

TESIS DE INVESTIGACIÓN
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS QUE PRESENTA EL
CONCRETO GEOPOLÍMERO A BASE DE CENIZA DE CASCARILLA DE
ARROZ PRODUCIDA EN EL DEPARTAMENTO DEL META, Y REFORZADO
CON FIBRAS DE ACERO.



Por:
María José Leguizamón Álvarez
María Alejandra Beltrán Vanegas



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
AÑO
2019

TESIS DE INVESTIGACIÓN
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS QUE PRESENTA EL
CONCRETO GEOPOLÍMERO A BASE DE CENIZA DE CASCARILLA DE
ARROZ PRODUCIDA EN EL DEPARTAMENTO DEL META, Y REFORZADO
CON FIBRAS DE ACERO.



Por:
María José Leguizamón Álvarez
María Alejandra Beltrán Vanegas

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Emiro Andrés Lozano Pérez
Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
AÑO
2019

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón.
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN
Decano Facultad Ingeniería Civil

EMIRO ANDRES LOZANO PEREZ
Director Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Villavicencio, 29 de Enero de 2020

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación va dedicado principalmente a Dios, por todas aquellas bendiciones que me ha brindado en la vida; A mis padres Elizabeth y Yilson que siempre me apoyaron económica y moralmente, siendo ellos mi motor de crecimiento personal y profesional; A mis queridos abuelos Romelia y Jaime los cuales siempre creyeron en mí, en mis capacidades, nunca me desampararon, y siempre me brindaron su mano para seguir adelante.

MARÍA ALEJANDRA BELTRÁN VANEGAS

Principalmente dedico este logro a mis padres, quienes han estado apoyándome y respaldándome en este proceso de mi vida, además, a cada uno de los profesores que me han acompañado en mi desarrollo como profesional y que han sido parte fundamental para llegar a tan grande resultado.

MARÍA JOSÉ LEGUIZAMÓN ÁLVAREZ

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por ser nuestro guía y fortaleza en nuestro camino.

A nuestros padres por ser parte fundamental en nuestro desarrollo, por los valores que nos inculcaron y por ser nuestro apoyo emocional y económico en nuestra trayectoria.

A nuestro director de tesis el Ingeniero, quién fue nuestro guía y nos compartió muchos de sus grandes conocimientos en el área de estructuras para poder llevar a cabo este proyecto de investigación, además de brindarnos su visión crítica en la ejecución de este proyecto, su apoyo incondicional y sus consejos en todo momento.

A la Universidad Santo Tomás por brindarnos la oportunidad de crecer íntegramente en sus planteles educativos, por todas esas herramientas brindadas para nuestro crecimiento profesional y personal, y por apoyarnos económicamente para la realización de este proyecto de investigación.

A todas aquellas personas que nos acompañaron en nuestro camino y nos brindaron su apoyo en cada etapa de este proceso.

RESUMEN

Este proyecto se realizó mediante la elaboración de cuarenta (40) cilindros y ocho (8) viguetas a base de cascarilla de arroz con reforzamiento de fibra de acero, y de diez (10) cilindros y dos (2) viguetas con concreto convencional, cumpliendo con la normativa especificada en el marco normativo; desarrollándose y ejecutándose en la ciudad de Villavicencio-Meta, utilizando ceniza de cascarilla de arroz proveniente del molino cereales del llano S.A, cemento ARGOS y fibra de acero con referencia Sika Fiber CHO 65/35.

Se define con este proyecto los módulos de elasticidad y relación de poisson, obtenidos mediante ensayos de esfuerzo a compresión, se determinaron los módulos de rotura por medio de los ensayos realizados a flexión y se llevó a cabo una comparación entre las propiedades mecánicas que presenta el concreto convencional con respecto a las del concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero, para comprobar el mejoramiento del comportamiento mecánico (Compresión y flexión).

En los resultados obtenidos la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) aportó al incremento en la resistencia a la compresión en el concreto, al igual que la fibra de acero en porcentajes menores o iguales al 1%. El módulo de elasticidad aumentó para los cilindros a base de cascarilla de arroz con reforzamiento de fibra de acero, y la relación de poisson disminuyó. El módulo de rotura en las viguetas sometidas a flexión a los 28 días aumentó con este nuevo tipo de concreto mejorando la distribución de esfuerzos en la matriz de concreto. Todos los resultados de los cilindros se analizaron a la edad de 60 días de curado, puesto que en edades inferiores este concreto a base de cascarilla de arroz con reforzamiento de fibra de acero tenía resultados inferiores en las propiedades mecánicas analizadas respecto al concreto convencional.

Palabras Clave: *Ceniza de cascarilla de arroz, fibra de acero, concreto geopolímero, propiedades mecánicas.*

ABSTRACT

This project was carried out through the elaboration of forty (40) cylinders and eight (8) beams based on rice husk with steel fiber reinforcement, and ten (10) cylinders and two (2) joists with conventional concrete, complying with the regulations specified in the regulatory framework; developing and running in the city of Villavicencio-Meta, using rice husk ash from Cereales del llano S.A mill, ARGOS cement and Sika Fiber CHO 65/35 steel fiber.

With this project the modules of elasticity and poisson relation are defined, thrown by tests of compression stress, the rupture modules were determined through the tests carried out to flexion and a comparison was made between the mechanical properties presented by the Conventional concrete with respect to those of geopolymers concrete based on rice husk ash and reinforced with steel fiber, to check the improvement of mechanical behavior, (Compression and bending).

Rice husk ash (RHA) contributed to the increase in compressive strength in concrete, as the steel fiber did in percentages less than or equal to 1%. The modulus of elasticity increased for rice husk-based cylinders with steel fiber reinforcement, and the poisson ratio decreased. The modulus of rupture in the beams subjected to bending at 28 days increased with this new type of concrete improving the distribution of stresses in the concrete matrix. All the results of the cylinders were analyzed at the age of 60 days of curing, because at lower ages this concrete based on rice husk with steel fiber reinforcement had inferior results in the mechanical properties analyzed with respect to conventional concrete.

Key Words: *Rice husk ash, steel fiber, geopolymer concrete, mechanical properties.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	XIV
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	XV
3.	JUSTIFICACIÓN.....	XVI
4.	OBJETIVOS	XVII
4.1.	OBJETIVO GENERAL	XVII
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XVII
5.	ALCANCE	XVIII
6.	MARCO DE REFERENCIA	XIX
6.1.	MARCO TEÓRICO	XIX
6.1.1.	Geopolímero	XIX
6.1.2.	Fibras de acero	XIX
6.1.3.	Ceniza de cascarilla de arroz	XXI
6.1.4.	Concreto geopolimero	XXII
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	XXII
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	XXIII
6.3.1.	Uso suplementario de la ceniza de la cáscara de arroz (CCA) como material cementoso en la industria del concreto	XXIII
	Resultados obtenidos	XXIV
6.3.2.	Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra de acero con diferentes resistencias de concreto	XXIV
	Conclusiones	XXIV
6.3.3.	Comportamiento mecánico del concreto con un porcentaje del 20% de CCA y porcentajes de 0,3%, 0,5% y 0,7% de fibra de acero	XXV
6.3.4.	Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico	XXVI
6.3.5.	Investigación analítica y experimental sobre el comportamiento a la flexión de vigas de hormigón geopolímero curado a temperatura ambiente reforzadas con fibras de acero.....	XXVII
6.4.	MARCO NORMATIVO.....	XXVIII
7.	EQUIPO DE INVESTIGACIÓN Y TRAYECTORIA	XXIX
8.	METODOLOGÍA	XXX
8.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	XXXI
9.	DISEÑO DE MEZCLA.....	XXXIV
9.1.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	XXXIV
9.2.	DISEÑO DE MEZCLA OBTENIDO	XXXVII
10.	DISEÑO REFORZADO DE LAS VIGUETAS.....	XLI
11.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS DE CONCRETO.....	XLII
12.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE LA ELABORACIÓN DE LAS VIGUETAS EN CONCRETO	XLIII
13.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	XLIV
13.1.	ENSAYO A COMPRESIÓN DE LAS DIFERENTES MUESTRAS DE CONCRETO	XLIV

13.2. MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON.....	LI
13.3. MODULO DE ROTURA DE LAS VIGUETAS	LII
13.4. ANÁLISIS DE COSTOS.....	LIV
14. DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS FINALES	LV
15. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	LVI
15.1. CONCLUSIONES	LVI
15.2. TRABAJOS FUTUROS.....	LVIII
BIBLIOGRAFÍA	LIX

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición química de las fibras de acero	XXI
Tabla 2 Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz	XXII
Tabla 3 Marco normativo	XXVIII
Tabla 4 Tipos de diseño de mezcla para cilindros y viguetas	XXXI
Tabla 5 Especificaciones de los cilindros	XXXII
Tabla 6 Especificaciones de las viguetas	XXXII
Tabla 7 Granulometría del agregado fino	XXXIV
Tabla 8 Porcentaje de absorción del agregado fino	XXXV
Tabla 9 Contenido de humedad del agregado fino	XXXV
Tabla 10 Granulometría del agregado grueso	XXXV
Tabla 11 Propiedades mecánicas y características físicas de la fibra de acero	XXXVI
Tabla 12 Curva granulométrica del cemento y la CCA	XXXVII
Tabla 13 Volumen de concreto para los cilindros	XXXVIII
Tabla 14 Volumen de concreto para las viguetas	XXXVIII
Tabla 15 Diseño de mezcla de los cilindros convencionales	XXXVIII
Tabla 16 Diseño de mezcla de los cilindros con 20% de CCA	XXXVIII
Tabla 17 Diseño de mezcla de cilindros con 20% de CCA y 0,5% de fibra de acero	XXXIX
Tabla 18 Diseño de mezcla de cilindros con 20% de CCA y 1% de fibra de acero	XXXIX
Tabla 19 Diseño de mezcla de cilindros con 20% de CCA y 1,5% de fibra de acero	XXXIX
Tabla 20 Diseño de mezcla de viguetas convencionales	XXXIX
Tabla 21 diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA	XL
Tabla 22 Diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA y 0,5% de fibra de acero	XL
Tabla 23 Diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA y 1% de fibra de acero	XL
Tabla 24 Diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA y 1,5% de fibra de acero	XL
Tabla 25 Datos iniciales para el cálculo de reforzamiento de las viguetas	XLI
Tabla 26 Cuantía requerida para el refuerzo de las viguetas	XLI
Tabla 27 Acero requerido para viguetas convencionales	XLI
Tabla 28 Acero requerido para viguetas con porcentajes de 0,5%,1% y 1,5% de fibra de acero	XLI
Tabla 29 Resistencia a compresión de cada una de las muestras (Mpa)	XLIV
Tabla 30 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 7 días de curado	XLV
Tabla 31 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 14 días de curado	XLVI
Tabla 32 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 28 días de curado	XLVII

Tabla 33 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 60 días de curado.....	XLVIII
Tabla 34 Muestras de concreto después de ser sometidas al ensayo a Compresión (cilindros).....	L
Tabla 35 Módulos de elasticidad de las diferentes muestras de concreto	LII
Tabla 36 Relación de Poisson de las diferentes muestras de concreto	LII
Tabla 37 Módulo de rotura obtenido en el ensayo a flexión de las viguetas.	LII
Tabla 38 Muestras de concreto después de ser sometidas al ensayo a Flexión (Viguetas).....	LIII
Tabla 39 Costo de los materiales para la elaboración de 1m ³ de concreto	LIV
Tabla 40 Resultados esperados a partir de los objetivos planteados.....	LV
Tabla 41 Pertinencia impacto	LV

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Secciones de las fibras de acero más comunes	XX
Ilustración 2 Geometría de los diferentes tipos de fibras de acero	XX
Ilustración 3 Modo de falla de concretos fibrorreforzados	XXV
Ilustración 4 Curva Granulométrica del agregado fino	XXXV
Ilustración 5 Curva granulométrica del agregado grueso	XXXVI
Ilustración 6 Curva granulométrica del cemento y la CCA	XXXVII
Ilustración 7 Preparación de material para la realización de la mezcla	XLII
Ilustración 8 Proceso de mezclado en la hormigonera	XLII
Ilustración 9 Camisas antes y después del llenado	XLIII
Ilustración 10 Camisas antes del relleno	XLIV
Ilustración 11 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto	XLV
Ilustración 12 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 7 días de curado	XLVI
Ilustración 13 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 14 días de curado	XLVII
Ilustración 14 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 28 días de curado	XLVIII
Ilustración 15 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 60 días de curado	XLIX

1. INTRODUCCIÓN

Hasta la actualidad (Año 2020), el gremio de la construcción ha impactado de forma negativa al medio ambiente mediante la alteración de la naturaleza, emisión de gases (CO_2) y producción de gran cantidad de partículas de polvo, es por esto que para reducir el impacto producido por las obras civiles se hace necesario la utilización de materiales con bajo contenido de carbono.

