



EFECTO DE LA ADICIÓN DE SÍLICE OBTENIDA A PARTIR DE LA CASCARILLA  
DE ARROZ SOBRE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DEL  
FIBROCEMENTO

DIANA MARCELA GÓMEZ MEJÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MANIZALES

2022

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE SÍLICE OBTENIDA A PARTIR DE LA CASCARILLA  
DE ARROZ SOBRE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DEL  
FIBROCEMENTO

DIANA MARCELA GÓMEZ MEJÍA

Proyecto de grado para optar al título de Magister en Ingeniería

Director

Ph.D. FRANCY NELLY JIMÉNEZ GARCÍA

Co-director

M.Sc. DANIEL FERNANDO HINCAPIÉ ROJAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MANIZALES

Enero, 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos a Dios por ser el dador de toda gracia y bendecirme cada día, a mi directora de trabajo de grado Francy Nelly Jiménez García y co-director Daniel Fernando Hincapié Rojas por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados. A mi familia por confiar en mí, por los valores y el amor que me han dado, a mis amigos, compañeros de trabajo y a mi comunidad que me apoyaron e hicieron posible que este trabajo se realizara con éxito. A los colabores de la Universidad Autónoma de Manizales, Universidad Nacional y Sena Regional Risaralda – Tecnoparque nodo Pereira por la participación en cada fase de la ejecución en este trabajo

## RESUMEN

Tras la sustitución del asbesto por otros materiales, se ha encontrado que, a partir de la cascarilla de arroz, residuo agroindustrial con alto contenido de sílice, es posible mejorar las propiedades del fibrocemento. En este trabajo de investigación se planteó determinar el efecto de la adición de diferentes formas de sílice, cascarilla de arroz, ceniza y microsílíce sobre el fibrocemento, para evaluar el efecto de su inclusión en las propiedades físicas y mecánicas.

En este trabajo se extrajo ceniza y micropartículas de sílice a partir de incineración y un proceso de lixiviación ácida de la cascarilla de arroz con ácido clorhídrico en concentraciones 1M, 2M y 3M. Este proceso se realizó con el fin de eliminar impurezas como óxidos metálicos presentes en la ceniza obtenida y de esta forma obtener un material con alto grado de pureza representado principalmente en sílice.

Por medio de Fluorescencia de Rayos-X se determinó la composición química de la ceniza luego del tratamiento químico. Se utilizó análisis termogravimétrico para monitorear la eliminación de componentes orgánicos durante el proceso de incineración y determinar el contenido de residuo obtenido. Con Difracción de Rayos X se realizó el análisis estructural del fibrocemento. También se utilizó Microscopía Electrónica de Barrido para observar la morfología de la cascarilla de arroz, sílice y fibrocemento. Los resultados mostraron que la ceniza lixiviada con ácido clorhídrico contiene más de 98% de sílice y un contenido de impureza menor al 2,0%, no se evidencian cambios significativos entre las diferentes concentraciones de ácido utilizadas. Se identificaron algunas fases tales como portlandita en  $2\theta=18^\circ, 34^\circ, 47^\circ, 51^\circ$ , silicato tricálcico en  $2\theta=29^\circ, 32^\circ$ , silicato dicálcico en  $2\theta=32^\circ$ , así como los asociados a calcita  $2\theta=23^\circ, 29^\circ, 34^\circ, 39^\circ, 42^\circ, 57^\circ$ , usingita  $2\theta=24^\circ$  y tobermorita en  $2\theta=29^\circ$ . Se observó a través de la Microscopía Electrónica de Barrido estructuras correspondientes a los productos de hidratación del cemento.

Para la elaboración de las muestras de fibrocemento se utilizó cemento, carbonato de calcio, bentonita, fibra de vidrio y sílice en diferentes formas. Se tomaron concentraciones de 0% 3%, 5% y 7% para cada forma de sílice con relación al cemento y se realizaron

cuatro repeticiones para cada una. El tiempo de fraguado fue de 28 días momento en el cual se realizaron además pruebas de absorción, densidad y humedad.

Se analizaron estadísticamente los efectos del tipo de aditivo, el porcentaje de mezcla y su interacción a un valor de confianza del 95% sobre las propiedades mecánicas y fisicoquímicas. Las muestras con cascarilla de arroz presentaron mayor resistencia a la compresión mientras las de microsílíce menor. No hay diferencias significativas en los porcentajes de mezcla, sin embargo, si las hay en la interacción entre ambas variables (aditivo y % de mezcla) de tal forma que las placas con cascarilla al 3% presentan la mayor resistencia a la compresión. No se encontraron diferencias significativas en la resistencia a la flexión ni en la medida de la humedad. Las muestras con cascarilla al 3% presentaron la menor densidad, mientras las muestras con microsílíce presentan los mayores valores de densidad, lo cual establece una relación inversa de este parámetro con la resistencia a la compresión.

**Palabras claves:** Cascarilla de arroz, ceniza de cascarilla de arroz, fibrocemento, microsílíce, sílice.

## ABSTRACT

After replacing asbestos with other materials, it has been found that, from rice husks, an agro-industrial waste with a high silica content, it is possible to improve the properties of fiber cement. In this research work, it was proposed to determine the effect of ash of different forms of silica, rice husk, and microsilica on fibercement, to evaluate the effect of its inclusion on physical and mechanical properties.

In this work, ash and silica microparticles were extracted from incineration and an acid leaching process of rice husks with hydrochloric acid at 1M, 2M and 3M concentrations. This process was carried out in order to eliminate impurities such as metal oxides present in the ash obtained and, in this way, obtain a material with a high degree of purity represented mainly in silica.

By means of X-Ray Fluorescence, the chemical composition of the ash was determined after chemical treatment. Thermogravimetric analysis was used to monitor the removal of organic components during the incineration process and determine the content of residue obtained. With X-Ray Diffraction, the structural analysis of the fiber cement was carried out. Scanning Electron Microscopy was also used to observe the morphology of rice husks, silica, and fibercement. The results showed that the ash leached with hydrochloric acid contains more than 98% silica and an impurity content of less than 2,0%, with no significant changes between the different concentrations of acid used. Some phases were identified, such as portlandite at  $2\theta=18^\circ, 34^\circ, 47^\circ, 51^\circ$ , tricalcium silicate at  $2\theta=29^\circ, 32^\circ$ , dicalcium silicate at  $2\theta=32^\circ$ , as well as those associated with calcite  $2\theta=23^\circ, 29^\circ, 34^\circ, 39^\circ, 42^\circ, 57^\circ$ , usingite at  $2\theta=24^\circ$  and tobermorite at  $2\theta=29^\circ$ . Structures corresponding to cement hydration products were observed through Scanning Electron Microscopy.

For the elaboration of the fiber cement samples, cement, calcium carbonate, bentonite, fiberglass and silica in different forms were used. Concentrations of 0%, 3%, 5% and 7% were taken for each form of silica in relation to the cement and four repetitions were made for each one. The setting time was 28 days, at which time absorption, density and humidity tests were also carried out.

The effects of the type of additive, the percentage of mixture and their interaction at a confidence value of 95% on the mechanical and physicochemical properties were statistically analyzed. The samples with rice husks presented higher compressive strength while those with microsilica lower. There are no significant differences in the mixture percentages, however, there are in the interaction between both variables (additive and mixture %) in such a way that the plates with 3% scale present the highest compressive strength. No significant differences were found in flexural strength or moisture measurement. The samples with 3% scale had the lowest density, while the samples with microsilica had the highest density values, which establishes an inverse relationship between this parameter and compressive strength.

**Keywords:** Rice husk, rice husk ash, fiber cement, microsilica, silica

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	16
2	ÁREA PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	18
3	ANTECEDENTES.....	22
3.1	CASCARILLA DE ARROZ .....	22
3.2	OBTENCIÓN DE SÍLICE.....	24
3.3	FIBROCEMENTO .....	25
4	OBJETIVOS.....	33
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	33
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	33
5	JUSTIFICACIÓN.....	34
6	REFERENTE TEÓRICO.....	39
6.1	CASCARILLA DE ARROZ .....	39
6.2	CENIZA OBTENIDA DE LA CASCARILLA DE ARROZ.....	40
6.3	SÍLICE .....	41
6.4	CEMENTO PORTLAND.....	43
6.5	FIBROCEMENTO .....	45
6.6	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	45
6.6.1	Método de Fluorescencia de Rayos X .....	45
6.6.2	Microscopía Electrónica de Barrido.....	46
6.6.3	Termogravimetría .....	47
6.6.4	Difracción de Rayos X .....	48
6.7	ENSAYO DE COMPRESIÓN PARA LAS PLACAS DE FIBROCEMENTO ...	49
6.8	ENSAYO DE FLEXIÓN.....	51
6.9	MÓDULO DE ELASTICIDAD-MÓDULO DE YOUNG .....	51
6.10	DENSIDAD, ABSORCIÓN Y HUMEDAD.....	53
6.11	REFERENTE NORMATIVO .....	54
7	METODOLOGÍA .....	55
7.1	FASE 1: OBTENCIÓN DE LA SÍLICE EN DIFERENTES FORMAS.....	55
7.1.1	Cascarilla molida .....	55
7.1.2	Ceniza de cascarilla de arroz .....	56

7.1.3	Lixiviación ácida .....	56
7.1.4	Microsílice .....	57
7.2	FASE 2 ELABORACIÓN DEL FIBROCEMENTO .....	58
7.2.1	Muestras para compresión .....	60
7.2.2	Muestras para flexión .....	61
7.3	CARACTERIZACIÓN DEL FIBROCEMENTO CON LA ADICIÓN DE SÍLICE EN DIFERENTES FORMAS.....	62
7.3.1	Ensayo de compresión .....	62
7.3.2	Ensayo de flexión en tres puntos .....	64
7.3.3	Propiedades físico-químicas .....	66
7.3.4	Absorción .....	67
7.3.5	Densidad .....	68
7.4	CARACTERIZACIÓN DEL FIBROCEMENTO.....	69
7.4.1	Análisis por Fluorescencia de Rayos X (XRF) .....	69
7.4.2	Análisis Termogravimétrico (TGA) .....	69
7.4.3	Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	69
7.4.4	Análisis por Difracción de Rayos X (XRD).....	70
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
8.1	FASE 1: TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN PARA SÍLICE.....	71
8.1.1	Fluorescencia de Rayos X .....	71
8.1.2	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	73
8.2	FASE 2 CARACTERIZACIÓN DEL FIBROCEMENTO .....	75
8.2.1	Análisis Termogravimétrico .....	75
8.2.2	ANÁLISIS CON DRX.....	79
8.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES ESTABLECIDAS PARA EXPERIMENTACIÓN CON FIBROCEMENTO.....	81
8.3.1	Análisis de las pruebas mecánicas.....	81
8.3.2	Análisis absorción, densidad y humedad.....	84
8.4	ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL FIBROCEMENTO .....	90
9	CONCLUSIONES .....	95
10	RECOMENDACIONES .....	97

11	DIVULGACIÓN DE RESULTADOS .....	98
12	BIBLIOGRAFÍA.....	99
13	ANEXOS.....	107
	ANEXO A.....	107
	ANEXO B.....	110
	ANEXO C.....	113

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Fibrocemento y fibras de asbesto recuperado .....	18
Figura 2. Asbesto mineral fibroso .....	18
Figura 3. Enfermedades asociadas al contacto con el asbesto.....	19
Figura 4. Material refractario a) Silicio b) sílice .....	20
Figura 5. Uso de la cascarilla de arroz.....	35
Figura 6. Propuesta de economía circular .....	37
Figura 7. Grano de arroz.....	39
Figura 8. Cascarilla de arroz a) muestra seca b) ceniza, fuente propia .....	41
Figura 9. Humo de sílice, microsíllice.....	42
Figura 10. Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X .....	46
Figura 11. Microscopía electrónica de barrido.....	47
Figura 12. Ley de bragg.....	49
Figura 13. Ensayo de tensión a), Montaje físico, b) módulo de elasticidad, gráfica esfuerzo-deformación .....	50
Figura 14. Ensayo de flexión para tres puntas.....	51
Figura 15. Módulo de elasticidad .....	52
Figura 16. Cascarilla de arroz a) Muestra seca b) Muestra molida .....	55
Figura 17. Proceso de obtención de ceniza de cascarilla de arroz a) Secado en horno de convección forzada, b) Incineración en mufla, c) Producto final.....	56
Figura 18. Lixiviación ácida a) HCl 37% b) Preparación de solución 1M, 2M, 3M c) Tratamiento químico, d) filtrado de la sílice .....	57
Figura 19. Obtención de micropartículas a) Sílice mayor a 90 $\mu\text{m}$ b) Microsíllice .....	57
Figura 20. Diagrama de la metodología .....	58
Figura 21. Mezcla de diferentes componentes del fibrocemento a) batidora Equimaq b) Mezcla final .....	60
Figura 22. Apisonamiento en el moldeo de probetas .....	60
Figura 23. Elaboración de muestras para compresión a) Molde triple de plástico b) Mezcla en moldes c) Briquetas secas .....	61
Figura 24. Proceso de elaboración de muestras de fibrocemento) Molde para briqueta de flexión b) Mezcla en moldes c) Briquetas secas.....	61

Figura 25. Ensayo de compresión a) Momento inicial de la prueba b) Carga en la muestra c) Fractura.....	62
Figura 26. Datos máquina universal de ensayos uniaxial UNITED para compresión .....	63
Figura 27. Cálculo del esfuerzo y deformación del material usando el programa Origin....	63
Figura 28. Gráfica esfuerzo vs elongación y cálculo del módulo de elasticidad.....	64
Figura 29. Prueba de Flexión a) Momento inicial de la muestra b) Prueba de flexión tres puntas c) Fractura .....	65
Figura 30. Datos máquina universal de ensayos uniaxial UNITED para ensayo de flexión	65
Figura 31. Cálculo del esfuerzo y deformación del material usando el programa Origin....	66
Figura 32. Gráfica esfuerzo vs elongación, valor correspondiente a la rotura del material .	66
Figura 33. Prueba de humedad a) Balanza analizadora b) Muestra en plato del equipo c) Proceso de la medición.....	67
Figura 34. Prueba de absorción a) Secado en horno b) Muestra sumergidas en agua c) Peso húmedo .....	67
Figura 35. Proceso de medición de la densidad a) Principio de Arquímedes b) Peso inicial c) Peso sumergido.....	68
Figura 36. Sílice en diferentes formas a) Ceniza de cascarilla de arroz b) limpieza y obtención de sílice .....	72
Figura 37. Pureza de la ceniza con tratamiento térmico.....	72
Figura 38. Pureza de la ceniza tratada con HCl a diferente concentración molar .....	73
Figura 39. Cascarilla de arroz a) 60X b) 247x d) 419X e) 1.08 kX .....	74
Figura 40. Micrografía microsílíce a) 100um b) 5um .....	75
Figura 41. TGA para muestra control fibrocemento .....	76
Figura 42. Gráfica de TGA y DTGA diferentes adiciones.....	77
Figura 43. Difractograma para el fibrocemento con diferentes adiciones.....	80
Figura 44. Módulo de elasticidad muestras de fibrocemento.....	82
Figura 45. Módulo de rotura para las diferentes adiciones en el fibrocemento.....	83
Figura 46. Valores de Densidad .....	85
Figura 47. Valores de Absorción.....	86
Figura 48. Humedad para el fibrocemento con diferentes adiciones .....	87

Figura 49. Gráfico de interacciones entre factores experimentales para la resistencia a la compresión .....	88
Figura 50. Gráfico de interacciones entre factores experimentales a) densidad y b) absorción. ....	88
Figura 51. Micrografía para fibrocemento muestra control .....	91
Figura 52. EDAX para muestra de fibrocemento .....	92
Figura 53. Micrografía para el fibrocemento cascarilla 3% .....	93
Figura 54. EDAX para muestra de fibrocemento cascarilla 3%.....	94
Figura 55. Micrografía fibrocemento con adición de microsílíce al 5% .....	94
Figura 56. Gráficas de probabilidad normal de las medidas de la densidad. ....	111
Figura 57. Gráfico de caja y bigotes para la medición de las densidades. ....	112

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de antecedentes .....	31
Tabla 2. Proceso de formación del Clinker .....	44
Tabla 3. Formulación para el fibrocemento masa total de 300g .....	59
Tabla 4. Pérdida de masa para cada una de las zonas de los TGA.....	77
Tabla 5 contenido de la portlandita en las muestras de fibrocemento.....	78
Tabla 6 ANOVA para la respuesta resistencia a la compresión – módulo de elasticidad....	82
Tabla 7. ANOVA para la respuesta resistencia a la flexión. ....	84
Tabla 8. ANOVA para la respuesta densidad.....	86
Tabla 9. Estadísticos de la comparación de la medida de la densidad. ....	110
Tabla 10. Niveles completos de experimentos y mediciones de variables de respuesta. ...	113

## TABLA DE NOMENCLATURAS

ANOVA: Análisis de Varianza

C<sub>2</sub>S: Silicato dicálcico (Belita)

C<sub>3</sub>A: Aluminato tricálcico

C<sub>3</sub>S: Silicato tricálcico (Alita)

C<sub>4</sub>AF: Ferrito aluminato tetracálcico

CaCO<sub>3</sub>: Carbonato de calcio (Calcita)

CH: Portlandita

CSH: Gel de tobermorita

DRX: Difracción de Rayos X

MANOVA: Análisis de Varianza Multifactorial

MC: Muestra control

MCA: Muestra cascarilla de arroz MCA-3, MCA-5, MCA-7 al 3%,5% y 7%

MCE: Muestra ceniza MCE-3, MCE-5, MCE-7 al 3%,5% y 7%

MM: Muestra microsílíce MM-3, MM-5, MM-7 al 3%,5% y 7%

MOE: Módulo de elasticidad

MOR: Módulo de rotura

SEM: Microscopía Electrónica de Barrido

SiO<sub>2</sub>: Sílice

TGA: Termogravimetría

XRF: Fluorescencia de rayos

## 1 INTRODUCCIÓN

En el año 1900, el ingeniero austriaco Ludwig Hatschek da origen al fibrocemento novedoso descubrimiento en el área de la construcción, combinando el cemento y la fibra de amianto, para fabricar placas o paneles compactos que podrían ser utilizadas en techos y revestimiento de edificaciones. A este invento lo llamó Eternit (eterno), aludiendo a su durabilidad, en el que incorporó el cemento Portland a la elaboración de las planchas. En 1907 el ingeniero italiano Adolfo Maza crea la primera máquina de producción de placas de fibrocemento a nivel industrial (Esquinas & González, 2019).

Con el tiempo se observa que el amianto o asbesto, que servía como refuerzo en la mezcla del cemento reforzado con fibras, comenzaba a generar problemas en el ámbito de la salud de las personas y del ambiente. La exposición a las fibras de asbesto en el lugar de trabajo: minado, molienda, producción, manejo en fábricas, construcción, reparación y hasta en los residuos en ropa, provocaban un daño, a través de cualquier vía (inhalatoria, dérmica y digestiva). El sistema respiratorio cuenta con mecanismos de defensa que trata de eliminar las fibras desde el instante que ingresan en la nariz. Sin embargo, muchas consiguen llegar hasta los alvéolos pulmonares, una vez dentro, los mecanismos de defensa del organismo tratan de descomponerlas y expulsarlas, pero a pesar de estos esfuerzos, consiguen quedarse y permanecer durante mucho tiempo y provocar derrames pleurales “idiopáticos”, fibrosis pleural, calcificación pleural y neoplasma, asbestosis, cáncer de pulmón o Mesotelioma maligno (Fortes & Garza, 2006).

Para el año 2019, el congreso de la república de Colombia a través de la ley 1968 prohibió el uso del asbesto en el territorio nacional y se estableció las garantías de protección a la salud de los colombianos y prohibió, a partir del 2021, la explotación, producción, comercialización, importación, distribución o exportación de cualquier variedad de asbesto y de los productos elaborados en el territorio nacional. Se crea la comisión para sustitución del asbesto como supervisor ante las disposiciones decretadas (Macías et al., 2019). Por tal motivo, el reemplazo de este material por fibras que incluyen lanas minerales, fibras refractarias, fibras orgánicas sintéticas, introducen el fibrocemento en el área de la construcción como un nuevo material resistente con características de resistencia y

elasticidad interesantes para constructores, ingenieros y arquitectos. La incorporación de fibras naturales y la utilización de otros materiales alternativos como puzolanas industriales, cenizas volantes, abren la puerta a la sílice, mineral conformado por silicio y oxígeno que se encuentra en la naturaleza y que también puede ser extraída de residuos agroindustriales como la cascarilla de arroz utilizada como materia prima en la construcción.

El arroz es uno de los tres cereales que más se consume principalmente como grano entero, es el segundo más cultivado en el mundo, después del maíz. Su cáscara es una capa dura que protege el grano y está compuesta básicamente por sílice amorfa, su alto contenido de silicio limita su uso especialmente como materia orgánica para incorporar al suelo por su bajo contenido de nutriente. Sin embargo, tiene una gran capacidad aislante, una buena conductividad térmica y un alto contenido de minerales, lo cual permite su uso en la industria de jabones, lijas, revestimientos y otros. Se compone de óxido de potasio, óxido de sodio, óxido de calcio, óxido de magnesio, sulfatos y sílice (Simón & Golik, 2020).

Este trabajo se utilizó la cascarilla de arroz como fuente de sílice para la elaboración de placas de fibrocemento adicionando otros aditivos como fibras de vidrio, bentonita y carbonato de sodio, con el fin de evaluar sus propiedades físico-químicas, mecánicas y morfológicas y determinar la mejor respuesta a la resistencia y durabilidad del material.

## 2 ÁREA PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

El fibrocemento es un material liviano y resistente usado en la construcción como revestimiento, aislamiento e impermeabilización de numerosas estructuras. Está compuesto de cemento, sílice, carbonato, bentonita, fibras. Anteriormente este material, constituido por una mezcla aglomerante y otros aditivos, utilizaba el amianto o asbesto, pero su nocividad significó la implementación de otros materiales (Esquinas, 2019).

**Figura 1. Fibrocemento y fibras de asbesto recuperado**



**Fuente:** Optimus technologies (2016)

En la Figura 1 y Figura 2 se muestra el asbesto, mineral fibroso que a partir del siglo XIX comenzó a utilizarse en la industria, presenta una densidad relativa de aproximadamente 2,5 y un punto de fusión superior a 1000 °C. Debido a su composición química son minerales resistentes al calor, que se destruyen a temperaturas superiores a 800 °C (Abú Shams & Pascal, 2005), y por sus efectos nocivos sobre la salud ha sido necesaria su sustitución por otros materiales que cumplan con las condiciones de producción segura, tales como las fibras minerales artificiales, fibras orgánicas sintéticas de carbón, fibras de acero y de vidrio.

**Figura 2. Asbesto mineral fibroso**

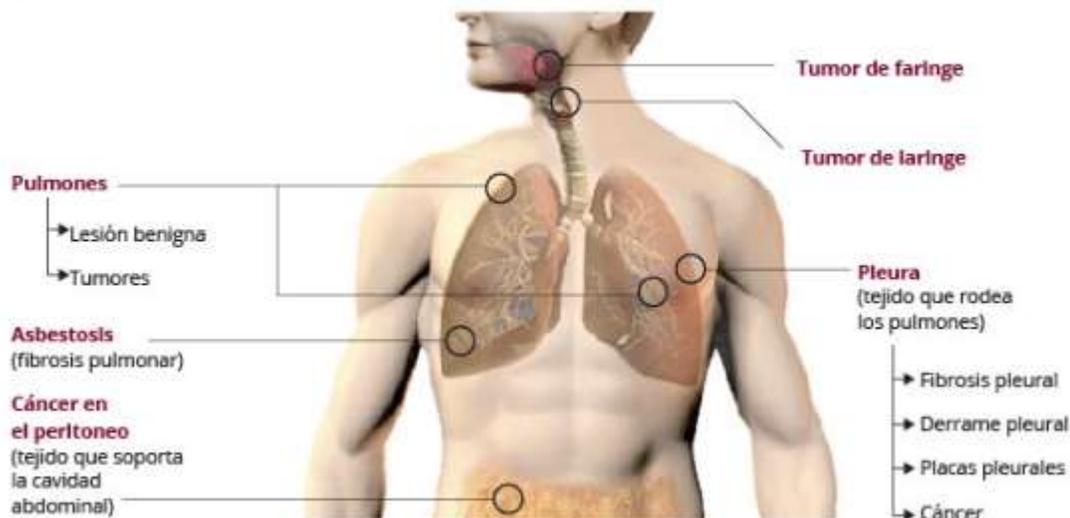


**Fuente:** tekstilsayfasi (2017)

Las enfermedades provocadas por el asbesto pueden verse en la Figura 3, entre éstas están: lesiones benignas, tumores en la faringe, laringe y pulmones, fibrosis pulmonar, placas

pleurales (calcificación), mesotelioma maligno (cáncer de la pleura, revestimiento del pulmón), que puede presentarse de 20 a 40 años después de la exposición, derrame pleural, acumulación que se produce alrededor del pulmón algunos años después de la exposición al asbesto y es benigno.

