

BLOQUES PARA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL A PARTIR DE MATERIALES
NO CONVENCIONALES

ANDRES BERMUDEZ PÁRRA
JONATHAN ALEXANDER TOVAR M

INGENIERO SILVIO DELVASTO ARJONA, MSc; Ph.D
DIRECTOR

INGENIERO YIMMY SILVA, MSc
CO - DIRECTOR

GRUPO DE MATERIALES COMPUESTOS



UNIVERSIDAD DEL VALLE - FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
COLOMBIA- SANTIAGO DE CALI

2017

BLOQUES PARA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL A PARTIR DE MATERIALES
NO CONVENCIONALES

ANDRES BERMUDEZ PÁRRA
JONATHAN ALEXANDER TOVAR M

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE
MATERIALES

INGENIERO SILVIO DELVASTO ARJONA, MSc; Ph. D
DIRECTOR

INGENIERO YIMMY SILVA URREGO, MSc
CO - DIRECTOR

UNIVERSIDAD DEL VALLE - FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
COLOMBIA- SANTIAGO DE CALI

2017

Nota de aceptación

Director

Jurado

Jurado

Santiago de Cali. Agosto, 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios.

A la Universidad del Valle, a la Facultad de Ingeniería, a nuestra Escuela de Ingeniería de Materiales por habernos permitido cumplir un sueño de formarnos en esta prestigiosa y amada institución, ya que seguramente no pudo haber mejor lugar para educarnos.

Al profesor y director Silvio Delvasto por ser el director de este proyecto y darnos la oportunidad de desarrollarlo.

A Yimmy Silva Urrego por su calidad de persona, profesional y amigo, ya que fue supremamente importante en cada paso de la realización de este trabajo, fue sencillamente un integrante más.

A los laboratoristas Constanza, July y Don Carlos. Por su amabilidad, colaboración y ayuda con cada uno de las labores que se presentaban en la ejecución del proyecto.

Agradezco a mis Padres Idolfo Tovar Sánchez y Gladis Mambuscay Dorado por su apoyo incondicional, a mis hermanos Gustavo Adolfo Tovar y Stephany Tovar y demás familiares y amigos que siempre estuvieron alentándome.

Agradezco a mis padres Nelson Bermúdez y Olga Lucia Parra, por su inmenso e incondicional apoyo durante mi formación académica, ya que lo que soy y seré es gracias a cada uno de los esfuerzos realizados para darme lo mejor. Así mismo sin menos importancia a mis hermanos Fabio Bermúdez Parra y Diego Fernando Bermúdez Parra, quien siempre está pendiente de cada paso firme que he dado como ejemplo para su vida.

También agradecer infinitamente y quizás con la mayor gratitud a mi novia Stefhania Montaña quien desde hace más de 11 años ha sido un pieza vital en mi vida.

Finalmente, ambos agradecemos a todos aquellos que en algún momento han sido un pilar para conseguir nuestros objetivos como futuros ingenieros, sin mencionarlos para no dejar ninguno por fuera, pero ellos saben que han sido esenciales para conseguir nuestro logro, muchas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN EJECUTIVO	12
1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GENERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. ESTADO DEL ARTE	16
3.1. MARCO TEÓRICO	16
3.1.1. Concreto fabricado con cemento Portland	16
3.1.2. Cemento.....	16
3.1.3. Agregados o áridos	17
3.1.4. Cascarilla de arroz	17
3.1.5. Ceniza de cascarilla de arroz (RHA)	17
3.1.6. Puzolana	18
3.1.7. Residuos de Construcción y Demolición.	19
3.1.8. Agua.....	20
3.1.9. Fique	20
3.1.10. Jugo de fique	20
3.1.11. Resistencia a la compresión de bloques de concreto estructural ...	21
3.1.12. Concreto vibrado.....	21
3.2. ANTECEDENTES.....	21
3.2.1. Agregados.....	21
3.2.2. Ceniza de cascarilla de arroz	22
3.2.3. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	24
3.2.4. Mortero adherido	26
3.2.5. Jugo de la planta de fique (JPF)	27
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	28
4.1. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA	28
4.2. ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	29

4.2.1.	Escombros de concreto.....	29
4.2.2.	Cemento.....	29
4.2.3.	Caracterización de los agregados	29
4.2.4.	Ceniza de cascarilla de arroz	30
4.2.5.	Pruebas realizadas al concreto en estado plástico y endurecido	31
4.3.	DISEÑO DEL CONCRETO.....	32
5.	PRODUCCIÓN DEL CONCRETO.....	33
5.1.	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ÓPTIMA DE LA MEZCLA DE ÁRIDOS FINOS Y ÁRIDOS GRUESOS	33
5.2.	SUSTITUCIÓN DE ARENA POR CENIZA	36
5.3.	APORTE DE JUGO DE FIQUE	37
5.4.	SUSTITUCIÓN DE GRAVA POR AGREGADO RECICLADO.....	37
5.5.	DISEÑO MEZCLA FINAL	37
5.6.	APORTE PUZOLÁNICO DE LA CENIZA	37
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	38
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	38
6.1.1.	Escombros de concreto.....	38
6.1.2.	Cemento.....	39
6.1.3.	Agregado grueso (grava natural).....	40
6.1.4.	Agregado fino (arena)	40
6.1.5.	Ensayo de impurezas orgánicas	42
6.1.6.	Agregado grueso (reciclado)	43
6.1.7.	Ceniza de cascarilla de arroz	48
6.2.	ESTUDIO DEL ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	52
6.3.	CÁLCULO DE LA SUSTITUCIÓN DE ARENA POR CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	55
6.4.	EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE JUGO DE FIQUE A UTILIZAR	58
6.5.	CÁLCULO DE LA SUSTITUCIÓN DE GRAVA NATURAL POR AGREGADO RECICLADO.....	60
6.6.	PRUEBA DE ASENTAMIENTO MEZCLA FINAL	64
6.7.	ELABORACIÓN DE BLOQUES ESTRUCTURALES DE CONCRETO	65

6.8.	ENSAYOS DE PERMEABILIDAD	67
6.8.1.	Absorción, densidad y porosidad	67
6.8.2.	Ensayo de succión capilar.....	68
6.8.3.	Comparación micrográfica mezcla patrón y final.....	70
7.	CONCLUSIONES	72
8.	REFERENCIAS	73

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ensayo realizado para la caracterización de agregados naturales y reciclado	30
Tabla 2. Normas utilizadas en el análisis del concreto en estado plástico y endurecido	31
Tabla 3. Diseño mezcla patrón	32
Tabla 4. Resistencia cubos de concreto reciclado.....	38
Tabla 5. Composición química del cemento argos tipo I	39
Tabla 6. Análisis granulométrico de la grava natural	40
Tabla 7. Características físicas de la grava natural	40
Tabla 8. Análisis granulométrico de la arena.....	41
Tabla 9. Características físicas de la arena natural	41
Tabla 10. Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado.....	43
Tabla 11. Características físicas del agregado grueso reciclado.....	44
Tabla 12. Resultado de la resistencia al desgaste de la grava virgen	45
Tabla 13. Granulometría grava virgen pasada por el molino de bolas	46
Tabla 14. Resultado resistencia al desgaste agregado reciclado.....	46
Tabla 15. Granulometría agregado reciclado pasada por el molino de bolas.....	47
Tabla 16. Análisis granulométrico de la ceniza de cascarilla de arroz.....	48
Tabla 17. Características físicas de la ceniza de cascarilla de arroz.....	50
Tabla 18. Composición química puntual de la ceniza de cascarilla de arroz mediante EDS.....	51
Tabla 19. FRX de la ceniza de cascarilla de arroz	52
Tabla 20. Datos de dosificación para determinación del índice de actividad puzolánica.....	53
Tabla 21. Datos resistencia a la compresión, índice de actividad puzolánica	54
Tabla 22. Resultados ensayo químico para la determinar la actividad puzolánica de la RHA	54
Tabla 23. Dosificación, sustitución ceniza de cascarilla de arroz por arena y cemento	56
Tabla 24. Dosificación, sustitución ceniza de cascarilla de arroz por arena.....	56
Tabla 25. Resistencias a compresión de la RHA por arena	57
Tabla 26. Dosificación, sustitución RHA y porcentaje del JPF por material cementante	58
Tabla 27. Resistencias al adicionar 3% y 5% de JPF, a los % de sustitución de RHA por arena.....	59
Tabla 28. Dosificación, sustitución RHA por arena, porcentaje de JPF y RCD por grava natural	61

Tabla 29. Resistencias a compresión al adicionar 3% y 5% de JPF, a 100kg/m ³ de sustitución de RHA por arena y (100, 75, 50 y 25) % de RCD por grava natural. .62	62
Tabla 30. Resistencia a la compresión de los bloques estructurales de concreto.66	66
Tabla 31. Resultados del ensayo de absorción, densidad y porosidad67	67
Tabla 32. Ensayo de succión capilar a 28 días de curado para la mezcla final (100kg/m ³ de RHA, 5% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD68	68
Tabla 33. Ensayo de succión capilar a 28 días de curado para la mezcla final (100kg/m ³ de RHA, 3% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD69	69

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tamices para determinación de granulometría de la ceniza de cascarilla de arroz.....	30
Figura 2. Paso a paso ensayo experimental de vibración para la determinación de vacíos	35
Figura 3. Ensayo experimental de adición de agua para la determinación de espacios vacíos.	35
Figura 4. Molino de mandíbulas y agregado grueso reciclado (tamaño máximo ½”)	38
Figura 5. Granulometría laser del cemento argos tipo I	39
Figura 6. Ensayo de colorimetría del agregado fino (arena)	42
Figura 7. Ensayo de colorimetría de agregados reciclado	43
Figura 8. Molino de bolas	45
Figura 9. Granulometría laser de la ceniza de cascarilla de arroz	48
Figura 10. Determinación de la densidad de la ceniza de cascarilla de arroz.....	49
Figura 11. SEM-EDS Ceniza de cascarilla de arroz.....	51
Figura 12. Mesa de flujo para el 0% y 20% de sustitución de cemento por RHA respectivamente.....	53
Figura 13. Grafica de solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en presencia de álcalis a 40°C	55
Figura 14. Asentamiento, sustitución de ceniza de cascarilla de arroz por arena.....	58
Figura 15. Asentamiento, grava natural, sustitución de 100kg/m ³ de RHA y JPF en 3% y 5% respectivamente.	60
Figura 16. Agregados utilizados en la mezcla final	61
Figura 17. Asentamientos, mezcla final 3% y 5% de jugo de fique respectivamente	64
Figura 18. Proceso de elaboración de bloques estructurales de concreto mezcla final	65
Figura 19. Bloques en proceso de curado	65
Figura 20. Bloques refrentados con yeso escayola.....	66
Figura 21. Imagen estereoscópica del espécimen tipo patrón a 15X.....	71
Figura 22. Imagen estereoscópica de la mezcla final a 12X	71

LISTADO DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Distribución granulométrica del agregado fino (arena) y grueso (grava)	33
Gráfica 2. Distribución granulométrica, mezclas del agregado fino (arena) y grueso (grava)	36
Gráfica 3. Superposición de la distribución granulométrica del cemento y la RHA	53
Gráfica 4. Comparación granulométrica grava natural (patrón) y grava reciclada (mezcla final).....	63
Gráfica 5. Ensayo de succión capilar a 28 días, mezcla final (100kg/m ³ de RHA, 5% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD).....	69
Gráfica 6. Ensayo de succión capilar a 28 días, mezcla final (100kg/m ³ de RHA, 3% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD).....	70

RESUMEN EJECUTIVO

Es evidente la gran demanda de concreto que hay en la actualidad, donde la mayoría de las estructuras habitacionales o empresariales requieren del uso de este material compuesto. La producción de concreto a nivel mundial contribuye en un alto porcentaje a la contaminación global debido al alto consumo energético tanto en la extracción de la materia prima como en el procesamiento de la misma (Rodrigues et al. 2016).

En el marco de este proyecto se buscó involucrar el aprovechamiento de un abundante residuo agroindustrial como la ceniza de cascarilla de arroz (RHA), Proveniente del cultivo de arroz en departamentos como Meta, Casanare, Tolima, Huila y en otros en menor proporción como el Valle del Cauca; en el año 2015 la producción de arroz a nivel nacional fue de 780,997 toneladas y para el 2016 llegó a 874,178 toneladas, mostrando un incremento anual considerable (Dane 2016). Además la cascarilla presenta un bajo índice de degradabilidad natural, lo que hace pertinente el uso de este residuo (Quiceno & Mosquera 2010).

El presente estudio buscó una alternativa de uso de este subproducto agroindustrial como reemplazo de agregado fino (arena) en la fabricación de bloques para mampostería estructural. De igual manera, se busca utilizar el residuo de construcción y demolición (RCD) como sustituto del agregado grueso, ya que al nivel regional se ha venido presentando gran aumento en toneladas de este residuo. “Cada día en Cali se generan cerca de 1850 toneladas de escombros que van a parar a puntos críticos generando focos de contaminación” (Dagma 2016). Además, se incluyó en el estudio la adición de jugo de las hojas de la planta de fique (JPF), proveniente del extracto orgánico de origen vegetal, el cual fue empleado como aditivo.

En esta investigación se fabricaron bloques de concreto para uso en mampostería estructural, empleando residuos y subproductos agroindustriales como reemplazo de los agregados y el jugo de fique como ayuda reológica. La RHA sustituyó a la arena en cantidades entre 300 kg/m^3 y 60 kg/m^3 con respecto a cantidad de arena de la mezcla de referencia (Patrón). Al porcentaje óptimo de empleo de RHA se le adicionó 3% y 5% de JPF, seleccionando finalmente la mezcla con 100 kg/m^3 (16% aproximado) de RHA y 5% de JPF. A las cantidades anteriormente seleccionadas se adicionó RCD en porcentajes entre 0% a 100%, siendo el porcentaje de 100% del RCD el seleccionado.

Sin embargo la resistencia a compresión de los bloques de concreto obtenidos con la sustitución final de RHA, RCD y aditivo de JPF, que fueron en promedio de

11,7 MPa está por debajo de la alcanzada con el concreto patrón en un 35% aproximadamente, No obstante los valores de resistencia hallados están dentro del rango que permiten cumplir el objetivo de lograr un concreto amigable con el medio ambiente para ser utilizado en bloques para mampostería estructural.

Palabras claves: Residuo de construcción y demolición (RCD), Ceniza de cascarilla de arroz (RHA), Jugo de las hojas de la planta de fique (JPF), bloque estructural, concreto.

1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El concreto es un material compuesto de consumo masivo mundial, presenta muchas ventajas en función de sus propiedades mecánicas, químicas y físicas, es por eso que se ha establecido como el material primario para la construcción de importantes obras civiles como vías, puentes y edificaciones, así mismo es trascendente no perder de vista que como material compuesto, presenta diferentes materias primas para su constitución, dentro de las cuales se requiere algunos componentes provenientes de fuentes no renovables (Mercader et al. 2010), generando un importante impacto ambiental al ser obtenidos a través de minería a cielo abierto.

De igual forma el entorno cambiante y el requerimiento de modificaciones y/o mejoramiento de estructuras, ha requerido realizar constantes cambios donde el principal actor ha sido el concreto, por tal motivo, se ha generado una importante contaminación ambiental ya que la mayoría de los residuos de demolición llegan a vertederos no autorizados, generando un gran volumen de escombros con consecuencias ambientales a nivel mundial, generando críticas y al mismo tiempo investigaciones que buscan dar solución a dicho problema.

Es por esto que, con la finalidad de reducir escombros, desechos agroindustriales y la tasa de explotación de minerales en yacimientos y canteras, se buscó el empleo de estos residuos como agregados en el concreto, para así obtener un material con algún tipo de aplicación o servicio de mayor beneficio, ya que por lo general se usa como material de relleno en la construcción de carreteras (Wijayasundara et al. 2017).

A residuos orgánicos como la cascarilla de arroz se le ha buscado una alternativa de uso aprovechable como combustible para generar calor en hornos de secado de arroz gracias a su capacidad calórica (aproximadamente 3500 kcal/kg) (Prada & Cortes 2010), esta ceniza no tiene un valor agregado significativo, es por eso, que se buscó implementarla como sustituto del agregado fino natural. Esto se llevara a cabo en proporciones regulables para no afectar el desempeño de los concretos, de tal forma, el presente proyecto muestra una posible solución de gran incidencia ambiental, social y económico, ya que al reciclar estos materiales se disminuye el costo y es más accesible a los sectores de la sociedad con menos recursos, por tanto, se consideró justificado el uso del concreto reciclado y la ceniza de cascarilla de arroz como fuentes alternativas de nuevos agregados.

No obstante, este material compuesto puede tener algunas propiedades diferentes al elaborado con los agregados vírgenes, es el caso que se presentó en el

desarrollo del proyecto al sustituir la arena por RHA, donde la consistencia del concreto fue demasiado seca al punto de no permitir la manipulación adecuada de las probetas, por tal motivo se buscó una alternativa igualmente amigable con el medio ambiente como lo es la adición de JPF cuyas características de ayuda reológica en la fabricación de concretos.