Para el año 2016, la zona de los llanos incremento notoriamente la producción de arroz, generando 1.156.460 toneladas de este producto, siendo la zona con mayor producción de arroz para ese mismo año, y así mismo, manteniendo la misma producción para los años siguientes [1]. Debido a su alta demanda y producción, se generan grandes cantidades de biomasa la cual es utilizada por muchas industrias en diversas presentaciones como pacas de cascarilla, cascarilla cruda y cascarilla quemada [2].

Sin embargo, es mucha la biomasa que se produce, es por esto que se busca su implementación en diferentes campos. Así pues, se ha encontrado que la cascarilla quemada contiene un porcentaje alto en sílice, lo que la convierte parcialmente en un buen sustituto del cemento. Además de suplir la demanda de infraestructura del departamento con su utilización, lograría la mitigación de los impactos ambientales generados por el concreto convencional, disminuyendo la emisión de gases de dióxido de carbono y reduciendo el excesivo residuo de cascarilla de arroz.

Para evitar que las propiedades mecánicas puedan verse afectadas en relación con el concreto convencional, se busca el reforzamiento de este geopolímero mediante la utilización de fibras de acero, las cuales proporcionan propiedades mecánicas específicas como flexo tracción, resistencia al impacto, durabilidad, ductilidad, tenacidad y disminución de fisuras; y además presentan características necesarias para dispersarse en una mezcla de concreto en estado fresco, empleando metodologías de mezclado tradicionales.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el comportamiento mecánico que presenta el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz producida en el departamento del Meta y reforzado con fibras de acero?

El Meta es un departamento colombiano que ha logrado un gran crecimiento poblacional y con esto se ha visto en la necesidad de crecer también en infraestructura; además, este departamento se encuentra catalogado como una zona de amenaza sísmica alta según el título A de la NSR-10, siendo susceptible a de fenómenos naturales (sismos, erosión, deslizamientos), que pueden causar daños estructurales en las diferentes obras civiles, lo que provocaría el aumento de la producción de desechos y la necesidad de realizar reconstrucciones de las distintas obras afectadas.

Dado esto es indispensable la ejecución de medidas que mitiguen el impacto ambiental generado por las obras civiles sin afectar las propiedades mecánicas necesarias para llevar a cabo la construcción de cualquier tipo de estructura. Para ello se propone la utilización de un concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibras de acero, buscando en este, mayor beneficio en su comportamiento mecánico en relación con el cemento convencional, y así mismo respetando el medio ambiente.

3. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día el concreto se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en el área de la construcción. La producción global de concreto es de aproximadamente 12 mil millones de toneladas al año, lo que equivale a casi 1m^3 por persona al año, elevando notablemente la demanda de este recurso. Además, esta industria es la encargada de producir alrededor del 5% de las emisiones totales hechas por el hombre. Es por este motivo que se hace necesario implementar medidas que mitiguen el impacto ambiental causado por la alta producción de concreto [3].

La presente investigación buscará disminuir este impacto, enfocándose en el estudio de un concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibras de acero, el cual buscará obtener propiedades mecánicas mejores a las presentes en un concreto convencional, debido a que las fibras de acero presentan características específicas de resistencia a flexión, las cuales podrían contribuir al comportamiento mecánico del concreto. Para ello, serán utilizados porcentajes de fibra de acero de 0.5%, 1% y 1.5% con respecto al cemento, ya que a partir de diferentes investigaciones realizadas, tal como se evidencia en el estado del arte del presente documento, se ha concluido que los porcentajes óptimos para uso de fibra de acero en el concreto pueden variar entre porcentajes de 0.5% a 1.5%. Además, al implementar ceniza de cascarilla de arroz en la mezcla, se buscará disminuir la cantidad de cemento portland utilizado, todo con el fin de disminuir los costos generados al crear la mezcla y la cantidad de gases contaminantes producidos.

Se plantea esta solución debido a que el concreto es un material que se seguirá utilizando debido a sus características y a su variedad de usos, ya que este producto está arraigado en la sociedad, y es inevitable su implementación en obras civiles, por lo cual con este proyecto se busca disminuir los impactos generados por este material sin disminuir las propiedades típicas presentadas en el concreto y sin aumentar costos de producción.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar las propiedades físico-mecánicas que presenta el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibras de acero, en comparación con el concreto convencional, utilizando un porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz del 20% y tres (3) porcentajes diferentes de fibra de acero (0,5%, 1%, 1,5%) con respecto al cemento.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño de mezcla del concreto convencional y de los diferentes tipos de muestra con contenido de ceniza de cascarilla de arroz y fibra de acero.
- Analizar los módulos de elasticidad y relación de poisson, obtenidos por los ensayos de esfuerzo a compresión tanto de los cilindros a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzada con fibra de acero como los cilindros de concreto convencional.
- Analizar módulos de rotura por medio de los ensayos realizados a flexión a la viga con concreto a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzada con fibra de acero y del concreto convencional.
- Comparar las propiedades mecánicas que presenta el concreto convencional respecto a las del concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero.

5. ALCANCE

Este proyecto se realizará mediante la elaboración de cuarenta (40) cilindros y ocho (8) viguetas de concreto a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero, y diez (10) cilindros y dos (2) viguetas con diseño de mezcla de concreto convencional, cumpliendo con los procesos especificados en el marco normativo, desarrollándose y ejecutándose en la ciudad de Villavicencio-Meta, utilizando la ceniza de cascarilla de arroz de la región, y el cemento de la empresa ARGOS la cual es una empresa nacional. Se quiere definir con este proyecto las propiedades mecánicas de compresión y flexión del concreto geopolímero a base de cascarilla de arroz y reforzado con fibras de acero, el cual se comparará con el concreto convencional, para así comprobar el mejoramiento del comportamiento mecánico (Compresión y flexión). Los ensayos para definir las propiedades mecánicas se realizarán en la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio. Todo lo anterior se ejecutará en función de las normativas vigentes de la república de Colombia.

El proyecto está dirigido hacia todo el gremio de construcción, como fuente y base para futuras investigaciones, a fin de poder lograr su implementación como uso alternativo y ambientalmente sostenible del concreto; se aclara que el uso de esta investigación para la construcción de elementos estructurales no es válido, puesto que se requiere la realización de muchos más ensayos que verifiquen su correcto funcionamiento y comportamiento, los cuales no se realizarán en este proyecto de investigación.

Se entregarán los resultados con sus respectivos análisis y conclusiones de los ensayos a tensión realizados a diez (10) viguetas que se fallarán a los 28 días y ensayos de compresión realizados a los cincuenta (50) cilindros que serán fallados a los 7, 14, 28 y 60 días.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1. Geopolímero

Un geopolímero es considerado como la tercera generación del cemento, seguido de la cal y el cemento convencional Portland. El término “geopolímero” es generalmente usado para describir aluminosilicatos amorfos que son comúnmente llamados como “polímeros inorgánicos”, “geo cementos”, “hidrocerámicos”, etc. A pesar de la variedad de nomenclatura, todos estos términos describen los mismos materiales sintetizados de igual composición química, la cual consiste en una unidad repetitiva de monómero de silicato ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$).

Una variedad de materiales aluminosilicatos como el caolín, feldespato y residuos industriales como la ceniza volante, escoria metalúrgica, desechos mineros, ceniza de cascarilla de arroz, entre otros, han sido utilizados como materia prima sólida en la tecnología de geo polimerización. La reactividad de estos aluminosilicatos depende de su composición química, composición mineralógica, morfología y contenido de finura. Los criterios principales para desarrollar geopolímeros estables es que los materiales deben ser de alta amorficidad y además poseer suficiente contenido vítreo, baja demanda de agua y ser capaz de liberar aluminio fácilmente.

Los activadores alcalinos como hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), silicato de sodio (Na_2SiO_3) y silicato de potasio (K_2SiO_3) son utilizados como materiales activadores de aluminosilicatos [4].

6.1.2. Fibras de acero

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y de sección pequeña, obtenidos mediante la deformación de alambres de acero que son estirados en frío. Como resultado de este proceso, conocido como trefilación, se producen fibras con diámetros entre 0,6 y 1,0 mm, de formas rectas u onduladas (con mejores propiedades de adherencia). Estas fibras son adicionadas al concreto con el propósito de transmitir ciertas propiedades mecánicas específicas como flexo tracción, resistencia al impacto, durabilidad, ductilidad, tenacidad y disminución de fisuras; estas cuentan con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla de concreto en estado fresco, empleando metodologías de mezclado tradicionales [5].

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades:

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del concreto.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.

- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del concreto. [6]

Existen cinco tipos de fibras de acero identificados según el proceso de fabricación y la variedad de las formas de presentación (rectas, onduladas o roscado en caliente o bloques de acero):

- Tipo I: Por estirado de alambre en frío (trefilación)
- Tipo II: Por corte de láminas (láminas onduladas)
- Tipo III: Por extrusión de acero
- Tipo IV: Por molino de corte
- Tipo V: Por modificación en el proceso de trefilación [5]



Ilustración 1 Secciones de las fibras de acero más comunes

Fuente: Salazar, Patricia Cristina Marmol, 2010 [6]

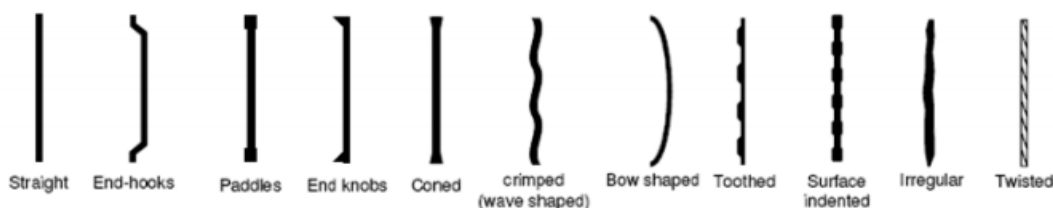


Ilustración 2 Geometría de los diferentes tipos de fibras de acero

Fuente: Salazar, Patricia Cristina Marmol, 2010 [6]

Para garantizar la ductilidad y asegurar la confiabilidad de las fibras de acero, estas deben, además de ser corrugadas, fabricarse con acero que cumpla la norma de fabricación ASTM A-820 (NTC 5214).

Esta norma exige una resistencia mínima a la tensión de 345 Mpa (50000 psi), suficiente para asegurar que el mecanismo final de falla suceda por el desprendimiento de fibras y no por la ruptura de las mismas [5].

Aportes de las fibras al concreto

La adición de fibras de acero al concreto le proporciona las siguientes características [5]:

1. Las fibras de acero “cosen” las fisuras del concreto formando un “puente” entre los agregados gruesos, para posibilitar la formación controlada de las fisuras. Esto conduce al concreto a un comportamiento dúctil después de la fisuración inicial, que reduce las posibilidades de una fractura frágil.

2. Mejoran la resistencia a la tracción, flexión y corte, con lo que generan un aumento de la capacidad portante.
3. Proporcionan una capacidad adicional de resistencia, debido a la redistribución del momento plástico en caso de solicitaciones localizadas.
4. Contribuyen con un esfuerzo uniforme en tres direcciones. De esta manera convierten al concreto en un material isótropo y homogéneo, con igual rendimiento en todas las direcciones y mejor control de fisuras.
5. Estudios recientes han indicado que la implementación de fibras de acero junto con un armado tradicional redunda en resultados excepcionales en el comportamiento bajo cargas sísmicas.

Tabla 1 Composición química de las fibras de acero

COMPOSICIÓN (WT. %)	FIBRA DE ACERO
SiO ₂	51.1
Al ₂ O ₃	25.6
Fe ₂ O ₃	12.5
CaO	4.3
MgO	1.5
MnO	0.15
K ₂ O	0.7
Na ₂ O	0.8
P ₂ O ₅	0.9
TiO ₂	1.3
SO ₃	0.24
Otros	0.46
LOI	0.6

Fuente: Tung T. Tran, Thong M. Pham, Hong Hao, 2019 [7]

6.1.3. Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz tiene una variedad de aplicaciones en diferentes industrias como la electrónica, construcción civil y para materiales químicos y cerámicos. Muchos estudios han demostrado la eficiencia del uso de la CCA como precursor de sílice para la producción de cerámica y de cemento geopolímero con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. Además, otros estudios han demostrado que el uso de la CCA mejora la trabajabilidad de la mezcla [8].

En algunas investigaciones han empleado este residuo como material puzolánico para reemplazar parcialmente el cemento, el cual suministra la microestructura en la zona interfacial entre la pasta de cemento y el agregado en concretos de auto

compactación, generando efectos positivos en la resistencia mecánica, a edades superiores a 60 días [9].

