5.5.1. Efecto de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a compresión de concretos.

Se puede decir que el aumento en la cantidad de volumen de ceniza incorporada en la mezcla de concreto, no tiene una reacción de fraguado idónea como es el caso de la muestra de control, además que en el proceso de mezclado se observó que los materiales necesitaron mayor cantidad de agua para un buen proceso de llenado de los moldes y enrasado de las probetas. Es decir, el asentamiento de la muestra de control cambiaba al agregar ceniza y disminuir la cantidad de cemento y esto se veía reflejado en el llenado de los cilindros. Al reemplazar porcentajes de cemento en volumen por ceniza de cascarilla de arroz, la resistencia no tuvo un buen comportamiento, pues en cada caso de remplazo esta disminuyó de acuerdo al porcentaje agregado.

Al aumentar el porcentaje de RHA, la mezcla pierde propiedades que hacen que se generen pequeños espacios o burbujas de aire atrapadas dentro de la matriz, como lo describe Ganesan et al. (2008), esto se debe a que el tamaño de partículas de la ceniza difiere con la del cemento, lo cual hace que el remplazo no sea idóneo en lo que concierne a granulometría.

En la realización de este proyecto investigativo, una vez terminada la fase de pruebas se deduce que el porcentaje de adición de RHA más cercano a la muestra de control es la de 10% en volumen de cemento, pues alcanzó un valor de resistencia de 10,64 MPa, llegando así a un 61,75 % de la resistencia requerida. También se dedujo que el porcentaje de adición de ceniza de cascarilla de arroz que más hizo disminuir la resistencia del concreto fue la de 30 % en volumen de cemento; llegando a una resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño de 27,16 % para 28 días de curado. En la tabla 5.9 se muestran los

porcentajes de resistencia a compresión de las probetas con adición de RHA respecto a la resistencia para la cual fueron diseñadas.

Tabla 5.9: Porcentaje de resistencia a compresión alcanzado por las probetas con adición de RHA respecto a la resistencia de diseño a los 28 días de curado.

Probetas	Porcentaje de resistencia alcanzado (%)
10% RHA	61,75
20% RHA	45,00
30%RHA	27,16

Fuente: Autores.

En la figura 5.14, se puede observar la resistencia a compresión en función de los días de curado para los diferentes porcentajes de ceniza de cascarilla de arroz adicionadas a las probetas de concreto.

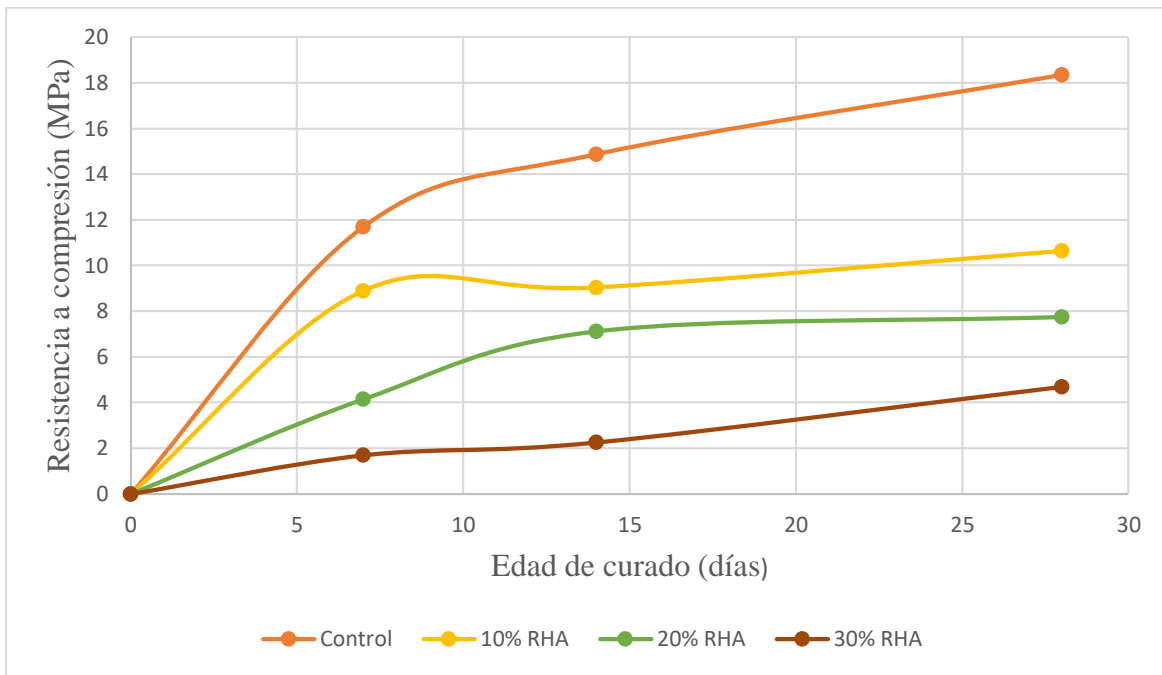


Figura 5.14: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para las probetas de concreto con diferentes porcentajes de RHA.