El JPF está conformado principalmente por agua, celulosa, materia orgánica y minerales, donde a su vez la materia orgánica está constituida por sacarosa, proteínas, esteroides, saponinas. Éstas últimas se comportan como surfactantes y son las responsables de la oclusión de aire en morteros y hormigones, es por eso, que la utilización de este producto que es un desecho de producción de las fibras vegetales procedentes de la planta de fique, en donde se estima que sólo el 5%, del peso de la planta, se recoge como fibra utilizable en la industria y en donde los desechos generados por el desfibrado del fique corresponde al 95% restante del peso de la hoja, y está representado en el bagazo (30%) y el jugo (70%) (Jaramillo & Ochoa 2009).

El trabajo de grado se realizó en el marco del proyecto “Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo” contrato FP44842-399-2015, financiado por el patrimonio autónomo fondo nacional de financiamiento para la ciencia, la tecnología y la innovación, francisco José de caldas – Colciencias, proyecto que es dirigido por el profesor Silvio Delvasto de la Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Fabricar bloques de concreto para mampostería estructural a partir de la sustitución parcial de agregados por RCD y RHA, en la búsqueda de materiales no convencionales amigables con el medioambiente.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar una formulación adecuada de sustitución parcial de RCD y RHA, que permita cumplir con las normas estructurales de los bloques.
- Contribuir a la reducción de la explotación y producción de materiales convencionales usados para la fabricación de bloques de concreto.

- Darle un valor agregado a materiales residuales que habían perdido su condición de uso eficiente.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. MARCO TEÓRICO

3.1.1. Concreto fabricado con cemento Portland

El concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados y áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión. Como las piedras naturales el concreto tiene resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción (por lo general la resistencia a la tracción es del orden de un 10% de su resistencia a la compresión); por lo tanto es inadecuado para formar piezas que han de resistir tracciones o flexiones. Pero al disponer varillas de acero en las zonas de tracción, se suple esta deficiencia, teniendo una pieza resistente a la flexión (Guzmán 2001).

3.1.2. Cemento

Durante el desarrollo del proyecto grado “bloques para mampostería estructural a partir de materiales no convencionales”, el cemento utilizado fue el cemento argos tipo I de uso general.

El cemento ampliamente utilizado es el cemento Portland hidráulico, el cual tiene propiedades de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto. “Estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de sus partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar. Cuando la mezcla se encuentra en estado plástico, la pasta actúa como lubricante de los agregados impartiendo fluidez a la mezcla, lo cual permite que la colocación y consolidación del concreto sean adecuadas ya que el alto grado de confinamiento conduce a una mayor resistencia. Cuando la mezcla se encuentra en estado sólido, la pasta de cemento obtura los espacios que hay entre las partículas a aglutinarse, reduciendo la permeabilidad del concreto y evitando el desplazamiento del agua dentro de la masa endurecida, lo cual es crítico en estructuras hidráulicas o en concretos que están expuestos a la acción de aguas agresivas que eventualmente puede degradar la estructura de la masa haciéndole perder resistencia” (Guzmán 2001).

3.1.3. Agregados o áridos

Como agregados o áridos para concretos pueden tomarse en consideración todos aquellos materiales que poseen una resistencia propia suficiente (resistencia del grano), no perturban ni afectan el endurecimiento del cemento hidráulico, es decir que son inertes y garantizan una adherencia suficiente con la pasta de cemento endurecida. Estos materiales pueden ser naturales o artificiales, dependiendo de su origen. La razón principal de utilizar agregados dentro de una mezcla de concreto, es que estos actúan como material de relleno, haciendo más económica la mezcla. Los agregados, en combinación con la pasta fraguada, también proporcionan parte de la resistencia mecánica característica a la compresión, debido a que, como se mencionó anteriormente, estos tienen una resistencia propia que aportan al concreto como masa endurecida (Guzmán 2001).

3.1.4. Cascarilla de arroz

La cáscara de arroz es un residuo agroindustrial obtenido de la cubierta externa de los granos de arroz durante el proceso de molienda. La producción de arroz a nivel mundial es de más de 700 millones de toneladas de la cual la cáscara de arroz constituye alrededor del 20% del peso del arroz, esta contiene aproximadamente 50% de celulosa, 25 a 30% de lignina, y 15-20% de sílice (Siddique & Iqbal Khan 2011).

3.1.5. Ceniza de cascarilla de arroz (RHA)

La ceniza de cascarilla de arroz utilizada para el desarrollo del proyecto de grado “Bloques para mampostería estructural a partir de materiales no convencionales”, proviene de la Arrocería La Esmeralda ubicada en el municipio de Jamundí- Valle del Cauca.

La ceniza de cascarilla de arroz es generada por la quema de cáscara de arroz. En la combustión, la celulosa y lignina se retiran dejando atrás cenizas de sílice, esta ceniza es producida por la quema de la cáscara de arroz entre 550°C y 700°C de temperatura de incineración durante una hora para transformar el contenido de la ceniza en sílice en fase amorfa. La reactividad de la sílice amorfa es directamente proporcional a la superficie específica de la ceniza. La ceniza así producida es pulverizada o molida y mezclada con cemento para producir un compuesto de cemento (Siddique & Iqbal Khan 2011).

Totalmente quemada la ceniza de cascarilla de arroz podría ser de color gris, púrpura o blanco, dependiendo de las impurezas presentes y de las condiciones de combustión. En la quema a campo abierto o en entornos no controlados de combustión, la ceniza se mantendrá en su mayoría no-reactiva debido a la

composición mineralógica desfavorable. La sílice de cascarilla de arroz es amorfa, cristalina o parcialmente amorfa dependiendo de la manera en la que se quema y se enfría. Si la ceniza se forma en la quema a campo abierto o en entornos no controlados de combustión, una gran proporción de sílice no reactiva se tendrá en forma de cristobalita y tridimita, la cual mediante una molienda intensiva ayudaría que se presentara una activación mecanoquímica. La reactividad de la ceniza de cascarilla de arroz se atribuye a su alto contenido de sílice amorfa, y a su gran superficie específica, gobernada por la estructura porosa de las partículas (Siddique & Iqbal Khan 2011).

En general, la reactividad es favorecida también por el aumento de la finura del material puzolánico. Sin embargo, algunos autores informan que la molienda de RHA con un alto grado de finura debe evitarse, ya que se reduce su actividad puzolánica principalmente de la superficie interna de las partículas. La forma de sílice obtenida después de la combustión de la cáscara de arroz depende de la temperatura y la duración de la combustión de cáscara de arroz (Siddique & Iqbal Khan 2011).

3.1.6. Puzolana

Los materiales de carácter puzolánico se usan generalmente en mezclas aglutinantes aéreas e hidráulicas con el fin de mejorar ciertas características de morteros y hormigones. Las puzolanas se definen comúnmente como materiales que tienen propiedades aglomerantes, pero no en sí mismas, estas se dan cuando se encuentra en presencia de agua. En las normas ASTM (C 340-58 T) sobre cementos, la definición es prácticamente idéntica, las puzolanas son materiales aluminosilíceos, que no poseen por sí mismas propiedades aglutinantes, pero en forma finamente dividida y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ordinaria para formar compuestos que poseen propiedades ligantes (Furlan & Houst 1980).

Así en general se consideran como puzolanas los materiales eminentemente silico-aluminosos naturales o artificiales que carentes de actividad hidráulica y de propiedades cementicias por sí solos, contienen constituyentes que a temperaturas ordinarias y en presencia de agua se combinan con el hidróxido de calcio para formar compuestos permanentes insolubles en agua y estables, los cuales se comportan como conglomerantes hidráulicos. Se clasifican en naturales, artificiales e intermedias (Guzmán 2001).

Un material esencialmente silíceo finamente dividido podría no poseer ninguna propiedad hidráulica, pero posee compuestos químicos como SiO_2 y Al_2O_3

capaces de ser activados y fijar el hidróxido de calcio a la temperatura ordinaria, para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas (Salazar, 2008).

3.1.7. Residuos de Construcción y Demolición.

El residuo de concreto y demolición con el que se trabajó para adelantar el trabajo de grado “Bloques para mampostería estructural a partir de materiales no convencionales”, procede de bloques estructurales elaborados por la Escuela de Ingeniería Civil en el desarrollo de un proyecto de grado y dispuestos en el vertedero de dicha Escuela para su posterior desecho.

Muchas de las estructuras que se construyeron en las décadas antes de 1980, que aún se encuentran en uso, deben ser renovadas o reemplazadas, debido a que ya están terminando de cumplir su vida útil o no haber sido construidas de acuerdo con la normatividad más reciente, de igual manera el cambio del uso del suelo ha contribuido a la sustitución prematura de grandes edificaciones, generando grandes cantidades de residuos que por lo general son vertidos en lugares inadecuados generando focos de contaminación ambiental y visual. El uso de estos residuos en fracciones pequeñas no es muy utilizado debido al mortero adherido, contenido de yeso y cantidades menores de otras sustancias. Sin embargo las fracciones de agregado que corresponden al tamaño grueso que contienen cierta cantidad de mortero adherido se ha utilizado de forma exitosa en investigaciones de laboratorio y estudios de campo. Las ventajas del empleo de agregado reciclado grueso derivan en una menor contaminación ambiental, reducción de espacio en vertederos, costos de transporte y ahorro en recursos de agregados naturales (Tabsh & Abdelfatah 2009).

Los residuos de construcción y demolición (RCD) generan problemas ambientales no sólo por el alto volumen generado, sino también de su tratamiento y eliminación en vertederos. Por consiguiente, deben ser tratados correctamente en plantas de tratamiento industrial, para la producción de árido reciclado y usarlo como agregado convencional, ayudando a conservar el medio ambiente y a reducir los gastos relacionados con la construcción y la gestión de residuos de demolición, y proteger los recursos naturales. Estudios han demostrado que es factible incorporar hasta el 100% de agregado grueso y fino reciclado para la producción de piezas de hormigón no estructurales; Sin embargo, un problema es que se requieren cantidades más altas de cemento para este tipo de elementos prefabricados con el fin de mantener los requisitos mecánicos (Morales et al. 2017).

Se consideran residuos de construcción y demolición (RCD) aquellos que se generan en el entorno urbano y no se encuentran dentro de los comúnmente

conocidos como residuos sólidos urbanos (residuos domiciliarios y comerciales, fundamentalmente), ya que, su composición es cuantitativa y cualitativamente distinta. Se trata de residuos, básicamente inertes, constituidos por: tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos concreto, pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, ferrallas, maderas, y en general, todos los desechos que se producen por el movimiento de tierras y construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas (Romero, 2007).

3.1.8. Agua

El proyecto se elaboró en el patio del laboratorio de concretos de la Escuela de Ingeniería de Materiales, el agua potable se tomó directamente del grifo de la red hidráulica que llega a la Universidad del Valle.

El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado (Guzmán 2001).

3.1.9. Fique

La planta de fique se utiliza como cerca viva para división de parcelas o intercalado con otros cultivos. Su aprovechamiento se conoce generalmente el uso de sus fibras para sacos de empaque, refuerzo de vigas, columnas, tejas, así como para nutriente y abono de cultivos, industria textil y refuerzos en polímeros, entre otras aplicaciones. Dentro del proceso de producción de la fibra, se inicia una vez cortada la penca y luego se desfibra, posteriormente pasa a un proceso de lavado para eliminar el bagazo y jugo adherido a la fibra, finalmente esta fibra pasa por un proceso de secado para obtener el material primario, la fibra de fique o cabuya.

3.1.10. Jugo de fique

El jugo de fique utilizado en el desarrollo del trabajo de grado, proviene del departamento del Cauca específicamente del municipio de Totoró - Cauca, el cual se extrajo de la penca en el proceso de extracción de cabuya de la mata de fique. El jugo de fique es una suspensión con características variables, dependiendo de la edad de la planta, la estación del año y la fertilidad del suelo, es de color verde ocre. Su densidad medida experimentalmente es de 1,02 kg/L y su pH varía entre 4 y 5; también sufre una rápida fermentación por lo cual es necesario conservarlo a bajas temperaturas menores a los 15 °C. En general la composición del jugo se conoce de forma cualitativa (Ochoa et al. 2009).

3.1.11. Resistencia a la compresión de bloques de concreto estructural

La resistencia de los bloques de concreto de tipo estructural en Colombia lo rige el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR -10 en su título d dedicado a la mampostería estructural, el cual indica que las unidades de concreto para mampostería deben cumplir lo especificado en la norma técnica colombiana NTC 4026.(NSR-10 1997)

La NTC 4026 hace referencia a las unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural. “Esta norma establece los requisitos para unidades de mampostería, perforadas o macizas de concreto, elaboradas con cemento Pórtland, agua y agregados minerales con la inclusión o no de otros materiales, aptos para elaborar mampostería estructural. Se establecen tres clases de unidades de mampostería de concreto según su peso: de peso normal, de peso medio y de peso liviano. Existen dos tipos de unidades de mampostería de concreto, Tipo I, de humedad controlada y tipo II de humedad no controlada. Según la resistencia a la compresión se establecen dos clases de unidades, de resistencia alta y de resistencia baja. Las unidades que cumplan con esta norma también se pueden utilizar para elaborar mampostería no estructural” (NTC-4026 1997).

3.1.12. Concreto vibrado

Por lo general solo se vibran concretos de consistencia adecuada, seca o ligeramente plástica, ya que al vibrar concretos fluidos existe la posibilidad de presentarse segregación si el tiempo no es el adecuado. Una menor relación agua/cemento permite obtener concretos de alta resistencia, quedando al mezclar el agua retenida por capilaridad en la superficie de los agregados, al vibrar esta agua se une a la parte fina de los agregados y el cemento para formar la pasta conglomerante. A partir de cierta vibración la compatibilidad del concreto no aumenta y la vibración solo puede ayudar a la colocación en obra. Para concretos secos o de alta consistencia los efectos de la vibración son más efectivos, en presencia de una cantidad mínima de agua capilar y de una cantidad suficiente de finos que permita la formación de una pasta lubricante adecuada alrededor de los granos de los áridos. (O’Reilly Díaz 1997)

3.2. ANTECEDENTES

3.2.1. Agregados

“Los agregados son partículas granulares de material pétreo de tamaño y forma variable, se ha demostrado que la grava que tiene una proporción mayor de granos inadecuados por su forma, requiere, al compararlo con los métodos

convencionales, una cantidad sustancial de mayor agregado fino, a efecto de llenar los espacios huecos mínimos. Al utilizar los métodos convencionales, las proporciones más favorables entre agregado fino y grueso, por ejemplo 34:66, arrojaron los resultados menos favorables, lo que se pudo comprobar en dependencia de la proporción de agregado grueso, cuando se alcanzó la óptima con las proporciones de 45:55 y 50:50. De estos ensayos se infiere que para determinar la proporción óptima entre agregado fino y agregado grueso, resulta decisivo el factor de la forma, por lo que no es correcto utilizar el método de las proporciones directas de las diferentes fracciones de la grava (la llamada curva ideal granulométrica) que se utiliza en la mayoría de países con la consistencia constante de la mezcla de hormigón (asentamiento de 7 hasta 8 cm)” (O’Reilly Díaz 1997).

3.2.2. Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz se utiliza como material de sustitución del cemento Portland en concretos de alto rendimiento. En una investigación, cuyos resultados fueron patentados por el Grupo Materiales Compuestos de la Universidad del Valle se comparó la efectividad de una ceniza de cascarilla de arroz tratada químicamente y sin tratamiento antes de la cocción con el efecto de tener un material sustituto del humo de sílice. El estudio demostró que la ceniza de cascarilla de arroz tiene buenas propiedades cementantes en porcentajes de sustitución iguales al humo de sílice, sin embargo, la ceniza tratada químicamente mostró mejores propiedades mecánicas y de durabilidad. En este estudio realizado por Salas y otros investigadores (Salas et al. 2009), el porcentaje de sustitución adecuado de ceniza de cascarilla de arroz tratada y no tratada químicamente fue del 10% ya que porcentajes superiores reducían la trabajabilidad y era necesario una mayor cantidad de plastificante.

Al variar entre (0% y 20%) de RHA como reemplazo del cementante en la composición de un concreto, se han hallado también resultados donde muestran que la adición de RHA en concreto puede mejorar tanto la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y reducir la fluencia del hormigón (He et al. 2017).

Según otro estudio la cascarilla de arroz debe calcinarse por debajo de 700°C donde alcanza altos niveles de sílice amorfa hasta en un 95%. La investigación consideró que la trabajabilidad tiende a aumentar según la relación agua/cemento si se utilizan aditivos minerales. En el estudio se preparó ceniza de cascarilla de arroz con tamaños de 5 μm (ultra afina) y 95 μm con la que se hicieron sustituciones de 5%, 10%, 15% y 20%, encontrando que las mayores resistencias

se dieron a sustituciones de 10% para ambos tamaños de las partícula, también mostraron que “el mecanismo detrás de esta reducción de la demanda de agua se atribuye a la absorción de partículas de RHA por las superficies de carga opuesta de las partículas de cemento que conduce a evitar que ellos floculen. Por lo tanto, las partículas de cemento se dispersan de manera eficaz y podría atrapar grandes cantidades de agua que resulta en la reducción de la necesidad de agua del sistema para lograr una consistencia aceptable” (Naji et al. 2010), y concluyeron que se pueden realizar sustituciones de este residuo RHA hasta en un 20% manejando un tamaño de partícula medio con la misma cantidad de agua.