Tabla 2 Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz

COMPONENTES (%)	
Ceniza de sílice (SiO_2)	80,3
Oxido de calcio (CaO)	0,71
Oxido de aluminio (Al_2O_3)	0,75
Otros componentes (Fe_2O_3)	0,02

Fuente: Anyi Marcela Rodríguez Sánchez, María Paula Tibabuzco Jiménez, 2018 [10]

6.1.4. Concreto geopolimero

El concreto geopolímero es una alternativa más sostenible que el concreto ordinario Portland (COP). El concreto geopolimero ha demostrado que tiene propiedades a la par e incluso superiores al COP, incluida una buena resistencia contra el ataque de sulfato y ácido, alta resistencia inicial y final a la compresión, y alta resistencia a incendios, en presencia de calor externo.

Recientemente, se ha logrado una buena resistencia a la compresión en condiciones ambientales, reduciendo la cantidad de energía necesaria durante la producción. Debido a la reducción de las emisiones de CO_2 y el implemento de materiales de desecho como cenizas volantes, el concreto geopolimero se considera una alternativa más sostenible en relación al cemento convencional [11].

6.2. MARCO CONCEPTUAL

- *Geopolimero:* Son materiales sintetizados a través de una activación alcalina de materiales precursores, que están compuestos principalmente por sílice y alúmina.
- *Ceniza de cascarilla de arroz:* La ceniza de cascarilla de arroz (CCA) es producida durante la combustión o quema de la cascarilla de arroz y forma aproximadamente el 20% del peso inicial de la cascarilla. Cuando el contenido de sílice de la CCA es mayor al 92%, es definida como cascarilla de arroz de sílice (SCA).
- *Concreto geopolimero:* Es una mezcla de materiales de fuente de silicato de aluminato, tales como cenizas volantes, escorias de alto horno o metacaolín, y solución activadora que incluye silicato de sodio, hidróxido de sodio o humo de sílice, hidróxido de sodio y agua.
- *Esfuerzo a compresión:* En el elemento actúan fuerzas en una misma dirección y en sentido contrario que intentan contraerlo.

- *Esfuerzo a flexión:* Deformación que presenta un elemento estructural en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.

6.3. ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación, se tomaron como referencia cinco artículos relacionados con la temática, los cuales serán una base para el proyecto y ayudarán a la ejecución de este.

6.3.1. Uso suplementario de la ceniza de la cáscara de arroz (CCA) como material cementoso en la industria del concreto

El principal responsable de la resistencia del concreto es el gel del cemento. El gel de cemento se obtiene mediante la combinación de hidrato de silicato de calcio (CSH) con el hidrato de aluminato de calcio (CAH). El concreto convencional está conformado por silicato tricálcico (C3S) y silicato di cálcico (C2S), y cuando estos componentes entran en contacto con el agua, se forma el gel de CSH junto a hidróxido de calcio (CH). Cuando un material puzolánico como la ceniza de cascarilla de arroz (SiO_2) se usa con el cemento, y reacciona con el CH, produce CSH en presencia del agua.

La reacción de álcali-sílice (ASR) es una de las causas más comunes de problemas de concreto. ASR es básicamente una reacción química entre el hidróxido alcalino y la sílice que se produce en presencia de humedad. Se forma un gel de ASR y causa la expansión volumétrica del concreto que da como resultado el agrietamiento y desprendimiento de estructuras de concreto cuando se produce una reacción puzolánica, el CSH absorbe todos los cationes alcalinos, reduciendo la abundancia de los componentes alcalinos en el concreto, reduciendo la expansión del ASR en el concreto.

El tamaño de la partícula también juega un papel importante en la resistencia del concreto pues tiene efectos significativos en el proceso de hidratación del concreto. Cuando la partícula de ceniza de cascarilla de arroz entra en contacto con el agua, forma una capa externa de hidratación. Mientras el núcleo se encuentre protegido por esta capa, permanecerá separado del agua disminuyendo el proceso de hidratación. Es por esto que una partícula más pequeña reaccionará más rápido con el agua, para mejorar la rapidez del proceso de hidratación.

Se utilizaron tres tipos diferentes de ceniza de cascarilla de arroz RHA (RHA-1, RHA-2 y RHA-3) en este estudio, y sus tamaños de partícula nominal fueron 600 μm , 150 μm y 44 μm , respectivamente. Las resistencias a la compresión se determinaron a los 7, 14, 21 y 28 días. Las resistencias a la flexión del concreto modificado se determinaron utilizando vigas rectangulares de 600 mm de largo con una sección transversal de 150 mm por 150 mm después de 28 días de curado.

Resultados obtenidos

Se obtuvo como resultado que para los cilindros de RHA-3 obtuvieron mejor resistencia al concreto convencional, y específicamente con el 10% de ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo un mejor comportamiento mecánico, aunque el comportamiento mecánico del 20% de ceniza de cascarilla de arroz fue más elevado que el concreto convencional, tanto para los ensayos a compresión, como para tensión y flexión. Las partículas de esta ceniza de cascarilla de arroz eran las de menor diámetro, es por esto que el proceso de homogenización fue mejor y su comportamiento mecánico fue mejor, a los cilindros de partícula mayor.

El concreto con partícula de ceniza de cascarilla de arroz de mayor diámetro mostró una mayor expansión que el concreto convencional, contribuyendo a la expansión ASR y a una mezcla no homogénea, y en cambio los cilindros de RHA-3 con menor diámetro de partícula obtuvieron una menor expansión al concreto convencional, siendo eficaces para mitigar y disminuir la expansión de ASR. Esto es debido a que la ceniza de cascarilla de arroz del RHA-3 era más fina y por consiguiente obtuvo una mayor actividad puzolánica, es decir las partículas del RHA-3 produjeron el suficiente gel de CSH para reaccionar con los cationes alcalinos reduciendo la proporción de álcali a sílice [12].

6.3.2. Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra de acero con diferentes resistencias de concreto

En este estudio, se realizaron 30 muestras de concreto en las cuales se utilizaron fibras con extremos ganchudos de tres longitudes (40, 50 y 60 mm) y dos diámetros (0,62 y 0.75 mm). Se agregaron fibras de acero con tres fracciones de volumen, 0.5%, 1.0% y 1.5%.

Conclusiones

- La resistencia a la compresión del concreto con contenido de fibra de acero de 0.5 a 1.5% aumentó ligeramente en no más de 10% para concreto de alta resistencia ($w/c=0.25$), mientras que para concreto de resistencia moderadamente alta el aumento en resistencia a la compresión alcanzó 25 %.
- El concreto con fibras de mayor relación de aspecto ha mostrado una mejora más pronunciada en la resistencia a la tracción que el concreto con una relación de aspecto más baja.
- La falla del concreto reforzado con fibra de acero se puede ver como un desprendimiento progresivo de las fibras con una lenta propagación de grietas. Esta lenta propagación de la grieta finalmente conduce a una propagación de la grieta inestable que causa la falla de la muestra [13].

6.3.3. Comportamiento mecánico del concreto con un porcentaje del 20% de CCA y porcentajes de 0,3%, 0,5% y 0,7% de fibra de acero

En este trabajo se realizó un estudio experimental a cinco muestras, una de control en la cual no se tuvieron en cuenta porcentajes de CCA ni de fibra de acero, la segunda muestra con un porcentaje del 20% de CCA como reemplazo parcial del cemento y las demás muestras con el mismo contenido de CCA pero adicionando contenidos de 0,3%, 0,5% y 0,7% de fibra de acero respectivamente.

1. Los resultados obtenidos por ensayo de asentamiento fueron los siguientes:

La incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (0,3%, 0,5% y 0,7%) generó una leve reducción de la trabajabilidad de la mezcla por lo cual se hizo necesario incrementar la dosis de aditivo súper plastificante.

En general las mezclas elaboradas presentaron una adecuada fluidez, con una buena cohesión entre sus componentes, sin exudación y segregación, cumpliendo así con las especificaciones de diseño en su estado fresco.

2. Los resultados obtenidos por ensayo a compresión fueron los siguientes:

La incorporación del 20% de CCA generó una disminución de la resistencia a la compresión en edades tempranas. Sin embargo, en edades prolongadas, se destaca un incremento significativo de esta resistencia.

Se aprecia que la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (0,3%, 0,5% y 0,7%) generó una leve disminución de la resistencia a la compresión a edades tempranas, aunque a edades mayores de 60 días se obtuvieron resistencias superiores a la mezcla de control adicionada y a la resistencia de diseño (28 MPa), para todos los volúmenes de refuerzo.



Ilustración 3 Modo de falla de concretos fibrorreforzados

Fuente: Robayo R, Matthey. P, Delvasto. S, 2013 [14]

El modo de falla a compresión de los concretos fibrorreforzados se puede apreciar en la Ilustración 3 Modo de falla de concretos fibrorreforzados, en donde se observa un modo de falla más dúctil y menos frágil que la mezcla adicionada de referencia,

debido al incremento de la tenacidad del material compuesto y de la mayor deformación transversal del concreto fibrorreforzado.

3. Los resultados obtenidos de la resistencia a flexión fueron los siguientes:

La adición del 20% de CCA generó un incremento de la resistencia a la flexión del orden del 6% y del 19% a los 28 y 60 días respectivamente. Al mismo tiempo es visibles que la incorporación de porcentajes bajos de volumen de fibras de acero en la matriz adicionada generó un leve incremento en la resistencia a la primera fisura, de manera proporcional a la cantidad de refuerzo incorporado.

4. Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad fueron los siguientes:

La incorporación de porcentajes bajos de fibras de acero, generaron un leve incremento del módulo de elasticidad de la mezcla, este aumento fue del orden del 12% para la mezcla en donde se incorporó una dosis de fibras de 0,7% (en volumen), la cual presentó un valor de módulo de elasticidad secante de 24,17 GPa en comparación al concreto adicionado de referencia que alcanzó un valor de módulo de 21,47 GPa. Este aumento puede atribuirse más al efecto de disminución del fisuramiento debido a la retracción de secado del material cementicio. Además, se apreció que la incorporación de un 20% de CCA semicristalina no genera modificaciones en el valor del módulo de la mezcla de control [14].

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

De este proyecto se concluyó que dentro de la composición química de la ceniza de cascarilla de arroz se encuentra un alto porcentaje de óxido de silicio, el cual es obtenido de un proceso de calcinación que no tiene ningún control de quema, este presenta material puzolánico lo que hace que al suplementarse junto con el cemento y el agua, estos dos reaccionen químicamente.

La CCA utilizada en la investigación, no cuenta con un adecuado proceso previo de secado y tamizado. Debido a las condiciones de granulometría y humedad que presenta el cemento, se verifica la importancia del control en el proceso de alistamiento de la ceniza, con el fin de que sus partículas asuman el mismo tamaño del cemento y puedan reaccionar químicamente.

Las muestras que fueron utilizadas del 3% y 5% por CCA, presentan resistencia menor a la muestra patrón con una diferencia del 2% y el 1% respectivamente. La trabajabilidad de la mezcla no se dificulta y los cilindros no mostraron inclusión de aire.

Del contenido de cemento de la mezcla de concreto, fue reemplazado un 10% de la ceniza de cascarilla de arroz obteniéndose que, a las edades que se ensayan usualmente las probetas de concreto (7, 14 y 28 días), la resistencia que se generó tuvo un aumento del 10% en la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla

patrón. Las muestras no presentan porosidad y permite la trabajabilidad de la misma, a diferencia de la mezcla del 15%, esta presenta una alta inclusión de aire.

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

En la prueba realizada con un contenido del 15%, se comprueba que supera más del 50% de la elasticidad del concreto convencional, esto se hace visible debido a la inclusión de aire de la probeta y del fisuramiento presente en la muestra [10].

6.3.5. Investigación analítica y experimental sobre el comportamiento a la flexión de vigas de hormigón geopolímero curado a temperatura ambiente reforzadas con fibras de acero.

La presente investigación, realizo un estudio acerca del comportamiento a la flexión que presentan las vigas de concreto geopolimero (CG) y reforzadas con fibra de acero. Este estudio demostró que este tipo de vigas presentan una mejora en la resistencia al agrietamiento, la facilidad de servicio y la ductilidad en comparación a las vigas Portland ordinarias.

La resistencia al agrietamiento mejoro debido a que se implementaron fibras con forma de gancho, además, mejoro la rigidez en la etapa posterior al agrietamiento (disminuye la desviación del servicio en un 21%), la capacidad de flexión (aumenta la carga máxima en un 40%) y la ductilidad (aumenta en un 49%), esto debido a la mejora en el endurecimiento de la tensión, el control de la contracción por secado y la tenacidad y la mejora del comportamiento posterior al pico en la zona de compresión.

El implemento de un volumen de fibras de acero del 0.75%, aumento la capacidad de carga de las vigas GP. Sin embargo, al utilizar un contenido de fibra del 1.5%, se observa una reducción de carga del 18% en comparación al de 0.75%. Dado esto, lo recomendable es utilizar un volumen alrededor del 0.75% para el concreto geopolimero y de esta manera garantizar una buena dispersión y orientación de la fibra.