Fuente: Autores.

En la figura 5.14 mostrada puede evidenciarse que en la medida en que aumenta el porcentaje de ceniza adicionada en la mezcla de concreto, la resistencia a compresión de las probetas disminuye de forma considerable teniendo en cuenta la resistencia a compresión que obtuvieron las probetas de control, Esto teniendo en cuenta que los diferentes grupos de probetas alcanzaron los 28 días de curado, que es necesario para que se llegue a la resistencia de diseño del concreto. La tendencia antes mencionada es en gran parte mayor cuando es adicionado un 30% de ceniza de cascarilla de arroz. Esta característica puede deberse a diferentes factores, entre ellos la ausencia de cemento en el concreto que garantice una buena reacción puzolánica, ya que la ceniza usada presento características de tamaño de partículas de hasta 155,28 μ m no idóneas para actuar como puzolana, puesto que estas deben estar en un tamaño menor a 20 μ m. Nguyen Van Tuan (2011).

Otro factor importante a tener en cuenta es el bajo porcentaje de amorfabilidad del 25,4%, debido a las altas temperaturas a las que es sometida la ceniza usada superando los 700°C, en la cual se obtiene en su mayoría sílice con características cristalinas

Puede decirse que los resultados obtenidos tienen gran similitud con otros procesos de investigación desarrollados, donde por ejemplo con diferentes porcentajes de ceniza se encuentran valores de resistencia a compresión por encima y debajo del máximo valor de resistencia para las muestras de control.

En el caso de las investigaciones desarrolladas por Ganesan, K; Rajagopal, K; Thangavel, K; (2008), donde trabajaron concreto con adición de ceniza de cascarilla de arroz con múltiples porcentajes como reemplazo del cemento, encontraron que para un valor de 10% de inclusión de ceniza los valores de resistencia no tenían mayor variabilidad con respecto a las probetas de control, para valores mayores a 10% y hasta un 25% de adición, las resistencias aumentaban significativamente por encima del valor de control y para inclusiones de 30% y mayores la resistencia a la compresión disminuía de manera considerable de la muestra de referencia. En el trabajo mencionado se garantizó una temperatura controlada de quemado inferior a 700°C para obtener el mayor contenido de sílice amorfa y además se disminuyó el tamaño de partícula de la RHA con la intención de aumentar el grado de amorficidad de la ceniza.

Resultados similares a este fueron obtenidos por Hwang Chao-Lung (2011) donde hicieron adiciones de cemento de 10, 20 y 30% respectivamente al concreto, usando residuo agroindustrial producto de la quema de la cascarilla, donde al igual que en este estudio la RHA con un porcentaje del 91% de sílice, presento baja amofabilidad y tamaños de partícula

en su mayoría muy por encima de los establecidos para considerarse un material puzolánico. Debido a esto no se registraron mejoras importantes en la resistencia a la compresión del concreto usado.

En el año 2015 en Cali Colombia trabajaron la aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales, en los cuales agregaron la RHA como puzolana y como agregado fino, obteniendo buenos resultados cuando la ceniza es adicionada como reemplazo de la arena. puesto que, esta tiene propiedades muy similares al tamaño de partícula del agregado mencionado, con un tamaño promedio de $125,27\mu\text{m}$ y un porcentaje de sílice del 91,39%. por tanto, al usar la ceniza como puzolana no cumple con el objetivo propuesto, porque la RHA tiene un porcentaje bajo de sílice amorfa del 29,38% y un tamaño de partículas muy superior a la del cemento lo que dificulta la buena reacción de la mezcla de concreto.

5.5.2. Análisis de falla en las probetas de concreto ensayadas en resistencia a compresión

Al momento de realizar los ensayos de compresión a las probetas de concreto bajo la norma ASTM C39 (2014), se pudieron identificar tres tipos de falla diferentes presentes en las probetas, que se encuentran descritas en la norma antes mencionada. las fallas encontradas se identifican como, falla de TIPO 2, falla de TIPO 3, y falla de TIPO 4.

Las fallas TIPO 2 son las que poseen conos bien formados desde el cabezal de la probeta. Se forman grietas verticales que recorren desde la punta del cono hasta la orilla del extremo opuesto como puede verse en la figura 5.15. El tipo de falla que se muestra en la figura, se presentó en una de las probetas de concreto que contenía el 10% de RHA, la cual evidencia

una forma conica regular en la que parte una grieta vertical en su punta hacia el extremo opuesto de donde nacio el cono, dando trazos de la forma descrita en la norma ASTM C39/C39M(2014).



Figura 5.15: Falla tipo 2, presentada en una probeta con 10% de adición de ceniza.

Fuente: Autores.

Las fallas TIPO 3 son aquellas con grietas en forma de conos, no definidos o irregulares con fisuras verticales encolumnadas desde ambos extremos de las probetas. En la figura 5.16 se muestran los aspectos de la falla antes descrita en las probetas del experimento. En esta se pueden observar los conos verticales mal definidos o irregulares de los que habla la norma .