Algunos autores como Shi et al, (2011) muestran como “la fabricación de cemento ha contribuido a la contaminación global. En la mitad del siglo XVIII, la concentración de CO₂ en el aire era de alrededor de 280 ppm. Por el estallido de la Segunda Guerra Mundial 200 años más tarde, los niveles de CO₂ han aumentado a 310 ppm, es decir, a un ritmo de 0,15 ppm por año. Pero entre 1960 y 2000, se elevó la concentración de CO₂ de 315 ppm a 365 ppm en tan sólo 40 años. Al nivel mundial, las cementeras están produciendo casi dos mil millones de toneladas por año de su producto y generando emisión de cerca de dos millones de toneladas de CO₂, alrededor de 6 a 7% de las emisiones totales de CO₂ del planeta en el proceso. A este ritmo, en 2025 la industria del cemento tendrá emisiones de CO₂ a un ritmo de 3,5 millones de toneladas por año, más o menos equivalentes a las emisiones totales en la Europa actual” (Shi et al. 2011).

Otro estudio ha demostrado la eficacia de utilizar ceniza de cascarilla de arroz como puzolana (Antiohos et al. 2014), donde el autor aclara la importancia de reducir el tamaño de la ceniza de cascarilla de arroz a partículas más finas, pues esto aporta a una mayor reactividad de la misma debido a su alta porosidad ya que se genera mayor superficie específica. Además en el desarrollo de esa investigación se encontró que la adición de 10% a 20% de RHA por cemento era apropiada, si la adición no supera el 30%.

Mattey et al. (2015) señalan que es posible utilizar la ceniza de cascarilla de arroz como puzolana y como *filler* en la fabricación de bloques no estructurales. En donde realizaron dos mezclas con relaciones de 1:6 y 1:8 de cemento: agregado, sustituyendo de agregados finos por 10%, 20% y 30% de RHA, donde se encontró que la mejor relación según la resistencia obtenida, que fue incluso mayor a la patrón era del 20% de RHA por agregado fino y una relación 1:6 cemento: agregado. Luego hicieron las mismas sustituciones anteriormente expresadas pero esta vez la sustitución del 10%, 20% y 30% de RHA como puzolana, donde se determinó según las resistencias dadas que la relación de

mezcla 1:6 y 20% de la RHA por cemento, estuvieron por debajo de las obtenidas cuando se sustituyó al agregado fino por RHA, pero muy cercanas a las del patrón. Adicionalmente realizaron un método de mezclado en dos etapas el cual consistió inicialmente en mezclar el 50% de los componentes y posteriormente adicionar los componentes restantes, método que reportó valores de resistencia mayores aproximadamente en un 10% para las mezclas dadas, lo cual se atribuyó a la mayor homogeneidad y reforzamiento de áreas débiles en los agregados inicialmente mezclados.

La absorción de humedad de la ceniza de cascarilla de arroz mostró un valor de 5,39 %. (Mattey et al. 2015). Así mismo otras publicaciones hacen referencia a valores similares de absorción como lo es “residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural” quienes mediante las normas INV.E 222-07 o NTC 237, establecieron que la absorción de la ceniza de cascarilla de arroz es de 5,18% de forma experimental (N. Fuentes & L.Vizcaino 2015).

Algunos investigadores de la Universidad de la Florida estudiaron el efecto cementante de algunos residuos industriales y agroindustriales entre ellos la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) y su contribución a la reducción de CO₂. Según el estudio sustituciones del 10% al 30% de ceniza de cascarilla de arroz reducen la trabajabilidad debido a la diferencia en el tamaño de las partículas y la mayor superficie específica. Estos investigadores llegaron a la conclusión de que “la reutilización de materiales de residuos puede tener un impacto significativo en la reducción potencial del calentamiento global del concreto sobre una base volumétrica” (Paris et al., 2016).

3.2.3. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

La Asociación Europea de Demolición estima que de los 200 millones de toneladas de residuos que se producen anualmente en Europa, alrededor del 30% de esta cantidad se recicla actualmente. Los estudios en esta área, sin embargo, muestran grandes diferencias en la cantidad de material reciclado en los diferentes países. Algunos países que han adoptado tempranamente estos procesos, como Holanda y Bélgica, alcanzan tasas de reciclaje de alrededor del 90%, pero en otros países europeos, como Italia y España, la tasa de reciclaje es inferior al 10%. La Asociación de reciclaje de materiales de construcción (CARM) estima que el 25% de esta cantidad se recicla. La agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos llevó a cabo recientemente un estudio sobre la construcción relacionada con la construcción y demolición que se estiman alrededor de 136 millones de toneladas de material de residuos, y no cuenta los millones de

toneladas procedentes de carreteras, puentes y aeropuertos construcción y renovación. La CARM estima que unos 100 millones de toneladas de hormigón de todas las fuentes se recicla anualmente en América del Norte. Los productos terminados se utilizan en gran medida como material de base para los productos de carretera, sobre la cual se coloca ya sea un hormigón o acabado de asfalto. En general, la resistencia del hormigón reciclado puede ser 10-25% menor que la del hormigón convencional hecho con agregado grueso natural (Tabsh & Abdelfatah 2009). “La literatura sugiere que la durabilidad y propiedades mecánicas del concreto con agregados reciclados son ligeramente inferior al hormigón convencional. Sin embargo, con el uso de aditivos y enfoques de mezcla modificados, se pueden obtener las propiedades deseadas” (Kisku et al. 2017).

En Hong Kong, a causa de los desastres naturales, se apreció una oportunidad para dar uso a los residuos de la construcción, tales como áridos reciclados de hormigón y vidrio triturado reciclado para la fabricación de productos de bloques de hormigón (Poon et al, 2002; Poon y Chan, 2006; Poon y Chan, 2007; Poon y Lam, 2008 y Poon et al, 2009).

Claro está que las ventajas de usar RCD vienen acompañadas de incidencias en el comportamiento y desempeño del material cementicios, por lo tanto debe aceptarse que generalmente la resistencia a la compresión del hormigón disminuye gradualmente a medida que la cantidad de RCD aumenta (Barra et al. n.d.). Un ejemplo claro de las desventajas que presentan los RCD, es el resultado obtenido en el estudio realizado por Morales y otros investigadores, en donde al emplear agregado reciclado en la elaboración de bloques se obtuvo una disminución que oscilaba entre 22,97% y 43,35% (Morales et al. 2017). Otra investigación mostró que una cantidad cada vez mayor de agregado fino reciclado (AR) normalmente conduce a una disminución lineal en la consistencia, la magnitud de la que depende la absorción de agua y la forma de los AR utilizados (Miranda & Selmo 2004).

Se puede mencionar que existen al menos tres tipos principales de RCD, los cuales después de someterse a procesos de beneficio adecuados en las plantas de reciclaje certificadas, son apropiados para la producción de productos cementosos; estos son agregados de concreto reciclados (ACR), agregados reciclados de mampostería (ARM) y los agregados reciclados mixtos (ARM). Aunque es habitual encontrar otros materiales en los agregados reciclados(AR), en menores cantidades, como el asfalto, plástico, madera, caucho y vidrio, estos son considerados como contaminantes y tienen límites estrictos de

su contenido, debido a su impacto negativo sobre la mecánica y durabilidad relacionado con el desempeño del concreto (Silva et al. 2014).

3.2.4. Mortero adherido

El mortero adherido hace referencia a la cantidad de material cementicio original que tiene el árido reciclado, el cual modifica las propiedades naturales del nuevo concreto, reflejándose en el aumento de la absorción del agua, menor densidad, menor resistencia, menor dureza y menor resistencia a la fragmentación. En concretos elaborados con agregados reciclados se presenta un fenómeno denominado nueva zona de transición en la cual se presentan dos zonas de transición una entre el agregado natural y la pasta de cemento antigua, y otra entre el agregado reciclado y la pasta de cemento nueva. El concreto es un material que consiste en agregados gruesos discretos dispersos en una matriz de arena y cemento, pero como en otros materiales compuestos el lazo entre estos dos materiales determina sus propiedades mecánicas. La debilidad de la zona de transición entre estas dos fases, impide que el hormigón funcione como una unidad (Álvarez 2014).

Los investigadores Duan y Poon (2014) presentaron resultados experimentales obtenidos al realizar concreto con agregado reciclado con cantidades variables de mortero adherido obtenido de diferentes fuentes, posteriormente realizaron una comparación entre las propiedades mecánicas conseguidas, en donde concluyeron que la resistencia del concreto depende de la fuente del agregado reciclado, sus características de producción y uso, en donde incluso en algunos casos puede ser comparable al concreto con agregado natural.

Hacer hormigón reciclado presenta calidades inferiores en comparación con áridos naturales, atribuidas principalmente a la naturaleza porosa del mortero de cemento adherido. Para mejorar la calidad del concreto de agregado reciclado, Seo & Choi (2017) propuso usar un método especial rentable para el medio ambiente. Con este método, se empapa el agregado reciclado de concreto con una solución de ácido acético, en el que el ácido acético reacciona con productos de hidratación de cemento unidos a la superficie del agregado reciclado del concreto. Esta reacción debilita el mortero adherido, por lo que es posible separarlo por frotamiento mecánico posterior. El concreto de agregado reciclado tratados tiene una menor absorción de agua y menor mortero de cemento adherido. Una vez utilizado como agregados en concreto nuevo, estos concretos de agregado reciclado pueden mejorar la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días hasta un 25%. Es seguro y limpio de aplicar este nuevo método, ya que no se utiliza ninguna sustancia química peligrosa y no hay productos químicos perjudiciales

que se introduzcan en el árido reciclado de concreto tratado. Más importante aún, no se generan residuos peligrosos, ya que la solución de residuos del tratamiento puede ser usado para producir productos de alto valor añadido, almacena de forma permanente CO_2 , y regeneran el ácido acético. Lo que mejoró la resistencia del hormigón en un 14% (Wang et al. 2017).

En otro estudio se evaluaron las características de adherencia entre árido reciclado y la matriz de mortero de cemento. Basándose en el análisis de imágenes, la cantidad de mortero antiguo unido a la superficie en función de los tamaños de los agregados reciclados. El mortero viejo adherido es un parámetro que determina la calidad entre el árido reciclado y la matriz de mortero, este estudio mostró que las cantidades adecuadas de mortero de cemento viejo pueden mejorar la calidad de la unión, debido a que proporciona un alto grado de angulosidad. Por otra parte, los agregados reciclados con un tamaño alrededor de 10 mm tienen la cantidad de mortero viejo adecuada para contribuir a la mejor calidad de la unión (Seo & Choi 2014).

3.2.5. Jugo de la planta de fique (JPF)

Esta sustancia no tan estudiada a nivel internacional, pero con grandes cantidad de producción a nivel nacional viene trayendo consigo serios problemas de contaminación y manejo ambiental, ya que no se ha encontrado un uso masivo que permita un aprovechamiento de esta sustancia, así lo ratifican estudios realizados en Colombia por el Grupo Materiales Compuestos de la Universidad del Valle. Los desechos generados por el desfibrado del fique representan, aproximadamente, el 96% del peso de la hoja, tal como bagazo y jugo. Debido a su naturaleza química, estos desechos agrícolas se convierten en un problema ambiental, a causa de su lenta biodegradación, a sus altos contenidos de saponinas y fenoles, que ocasionan efectos sobre las fuentes de agua cercanas a los sitios de producción. El efecto de las saponinas desde el punto de vista biológico puede ser muy diverso; pueden tener efectos perjudiciales actuando como antinutrientes, siendo muy tóxicas para los peces y han sido reportadas con actividad herbicida, fungicida y bactericida. De acuerdo con estimativos de producción de cabuya, Colombia produce 720.000 toneladas de residuos de desfibrado al año según lo menciona. Se ha determinado que el jugo de fique actúa como un surfactante que al mezclarse con el agua de amasado del hormigón, disminuye su tensión superficial, y permite la formación de pequeñas burbujas de aire, estables, que permanecen durante el proceso de fabricación de la mezcla y posteriormente forman pequeños poros, no coalescentes, que disminuyen la densidad de la mezcla, y mejoran la durabilidad del hormigón a agentes físicos y químicos (Jaramillo & Ochoa 2009).

De acuerdo con la investigación realizada por (Jaramillo & Ochoa 2009) cantidades de jugo de fique entre el 3% y 5%, proporcionan la cantidad de aire ocluido recomendado (entre 4 y 8%) para proporcionar una adecuada durabilidad en el hormigón. así mismo concluyó en su investigación que la mezcla con 5% de jugo fresco presenta una mayor superficie específica en comparación con la adicionada con el 10% de jugo, lo cual refleja la formación de una estructura con poros más pequeños teniendo contenidos de aire similares. Con lo obtenido en esta investigación, se podría clasificar el jugo como un aditivo aireante de acuerdo con las normas ASTM C494, ya que pueden lograrse aumentos en la resistencia a la compresión hasta del 28% al reducirse el agua necesaria en la mezcla, en esta investigación se observó que al utilizar jugo de fique se pudo reducir el consumo de agua hasta en un 27 %, con respecto a otros aditivos orgánicos que podría atribuirse a las concentraciones de azúcar altas que se conocen del jugo, unido con el efecto lubricante que proporcionan las burbujas de aire formadas por el mismo.

Es importante mencionar que Colombia es el mayor productor de fibra de fique en el mundo. En la actualidad se producen alrededor de 30.000 toneladas de cabuya al año destinada a la industria de empaques, hilanderías y artesanías. Los cinco principales departamentos productores: Antioquia, Boyacá, Cauca, Nariño y Santander; ofrecen el 99% de la superficie cosechada, estimada en más de 23.000 hectáreas en el año 2004. Así mismo en otras investigaciones se ha encontrado que en inclusiones de jugo de fique con cemento tipo I y árido de 9,5 mm, a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo, se incrementa también el porcentaje de aire ocluido y se disminuye el porcentaje de agua de exudación, según lo concluye (Ochoa et al. 2009).

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El desarrollo y ejecución del trabajo de grado para el cumplimiento de los objetivos propuestos, siguió la metodología que se presenta a continuación.

4.1. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

El trabajo de grado comenzó con una amplia consulta bibliográfica la cual se llevó a cabo de manera permanente hasta su finalización, garantizando una continua actualización del estado del arte. La búsqueda de información acerca del

agregado reciclado, ceniza de cascarilla de arroz y jugo de fique en la elaboración de concreto auto-sostenible y se llevó a cabo teniendo en cuenta las bases de datos de la biblioteca de la Universidad del Valle, libros, trabajos de grados, formatos electrónicos e información en páginas WEB de acceso libre. La información seleccionada se orientó hacia el cumplimiento de los objetivos del proyecto, en donde, se analizaron y sintetizaron los conceptos encontrados en el marco teórico y antecedentes, considerando la información más relevante para el desarrollo de la investigación.

4.2. ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Una vez se obtuvieron y se seleccionaron los materiales que se utilizaran durante el desarrollo del proyecto, se procedió a su caracterización, con el propósito de conocer el aporte que cada uno de estos materiales tendrá en el desarrollo del mismo.

4.2.1. Escombros de concreto

Los bloques de concreto utilizados provinieron del patio de escombros de la Escuela de Ingeniería Civil, inicialmente se realizó una trituración manual con martillo el cual permite retirar la malla de acero que tenían y reducir el tamaño del bloque, para, así poder utilizar el triturador de mandíbulas que permitió obtener el tamaño máximo deseado de $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm).

4.2.2. Cemento

El cemento utilizado fue Argos tipo I de uso general, su composición química fue determinada en estudios previos mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, igualmente, su granulometría.

4.2.3. Caracterización de los agregados

Las normas técnicas utilizados en la caracterización de los agregados utilizados en este proyecto se observan en la Tabla 1. Los procedimientos realizados se llevaron a cabo de acuerdo con cada uno de los parámetros especificados en las normativas.

Tabla 1. Ensayo realizado para la caracterización de agregados naturales y reciclado

ENSAYO REALIZADO	NORMA
Distribución granulométrica (arena, grava, RCD, RHA)	NTC 77
Impurezas orgánicas (arena, RCD)	NTC 127
Densidad y absorción (grava, RCD)	NTC 176
Densidad y absorción (arena)	NTC 237
Contenido de humedad (arena, grava, RCD, RHA)	NTC 1776
Módulo de finura (arena, grava, RCD, RHA)	NTC 77
Resistencia al desgaste (grava, RCD)	Modificación ASTM C131
Densidad (RHA)	ASTM C329
SEM, EDS y FRX (RHA)	-

4.2.4. Ceniza de cascarilla de arroz

A la ceniza de cascarilla de arroz obtenida de la arrocería la Esmeralda ubicada en el municipio de Jamundí – Valle se le realizaron varios estudios con el objetivo de determinar la aptitud de este material para el desarrollo del proyecto.

4.2.4.1 Granulometría de la ceniza de cascarilla de arroz

La distribución de tamaño de la cascarilla se realizó empleando tamices aplicando la norma NTC 77, tal y como se registra en la Figura 1, también se realizó el análisis granulométrico laser, el cual se realizó a una muestra de 50 g de ceniza de cascarilla de arroz que pasa el tamiz número 100 (0,15 mm).



Figura 1. Tamices para determinación de granulometría de la ceniza de cascarilla de arroz

4.2.4.2 Densidad de la ceniza de cascarilla de arroz

La densidad de la cascarilla se realizó mediante la norma ASTM C329, la cual se define como la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo sus poros saturables y no saturables, (pero sin incluir los vacíos entre las partículas) y la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida.