Para el mismo contenido de fibra (0.75%), las vigas GC con una fibra larga de 60 mm de longitud presentaron una capacidad menor (aproximadamente 10%) que la GC reforzada con fibras más cortas (35 mm de longitud). A partir de una estimación analítica realizada, se concluye que la longitud de la fibra de 35 mm es suficiente para evitar la extracción prematura de las fibras antes de la ruptura de las fibras. Por lo tanto, si se aumenta la longitud de la fibra, no se mejorará la capacidad de las vigas GC, pero puede causar efectos adversos, como una dispersión de fibra deficiente y una formación de bolas de fibra [15].

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 3 Marco normativo

NORMA	DESCRIPCIÓN
NTC 550. CONCRETOS. ELABORACION Y CURADO DE ESPECIMENES DE CONCRETO EN OBRA.	ESTABLECE LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA ELABORACION Y CURADO DE ESPECIMENES CILINDRICOS Y PRIISMATICOS, TOMADOS DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE CONCRETO FRESCO PARA CONSTRUCCION.
NTC 673. CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO.	ESPECIFICACIONES PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO.
NTC 396. INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA. METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO.	CONTIENE RESUMEN DEL METODO, APARATOS, MUESTRA, PROCEDIMIENTO, INFORME, PRECISION Y SESGO.
NTC 174. CONCRETOS. ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO.	ESTABLECE LOS REQUISITOS DE GRADACION Y CALIDAD PARA LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS PARA USO EN CONCRETO.
NTC 5214. FIBRAS DE ACERO PARA REFUERZO DE CONCRETO.	ESTABLECE LOS REQUISITOS MÍNIMOS PARA LAS FIBRAS DE ACERO DESTINADAS AL USO EN EL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.
NTC 4227. MAQUINAS DE ENSAYO. VERIFICACION DE TENSION. COMPRESION Y FLEXION.	ESTABLECE LOS PRINCIPIOS DE VERIFICACION DE LAS MAQUINAS DE ENSAYO DE TENSION COMPRESION. CONTIENE INSPECCION GENERAL Y ENSAYO DEL SISTEMA DE MEDICION.
NTC 4025. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y LA RELACIÓN DE POISSON EN CONCRETO A COMPRESIÓN.	ESTA NORMA DETERMINA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD SECANTE (O MÓDULO DE YOUNG) Y LA RELACIÓN DE POISSON DE CILINDROS DE CONCRETO NORMALIZADOS Y NÚCLEOS DE CONCRETO, CUANDO ÉSTOS SE HALLAN BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN LONGITUDINAL.

Fuente: Autores

7. EQUIPO DE INVESTIGACIÓN Y TRAYECTORIA

El equipo de investigación de este proyecto está conformado por las estudiantes María José Leguizamón Álvarez, María Alejandra Beltrán Vanegas, y el Ingeniero Director, Emiro Andrés Lozano Pérez, pertenecientes a la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, quienes forman parte del semillero de investigación en estructuras CROSS.

El objetivo del semillero CROSS es desarrollar proyectos de investigación guiados al área de estructuras, así como también al ámbito de análisis de construcción. Los proyectos que se han realizado en este semillero han sido: cuantificación del módulo de elasticidad del concreto de 3000 psi e influencia del curado y características de los agregados en las resistencias finales; evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico, y actualmente en el semillero se están desarrollando investigaciones relacionadas con la implementación de ceniza de cascarilla de arroz y fibra de acero en el concreto convencional.

8. METODOLOGÍA

Debido a la necesidad de implementación de un nuevo tipo de concreto más amigable con el ambiente, económico y que no disminuya su resistencia, utilizando recursos ofrecidos por el Departamento del Meta, se busca dar cumplimiento a los objetivos de este proyecto los cuales pretenden dar solución a la problemática principal. Para esto, se precisa el alcance al cual está sujeto el proyecto, y junto a todos los lineamientos mencionados en este documento, se plantean las siguientes etapas a realizar:

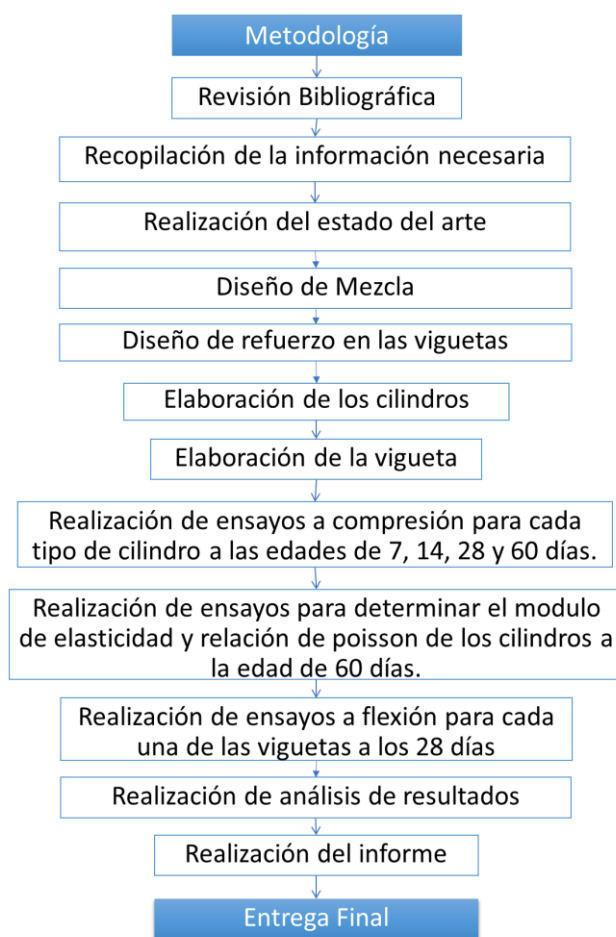


Ilustración 4 Mapa de las etapas del proyecto

Fuente: Autores

Mediante el desarrollo de estas etapas, se podrá cumplir el objetivo principal de este proyecto, cabe aclarar que cada etapa de las nombradas anteriormente tiene ciertas tareas que se necesitan realizar para su cumplimiento.

8.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

- **Revisión bibliográfica:** Es toda aquella información, artículos, investigaciones, bases científicas y matemáticas que nos servirán de guía a la hora de realizar los cálculos pertinentes que sustenten y argumenten la eficacia y solidez y validez del proyecto.
- **Recopilación de la información necesaria:** Es la búsqueda de información del lugar y sus alrededores, el público a afectar directa e indirectamente, etc.
- **Realización del estado del arte:** Es la elaboración de un informe mediante la recopilación de datos obtenidos de artículos, trabajos de grado o proyectos los cuales puedan ser guía para la realización de este proyecto.
- **Diseño de Mezcla:** Estimación de la cantidad de agua, concreto, ceniza de cascarilla de arroz, fibra de acero y agregados a utilizar al momento de elaborar los cilindros a fallar. Se realizarán diez (10) diseños de mezcla, los cuales se encuentran especificados en la siguiente tabla:

Tabla 4 Tipos de diseño de mezcla para cilindros y viguetas

Nº	Diseño de mezcla para Cilindros	Nº	Diseño de mezcla para Viguetas
1	Concreto convencional	6	Concreto convencional
2	Concreto con CCA al 20%	7	Concreto con CCA al 20%
3	Concreto con CCA al 20%, FA al 0,5%	8	Concreto con CCA al 20%, FA al 0,5%
4	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,00%	9	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,00%
5	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,5%	10	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,5%

Fuente: Autores

A partir de los anteriores diseños de mezcla, se buscará garantizar el adecuado comportamiento mecánico del concreto, el cual estará diseñado para resistir un esfuerzo de 21 Mpa en los cilindros y una carga de 50KN en las viguetas. También se buscará que el reemplazo parcial del cemento (CCA y fibras de acero) mejore y/o aumente las propiedades mecánicas del concreto.

- **Diseño de refuerzo en las viguetas:** Obtención de la cantidad de barras de acero requerido para soportar una fuerza puntual estimada de 50KN, la cual se le aplicará a las viguetas al momento de realizar los respectivos ensayos a flexión.
- **Elaboración de los cilindros de concreto:** Consta de la elaboración de treinta (30) cilindros de concreto que posean porcentajes del 20 % de ceniza de cascarilla de arroz y 0,5%, 1% y 1,5 % de fibra de acero respectivamente; además se elaborarán cuatro (4) cilindros tipo Portland, cuatro (4) que contengan solo un 20% de ceniza de cascarilla de arroz según las medidas predispuestas por los moldes del laboratorio.

Tabla 5 Especificaciones de los cilindros

	7 Días	14 Días	28 Días	60 Días	Total por Cilindro
Cilindros Portland Tipo 1	3	3	3	1	10
Cilindro CCA 20%	3	3	3	1	10
Cilindro CF 0,5%	3	3	3	1	10
Cilindro CF 1%	3	3	3	1	10
Cilindro CF1,5%	3	3	3	1	10
Total General					50

Fuente: Autores

Donde CCA se refiere a ceniza de cascarilla de arroz y CF a ceniza de cascarilla de arroz con fibra de acero.

- Elaboración de la vigueta: Consta de la elaboración de seis (6) viguetas de concreto que posean porcentajes del 20 % de ceniza de cascarilla de arroz y 0,5%, 1% y 1,5 % de fibra de acero respectivamente; además se elaboraran dos (2) viguetas tipo Portland y dos (2) viguetas que contengan solo un 20% de ceniza de cascarilla de arroz según las medidas predispuestas por los moldes del laboratorio.

Tabla 6 Especificaciones de las viguetas

	28 Días
Viguetas Portland Tipo 1	2
Viguetas CCA 20%	2
Viguetas CCA 20%, FA 0,5%	2
Viguetas CCA 20%, FA 1%	2
Viguetas CCA 20%, FA 1,5%	2
Total	10

Fuente: Autores

- Realización de ensayos a compresión para cada tipo de cilindro a las edades de 7, 14, 28 y 60 días: Mediante la máquina electro-hidráulica digital para ensayos de compresión, se busca hallar la resistencia a compresión de los cilindros, fallándolos.
- Realización de ensayos para determinar el módulo de elasticidad y relación de poisson de los cilindros a la edad de 60 días:
- Realización de ensayos a flexión para cada tipo de vigueta a los 28 días: Mediante la maquinaria digital para ensayos a flexión, se busca hallar la resistencia de las viguetas.
- Realización de análisis de resultados: Analizar cada uno de los datos adquiridos en los respectivos ensayos a flexión y compresión. Realizar un análisis de costos.

- Realización del informe: Elaboración del informe final, recopilando toda la información obtenida a lo largo de la planeación y ejecución del proyecto, junto a los resultados y análisis realizados y las conclusiones a las que se llegó al realizar el proyecto.

9. DISEÑO DE MEZCLA

9.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

- Agregado fino y grueso

El agregado fino y grueso utilizado para la elaboración de los diferentes cilindros de concreto fue adquirido en *ferretería la 15 de la ciudad de Villavicencio*. Se realizó la caracterización de este material por medio de los siguientes ensayos de laboratorio: método para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos (NTC 77), método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino (NTC 237) y método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados (NTC 1776). A partir de lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7 Granulometría del agregado fino

Granulometría de agregado Fino				
Tamiz (#)	Peso (gr)	% Retenido	%Acumulado	% Pasa
4	41.18	7.096	7.096	92.904
10	142.66	24.583	31.679	68.321
30	181.23	31.229	62.907	37.093
40	41.48	7.148	70.055	29.945
60	64.56	11.125	81.180	18.820
100	70.78	12.197	93.376	6.624
200	26.95	4.644	98.020	1.980
Fondo	11.49	1.980	100.000	0.000
Total Peso (gr)		580.33		

Fuente: Autores

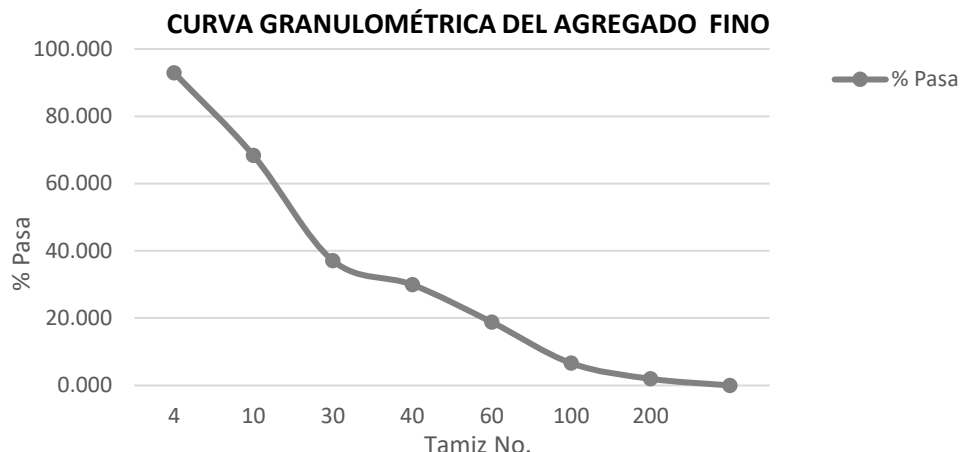


Ilustración 4 Curva Granulométrica del agregado fino

Fuente: Autores

Tabla 8 Porcentaje de absorción del agregado fino

A= Masa en el aire de la muestra de ensayo secado al horno (gr)	19.5
B= Masa del picnómetro con agua (gr)	43.6
C= Masa del picnómetro con la muestra y agua (gr)	52.3
S= Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (gr)	20
% Absorción	2.56
Densidad Aparente (gr/cm3)	1.765
Densidad Nominal (gr/cm3)	1.801
Peso específico (Kg/m3)	1801.042