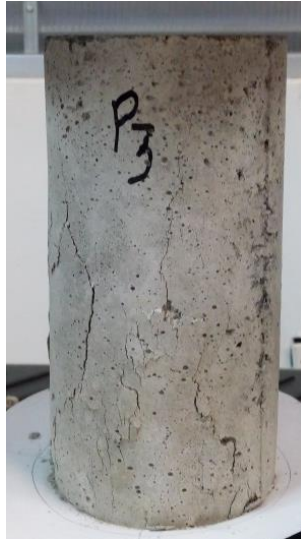


Figura 5.16: Falla tipo 3, presentada en una probeta con 20% de adición de ceniza.

Fuente: Autores.

Las fallas TIPO 4 poseen fracturas diagonales sin fisuras a travez de los extremos, este tipo de fracturas se puede distinguir en la figura 5.17, donde se ve claramente una grieta lineal en forma diagonal que parte del extremo superior hacia el inferior.



Figura 5.17: Falla tipo 4, presentada en una probeta con 30% de adición de ceniza.

Fuente: Autores.

Estos tipos de falla que se mostraron en las figuras 5.15 a 5.17, donde se presentan grietas en forma conica de aspecto ireegular en los extremos de las probetas de concreto y gietas verticales que llegan de un extremo al otro, se presentaron tanto en las probetas de control como en las que tenian adiccion de 10%, 20% y 30% de RHA; estas fallas pueden presentarse debido a que la simetria de las superficies de las probetas utilizadas, no quedan totalmente horizontales a la aplicasion de la carga, produciendo concentracion de esfuerzos en una zona mas que en otra.

Según lo dicho anteriormente, se puede aseverar que el pocentaje de ceniza de cascarilla de arroz adicionado a las probetas, no tuvo influencia o no fue un factor determinante en el tipo de falla de las probetas, ya que en todos los ensayos realizados no se evidenció una tendencia definida. Se consideró que los tipos de falla que mas se presentearon fueron los de TIPO 3 y TIPO 4, siendo el primero uno de los mas encontrados para las probetas en cada grupo.

El material que se desprendió al momento de practicar el ensayo de compresión a las probetas de concreto, no hubo mayor diferencia una de otra con respecto a los porcentajes de RHA, esto nos muestra que la ceniza no inside de manera directa en la formacion de la matriz del cilindro de concreto y que es similar a la de las probetas de control, a la hora de producirce la fractura debido a la carga axial aplicada. Por tanto, se puede decir que en principio no demuestra una diferencia notoria para aplicaciones de obras civiles al momento de la aplicacion de las cargas de trabajo a la cual se ponen las estructuras civiles hechas de concreto en la actualidad. Las fallas presentes en los ensayos se resumen en el anexo A8 del presente documento.

5.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR EL MÉTODO DE VARIANZAS (ANOVA)

Se comenzó con el análisis estadístico, tabulando los datos que se obtuvieron a la edad de curado de 7 días, en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Medias de la resistencia a la compresión para 7 días de curado en MPa.

% RHA	0%	10%	20%	30%
	12,01	9,74	4,10	1,73
	15,91	7,30	3,58	1,40
	10,88	8,52	4,58	2,08
	9,61	9,54	3,65	1,66
	10,81	9,42	4,86	1,56
media	11,70	8,90	4,15	1,69

Fuente: Autores.

En el programa de Microsoft Excel (2010), el cual contenía la información de los grupos de probetas, con un tamaño de muestra de $n=5$ y un nivel de significancia (Ns)=5%, en donde se obtuvo la siguiente información mostrada en la tabla 5.11.

Tabla 5.11: Análisis de varianza de Microsoft Excel para resistencia a compresión de 7 días de curado.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	307,1263085	3	102,3754362	52,74	1,61905E-08	3,238871517
Dentro de los grupos	31,05849489	16	1,941155931			
Total	338,1848034	19				

Fuente: Autores.

De esta tabla se toman como referencia los valores resaltados, el nivel de significancia N_s , se obtiene del programa, ya que la confiabilidad de este es del 95%, se compara el valor de la probabilidad resaltada con la N_s para determinar la hipótesis.

Para el caso de los datos mostrados en la tabla 5.11, la Probabilidad es menor a N_s , así que se tiene que aceptar la hipótesis alterna H_a , y se debe ubicar cuales son los grupos de información que poseen la diferencia significativa. Para esto es necesario buscar los parámetros que definen la prueba Tukey que se muestran en las ecuaciones 4.9 y 4.10.

Se utilizó la tabla de valores críticos para la prueba de Tukey para hallar el valor del multiplicador, la cual contrasta los grados de libertad que para este caso fueron 16 y el número de grupos que son 4.

$$M = 4,05$$

$$\text{Por tanto, HSD} = 2,52$$

Se realizó la tabla 5.12 en donde se anotaron las diferencias de las medias de cada grupo entre sí.