4.2.4.3 SEM y EDS de la ceniza de cascarilla de arroz

A través de las técnicas de caracterización SEM y EDS, se observó la morfología de las partículas de la ceniza de cascarilla de arroz, además de estimar la composición química puntual presente en la ceniza de cascarilla de arroz (RHA).

4.2.4.4 FRX ceniza de cascarilla de arroz

Esta técnica permitió determinar la composición química de la ceniza de cascarilla de arroz, mediante el espectro de fluorescencia de rayos X (FRX).

4.2.5. Pruebas realizadas al concreto en estado plástico y endurecido

El desarrollo del análisis se basa principalmente en la resistencia a la compresión, sin embargo, para el completo análisis del concreto en estado plástico y endurecido se realizaron los ensayos que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Normas utilizadas en el análisis del concreto en estado plástico y endurecido

ENSAYO REALIZADO	NORMA
Asentamiento del concreto	NTC 396
Mesa de flujo	NTC 111
Determinación de la actividad puzolánica, método de la resistencia	ASTM C618
Ensayo químico para determinar la actividad puzolánica	NTC 1512
Determinación de la resistencia a la compresión de cubos de concreto	NTC 220
Absorción, densidad y porosidad	NTC 5653
Succión capilar	SIA 162/1 y ASTM 1518

4.3. DISEÑO DEL CONCRETO

Se elaboró un diseño de mezclas simple, teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión. Para cada una de las sustituciones de RHA por arena y RCD por grava se ejecutó un programa en Excel, el cual permite, de acuerdo a las diferentes densidades de los agregados sustitutos y los agregados vírgenes utilizados, mantener constantes los volúmenes de mezcla. Inicialmente se determinó el volumen ocupado por la pasta de cemento más el 2% de aire incluido, el restante volumen corresponde a los agregados fino y grueso en porcentajes iguales 50:50 respectivamente, al volumen de cada agregado virgen se le resta el volumen ocupado por el respectivo sustituto en la cantidad dada, de esta manera se mantuvieron los volúmenes de mezcla durante el desarrollo del proyecto.

Una vez se escogió el porcentaje de arena y concreto a utilizar (50% arena: 50% grava), se procedió a determinar la relación agua/cemento para una determinada resistencia esperada, previendo su posible reducción al adicionar la ceniza de cascarilla de arroz y agregado grueso reciclado. La relación agua cemento escogida fue de 0,6, ya que, como lo expresa (Guzmán 2001), aproximadamente para diferentes cementos tipo I en Colombia la resistencia esperada es de 21 MPa y la que se desea obtener como mínimo es de 11 MPa por bloque estructural.

Posteriormente al precisar los porcentajes de agregados y relación agua/cemento, se realizaron probetas tipo cubo de 50 mm o 2 pulgadas de lado, las cuales fueron evaluadas a 7, 28 y 60 días de curado en agua. Las cantidades de la mezcla patrón se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño mezcla patrón

MEZCLA	CEMENTO (kg/m ³)	ARENA (kg/m ³)	GRAVA (kg/m ³)	AGUA (l/m ³)
PATRÓN	300	893,45	983,81	180

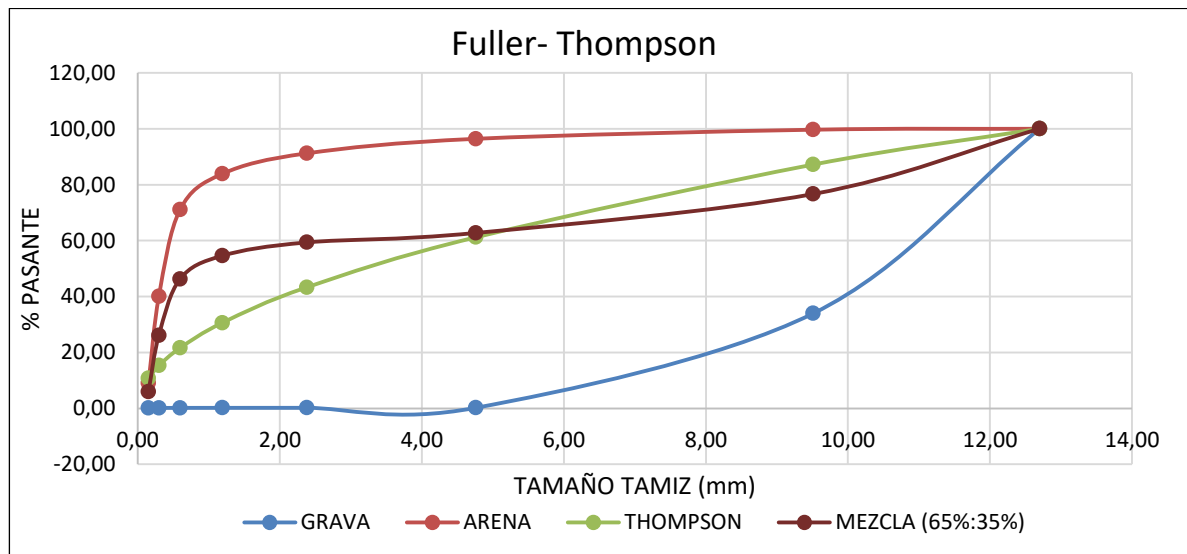
- Una vez se elaboró el diseño de mezcla patrón, se comenzó a realizar las sustituciones de RHA y RCD, estas sustituciones se realizaron en volumen, ya que, al trabajar con materiales con diferentes densidades se debía mantener constante las proporciones de los agregados.
- A continuación, la dosificación se reporta para un metro cubico y el porcentaje de volumen de sustitución de arena por RHA, los cuales fueron de 60 kg/m³ (9,5%), 80 kg/m³ (12,6%), 100 kg/m³ (16%), 200 kg/m³ (31%) y 300 kg/m³ (47%) de mezcla.

- Después de obtener un valor razonable de resistencia se adicionó jugo de fique en porcentajes de 3% y 5% de la cantidad del cementante a los valores de sustitución de agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz de 60 kg/m^3 (9,5%), 80 kg/m^3 (12,6%) y 100 kg/m^3 (16%).
- Posteriormente al paso anterior para el valor de 100 kg/m^3 (16%) de sustitución de agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz y 5% de jugo de fique se hacen las sustituciones en volumen del agregado grueso virgen por agregado grueso reciclado de concreto de 100%, 75%, 50% y 25%.

5. PRODUCCIÓN DEL CONCRETO

5.1. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ÓPTIMA DE LA MEZCLA DE ÁRIDOS FINOS Y ÁRIDOS GRUESOS

Como se observa en la Gráfica 1, se describe la curva ideal de Fuller Thompson, así mismo se muestra en el extremo superior la curva correspondiente al agregado fino y en el extremo opuesto o inferior la curva correspondiente al agregado grueso, en ambos casos se linealizó con los datos para las muestras vírgenes, por otra parte, se estableció la relación de más cercanía a la ideal propuesto por Fuller Thompson, por tal motivo se estableció una relación de 65% arena y 35 % grava con la que se estima que, de acuerdo al modelo ideal, presentaría las mejores propiedades mecánicas según el agregado utilizado.



Gráfica 1. Distribución granulométrica del agregado fino (arena) y grueso (grava)

Sin embargo de acuerdo con O'Reilly (1997), la determinación óptima de áridos finos y gruesos basados en la granulometría ideal no es posible, ya que el factor de forma de los áridos gruesos es decisivo. En donde el método más preciso es el experimental, que se basa en la determinación del porcentaje de vacío de la mezcla de áridos finos y gruesos. En la cual, el porcentaje de vacío y la superficie específica mínimos de la mezcla de áridos, señalara la composición óptima, la cual requiere una cantidad mínima de cemento (O'Reilly Díaz 1997).

Se realizaron las siguientes mezclas de áridos, con las proporciones en peso de arena y grava de: 40:60, 45:55, 50:50, 55:45, 60:40. Además se usó una mesa de vibrado en donde las mezclas estuvieron sometidas a vibración por dos minutos, los agregados utilizados para el experimento se secaron a 105°C durante 24 horas.

Inicialmente se determinó el peso unitario compacto y vibrado por unidad de volumen de cada mezcla, posteriormente se determinó por ley de mezclas la densidad de cada una de las mezclas, según se aprecia en la ecuación 1.

$$\rho_{mezcla} = \frac{(\rho_{arena} * \%arena) + (\rho_{grava} * \%grava)}{100} \quad \text{Ecuación 1}$$

Una vez se determinó la densidad de mezcla para cada uno de los porcentajes propuestos, se determinó el porcentaje de vacíos para cada uno de ellos haciendo uso de la ecuación 2, según el procedimiento realizado por Vitervo O'Reilly (1997).

$$\% Vacios = \frac{\rho_{mezcla} - \rho_{unitario}}{\rho_{mezcla}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Del anterior ejercicio, se adicionó a cada mezcla (arena y grava), agua hasta la saturación, cuando sucede esto se considera que la cantidad de agua adicionada para cada proporción de mezcla es la cantidad de espacios libres de la mezcla. El anterior procedimiento pudo servir para comprobar los resultados obtenidos para el porcentaje de vacíos del paso anterior, ya que a menor porcentaje de vacíos, menor absorción de agua. En la Figura 2, que se presenta a continuación se muestra el equipo y procedimiento desarrollados para determinación de los vacíos en la mezcla de agregados.



Figura 2. Paso a paso ensayo experimental de vibración para la determinación de vacíos

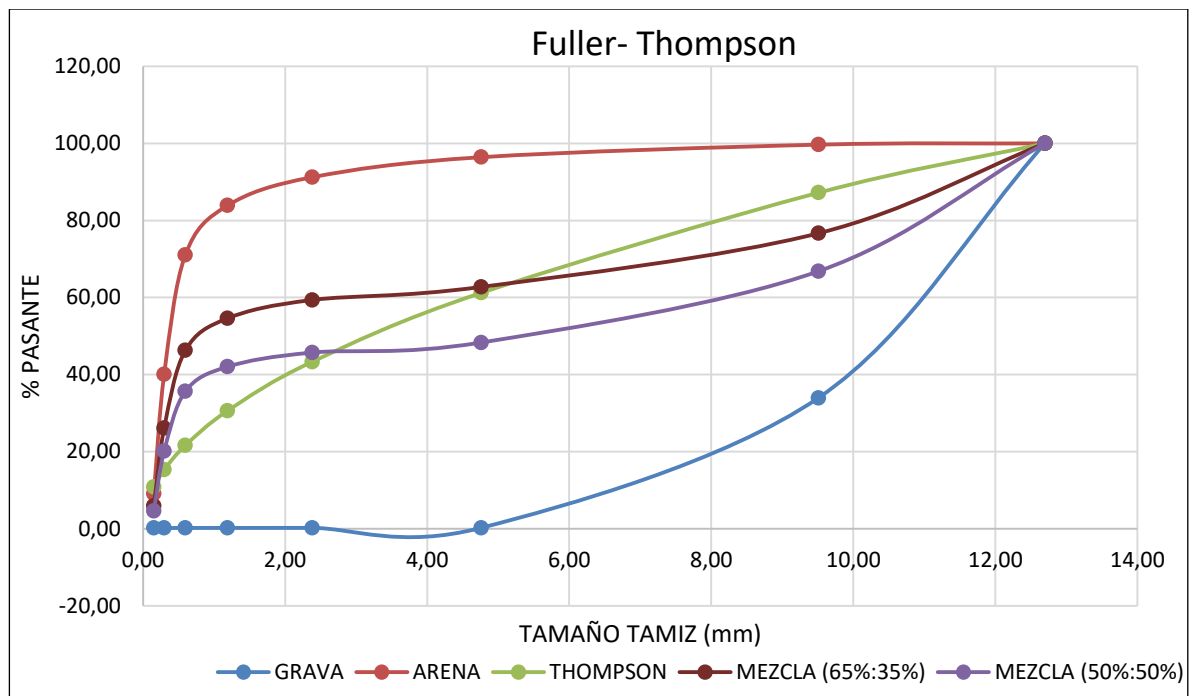
Además de los anteriores procedimientos, se decidió hacer otro experimento en el cual se llenó un recipiente con agregado grueso hasta el tope y se vibró cuidando de mantenerlo a ras, a este recipiente se adicionó agua, igualmente hasta el tope, este volumen de agua determinado debe ser el volumen de arena a utilizar para tener un mínimo de espacios vacíos. Con el volumen de agregado grueso y fino se realizó una mezcla y se llenó de nuevo el recipiente hasta el tope realizando vibración a la mezcla, como se hizo en el paso anterior se depositó agua hasta el tope, esta agua adicionada se supone la cantidad de vacíos la cual corresponderá a la cantidad de pasta de cemento. En la Figura 3 se observan algunos pasos en la determinación experimental de los espacios vacíos.



Figura 3. Ensayo experimental de adición de agua para la determinación de espacios vacíos.

El anterior procedimiento se realizó debido a que garantiza la menor cantidad de pasta a utilizar, ya que, tiene aspectos en cuenta como la morfología y una deficiente distribución granulométrica, este método conlleva a un menor consumo de cemento y de esta forma un menor impacto ambiental. La distribución granulométrica mediante el modelo de Fuller y Thompson no muestra que la mejor combinación sea la de 50:50 arena y grava respectivamente, tal y como se indica

en la Gráfica 2, esto se debe a que al haber mayor contenido de finos el porcentaje de estos que pasan por los tamices correspondientes es mayor, acercándose a la ideal de Fuller y Thompson, todo lo contrario ocurre en la zona de los agregados gruesos en donde al haber menor cantidad de agregado con un tamaño mayor el porcentaje pasante se reduce, alejándose de la curva ideal de Fuller y Thomson.



Gráfica 2. Distribución granulométrica, mezclas del agregado fino (arena) y grueso (grava)

5.2. SUSTITUCIÓN DE ARENA POR CENIZA

El diseño del concreto se elabora para un metro cubico, se remplazó inicialmente la arena por ceniza de cascarilla de arroz en proporciones de (300, 200, 100, 80, 60) kg/m^3 , los cuales corresponden a porcentajes en volumen de (9,5, 12,6, 16, 31 y 47) %, se tiene en cuenta las densidades para mantener el rendimiento de las mezclas, el porcentaje de los demás agregados se mantiene constante. Con cada una de las mezclas, se realizaron probetas cúbicas, las cuales fueron evaluadas a la compresión a 7, 28 y 60 días, para las cuales los resultados con respecto al patrón fueron muy bajos. Sin embargo, se decidió trabajar con los últimos tres reemplazos de 100, 80 y 60 kg/m^3 de sustitución de reemplazo de arena por ceniza de cascarilla de arroz, ya que, la resistencia no varió mucho, además de coincidir con rangos en volumen utilizados en otras investigaciones(Matthey et al. 2015).

5.3. APORTE DE JUGO DE FIQUE

El aporte del jugo de fique fue fundamental, ya que le dio trabajabilidad a las mezclas utilizadas de sustitución de arena por ceniza de cascarilla de arroz de (100, 80, 60) kg/m³, que inicialmente fueron muy secas y de baja trabajabilidad. Se realizó un reemplazo de jugo de fique del 3% y 5% del cementante para cada una de las sustituciones anteriores de ceniza de cascarilla de arroz por arena, las cuales, fueron evaluadas a compresión a 7, 28 y 60 días.

5.4. SUSTITUCIÓN DE GRAVA POR AGREGADO RECICLADO

Se sustituyó grava por agregado grueso reciclado en porcentajes de (100%, 75%, 50% y 25%), en una mezcla con 3% y 5% del cementante por jugo de fique y 100 kg/m³ de arena por ceniza de cascarilla de arroz. Estos especímenes fueron evaluados a la compresión a 7, 28 y 60 días, se decidió trabajar con 100% de reemplazo de agregado grueso reciclado, ya que presentó la resistencia mínima necesaria para cumplir con la norma NTC 4026, que indica la resistencia que deben tener los bloques de concreto estructural.

5.5. DISEÑO MEZCLA FINAL

El desarrollo de mezcla final se realizó con base en el reemplazo experimental de tres parámetros (ceniza de cascarilla de arroz, jugo de fique y agregado grueso reciclado) de sustitución, en donde la variable de retorno es la resistencia a la compresión.

5.6. APORTE PUZOLÁNICO DE LA CENIZA

La determinación de la actividad puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz se realizó con el objetivo de encontrar si cumplía un papel preponderante en la resistencia final concreto, se llevó a cabo aplicando la norma ASTM C618. Se elaboraron cubos de lado 50 mm o 2 pulgadas con cemento portland tipo I y arena de Ottawa con una relación de 1:2,7. El procedimiento consistió en la elaboración de morteros con 0% y 20% de sustitución de cemento por ceniza de cascarilla de arroz, con una relación de agua cemento de 0,6 hallada experimentalmente en la mesa de flujo con un asentamiento de más o menos 100 cm a 115 cm, cuyo procedimiento lo rige la norma NTC 111, la resistencia de los especímenes realizados se evaluó a 28 y 60 días.

Además del anterior estudio, se realizó la prueba de Fratini o ensayo químico para determinar la actividad puzolánica según la norma NTC 1512 a 7 y 28 días.