Fuente: Autores

Tabla 9 Contenido de humedad del agregado fino

S=Masa de la muestra seca (gr)	580.4
H=Masa de la muestra (gr)	643.9
W=Contenido de humedad (%)	10.941

Fuente: Autores

Tabla 10 Granulometría del agregado grueso

Granulometría de agregado Grueso				
Tamiz (in)	Peso (gr)	% Retenido	%Acumulado	% Pasa
1 1/2	0	0.000	0.000	100.000
1	0	0.000	0.000	100.000
3/4	0.22	22.000	22.000	78.000
1/2	0.78	78.000	100.000	0.000
Total peso (gr)	1.000			

Fuente: Autores

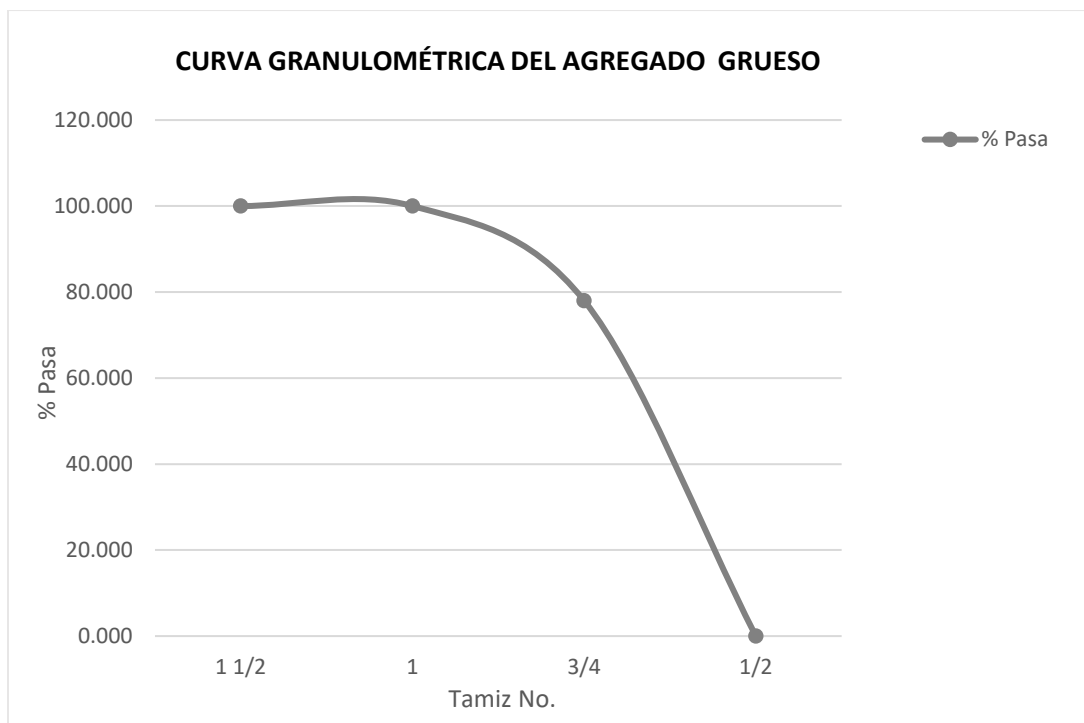


Ilustración 5 Curva granulométrica del agregado grueso

Fuente: Autores

- Fibras de acero

Las fibras de acero implementadas en el diseño de mezcla fueron de referencia Sika Fiber CHO 65/35 con extremos en forma de gancho utilizadas para reforzamiento de concretos convencionales. Según la norma ASTM A 820, este tipo de fibras se clasifican como trefilados en frío (Tipo I). Las propiedades mecánicas y características físicas de la fibra se presentan a continuación:

Tabla 11 Propiedades mecánicas y características físicas de la fibra de acero

Longitud (mm)	35
Diámetro (mm)	0.54
Relación longitud/diámetro	65
Resistencia a tracción (MPa)	1150
Módulo de elasticidad (GPa)	200
Elongación de ruptura	4 % máx.

Fuente: Robayo R, Matthey. P, Delvasto. S, 2013 [14]

- Cemento y cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz y el cemento fueron los mismos que se utilizaron en el proyecto de investigación denominado: “Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico” [10], del

cual los autores son pertenecientes al semillero CROSS, por lo que las propiedades granulométricas de este material son las iguales.

Tabla 12 Curva granulométrica del cemento y la CCA

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

Fuente: Anyi Marcela Rodriguez, María Paula Tibabuzo [10]

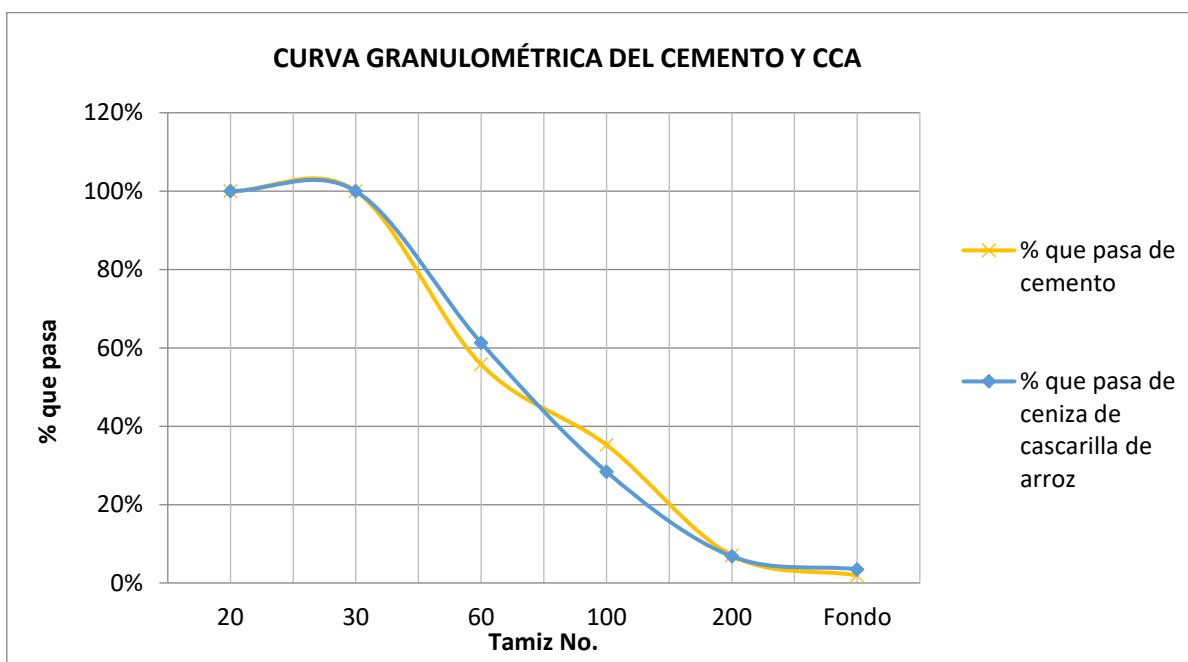


Ilustración 6 Curva granulométrica del cemento y la CCA
Fuente: Anyi Marcela Rodriguez, María Paula Tibabuzo [10]

9.2. DISEÑO DE MEZCLA OBTENIDO

A partir de las propiedades obtenidas de los materiales, se realizó el siguiente diseño de mezcla:

Tabla 13 Volumen de concreto para los cilindros

VOLUMEN DE CONCRETO	
Cilindros (m3) con desperdicio (35%)	
0.0716	Concreto convencional
0.0716	Concreto con CCA al 20%
0.0716	Concreto con CCA al 20%, FA al 0,5%
0.0716	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,00%
0.0716	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,5%
0.3578	Volumen total

Fuente: Autores

Tabla 14 Volumen de concreto para las viguetas

VOLUMEN DE CONCRETO	
Viguetas (m3) con desperdicio (20%)	
0.029025	Concreto convencional
0.029025	Concreto con CCA al 20%
0.029025	Concreto con CCA al 20%, FA al 0,5%
0.029025	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,00%
0.029025	Concreto con CCA al 20%, FA al 1,5%
0.145125	Volumen total

Fuente: Autores

Tabla 15 Diseño de mezcla de los cilindros convencionales

CONVENCIONAL		
Agua	12.000	Kg
Cemento	26.700	Kg
Agregado fino	54.000	Kg
Agregado grueso	80.000	Kg

Fuente: Autores

Tabla 16 Diseño de mezcla de los cilindros con 20% de CCA

20% CCA		
Agua	12.000	Kg
Cemento	21.360	Kg
Agregado fino	54.000	Kg
Agregado grueso	80.000	Kg
CCA	5.340	Kg

Fuente: Autores

Tabla 17 Diseño de mezcla de cilindros con 20% de CCA y 0,5% de fibra de acero

20% CCA Y 0,5% FIBRA DE ACERO		
Agua	12.000	Kg
Cemento	21.360	Kg
Agregado fino	54.000	Kg
Agregado grueso	80.000	Kg
CCA	5.340	Kg
Fibra de acero	0.134	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 18 Diseño de mezcla de cilindros con 20% de CCA y 1% de fibra de acero

20% CCA Y 1% DE FIBRA DE ACERO		
Agua	12.000	Kg
Cemento	21.360	Kg
Agregado fino	54.000	Kg
Agregado grueso	80.000	Kg
CCA	5.340	Kg
Fibra de acero	0.267	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 19 Diseño de mezcla de cilindros con 20% de CCA y 1,5% de fibra de acero

20% CCA Y 1,5% DE FIBRA DE ACERO		
Agua	12.000	Kg
Cemento	21.360	Kg
Agregado fino	54.000	Kg
Agregado grueso	80.000	Kg
CCA	6.000	Kg
Fibra de acero	0.401	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 20 Diseño de mezcla de viguetas convencionales

CONVENCIONAL		
Agua	5.500	Kg
Cemento	10.800	Kg
Agregado fino	21.700	Kg
Agregado grueso	32.500	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 21 diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA

CON 20% CCA		
Agua	5.500	Kg
Cemento	8.640	Kg
Agregado fino	21.700	Kg
Agregado grueso	32.500	Kg
CCA	2.160	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 22 Diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA y 0,5% de fibra de acero

20% CCA Y 0,5% DE FIBRA DE ACERO		
Agua	5.500	Kg
Cemento	8.640	Kg
Agregado fino	21.700	Kg
Agregado grueso	32.500	Kg
CCA	2.160	Kg
Fibra de acero	0.054	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 23 Diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA y 1% de fibra de acero

20% CCA Y 1% DE FIBRA DE ACERO		
Agua	5.500	Kg
Cemento	8.640	Kg
Agregado fino	21.700	Kg
Agregado grueso	32.500	Kg
CCA	2.160	Kg
Fibra de acero	0.108	Kg
Fuente: Autores		

Tabla 24 Diseño de mezcla de viguetas con 20% de CCA y 1,5% de fibra de acero

20% CCA Y 1,5% DE FIBRA DE ACERO		
Agua	5.500	Kg
Cemento	8.640	Kg
Agregado fino	21.700	Kg
Agregado grueso	32.500	Kg
CCA	2.160	Kg
Fibra de acero	0.162	Kg
Fuente: Autores		

10. DISEÑO REFORZADO DE LAS VIGUETAS

El diseño reforzado de las viguetas se realizó a partir de las especificaciones dadas en el Título C capítulo 10 de la Norma sismoresistente (NSR-10), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 25 Datos iniciales para el cálculo de reforzamiento de las viguetas

DISEÑO DE VIGUETAS		
Fy	420	Mpa
F'c	24	Mpa
Longitud	0.545	m
Base	0.15	m
Altura	0.15	m
d	0.1	m
P	100	KN
Mu	6.8125	KN*m
ϕ	0.9	

Fuente: Autores

Tabla 26 Cuantía requerida para el refuerzo de las viguetas

CUANTÍA REQUERIDA	
M	20.5882
K	4541.6667
P	0.0140

Fuente: Autores

Tabla 27 Acero requerido para viguetas convencionales

ACERO REQUERIDO		
As	0.00021	m2
As	2.1069	cm2
Tipo de barras	#4	
No. Barras	2	un

Fuente: Autores

Tabla 28 Acero requerido para viguetas con porcentajes de 0,5%,1% y 1,5% de fibra de acero

ACERO REQUERIDO		
0.50%	1%	1.50%
2.0963 cm2	2.0858 cm2	2.0753 cm2

Fuente: Autores

11. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS DE CONCRETO

Para la realización de los cilindros con mezcla de concreto convencional, con 20% de CCA y con porcentajes de fibra de acero de 0,5%, 1% y 1,5 se realizó el siguiente procedimiento:

- Para la realización de la mezcla se procedió a pesar cada uno de los materiales según las especificadas en el diseño de mezcla.