**Figura 3. Enfermedades asociadas al contacto con el asbesto**



**Fuente:** El periódico (2018)

De acuerdo a la peligrosidad de las fibras de asbesto, se ha buscado la sustitución de este material por otros, según la norma técnica NTP 306 “Las fibras alternativas al amianto de 1991, consideraciones generales dadas por el ministerio de trabajo y asuntos sociales España” (Blanxart, 1991). En estas fibras de reemplazo se incluyen lanas minerales como lana de escoria, lana de roca, lana de vidrio y fibras refractarias (sílice, aluminosilicatos de circonio, silicato de aluminio, aluminosilicatos de boro, aluminosilicatos de cromo, alúmina, circonio, boro, nitruro de boro, carburo de silicio, nitruro de silicio) y fibras orgánicas sintéticas para reforzar el cemento, como polipropileno, alcohol polivinilo, polietileno y acrílicas.

Dentro de las fibras refractarias se halla la sílice (Figura 4b), compuesta por silicio y oxígeno, que se encuentra en el suelo en forma de rocas y arenas. Es la materia prima para la fabricación de vidrios, silicatos, cerámicas refractarias, constituyentes del hormigón y los ladrillos, para el reforzamiento de obras civiles. La extracción del mineral se da con la explotación a cielo abierto: canteras y ríos; el cual se extrae de las rocas que se encuentran conformados de dicho mineral. Su procesamiento consiste en triturarlas o demolerlas para

extraer la mayor concentración de sílice. La actividad exploratoria minera es demasiado costosa e implica muchos riesgos, la mayor parte de la minería incluyendo la de la mineral sílice es realizada por el sector informal y un 76% de las minas es explotado sin permiso legales. Adicionalmente, más del 50% de los mineros no tienen permiso y trabajan en la informalidad, sin garantías (Cahuana, 2014).

**Figura 4. Material refractario a) Silicio b) sílice**



a)



b)

**Fuente:** Xatico (2019)

Por otro lado, se ha encontrado que la cascarilla de arroz es un residuo agroindustrial que contiene una gran cantidad de sílice, gran proporción de la cascarilla producto del procesamiento del arroz es incinerada infructuosamente o arrojada a fuentes de agua, lo cual repercute negativamente en el ecosistema. Actualmente, las empresas que generan los residuos del proceso de producción con el arroz optan por quemar el desperdicio en calderas, emitiendo gases al medio ambiente. Sin embargo, se han encontrado diferentes usos, tales como combustible sólido, material para abonos, camas y alimentos concentrados para animales, productos de compostaje, flores e insumo para materiales de construcción(Aguilar, 2009).

La sílice extraída de la cascarilla de arroz ha permitido el aprovechamiento de un residuo agroindustrial, cuya cantidad oscila en cifras cercanas al 20% en masa de la producción total de arroz en plantas procesadoras. Este porcentaje ocasiona problemas en su evacuación, transporte y su aprovechamiento se ve limitado porque su constitución físico-química es de difícil biodegradación (Galeano et al., 2016).

Por lo tanto, es importante encontrar otros medios de obtención de sílice a partir de materiales alternativos como la cascarilla, procesos que pueden derivarse de residuos

agroindustriales para ser empleados como agregado que mejoran la fluidez y la resistencia de los materiales. De hecho, se consiguen aumentos de la resistencia a la compresión en comparación con materiales que contienen solo sílice, cuando se adicionan nanopartículas, en este sentido se ha logrado hasta un 120% de mejora en sus propiedades de resistencia con respecto a las muestras de control (Shih et al., 2006).

En el reforzamiento de obras civiles como ladrillos y cementos se ha utilizado la sílice como componente en el proceso de endurecimiento del cemento, que al ser agregada con agua y aditivos forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Para el caso del fibrocemento, que se compone de una pulpa de fibras celulósicas o sintéticas, (Tobón et al., 2007) se ha encontrado que las fibras alternativas usadas en el refuerzo de cemento tienen durabilidad en medios alcalinos. Sin embargo, a largo plazo, las fibras sufren una reducción de la resistencia y ductilidad, lo que se atribuye a la degradación de la fibra (Centenero, 2013). Se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué efecto tiene la adición de sílice en diferentes formas sobre propiedades físicas y mecánicas del fibrocemento?

### 3 ANTECEDENTES

Se encontraron referentes en el aprovechamiento de la cascarilla de arroz, la obtención de sílice a partir de la ceniza, la limpieza y adición a materiales como el cemento para estudiar el cambio en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas, además de las diferentes técnicas de caracterización utilizadas para el análisis de este material compuesto

#### 3.1 CASCARILLA DE ARROZ

La presencia de sílice dentro de la estructura de la cascarilla de arroz se conoce desde 1938. No obstante, desde 1934 científicos japoneses ya habían observado que el silicio es benéfico para el crecimiento normal del arroz. El contenido de sílice presente en diferentes partes de la planta (raíz, tallo, hojas, cáscara o vaina) varía entre 2,63 y 13,3%, y se encuentra en mayor cantidad con respecto a la parte orgánica en la cáscara del grano de arroz (Arcos, Pinto, et al., 2007). En la planta de arroz la sílice que se almacena en la cascarilla entra en forma soluble como ácido monosilicato a través de su raíz y se mueve a la parte superior, donde por medio de un proceso de evaporación y polimerización se forma una membrana de sílice y celulosa (Sun & Gong, 2001). Los átomos de silicio en la planta se dispersan de forma natural y uniforme por unidades moleculares (Liou, 2004).

Serrano et al. (2012) analizaron la posibilidad de utilizar la cascarilla de arroz con y sin pretratamientos, como una adición en la fabricación de morteros ligeros. Se estudiaron diversos pretratamientos de la cascarilla, tales como el lavado con agua destilada, baño en disolución ácida durante 24 horas, baño en disolución básica durante 24h, así como combinaciones y variaciones de los anteriores pretratamientos. Se determinaron propiedades como la densidad, la resistencia a flexión y la resistencia a compresión de los morteros realizados. Finalmente se sometieron a análisis de microscopía electrónica tres de las muestras más representativas.

Los resultados mostraron que se obtuvieron morteros de muy baja densidad y elevada porosidad que los convierten en candidatos para elaborar materiales de construcción para aislamiento térmico y acústico, pero no para fabricar elementos portantes debido a su baja resistencia mecánica. Se concluye que el tratamiento químico de la cascarilla con reactivos

alcalinos y la adición de cloruro cálcico como acelerante del fraguado son dos propuestas efectivas para la reutilización de estos residuos en morteros aligerados.

Los autores Embadi et al. (2015) reemplazan desecantes químicos con fibras naturales y materiales alternativos sostenibles, utilizan cáscara de arroz y sus formas tratadas con álcali y solución ácida. El material se caracterizó mediante difracción de rayos X, análisis termogravimétrico y microscopía electrónica de barrido. La capacidad de absorción de agua para las muestras preparadas ha sido comparada a  $28 \pm 2$  °C. El compuesto con mayor porcentaje de cáscara de arroz tratada con ácido mostró mayor absorción de agua que probablemente se atribuya a la porosidad y mejora de las propiedades de adhesión (superficie grupos hidroxilo) en las muestras preparadas.

En su trabajo Galeano et al. (2016) realizaron análisis granulométrico, módulo de finura, humedad, densidad, masa unitaria suelta y compacta, entre otras propiedades para la ceniza de cascarilla de arroz y arena. Lo anterior con el fin de determinar su desempeño como agregado fino en adhesivos tipo mortero en la colocación de baldosas cerámicas, debido al alto porcentaje de sílice en su composición química. Se analizaron las propiedades físicas y químicas de los agregados y el comportamiento mecánico de fluidez y resistencia a la tracción de los morteros obtenidos con reemplazo parcial de arena en porcentajes desde 5% hasta 25%, Los resultados muestran que un porcentaje de reemplazo de la arena por ceniza de cascarilla de arroz de 20% produce fuerzas de tracción comparables con las obtenidas para adhesivos comerciales.

Camus et al. (2014) realizaron una investigación sobre placas de compuestos de fibra utilizando la cascarilla de arroz y lodos resultantes de la fabricación de papel blanco, determinaron cenizas para el papel empleado y un análisis proximal para la cascarilla de arroz. Diseñaron formulaciones: cascarilla (5-15%), cemento (30-50%), yeso (15-25%), goma (10%) y lodos de papel (10-20%) y realizaron la respectiva caracterización de las placas. En este trabajo se recomendó utilizar cascarilla molida ya que al distribuirse en la masa total crea mayor uniformidad, sin embargo, esta densidad aparente de la cascarilla no es una propiedad intrínseca para el fibrocemento y depende de la forma de compactación. Los resultados indicaron que los valores mayores de dureza son para cascarilla molida

muestra 2 y 3 al 5% y entera, muestras 1,2,3 (5%), 8 (7,86%), 15 (5%) y 21 (10%) las densidades encontradas en las placas de fibrocemento variaron entre 0.88 y 1.39 g/cm<sup>3</sup>.

Hidalgo (2018) caracterizó la ceniza de paja de arroz (CPA) física y químicamente, para determinar las propiedades puzolánicas y su posible uso como adición puzolánica en morteros de cemento Portland. Se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido de campo, y difracción de rayos X, por último, se fabricaron probetas de mortero de cemento Portland control y cemento Portland con sustitución de cemento por CPA (15 y 30%) y se evaluó su resistencia mecánica a flexión y compresión a distintas edades de curado. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios para porcentajes de sustitución entre el 15-30%. Dichos resultados son preliminares, pero crean un buen perfil de este material, como adición puzolánica en la posible utilización para la fabricación de morteros de cemento Portland.

### **3.2 OBTENCIÓN DE SÍLICE**

Junior et al. (2010) estudiaron una estrategia para obtener sílice de cascarilla de arroz con un nivel de pureza adecuado para aplicaciones en electrónica. La técnica se basa en dos pasos de lixiviación, utilizando respectivamente soluciones de agua legía que extraen la matriz orgánica y las impurezas inorgánicas. Se utilizaron ácido clorhídrico (HCl) de grado reactivo analítico, ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). El material se caracterizó por varias técnicas, se encontró por TGA que se encuentran zonas de pirólisis de la celulosa y hemicelulosa, en la curva de derivada del TGA (DTGA) el pico más pronunciado corresponde a la lixiviación de la materia orgánica, con un segundo evento a 470°C correspondiente a un evento exotérmico que no implica una pérdida significativa de masa.

Arcos et al. (2007) estudiaron la naturaleza de la fracción orgánica donde se nuclean los complejos de sílice y las condiciones óptimas, a través de microscopía electrónica de barrido difracción de rayos, infrarrojo (FTIR) y análisis térmico diferencial. Se uso HCl para eliminar impurezas como Fe, Na, K, entre otros compuestos inorgánicos. Los resultados obtenidos mostraron que, en la parte externa de la cascarilla, constituida de celulosa, se nuclea la sílice, y el SiO<sub>2</sub> obtenido de la misma es amorfo, con un alto valor de

superficie específica ( $\sim 277 \text{ m}^2/\text{g}$ ), morfología no definida y tamaño nanométrico ( $< 200 \text{ nm}$ ).

Selvakumar et al. (2014) trabajaron sobre la producción de partículas de sílice. El lavado con ácido antes de la extracción dio como resultado sílice con una menor concentración de minerales. La síntesis se realizó mediante precipitación usando diferentes ácidos, sulfúrico y nítrico, que produjeron nanosílice. Se estudió el efecto de diferentes ácidos sobre el tamaño y el grado de aglomeración de las partículas de sílice y la sílice formada se clasificó para diversos usos.

Mafla (2009) estudiaron la adición del  $\text{SiO}_2$ , obtenido de la cascarilla de arroz, al Cemento Portland común y el efecto que esta materia prima tiene sobre el comportamiento mecánico del concreto fabricado con ella. Se indican las características más importantes del  $\text{SiO}_2$  y las curvas de resistencia a la compresión de muestras de mortero. El proceso se inicia con el lavado de la cascarilla de arroz, retirando de ella toda clase de sólido para posteriormente colocarla a secar al medio ambiente. Con la cascarilla seca, se procede al tratamiento químico sometiéndola al proceso de reflujo químico en una disolución de ácido clorhídrico  $\text{HCl}$  por aproximadamente 5 horas. El dióxido de silicio obtenido de la cascarilla de arroz presentó buenas propiedades como material puzolánico. Su alta pureza y superficie específica hacen que al mezclarlo con el cemento portland y en presencia de agua reaccione fácilmente con el calcio o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libre.

### **3.3 FIBROCEMENTO**

El fibrocemento es un material liviano y resistente usado en la construcción como revestimiento, aislamiento e impermeabilización de numerosas estructuras. Está compuesto de cemento, fibras y aditivos puzolánicos. Los efectos puzolánicos son las reacciones de un material aglomerante con el hidróxido de calcio para formar compuestos hidráulicos similares a los que se generan durante la hidratación del cemento. López et al. (2010) utilizaron los materiales puzolánicos para adicionarlos a las mezclas de hormigón con cemento portland que reaccionan con la portlandita formando nuevos silicatos de calcio hidratados que pueden mejorar la durabilidad de estructuras de hormigón. Con el objetivo de mejorar el entendimiento del rol de las puzolanas naturales en el desempeño del

hormigón, este estudio caracterizó la porosidad e interconectividad de los poros de hormigones en función del contenido de puzolanas naturales.

El programa experimental caracterizó la resistencia y permeabilidad de hormigones con diferentes contenidos de puzolanas y con edades entre 28 y 84 días para así evaluar el efecto de las puzolanas en función del tiempo. Los resultados muestran que la ganancia en impermeabilidad debido al uso de puzolanas naturales es muy superior al efecto observado en resistencia. Por ejemplo, hormigones con 33% de puzolanas en reemplazo del cemento presentaron una resistencia a compresión 27% inferior a la del hormigón sin puzolanas; sin embargo, su impermeabilidad fue aproximadamente 200% superior a las de los hormigones sin puzolanas. Los ensayos de permeabilidad a iones cloruro y absorción capilar presentaron baja variabilidad y buena correlación con las reacciones puzolánicas. Se concluye que se debe controlar independientemente la permeabilidad y la resistencia del hormigón ya que son afectadas de manera diferente por las reacciones puzolánicas; además, se concluye que para considerar el efecto de las puzolanas se debe ensayar permeabilidad a edades tardías.

Según Hincapié et al. (2017), se estudió una forma alternativa de obtener nanosílice para determinar su efecto a 0, 3, 5 y 7% sobre las propiedades mecánicas, morfológicas y térmicas del material. La obtención partió de la incineración de la cascarilla y limpieza por tratamiento químico y posterior molienda mecánica de alta energía para la reducción de su tamaño a escala nanométrica. Se elaboraron placas adicionando nanopartículas y se realizó análisis termogravimétrico para estudiar la degradación térmica de la cascarilla y la eliminación de componentes orgánicos. Se determinaron las fases mineralógicas de la nanosílice, tamaño de nanopartículas por microscopía electrónica de barrido y cálculo del área superficial usando microscopía electrónica de transmisión, además de la caracterización mecánica para el fibrocemento. Los resultados indicaron que entre 150-450°C se liberaba el material orgánico de la cascarilla, y por encima de 550°C se obtiene ceniza rica en sílice. La pureza de la sílice se incrementó hasta un 98.48%, usando el tratamiento químico. La reducción del tamaño de partícula por molienda mecánica a 600 rpm durante 3 h se logró hasta el tamaño de nanómetro. La cascarilla resulta ser fuente natural de silicio que puede ser llevado a tamaño de nanométrico mediante un proceso de

bajo costo como la molienda mecánica y al adicionarse en una proporción adecuada en el fibrocemento mejora su resistencia y desempeño funcional.

Choi et al. (2021) investigaron las características de fraguado de los compuestos de cemento reforzado con fibra de celulosa natural en función de las dosis de cáñamo y fibra de yute (0, 0,25, 0,5, 1 y 2%) como variables principales. Se observó que la sección transversal de la fibra tenía una estructura de tubo en haz hueco mediante microscopía electrónica de barrido. La resistencia a la compresión del material compuesto con una proporción de mezcla de fibras del 0,25% fue mayor que la de la muestra simple. Las resistencias a la compresión de los otros compuestos disminuyeron gradualmente con el aumento de la proporción de mezcla de fibras, presumiblemente como efecto de la aglomeración de fibras. Los resultados experimentales indicaron que cuanto mayor es la dosis de las fibras de cáñamo y yute, más largos se vuelven los tiempos de fraguado inicial y final. Este parece ser el efecto de la celulosa y la pectina que componen la fibra. En el caso de la muestra con alto contenido de fibra fue difícil predecir el rendimiento de fraguado midiendo la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) debido a la configuración de la red de fibra y la reacción química entre la fibra y el cemento.

Miotto et al. (2015) evaluaron experimentalmente vigas mixtas madera-hormigón en dos situaciones diferentes con y sin polímero reforzado con fibra de vidrio. Se produjeron cuatro vigas mixtas a escala real (5,4 m de longitud), dos de las cuales tenían refuerzo (espesor nominal de 10 mm) y dos sin refuerzo. El refuerzo de fibra de vidrio se formó a partir de la impregnación de tela de fibra de vidrio unidireccional - espesor efectivo de 0,5 mm - con resina epoxi. El sistema de conexión consistió en ganchos de acero inclinados a 45 grados, adheridos con adhesivo epoxi a los orificios previamente perforados en la madera, cuya densidad aparente al 12% de humedad fue de 0,79 g / cm<sup>3</sup>. Las vigas compuestas de madera reforzada y hormigón ensayadas tuvieron una eficiencia de rendimiento del 79% y una resistencia media a la rotura de 142,5 kN.

Barrios et al. (2021) realizaron un análisis de las propiedades de los morteros de cal y cemento elaborados con áridos cerámicos reciclados reforzados con tres tipos de fibras: vidrio, basalto y carbono. Se realizó caracterización química y física de los materiales y análisis estadístico de los resultados obtenidos. Se comprobó que la adición de fibras

mejora las propiedades mecánicas del material y disminuye su retracción, lo que favorece la incorporación de áridos reciclados en la fabricación de morteros. Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que la fibra de carbono es el material de refuerzo de mejor desempeño.

Ribeiro et al. (2018) investigaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos híbridos hechos de fibras de sisal / vidrio e inclusiones de cemento Portland. Se generó un diseño factorial completo para identificar los efectos de la secuencia de apilamiento y las partículas de cemento sobre la resistencia a la flexión, la rigidez a la flexión, la densidad aparente, la porosidad aparente y la absorción de agua de los materiales compuestos. Las contribuciones significativas de estos factores principales y sus interacciones se determinaron mediante el Diseño de Experimentos (DoE) y el Análisis de Varianza (ANOVA). También se informaron las características de la fractura y los mecanismos de daño del compuesto híbrido. La inclusión de micropartículas de cemento condujo a una mayor porosidad aparente, así como a una mejor absorción de agua, rigidez a la flexión y resistencia a la flexión de los compuestos híbridos. Las propiedades mecánicas dependían en gran medida de la secuencia de apilamiento de las fibras, que representa aproximadamente el 98% de los efectos observados. Además, la secuencia de apilamiento afectó el mecanismo de daño de los biocompuestos. Finalmente, la sustitución de fibras de vidrio por refuerzos de sisal unidireccionales puede potencialmente mejorar las propiedades específicas en aplicaciones estructurales con una huella medioambiental sostenible.

Khorami et al. (2017) utilizaron fibras de vidrio (GL), Fibras de pulpa Kraft (KF) y Nano Silica Fume (NSF) para producir un tablero compuesto de cemento (CCB). Se produjeron quince grupos de proporciones de mezcla para investigar los efectos del contenido y el tamaño de la fibra junto con el efecto de la NSF sobre la interacción, la unión y las propiedades mecánicas del CCB. Se realizaron observaciones de densidad, absorción de agua, movimiento de humedad, resistencia a la flexión y microscopía electrónica de barrido. Los resultados mostraron que algunas mezclas podrían cumplir con los requisitos estándar y también la inclusión de GL y NSF en la mezcla que contiene KF (extraído de cartón de desecho) podría mejorar las características de CCB.

Yurdakul et al. (2018) utilizaron como materiales de refuerzo en cemento fibras de vidrio

Zrn1 recientemente desarrolladas pertenecientes al sistema SrO-Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (SMFMZS). El valor de resistencia a la compresión más alto (2.610 N / mm<sup>2</sup>) se obtuvo con la adición de 3% en peso de fibras de Zrn1 en cemento Portland. El comportamiento microestructural de estas fibras junto con las disponibles comercialmente en la estructura del cemento se estudió por SEM. Las microestructuras fueron totalmente compatibles con los resultados mecánicos obtenidos. Finalmente, se determinó que la fibra Zrn1 puede ser un buen candidato para el refuerzo de cemento que conduce a valores de resistencia altos. Para este trabajo se usará fibra de vidrio Cem-FIL 60 Diámetro del filamento: 14 μm, y longitud de 12mm.

Wang et al. (2020) seleccionaron una relación agua-cemento de 0.5 y un asentamiento de 18 cm y fibras de vidrio de 0.60 y 2.54 cm de 0.5%, 1.0% y 1.5% de cemento por peso, respectivamente, para discutir el efecto de una hora de alta temperatura (440, 500, 580, 800 y 1000 ° C) sobre la resistencia a la compresión y la conductividad térmica del hormigón. Los resultados mostraron que la cantidad adicional de fibras de vidrio utilizada para mejorar la resistencia a la compresión del hormigón debería ser apropiada. Cuando se agrega fibra de vidrio corta al concreto, la resistencia a la flexión del concreto se reducirá cuando la cantidad de fibra sea demasiado grande; cuando la longitud de fibra de vidrio agregada al hormigón es lo suficientemente larga, la resistencia a la flexión del hormigón aumentará con el aumento de la cantidad de fibra. Bajo el efecto de la alta temperatura, la resistencia a la compresión residual del hormigón aumenta con la cantidad de fibras de vidrio agregadas y aumenta con la longitud de la fibra de vidrio

Mohammed et al. (2021) investigaron el comportamiento mecánico y el comportamiento de ductilidad del hormigón reforzado con fibra de ultra alto rendimiento que contiene un alto volumen de microfibras de vidrio (MGF) Se investiga la influencia de varias fracciones de volumen de MGF y de dos proporciones de agua aglutinante (a / b). Estas relaciones a/ b son 0,12 y 0,14. Con base en estas proporciones, se prepararon dos grupos de mezclas de fibra de ultra alto rendimiento y cada grupo incluye siete mezclas preparadas con dosis de volumen de MGF de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% y 3%. En total, se examinaron catorce mezclas para determinar las propiedades mecánicas. Se llegó a la conclusión de que una a / b más baja daba como resultado un mejor rendimiento mecánico. Además, las mezclas que

contienen 1,5% a 3% de microfibras de vidrio dieron como resultado la resistencia a la compresión más alta que alcanzó hasta 160 MPa. Además, los resultados indicaron que no se puede lograr más mejora de la fuerza más allá del 1,5% de MGF.