6. ANALISIS Y RESULTADOS

6.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

6.1.1. Escombros de concreto

El escombro reciclado se tamizó en malla de $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm) para cerciorarse del tamaño máximo a utilizar, igualmente se tamiza en malla numero 8 (2,38 mm) en donde se desechó el material pasante por esta malla, ya que el propósito es utilizar este material como agregado grueso. En la Figura 4 se muestra el equipo utilizado en la fase final de transformación del concreto reciclado y el resultado obtenido.



Figura 4. Molino de mandíbulas y agregado grueso reciclado (tamaño máximo $\frac{1}{2}$ ")

Una vez se retiró el acero de los bloques, se cortaron cubos de 50 mm de lado, a los cuales se le realizaron pruebas de resistencia a compresión, con el propósito de tener una idea de la resistencia del antiguo concreto, los resultados obtenidos pudieron haber tenido una resistencia mayor, sin embargo, esta no pudo haberse obtenido debido a las tensiones y fallas generadas en el proceso de transformación a un tamaño máximo de $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm). Las pruebas ejecutadas por el laboratorio de ensayos físicos de la Escuela de Ingeniería de Materiales, arrojaron los valores que se presentan en Tabla 4.

Tabla 4. Resistencia cubos de concreto reciclado

	Resistencia a compresión (MPa)
Probeta I	17,5
Probeta II	19,2
Probeta III	22,5
Promedio	19,7
Desviación estándar	2,075
Coefficiente de variación	10,5%

6.1.2. Cemento

El cemento utilizado en la ejecución de este proyecto fue Argos tipo I de uso general, el cual tiene una composición química de acuerdo con la técnica de fluorescencia de rayos X mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química del cemento argos tipo I

Elemento y/o compuesto	% En peso	Elemento y/o compuesto	% En peso
CaO	55,658	P ₂ O ₃	0,159
SiO ₂	19,39	SrO	0,155
Fe ₂ O ₃	4,704	Cr ₂ O ₃	0,043
Al ₂ O ₃	4,13	Mn ₂ O ₃	0,037
SO ₃	3,9	BaO	0,025
MgO	1,706	Cl	0,019
Na ₂ O	0,316	ZnO	0,016
K ₂ O	0,28	LOI	9,21*
TiO ₂	0,251		

En la Figura 5, se observa la granulometría laser realizada al cemento argos tipo I, y fue utilizada para superponerla con la granulometría laser realizada a la ceniza de cascarilla de arroz y observar a partir de qué tamaño de partícula esta tiene un tamaño similar al del cemento y pueda tener un posible comportamiento puzolánico.

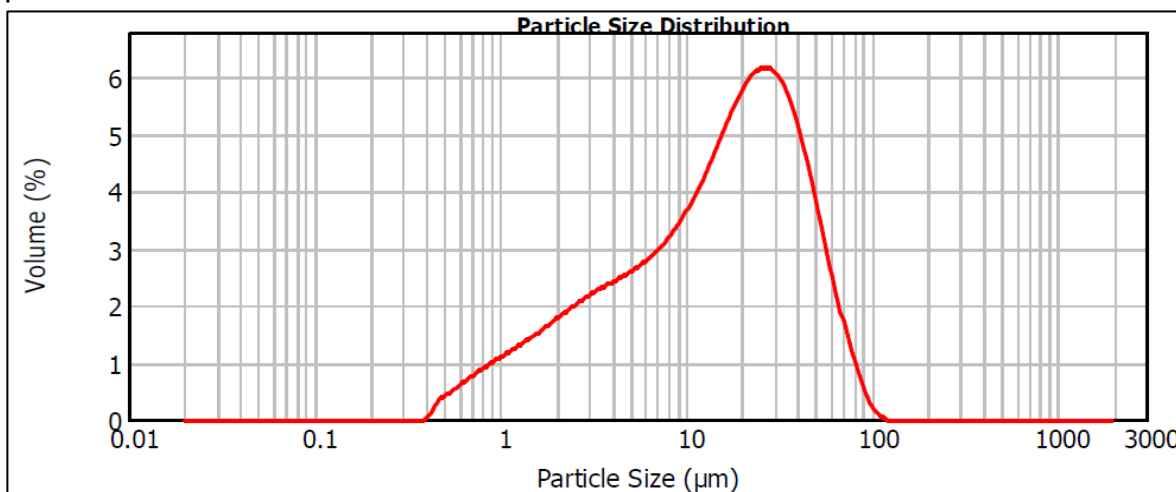


Figura 5. Granulometría laser del cemento argos tipo I

6.1.3. Agregado grueso (grava natural)

El agregado grueso natural (grava) se caracterizó siguiendo los procedimientos indicados en la norma técnica colombiana, con la NTC 77 se determinó la distribución de partículas de la grava, con la NTC 176 se determinó la densidad y absorción de la grava. Los resultados obtenidos en la caracterización de la grava se presentan en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Análisis granulométrico de la grava natural

# Tamiz	# Tamiz, mm	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1/2	12,700	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,510	606,40	66,05	66,05	33,95
4	4,760	309,70	33,73	99,78	0,22
8	2,380	0,10	0,01	99,79	0,21
16	1,190	0,10	0,01	99,80	0,20
30	0,595	0,10	0,01	99,81	0,19
50	0,297	0,10	0,01	99,83	0,17
100	0,149	0,10	0,01	99,84	0,16
fondo		1,50	0,16	100,00	0,00
total		918,10	100,00		

Tabla 7. Características físicas de la grava natural

ENSAYO	RESULTADO	NORMA UTILIZADA
Densidad aparente (bulk)	2,8 (g/cm ³)	NTC 176
Absorción	1,4%	NTC 176
Módulo de finura	6,65	NTC 77
Tamaño máximo	½" o (12,7 mm)	NTC 77
Tamaño máximo nominal	½" o (12,7 mm)	NTC77

6.1.4. Agregado fino (arena)

Como se hizo en el paso anterior, se determinó la distribución granulométrica de la arena, lo cual se llevó a cabo haciendo uso de la norma NTC 77, igualmente se determinó la absorción y porosidad haciendo uso de la norma NTC 237,

correspondiente para este tipo de agregado; también se encontró la cantidad de material orgánico con la NTC 127. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Análisis granulométrico de la arena

# Tamiz	# Tamiz mm	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1/2	12,7	0	0	0	100
3/8	9,51	3,270	0,328	0,328	99,672
4	4,76	32,480	3,255	3,583	96,417
8	2,38	51,900	5,201	8,783	91,217
16	1,19	73,250	7,340	16,124	83,876
30	0,595	127,900	12,817	28,941	71,059
50	0,297	309,200	30,985	59,926	40,074
100	0,149	309,620	31,027	90,953	9,047
200	0,075	77,300	7,746	98,699	1,301
fondo		12,980	1,301	100,000	0,000
total		997,900	100,000		

Tabla 9. Características físicas de la arena natural

ENSAYO	RESULTADO	NORMA UTILIZADA
Densidad aparente (bulk)	2,541 (g/cm ³)	NTC 237
Absorción	1,399%	NTC 237
Módulo de finura	2,09	NTC 77
Tamaño máximo	½" o (12,7 mm)	NTC 77
Tamaño máximo nominal	8 o (2,38 mm)	NTC77
Material orgánico	Escala de orgánicos #2	NTC 127

6.1.5. Ensayo de impurezas orgánicas

El contenido de material orgánico presente en la arena correspondió a un número de referencia orgánica (2) y un número de Gardner (8) según la escala de colorimetría empleada para su comparación como se observa en la Figura 6, de acuerdo con estos resultados la arena en estudio pudo ser empleada como agregado para concretos.



Figura 6. Ensayo de colorimetría del agregado fino (arena)

Al igual que con agregado fino (arena), se realizó el ensayo de impurezas orgánicas según la NTC-127 (ASTM C-40) al agregado grueso reciclado como se puede observar en la Figura 7, siguiendo el mismo procedimiento para el anterior agregado, se estableció que el contenido de material orgánico presente en el agregado reciclado corresponde a un número de referencia orgánica de (1) y aun número de Gardner de (5) según la escala de colorimetría de agregados. Sin embargo, cabe aclarar que este ensayo no corresponde a agregados de tipo grueso, se realizó a la espera de obtener un resultado que indicara que tanto había interferido el estar a la intemperie con otros residuos.

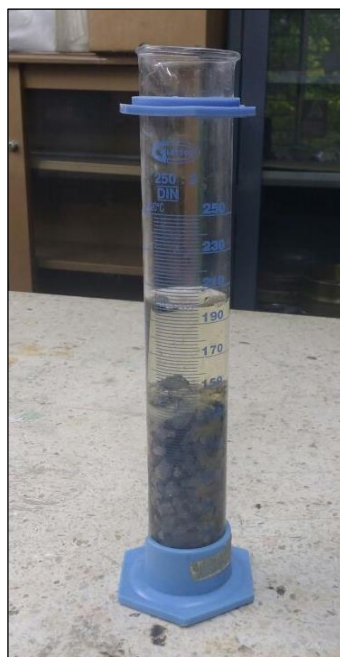


Figura 7. Ensayo de colorimetría de agregados reciclado

6.1.6. Agregado grueso (reciclado)

Como se realizó para el agregado fino (arena) y agregado grueso (grava virgen), cumpliendo con los parámetros de la norma técnica colombiana describe para cada ensayo, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado

# Tamiz	# Tamiz mm	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1/2	12,7	0,000	0,000	0,000	100,000
3/8	9,51	155,650	14,193	14,193	85,807
4	4,76	574,700	52,406	66,599	33,401
8	2,38	266,100	24,265	90,864	9,136
16	1,19	80,250	7,318	98,182	1,818
30	0,595	8,830	0,805	98,987	1,013
50	0,297	1,990	0,181	99,168	0,832
100	0,149	1,550	0,141	99,310	0,690
fondos		7,570	0,690	100,000	0,000
total		1096,640			

También se destaca como se observa en la Tabla 10 que la mejor distribución granulométrica obtenido en el proceso de molturación del agregado reciclado permitió un mejor acomodamiento de las partículas en comparación con el agregado grueso natural cuya distribución granulométrica presentaba un tamaño de partícula unidimensional en un 70% aproximadamente.

Tabla 11. Características físicas del agregado grueso reciclado

ENSAYO	RESULTADO	NORMA UTILIZADA
Densidad aparente (bulk)	2,23 (g/cm ³)	NTC 176
Absorción	9,144%	NTC 176
Módulo de finura	5,67	NTC 77
Tamaño máximo	½" o (2,38 mm)	NTC 77
Tamaño máximo nominal	3/8" o (9,51 mm)	NTC77
Material orgánico	Escala de orgánicos #1	NTC 127

Como se observa en la Tabla 7 y 11 los valores obtenidos de la absorción para la grava natural (1,402%) y el agregado reciclado (9,144%), son bastante diferentes, aproximadamente 6,5 veces mayor la del agregado reciclado con respecto a la grava natural, lo que indica una posible reducción de agua de mezclado, por lo que no habría agua suficiente para la completa hidratación del cemento. Sin embargo, en el diseño de mezcla de concreto se tuvo en cuenta realizar la respectiva corrección por humedad para cada agregado utilizado.

6.1.6.1 Resistencia al desgaste de la grava (virgen) y el agregado grueso reciclado

La prueba de resistencia al desgaste es importante porque evalúa la tenacidad y la resistencia a la abrasión. Esta prueba se realizó tomando como base el principio de la norma ASTM C131, usando un molino de bolas para determinar la aptitud a la molienda en el agregado grueso virgen y reciclado. Para esto, se tomaron muestras de ambos agregados en dos rangos de tamaño, cada muestra, se lavó, se secó en horno a 110°C ± 5°C y se introdujo en el molino de bolas por aparte, con 8 cuerpos moledores medianos de 62,8 g cada uno, durante 15 minutos, y posteriormente se realizó un análisis granulométrico a cada grupo.

Se tomaron 1000 g de material que fue previamente tamizado por el tamiz ½" (12,7mm), garantizando así el tamaño máximo nominal del material empleado en

el desarrollo y ejecución del proyecto, se introdujo en el molino de bolas (Figura 8), con un promedio de revolución por vuelta de 0,64 segundos, para un total de 1046 revoluciones, durante los 15 min de rotación. El anterior procedimiento se realizó para el agregado reciclado, variado las revoluciones por vuelta a 0,87 segundos, para un total de 1034 revoluciones.

Al finalizar el tiempo, se retira el material del contenedor y se lleva al tamiz No.12 (1,7 mm) para así calcular el porcentaje de material que se redujo a este tamaño, el cual no debe exceder el 20% del total del agregado que se introdujo según la norma, sin embargo, debido a la modificación realizada solo se puede apreciar la considerable mayor resistencia al desgaste de la grava virgen, siendo 16 veces mayor a la del agregado reciclado.



Figura 8. Molino de bolas

Se tomaron los 1000 g de grava virgen del molino de bolas una vez pasan los 15 minutos del ensayo y se pasan por el tamiz No. 12, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultado de la resistencia al desgaste de la grava virgen

Se pasa por el tamiz No.12	1000 g
Cantidad que pasa	3,8 g
% que se redujo a un tamaño menor del tamiz No. 12	0,38%

Una vez realizado el anterior procedimiento se introdujo la totalidad del material en la serie de tamices registrados en la Tabla 13, para así determinar el análisis granulométrico, donde se encontró que el módulo de finura del agregado grueso virgen fue de 6,58.

Tabla 13. Granulometría grava virgen pasada por el molino de bolas

# tamiz	mm	PESO (gr)	% de retenido	% de retenido acumulado	% pasa
1/2	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8	9,5	625,1	62,52	62,52	37,48
4	4,76	348,8	34,88	97,40	2,60
8	2,36	19,8	1,98	99,38	0,62
16	1,18	2,4	0,24	99,62	0,38
30	0,595	1,3	0,13	99,75	0,25
50	0,297	0,8	0,08	99,83	0,17
100	0,15	0,3	0,03	99,86	0,14
fondos		1,4	0,14	100,00	0,00
total		999,9			

De la misma manera que se realizó en el paso anterior se introdujeron 1000 g de agregado grueso reciclado, luego de los 15 minutos de rotación en el molino de bolas, se retiró el material y se hizo pasar por el tamiz No. 12, obteniendo los resultados registrados en la tabla 14.

Tabla 14. Resultado resistencia al desgaste agregado reciclado

Se pasa por el tamiz No.12	1000 g
Cantidad que pasa	62,6 g
% que se redujo a un tamaño menor del tamiz No. 12	6,26%

Seguido al anterior proceso se introdujeron a la serie de tamices registrados en la Tabla 15, la totalidad del material de ensayo, para así determinar el análisis granulométrico del agregado grueso reciclado. En donde se determinó que el módulo de finura correspondiente fue de 5,66.

Tabla 15. Granulometría agregado reciclado pasada por el molino de bolas

# tamiz	mm	PESO (gr)	% de retenido	% de retenido acumulado	% pasa
1/2	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8	9,5	234,2	23,42	23,42	76,58
4	4,76	468,1	46,81	70,24	29,76
8	2,36	145,3	14,53	84,77	15,23
16	1,18	89,7	8,97	93,74	6,26
30	0,595	27,4	2,74	96,48	3,52
50	0,297	15,1	1,51	97,99	2,01
100	0,15	11,3	1,13	99,12	0,88
fondos		8,8	0,88	100,00	0,00
total		999,9			

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, se tiene de acuerdo a la adecuación de la norma ASTM C131, el agregado grueso reciclado tiene un muy buen comportamiento al desgaste, menor al 20%, que corresponde al 6,26% de desgaste, lo cual indica que su utilización se recomienda.

Se puede destacar que al obtener resultados de desgaste por debajo de lo requerido por la norma ASTM C131, evidencia una importante utilidad en aplicaciones estructurales, como losas, pisos o estructuras donde requieran o se pueda emplear este agregado grueso reciclado, ya que aunque al comparar ambos resultados, la muestra reciclada es mucho más propensa al desgaste, sigue cumpliendo lo establecido en la normatividad mencionada.

6.1.7. Ceniza de cascarilla de arroz

6.1.7.1 Granulometría de la ceniza de cascarilla de arroz

Se obtiene la distribución granulométrica de la ceniza en estudio al hacerla pasar por la serie de tamices registrados en la Tabla 16, se hace la observación que con el fin de obtener una granulometría de las partículas y no de un conglomerado de ellas, se realiza un secado previo de la muestra a tamizar en un horno eléctrico a una temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante un periodo de 24 horas, también se registra la distribución de granulometría laser para la misma ceniza en la Figura 9.