Ilustración 7 Preparación de material para la realización de la mezcla
Fuente: Autores

- Luego de la preparación de los materiales, se procedió a mezclarlos en la hormigonera.



Ilustración 8 Proceso de mezclado en la hormigonera
Fuente: Autores

- Después de mezclados los materiales, se tomaron las camisas previamente engrasadas y ajustadas de los cilindros para rellenarlas y así formar los cilindros. Tal como lo indica la Norma técnica Colombiana (NTC 550), se realizó el llenado por capas, cada una de estas con sus respectivos golpes.



Ilustración 9 Camisas antes y después del llenado

Fuente: Autores

12. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE LA ELABORACIÓN DE LAS VIGUETAS EN CONCRETO

Para la realización de las viguetas con mezcla de concreto convencional, con 20% de CCA y con porcentajes de fibra de acero de 0,5%, 1% y 1,5 se realizó el siguiente procedimiento:

- Para la realización de la mezcla se realizó el mismo procedimiento para la preparación del material y el mezclado que en los cilindros.
- Luego de realizar la respectiva mezcla para cada una de las viguetas, se procedió a colocar el acero de refuerzo, en este caso, dos barras número 4.
- Después de colocar el refuerzo a cada una de las viguetas, se procede a realizar el llenado de las camisas previamente engrasadas y ajustadas, teniendo en cuenta el método de compactación estipulado en la Norma técnica colombiana (NTC 550).

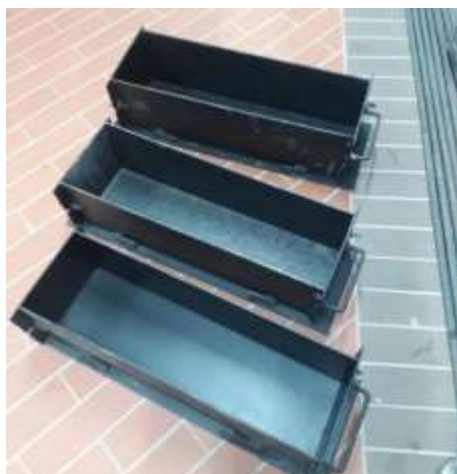


Ilustración 10 Camisas antes del relleno

Fuente: Autores

13. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

13.1. ENSAYO A COMPRESIÓN DE LAS DIFERENTES MUESTRAS DE CONCRETO

Para este ensayo se sometieron a compresión las diferentes muestras de concreto convencional, con 20% de CCA, 20% de CCA y 0.5% de fibra de acero, 20% de CCA y 1% de fibra de acero, 20% de CCA y 1,5% de fibra de acero, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 29 Resistencia a compresión de cada una de las muestras (Mpa)

Descripción de la muestra	7 días	14 días	28 días	60 días
Diseño de mezcla convencional	11.7	14.62	21.83	24.6
Diseño de mezcla con 20% de CCA	8.64	11.17	17.27	25.67
Diseño de mezcla con 20% de CCA y 0.5% de FA	6.53	8.47	18.56	25.798
Diseño de mezcla con 20% de CCA y 1% de FA	6	8.43	15.85	25.926
Diseño de mezcla con 20% de CCA Y 1.5% FA	3.81	7.61	14.67	25.63

Fuente: Autores

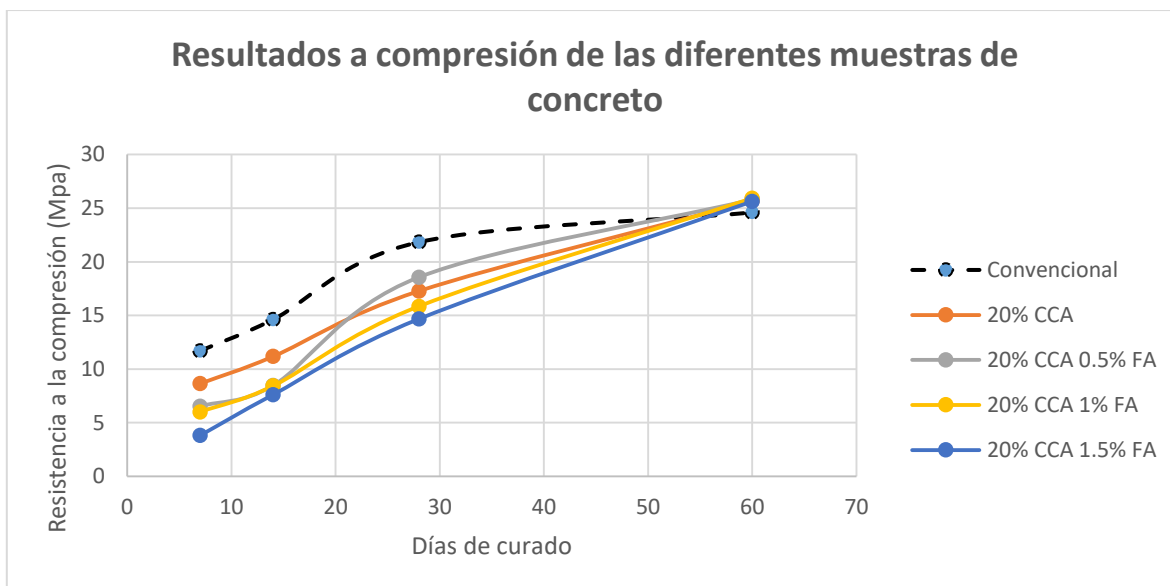


Ilustración 11 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto

Fuente: Autores

La resistencia a la compresión de los 50 cilindros se determinó mediante el proceso establecido en la norma NTC 673.

De acuerdo con los resultados suministrados en la tabla 27 del presente documento, se evidencia que los cilindros con un suplemento de 20% ceniza de cascarilla de arroz con y sin reforzamiento de fibra de acero de 0.5%, 1% y 1.5% a las edades de 7, 14 y 28 días tuvieron una disminución en su resistencia a la compresión respecto a los cilindros de concreto convencional, pero en la edad de 60 días se pudo observar que estos mismos cilindros superaban la resistencia a compresión de los cilindros de concreto convencional.

Los resultados obtenidos por cada edad fueron los siguientes:

Tabla 30 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 7 días de curado

Resultados a compresión a los 7 días de curado (Mpa)	
Convencional	11.701
CCA 20%	8.638
FA 0.5%-20% CCA	6.526
FA 1%-20% CCA	6.004
FA 1.5%-20% CCA	3.810

Fuente: Autores

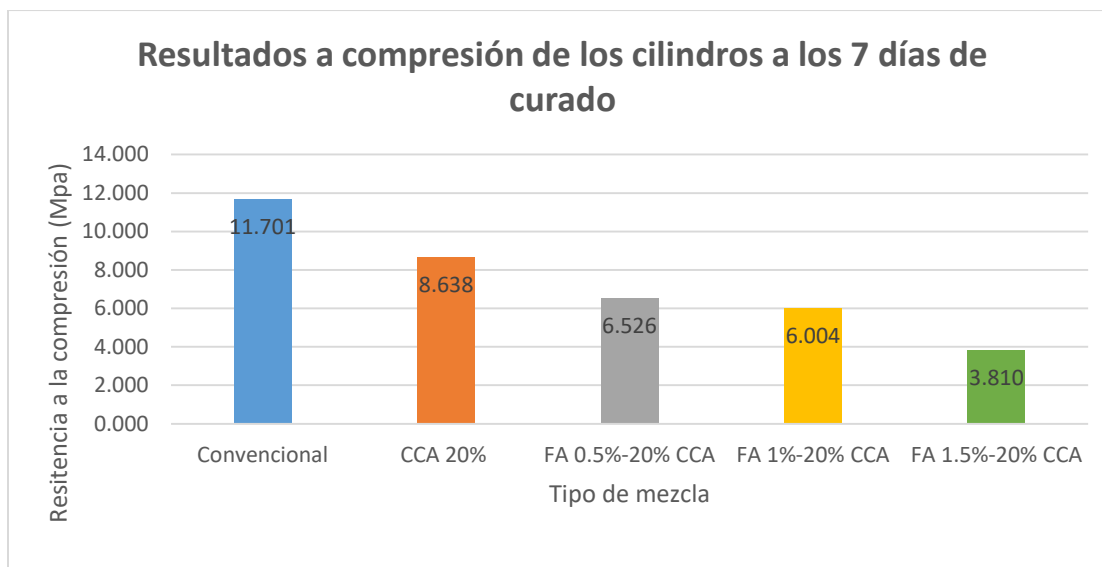


Ilustración 12 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 7 días de curado

Fuente: Autores

En los primeros 7 días, el concreto convencional obtuvo la mayor resistencia de los 5 especímenes analizados (Con 11.7Mpa), y el concreto geopolímero de ceniza de cascarilla de arroz al 20% y reforzado con 1.5% de fibra de acero obtuvo la menor resistencia (3.81 Mpa). La disminución gradual de la resistencia de los cilindros que contenían fibra de acero pudo ocasionarse debido a una reacción química entre los componentes de la cascarilla de arroz y la fibra de acero

Tabla 31 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 14 días de curado

Resultados a compresión a los 14 días de curado (Mpa)	
Convencional	14.619
CCA 20%	11.167
FA 0.5%-20% CCA	8.469
FA 1%-20% CCA	8.429
FA 1.5%-20% CCA	7.613

Fuente: Autores

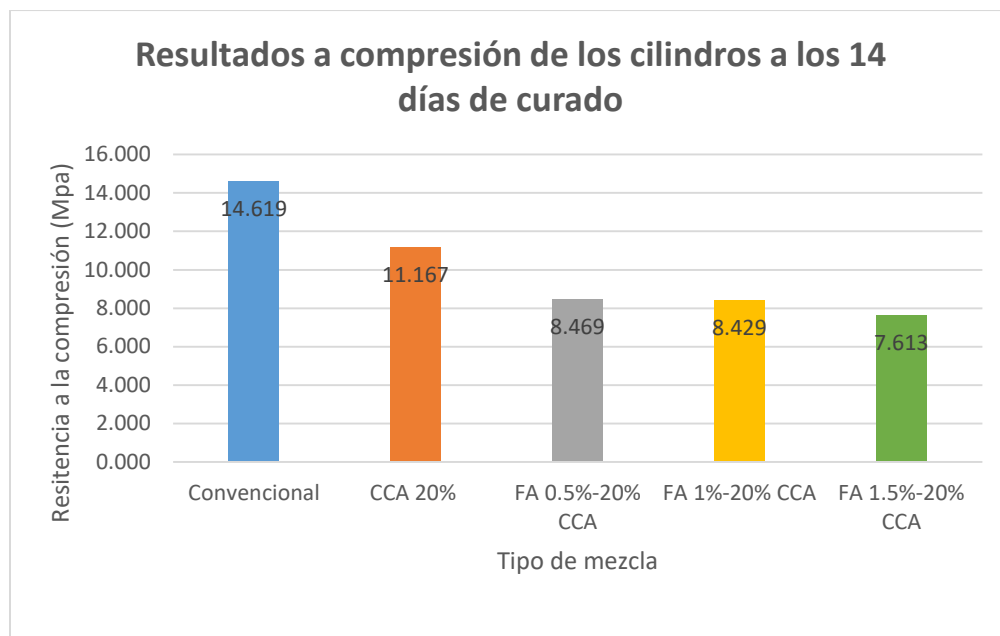


Ilustración 13 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 14 días de curado

Fuente: Autores

A los 14 días se observó que los cilindros a base de ceniza de cascarilla de arroz y con porcentajes de fibra de acero de 0.5%, 1% y 1.5% obtuvieron un porcentaje de 57.93%, 57.66%, y 52.08% respecto a la resistencia adquirida por los cilindros convencionales.

Los cilindros a base de cascarilla de arroz y reforzados con porcentajes de fibra de acero de 0.5%, 1%, y 1.5% aumentaron solamente 29.77%, 40.39% y 99.82% respectivamente a comparación de las resistencias obtenidas a los 7 días.