Rabab'ah et al. (2021) investigaron el uso de fibras de vidrio como refuerzo aleatorio discreto en suelo de subrasante expansivo para mejorar su resistencia para la aplicación del pavimento. El contenido de fibra varió entre 0,25% y 1,0% en peso de suelo seco. Se llevaron a cabo una serie de ensayos de oleaje libre, resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la tracción indirecta y relación de carga de California) en muestras de suelo expansivo reforzado y no reforzado. Además, se evaluó el efecto de la inclusión de la fibra en el diseño y desempeño del pavimento flexible utilizando la Guía de Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos. Los resultados de la prueba mostraron que la inclusión de fibras de vidrio en el suelo de la subrasante aumenta significativamente la resistencia a la tracción indirecta, resistencia a la compresión no confinada y la relación de carga disminuye los valores de oleaje libre.

Haque et al. (2021) plantearon como objetivo predecir y optimizar las propiedades frescas y endurecidas del hormigón mezclado con ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo del cemento y fibras de vidrio como elemento de refuerzo adicional utilizando la metodología de superficie de respuesta. Los porcentajes volumétricos de ceniza y fibras se consideraron como dos variables independientes para desarrollar modelos probabilísticos de asentamiento, densidad fresca y seca, resistencia a la tracción por compresión y división como respuestas deseadas. El efecto de las variables sobre las propiedades deseadas se investigó mediante Análisis de Varianza (ANOVA) a un nivel de confianza del 95%. Tanto la resistencia a la tracción a la compresión como a la rotura a los 7, 14 y 28 días han mostrado las respuestas más altas con un contenido de ceniza del 15%. con el porcentaje máximo de fibra de (0.08%). La disminución de la resistencia al aumentar el reemplazo de ceniza por encima del contenido óptimo se debe a la falta de proceso de hidratación de una cantidad adicional de sílice con contenido de cemento reducido. Por otro lado, la presencia de fibras de vidrio como elemento de refuerzo disminuye la fragilidad del hormigón y aumenta la cohesión de fibras con partículas de cemento que mejora la resistencia de la mezcla de hormigón.

Kanamarlapudi et al. (2020) reemplazaron el cemento parcialmente por aditivos minerales como cenizas volantes, escoria de alto horno granulada molida humo de sílice y fibras de vidrio resistentes al álcali al 0.5% que se agregan al volumen total de concreto. El diseño de mezcla para concreto grado M40 fue desarrollado para diferentes proporciones 15%, 30%, 45% de cemento y se determinan las propiedades de resistencia y durabilidad. Se probaron propiedades de resistencia como la tracción dividida por compresión, la flexión para todas las proporciones y se eligió la proporción óptima para la fundición de vigas. A partir de los resultados, se concluyó que el 30% de reemplazo del cemento es óptimo para las propiedades de resistencia del concreto. El espesor a la compresión y la resistencia a la flexión aumentan hasta en un 20% de reemplazo y luego comienza a disminuir.

En la Tabla 1 Se resumen los antecedentes con los autores consultados para el desarrollo de este trabajo.

**Tabla 1. Resumen de antecedentes**

<b>Tema</b>	<b>Breve descripción</b>	<b>Autores</b>
<b>Cascarilla de arroz</b>	Uso de la cascarilla de arroz como	Arcos et al., (2007)
	adición en la fabricación de	Serrano et al., (2012)
	motos y agregados livianos	Embadi et al. (2015)
		Galeano et al. (2016)
		Camus et al. (2014)
	Hidalgo (2018)	
<b>Obtención de Sílice</b>	Lixiviación ácida	Junior et al. (2010)
	Limpieza	Arcos, Pinto et al. (2007)
		Selvakumar et al. (2014)
		Mafla (2009)
<b>Fibrocemento</b>	Cemento	López et al. (2010)
	Aditivos	Hincapié et al. (2017),
	Fibras de refuerzo	Choi et al. (2021)
	Efectos puzolánicos	Miotto et al. (2015)
	Propiedades mecánicas	Barrios et al. (2021)
		Ribeiro et al. (2018)

---

Khorami et al. (2017)  
Yurdakul et al. (2018)  
Xu et al. (2020)  
Mohammed et al. (2021)  
Rabab'ah et al. (2021)  
Haque et al. (2021)  
Kanamarlapudi et al. (2020)

---

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el efecto de la inclusión de diferentes formas de sílice (cascarilla, ceniza y microsílice) extraídas de la cascarilla de arroz sobre propiedades físicas y mecánicas del fibrocemento.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

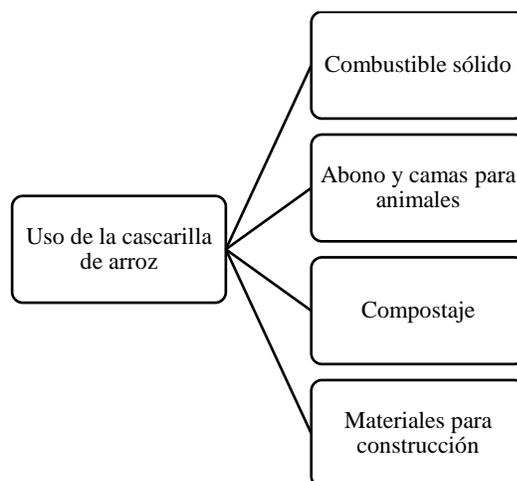
1. Obtener la sílice en diferentes formas a partir de la cascarilla de arroz para su posterior utilización en placas de fibrocemento.
2. Elaborar las placas de fibrocemento a partir de la mezcla de los componentes con las diferentes formas de sílice obtenidas y variando las proporciones.
3. Analizar las propiedades físico-químicas y mecánicas de las placas de fibrocemento en función de las diferentes formas y proporciones de la sílice adicionada

## 5 JUSTIFICACIÓN

La sustitución del asbesto por fibras naturales, cascarilla de arroz y la adición de sílice, brindan una oportunidad de reemplazo para este material que, aunque se sabe desde 1920 que es nocivo y ya 57 países lo han prohibido, aún amenaza a 125 millones de personas en el mundo y causa aproximadamente 107,000 muertes al año cifras al 2017, según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Greenpeace, 2017). Colombia es el sexto productor de asbesto en el mundo, 256 empresas desarrollan 25 actividades con asbesto donde el 7% de los trabajadores (688 de 15.170) están expuestos. Se usan tejas para más de cinco millones de casas, a razón de 350.000 viviendas cada año, principalmente de estratos bajos. Eternit ha cubierto más 300 millones de metros cuadrados con sus tejas, también ha puesto 40,000 km de tuberías, es decir, ha cruzado el país 23 veces de punta a punta en materiales cancerígenos (El Nuevo Siglo, 2017). Como la evidencia científica lo ha demostrado, el asbesto es carcinógeno porque al quedar suspendidas en el aire sus fibras entran a las vías respiratorias y causan una enfermedad llamada asbestosis que, en la mayoría de los casos, desemboca en mesotelioma, un mortal cáncer de pulmón, y otras alteraciones.

La peligrosidad de las fibras de asbesto ha permitido el uso de fibras sustitutas, entre ellas, las fibras refractarias como la sílice que pueden ser extraídas de la cascarilla de arroz. Según cifras del DANE, el sector arrocero es el tercer productor con mayor importancia en la agricultura colombiana. Adicionalmente, el arroz procesado juega un papel importante en la dieta y en la canasta familiar de los hogares colombianos, y en particular, en la canasta de consumo de los hogares más pobres. Según cifras (2017) el consumo aparente en el país fue de 2.776.823 toneladas de arroz y según las EVA (Ministerio de Agricultura, 2019), el área sembrada de arroz en Colombia presentó una tendencia creciente entre 2007-2017 al pasar de 457.022 en 2007 a 685.128 hectáreas en 2017 con un consumo per cápita para el 2018 de 42,22 kg (Duque et al., 2019).

**Figura 5. Uso de la cascarilla de arroz**



La cascarilla de arroz dentro de sus aplicaciones (Figura 5) tiene uso en materiales de construcción, se encuentra en este sector, los morteros y hormigones con excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, como se trata de materiales rígidos, presentan poca resistencia a la tracción y baja ductilidad, propiedades que son necesarias para las armaduras de refuerzo en los sistemas de construcción. Por este motivo, se empezaron a incorporar fibras de refuerzo, en este caso naturales como celulosas o provenientes de residuos agroindustriales que mejoran la ductilidad, la resistencia a la flexión y disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por la producción del cemento, aproximadamente el 60% se deben a las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno, y el 40% restante son debidas a la combustión (Perera & Sancha, 2016). Por otro lado, el uso de la sílice como aditivo favorece la reacción con los productos anhidros para formar los diferentes productos de hidratación que le confieren la resistencia mecánica a las placas de fibrocemento (Centenero, 2013) y le confiere no solo mejora en sus propiedades, sino también en el aprovechamiento de residuos con alta composición de sílice.

Para el uso de fibras se han desarrollado diferentes formulaciones que permiten obtener un producto con buenas características de resistencia. Para esto se han utilizado fibras de celulosa, vidrio, polivinilalcohol (PVA), polipropileno y de poliacrilonitrilo (PAN), que aportan las propiedades mecánicas necesarias al producto sin amianto, en determinadas aplicaciones. No obstante, el empleo de estas fibras conlleva un coste superior, bien por su

mayor precio con respecto a las fibras de amianto, o bien por la necesidad de aditivos adicionales.

Para el sector de la construcción, el uso de materiales como el concreto premezclado ha aumentado para Colombia, en noviembre de 2021, la producción de cemento gris a nivel nacional fue de 1.201,2 miles de toneladas, lo que representó un decrecimiento del 1,1% con relación al mismo mes de 2020. En el mes de análisis se despacharon al mercado nacional 1.166,8 miles de toneladas de cemento gris, lo que significó un crecimiento de 4,0% frente a noviembre de 2020. Al comparar el mes de análisis con el mismo periodo de 2019, la producción de cemento gris a nivel nacional registró un crecimiento del 7,9% al pasar de 1.112,9 miles de toneladas a 1.201,2 miles de toneladas. En noviembre de 2021 se despacharon al mercado nacional 1.166,8 miles de toneladas de cemento gris, lo que significó un crecimiento de 7,7% frente a noviembre de 2019 cuando se despacharon 1.083,3 miles de toneladas (DANE, 2022).

La adición de fibras de refuerzo y de sílice para mejorar la resistencia de materiales son recursos altamente estratégicos y novedosos, pero poco visibilizados, por lo cual deben ser puestos en la mira del sector empresarial, debido a sus innumerables usos en sectores clave de la economía: la construcción y la industria. El fibrocemento como material alternativo al concreto puede dar respuesta a la demanda actual, además, su producción puede ser generador de empleo, esencial para el crecimiento económico de los pobladores y vecinos en las regiones que se explotan. Debido a su importancia debe convertirse con los años en un enclave de la economía nacional, tal como ocurre con otros recursos como el petróleo y el carbón, que proveen la mayoría de los ingresos del PIB a la nación (Upme, 2015).

La extracción de la sílice de desechos agroindustriales como el arroz es un tema que se enmarca en la política de crecimiento verde, CONPES 3934 (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2018), y en la Gestión Integral de Residuos Sólidos CONPES 3874 (Departamento Nacional de Planeación, 2016a). Estos documentos sentaron las bases para que Colombia iniciara su transición hacia una economía circular. La demanda interna de materiales que crece rápidamente impulsa el consumo ascendente de la biomasa y minerales para la construcción. Por tanto, se revela la necesidad de avanzar y fortalecer la innovación e implementación de tecnologías con procesos más limpios que permitan el

reúso de materiales en los ciclos productivos, así como la reducción de consumo de materias primas y en la generación de residuos. Por lo anterior es importante el uso de los desechos de cascarilla de arroz que se plantea en este trabajo.

**Figura 6. Propuesta de economía circular**



**Fuente:** Agroamb (2018)

La economía circular (Figura 6) como modelo de producción y consumo que garantiza un crecimiento sostenible en el tiempo aprovecha al máximo los recursos materiales que se disponen, alargando el ciclo de vida de los productos. Este postulado y las políticas ambientales apuntan a dar cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible para la protección del planeta (Naciones Unidas, 2018). Esta investigación tiene en cuenta el objetivo acción por el clima, y busca contribuir a la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático, ya que afecta a todos los países en todos los continentes, lo que produce un impacto negativo en su economía, la vida de las personas y las comunidades. En un futuro se prevé que las consecuencias serán peores ya que los patrones climáticos están cambiando, los niveles del mar están aumentando, los eventos climáticos son cada vez más extremos y las emisiones del gas de efecto invernadero están ahora en los niveles más altos de la historia.

La Universidad Autónoma de Manizales a través del Centro de Estudios Ambientales contribuye al desarrollo local y regional en el marco de la sostenibilidad, apoyan los procesos de educación, investigación y proyección con el fin de generar conciencia en lo que comprende a la naturaleza y medio ambiente. Todo ello a través de prácticas para

participar responsable y eficazmente en la prevención y solución de los problemas ambientales.

La investigación y el trabajo en nuevos materiales que den soluciones a problemas ambientales como lo son los residuos agroindustriales, también se trabaja desde la Maestría en Ingeniería y desde el Grupo de Investigación en Física y Matemática con énfasis en la formación de ingenieros de la UAM que ha implementado la línea de trabajo recientemente para materiales compuestos como el fibrocemento, con la compra de equipos como: Batidora industrial de 10 Litros Equimaq, moldes triples de plástico "Deslauriers" fabricado para fundir cubos de mortero, con arista de 2" (50,8 mm) y tamices certificados de acero inoxidable para gradación de suelos y agregados, con diámetro de 8" (203,2 mm), altura de 2" (50,8 mm) y malla de 200 y 90  $\mu\text{m}$ .. Además, también hace parte de la línea de materiales de Tecnoparque nodo Pereira Centro Atención Sector Agropecuario del SENA Regional Risaralda, línea de biotecnología y nanotecnología, que busca apoyar el desarrollo de proyectos de base tecnológicas enmarcadas en las necesidades de aprendices SENA, investigadores, emprendedores y empresas.

Así mismo, este trabajo apunta hacia el objetivo de desarrollo sostenible: industrial, innovación e infraestructura, ya que el sector de la construcción es un impulso importante del desarrollo económico y del empleo. Buscar alternativas que beneficien el sector de la construcción a media que se desarrolle una economía circular permite el desarrollo económico del país. Así mismo, el diseño de nuevos materiales que aprovechen los residuos de las industrias arroceras y que no emitan gases contaminantes al ambiente son una buena alternativa que impulsan el desarrollo tecnológico y la innovación además de la incorporación de otros materiales de refuerzo para el fibrocemento como fibras de celulosa y de vidrio. Este desarrollo, ha estado planteado para Colombia desde el CONPES 3582 (Departamento Nacional de Planeación, 2016b) como política para incrementar la capacidad de generar y usar conocimiento científico y tecnológico como fuente de desarrollo económico y social.

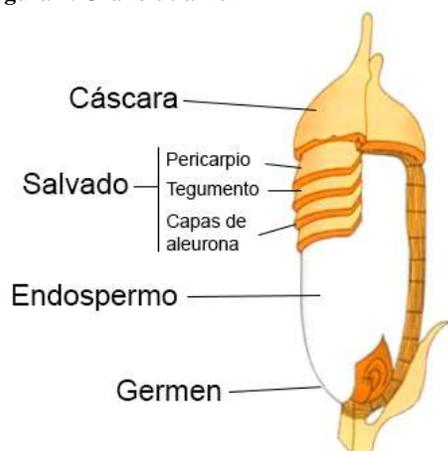
## 6 REFERENTE TEÓRICO

A continuación, se presentan los tópicos que intervienen en el desarrollo de la investigación que utiliza la cascarilla de arroz como fuente de sílice en la elaboración de placas de fibrocemento. Se inicia con algunos conceptos relacionados con la cascarilla, la ceniza, la sílice y el fibrocemento; después se describen las técnicas empleadas en este trabajo para realizar la caracterización física y mecánica de las placas de fibrocementos.

### 6.1 CASCARILLA DE ARROZ

La planta de arroz se denomina científicamente *Oriza sativa*, pertenece a la familia de las gramíneas y su contenido de sílice es de los más altos. En la planta de arroz la sílice que se almacena en la cascarilla entra en forma soluble como ácido monosilicato a través de su raíz y se mueve hasta la parte superior, donde por medio de un proceso de evaporación y polimerización se forma una membrana de sílice y celulosa. El grano de arroz presenta diferentes partes entre las que se destacan la cascarilla, el salvado, el germen y el endospermo como se muestra en la Figura 7. El 72% del volumen del grano está representado por el endospermo almidonoso, el 20% corresponde a cascarilla y el 8% restante es el pericarpio o salvado de arroz (Franquet & Borràs, 2004).

Figura 7. Grano de arroz



Fuente: gominolas de petróleo (2015)

La cascarilla de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo a la púrpura oscura. Su densidad es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes

espacios. El peso específico es de  $125 \text{ kg/m}^3$ , es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de  $8 \text{ m}^3$  a granel. El poder calorífico de la cascarilla es de  $3.281,6 \text{ Kcal/kg}$ . Debido su estructura, la combustión se dificulta, adicionalmente debido a su alto contenido de sílice (cerca del 20 %), presenta muy baja biodegradabilidad. La temperatura máxima para ser quemada varía de acuerdo con su condición:  $970^\circ\text{C}$  (seca),  $650^\circ\text{C}$  (con algún grado de humedad) y hasta los  $1000^\circ\text{C}$  (mezclada con combustible). Uno de los usos alternativos propuestos para la cascarilla de arroz es la obtención de materia prima como la sílice, ya que la ceniza obtenida después del proceso de incineración tiene un alto contenido de este mineral (cerca del 94%) (Prada & Cortés, 2010).

La cáscara o cascarilla de arroz representa aproximadamente una quinta parte del peso del grano recolectado. Las características físicas más significativas son las siguientes: peso específico  $0,78 \text{ g/cm}^3$ ; densidad aparente sin compactar  $0,108 \text{ g/cm}^3$ ; densidad aparente compactado  $0,143 \text{ g/cm}^3$ . Se compone de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, azufre, cenizas y la composición de la ceniza de la cascarilla corresponde a: sílice  $\text{SiO}_2$ , óxido de calcio  $\text{CaO}$ , óxido de magnesio  $\text{MgO}$ , óxido de potasio  $\text{K}_2\text{O}$ , óxido de sodio  $\text{Na}_2\text{O}$ , sulfato, cloro, óxido de titanio  $\text{TiO}_2$ , óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y otros componentes (Franquet & Borràs, 2004).

## **6.2 CENIZA OBTENIDA DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

La cascarilla de arroz (Figura 8a) es un material compuesto de una parte inorgánica y otra parte orgánica. La composición orgánica es similar a la de la mayoría de las fibras orgánicas, contiene celulosa, hemicelulosa, lignina, compuestos nitrogenados, lípidos y ácidos orgánicos. La mayor parte de los hidratos de carbono presentes en la cascarilla de arroz lo constituyen la celulosa y la hemicelulosa, además se pueden encontrar más polisacáridos en la cascarilla de arroz: xilosa, arabinosa y galactosa.

Figura 8. Cascarrilla de arroz a) muestra seca b) ceniza, fuente propia



a)

b)

En el proceso de incineración de la cascarrilla de arroz, los compuestos orgánicos se descomponen en una atmósfera controlada y las impurezas, representadas principalmente como óxidos metálicos pueden ser transformados en iones solubles, mediante el proceso de lixiviación ácida (López, 2015).

### 6.3 SÍLICE

El cuarzo  $\text{SiO}_2$  es el principal constituyente de las arenas de sílice y procede de rocas ricas en sílice, tanto intrusivas como extrusivas y de sedimentarias como las areniscas, y minerales más abundantes en la corteza terrestre. Entre todos los minerales es casi el único que constituye un compuesto químico puro, ya que su composición suele ser 100% de  $\text{SiO}_2$  (46,7% de Si y 53,3% de  $\text{O}_2$ ), (Coordinación general de minería, 2014).

La arena de sílice tiene muchas aplicaciones industriales debido a que es químicamente inerte en un rango muy amplio de pH, lo que permite su aglutinamiento sin dejar residuos ajenos a la mezcla, conservando sus características físicas y químicas, aún en condiciones de carga y temperatura refractaria; La arena molida se emplea como material de relleno en pastas de pulir, así como filtro de líquidos y para tratamientos abrasivos en la forma de chorros de arena. Una de las propiedades más importantes es su resistencia, por lo que se extraen grandes volúmenes para ser utilizados en la industria de la construcción, principalmente para la elaboración de ladrillos sílico calcáreos que sobrepasan los estándares de resistencia de otros tipos de materiales. Mientras que un ladrillo de construcción estándar resiste una compresión de  $160 \text{ kg/cm}^2$ , el ladrillo sílico calcáreo resiste de  $320$  a  $350 \text{ kg/cm}^2$ , según sea su aglutinamiento y la selección de mineral.

La microsílíce (o humo de sílice) suele definirse como una “súper puzolana” por las propiedades que proporciona como aditivo en el cemento. Según el ACI 116R (American Concrete Institute) el humo de sílice se define como un material muy fino y no cristalino, producido en hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio o de aleaciones, elementales que contienen silicio; también es conocido como humo de sílice condensado o microsílíce”. Es un mineral compuesto de dióxido de silicio amorfo y ultrafino, que resulta del proceso de obtención de ferrosilicio o silicatos e involucra la reducción en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000°C. La microsílíce presenta colores grises que pueden variar de claro a oscuro dependiendo de sus rellenos no silicios y pueden ser carbón u óxido de hierro por ser producto de un proceso de alto horno. Al tener mayor contenido de carbón la microsílíce será más oscura (Allauca et al., 2012), ver Figura 9.

**Figura 9. Humo de sílice, microsílíce**



**Fuente:** Dificonsa (2020)

La actividad puzolánica de un material se define como la capacidad de fijar hidróxido cálcico a temperatura ambiente en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica, durante un periodo de tiempo determinado permitiendo el fraguado del cemento. En presencia de cemento portland hidratado, el humo de sílice desarrolla su actividad puzolánica, al ser un material muy fino rico en sílice, el hidróxido cálcico se combina con la sílice para formar silicato cálcico hidratado. Su actividad es efectiva en los primeros días de edad aproximadamente al segundo día y su actividad es mayor hasta los 28 días (Cedex, 2012). La actividad puzolánica en el cemento

permite la hidratación de los productos anhidros del cemento para formar productos que confieren las características finales del fibrocemento.

#### **6.4 CEMENTO PORTLAND**

El cemento portland es sólo una de las muchas clases de cemento que se conocen, es el más importante para la construcción debido a su resistencia y durabilidad. Se lo emplea fundamentalmente en hormigones y morteros, debiendo su nombre, “Portland”, a su descubridor, un albañil del siglo pasado llamado José Aspdín, quien pensó que su aspecto era muy similar a las rocas de la región de Portland, en Gran Bretaña (Prato, 2007). Se fabrica con piedra caliza y arcilla. La mezcla es calcinada y el Clinker que resulta, molido y convertido en un polvo. El proceso de fabricación puede ser dividido en tres etapas principales: la preparación de las materias primas, su calcinación en hornos especiales y el molido del Clinker para obtener el cemento en polvo. El cemento se compone de Cal + Arcilla (sílice y alúmina), elementos que varían dentro de los siguientes límites:

- 58 a 66 % de óxido de calcio (CaO), producto de cocción de piedras calizas que se presentan en la naturaleza en estado de carbonato de calcio (CaCO<sub>2</sub>).
- 19 a 26 % de sílice (óxido silícico SiO<sub>2</sub>).
- 3 a 6 % de Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 4 a 7 % de óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que se agrega como fundente.

La hidratación del cemento es el proceso en el cual el agua se combina con los minerales del clinker anhidros, formándose nuevos compuestos, silicatos, aluminatos y ferritos hidratados, y otros hidratos complejos, con liberación de calor. En este proceso tiene lugar una solidificación, es decir el paso de un estado inicialmente líquido o plástico a un estado sólido. La hidratación del cemento puede dividirse en dos fases: fraguado y endurecimiento Prato (2007). Dentro del proceso de hidratación se generan cuatro fases mayoritarias del cemento que son: C<sub>3</sub>S , C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF, que a su vez generan productos de hidratación, en la Tabla 2 se muestran sus características (Monteagudo, 2014).