Tabla 16. Análisis granulométrico de la ceniza de cascarilla de arroz

CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ					
# tamiz	# tamiz (mm)	PESO (gr)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa
4	4,76	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,38	0,62	0,088	0,088	99,912
16	1,19	7,34	1,040	1,128	98,872
30	0,595	36,7	5,201	6,329	93,671
50	0,297	105,1	14,893	21,222	78,778
100	0,149	168,44	23,869	45,091	54,909
200	0,075	289,41	41,012	86,103	13,897
325	0,045	34,618	4,906	91,009	8,991
fondo		63,451	8,991	100,000	0,000
total		705,679	100,000		

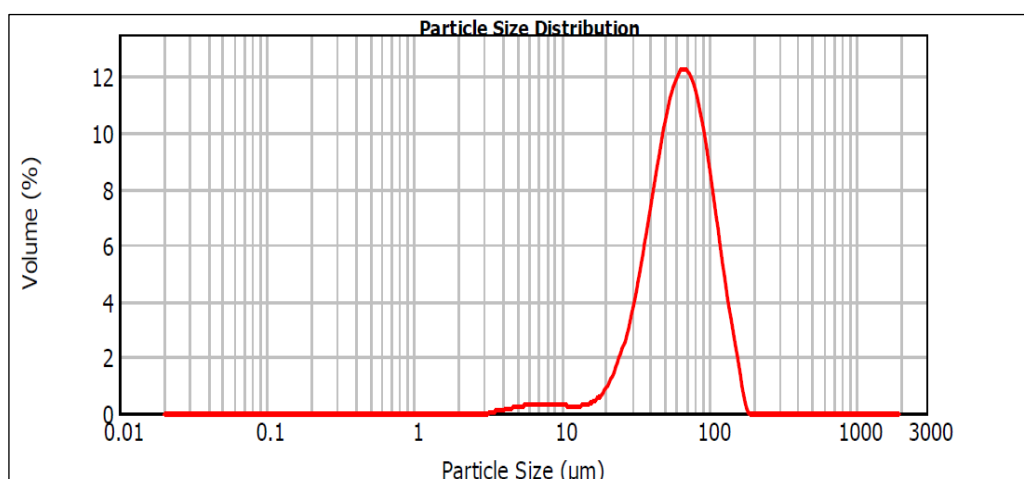


Figura 9. Granulometría laser de la ceniza de cascarilla de arroz

Con los resultados hallados mediante el análisis de la distribución granulométrica en la Tabla 16 los cuales se asemejan a la obtenida a la distribución de los agregados finos, se puede decir que es factible realizar la sustitución parcial en diferentes porcentajes como lo fue planteado en la ejecución del proyecto, como se mencionó al inicio del diseño del concreto, cuando se decide trabajar con los últimos tres reemplazos de (100, 80 y 60) kg/m³ de sustitución de reemplazo de arena por ceniza de cascarilla de arroz, , haciendo la anotación que el diseño del concreto se elabora para un metro cubico, teniendo en cuenta las densidades de los agregados para mantener constante las proporciones de mezcla.

Por otro lado se observa en la granulometría que una cantidad considerable de ceniza de cascarilla de arroz presenta un tamaño menor a 75 μm (tamiz 200), por tal motivo se consideró realizar el análisis granulométrico laser para observar su distribución en el rango de 0 a 75 μm , en donde el 4,4% de la muestra total presenta un tamaño menor al 20% (Tabla 16). De igual forma se resalta que el tamaño promedio de la partícula es de 68,48 μm para esta ceniza sin ningún tratamiento de molienda, esta grafica se superpuso con la del cemento utilizado en el proyecto para contrastar y analizar el tamaño de partícula entre ellos.

6.1.7.2 Densidad de la ceniza de cascarilla de arroz

Cumpliendo las especificaciones de la norma técnica correspondiente se obtuvieron las características físicas de la ceniza de cascarilla de arroz, cuyos resultados se registran en la Tabla 17, también se observa en la Figura 10 el sistema que se usó para determinar la densidad de la ceniza de cascarilla de arroz.



Figura 10. Determinación de la densidad de la ceniza de cascarilla de arroz

6.1.7.3 Perdida al fuego de la ceniza de cascarilla de arroz

En el desarrollo de la caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz empleada en la ejecución de este trabajo, se realizó la prueba de perdida de fuego o ignición en el laboratorio de caracterización del grupo de materiales compuesto (GMC) de la Universidad del Valle, donde la muestra analizada de ceniza de cascarilla de arroz dio un valor de 4,61%, de acuerdo a la norma ASTM C618, la ceniza presenta un valor de perdida permitido que es hasta máximo de 6% de inquemados para cenizas tipo C, la cual además de tener propiedades puzolánicas, presenta propiedades cementicios, este tipo de ceniza volante se produce básicamente a partir de lignito o carbón subituminoso.

Los resultados obtenidos en el laboratorio fueron comparados con investigaciones (Mattey et al. 2015) donde se concluyó que la RHA presentó un porcentaje de perdida al fuego (4,09%) se encuentra dentro del valor permitido por la norma ASTM C618, que es de hasta el 6% de inquemados.

Tabla 17. Características físicas de la ceniza de cascarilla de arroz

ENSAYO	RESULTADO	NORMA UTILIZADA
Densidad aparente (bulk)	1,793(g/cm ³)	ASTM C329
Absorción	5,6%	(Mattey et al, 2014) (N. Fuentes & L.Vizcaino 2015)
Módulo de finura	0,74	NTC 77
Tamaño máximo	4 o (4,76mm)	NTC 77
Tamaño máximo nominal	30 o (0,595mm)	NTC77
Perdida al fuego de la RHA	4,61%	ASTM C618

6.1.7.4 SEM y EDS de la ceniza de cascarilla de arroz

A través de la micrografía y los espectros tomados por la técnica SEM y EDS, como se observa en la Figura 11, se registraron los valores de la composición química (valores puntuales), en la Tabla 18, en donde se puede apreciar que su composición es básicamente silicio y oxígeno, que llevan a la formación de sílice, ya que, mediante el ensayo de Fluorescencia de rayos X (FRX), como se observa en la Tabla 19, afirma que la composición química de la ceniza de cascarilla de arroz es sílice en más del 90%. Lo cual corresponde a la composición de las cenizas Tipo F, donde la suma del porcentaje de sílice, oxido de aluminio, óxido de hierro debe ser del 50% como mínimo.

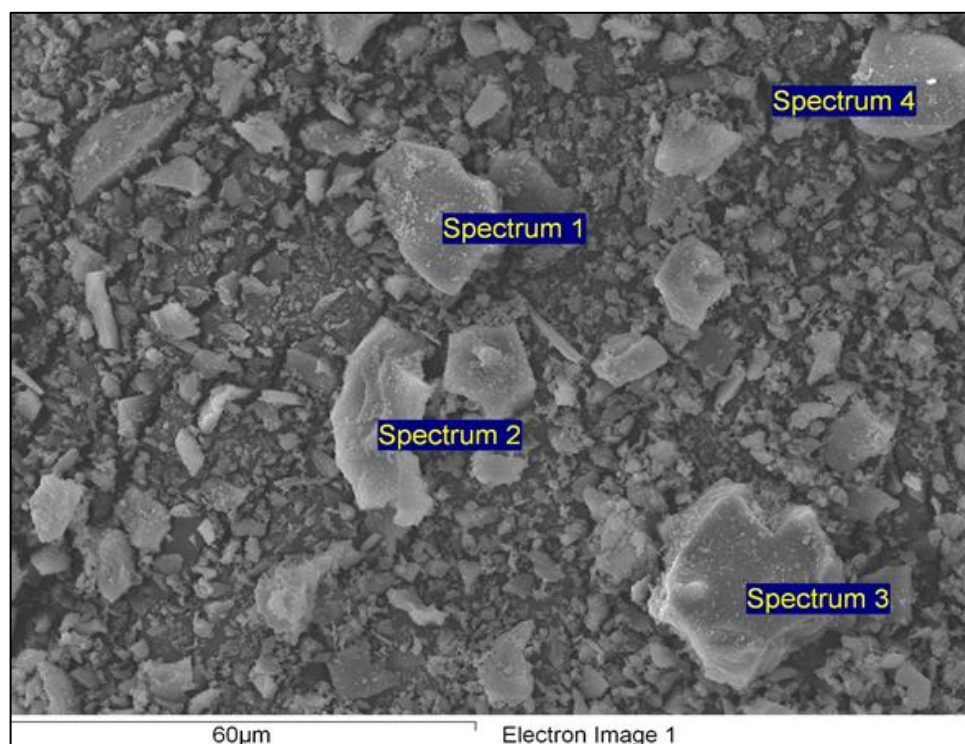


Figura 11. SEM-EDS Ceniza de cascarilla de arroz

Tabla 18. Composición química puntual de la ceniza de cascarilla de arroz mediante EDS

Parámetros \ Espectro	C	O	Si	TOTAL
Máximo	22.77	56.73	37.18	
Mínimo	10.24	40.05	32.22	
Media	14,29	51,74	33,97	100
Desviación Estándar	5.87	7.88	2.20	

6.1.7.5 FRX ceniza de cascarilla de arroz

La composición química de la ceniza de cascarilla de arroz se determinó mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, los resultados se presentan en la Tabla 19.

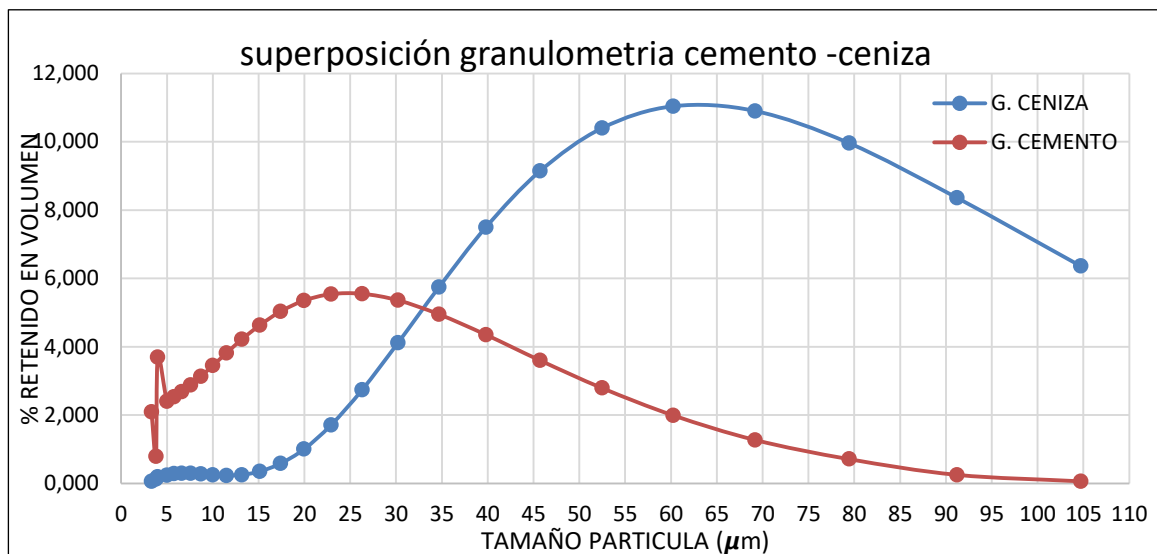
Tabla 19. FRX de la ceniza de cascarilla de arroz

Elemento y/o Compuesto	RHA (%)	Elemento y/o Compuesto	RHA (%)
SiO ₂	91,388	Al ₂ O ₃	0,129
K ₂ O	2,169	Na ₂ O	0,055
P ₂ O ₅	0,793	Cl	0,042
CaO	0,388	Cr	0,011
Fe ₂ O ₃	0,367	Zn	0,007
MgO	0,333	Rb	0,004
MnO	0,172	H ₂ O	4
S	0,142		

6.2. ESTUDIO DEL ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

La ceniza de cascarilla de arroz utilizada era posible que tuviera propiedades puzolánicas, ya que fue calcinada a una temperatura aproximada de 500°C teniendo posiblemente lugar la formación de sílice amorfa. Como se observa en la Gráfica 3 el rango de tamaño menor a 33 μm correspondiente a la ceniza de cascarilla de arroz y un valor aproximado en volumen del 50% podría tener un comportamiento puzolánico, ya que a un tamaño de partícula menor a este mayor área superficial y mayor posibilidad de haberse generado sílice amorfa con características reactivas (Siddique & Iqbal Khan 2011).

Se pasa la ceniza de cascarilla de arroz por el tamiz pasa 100 (0,149 mm), a la cual se realizó granulometría laser y se superpone con la granulometría laser realizada al cemento, para determinar así el rango de la ceniza que puede remplazarse por cemento.



Gráfica 3. Superposición de la distribución granulométrica del cemento y la RHA

En la Tabla 20 y Figura 12 se presenta la dosificación, como también el registro fotográfico obtenidos para el índice de actividad puzolánica de 0% y 20% de sustitución de cemento por ceniza de cascarilla de arroz, tal y como se indica en la norma ASTM C618.

Tabla 20. Datos de dosificación para determinación del índice de actividad puzolánica

MUESTRA	DOSIFICACIÓN(g)			
	Cemento	Arena	Ceniza	Agua
0%	375	1012,5	0	225
20%	300	1012,5	75	225



Figura 12. Mesa de flujo para el 0% y 20% de sustitución de cemento por RHA respectivamente

Con cada una de las mezclas se elaboraron cubos de lado 50 mm o 2", a los cuales posteriormente se les realizaron pruebas de resistencia a la compresión a 28 y 60 días de curado, los resultados se reportan en la tabla 21.

Tabla 21. Datos resistencia a la compresión, índice de actividad puzolánica

MUESTRA	RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN (MPa)	
	28 DÍAS	60 DÍAS
0%	26,85	28,7
20%	13,1	13,3

Como lo indica la norma ASTM C618, una resistencia a los 28 días superior o igual al 75%, señala que el material utilizado en este caso ceniza de cascarilla de arroz tendrá actividad puzolánica. Como se muestra en la Tabla 21, los datos de resistencia de las muestras con ceniza de cascarilla de arroz tienen un porcentaje del 48,7% del valor de la resistencia de la muestra patrón, lo que indicaría la no reactividad de la ceniza, sin embargo, como la actividad puzolánica se presenta a edades tardías se analizaron la resistencia a compresión a 60 días, como se observa en la misma tabla 21 se reduce la resistencia de las muestras con RHA a 46,3%, lo que corrobora la no actividad puzolánica de la RHA.

Además del anterior estudio, se realizó la prueba de Fratini o ensayo químico para determinar la actividad puzolánica según la norma NTC 1512 para el cual se espera obtener datos a 7 y 28 días. En la Tabla 22 se registran los resultados obtenidos.

Tabla 22. Resultados ensayo químico para la determinar la actividad puzolánica de la RHA

Muestra	Edad días	Alcalinidad total - ia milimoles de oh/l	Índice puzolánico – ip milimoles de cao/l
Ceniza de cascarilla de arroz	7	45.5	15.8
Ceniza de cascarilla de arroz	28	43.4	11.0

Tal y como lo indica la norma NTC 1512, si el punto representativo del contenido de óxido de calcio en función de la alcalinidad total, está situado por debajo de la isoterma de solubilidad de la Figura 13, el material ensayado tiene actividad

puzolánica, en este caso la ceniza de cascarilla de arroz no tiene actividad puzolánica como lo muestra el alineamiento de la Figura 13, en donde para 7 días y 28 días el punto de intercepción representativo queda por encima de la isoterma de solubilidad.

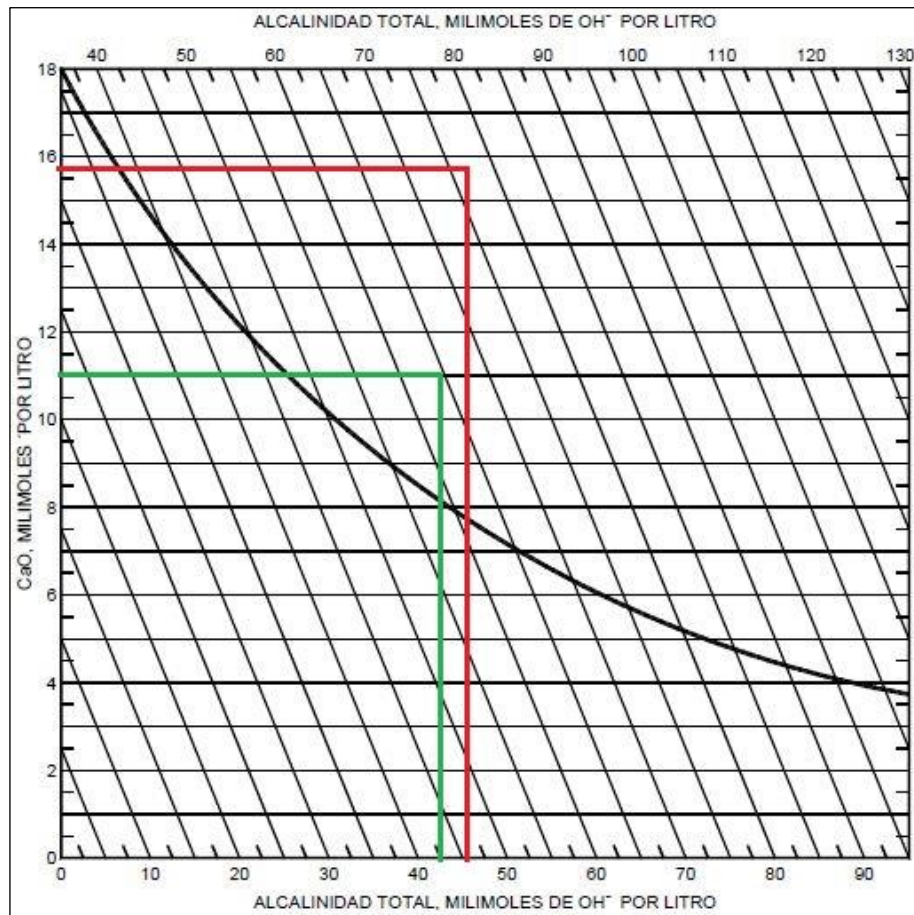


Figura 13. Grafica de solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en presencia de álcalis a 40°C

6.3. CALCULO DE LA SUSTITUCIÓN DE ARENA POR CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

El diseño del concreto se realiza en kilogramos por metro cúbico, en las Tablas 23 y 24, se observan las dosificaciones y en la Tabla 25 los valores de la resistencia a la compresión obtenidos para (300, 200, 100, 80 y 60) kg/m^3 de sustitución de ceniza de cascarilla de arroz por arena.