Tabla 5.12: Diferencias de las medias de cada grupo entre sí para 7 días de curado.

	0% ceniza	10% ceniza	20% ceniza	30% ceniza
0% ceniza		2,80	7,55	10,01
10% ceniza			4,75	7,22
20% ceniza				2,47
30% ceniza				

Fuente: Autores.

Se hizo una comparación entre el valor de HSD con los valores resultantes en la tabla 5.10, identificando cuál de esta era mayor al HSD para conocer los grupos que contiene la diferencia significativa.

Para el caso de los datos que corresponden a la edad de curado de 14 días, se tabularon en la siguiente tabla 5.13.

Tabla 5.13: Resistencia a compresión para 14 días de curado (MPa)

% RHA	0%	10%	20%	30%
	15,31	7,04	6,55	1,58
	15,28	10,90	8,22	1,90
	10,25	10,87	7,01	2,67
	14,38	7,37	6,32	3,13
	19,13	6,10	7,50	2,00
media	14,87	8,46	7,12	2,26

Fuente: Autores.

Se usa el programa de Microsoft Excel para hallar los valores de relevancia estadístico como se hizo para la edad de curado de 7 días. Cuya información se encuentra en la tabla 5.14.

Tabla 5.14: Análisis de varianza de Microsoft Excel para resistencia a compresión de 14 días de curado.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	405,3146045	3	135,1048682	33,51	3,95387E-07	3,238871517
Dentro de los grupos	64,51483127	16	4,032176955			
Total	469,8294358	19				

Fuente: Autores.

Como sucedió para el caso de la edad de curado de 7 días, el valor de la probabilidad es mucho menor que el valor del Nivel de Significancia N_s que es de 0,05, por tanto, se debe

utilizar la prueba de tukey para hallar la diferencia significativa, de los valores de las respectivas medias de los grupos, e identificar los grupos donde se encuentre esta diferencia. Se encontraron los parámetros de la prueba de tukey y el valor de Mse con la ecuación 4.10, que fue de 4,03; tomando los valores de la suma de cuadrados y grados de libertad resaltados en la tabla 5.14 se hallaron los valores críticos de la prueba de tukey, el cual, el valor del Multiplicador, es de 4,05 y por último se reemplazaron estos valores en la ecuación 4.9, con un tamaño de muestra $n=5$, luego se reemplazaron estos valores para hallar el número correspondiente a la Diferencia Honestamente Significativa HSD que dio 3,64; con el cual se hizo el respectivo análisis estadístico.

Se hace la tabla 5.15 hallando las diferencias del valor de resistencia de compresión media de cada porcentaje de RHA que corresponden a los grupos de estudio para los 14 días de curado.

Tabla 5.15: Diferencias de las medias de cada grupo entre sí para 14 días de curado

	0% ceniza	10% ceniza	20% ceniza	30% ceniza
0% ceniza		6,42	7,75	12,61
10% ceniza			1,34	6,20
20% ceniza				4,86
30% ceniza				

Fuente: Autores.

Por último, para el caso de la edad de curado de 28 días, se tabulo la información obtenida en el programa computacional de Excel en la tabla 5.16.

Tabla 5.16: Resistencia a compresión para 28 días de curado (MPa).

% RHA	0%	10%	20%	30%
	20,03	10,59	7,61	4,65
	21,64	10,83	8,49	4,10
	13,84	13,16	8,41	5,17
	15,61	7,58	6,20	5,79
	20,57	11,07	8,06	3,70
media	18,34	10,65	7,75	4,68

Fuente: Autores

Una vez más se utiliza el programa de Microsoft Excel para hallar los valores de relevancia estadístico como se hizo para las edades de curado anteriores; como puede verse en la tabla 5.17.

Tabla 5.17: Análisis de varianza de Microsoft Excel para resistencia a compresión de 28 días de curado.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	513,9423567	3	171,3141189	39,91	1,17786E-07	3,238871517
Dentro de los grupos	68,68103177	16	4,292564485			
Total	582,6233885	19				

Fuente: Autores.

Se compra el valor de la probabilidad que esta resaltado en la tabla 5.15 con el Nivel de Significancia Ns y se nota que la probabilidad es mucho menor que 0,05, que es el valor de

Ns, por tanto, se acepta la hipótesis alterna Ha, y se rechaza la hipótesis nula Ho, ya que, según el análisis de varianza dos o más grupos en los que se recopilaron los datos, sus medias, no son iguales y debemos conocer en que grupos se encuentra las diferencias con significancia. Para ello utilizamos la prueba de tukey con el fin de realizar un análisis en base a la ubicación de las diferencias notables de las medias. Se hallan los parámetros importantes de esta prueba, como el Mse, que se encuentra con la ecuación 4.10, tomando los resultados resaltados de suma de cuadrados y grados de libertad dentro de los grupos, el cual dio un valor de 4,29; el Multiplicador de los valores criticos de tukey, utilizando los grados de libertad de 4,05, el tamaño de la muestra de cada grupo n que es de 5, y reemplazando en la ecuación 4.9 que representa la Diferencia Honestamente Significativa HSD, se encontró un valor de 3,75, con el que se hizo el respectivo análisis estadístico.