**Tabla 2. Proceso de formación del Clinker**

<b>Fases</b>	<b>Características</b>
Silicato tricálcico, Alita ( $C_3S$ )	Es un compuesto que se presenta en la fase sólida, se caracteriza por poseer un alto calor de hidratación y una velocidad de hidratación rápida, lo que se traduce en altas resistencias mecánicas a edades cortas, sus productos son el gel de tobermorita (CSH) y la portlandita (CH).
Silicato bicálcico, Belita ( $C_2S$ )	Posee un calor de hidratación bajo y una velocidad de hidratación lenta, presenta buenas resistencias mecánicas a largo plazo, los productos de hidratación son iguales que en el caso de la alita.
Aluminato tricálcico ( $C_3A$ )	El calor de hidratación es muy elevado y su velocidad muy rápida, en presencia de yeso reacciona formando etringita, el producto que se obtiene es el sulfoaluminato de calcio hidratado, tiene influencia en la durabilidad del material.
Ferrito aluminato tetracálcico, Ferrito ( $C_4AF$ )	Reacciona similar al $C_3A$ , muestra el proceso de reacción en presencia de la etringita, no contribuye al aporte de resistencias.

Cada uno de los productos de hidratación son los responsables de las propiedades del cemento, por ejemplo, la Tobermorita gel (CSH) es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y hormigones y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados (Calleja, 2001) por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo.

Los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos, que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión. La etringita genera expansión ya que se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas que se produce en edades tardías (mayores a 28 días). La formación de etringita conlleva a una expansión debido a su crecimiento orientado. Se plantea que la expansión está asociada a las condiciones de curado (Giraldo & Tobón, 2006).

## **6.5 FIBROCEMENTO**

El cemento es el material pionero utilizado en la industria de la construcción, está constituido por una mezcla de un aglomerante inorgánico hidráulico (cemento) y un aglomerante de silicato de calcio que se forma por la reacción química de un material silíceo y un material calcáreo (Ham-Hernández et al., 2019). Además, contiene fibras y se utiliza para fabricar placas ligeras y de tipo rígidas las cuales se utilizan en demasía en el campo de la construcción. Es un material impermeable, incombustible, inoxidable resistente a cambios bruscos de temperatura, agentes químicos y aislante.

Los compuestos cementosos se caracterizan típicamente por ser frágiles con baja resistencia a la tracción y capacidad de deformación, por esta razón se refuerzan con fibras para mejorar su flexibilidad. Algunos parámetros que se deben controlar a la hora de introducir las fibras en la matriz cementicia son los siguientes: la preparación de la mezcla, tamaño, tipo, geometría y la dispersión de las fibras. Las fibras son importantes ya que éstas mejoran la capacidad de carga de CCB (Cement Composite Board) y aumentan la resistencia a la fractura y disminuyen las tensiones aplicadas concentradas que actúan sobre la punta de las grietas.

Existen preocupaciones en el uso de CCB por exposición a largo plazo y ambientes agresivos, ya que hay estudios que demuestran que al utilizar fibras de celulosa se deterioran más fácilmente, debido al ataque alcalino generado en la matriz, lo que conlleva a la reducción en la resistencia a la flexión, la resistencia a la fractura y dureza con el tiempo, este ambiente alcalino favorece a la mineralización de las fibras (Khorami et al., 2017).

## **6.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN**

A continuación, se describen cada una de las técnicas que se han empleado en este trabajo para realizar los análisis fisicoquímicos y mecánicos a los materiales en estudio.

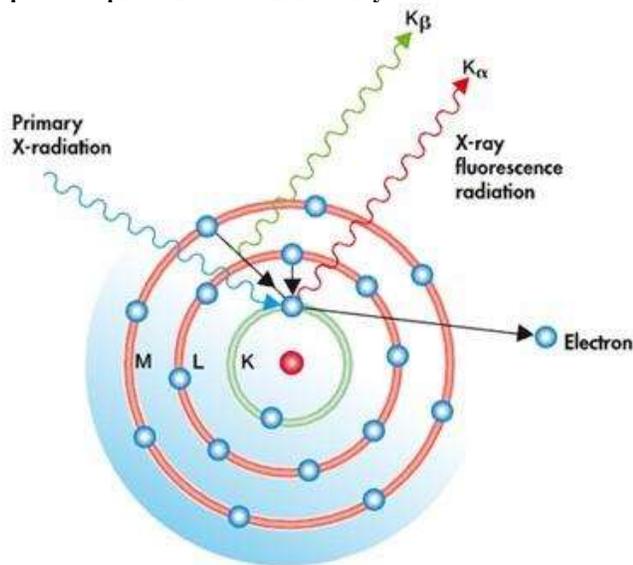
### **6.6.1 Método de Fluorescencia de Rayos X**

La espectrometría de rayos x es un conjunto de técnicas que permiten detectar y cuantificar la composición de una muestra de material desconocido irradiándola con rayos X. Como se

muestra en la Figura 10, se caracteriza por el hecho de que la radiación resultante del análisis se descompone en sus diferentes longitudes de onda o espectros para el análisis sobre los elementos o compuestos que contiene la muestra. Los rayos X de fluorescencia tienen una longitud de onda mayor que la de los rayos X primarios, estos son característicos del material irradiado o radiador; su emisión siempre va acompañada de fotoelectrones y las longitudes de onda de estos rayos son independientes de la longitud de onda de la radiación primaria. (Martínez et al., 2006).

Esta técnica se ha usado en este trabajo para determinar el porcentaje de pureza de la sílice como resultado de la lixiviación con ácido clorhídrico, proceso para eliminación de óxidos y otras impurezas.

Figura 10. Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X



Fuente: Aparicio (2018)

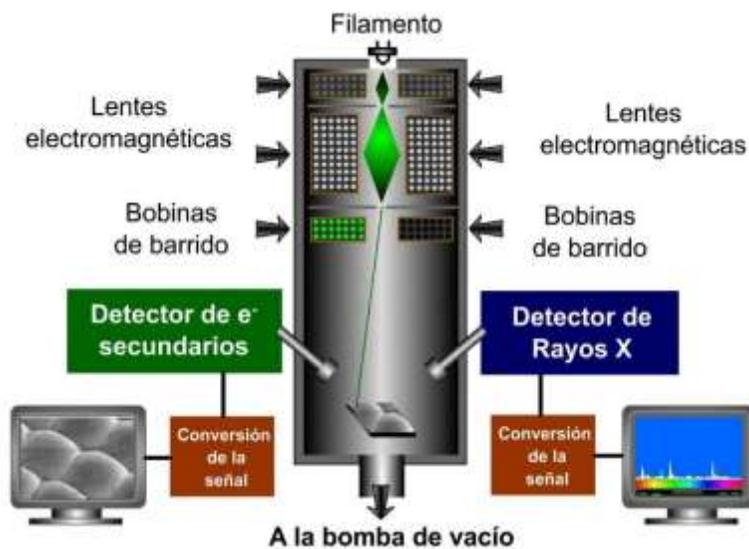
### 6.6.2 Microscopía Electrónica de Barrido

En la microscopía electrónica de barrido, SEM del inglés “Scanning Electron Microscopy”, los electrones secundarios de baja energía (<50 eV) emitidos de la superficie de la muestra se puede utilizar para dar un tipo de imagen (Figura 11). Para facilitar esta emisión de electrones se metaliza la muestra que es recubrirla de una pequeña capa de un metal conductor como el Au. El haz de electrones se puede concentrar en una zona diminuta (~20 Å) que puede barrer la superficie del espécimen al ser deflectado por bobinas adecuadas.

Los electrones secundarios se detectan por encima del espécimen y la imagen muestra la intensidad de los electrones secundarios emitidos por las diferentes partes de la muestra (Henhapl & Jones, 1971).

El SEM utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie para crear una imagen que refleja las características superficiales de la muestra. Mediante esta técnica se obtiene información de las formas, texturas y composición química de los constituyentes de la muestra (Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid, 2010).

Figura 11. Microscopía electrónica de barrido



Fuente: Matamoros (2017)

### 6.6.3 Termogravimetría

Es una técnica en la cual se mide el peso de una muestra frente al tiempo o a la temperatura mientras se somete la muestra a un programa de temperatura controlado en una atmósfera específica. El programa de temperatura puede mantenerse constante (isotermo), calentamiento a velocidad constante (el más habitual junto al isotermo), enfriamiento o cualquier combinación de ellos. Lo habitual es que se produzca una pérdida de peso, pero también es posible que haya una ganancia de peso. La atmósfera puede ser estática o

dinámica con un caudal determinado (también se emplean condiciones de presión reducida) y los gases más habituales son  $N_2$ , aire, Ar,  $CO_2$ . También se usan  $H_2$ ,  $Cl_2$ , o SO(Angulo, 2018). Una característica fundamental de la Termogravimetría (TG) es que sólo permite detectar procesos en los que se produce una variación de peso tales como descomposiciones, sublimaciones, reducción, desorción, absorción, etc. Mientras que no permite estudiar procesos como fusiones, transiciones de fase, etc.

El equipo utilizado en TG es una termobalanza que consta de 5 partes principales:

1. Una micro balanza electrónica y su equipo de control
2. Un horno y los sensores de T, habitualmente un termopar colocado en las proximidades de la muestra, pero no en contacto con ella.
3. Un programador de T
4. Un controlador de la atmósfera (tipo de gas y caudal)
5. Dispositivo para almacenar los datos de peso y T fundamentalmente

El resultado de un análisis termogravimétrico se suele presentar en forma de gráfica conocida como termograma o curva termogravimétrica. En ella se presenta el peso en el eje y (en valor absoluto o en porcentaje) frente a la temperatura o al tiempo en el eje x. Al mismo tiempo se suele representar la curva DTG, que es la primera derivada de curva TG frente al t o a la T, es decir la velocidad de pérdida o ganancia de peso. Las unidades por tanto serán %/min, %/°C, mg/min o mg/°C. La gráfica DTG ayuda a identificar con mayor claridad las T inicial y final de los procesos, además permite detectar la presencia de procesos solapados. Un parámetro importante en las curvas DTG es la T del máximo que es la T de máxima velocidad de reacción, o de máxima velocidad del proceso en general (Zuñiga, 2016).

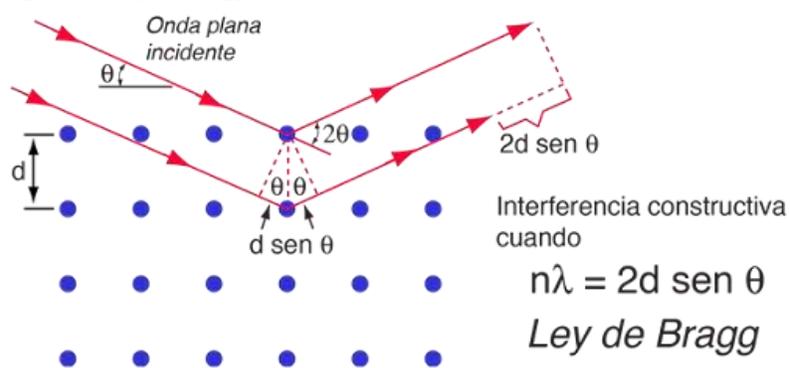
#### **6.6.4 Difracción de Rayos X**

La aplicación fundamental de la difracción de Rayos X (DRX) es la identificación cualitativa de la composición de las fases cristalinas de una muestra. La difracción está basada en las interferencias que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de anchura comparable a la longitud de onda de la radiación. La técnica de DRX consiste en la emisión de rayos X sobre una muestra sólida, cristalina, policristalina o

polvos de cristal. Debido al arreglo periódico de las moléculas o átomos de la muestra, los planos cristalinos reflejan los rayos en diferentes direcciones. La interferencia de los rayos reflejados por un conjunto de planos paralelos igualmente espaciados sucede para cierto ángulo  $2\theta$  entre el vector del rayo incidente y el vector del rayo reflejado.

La famosa ley de Bragg estipula la siguiente relación entre la longitud de onda de los rayos  $x$  y el ángulo  $\theta$  para un conjunto de planos  $(h, k, l)$  espaciados una distancia  $d$ .

**Figura 12. Ley de Bragg**



Fuente: Olmo (2017)

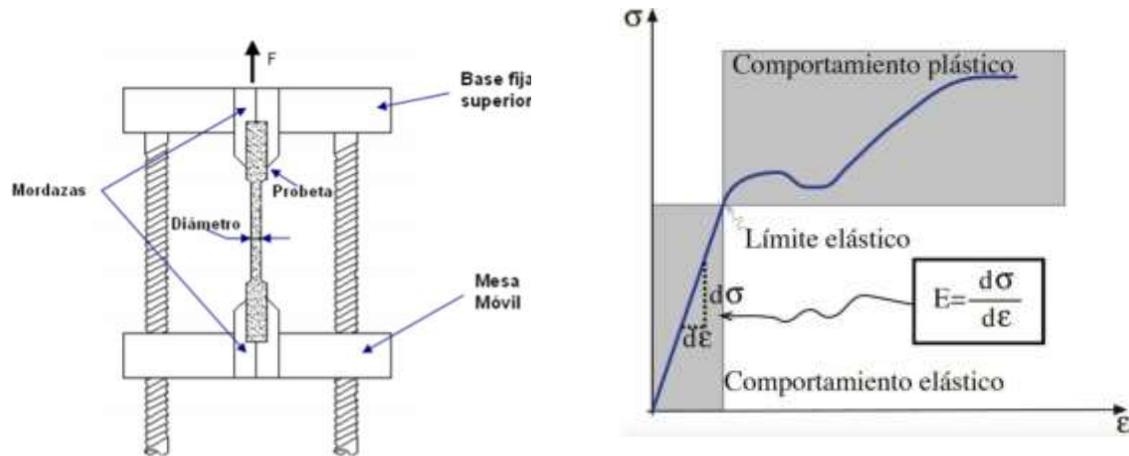
El análisis de difracción de rayos  $x$  se realiza en base a la ley de Bragg (Figura 12), con esto es posible dilucidar el tipo de estructura de una muestra sólida y determinar sus parámetros de red. Caracteriza todo tipo de material con estructura cristalina (no amorfa), los rayos  $x$  difractan los materiales y producen distintos patrones de barrido que funcionan como “huella digital” de un material cristalino para permitir la identificación y cuantificación de fases desconocidas en una muestra. Las muestras pueden estar en forma de polvo o en sólido.

## 6.7 ENSAYO DE COMPRESIÓN PARA LAS PLACAS DE FIBROCEMENTO

El ensayo de compresión mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. El ensayo se realiza aplicando una fuerza  $F$  (carga) sobre un determinado material, ecuación (6.1) y (6.2). Este ensayo (Figura 13a) es utilizado para medir la resistencia de un material cuando es sometido a la acción de una fuerza. Esta prueba consiste en deformar una probeta de ensayo por fuerza de compresión para conocer propiedades mecánicas como la resistencia, rigidez y ductilidad. Sabiendo que los

resultados del ensayo para un material dado son aplicables a todo tamaño y formas de muestra, se ha establecido una prueba en la cual se aplica una fuerza de tensión sobre una probeta de forma cilíndrica y tamaño normalizado, este ensayo se lleva a cabo a temperatura ambiente entre 10°C y 35°C (Castellanos Araujo, 2008)

Figura 13. Ensayo de tensión a), Montaje físico, b) módulo de elasticidad, gráfica esfuerzo-deformación



a)

b)

**Fuente:** Universidad Tecnológica Nacional (2020), Soriano et al., (2016)

$$\text{Esfuerzo } \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6.1)$$

$$\text{Deformación } \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6.2)$$

De donde:

$A_0$  = Área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo

$l_0$  = Distancia original entre marcas calibradas

$l$  = Es la distancia entre las mismas después de haberse aplicado la fuerza  $F$

En la Figura 13b se muestra la curva correspondiente al comportamiento esfuerzo-deformación de un material, donde se puede identificar la parte lineal de la zona elástica del material. Para calcular el módulo de Young, se calcula el valor de la pendiente entre el esfuerzo y la deformación.

## 6.8 ENSAYO DE FLEXIÓN

En los materiales dúctiles, la curva esfuerzo-deformación generalmente pasa por un valor máximo, este esfuerzo máximo es la resistencia del material a la tensión. La falla ocurre a un esfuerzo menor después de que el encuellamiento ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga. Por otro lado, los materiales con poca ductilidad (frágiles) como el fibrocemento, la falla ocurre a la carga máxima donde la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son las mismas. En muchos materiales frágiles el ensayo de flexión se realiza aplicando la carga en tres puntos lo que causa la flexión del material (Figura 14), ecuación (6.3).

$$\text{Deformación } \varepsilon = \frac{6wh}{L^2} \quad (6.3)$$

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

Donde F es la carga a la fractura, L la distancia entre los dos puntos de apoyo, w es el ancho de la probeta, y h es su altura.

Figura 14. Ensayo de flexión para tres puntas



## 6.9 MÓDULO DE ELASTICIDAD-MÓDULO DE YOUNG

El módulo de elasticidad E (Figura 15) es una medida de rigidez del material. Un material rígido, con un alto módulo de elasticidad, conserva su tamaño y su forma incluso al ser

sometido a una carga en la región elástica. Este módulo se puede hallar calculando la pendiente de la porción inicial lineal de la gráfica de esfuerzo versus deformación. El módulo de Young se calcula con la ley de Hooke para materiales sólidos (Gutiérrez et al., 2017).

Si aplicamos una fuerza  $F$  a una barra de longitud  $l_0$  el material se deforma longitudinalmente y se alarga  $l - l_0$ , ecuación (6.4).

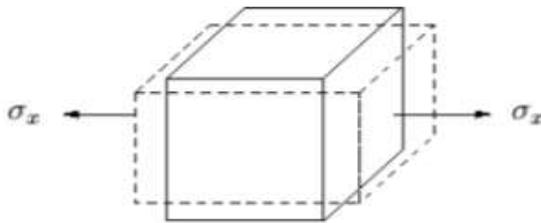
$$\frac{F}{S} = E \frac{l - l_0}{l} \quad (6.4)$$

La razón de proporcionalidad entre el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y deformación unitaria (deformación por unidad de longitud) está dada por la constante  $E$ , denominada módulo de Young, que es característico de cada material.

La Ley de Hooke relaciona la deformación  $\varepsilon_x$  de una barra sometida a esfuerzo axial, con la tensión normal generada por dicho esfuerzo  $\sigma_x$ , mediante la constante  $E$  que se denomina módulo de elasticidad lineal o módulo de Young.

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (6.5)$$

**Figura 15. Módulo de elasticidad**



**Fuente:** Químicas (2019)

La rigidez de un material queda caracterizada por la relación entre el esfuerzo  $\sigma_x$  y deformación  $\varepsilon_x$ , o sea por el módulo de Young como se muestra en la ecuación 6.6.

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{\frac{F_x}{A}}{\frac{\Delta x}{x}} \quad (6.6)$$

El módulo de Young tiene las mismas unidades que el esfuerzo (Johnson, 2019).

## 6.10 DENSIDAD, ABSORCIÓN Y HUMEDAD

Densidad: se define como la cantidad de materia contenida en un volumen dado de espacio, siendo la masa y el volumen propiedades generales o extensivas de la materia. Se expresa como:  $\rho = m/V$  Donde  $\rho$ ,  $m$  y  $V$  corresponden a la densidad, masa y volumen de una sustancia respectivamente. La densidad del cemento desempeña un papel significativo en su producción y funcionamiento. Los minerales crudos se calientan en hornos enormes para promover cambios químicos en éstos, obteniendo el “Clinker”. Los pasos finales en la fabricación del cemento implican la molienda y el mezclado, los cuales producen ese polvo fino o cemento. El cemento se muele hasta una finura determinada puesto que este tamaño de partícula influye en su cinética de hidratación y en el desarrollo de la resistencia. La reducción de los tamaños de partícula promedio, produce generalmente una mayor resistencia.

Absorción: es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas. Se obtiene generalmente después de haber sometido al material a una saturación durante 24 horas a alta temperatura, cuando ésta termina se procede a secar superficialmente el material, y por diferencias de masa se logra obtener el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material (NTC 237-2020, NTC 176-2010).

Humedad: cantidad de agua que hay en el hormigón terminado que depende de su porosidad. El movimiento del agua en el hormigón ocurre como consecuencia de condiciones no equilibradas, ya sean presiones, humedades relativas o potenciales eléctricos. La superficie libre del sólido (por ejemplo, de un poro) tiene un exceso de energía debido a la falta de enlaces en las moléculas cercanas. En los poros de la pasta de cemento, esta energía superficial tiende a compensarse absorbiendo moléculas de vapor de agua sobre dichas superficies ASTM E1907-04.

El agua contenida en los materiales en base cemento depende del equilibrio entre su entorno atmosférico y las propiedades de la masa. De esta forma, el perfil de contenido de humedad puede variar con la climatología. En un entorno con una humedad relativa moderada, el material cementicio tiende a perder el agua que se almacena en sus poros. Este proceso puede ser importante cuando el cemento está fraguando y es muy joven. Todo

esto significa que al cabo de unos pocos días el contenido en agua disminuye drásticamente cerca de la superficie, mientras que el núcleo contiene, sin embargo, un alto porcentaje de agua en sus poros. En hormigones o morteros más antiguos, el proceso de secado es más lento, cambiando sin embargo el contenido de humedad en el interior, según esté o no en contacto con un ambiente de mayor o menor humedad relativa (Guilbaud et al., 2000).

## **6.11 REFERENTE NORMATIVO**

Para el desarrollo de este trabajo se ha hecho uso de las normas técnicas que se enuncian a continuación:

- ASTM C305 - 20 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
- ASTM. C109/C109M – 20b Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)
- ASTM C293 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)
- ASTM C78/C78M – 21 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
- NTC 5069:2002 Paneles prefabricados de fibrocemento. Ensayo de compresión
- NTC 112:2021 Cementos. Mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica
- NTC 176:2019 Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso

## 7 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se planteó la adición de la sílice en diferentes formas y proporciones 3%,5% y 7% (cascarilla de arroz molida, ceniza de cascarilla de arroz y microsílíce) para evaluar el efecto de su inclusión en las propiedades físicas y mecánicas de placas de fibrocemento. La primera fase corresponde a la obtención de la sílice y caracterización de la materia prima y la segunda corresponde a la elaboración de muestras de fibrocemento y al estudio de propiedades fisicoquímicas como humedad, absorción y densidad, mecánicas (compresión y flexión), morfológicas (tamaño, forma, en función de la forma y la proporción de sílice utilizada.

### 7.1 FASE 1: OBTENCIÓN DE LA SÍLICE EN DIFERENTES FORMAS

#### 7.1.1 Cascarilla molida

Se utilizó cascarilla de arroz (Figura 16a) resultado del cultivo en la zona central de Colombia (Tolima), se realizó lavado con agua de grifo para retirar impurezas y toda clase de sólido y se llevó a horno de convección forzada a 100°C por una hora para secarla. Después, se llevó a molino eléctrico para grano econ capacidad de molienda de 50g, potencia 200W voltaje 110V, para reducir su tamaño (Figura 16b).

Figura 16. Cascarilla de arroz a) Muestra seca b) Muestra molida



a)



b)

### 7.1.2 Ceniza de cascarilla de arroz

Se lavó la cascarilla de arroz con agua de grifo y se llevó a horno de convección forzada a una temperatura de 100°C por tres horas (Figura 17a), posteriormente se llevó la muestra a mufla con una rampa inicial de 10°C/min hasta alcanzar una temperatura de 400°C, se sostuvo isoterma durante 1 hora (Figura 17b). En este tiempo se eliminaron componentes orgánicos como celulosa, lignina, hemicelulosa, ácido acético y proteínas. Luego se llevó a una temperatura de 700°C y se mantuvo isoterma durante una hora para eliminar impurezas como calcio, potasio, magnesio y manganeso, y otras secundarias como aluminio, hierro boro y fósforo generalmente en forma de óxido.