Tabla 32 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 28 días de curado

Resultados a compresión a los 28 días de curado (Mpa)	
Convencional	21.830
CCA 20%	17.270
FA 0.5%-20% CCA	18.560
FA 1%-20% CCA	15.850
FA 1.5%-20% CCA	14.670

Fuente: Autores

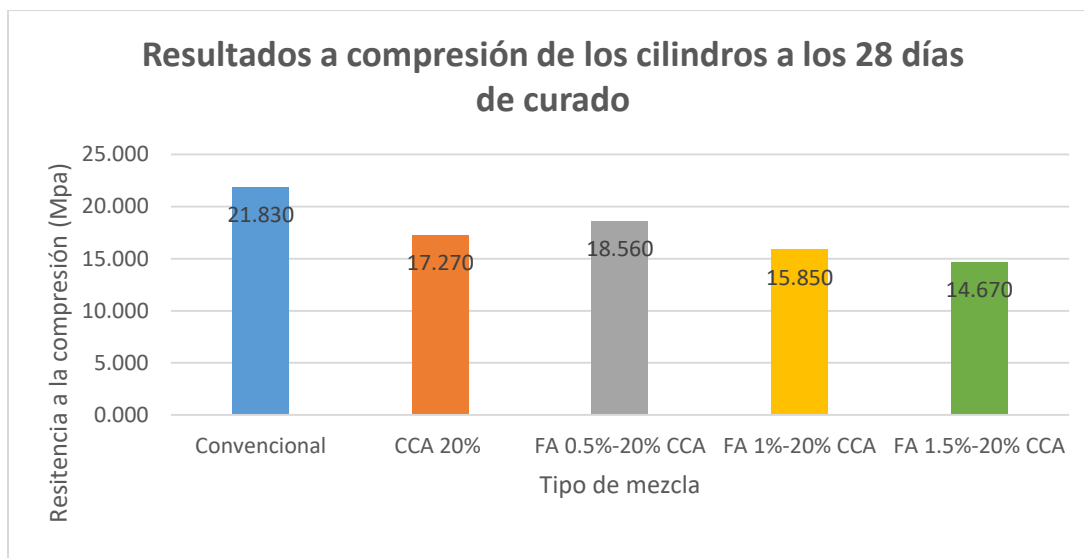


Ilustración 14 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 28 días de curado

Fuente: Autores

A la edad de 28 días, los cilindros convencionales obtuvieron una resistencia mayor a los demás, pero en esta edad ya se evidenció que la resistencia de los cilindros reforzados con 0.5% de fibra de acero fue mayor en comparación a la resistencia de los cilindros con solo 20% ceniza de cascarilla de arroz, el cual en las edades de 7 y 14 días obtenía resistencias mayores a todos los cilindros reforzados con fibra de acero.

En esta edad se pudo evidenciar como la resistencia de los cilindros reforzados con fibra de acero adquirieron el doble de la resistencia que obtuvieron a la edad de 14 días. También se evidencia que aunque el cilindro convencional obtuvo la mayor resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días, su resistencia a la compresión comienza a volverse constante respecto al tiempo.

Tabla 33 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 60 días de curado

Resultados a compresión a los 60 días de curado (Mpa)	
Convencional	24.6
CCA 20%	25.67
FA 0.5%-20% CCA	25.798
FA 1%-20% CCA	25.926
FA 1.5%-20% CCA	25.630

Fuente: Autores

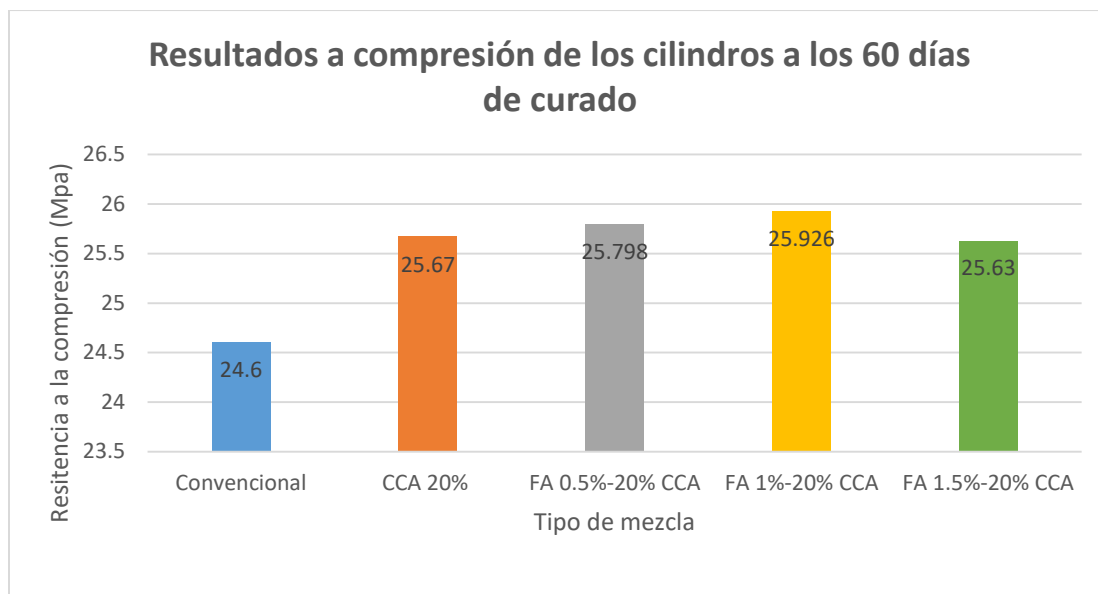


Ilustración 15 Resultados a compresión de las diferentes muestras de concreto a los 60 días de curado

Fuente: Autores

A los 60 días de edad, los cilindros reforzados con fibra de acero aumentaron su resistencia a la compresión por encima de los cilindros convencionales.

Los cilindros reforzados con 0.5% y 1% de fibra de acero aumentaron en un porcentaje no significativo la resistencia a la compresión. Los cilindros reforzados con 1.5% de fibra de acero no superaron la resistencia a la compresión de los cilindros que solo contenían 20% de ceniza de cascarilla de arroz, puesto que entre mayor es el porcentaje de fibra de acero, disminuye la resistencia a la compresión, esto se debe a su alto porcentaje de óxido de aluminato el cual en las fibras de acero se encuentra en alrededor de un 25% [7] en comparación al cemento en el cual se encuentra entre un 4% a 7% y a la cascarilla en el cual se encuentra menor al 1% [10]. La presencia de un alto contenido de C3A conlleva a un cilindro más poroso que por ende va perdiendo resistencia a la compresión, esto se debe a que en el proceso de la hidratación el componente C3A está fraguando primero que los otros componentes principales que son C2S y el C3S, por ende su fraguado se acelera, situación que se presentó al momento de elaborar la mezcla de los cilindros con fibra de acero, puesto que a medida que aumentaba el porcentaje de fibra de acero, la trabajabilidad de la mezcla era más difícil, era necesario realizar el proceso de llenado de las camisas rápidamente.

El pequeño aumento de la resistencia a la compresión debido a los diferentes porcentajes de fibra de acero se debió a que, aunque estas no disminuyen la presencia de fisuras que se presentan en el concreto [15] en su proceso de hidratación lo que hacen al estar distribuidas aleatoriamente es adherirse y generar un efecto de confinamiento que se evidencia en el tipo de falla de los cilindros con

adición de fibra de acero, mejorando el comportamiento de la matriz compuesta, logrando de esta forma distribuir mejor los esfuerzos.

La ceniza de cascarilla de arroz, contribuyo al pequeño aumento en la resistencia a compresión ya que el hecho de que se agregue mayor contenido puzolanico a la mezcla contribuye a una mayor producción de gel de cemento (C-S-H) el cual disminuye el tamaño de los poros y aumenta los componentes principales que aumenta la resistencia a la compresión (C3S y C2S).

Tabla 34 Muestras de concreto después de ser sometidas al ensayo a Compresión (cilindros)

Características	Muestras
• Mezcla convencional • Edad de curado: 60 días	
• Mezcla con 20% de CCA • Edad de curado: 60 días	
• Mezcla con 20% de CCA y 0.5% FA • Edad de curado: 60 días	

Características	Muestras
• Mezcla con 20% de CCA y 1.0% FA • Edad de curado: 60 días	
• Mezcla con 20% de CCA y 1.5% FA • Edad de curado: 60 días	

Fuente: Autores

Las fallas presentadas en los cilindros con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzados con fibra de acero demuestran un comportamiento dúctil de los esfuerzos debido a que la fibra de acero funciona como un puente entre los agregados, impidiendo el crecimiento de las grietas, y evitando una falla frágil, en cambio los cilindros convencionales presentaron fallas frágiles.

En estas imágenes se puede apreciar como los cilindros con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzados con fibra de acero al ser sometidos a fuerzas mayores que los cilindros convencionales, su deformación es menor y su falla no es “súbita”.

13.2. MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON

El módulo de elasticidad fue obtenido según las especificaciones presentadas en el ASTM C469; y fue calculado a partir de la relación entre el esfuerzo ($d\sigma$) aplicado sobre la deformación unitaria ($d\delta$).

$$E = \frac{d\sigma}{d\delta} \quad (1)$$

Tabla 35 Módulos de elasticidad de las diferentes muestras de concreto

MÓDULOS DE ELASTICIDAD (Mpa)	
Mezcla convencional	21812.24
Mezcla 20% CCA	22956.07
Mezcla 20% CCA-0.5% FA	23660.17
Mezcla 20% CCA-1% FA	23717.39
Mezcla 20% CCA-1.5% FA	23991.95

Fuente: Autores

Tabla 36 Relación de Poisson de las diferentes muestras de concreto

Tipo de mezcla	Deformación vertical	Deformación horizontal	Eh/Ev
Mezcla convencional	0.00517	0.001	0.193
Mezcla 20% CCA	0.00520	0.001	0.192
Mezcla 20% CCA-0.5% FA	0.00520	0.001	0.192
Mezcla 20% CCA-1% FA	0.00523	0.001	0.191
Mezcla 20% CCA-1.5% FA	0.00529	0.001	0.189

Fuente: Autores

El módulo de elasticidad y la relación de poisson corresponden a cilindros con una edad de 60 días. En las muestras con contenidos de fibra de acero se observa una disminución en la relación de poisson debido a que estas buscan confinar la matriz de concreto, rigidizándola, y generando que la relación de poisson disminuya.

El módulo de elasticidad de los cilindros con fibras de acero aumenta, esto quiere decir que este tipo de concreto puede alcanzar altos esfuerzos sin salir de su zona elástica, teniendo la capacidad de volver a su estado normal, a diferencia del concreto convencional el cual obtuvo un módulo de elasticidad inferior a todas las demás muestras.

13.3. MODULO DE ROTURA DE LAS VIGUETAS

Tabla 37 Módulo de rotura obtenido en el ensayo a flexión de las viguetas.

ESPECIFICACIÓN VIGUETA	MÓDULO DE ROTURA (Mpa)
Mezcla con 20% CCA	5.30
Mezcla con 20% CCA y 0,5% FA	5.44
Mezcla con 20% CCA y 1,0% FA	5.51
Mezcla con 20% CCA y 1,5% FA	5.45
Mezcla Convencional	5.14

Fuente: Autores

El ensayo a flexión realizado fue en cuatro puntos con una configuración de L/3 esto quiere decir que la vigueta se encontraba apoyada en dos puntos y la carga la transmitían dos puntos en la parte superior en la zona central de la vigueta la cual se encontraba sometida a una tensión uniforme obtenido un momento flector constante en esta misma zona.

Se reforzaron las viguetas con el objetivo de comparar su comportamiento a la flexión con refuerzo. En el título 10 del presente documento se evidencia el diseño del reforzamiento de las viguetas las cuales se diseñaron para resistir una fuerza puntual de 50Kn cada una.

De los resultados obtenidos en el ensayo a flexión de los diferentes tipos de viguetas, se pudo evidenciar que el módulo de rotura aumenta en las viguetas reforzadas con fibra de acero, el tipo de falla que presentaron estas viguetas reforzadas, fue un fallo a flexión, se pudo observar en la vigueta que contenía 20% de ceniza de cascarilla de cascarilla de arroz y estaba reforzada con 1% de fibra de acero rompimiento de algunas fibras.

Tabla 38 Muestras de concreto después de ser sometidas al ensayo a Flexión (Viguetas)

Características	Muestras
• Mezcla convencional • Edad de curado: 28 días • Carga promedio soportada: 52.74 KN	
• Mezcla con 20% de CCA • Edad de curado: 28 días • Carga promedio soportada: 50.83 KN	
• Mezcla con 20% de CCA y 0.5% FA • Edad de curado: 28 días • Carga promedio soportada: 56.76 KN	
• Mezcla con 20% de CCA y 1.0% FA • Edad de curado: 28 días • Carga promedio soportada: 59.62 KN	

Características	Muestras
- Mezcla con 20% de CCA y 1.5% FA - Edad de curado: 28 días - Carga promedio soportada: 56.95 KN	

Fuente: Autores

Las viguetas con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzadas con fibra de acero presentaron menor formación de grietas fallando algunas por cortante y otras por flexión, evidenciándose la correcta adherencia de las fibras para impedir el aumento del tamaño de las grietas, distribuyendo bien los esfuerzos, e impidiendo el arrancamiento de la matriz de concreto.

Las viguetas convencionales en cambio fallando por cortante presento una grieta de gran tamaño y apertura, teniendo una resistencia menor a los otros especímenes analizados.