En la tabla 5.18 hallamos las diferencias del valor de resistencia de compresión media de cada porcentaje de RHA que corresponden a los grupos de estudio para los 28 días de curado.

Tabla 5.18: Diferencias de las medias de cada grupo entre sí para 28 días de curado

	0% ceniza	10% ceniza	20% ceniza	30% ceniza
0% ceniza		7,69	10,59	13,66
10% ceniza			2,90	5,97
20% ceniza				3,07
30% ceniza				

Fuente: Autores.

En la tabla 5.12 se muestra la diferencia presente en los grupos de porcentajes de RHA reemplazados por cemento para la edad de curado de 7 días, se puede notar que hay una diferencia significativa entre el grupo de información de 0% de RHA o también conocido como la probetas de control con respecto a las probetas que tuvieron un 10% de RHA, esta diferencia se presentó para las probetas de 20% y las probetas de 30%; esta diferencia indica

que las medias presentan desviaciones de varianzas considerables que permiten determinar que el valor de la resistencia a la compresión en cada grupo es totalmente diferente y se puede realizar las demás conclusiones partiendo de esta información. Para el caso del grupo de 10% de ceniza se nota una diferencia grande con respecto a los grupos de 20% y 30% por tanto, las medias encontradas para estos grupos con respecto al grupo de 10% son diferentes de manera significativa. La diferencia que existe entre el grupo de las probetas con 20% de RHA y las que contienen el 30% arroja un resultado menor con respecto al HSD, que indica que las medias de los dos grupos no muestran una diferencia significativa estadísticamente analizada; se puede inferir que el cambio en el valor de la resistencia a la compresión no fue de relevancia manteniendo parecidos los resultados obtenidos.

En la tabla 5.15 se evidencia que al comparar las probetas de control con las probetas con 10%,20% y 30% de RHA, se presentan diferencias significativas entre los valores de las medias, esto comprueba que los resultados de la resistencia a la compresión que se obtuvieron en el experimento para la edad de 14 días de curado, son totalmente diferentes, de aquí en adelante se pueden realizar las diferentes conclusiones de esta diferencia demostrada estadísticamente. Para el caso correspondiente al grupo con 10% se estudia la diferencia que se presenta con respecto a los grupos de 20% y 30%, se denota que con el primer grupo no existe una diferencia, mostrando que los resultados no son diferentes y para el segundo grupo en mención si existe esta diferencia significativa que nos permite inferir un cambio sustancial en el valor de la resistencia a la compresión. Y por último se analizan los resultados obtenidos para el 20% de RHA con respecto al de 30% de RHA, se encontró que si existe un cambio de consideración en los resultados de las medias; indicando que la resistencia que tuvieron las probetas de ambos grupos fueron totalmente diferentes.

En la tabla 5.18 la comparación estadística realizada en las probetas de control con los respectivos reemplazos de porcentaje de RHA de 10%,20%, y 30% , para la edad de curado de 28 días, se sigue manteniendo la diferencia entre los grupos que también se manifestó en los análisis estadísticos realizados para las probetas ensayadas en la edad de curado de 14 días; esto nos indica que los resultados reales de la resistencia a la compresión se mantuvieron diferentes para las tres edades de curado, en el caso de las probetas de 10% de RHA con respecto a las probetas de 20% y 30%. Para el caso de 20% los resultados de las medias no representan una diferencia significativa como se evidenció en las probetas de 14 días, mostrando que entre esos intervalos de sustitución de cemento no hay diferencia entre la resistencia a la compresión. Pero para las probetas con 30% de RHA se siguió manteniendo la diferencia significativa. por último, para el análisis que se realizó entre el grupo con 20% y el 30% de ceniza, se muestra que no existe esta diferencia como en el estudio realizado para 7 días de curado, indicando que el cambio de resistencia a la compresión en comparación no es de relevancia estadística.

6. CONCLUSIONES

La ceniza de cascarilla de arroz, que se obtiene del desecho agrícola en el proceso de secado del arroz, realizado en la empresa INCOARROZ tuvo un porcentaje de óxido de Sílice de 89,20%, la cual mostro un bajo contenido de sílice amorfa de 25,4%, y un tamaño de partícula de hasta 155,28 μ m afectando la reacción puzolánica de la ceniza en la mezcla. Esto dice que la ceniza utilizada está por encima del valor permitido para que esta actúe como puzolana, que es menor a 20 μ m, contribuyendo a que no se desarrolle la reacción de hidratación necesaria para que el concreto alcance la resistencia a la compresión requerida.

La temperatura con la que es quemada la cascarilla de arroz no es adecuada, ya que está se encuentra entre 726°C a 760°C aproximadamente, con la cual la estructura de la RHA no desarrolla trazos de amorfabilidad, pues la temperatura recomendada en la literatura oscila por debajo de los 700°C.