Figura 17. Proceso de obtención de ceniza de cascarilla de arroz a) Secado en horno de convección forzada, b) Incineración en mufla, c) Producto final



a)

b)

c)

### 7.1.3 Lixiviación ácida

La ceniza obtenida del proceso térmico (Figura 17c) presenta algunas impurezas inorgánicas diferentes a la sílice; para eliminar dichas impurezas se realizó un proceso de lixiviación ácida. Para este proceso químico se preparó una solución de HCl a una concentración de 1M, 2M y 3M (Figura 18b), se adicionó agua destilada hasta aforar a 250 ml y se agregaron 5g de ceniza de cascarilla de arroz, la solución se llevó a una temperatura de 85°C en plancha con agitación magnética por una hora mediante un sistema de reflujo (Figura 18c). Para este proceso se utilizó ácido clorhídrico al 37% de J.T Baker (Figura 18a). La pasta resultante se lavó cinco veces con agua destilada para eliminar la solución ácida, se filtró usando una bomba de vacío (Figura 18d) y se verificó el valor de pH. Con este proceso se transforma la ceniza en un polvo blanco con alto contenido de sílice (Junior et al., 2010; Arcos et al., 2007; Selvakumar et al., 2014; López et al., 2015).

**Figura 18. Lixiviación ácida a) HCl 37% b) Preparación de solución 1M, 2M, 3M c) Tratamiento químico, d) filtrado de la sílice**



a)



b)



c)



d)

#### **7.1.4 Microsílice**

Para la obtención de las micropartículas de sílice (Figura 19b), se tomó una muestra seca de sílice y se trituró en el mortero, posteriormente fue pasada por tamiz certificado de acero inoxidable para gradación de suelos y agregados (Figura 19a), con diámetro de 8" (203.2 mm), altura de 2" (50.8 mm) y malla de 90  $\mu\text{m}$ , con la finalidad de garantizar un tamaño de partícula más uniforme.

**Figura 19. Obtención de micropartículas a) Sílice mayor a 90  $\mu\text{m}$  b) Microsílice**



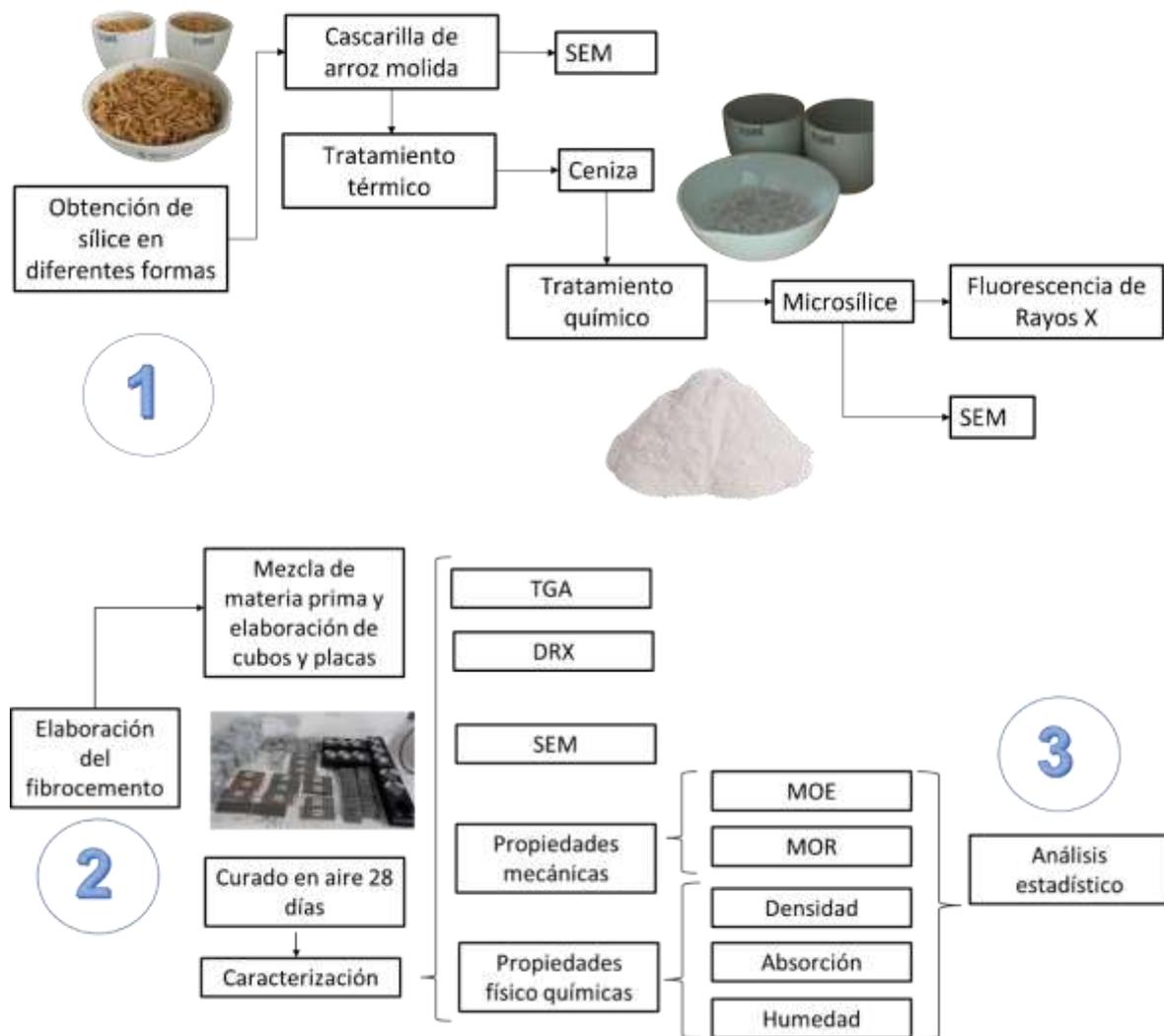
a)



b)

## 7.2 FASE 2 ELABORACIÓN DEL FIBROCEMENTO

Figura 20. Diagrama de la metodología



Para la elaboración de las muestras de fibrocemento (Figura 20) se utilizó la siguiente materia prima: cemento, carbonato de calcio, bentonita, fibra de vidrio y sílice en diferentes formas. La formulación se realizó para una masa total de 300g: Cemento hidráulico uso general línea vertuá plus de Cemex tipo MM/B(P-C)-28 más sílice en diferentes formas 80,2%. Carbonato de calcio (marmolina  $\text{CaCO}_3$  90%) 14,70%. Fibra de vidrio Cem-FIL 60 Diámetro del filamento:  $14 \mu\text{m}$  y longitud de 12mm 3,10%. Bentonita 1,60% y plastificante reductor de agua de alto rango basado en policarboxilatos de muy alta fluidez y reducción de agua de sumiglas S.A 0,4%. Se utilizó una relación agua/cemento de 0,33 y se tomaron concentraciones de 0%, 3%,5% y 7% basadas en el trabajo anterior de Hincapié (2017).

Para cada formulación, se realizó el diseño de experimentos que se presenta en la Tabla 3, con 4 repeticiones para cada formulación, para un total de 40 muestras para compresión y 40 muestras para flexión que se tomaron en forma aleatoria para los análisis. Se realizó la mezcla teniendo en cuenta la norma ASTM C305 - 20 Standard Practice for \Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency (ASTM C305 -20, 2020).

**Tabla 3. Formulación para el fibrocemento masa total de 300g**

Muestras	Cemento (g)	Carbonato de calcio (g)	Agua (mL)	Plastificante (mL)	Fibra de vidrio (g)	Bentonita (g)	Forma de Sílice (%)	Sílice (g)
MC	240,60	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	0	0,00
MCA-3	233,38	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	3	7,22
MCA-5	228,57	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	5	12,03
MCA-7	223,76	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	7	16,84
MCE-3	233,38	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	3	7,22
MCE-5	228,57	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	5	12,03
MCE-7	223,76	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	7	16,84
MM-3	233,38	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	3	7,22
MM-5	228,57	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	5	12,03
MM-7	223,76	43,80	165,00	1,20	9,30	4,80	7	16,84

MC=Muestra control, MCA Muestra cascarilla de arroz al 3%, 5% y 7%, MCE= Muestra ceniza al 3%, 5% y 7%, MM= Muestra microsílíce al 3%, 5% y 7%

Para elaborar las placas de fibrocemento se mezclaron los diferentes componentes junto con el agua en una batidora industrial de 10 Litros Equimaq (Figura 21), con velocidad en bajo durante 5 min.

Figura 21. Mezcla de diferentes componentes del fibrocemento a) batidora Equimaq b) Mezcla final



a)

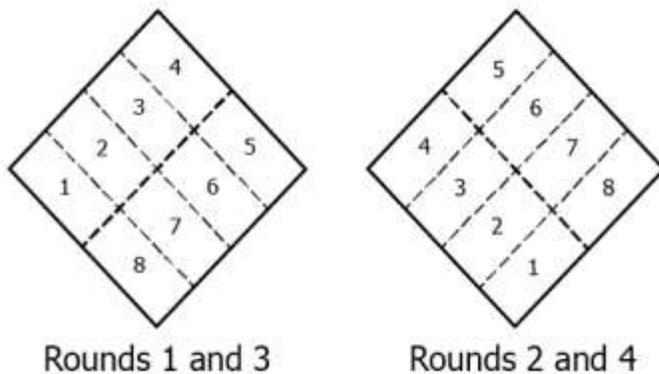


b)

### 7.2.1 Muestras para compresión

Se utilizó molde triple de plástico "Deslauriers" fabricado para fundir cubos de mortero, con arista de 2" (50,8 mm) y se siguió la norma Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)(ASTM C109/109M -16a, 2016). Cada muestra fue colocada en el molde y prensada con pistón de plástico según norma que define un recorrido de 32 movimientos (Figura 22) para garantizar uniformidad en la muestra. Se colocó una primera capa aproximadamente de 25 mm a la mitad del molde para apisonar la muestra en cada compartimiento por un tiempo 10 s en cuatro rondas en ángulo recto seguido de golpes contiguos sobre la superficie; luego se alisaron los cubos usando una paleta en la parte superior con el propósito de nivelar la muestra y garantizar un espesor más uniforme (Figura 23).

Figura 22. Apisonamiento en el moldeo de probetas



**Figura 23. Elaboración de muestras para compresión a) Molde triple de plástico b) Mezcla en moldes c) Briquetas secas**



a)

b)

c)

Para el cálculo en la formación de las probetas cúbicas se tomó como base una masa total 825 g correspondiente a una masa de sólidos de 633 g y una masa de agua de 192 mL para el molde de tres cubos. Las muestras se secaron a temperatura ambiente por un tiempo de fraguado de 28 días, con una humedad relativa del 70% y una temperatura aproximada de 18°C.

### 7.2.2 Muestras para flexión

Se utilizó la norma Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)(ASTM C78/C78M – 21, 2010) para la conformación de las probetas con dimensiones de 150x50x10 mm Figura 24; se tomó como base una masa total 200 g correspondiente a una masa de sólidos de 153,8 g y una masa de agua de 46,2 mL.

**Figura 24. Proceso de elaboración de muestras de fibrocemento) Molde para briqueta de flexión b) Mezcla en moldes c) Briquetas secas**



a)

b)

c)

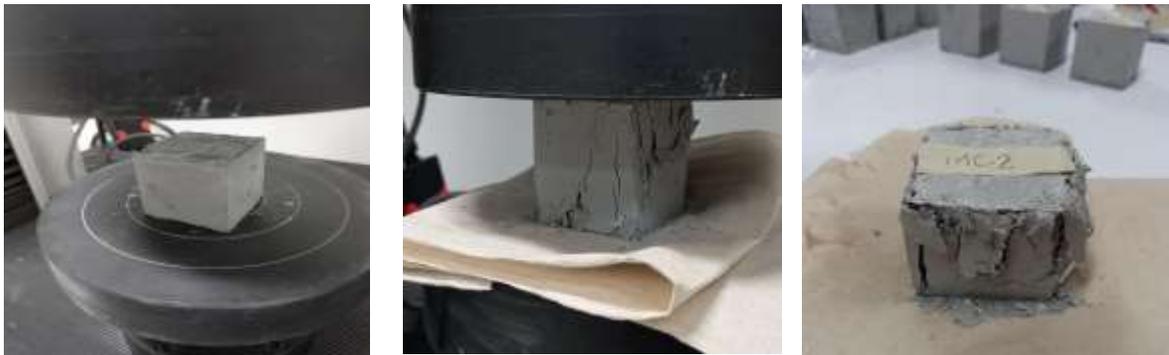
### 7.3 CARACTERIZACIÓN DEL FIBROCEMENTO CON LA ADICIÓN DE SÍLICE EN DIFERENTES FORMAS

A continuación, se muestran las pruebas mecánicas y propiedades físico-químicas para las placas de fibrocemento.

#### 7.3.1 Ensayo de compresión

Se realizó un ensayo de compresión para medir la resistencia del material cuando se aplica una fuerza estática o gradualmente aplicada (Figura 25). Este ensayo se hizo según la norma Ensayo para comprobar la resistencia a la compresión (NTC 5069, 2002). Las medidas se realizaron en una máquina universal de ensayos uniaxial UNITED, capacidad máxima de carga 100N, resolución 1 kN, velocidad variable de 0,001 in/min hasta 1 in/min.

Figura 25. Ensayo de compresión a) Momento inicial de la prueba b) Carga en la muestra c) Fractura



a)

b)

c)

Los parámetros usados para la prueba fueron: Testing machine STM- 100kN 0130218 N/S Celda de carga (TVI116995) Units (LBS) 22480 velocidad de cruceta (mm/min) or rate 50 Extensión o posición medido por XHD-100.

El software entrega los datos correspondientes a la fuerza aplicada y el desplazamiento como se observa en la Figura 26, para realizar el cálculo del módulo de elasticidad se realizaron los cálculos según las ecuaciones (6.1) y (6.2) para determinar el esfuerzo y la deformación (Figura 27). La gráfica del comportamiento mecánico del material se halló con el programa Origin para el tratamiento de datos.

**Figura 26. Datos máquina universal de ensayos uniaxial UNITED para compresión**

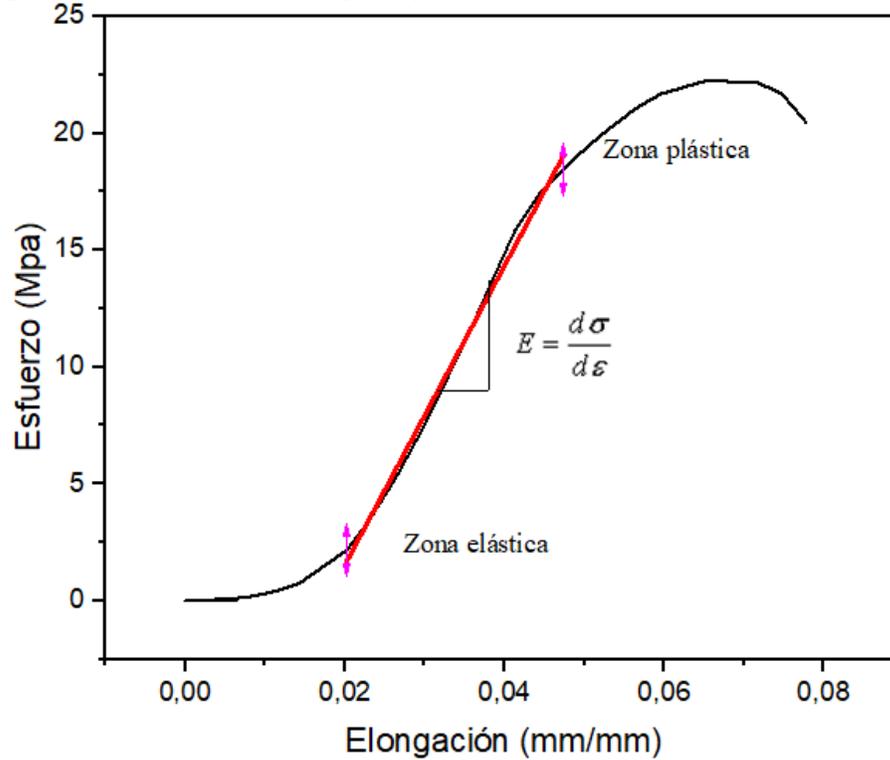
A	B	C	D	E	F
TESTNUM	POINTNUM	TIME	POSIT	FORCE	EXT
1543	1	0,124	0	0,098333	0
1543	2	0,222	-0,0127	-2,40954	0,0127
1543	3	0,322	-0,1543	0,688432	0,154305
1543	4	0,422	-0,31115	4,474783	0,31115

**Figura 27. Cálculo del esfuerzo y deformación del material usando el programa Origin**

	A(X1)	B(Y1)	C(X2)	D(Y2)
Long Name	Alargamiento	carga	Elongación	Esfuerzo
Units	mm	N	mm/mm	Mpa
Comments			altura inicial 50,9	área contacto 51*51
F(x)=			A/50,9	B/(51*51)
1	0	0,19667	0	7,56117E-5
2	0	0,93429	0	3,59204E-4
3	0,17145	1,37686	0,00337	5,29359E-4
4	0,33084	19,5712	0,0065	0,00752
5	0,33084	19,5712	0,0065	0,00752

En la Figura 27 se tomaron las medidas de altura y área de contacto utilizando un pie de rey con resolución de 0,05 mm para cada una de las muestras, luego se realizaron cada una de las gráficas. En la Figura 28 se muestra la gráfica de esfuerzo y elongación a partir de la cual se obtiene el valor de la pendiente correspondiente al módulo de Young.

Figura 28. Gráfica esfuerzo vs elongación y cálculo del módulo de elasticidad



### 7.3.2 Ensayo de flexión en tres puntos

El ensayo de flexión (Figura 29) consistió en aplicar carga a tres puntos para causar la flexión del material, teniendo en cuenta la norma Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión del hormigón (utilizando viga simple con carga en el punto central) (ASTM-C293, 2015).

**Figura 29. Prueba de Flexión a) Momento inicial de la muestra b) Prueba de flexión tres puntas c) Fractura**



a)

b)

c)

Los parámetros usados para la prueba fueron: Testing machine STM-100 kN 0130218 N/S Celda de carga (TVI116995), units (LBS) 22480 valor de precarga (-N) 1 velocidad de cruceta (mm/min) or rate, extensión o posición medido por EZ 2-2(TEST) (9988).

En la Figura 30 se muestran los valores entregados por el software de la máquina de ensayos y se realizaron los cálculos para el esfuerzo y la deformación según ecuaciones (6.2) y (6.3) (Figura 31 y Figura 32) para determinar el módulo de rotura.

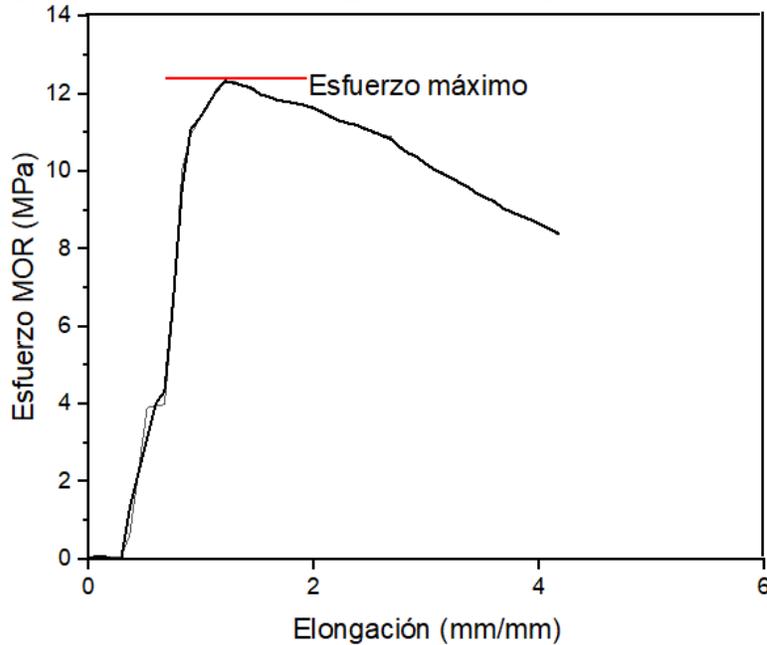
**Figura 30. Datos máquina universal de ensayos uniaxial UNITED para ensayo de flexión**

A	B	C	D	E	F
TESTNUM	POINTNUM	TIME	POSIT	FORCE	EXT
1463	1	2,17	-0,000635	-0,19672	0,000635
1463	2	2,271	-0,000635	-0,44257	0,000635
1463	3	2,37	-0,04191	2,065295	0,04191
1463	4	2,469	-0,120650001	1,57353	0,12065
1463	5	2,569	-0,20065999	0,983481	0,20066

Figura 31. Cálculo del esfuerzo y deformación del material usando el programa Origin

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)
Long Name	Alargamien	carga	Esfuerzo MOR	Elongación
Units	mm	N	Mpa	mm/mm
Comments			$3 \cdot \text{fuerza} \cdot \text{span} / 2 \cdot \text{ancho} \cdot \text{espesor} \cdot \text{espesor}$	$6 \cdot \text{deformación} \cdot \text{espesor} / \text{span} 2$
F(x)=			$(3 \cdot B \cdot 120) / (2 \cdot 47 \cdot 7 \cdot 7)$	$(6 \cdot A \cdot 7) / (120 \cdot 120)$
1	0,14478	82,0713	6,4146	4,22275E-4
2	0,18034	83,30064	6,51069	5,25992E-4
3	0,24321	82,85806	6,4761	7,09348E-4
4	0,32131	100,2657	7,83666	9,37154E-4
5	0,39751	157,2583	12,29114	0,00116
6	0,47435	166,7489	13,03291	0,00138
7	0,55309	173,5841	13,56715	0,00161

Figura 32. Gráfica esfuerzo vs elongación, valor correspondiente a la rotura del material



En la Figura 32 se muestra el comportamiento esfuerzo y elongación donde el valor máximo corresponder al módulo de rotura para las placas de fibrocemento.

### 7.3.3 Propiedades físico-químicas

Se realizaron medidas de humedad, densidad relativa según norma Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso (NTC 176, 2019), y absorción, sometiendo el material a una saturación en agua durante 24 horas para determinar por diferencias de masa el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material. Para la determinación del porcentaje de humedad se utilizó una balanza analizadora de humedad marca ACZET Figura 33a capacidad máxima 50 g y se hizo la medición a partir de una muestra obtenida en el resultado de la prueba de compresión Figura 33b y 33c.

Figura 33. Prueba de humedad a) Balanza analizadora b) Muestra en plato del equipo c) Proceso de la medición



a)



b)



c)



a)



b)



c)

### 7.3.4 Absorción

Para esta prueba se tomaron las muestras resultantes de la prueba de flexión Figura 34a, se tomó el peso inicial para cada muestra y se llevó a horno de convección a una temperatura de 90°C por un tiempo de 24 horas. Se tomaron los pesos secos y se sumergieron las muestras en agua por un tiempo de 12 horas Figura 34b, posteriormente se tomó el peso húmedo Figura 34c y se realizaron los cálculos del porcentaje de absorción de acuerdo a la ecuación 7.1. Para esta prueba se calculó el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios porosos dentro de las partículas constituyentes en comparación con la condición seca, NTC 176.

$$\% \text{ absorción} = \frac{\text{Masa}_{\text{humeda}} - \text{Masa}_{\text{seca}}}{\text{Masa}_{\text{seca}}} * 100 \quad (7.1)$$

Figura 34. Prueba de absorción a) Secado en horno b) Muestra sumergidas en agua c) Peso húmedo

### 7.3.5 Densidad

Con la ecuación 7.2 se calculó la densidad, se tomó el peso seco de cada muestra y se realizó el procedimiento por volumen desplazado (principio de Arquímedes Figura 35a) y usando un dinamómetro de 2 N Figura 35b y 35c para determinar el peso sumergido, la medición se realizó con las muestras que estuvieron en saturación de agua por 12 horas.