Tabla 23. Dosificación, sustitución ceniza de cascarilla de arroz por arena y cemento

MEZCLA	CEMENTO (kg/m ³)	ARENA (kg/m ³)	GRAVA (kg/m ³)	CENIZA (kg/m ³)	AGUA (kg/m ³)
PATRÓN	300	893,45	983,81	0	180
300 kg/m ³	245,92	512,62	983,81	300	180
200 kg/m ³	263,95	639,56	983,81	200	180
100 kg/m ³	281,97	766,50	983,81	100	180
80 kg/m ³	285,58	791,89	983,81	80	180
60 kg/m ³	289,18	817,28	983,81	60	180

La dosificación de la Tabla 23 se realizó esperando actividad puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz, sin embargo, más adelante en el desarrollo del trabajo de grado al realizar los ensayos de actividad puzolánica según la norma ASTM C618 y NTC 1512, se encontró que esta no tiene actividad puzolánica según la Tabla 21 y figura 13, por lo tanto, todo el reemplazo de la arena por ceniza de cascarilla de arroz se realizó como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Dosificación, sustitución ceniza de cascarilla de arroz por arena

MEZCLA	CEMENTO (kg/m ³)	ARENA (kg/m ³)	GRAVA (kg/m ³)	CENIZA (kg/m ³)	AGUA (kg/m ³)
PATRÓN	300	893,45	983,81	0	180
300 kg/m ³	300	468,29	983,81	300	180
200 kg/m ³	300	610,01	983,81	200	180
100 kg/m ³	300	751,73	983,81	100	180
80 kg/m ³	300	780,07	983,81	80	180
60 kg/m ³	300	808,41	983,81	60	180

Como se observa en la Tabla 25, los valores de resistencia a la compresión obtenidos son muy bajos en comparación con las probetas patrón, esto se debe al

tamaño de la partícula de la ceniza de cascarilla de arroz y su área superficial que demandan gran cantidad de agua, lo cual reduce la trabajabilidad de la mezcla al aumentar el porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz, como también la reducción del agua de hidratación del cemento. Esto coincide por lo expresado por Paris et al. (2016) para valores similares de sustitución, sin embargo no coincide con el aumento de la resistencia expresado en su estudio.

Tabla 25. Resistencias a compresión de la RHA por arena

MUESTRA	RESISTENCIA PROMEDIO A COMPRESIÓN (MPa)		
	7 DÍAS	28 DÍAS	60 DÍAS
PATRÓN	18,4	26,9	29,0
D estándar	0,374	0,858	0,883
300 kg/m ³	0,83	1,13	1,94
D estándar	0,202	0,335	0,226
200 kg/m ³	2,11	2,86	3,62
D estándar	0,268	0,170	0,460
100 kg/m ³	3,85	5,82	7,98
D estándar	0,271	0,260	0,203
80 kg/m ³	4,87	6,65	7,70
D estándar	0,281	0,143	0,099
60 kg/m ³	5,38	8,43	9,52
D estándar	0,087	0,150	0,480

En la Figura 14 se observa la prueba de asentamiento para la mezcla con 100 kg/m³ de ceniza de cascarilla de arroz por arena, como muestra la imagen el asentamiento fue de 0 cm, lo cual se debe a la absorción de la ceniza y su efecto sobre la mezcla, este valor de asentamiento fue el mismo para cada una de la mezclas presentadas en la Tabla 24.



Figura 14. Asentamiento, sustitución de ceniza de cascarilla de arroz por arena

6.4. EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE JUGO DE FIQUE A UTILIZAR

La cantidad de jugo de fique a utilizar para las muestras de (100, 80 y 60) kg/m^3 de reemplazo de ceniza de cascarilla de arroz por arena, fue del 1%, 3% y 5% del material cementante, sin embargo, el reemplazo del 1% se descartó puesto que no representaba cambios apreciables en la trabajabilidad y resistencia a compresión. Los datos de la dosificación son los mismos de la tabla 24 anteriormente mostrada, En las tablas 26 y 27 se muestra la dosificación y resistencias a la compresión obtenidas.

Tabla 26. Dosificación, sustitución RHA y porcentaje del JPF por material cementante

MEZCLA	CEMENTO (kg/m^3)	ARENA (kg/m^3)	GRAVA (kg/m^3)	CENIZA (kg/m^3)	AGUA (kg/m^3)	Jugo de fique(l/m^3)	
						3%	5%
Patrón	300	893,45	983,81	0	180	-	-
100 kg/m^3	300	751,73	983,81	100	300	9	15
80 kg/m^3	300	780,07	983,81	80	300	9	15

Tabla 27. Resistencias al adicionar 3% y 5% de JPF, a los % de sustitución de RHA por arena

MUESTRA	RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN (MPa)					
	7 DÍAS		28 DÍAS		60 DÍAS	
	3%	5%	3%	5%	3%	5%
Patrón	18,4		26,9		29,0	
D estándar	0,374		0,858		0,883	
100 kg/m ³	10,24	14,64	12,80	16,29	13,23	17,77
D estándar	0,366	0,365	0,201	0,285	0,220	0,123
80 kg/m ³	12,83	15,80	17,33	18,29	18,37	19,55
D estándar	0,198	0,192	0,446	0,344	0,457	0,392
60 kg/m ³	13,35	16,52	20,91	17,69	23,85	20,97
D estándar	0,289	0,327	0,159	0,481	0,348	0,771

Es evidente el aporte a la resistencia que da la acción del el jugo de fique a la resistencia del concreto al observar las Tablas 25 y 27, esto se debe a la mojabilidad que le aporta el jugo de fique a la mezcla lo cual permite una hidratación adecuada del cemento, de igual manera le aporta trabajabilidad lo que permite mantener una consistencia de forma la cual no se alcanzaba cuando no había jugo de fique, ya que la mezcla era extremadamente seca y los cubos tendían a desmoronarse, lo que afectaba la resistencia final, puesto que, la carga no se aplicaba sobre un área específica constante. Se decidió trabajar con 100 kg/m³ de ceniza de cascarilla de arroz por arena el cual corresponde a un porcentaje del 16% aproximadamente de sustitución de ceniza por arena, ya que la resistencia no se aleja mucho con respecto a las proporciones de 80 kg/m³ y 60 kg/m³.

Por otra parte los resultados mostrados en la anterior Tabla 27, correspondientes a la muestra de 60 kg/m³, a las edades de 28 y 60 días evidencia que al aumentar el porcentaje de adición en jugo de fique disminuyen las resistencias para ambas edades, lo cual no estaría cumpliendo la tendencia de que a mayores concentraciones de jugo de fique mayor resistencia como se muestra para las mezclas en las tablas 27 y 29. Se observa en la Figura 15 que el aporte del jugo de fique a la mezcla le da trabajabilidad y mojabilidad, aunque la consistencia del concreto siguió siendo de tipo seco, con asentamiento de 0 cm.



Figura 15. Asentamiento, grava natural, sustitución de 100kg/m^3 de RHA y JPF en 3% y 5% respectivamente.

6.5. CALCULO DE LA SUSTITUCIÓN DE GRAVA NATURAL POR AGREGADO RECICLADO

La cantidad de agregado reciclado grueso a sustituir por grava natural se realiza únicamente para las mezclas que corresponden a 100 kg/m^3 (16%) de remplazo de ceniza de cascarilla de arroz por arena (C), se mantiene la adición del 3% y 5% de jugo de fique de la cantidad del cementante. Los reemplazos se hicieron en volumen para el (100, 75, 50 y 25) % de la grava natural, los datos de dosificación y respuesta de la resistencia a la compresión se muestra a continuación en las Tablas 28 y 29.

Tabla 28. Dosificación, sustitución RHA por arena, porcentaje de JPF y RCD por grava natural

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Agregado reciclado (kg/m ³)	Ceniza (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Jugo De Fique (l/m ³)
Patrón	300	893,45	983,81	-	-	180	-
C-3%-100%	300	751,53	-	785,15	100	180	9
C-5%-100%	300	751,53	-	785,15	100	180	15
C-3%-75%	300	751,53	246,03	588,8	100	180	9
C-5%-75%	300	751,53	246,03	588,8	100	180	15
C-3%-50%	300	751,53	492	392,5	100	180	9
C-5%-50%	300	751,53	492	392,5	100	180	15
C-3%-25%	300	751,53	737,84	196,3	100	180	9
C-5%-25%	300	751,53	737,84	196,3	100	180	15

En la Figura 16 se observan los componentes utilizados en la preparación de la mezcla final, la cual corresponde a un volumen aproximado de seis litros con los cual se realizó el ensayo de asentamiento como se observa en la Figura 16.



Figura 16. Agregados utilizados en la mezcla final

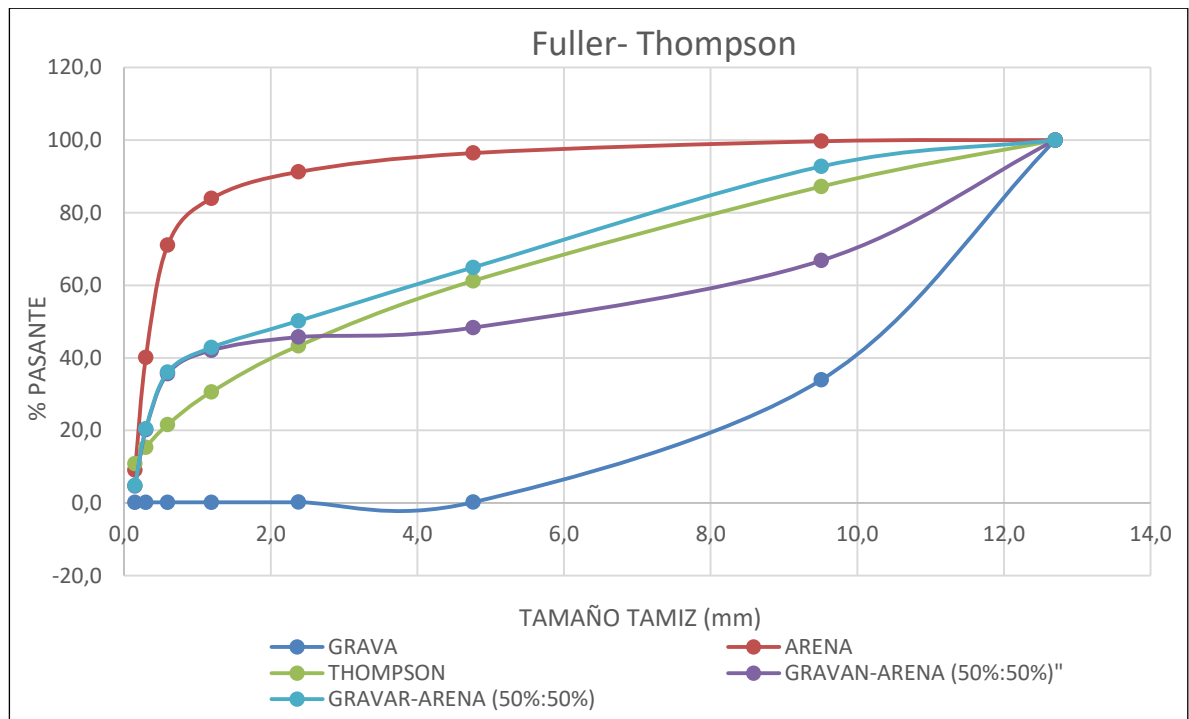
Tabla 29. Resistencias a compresión al adicionar 3% y 5% de JPF, a 100kg/m³ de sustitución de RHA por arena y (100, 75, 50 y 25) % de RCD por grava natural.

MEZCLA	RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN (MPa)		
	7 DÍAS	28 DÍAS	60 DÍAS
Patrón	18,4	26,9	29,0
D estándar	0,374	0,858	0,883
C-3%-100%	9,8	11,7	14,7
D estándar	0,860	0,613	0,694
C-5%-100%	11,8	14,4	16,8
D estándar	0,450	0,899	0,865
C-3%-75%	9,4	12,3	14,8
D estándar	0,988	0,478	0,984
C-5%-75%	12,0	15,2	17,0
D estándar	0,510	0,736	0,535
C-3%-50%	8,4	12,8	14,8
D estándar	0,573	0,616	0,698
C-5%-50%	12,9	16,1	16,9
D estándar	0,572	1,597	0,776
C-3%-25%	10,4	14,8	17,6
D estándar	0,450	0,953	0,939
C-5%-25%	14,2	17,9	19,8
D estándar	0,340	0,478	0,660

Como se observa en la Tabla 29, las resistencias a la compresión de cada una de las mezclas con respecto a la mezcla patrón presentaron menores resistencias a la compresión. Se observa que las mezclas con presencia de agregado reciclado alcanzaron solo hasta un 75% de la resistencia final en los primeros siete días, se nota asimismo que la resistencia alcanzada de cada mezcla con el porcentaje del 5% de jugo de fique es mayor con respecto a la misma mezcla con 3% de jugo de

fique, esto se debe a la acción plastificante del 5% del jugo de fique lo que puede deberse al mayor contenido de agua que este involucra y su factor espumante sobre la mezcla (Jaramillo & Ochoa 2009).

Al analizar los valores obtenidos de resistencia a 28 días, para los porcentajes de sustitución en volumen de grava por agregado reciclado (100, 75 y 50) % se observa un aumento en la resistencia al disminuir el contenido de agregado reciclado, sin embargo, esta diferencia no es tan amplia, esto puede deberse al mejor acomodamiento de las partículas, debido a una mejor distribución granulométrica resultado del proceso de molturación con respecto al agregado grueso natural utilizado, tal y como se muestra en la Gráfica 4, también puede deberse al tamaño máximo utilizado (1/2" o 12,7mm), el cual puede estar en un rango que le atribuye una cantidad adecuada de mortero adherido que le proporciona un mayor anclaje a la nueva pasta de cemento como lo indica (Seo & Choi 2014). Los parámetros para determinar los porcentajes a utilizar son la resistencia y la mayor cantidad que se pueda de agregados reciclados, es por esto, que se decidió trabajar con un 100% de agregado reciclado.



Gráfica 4. Comparación granulométrica grava natural (patrón) y grava reciclada (mezcla final)

6.6. PRUEBA DE ASENTAMIENTO MEZCLA FINAL

Como se puede observar en la Figura 17 al realizar el ensayo para determinar el asentamiento del concreto según los parámetros de la norma NTC 396, se puede observar que el asentamiento fue de 0 cm para ambos porcentajes de jugo de fique 3% y 5% respectivamente, esto se debe a las características propias de los materiales de mezcla. Como se ha comentado anteriormente la ceniza de cascarilla de arroz tiene gran área superficial lo cual infiere una gran demanda de agua necesaria para rodear cada partícula, de igual manera, al trabajar esta mezcla final con un cien por ciento de agregado reciclado, el contenido de mortero agregado influye de manera determinante en la absorción de agua debido a su característica porosa. Además, se debe tener en cuenta que la arena utilizada en el trabajo de grado tiene un módulo de finura bajo (2,09), lo que implicó una mayor demanda de agua.



Figura 17. Asentamientos, mezcla final 3% y 5% de jugo de fique respectivamente

El asentamiento encontrado con el cono de Abrams fue el esperado, ya que la consistencia de la mezcla para realizar este tipo de bloques de concreto es de un carácter seco, la cual permite mantener la estructura del bloque cuando se saque de la maquina vibro compactadora como se muestra en la Figura 18.

6.7. ELABORACIÓN DE BLOQUES ESTRUCTURALES DE CONCRETO

Una vez se tuvo el diseño del concreto a utilizar para la elaboración de los bloques estructurales, se realizaron un par de pruebas en la maquina vibro compactadora, la cual se observa en la Figura 18, esto con el fin de establecer su manejo adecuado y el tiempo requerido de vibración apropiado. Una vez se estableció el correcto manejo de la máquina se hicieron 4 bloques patrón, 4 bloques con 3% de JPF y otros 4 con JPF 5%, y dos en cada ciclo de uso de la maquina vibro compactadora como se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Proceso de elaboración de bloques estructurales de concreto mezcla final

Una vez se elaboraron los bloques se cubrieron y se ubicaron en un lugar a la sombra durante 24 horas, posteriormente se llevaron los bloques hacia uno de los tanques de curado del laboratorio de concretos, allí estuvieron durante 28 días tal y como se muestra en la Figura 19, habiendo cumplido el tiempo de curado se sacan y se dejan al sol para que sequen durante un par horas antes de realizar la prueba a la compresión.



Figura 19. Bloques en proceso de curado

Antes de realizar las pruebas de compresión se realizó el proceso de refrentado, el cual consiste en utilizar yeso escayola para dejar la superficie inferior y superior totalmente planas con el objetivo de que la carga se distribuya en toda el área de trabajo del bloque y se transmita axialmente por la estructura del mismo, como se muestra a continuación en la Figura 20. La resistencia a la compresión de los bloques estructurales se registra en la Tabla 30.