Basándose en los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión, se demostró que la adición de ceniza de cascarilla de arroz reduce notablemente la densidad del concreto, disminuyendo un aproximado de 205kg por cada metro cubico. dando muestras de que puede ser una buena opción resistencia peso para las grandes construcciones.

El porcentaje de agua que se necesita para que en la mezcla de concreto se dé la reacción de hidratación, debe ser mayor conforme aumenta los porcentajes de RHA en comparación con la muestra de control. Esto se debe a que la ceniza al tener más volumen en la mezcla debido a su densidad absorbe mayor contenido de agua.

El concreto obtenido con porcentaje de ceniza de cascarilla de Arroz no adquirió las resistencias que se esperaban a los 28 días; no obstante, la relación resistencia peso puede ser

objeto de investigación para mampostería no estructural, donde es importante reducir el peso de los materiales.

7. RECOMENDACIONES

Al momento de obtener las probetas de concreto, se debe contar con unos moldes que garanticen que la superficie de los cilindros quede lo más plano y uniforme posible, para evitar que la carga que se aplica en los ensayos de compresión se concentre en un solo punto influyendo a un mal resultado obtenido debido a este desperfecto.

Se evidenció que la partícula de la ceniza que queda luego del quemado de la cascarilla es fina, muy parecido a la partícula de agregado fino, que se necesita para la realización de la mezcla de concreto, por tanto, se recomienda que para futuros estudios se piense en reemplazar el desecho agrícola por el agregado fino y verificar los cambios en las propiedades del concreto.

Se debe tener en cuenta el tamaño de la partícula de la ceniza de cascarilla de arroz, ya que, según estudios realizados anteriormente, se estableció que entre más pequeña es la partícula, está ocupara los espacios que se encuentran inmersos en la mezcla de concreto y donde se encuentran burbujas de aire que afectan la resistencia a la compresión.

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar el efecto de la RHA en la resistencia a flexión, para su uso en la elaboración de bloques de mampostería no estructural.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anwar, M., Miyagawa, T., and Gaweesh, M. 2001. Using rice husk ash as a cement replacement material in concrete. In the Proceedings of the 2001 first international Ecological Building Structure Conference. pp. 671- 684.

Amanda Pereira Vieira, Romildo Dias Toledo Filho, Luís Marcelo Tavares Guilherme Chagas Cordeiro^c. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete (2019)

ASOCRETO. 2010. Tecnología del concreto. Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tomo I. Nomos impresores, Colombia, p2-60

ASTM C31/C31M. 2008. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Annual book of ASTM standards.

ASTM-C33. 2013 Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual book of ASTM standards.

ASTM C39/C39M. 2014. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual book of ASTM standards.

ASTM C293 “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)”.

CURADURIA URBANA. 2014. Informe de Coyuntura Económica Regional. Departamento de Córdoba.

DANE. 2016. Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. Boletín técnico. Cuarto Censo Nacional Arrocero.

FAO. 2018. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Seguimiento del mercado del arroz, Abril de 2018

Favier, A., Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. and Roussel, N. (2013). Mechanical properties and compositional heterogeneities of fresh geopolymer pastes. *Cement and Concrete Research*, 48, pp.9-16.

FEDEARROZ 2016. Federación Nacional de Arroceros. Estadísticas arroceras.

Hendriks, C. A. (2017). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry.

Hwang Chao-Lung (2011). Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and Building Materials*.
<http://www.sciencedirect.com>.

Montgomery, D. and Runger, G. (2006). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: Limusa Wiley, pp.451-525.

Md. Abu Noaman Md. Rezul Karim Md. Nazrul Islam. Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete (2019)

NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO (2010).

Nguyen Van Tuan, Guang Ye, Klaas van Breugel, y Oguzhan Copuroglu. “Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash”. *Cement and Concrete Research* 41 (2011). pp. 1104-1111.

Oficemen, 2006. Agrupación de fabricantes de cementos de España. Crecimiento del consumo de cemento.

Peter A. Adesina Festus A. Olutoge. Structural properties of sustainable concrete developed using rice husk ash and hydrated lime (2019)

Pedro E. Matthey, Rafael A. Robayo, Jherson E. Díaz, Silvio Delvasto, José Monzó. (2015). Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales.

Rawaid Khan, Abdul Jabbar, Irshad Ahmad, Wajid Khan, Akhtar Naeem Khan, y Jahangir Mirza. “Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete”. Construction and Building Materials 30 (2012). pp. 360-365.

Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, Sharon L. Myers. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Pearson educación-México (2012).

Rodríguez de Sensale, G., Romay, C., Sabalsagaray, S. and Dalchiele, E. (2013). valorización del residuo obtenido de la quema de la cáscara de arroz. doctorado. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay.