Figura 35. Proceso de medición de la densidad a) Principio de Arquímedes b) Peso inicial c) Peso sumergido



a)

b)

c)

$$\rho = \frac{Masa_{\text{peso seco}}}{Masa_{\text{peso húmedo}} - Masa_{\text{peso sumergido}}} * Densidad_{\text{agua}} \quad (7.2)$$

Finalmente, Se realizó un análisis estadístico con el fin de correlacionar los resultados de las variables independientes y dependientes, se realizaron dos medidas para la densidad, método por diferencia de pesos y volumen desplazado, sin embargo los valores para la densidad directa provienen de una distribución no normal lo que invalida las pruebas de comparación de la varianza, mientras que, las medidas de la densidad por diferencia provienen de una distribución normal, por tal motivo, se define para este trabajo realizar la correlación con la densidad por el método directo (ver anexo B).

## **7.4 CARACTERIZACIÓN DEL FIBROCEMENTO**

### **7.4.1 Análisis por Fluorescencia de Rayos X (XRF)**

Luego de la obtención de las micropartículas de sílice, las muestras fueron secadas a 105°C por un periodo de 12 horas, cada una con un peso aproximado de 8 g. Después fueron mezcladas con cera espectrométrica de merk en una relación cera de 10:1, homogenizada por agitación y llevadas a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto para generar tres pastillas prensadas de 37 mm de diámetro. Con estas pastas se realizó un análisis semicuantitativo con el software SemiQ5 mediante 11 barridos con el fin de detectar los elementos presentes en la muestra excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos. Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW-2440 philips (WDXRF) equipado con un tubo de rodio, con una potencia de 4 kW, una sensibilidad de 100 ppm (0,01%) en la detección de elementos pesados metálicos. La prueba se realizó en el laboratorio Inter facultades de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá

### **7.4.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)**

Se realizó análisis para muestra control de fibrocemento, fibrocemento adición cascarilla 3%, ceniza 3%, microsílíce 3%, microsílíce 5% y Microsílíce 7%, equipo Themys ONE de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales + rampa de calentamiento 10°C/min atmosfera de N<sub>2</sub> desde temperatura ambiente hasta 700°C. Este análisis se realizó con el fin de determinar la descomposición orgánica del material, % de pérdida de peso por descomposición, por deshidratación, etc, en función del tipo de aditivo y del % de adición.

### **7.4.3 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

Se realizaron barridos por SEM para la muestra control de fibrocemento, adición de cascarilla al 3%, ceniza al 3% y microsílíce al 5%, equipo QUANTA 250, microscopio electrónico de barrido de la Universidad de Caldas. Se prepararon las muestras con recubrimiento de oro espesor aproximado entre 15 y 20 nm, tiempo de deposición de 1,5 min para mejorar el contraste en las imágenes. Se realizaron barridos con un valor de 17kV

para mejorar la resolución, se utilizó detección química EDAX para identificar componentes de los productos de hidratación del cemento.

#### **7.4.4 Análisis por Difracción de Rayos X (XRD)**

Se utilizó la técnica de difracción de rayos X para identificar las fases presentes en el fibrocemento con adición de: cascarilla 5%, ceniza 5%, microsíllice 5% y muestra control. Las muestras se pulverizaron y se tamizaron para obtener un polvo homogéneo. Los patrones de difracción fueron obtenidos utilizando el equipo difractómetro RIGAKU, MINIFLEX II de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, operado a temperatura ambiente, equipado con una fuente de radiación de Cu K $\alpha$  ( $\lambda= 1.540562 \text{ \AA}$ ), y fuente de rayos X a 30 kV y 15 mA, el barrido se realizó entre 5° y 70°, en escala de 2 theta y con un barrido de paso de 0.02 grados/s.

## **8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **8.1 FASE 1: TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN PARA SÍLICE**

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de la sílice utilizando la técnica de fluorescencia de rayos X y los resultados del fibrocemento con adición de cascarilla de arroz, ceniza de cascarilla de arroz y microsíllice utilizando las siguientes técnicas: Análisis termogravimétrico TGA, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido SEM.

#### **8.1.1 Fluorescencia de Rayos X**

Muchas de las formas para extraer sílice de la cascarilla de arroz son a través de la calcinación, sin embargo, quedan impurezas inorgánicas, para esto se realiza un proceso de lixiviación ácida utilizando diferentes reactivos. En el trabajo de (Da Silva et al., 2010), se hizo la limpieza con ácido clorhídrico, sulfúrico, nítrico y peróxido de hidrogeno en reacción con la cascarilla para la eliminación de los elementos inorgánicos resultado del tratamiento térmico.

En este trabajo se utilizó una concentración al 1M, 2 M y 3 M de HCl para el proceso de limpieza en el cual se observó un cambio de color de la ceniza de la cascarilla de arroz tras la eliminación de impurezas y obtención de sílice con alta pureza (Figura 36). Se trabajó con HCl ya que en el trabajo anterior de Hincapié (2017), se determinó la pureza de la sílice al utilizar  $H_2SO_4$ ,  $NHO_3$ , y HCl a 1M y se obtuvo que usando HCl se obtiene el mayor porcentaje de sílice (98,48%) comparado con la muestra control de (93,39%) (Figura 37).

Figura 36. Sílice en diferentes formas a) Ceniza de cascarilla de arroz b) limpieza y obtención de sílice

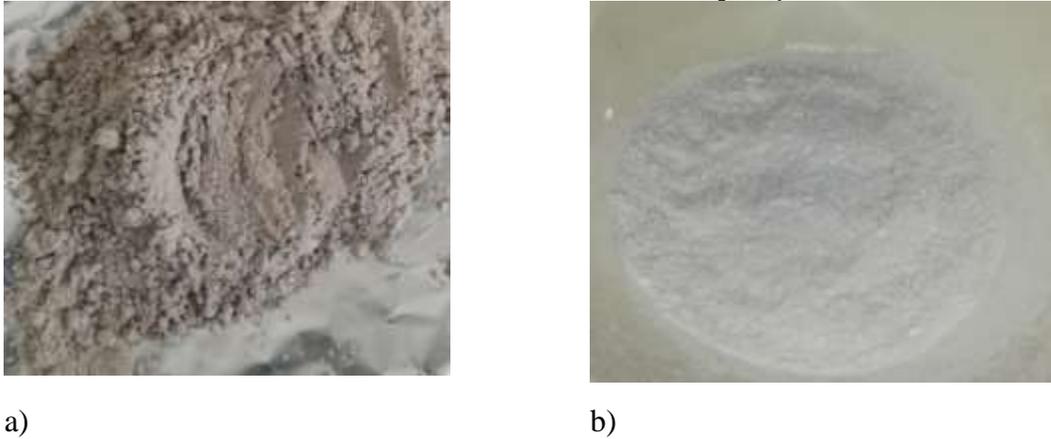
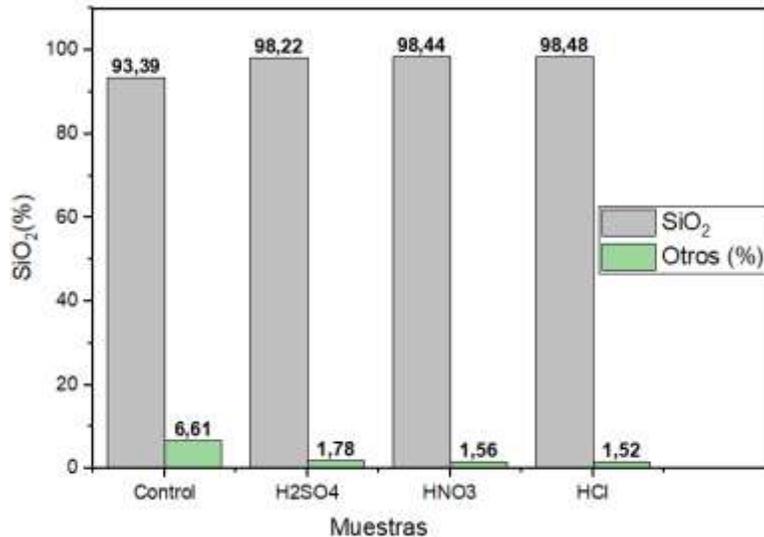


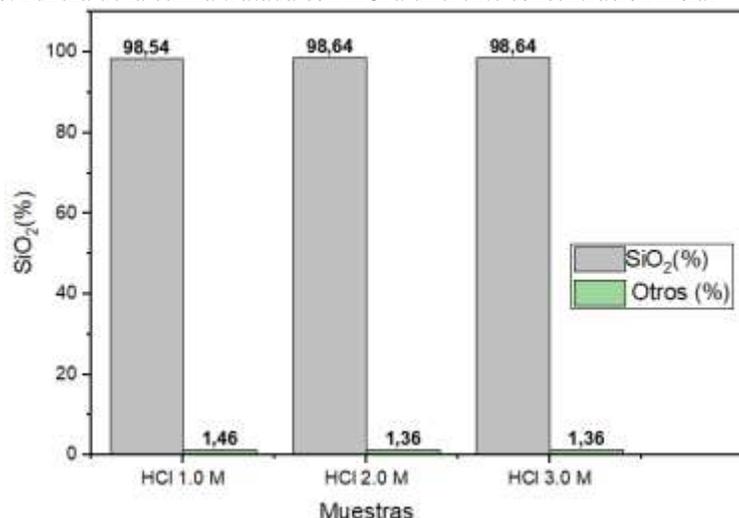
Figura 37. Pureza de la ceniza con tratamiento térmico



Fuente: Hincapié (2017)

Según los resultados de fluorescencia de rayos X que se consolidan en la Figura 38, la ceniza lixiviada en tratamiento con HCl se compone de sílice en porcentaje mayor a 98 % y un contenido de impureza menor al 2,0%. Para las muestras analizadas no se hicieron réplicas debido a que en cada análisis se hacen 11 barridos (Ver anexo A) lo que permite tener una estadística de todos los componentes presentes en el material. No se evidencian cambios significativos en la composición de la microsíllice con el empleo de diferentes concentraciones de ácido clorhídrico, por tanto, es suficiente trabajar con una solución al 1 M para minimizar costos y desperdicios.

Figura 38. Pureza de la ceniza tratada con HCl a diferente concentración molar



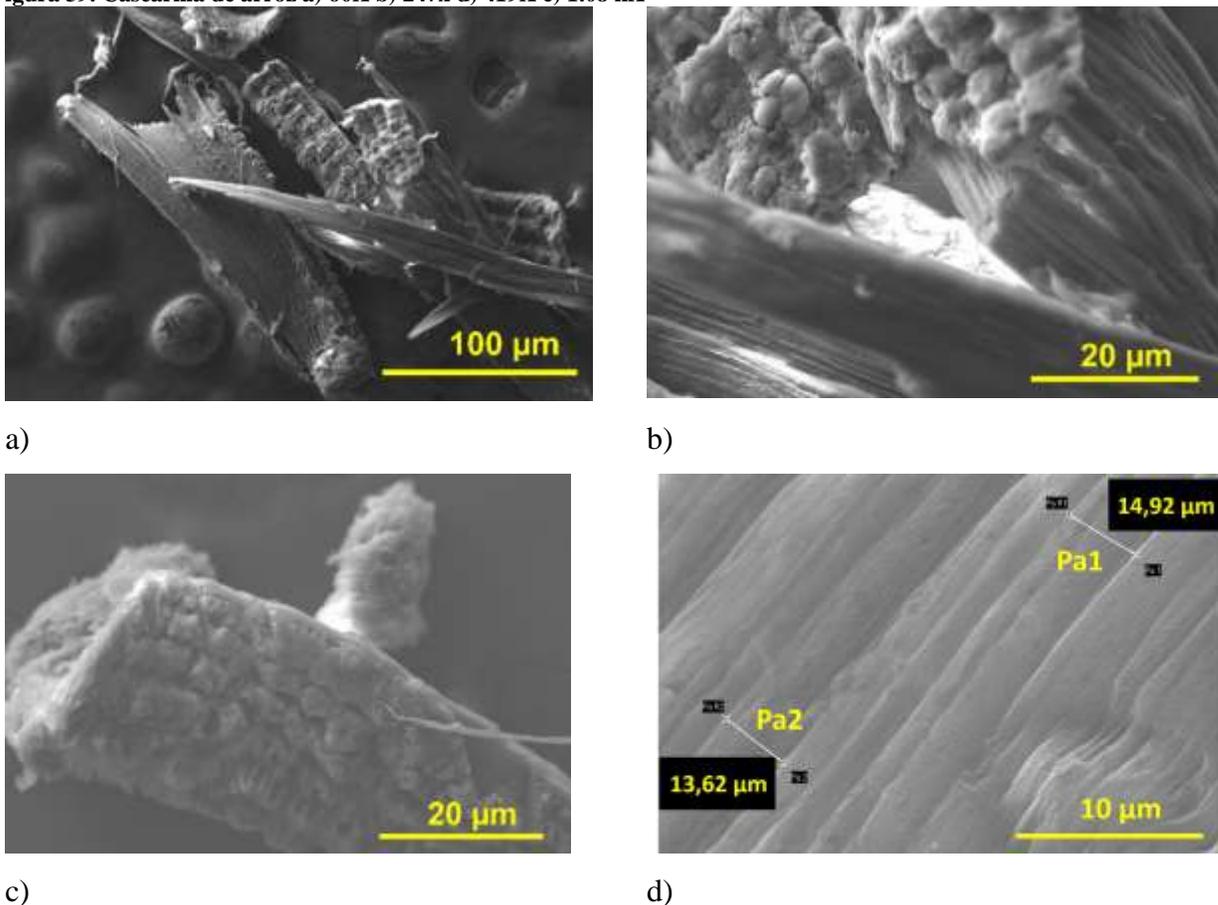
La composición inorgánica de la ceniza de cascarilla de arroz difiere de las cenizas de otras fibras orgánicas en que tiene un elevado contenido en sílice, se encuentra en la ceniza resultante un porcentaje superior al 90%, lo que la convierte en una fuente potencial de sílice. El porcentaje de SiO<sub>2</sub> en la ceniza puede alcanzar el 95%, el 5% restante corresponde a trazas de diferentes óxidos, principalmente K<sub>2</sub>O. Las principales impurezas que contiene esta sílice son calcio, potasio, magnesio y manganeso, y como secundarias aluminio, hierro (10-20 ppm), boro y fósforo (1-40 ppm), generalmente en forma de óxidos (Serrano et al., 2012). En este trabajo se obtuvo una muestra con el 98,54% de sílice y el porcentaje restante correspondiente a impurezas como: óxido de potasio, calcio, magnesio, manganeso, aluminio, hierro, cloro, azufre, fósforo, sodio, plomo (74 ppm), zinc (55 ppm) y rubidio (31 ppm) para una concentración de HCl 1 M lo que corrobora los resultados reportados

### 8.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En la Figura 39 se muestran imágenes de la cascarilla de arroz y microsílíce Figura 40 tomadas con microscopio electrónico de barrido QUANTA 250 a 17kV, las muestras fueron recubiertas con oro, grosor entre 15nm y 20nm por un tiempo de 1,5 minutos para determinar la morfología. En general, la superficie abaxial o externa de la cascarilla de arroz, llamada exocarpo, se caracteriza por tener una estructura simétrica constituida por celdas convexas (presencia de papilas simples), las cuales están separadas por surcos y

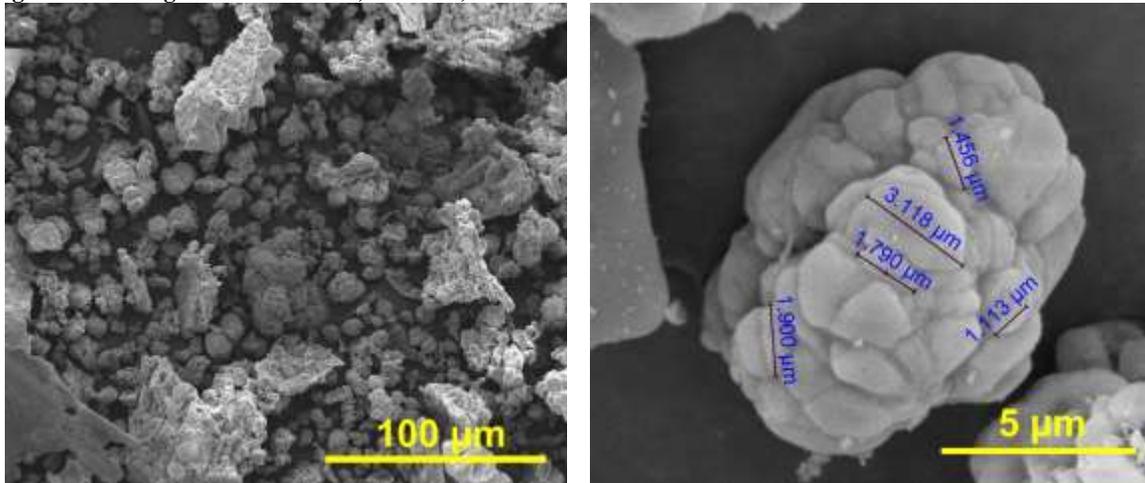
granos de compuestos de silicio dispersos sobre toda la superficie (Figura 39a). En la Figura 39b y Figura 39c se observa la presencia de macroporos unicelulares (estructuras aciculares) (Arcos, Macías, et al., 2007). Se tomaron para la cascarilla de arroz dos medidas para los surcos correspondientes a  $13,63 \mu\text{m}$  y  $14,92 \mu\text{m}$  como se indican en la Figura 39d.

**Figura 39. Cascarilla de arroz a) 60X b) 247x d) 419X e) 1.08 kX**



En la Figura 40a se muestra la estructura de las partículas de la microsílíce tomadas a 40000 X que presentan formas irregulares de diferentes tamaños, las muestras fueron tamizadas a  $90\mu\text{m}$ , sin embargo, en la Figura 40b se muestra una magnificación de la muestra en la cual se observan aglomerados que alcanzan a medir hasta  $5,0 \mu\text{m}$  con forma esférica, resultado de los procesos de hidratación. Entre más pequeñas sean las partículas, mayor es la reactividad puzolánica. Para este trabajo no se observaron cambios entre la ceniza y la microsílíce.

Figura 40. Micrografía microsíllice a) 100um b) 5um



a)

b)

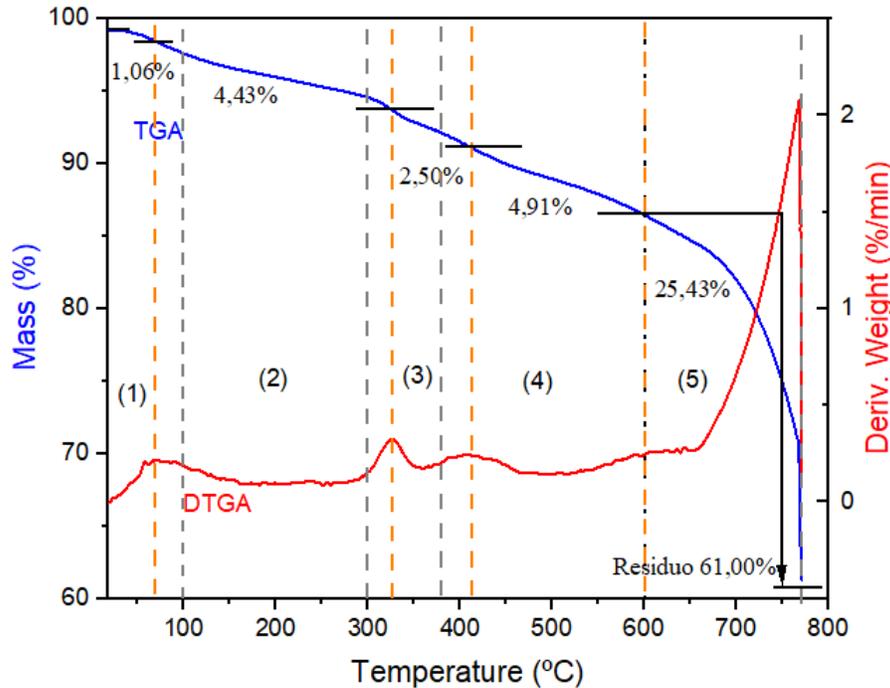
## 8.2 FASE 2 CARACTERIZACIÓN DEL FIBROCEMENTO

En esta sección se presenta la caracterización del fibrocemento con diferentes adiciones y formas por análisis termogravimétrico, rayos X y SEM. Se realiza la caracterización física química, mecánica para las muestras y el análisis estadístico de los datos establecidos para experimentación con fibrocemento.

### 8.2.1 Análisis Termogravimétrico

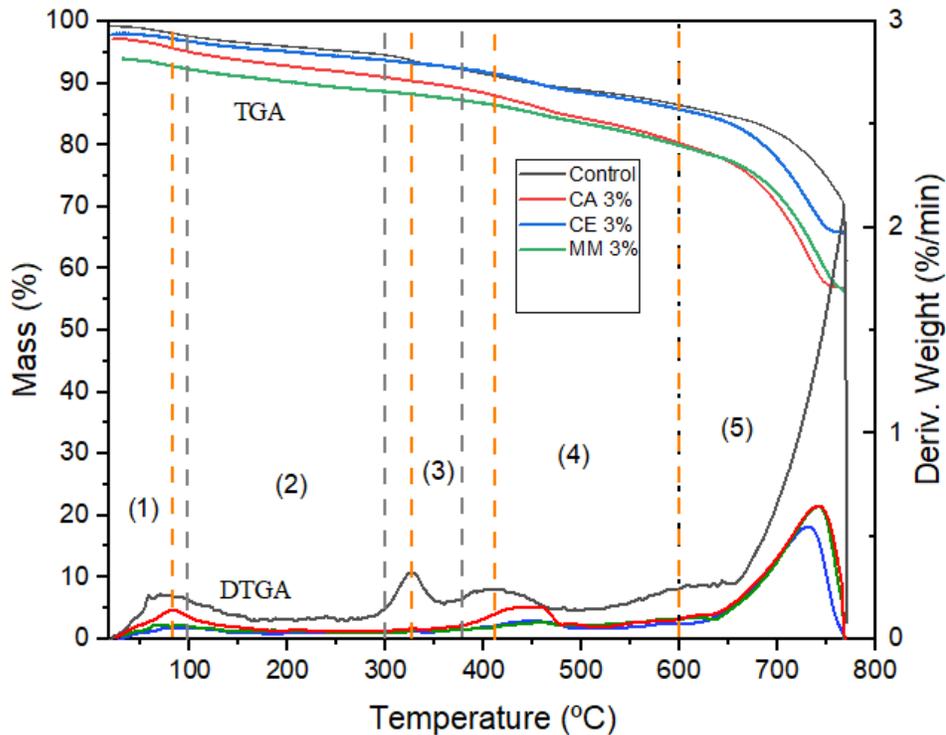
Se realizaron análisis de TGA para muestra control y fibrocemento con adición cascarilla 3%, ceniza 3%, microsíllice 3%, microsíllice 5% y Microsíllice 7%. Los análisis se realizaron en un equipo Themys ONE +, rampa de calentamiento 10°C/min, atmosfera de N<sub>2</sub> desde temperatura ambiente hasta 700°C, los termograma se muestran en las Figura 41 y Figura 42.

Figura 41. TGA para muestra control fibrocemento



En el termograma de la Figura 41 se evidencian varias zonas y picos asociados a la descomposición del cemento, las cuales puede identificarse de la siguiente forma. Una primera zona hasta 300°C que tiene dos contribuciones, en la primera para temperaturas por debajo de 100°C, se da la evaporación del agua absorbida físicamente en los poros de los granos; la segunda zona entre 100- 300°C (Deboucha et al., 2017) está relacionada con procesos de deshidratación de componentes propios del cemento como la tobermorita, los aluminatos y aluminosilicatos de calcio hidratados, entre otros. Entre 300 - 370°C se evidencia una zona asociada a la descomposición de fibras poliméricas como la celulosa presentes en la cascarilla (Hincapié et al., 2020) e incluso el plastificante de policarboxilato que fue empleado en el presente trabajo (Berra et al., 2012). Entre 400°C y 600°C se tiene la deshidroxilación de la portlandita y la última zona entre 600°C y 800°C se asocia a la descarbonatación de  $\text{CaCO}_3$  (Deboucha et al., 2017).