Figura 20. Bloques refrentados con yeso escayola

Tabla 30. Resistencia a la compresión de los bloques estructurales de concreto

28 días	MEZCLA		
	Patrón	100C–3%F-100%R	100C–5%F-100%R
Probeta I	17,30	7,55	12,57
Probeta II	16,44	9,93	10,95
Probeta III	1810	8,67	11,83
Promedio	17,28	8,72	11,78
D estándar	0,678	0,972	0,662

6.8. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

6.8.1. Absorción, densidad y porosidad

Este ensayo se realizó de acuerdo siguiendo las especificaciones de la norma NTC 5653, en la tabla 31 se presentan los resultados promedios obtenidos luego de 28 días de curado. Los especímenes de estudio correspondieron a cubos de 50 mm de lado o 2" y se reporta el promedio de dos especímenes.

Tabla 31. Resultados del ensayo de absorción, densidad y porosidad

Propiedad	Patrón	C-5%F-100%R	C-5%F-75%R	C-5%F-50%R	C-5%F-25%R	C-3%F-100%R	C-3%F-75%R	C-3%F-50%R	C-3%F-25%R
Absorción Después de inmersión (%)	7,5	14,92	11,53	11,03	11,48	10,88	10,70	9,69	9,50
Absorción después de inmersión y hervido (%)	8,1	17,08	14,88	16,31	14,36	13,00	12,54	12,09	11,83
Densidad de masa, seca (g/cm ³)	2,3	1,86	1,98	1,81	1,97	1,91	1,93	2,03	2,05
Densidad de masa, después de inmersión (g/cm ³)	2,4	2,13	2,20	2,01	2,20	2,12	2,14	2,23	2,25
Densidad de masa después de inmersión y hervido (g/m ³)	2,4	2,17	2,26	2,10	2,26	2,16	2,18	2,28	2,29
Densidad aparente (g/m ³)	2,8	2,72	2,77	2,56	2,75	2,54	2,55	2,70	2,72
Volumen de poros permeables (%)	18,2	31,68	28,39	29,36	28,34	24,81	24,25	24,59	24,56

Como se observa en la tabla 31 la mayor proporción de jugo de fique y de agregado grueso reciclado en los bloques tiende a aumentar el volumen de poros

permeables y, al disminuir el porcentaje de agregado reciclado disminuye el volumen de poros permeables, esto se debe a que a mayor porcentaje de agregado reciclado el porcentaje de mortero adherido también aumenta, lo cual se confirma al observar el valor de la densidad del concreto en donde aumentar la cantidad de agregado reciclado disminuye la densidad. Lo encontrado concuerda con el trabajo realizado por Leite et al. (Leite, M. B., Figueire do Filho, J. G. L., & Lima 2012) quienes atribuyen la absorción al mortero adherido presente en el agregado reciclado. De igual manera, sucede al observar los valores de absorción después de inmersión en donde para la misma cantidad de ceniza de cascarilla de arroz y agregado reciclado, la mezcla con mayor porcentaje de jugo de fique presenta mayor absorción, esto puede deberse a que se incorpora mayor cantidad de agua a la mezcla. Confirmando las propiedades espumante y aireante del jugo de fique como se mostró en el trabajo realizado por Jaramillo y Ochoa (2009)(Jaramillo & Ochoa 2009)

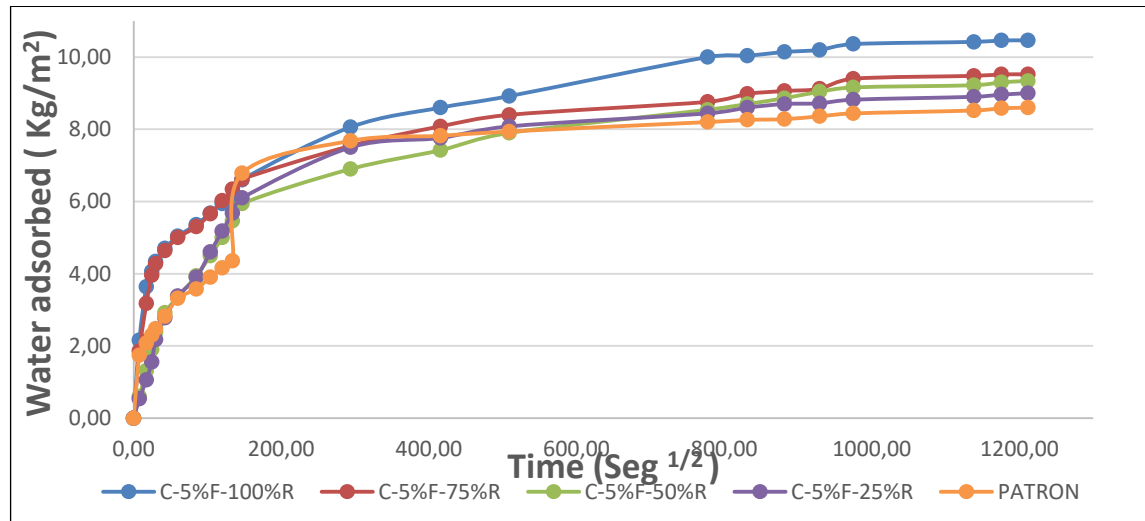
6.8.2. Ensayo de succión capilar

El ensayo de succión capilar se realizó de acuerdo con la norma SIA 162/1 Y ASTM 1585, en la Tabla 32 y Gráfica 5 se observan los resultados promedio de dos especímenes cúbicos de 50 mm de lado, para la mezcla con un 5% de jugo de fique con respecto al peso del cementante, los cuales presentan saturación a los 15 días de empezar el ensayo. De la misma forma en la tabla 33 y Gráfica 6 se presentan los resultados para la mezcla con un 3% de jugo de fique los cuales presentan saturación a los 15 días de empezar el ensayo. Este ensayo determina el incremento de la masa debida a la absorción capilar de agua en función del tiempo. Las tablas reportan los valores de rata de absorción K, la resistencia a la penetración m y la porosidad efectiva ϵ_e calculados para las diferentes mezclas.

Tabla 32. Ensayo de succión capilar a 28 días de curado para la mezcla final (100kg/m³ de RHA, 5% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD

Mezcla	K (Kg/m ² seg ^{1/2})	m (10 ⁷ s/m ²)	Porosidad efectiva ϵ_e (%)
PATRON	0,014	8,825	15,7
C-5%F-100R	0,013	22,488	19,4
C-5%F-75R	0,012	17,853	16,0
C-5%F-50R	0,014	12,987	16,5
C-5%F-25R	0,015	12,708	16,4

Como se observan en las tablas 32 y 33 la porosidad efectiva es menor para porcentajes de 5% de adición de JPF, esto puede deberse a la mayor cantidad de agua de amasado que involucra este, lo que facilita el mezclado y posterior compactación, lo que no ocurre con una menor proporción, también esto podría explicarse por la mayor cantidad de poros formados al tener una mayor cantidad de JPF, dejando así menor espacio para la formación de poros capilares, disminuyendo de esta manera la absorción (Jaramillo & Ochoa 2009).

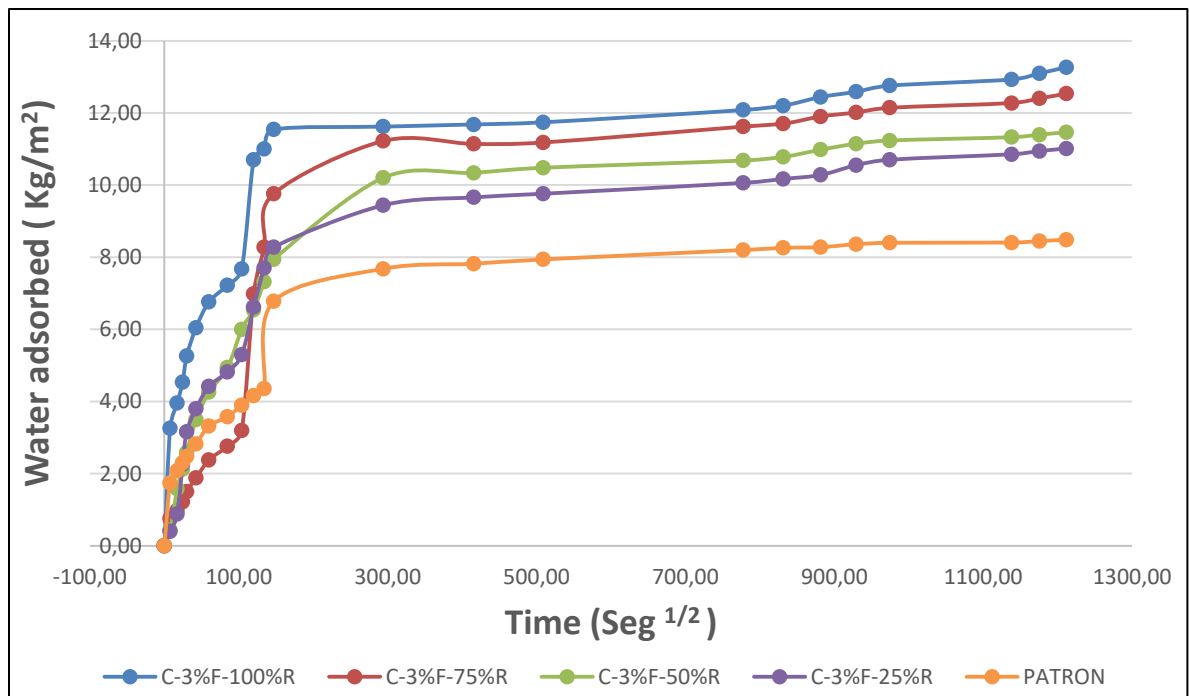


Grafica 5. Ensayo de succión capilar a 28 días, mezcla final (100kg/m³ de RHA, 5% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD

Como lo muestran las Gráficas 5, existe una absorción menor de agua, en comparación con la mezcla del 3% de JPF, mostrado en la Gráfica 6, esta menor absorción puede deberse a que a mayores poros formados menor espacios para la formación de poros capilares, también puede deberse a la mejor compactación que involucra mayor cantidad de líquido de amasado.

Tabla 33. Ensayo de succión capilar a 28 días de curado para la mezcla final (100kg/m³ de RHA, 3% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD

Mezcla	K (Kg/m ² seg ^{1/2})	m (10 ⁷ s/m ²)	Porosidad efectiva ϵ_e (%)
PATRON	0,014	12,839	16,051
C-3%F-100R	0,018	14,965	22,440
C-3%F-75R	0,025	8,710	22,770
C-3%F-50R	0,020	9,415	19,715
C-3%F-25R	0,019	9,304	17,961



Gráfica 6. Ensayo de succión capilar a 28 días, mezcla final (100kg/m³ de RHA, 3% del peso del cementante por JPF y 100% de RCD

6.8.3. Comparación micrográfica mezcla patrón y final

Como se observa en la micrografía de la Figura 22, tomadas en un estereoscopio, se ve el mortero adherido en la mezcla final, se hace evidente las zonas de transición entre el agregado natural y la pasta cemento antiguo que incluye el agregado fino y corresponde al agregado reciclado, como también la zona de transición entre el agregado reciclado y la pasta de cemento nueva que incluye la RHA y el agregado fino, en contraste con la micrografía de la muestra patrón, Figura 21.

El mortero adherido involucra alta porosidad lo que indica que a los concretos elaborados serán de menor densidad, además, sumado a las tensiones generadas en el proceso de molturación y la zona de transición del agregado reciclado, implica concretos de menor resistencia.



Figura 21. Imagen estereoscópica del espécimen tipo patrón a 15X



Figura 22. Imagen estereoscópica de la mezcla final a 12X

7. CONCLUSIONES

Se logró encontrar un diseño de concreto adecuado, el cual involucra la utilización de tres materiales no convencionales, obteniendo resistencias por encima de la mínima establecida para una unidad, la cual debe ser de 11 MPa de acuerdo a la norma NTC 4026. Sin embargo, de acuerdo con la anterior norma, al comparar el promedio de resistencia de los bloques el cual fue de 11,7 MPa, se tiene un valor por debajo de lo establecido en la NTC 4026 que establece un valor promedio de 13 MPa.

Se contribuye al medio ambiente reduciendo la utilización de materiales convencionales en la fabricación de bloques para mampostería estructural, al utilizar materiales que no tienen un uso eficiente como la RHA, RCD y JPF.

Se encontró muy favorable la utilización de agregado grueso reciclado utilizado en la elaboración del concreto, siendo un factor importante la procedencia del agregado grueso reciclado como factor determinante en la resistencia del nuevo concreto, en nuestro caso la elaboración de bloques para mampostería estructural con el 100% de agregado reciclado.

Al utilizar jugo de la hoja de la planta de fique se logró evidenciar su comportamiento como aditivo oclisor de aire y espumante, el cual favoreció la trabajabilidad y mojabilidad de la mezcla, ya que estas, sin la presencia de jugo de fique eran muy secas y de poca consistencia. El jugo de fique al mezclarse con el agua de amasado del concreto, aumentó el líquido de mezclado y aumentó la trabajabilidad de la mezcla para porcentajes de 5% el peso del cementante.

La utilización de ceniza de cascarilla de arroz en la elaboración de concreto presenta varias dificultades, debido a que su módulo de finura tan bajo y por lo tanto elevada área superficial demandan gran cantidad de agua, ya que por su característica higroscópica reduce la cantidad de agua necesaria para generar las reacciones de hidratación, sin embargo se logró utilizar un 16% de sustitución de ceniza de cascarilla de arroz por arena.

8. REFERENCIAS

- Álvarez, N., 2014. *Concretos elaborados con áridos finos obtenidos de escombros de la construcción*. Cali: Universidad del Valle, grupo de materiales compuestos.
- Antiohos, S.K., Papadakis, V.G. & Tsimas, S., 2014. Cement and Concrete Research Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research*, 61–62, pp.20–27.
- Barra, M. et al., Utilización de áridos reciclados “Una oportunidad frente a la situación actual.” *Recerca i innovació a l'escola de camins*, pp.1–3.
- Dagma, 2016. En Cali se arrojan 200 toneladas de escombros ilegalmente a diario. *Diario el País, Cali*. Available at: <http://www.elpais.com.co/cali/en-se-arrojan-200-toneladas-de-escombros-ilegalmente-a-diario.html>.
- Dane, 2016. Encuesta nacional de arroz mecanizado. *Boletín técnico*, 2016, pp.1–19. Available at: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_lsem16.pdf.
- Furlan, V. & Houst, Y., 1980. Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation. , 11(7), pp.29–32.
- Guzmán, D.S. De, 2001. *Tecnología del concreto y del mortero* Quinta edición. bhandar Ltda. Editores, ed., Bogotá – Colombia.
- He, Z., Li, L. & Du, S., 2017. Creep analysis of concrete containing rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 80, pp.190–199.
- Jaramillo, L. & Ochoa, J., 2009. Evaluación del jugo de fique como aditivo oclisor de aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto.
- Kisku, N. et al., 2017. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. , 131, pp.721–740.
- Leite, M. B., Figueire do Filho, J. G. L., & Lima, P.R.L., 2012. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. *Materials and Structures*.
- Mattey, P. et al., 2015. Application of rice husk ash obtained from agro-industrial process for the manufacture of nonstructural concrete blocks. *Rev.LatinAm.Metal.Mat*, 35(2), pp.285–294.
- Mercader et al; 2010. Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación. *Informes de la Construcción* Vol. 62, 517, 125–132.

- Miranda, L. & Selmo, S., 2004. Construction and demolition waste variability and its influence on masonry and plastering mortars properties.
- Morales, M. et al., 2017. Effect of recycled aggregate on physical-mechanical properties and durability of vibro-compacted dry-mixed concrete hollow blocks. , 145, pp.303–310.
- N. Fuentes, O.F. & L.Vizcaino, 2015. Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. , pp.99–116.
- Naji, A. et al., 2010. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength , water permeability and workability of binary blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24, pp.2145–2150.
- NSR-10, R. colombiano de construcción sismo-R., 1997. *NSR-10*, Colombia.
- NTC-4026, N.T.C., 1997. *NTC - 4026*, Colombia.
- O'Reilly Díaz, Vi., 1997. *Método para el diseño de hormigón de alto comportamiento* U. del V. Editorial, ed., Cali - Colombia.
- Ochoa, J., Payá, J. & Borrachero, M., 2009. Uso del licor de plantas agavaceas como aditivo en morteros y hormigones.
- Paris, J.M. et al., 2016. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121, pp.1–18.
- Prada, A. & Cortes, C., 2010. La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Universidad de los ILanos*.
- Quiceno, D. & Mosquera, M., 2010. *Alternativas Tecnológicas Para El Uso De La Cascarilla De Arroz Como Combustible*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Rodrigues, D., Luiz, J. & Zanellato, F., 2016. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, pp.656–666.
- Salas, A. et al., 2009. Cement and Concrete Research Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 39, pp.773–778.
- Seo, D.S. & Choi, H.B., 2014. Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar. , 59, pp.72–77.
- Shi, C., Jiménez, A.F. & Palomo, A., 2011. Cement and Concrete Research New cements for the 21st century : The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), pp.750–763.
- Siddique, R. & Iqbal Khan, M., 2011. *Supplementary Cementing Materials* Springer, ed.,

- Tabsh, S.W. & Abdelfatah, A.S., 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), pp.1163–1167.
- Wang, L. et al., 2017. An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. , 144, pp.432–441.
- Wijayasundara, M., Mendis, P. & Crawford, R.H., 2017. Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, pp.321–334. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.001>.