Salas A., Ospina M. A., Delvasto S., Mejía de Gutiérrez R: “Study on the pozzolanic properties of silica obtained from rice husk by chemical and thermal process”. Phys. stat. sol. (c) 4(11) (2008). pp. 4311–4318

Saeid Hesami, S. A. (28 February 2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. Construction and Building Materials, 680- 691: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813011033>

Shravan Muthukrishnan Souradeep Gupta Harn Wei Kua. Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement mortar (2019)

Siddique, R. Chopra, D., y Kunal. (2015). "Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash". Biosystems Engineering.

UPME. 2014. Evaluación de la situación actual y de los escenarios futuros del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Cali, Cúcuta, Villavicencio, Cartagena, Sincelejo, Yopal, Valledupar y Montería. p43.

9 ANEXOS

A1: Densidad de todas las probetas de concreto sometidas al ensayo de compresión

probeta	Material usado	Porcentaje en volumen de ceniza (%)	Edad de curado (días)	Longitud (m)	Diámetro (m)	Masa (Kg)	Volumen (m ³)	Densidad (Kg/m ³)
P1	CONTROL	0	7	0,2	0,101	3,555	0,00160	2218,66
P2	CONTROL	0	7	0,2	0,1	3,535	0,00157	2250,52
P3	CONTROL	0	7	0,201	0,101	3,565	0,00161	2213,83
P4	CONTROL	0	7	0,199	0,1	3,545	0,00156	2268,22
P5	CONTROL	0	7	0,2	0,101	3,57	0,00160	2228,02
P1	CONTROL	0	14	0,201	0,101	3,64	0,00161	2260,40
P2	CONTROL	0	14	0,2	0,101	3,59	0,00160	2240,50
P3	CONTROL	0	14	0,2	0,1	3,63	0,00157	2311,00
P4	CONTROL	0	14	0,201	0,101	3,64	0,00161	2260,40
P5	CONTROL	0	14	0,2	0,1	3,61	0,00157	2298,27
P1	CONTROL	0	28	0,199	0,1	3,56	0,00156	2277,82
P2	CONTROL	0	28	0,2	0,102	3,615	0,00163	2212,08
P3	CONTROL	0	28	0,2	0,101	3,59	0,00160	2240,50
P4	CONTROL	0	28	0,199	0,1	3,58	0,00156	2290,62
P5	CONTROL	0	28	0,2	0,1	3,57	0,00157	2272,80
P1	CENIZA	10	7	0,2	0,101	3,555	0,00160	2218,66
P2	CENIZA	10	7	0,2	0,1	3,505	0,00157	2231,42
P3	CENIZA	10	7	0,2	0,1	3,56	0,00157	2266,43
P4	CENIZA	10	7	0,202	0,1	3,61	0,00159	2275,51
P5	CENIZA	10	7	0,199	0,1	3,47	0,00156	2220,24
P1	CENIZA	10	14	0,2	0,101	3,45	0,00160	2153,13
P2	CENIZA	10	14	0,201	0,101	3,51	0,00161	2179,67
P3	CENIZA	10	14	0,201	0,101	3,49	0,00161	2167,25

P4	CENIZA	10	14	0,2	0,101	3,455	0,00160	2156,25
P5	CENIZA	10	14	0,201	0,102	3,39	0,00164	2064,08
P1	CENIZA	10	28	0,2	0,101	3,435	0,00160	2143,76
P2	CENIZA	10	28	0,201	0,1	3,495	0,00158	2213,98
P3	CENIZA	10	28	0,199	0,101	3,445	0,00159	2160,81
P4	CENIZA	10	28	0,2	0,101	3,455	0,00160	2156,25
P5	CENIZA	10	28	0,199	0,1	3,405	0,00156	2178,65
P1	CENIZA	20	7	0,2	0,1	3,355	0,00157	2135,92
P2	CENIZA	20	7	0,2	0,1	3,405	0,00157	2167,75
P3	CENIZA	20	7	0,2	0,1	3,415	0,00157	2174,12
P4	CENIZA	20	7	0,2	0,1	3,365	0,00157	2142,29
P5	CENIZA	20	7	0,2	0,1	3,355	0,00157	2135,92
P1	CENIZA	20	14	0,201	0,102	3,39	0,00164	2064,08
P2	CENIZA	20	14	0,202	0,101	3,37	0,00162	2082,37
P3	CENIZA	20	14	0,201	0,1	3,345	0,00158	2118,96
P4	CENIZA	20	14	0,201	0,101	3,39	0,00161	2105,15
P5	CENIZA	20	14	0,2	0,101	3,385	0,00160	2112,56
P1	CENIZA	20	28	0,2	0,1	3,29	0,00157	2094,54
P2	CENIZA	20	28	0,2	0,1	3,295	0,00157	2097,72
P3	CENIZA	20	28	0,199	0,101	3,265	0,00159	2047,91
P4	CENIZA	20	28	0,199	0,101	3,27	0,00159	2051,04
P5	CENIZA	20	28	0,199	0,101	3,365	0,00159	2110,63
P1	CENIZA	30	7	0,201	0,1	3,335	0,00158	2112,63
P2	CENIZA	30	7	0,2	0,1	3,33	0,00157	2120,01
P3	CENIZA	30	7	0,2	0,1	3,305	0,00157	2104,09
P4	CENIZA	30	7	0,2	0,1	3,27	0,00157	2081,81
P5	CENIZA	30	7	0,2	0,1	3,285	0,00157	2091,36
P1	CENIZA	30	14	0,201	0,1	3,16	0,00158	2001,77
P2	CENIZA	30	14	0,201	0,101	3,245	0,00161	2015,11