Figura 42. Gráfica de TGA y DTGA diferentes adiciones



En la Figura 42 se presentan los termogramas para las demás muestras de fibrocemento con adición de sílice en sus diferentes formas y concentraciones. Se observan las mismas zonas antes mencionadas, es decir, es predominante el comportamiento del fibrocemento en el cual se evidencia la deshidratación, la descomposición de la portlandita y la descarbonatación. En la Tabla 4 se presenten los valores de las pérdidas de masa para cada zona, se evidencias que la mayor pérdida de masa se da en la zona de descarbonatación, la cual es mayor para la adición de microsíllice al 5% y 7%.

Tabla 4. Pérdida de masa para cada una de las zonas de los TGA

	Pérdida de masa (%)					Residuo
	Evaporación del agua absorbida	Deshidratación componentes del cemento	Descomposición de fibras poliméricas - plastificante de policarboxilato	Deshidroxilación de la portlandita	Descarbonatación de CaCO <sub>3</sub>	
MC	1,06	4,43	2,50	4,91	25,43	61,67
MCA-3	1,51	4,90	4,90	4,62	24,38	59,67
MCE-3	0,97	3,63	3,48	4,20	20,04	67,68
MM-3	0,53	5,03	3,18	5,70	22,96	62,61

<b>MM-5</b>	2,35	6,12	4,99	6,63	24,89	55,02
<b>MM-7</b>	1,40	4,69	3,68	6,88	34,50	48,85

En la Tabla 4 se muestra la pérdida de masa para cada muestra de fibrocemento con las diferentes adiciones, Los porcentajes altos en la fase de descarbonatación se deben a la descomposición del carbonato cálcico en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante la cocción (García, 2005). En las zonas 4 y 5 se destacan los mayores porcentajes de pérdida de masa en lo que indica mayor presencia de fases hidratadas propias del fibrocemento. El valor menor de residuo corresponde a la muestra de cascarilla al 3% lo que es consecuente con la adición que más parte orgánica contiene con respecto a las demás formas escogidas para el análisis, los demás residuos están por encima del 61%. La zona en el termograma que menor pérdida de masa muestra es la correspondiente a la descomposición de fibras poliméricas- plastificante de policarboxilato.

La cantidad de portlandita en las muestras se calcula a partir de las curvas de TGA en la región correspondiente a la fase 4 usando siguiente ecuación (8.1):

$$CH\% = WL_{CH}(\%) * \frac{MW_{CH}}{MW_w} \quad (8.1)$$

Donde  $WL_{CH}$  es la pérdida de masa en porcentaje correspondiente a la descomposición térmica de la portlandita,  $MW_w$  es el peso molecular del agua (18g/mol) y  $MW_{CH}$  peso molecular de la portlandita (74,01 g/mol) (Jain & Neithalath, 2009)

**Tabla 5 contenido de la portlandita en las muestras de fibrocemento**

<b>Muestra de fibrocemento</b>	<b>Pérdida de masa</b>	<b>Porcentaje CH (%)</b>
MC	4,91	1,19
MCA-3	4,62	1,12
MCE-3	4,20	1,02
MM-3	5,70	1,39
MM-5	6,63	1,61
MM-7	6,88	1,67

En la Tabla 5, se identifican las muestras con mayor porcentaje de portlandita, éstas son MM-3, MM-5 y MM-7 Los productos de hidratación principales en el cemento son el gel CSH y el hidrato de calcio o portlandita (CH), el hidróxido de calcio (CH) que es formado a

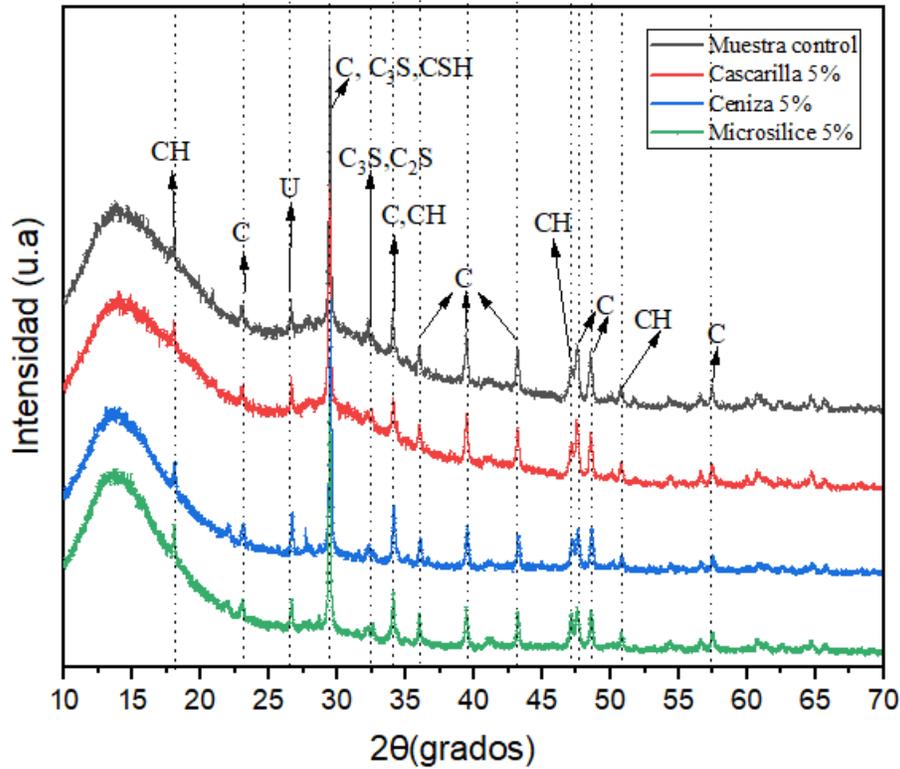
través de la hidratación del cemento no tiene propiedades cementantes y debido a su morfología es relativamente débil y quebradizo. Lo anterior favorece a la propagación de las grietas en las zonas donde se encuentra el (CH) especialmente en la interfaz de agregado de matriz de mortero de cemento (Singh et al., 2013)

La portlandita tiene efectos positivos en la matriz ya que es la encargada de mantener el pH de la pasta en valores altos (12-13) por actuar como una reserva alcalina, por tanto, mantiene a los hormigones armados protegidos contra la corrosión electroquímica. También es positiva en el caso de hormigones y morteros con áridos calizos, ya que en ellos la adherencia árido-pasta es mayor que en el caso de los áridos silíceos. Sin embargo, también tiene otros efectos negativos tales como: solubilidad en agua y fácilmente lixiviable por disolución; puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer material en descomponerse a altas temperaturas (600°C). Varios de estos aspectos negativos pueden controlarse con la adición de puzolanas (cenizas volantes, humo de sílice, escoria de hornos, etc.) (Giraldo & Tobón, 2006).

### **8.2.2 ANÁLISIS CON DRX**

Análisis por difracción de rayos X para MC, MCA-5, MCE-5 Y MM-5.

Figura 43. Difractograma para el fibrocemento con diferentes adiciones



En los difractogramas de las cuatro muestras, Figura 43, aunque el fibrocemento es un material que contiene múltiples fases y su identificación no es sencilla, se evidencian algunas fases tales como portlandita (CH) en  $2\theta=18^\circ, 34^\circ, 47^\circ, 51^\circ$  patrones comparados con el datasheet de la difracción de polvos (PDF # 44-1481), silicato tricálcico ( $C_3S$ ) (PDF # 31-0301) en  $2\theta=29^\circ, 32^\circ$ , silicato dicálcico ( $C_2S$ ) (PDF # 33-0302) en  $2\theta=32^\circ$ , así como los asociados a calcita ( $CaCO_3$ ), (PDF # 05-05862) en  $2\theta=23^\circ, 29^\circ, 34^\circ, 39^\circ, 42^\circ, 57^\circ$ , usingita (U)(Zhang et al., 2021) en  $2\theta=24^\circ$  y tobermorita (CSH) en  $2\theta=29^\circ$  (Giraldo & Tobón, 2006) (Abd.el.aleem et al., 2014).

La identificación de fases predominantes se puede correlacionar con la presencia de tobermorita en el material, que favorece a la resistencia, ya que este producto de hidratación es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y hormigones de su resistencia mecánica, por lo que resulta un constituyente indispensable del cemento.

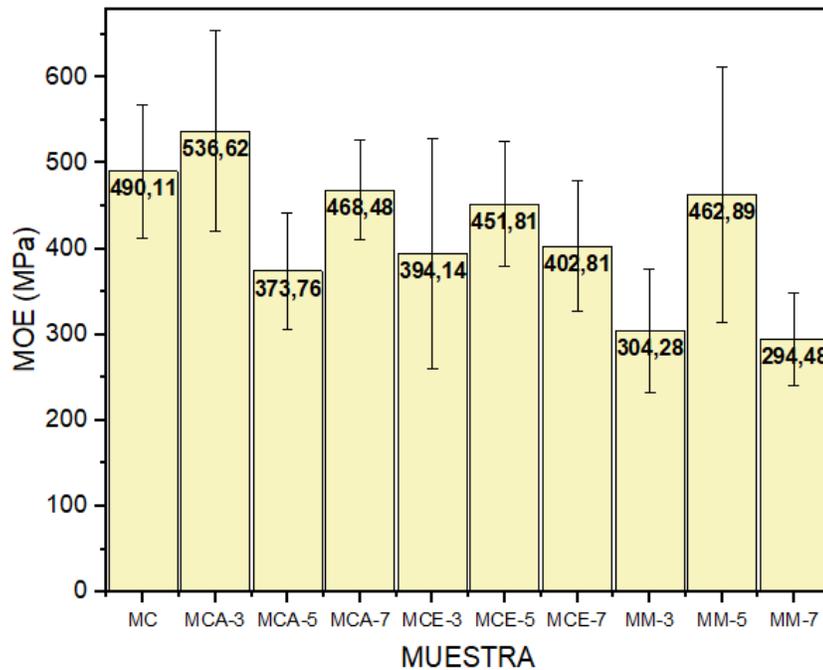
### **8.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES ESTABLECIDAS PARA EXPERIMENTACIÓN CON FIBROCEMENTO**

Los factores controlados para la fabricación de las muestras de fibrocemento fueron: variación de porcentaje de mezcla en tres niveles 3%, 5% y 7%; y material de mezcla en también tres niveles de factor: cascarilla de arroz, ceniza y microsílíce. Se realizó un experimento aleatorizado, replicado (1 original + 3 réplicas) y en un único bloque. Se tuvieron las siguientes variables de respuesta fundamentales: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, densidad, absorción y humedad. En el anexo C se presentan los niveles y valores del experimento. Se realizó un Análisis de Varianza Multifactorial inicial de múltiples variables de respuesta (MANOVA) con confianza de 95% e interacciones máximas de segundo orden entre factores para cada una de las variables de respuestas seleccionadas: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, densidad, absorción y humedad. Todas las ANOVA cumplen con los supuestos de normalidad de residuales (Test de Lilliefors), homocedasticidad de residuales e independencia de datos (Test Varlet). Se aplica una prueba LSD de Fisher con 95% de confianza para determinar los grupos de medias diferentes en cada una de las variables de respuesta, se elige de acuerdo con el espaciamiento uniforme en los factores y factores fijos. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada una de las variables de respuesta.

#### **8.3.1 Análisis de las pruebas mecánicas**

A partir de las pruebas mecánicas se determinaron el módulo elástico y la resistencia máxima a la flexión tal como se describió en la sección de metodología. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 44 y 45 respectivamente.

Figura 44. Módulo de elasticidad muestras de fibrocemento



En la Figura 44 se observan que la muestra con cascarilla al 3% presenta mayores valores para el módulo elástico (promedio en 563,62 MPa), el cual aumenta en un 9,4% respecto a la muestra control (promedio en 490,11 MPa). Una inspección a los valores de MOE para las demás muestras indica que en las probetas a las que se ha adicionado ceniza y microsílíce se da una disminución del módulo de elasticidad a las concentraciones empleadas en este trabajo. Los p-valores obtenidos en el análisis estadístico que se presenta en la Tabla 6 indica que hay diferencias estadísticamente significativas (p menores 0.05) en el módulo elástico (es decir en la resistencia a la compresión) en cuanto al tipo de aditivo, y la combinación entre tipo y porcentaje de aditivo.

Tabla 6 ANOVA para la respuesta resistencia a la compresión – módulo de elasticidad

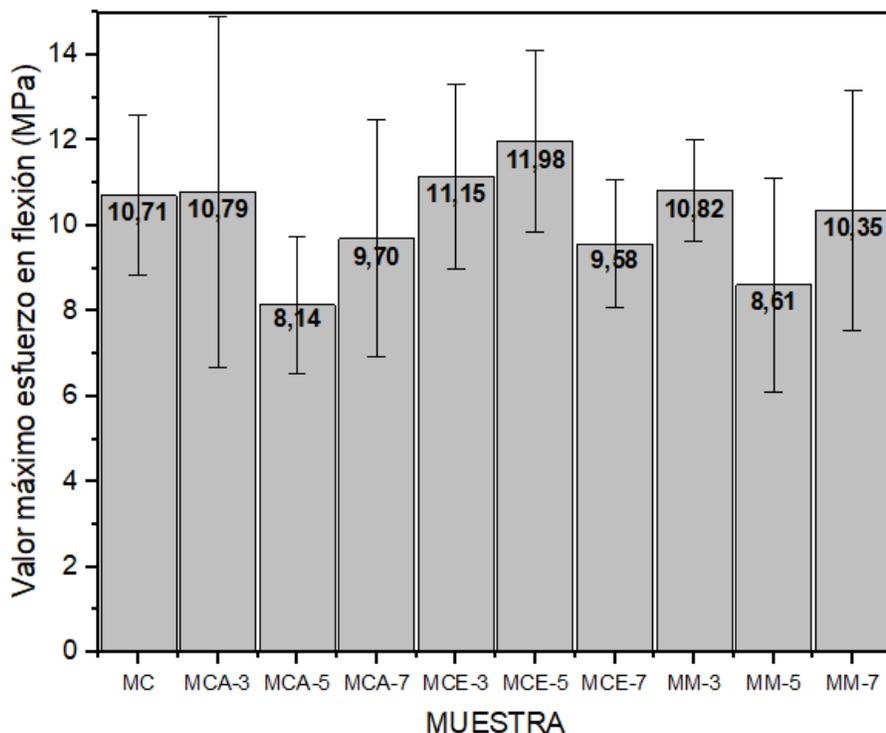
Fuente de variación	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
<b>Efectos Principales</b>					
A: Material	67799,8	2	33899,9	3,77	0,0360*
B: Porcentaje de mezcla	10090,6	2	5045,3	0,56	0,5773
<b>Interacciones</b>					
AB	122642	4	30660,6	3,41	0,0222*
Error	242937	27	8977,66		
Total	443470	35			

\* Estos valores-p implican efectos significativos.

Según la norma NTC 4373 para placas planas el módulo de elasticidad se encuentra entre 2000 y 4000 MPa sin embargo en este trabajo se trabajó con probetas cúbicas elaboradas

según la norma NTC 5069 (Paneles prefabricados de fibrocemento. Ensayo de compresión) variando entre 294,48 y 536,62 MPa.

Figura 45. Módulo de rotura para las diferentes adiciones en el fibrocemento



En la Figura 45 se presenta la resistencia a la flexión de las probetas en estudio. Se encontraron valores entre 7 y 14 MPa los cuales guardan coherencia con los reportados por la norma NTC 4373 (Ingeniería civil y arquitectura. Placas planas de fibrocemento categoría 3 módulo de rotura) que determina un rango entre 9 y 11 MPa (Toptec, 2020). Se evidencian mayores valores para la muestra con cascarilla al 3% y ceniza al 3% y 5%. Sin embargo, no se evidencian diferencias significativas en la resistencia máxima a la flexión con ninguna de estas variables (tipo de aditivo, porcentaje de aditivo o la combinación entre ambos), como se muestra en la Tabla 7 ( $p$  menores 0.05). Esto puede deberse a que la cantidad de fibra de vidrio adicionada es la que controla este comportamiento (Mohammed et al., 2021) y por tener el mismo porcentaje para todas las muestras de este experimento no se evidencian diferencias significativas. De otra parte, no se evidencian de cambios significativos puede indicar que no ha desaparecido la portlandita cristalina, la cual se

identificó en los difractogramas de rayos X y que se forma durante la hidratación del cemento portland (Nazari & Riahi, 2021).

**Tabla 7. ANOVA para la respuesta resistencia a la flexión.**

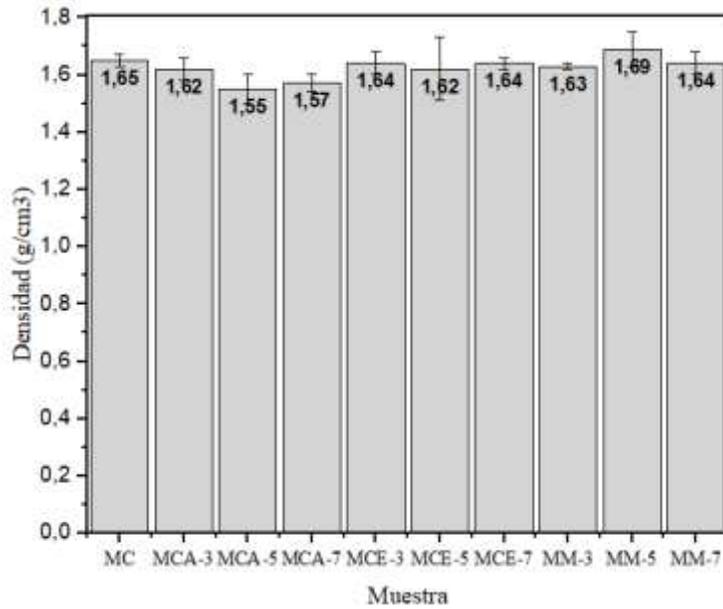
Fuente de variación	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
<b>Efectos Principales</b>					
A: Material	11,0178	2	5,50888	0,89	0,4223
B: Porcentaje de mezcla	11,1592	2	5,57958	0,90	0,4178
<b>Interacciones</b>					
AB	25,5261	4	6,38153	1,03	0,4093
Error	167,11	27	6,18925		
Total	214,813	35			

Es posible que el rango de concentraciones empleado en este trabajo no sea suficiente para evidenciar cambios significativos la resistencia a la flexión y se requieran mayores valores de aditivos como los reportados por Kanamarlapudi et al. (2020) y Haque et al. (2021) de 15 y 20%.

### **8.3.2 Análisis absorción, densidad y humedad**

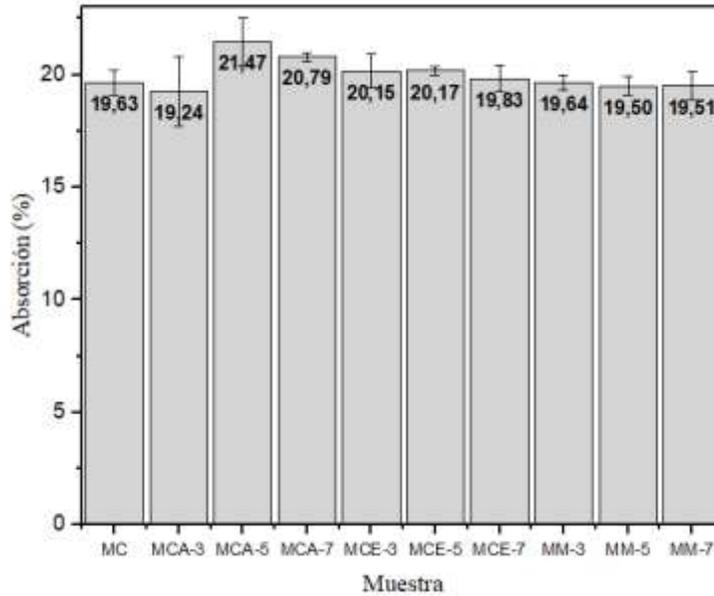
En las Figura 46, Figura 47 y Figura 48 se presentan los resultados obtenidos para la densidad, absorción y humedad de las muestras, calculados según se explicó en la sección de metodología. En las Tablas 8 y 9 se presentan los resultados de los análisis ANOVA realizados.

Figura 46. Valores de Densidad



En la Figura 46 se observan medidas muy homogéneas para la densidad alrededor de 1,62 g/cm<sup>3</sup>, valores que están de acuerdo con los reportes y fichas técnicas para el fibrocemento en los que se tiene valores de 1,625 g/cm<sup>3</sup> (Tejas Borja, 2008); 1,3 ± 0,3 g/cm<sup>3</sup> (Duralit, 1993) 1,25 g/cm<sup>3</sup> (Toptec, 2020). La densidad en los cementos se encuentra cerca de 3,15 g/cm<sup>3</sup>, y disminuye, dependiendo de la cantidad de adiciones utilizadas. Por tanto, cuando se elaboran probetas de fibrocemento la densidad debe ser menor a la del concreto ya que se incorporan aditivos como los empleados en este trabajo: carbonato de calcio, bentonita y fibra de vidrio y sílice.

Figura 47. Valores de Absorción



En la Figura 47 se presentan los valores de porcentaje de absorción de las muestras los cuales están alrededor del 20%, resultado que es acorde con los reportados en la literatura: 18% (Tejas Borja, 2008), 33% (Duralit, 1993) y 30% (Toptec, 2020).

En la Tabla 8 se evidencia que hay diferencias significativas en la densidad de las placas frente al tipo de aditivo empleado, mas no con relación a su porcentaje. La interacción de ambas variables genera diferencias significativas, aunque es menor que para el tipo de aditivo. Es físicamente entendible que el tipo de aditivo genere cambios en la densidad ya que la cascarilla tiene una densidad (0.7 g/cm<sup>3</sup>) no solo menor al cemento (3,2 g/cm<sup>3</sup>) sino también a la ceniza (0.89 g/cm<sup>3</sup>) y la microsílíce (2.2 g/cm<sup>3</sup>)(García, 2018).

Tabla 8. ANOVA para la respuesta densidad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
<b>Efectos Principales</b>					
A: Material	0,0220541	2	0,0110271	6,96	0,0036*
B: Porcentaje de mezcla	0,00207064	2	0,00103532	0,65	0,5283
<b>Interacciones</b>					
AB	0,0183652	4	0,0045913	2,90	0,0407*
Error	0,0427758	27	0,00158429		
Total	0,0852657	35			

\* Estos valores-p implican efectos significativos.

En la Tabla 9 se puede evidenciar que al igual que para la densidad también hay diferencias significativas en la absorción respecto al tipo de aditivo y la interacción entre el aditivo y su

% de adición (p menores 0.05). Los valores de densidad y de la absorción presentan un comportamiento inverso es decir a mayor densidad menor absorción y viceversa, lo cual es entendible ya que si hay menor densidad -lo cual se presenta con la cascarilla en este caso- se tiene más porosidad en el material y por tanto más espacios para que haya absorción de agua. Además, las partículas de cascarilla tienen mayor grosor que las partículas del cemento, lo cual favorece la absorción de agua (Tunji et al., 2019).

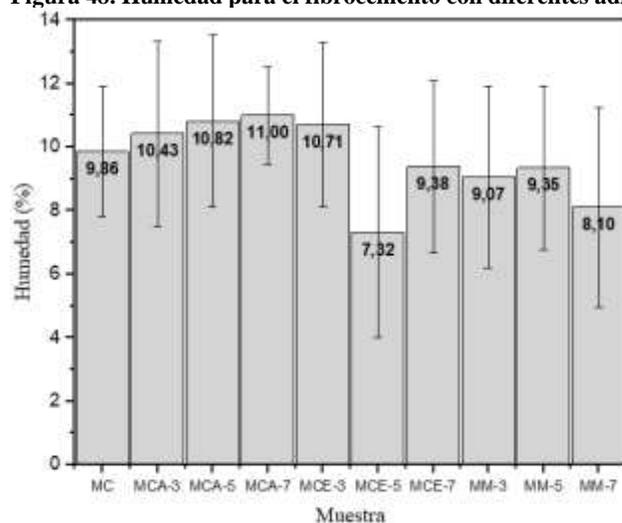
**Tabla 9. ANOVA para la respuesta absorción.**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	Valor-p
<b>Efectos Principales</b>					
A: Material	5,43538	2	2,71769	4,94	0,0149*
B: Porcentaje de mezcla	2,98189	2	1,49094	2,71	0,0847
<b>Interacciones</b>					
AB	7,84118	4	1,96029	3,56	0,01867*
Error	14,8592	27	0,550341		
Total	31,1176	35			

\* Estos valores-p implican efectos significativos.