13.4. ANÁLISIS DE COSTOS

Los costos se realizaron a 1m³ de concreto, utilizando el mismo diseño de mezcla que se realizó para los cilindros, y los costos reales por cada kg de material. Se evidencia en la Tabla 39, que la mezcla con 20% de CCA y 0.5% de FA sale más económico en un 3,46% respecto al concreto convencional. Por el contrario, las mezclas adicionadas con 1% y 1.5% aumentan el costo en un 0.115% y 3.52% respectivamente.

Tabla 39 Costo de los materiales para la elaboración de 1m³ de concreto

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	COSTOS MATERIALES (COP)				COSTO TOTAL
	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	CEMENTO	FIBRA DE ACERO	
Mezcla convencional	190060	135900	179040	0	505000
Mezcla con 20% de CCA	190060	135900	143520	0	469480
Mezcla con 20% de CCA y 0.5% de FA	190060	135900	143520	18050	487530
Mezcla con 20% de CCA y 1% de FA	190060	135900	143520	36100	505580
Mezcla con 20% de CCA Y 1.5% FA	190060	135900	143520	53295	522775

Fuente: Autores

14. DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS FINALES

A partir de los objetivos propuestos se plantearon los siguientes resultados:

Tabla 40 Resultados esperados a partir de los objetivos planteados

Resultado	Indicador	Objetivo relacionado
Obtención de porcentajes adecuados de arena, agua, cemento, ceniza de cascarilla de arroz y fibra de acero; según la relación agua/cemento a implementar.	Proporciones de los respectivos diseños de mezcla del concreto convencional y del concreto geopolímero.	Objetivo específico 1
Aumento en la resistencia a compresión de las muestras con concreto geopolímero, aumento en el módulo de elasticidad y disminución de la relación de poisson.	Obtención de resultados, a partir de ensayos a compresión realizados a cada uno de los cilindros.	Objetivo específico 2
Aumento en el módulo de rotura de cada una de las muestras con concreto geopolímero.	Obtención de resultados, a partir de ensayos a flexión realizados a cada una de las viguetas.	Objetivo específico 3
Mejora en las propiedades mecánicas del concreto geopolímero con respecto al concreto convencional.	Análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados a las muestras con concreto geopolímero y a las de concreto convencional. Análisis de costos para cada diseño de mezcla.	Objetivo específico 4

Fuente: Autores

La ejecución de este proyecto tiene como fin obtener un nuevo tipo de concreto a base de cascarilla de arroz y fibra de acero que logré reemplazar el concreto convencional, disminuyendo costos, mejorando su comportamiento mecánico, y disminuyendo los impactos ambientales generados por la construcción.

Tabla 41 Pertinencia impacto

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Social	Este concreto es apto para la construcción de viviendas de interés social.	Mayor presupuesto para construir más viviendas de interés social debido a la disminución en costos al implementar este nuevo tipo de concreto.	Mediano
Económico	Disminución de costos en materiales. Disminución en costos de reparación.	Economía en el proceso constructivo en el cual se implemente el uso de concreto.	Corto
Ambiental	Sustitución de un 20% de cemento por CCA en las mezclas de concreto	Disminución del impacto ambiental generado por las productoras de cemento y por los procesos constructivos en los cuales se implementa grandes volúmenes de concreto.	Largo

Fuente: Autores

15. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

15.1. CONCLUSIONES

El diseño de mezcla que se planteó en esta investigación fue el apropiado debido a que se realizó una caracterización física de los materiales a utilizar y gracias a esto se pudo obtener una resistencia mayor a la mínima deseada del cilindro de concreto convencional a la edad de 28 días, y partiendo de este diseño se obtuvieron el de los demás especímenes, logrando de esta forma comparar el comportamiento mecánico de cada tipo de espécimen.

De los resultados obtenidos a compresión se concluye que el uso de fibra de acero aporta un porcentaje poco significativo al incremento de la resistencia a compresión del concreto, en cambio, el uso de más de 1% de fibra de acero disminuye esta resistencia. A edades tempranas, el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero obtiene resistencias más bajas respecto al concreto convencional, pero después de 28 días de curado, se observa un aumento significativo en su resistencia a compresión.

En la relación de poisson se pudo observar que los cilindros con 20% de ceniza de cascarilla de reforzados con porcentajes de 0.5%, 1% y 1.5% de fibra de acero, tuvieron una disminución del 0.518%, 1.036% y 2.07% respectivamente, en comparación a los cilindros convencionales, lo cual es muy positivo debido a conserva un poco más las dimensiones originales de los elementos.

Respecto al módulo de elasticidad, los cilindros con 20% de ceniza de cascarilla de arroz reforzados con porcentajes de 0.5%, 1% y 1.5% de fibra de acero, tuvieron un aumento del 8.47%, 8.73% y 8.2% respectivamente, de lo cual se concluye que el módulo de elasticidad del concreto con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero es mayor y por ende presentarán menores deformaciones. Las fallas que presentan los cilindros con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzados con fibra de acero aunque son columnares no presentan una fractura frágil como lo presentan los cilindros de concreto convencional.

El módulo de rotura obtenido del concreto con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero en porcentajes de 0.5%, 1% y 1.5% fue mayor al concreto convencional un 5.84%, 7.20% y 6.03% respectivamente. Las fallas presentadas en las viguetas con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzadas con fibra de acero no fueron tan súbitas como las presentadas en el concreto convencional, esto se debe a que las fibras ubicadas aleatoriamente impidieron el crecimiento de las grietas internas, y al momento de someter la vigueta a la carga, la tensión que se generaba en la parte inferior la cual intentaba producir un efecto de arrancamiento del concreto, fue soportada por las fibras las cuales al estar adheridas al concreto intentaban evitar la fractura del material.

Comparando el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero respecto al concreto convencional, el primero arroja un comportamiento superior en todas las propiedades mecánicas analizadas en esta investigación (Resistencia a la compresión, Módulo de rotura, Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson), pero esto solamente sucede a los 60 días de edad, que es donde se visualiza el incremento potencial de sus propiedades.

Económicamente hablando respecto al costo de los materiales para la elaboración de las diferentes mezclas de concreto, solamente la mezcla con 20% de CCA y 0.5% de FA es más económica que la mezcla de concreto convencional, las mezclas con 20% de CCA y con porcentajes de 1% y 1.5% de fibra de acero son más costosas, aunque según los resultados obtenidos a compresión el cilindro que obtiene mayor resistencia a los 60 días es el que contiene 20% de CCA y 1% de FA con un aumento del 5.39% respecto al concreto convencional, lo mismo sucede con el módulo de elasticidad y el módulo de rotura los cuales aumentan un 8.73% y 7.20% respectivamente, este cilindro solamente incrementa el costo en un 0.115%, pero se obtiene un mejor comportamiento mecánico. La mezcla con 20% de CCA y 1.5% de FA no es recomendable, debido a que esta aumenta en un 3.52% el costo respecto al concreto convencional, y disminuye la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad respecto a la mezcla que contiene 20% de CCA. La mezcla más económica que disminuye en costos un 3.46% y aun así obtiene un incremento en las propiedades mecánicas respecto al concreto convencional, como se evidencia en las anteriores conclusiones y análisis de resultados.

La implementación de este tipo de concreto con 20% de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero resulta también económico cuando al momento de necesitar el refuerzo mínimo por cortante en vigas y cumpliendo con las especificaciones dadas por el ACI 318 del 2011 sección 11.4.6.1, pueda ser reemplazado el refuerzo mínimo por fibras de acero, y en muchas otras circunstancias evidenciadas en el ACI 318.

Ambientalmente es amigable, ya que con la implementación de este nuevo tipo de concreto se reemplaza el 20% de cemento por 20% de ceniza de cascarilla de arroz, de la cual anualmente se generan toneladas siendo denominadas como desechos agronómicos, sin ningún otro uso.

Socialmente contribuye a la baja producción de desechos, esto se debe a que nuestra región es una gran productora de arroz, también contribuye a la disminución de costos en construcción, y en el aumento de las propiedades mecánicas del concreto con el implemento de la fibra de acero.

15.2. TRABAJOS FUTUROS

- Los resultados y conclusiones se pueden utilizar siempre y cuando se realice la apropiada caracterización de las propiedades físicas y químicas de todos los materiales utilizados para la elaboración del concreto, además del seguimiento de las reacciones químicas ocurridas en el proceso de fraguado y curado del concreto a base de ceniza de cascarilla de arroz y reforzado con fibra de acero, para así entender y comprender mejor las propiedades físico-mecánicas de este tipo de concreto.
- Se recomienda la utilización de otras proporciones de fibra de acero entre el 1% y el 1.5% cuando se implemente también el uso de la ceniza de cascarilla de arroz para determinar el punto exacto en el que el aumento de fibra de acero comienza a afectar negativamente las propiedades mecánicas.
- Se recomienda someter la ceniza de cascarilla de arroz a un proceso de limpieza, tamizado y molienda, para disminuir su módulo de finura igualando casi al módulo de finura del cemento para lograr obtener una mayor resistencia a la compresión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DANE, «FEDEARROZ,» [En línea]. Available: http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php.
- [2] M. Angelo, «Prensa Libre Casanare,» 13 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://prensalibrecasanare.com/casanare/24091-el-departamento-que-mbs-brea-sembru-arroz-en-2016-fue-casanare.html>. [Último acceso: 11 Noviembre 2019].
- [3] K. C. A. S. K. S. S. D. B. Manpreet Singh, «A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete,» *Journal of building engineering*, vol. 13, pp. 87-95, 2017.
- [4] I. G. M. G. S. B. B. Singh, «Geopolymer concrete: A review of some recent developments,» *Construction and building materials*, vol. 85, pp. 78-90, 2015.
- [5] J. A. C. Ramírez, «Fibras de acero para reforzar concreto,» de *Construcción metálica*, 2015, pp. 66-68.
- [6] P. C. M. Salazar, «Hormigones con fibras de acero y características mecánicas,» 2010. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf. [Último acceso: 21 11 2018].
- [7] T. M. P. H. H. Tung T. Tran, «Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient,» *Engineering Structures*, vol. 200, n° 109707, p. 18, 2019.
- [8] N. S. E. M. M. T. P.R. Santos, «Mechanical and thermal behavior of kaolin/rice-husk ash matrix composites reinforced with corrugated steel fibers,» *Ceramics International*, vol. 44, pp. 14291-14296, 2018.
- [9] L. D. B. L. M. P. V. P. Martha Alix Novoa Galeano, «La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero,» 30 11 2016. [En línea]. Available: <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/13/la-ceniza-de-cascarilla-de-arroz-y-su-efecto-en-adhesivos-tipo-mortero.pdf>. [Último acceso: 21 11 2018].
- [10] M. P. T. J. Anyi Marcela Rodriguez Sánchez, «Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico,» Villavicencio-Meta, 2018.
- [11] K. C. E. (. D. R. A. P. Z. Lateef Assi, «Sustainable concrete: Building a greener future,» *Journal of Cleaner Production*, p. 32, 2018.
- [12] M. BadrulAhsanZahidHossain, «Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry,» *Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 1-9, 2018.
- [13] M. I. K. S. M. Wasim Abbass, «Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete,» *Construction and building materials*, vol. 168, pp. 556-569, 2018.
- [14] M. P. D. S. Robayo R., «Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero,» *Revista de la construcción*, vol. 12, n° 2, pp. 139-151, 2013.

- [15] T. M. H. H. Tung T. Tran, «Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with steel fibers,» *Engineering Structures*, vol. 200, p. 18, 2019.
- [16] C. O. C. F. M. A. C. C. G. T. y. A. M. V. José Castañeda Ávila, «Análisis comparativo entre el concreto hidráulico simple y el reforzado con fibra de acero,» *Ingeniería de construcción*, vol. 15, nº 1, p. 12, 2000.
- [17] M. Z. J. C. X. L. Juhong Han, «Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 577-591, 2019.
- [18] Z. H. Mohammad Badrul Ahsan, «Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry,» *Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 1-9, 2018.
- [19] S. A. R. F. N. A. A. M. A. M. S. Alireza Naji Givi, «Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete,» *Journal of American Science*, p. 9, 2010.
- [20] «Axial Compressive behavior of confined steel fiber reinforced high strength concrete,» *Construction and building materials*, vol. 230, p. 10, 2020.
- [21] C. E. C. Abelardo Prada, «LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ: UNA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO INTEGRAL,» *Orinoquia*, pp. 155-170, 2010.
- [22] «Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra de acero,» *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 14, nº 3, pp. 435-450, 2013.
- [23] L. P. G. P. G. C. L. J. Gallo Arciniegas, «Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión,» *Ciencia e Ingeniería Nогranadina*, vol. 23, nº 1, pp. 117-133, 2013.
- [24] L. O. G. s. Wilfredo Benavides Cerezo, «Fibras de acero para reforzamiento de matrices cementicias,» Universidad Nacional de Colombia, Palmira, 2012.

ANEXOS

ANEXO A

RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE LAS DIFERENTES
MUESTRAS-MODULO DE ROTURA DE LAS MUESTRAS