P3	CENIZA	30	14	0,2	0,101	3,22	0,00160	2009,58
P4	CENIZA	30	14	0,201	0,1	3,24	0,00158	2052,45
P5	CENIZA	30	14	0,2	0,101	3,23	0,00160	2015,82
P1	CENIZA	30	28	0,201	0,101	3,235	0,00161	2008,90
P2	CENIZA	30	28	0,2	0,101	3,155	0,00160	1969,02
P3	CENIZA	30	28	0,201	0,1	3,235	0,00158	2049,28
P4	CENIZA	30	28	0,201	0,101	3,315	0,00161	2058,58
P5	CENIZA	30	28	0,202	0,101	3,38	0,00162	2088,55

A2: Granulometría de la arena del Rio Sinú utilizada para la fabricación de las probetas de concreto con adición de RHA.

TAMICES		PESO		% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA		
No	mm	RETENIDO gr						
2	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
4	4,75	94,20	7,48	7,48	7,48	92,52		
8	2,36	141,20	11,21	18,68	18,68	81,32		
16	1,18	215,20	17,08	35,76	35,76	64,24		
30	0,595	418,50	33,21	68,98	68,98	31,02		
50	0,297	196,90	15,63	84,60	84,60	15,40		
100	0,149	136,12	10,80	95,41	95,41	4,59		
200	0,149	57,51	4,56	99,97	99,97	0,03		

MODULO DE FINURA: =	2,87	TAMAÑO MAXIMO DE PARTICULA:
---------------------	------	-----------------------------

A3: calculo granulométrico del tamaño máximo nominal de la grava del rio Sinú usada en la fabricación de las probetas de concreto con adición de RHA.

P3	CONTROL	0	14	10,26
P4	CONTROL	0	14	14,39
P5	CONTROL	0	14	19,13
P1	CONTROL	0	28	20,03
P2	CONTROL	0	28	21,64
P3	CONTROL	0	28	13,84
P4	CONTROL	0	28	15,61
P5	CONTROL	0	28	20,57
P1	CENIZA	10	7	9,74
P2	CENIZA	10	7	7,29
P3	CENIZA	10	7	8,52
P4	CENIZA	10	7	9,54
P5	CENIZA	10	7	9,42
P1	CENIZA	10	14	7,04
P2	CENIZA	10	14	10,90
P3	CENIZA	10	14	10,88
P4	CENIZA	10	14	7,37
P5	CENIZA	10	14	6,10
P1	CENIZA	10	28	10,59
P2	CENIZA	10	28	10,83
P3	CENIZA	10	28	13,17
P4	CENIZA	10	28	7,58
P5	CENIZA	10	28	11,07
P1	CENIZA	20	7	4,10
P2	CENIZA	20	7	3,58
P3	CENIZA	20	7	4,58
P4	CENIZA	20	7	3,65
P5	CENIZA	20	7	4,86
P1	CENIZA	20	14	6,56
P2	CENIZA	20	14	8,22
P3	CENIZA	20	14	7,01
P4	CENIZA	20	14	6,32
P5	CENIZA	20	14	7,50
P1	CENIZA	20	28	7,61
P2	CENIZA	20	28	8,49
P3	CENIZA	20	28	8,41
P4	CENIZA	20	28	6,20
P5	CENIZA	20	28	8,06
P1	CENIZA	30	7	1,74
P2	CENIZA	30	7	1,40

P3	CENIZA	30	7	2,08
P4	CENIZA	30	7	1,66
P5	CENIZA	30	7	1,56
P1	CENIZA	30	14	1,58
P2	CENIZA	30	14	1,90
P3	CENIZA	30	14	2,67
P4	CENIZA	30	14	3,13
P5	CENIZA	30	14	2,01
P1	CENIZA	30	28	4,65
P2	CENIZA	30	28	4,10
P3	CENIZA	30	28	5,17
P4	CENIZA	30	28	5,79
P5	CENIZA	30	28	3,71

A6: Resistencia a compresión promedio para las 3 edades de curado

Mezcla	Resistencia a compresión 7 días de curado (MPa)	Resistencia a compresión 14 días de curado (MPa)	Resistencia a compresión 28 días de curado (MPa)
Control	11,7	14,87	18,34
10% ceniza	8,9	9,04	10,64
20% ceniza	4,15	7,12	7,75
30% ceniza	1,69	2,25	4,68

A7: Curva de resistencia a compresión como función del porcentaje de volumen de RHA, adicionado a la mezcla de concreto para 7 Y 14 días de curado.