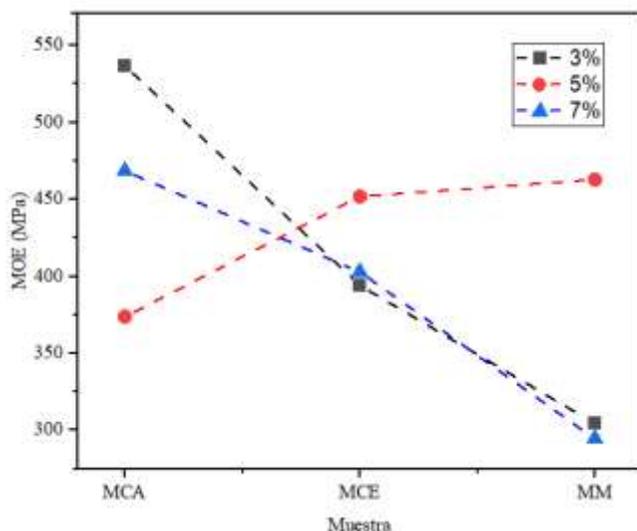
En la Figura 48 se presentan los resultados de humedad los cuales oscilan alrededor del 10% y presentan una amplia variabilidad (entre 4 y 13%), Tejera, 2008 reporta valores del 10% acordes con los encontrados en este trabajo. No se evidenciaron diferencias significativas en la humedad respecto a las variables independientes en el estudio estadístico.

**Figura 48. Humedad para el fibrocemento con diferentes adiciones**



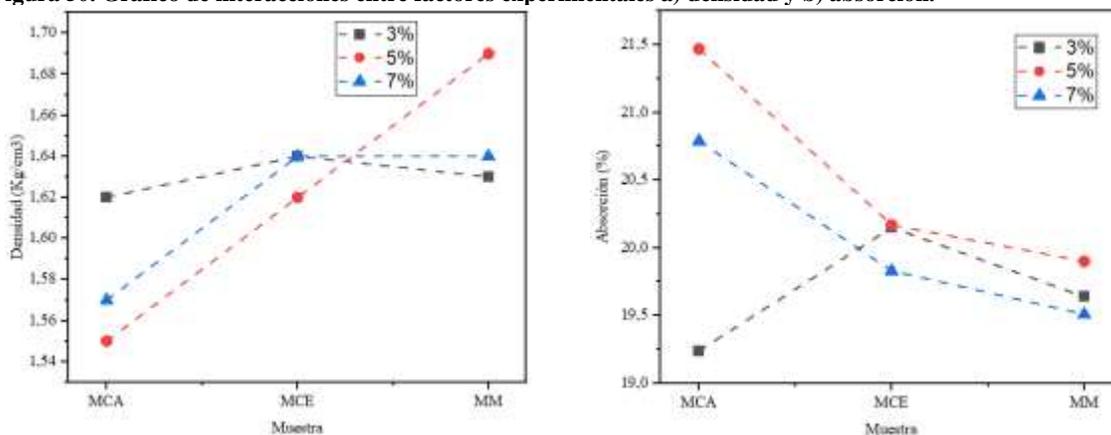
Los efectos de las interacciones (aditivo y porcentaje de adición) son ilustrados en la Figura 49 y Figura 50 para la resistencia a la compresión y para la densidad y la absorción, respectivamente, la gráfica corresponde a los valores promedio sin la barra de error.

Figura 49. Gráfico de interacciones entre factores experimentales para la resistencia a la compresión



En la Figura 49 se puede apreciar que los valores más altos de la resistencia a la compresión se consiguen con la cascarilla de arroz en porcentaje de mezcla de 3%; así mismo las muestras con microsílíce al 5% presentan resistencias a la compresión favorables.

Figura 50. Gráfico de interacciones entre factores experimentales a) densidad y b) absorción.



a)

b)

En la Figura 50a se observa que el valor más bajo de densidad se obtiene con la cascarilla de arroz al 5%, mientras que en esa misma proporción de mezcla se maximiza la densidad para el microsílíce. En la Figura 50b se observa que la interacción entre los factores permite

verificar la relación inversa entre la densidad y la absorción, las muestras de mayor densidad (cascarilla al 3% y microsílíce al 5%) tiene menor absorción y a la vez presentan mayor resistencia a la compresión. Este hecho puede explicarse en que la adición de cascarilla actúa para mejorar la microestructura, también como activadores para promover la reacción puzolánica con el hidróxido de calcio (CH), lo que conduce a una mayor acumulación y precipitación de los productos hidratados en los poros abiertos disponibles que estaban originalmente llenos de agua; esto conduce a la formación de una microestructura homogénea lo cual puede generar una mayor resistencia a la compresión; este tipo de proceso se ha reportado para la adición de nanosílíce en placas de fibrocemento (Abd.el.aleem et al., 2014).

Danso (2020) reporta un 6% de aumento en el modulo elástico de morteros de cemento cuando se adiciona cascarilla de arroz al 0.5% y un aumento en la abosrción de agua, resultados comparables a los obtenidos en este trabajo para las placas de fibrocemento. La mejora de la resistencia a la compresión está asociada al aumento de adhesión del mortero de cemento y la cáscara de arroz, asi como al aumento de la fricción y adhesión entre la cáscara de arroz y la matriz. Este mismo autor reporta una disminución en el módulo elástico para mayores valores de adición de cascarilla (1% al 25 %), resultado comparable al presente trabajo para las probetas de fibrocemento en las cuales el modulo elástico disminuye cuando se adiciona 5% y 7% de cascarilla. Tunji et al. (2019) reportan que el módulo elástico de las probetas de cemento con adición de cascarilla de arroz al 1.5, 2.5, 5.0, 7.5 y 10% también presentaron una disminución, sin embargo, el valor al 1.5% es similar al de la muestra control. La disminución de la resistencia a la compresión de las probetas con el aumento del contenido de cáscara de arroz se atribuye a la menor reacción de hidratación en el mortero como resultado del predominio de la cáscara de arroz en el material compuesto (Tran et al., 2018), lo cual que genera un entrecruzamiento entre las fibras y resultan en la reducción de la cohesión entre el mortero y la cascarilla .(Danso & Manu, 2020)

Finalmente se realiza una comparación entre los valores de resistencia a la compresión entre la muestra con cascarilla de arroz al 3% y la muestra de control, se hace el análisis teniendo en cuenta que se realizaron tres réplicas. Se realizó un ANOVA de un único factor

cualitativo con 95% de confianza para determinar si existe diferencia significativa entre los niveles del factor. Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10. ANOVA de comparación entre probeta de control y probeta con cascarilla de arroz y mezcla al 3%.**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
<b>Efectos</b>					
A: Material	26928	1	26928	9,18	0,039
Error	11738	4	2934		
Total	38666	5			

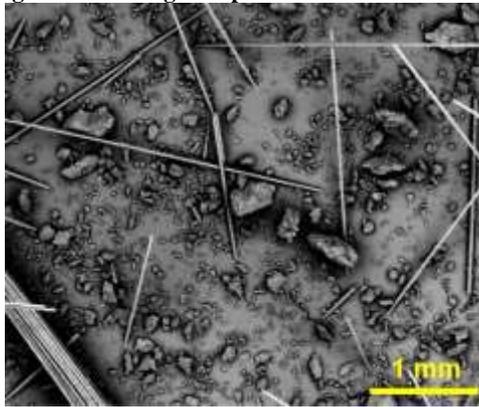
El ANOVA cumple con normalidad de los residuales e independencia. La homocedasticidad de residuales se comprobó con prueba de Levene con 95% de confianza generando un valor-p de 0,039 lo que indica que los residuales son homocedásticos. La prueba ANOVA es entonces validada y se especifica en que si hay diferencia significativa entre la probeta de control y la probeta con cascarilla de arroz al 3% en cuanto a la resistencia a la compresión se refiere.

Según Haque et al. (2021) el hormigón mezclado con ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo del cemento, y fibras de vidrio como elemento de refuerzo adicional, presenta una mayor resistencia a la compresión para un contenido de ceniza del 15%, la cual disminuye a medida que aumenta el contenido de ceniza. Los autores indican que esta disminución de la resistencia al aumentar el reemplazo de ceniza por encima del contenido óptimo se debe a la falta de proceso de hidratación.

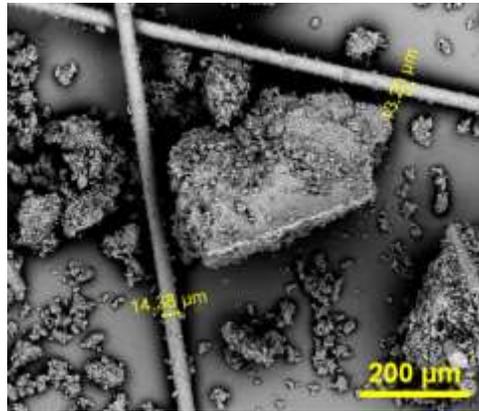
#### **8.4 ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL FIBROCEMENTO**

Según el análisis estadístico, se decidió realizar SEM para las muestras que presentaron mejor resistencia a la compresión comparadas con la muestra control, adición de cascarilla al 3%, microsíllice 5%. El análisis se realizó en el equipo QUANTA 250 voltaje 17kV En la Figura 51a se muestra la morfología del fibrocemento (muestra control) en la cual se observan las fibras de vidrio (Figura 51b) con diámetros que coinciden con los datos de la ficha técnica CEMFIL-60 de 14  $\mu\text{m}$ . En la Figura 51c se observan partículas correspondientes a los aditivos utilizados en la formulación y su adhesión a las fibras y en la Figura 51d se observa el apilamiento de los productos de hidratación. Como se mencionó en anteriormente, la adhesión de los aditivos a las fibras es responsable de la resistencia a la compresión.

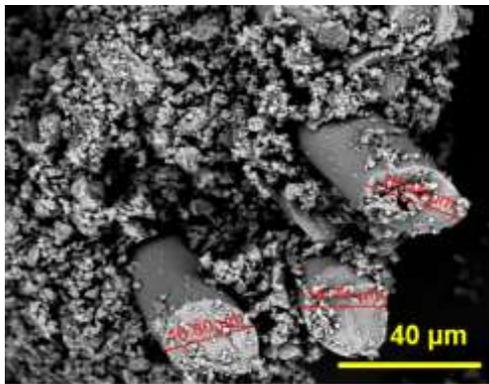
Figura 51. Micrografía para fibrocemento muestra control



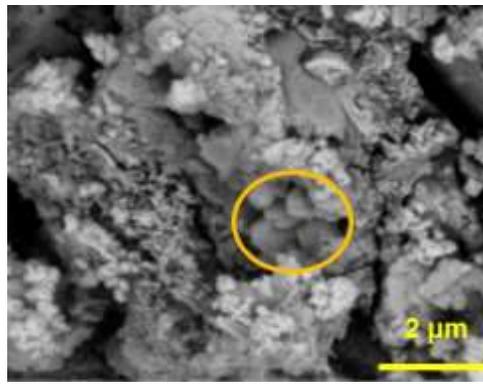
a)



b)



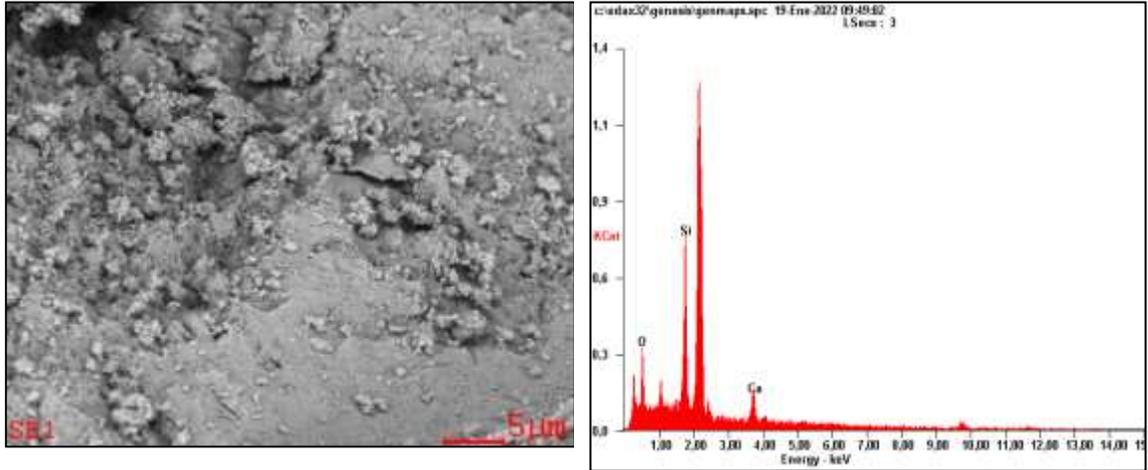
c)



d)

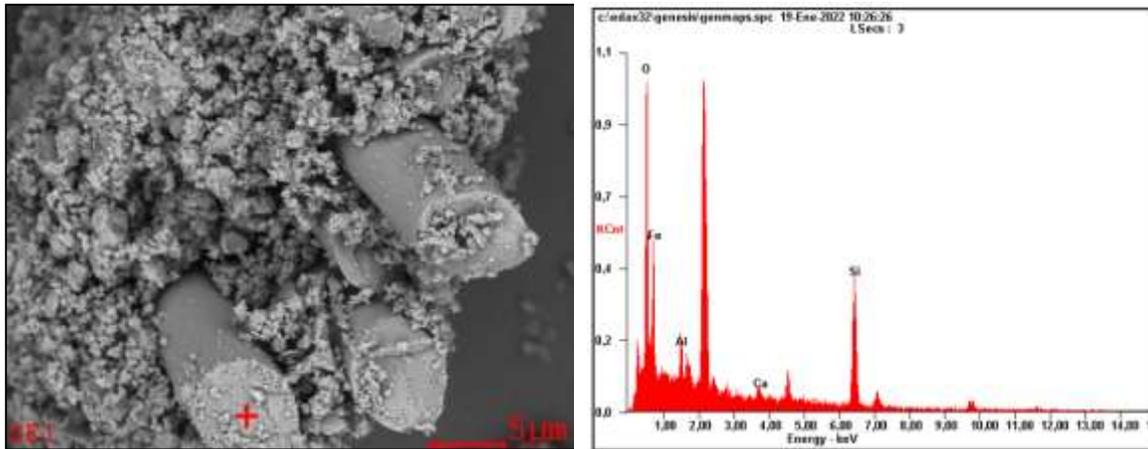
En el área mostrada en la Figura 52a se realiza un análisis EDAX para la muestra control del fibrocemento. Como se observa en la Figura 52b, los componentes identificados para esta muestra son silicio, oxígeno y calcio, además del pico más predominante que corresponde al oro usado en el recubrimiento de la muestra, Se realiza también el análisis EDAX sobre el punto indicado en la Figura 52c y Figura 52d se identifica aluminio, hierro, silicio y calcio que corresponden a las fases hidratadas que se identificaron en el análisis de rayos X.

Figura 52. EDAX para muestra de fibrocemento



a)

b)

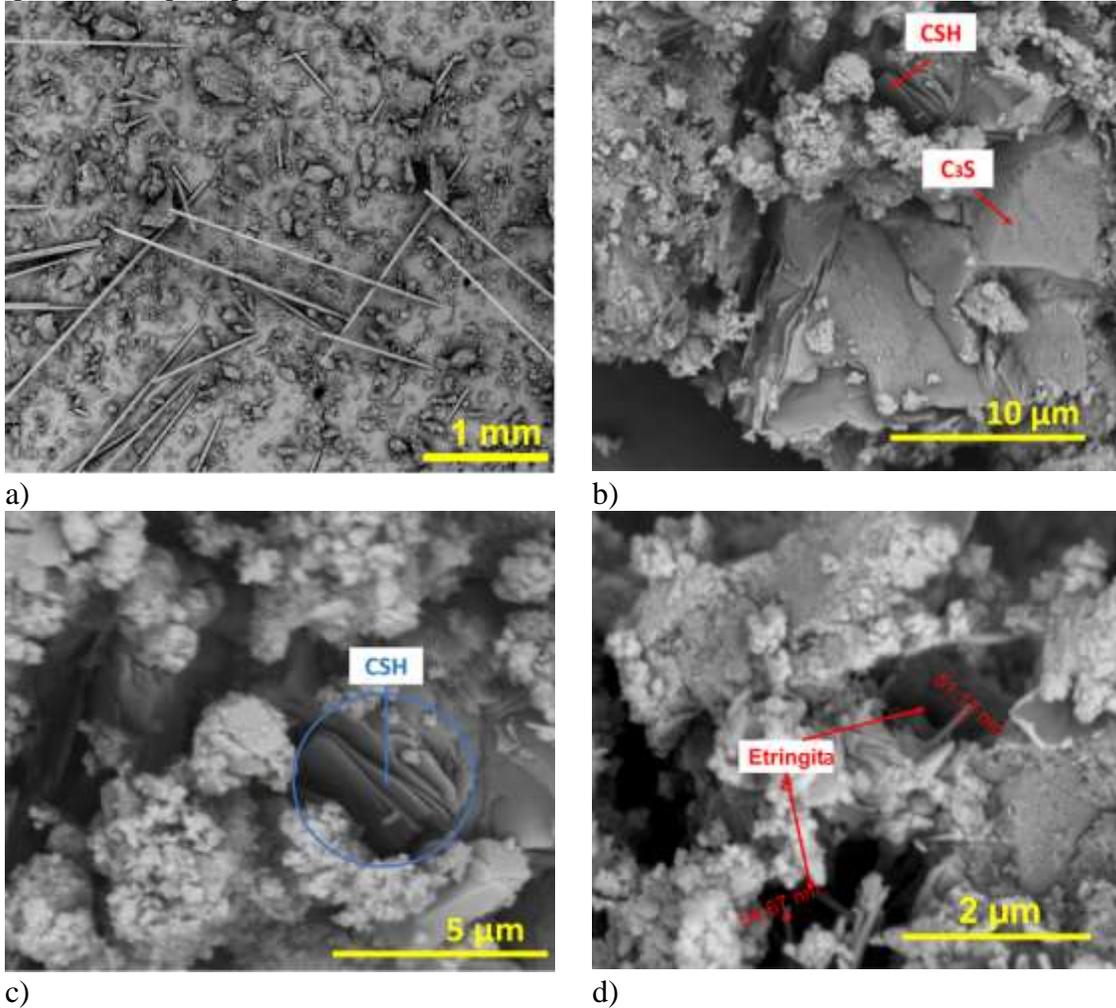


c)

d)

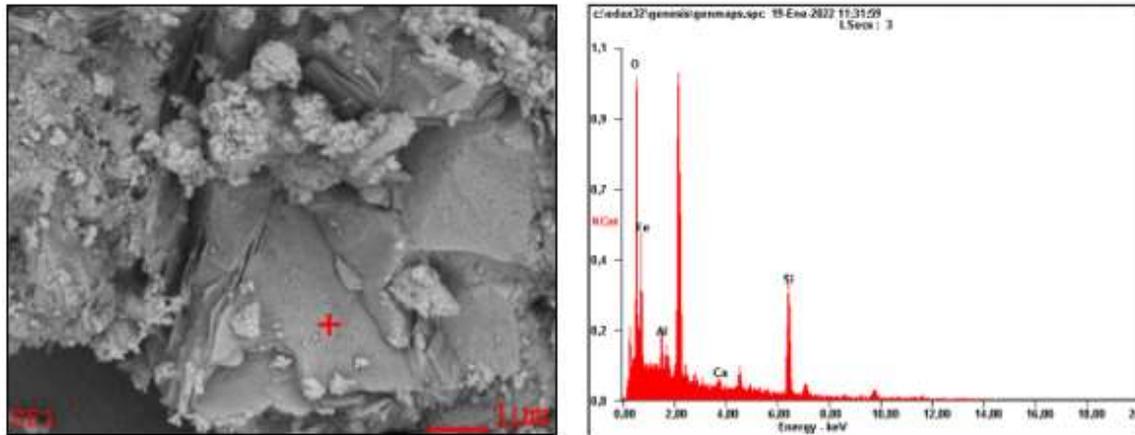
En la Figura 53a se muestra la morfología del cemento con adición de cascarilla al 3%. En la Figura 53b se observan apilamientos de placas de cristales del gel de tobermorita y otras estructuras como la alita, productos que favorecen a la resistencia del material (Hincapié et al., 2020). En la Figura 53c se hace una magnificación para los cristales de gel de tobermorita y en la Figura 53d se evidencian productos de hidratación como la etringita que tiene forma de agujas. Estas formas fibrosas tienen un diámetro de 14,67 nm y 51,17 nm, dichas estructuras se encuentran en espacios vacíos y fisuras que generan aspectos negativos en el cemento ya que afectan la durabilidad y resistencia, debido a la expansión que provoca en el interior de la matriz (Giraldo & Tobón, 2006).

Figura 53. Micrografía para el fibrocemento cascarilla 3%



En el área mostrada de la Figura 54a y Figura 54b se realiza un análisis químico para la muestra con cascarilla al 3% y se evidencia la presencia de picos representativos de oxígeno, hierro, aluminio, silicio y calcio, Estos elementos corresponden a la formación de aluminosilicatos y ferrosilicatos, componentes propios del cemento que fueron identificado en los difractogramas de rayos X. Se ha reportado que la formación de silicatos de calcio hidratados (CSH) formados a partir de la reacción del CH (reacción puzolánica) puede ser mayor en las placas de fibrocemento en las que se ha adicionado sílice que en la placa sin adiciones (Abd.el.aleem et al., 2014), lo cual se está presentado en este caso con la adición de cascarilla y es evidente en las imágenes SEM para la muestra con cascarilla al 3% en comparación con la muestra control.

Figura 54. EDAX para muestra de fibrocemento cascarilla 3%

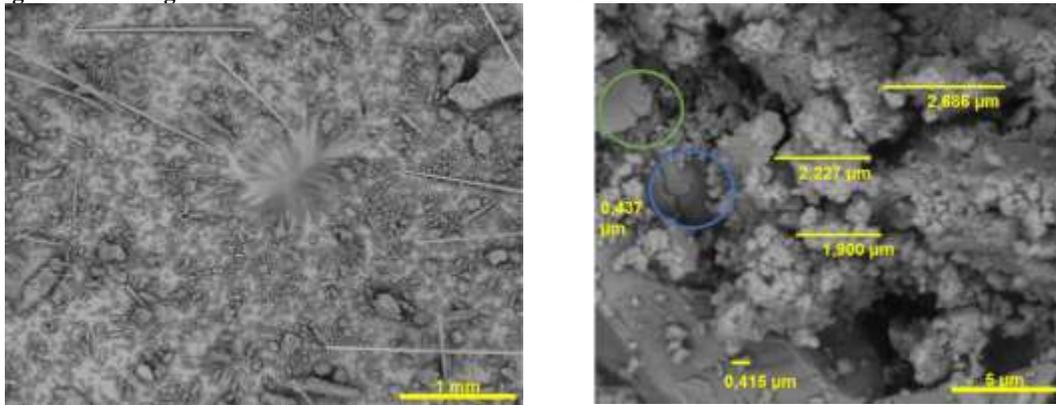


a)

b)

En la Figura 55a se puede observar el área para la muestra de microsílíce al 5% y en la Figura 55b las estructuras en forma de placas apiladas y la formación de tobermorita, también se observan aglomeraciones en la estructura del fibrocemento que son producto de la hidratación del cemento que se van uniendo de acuerdo con el tiempo de curado. (Giraldo & Tobón, 2006) Es de anotar que para esta muestra no se identificaron otros productos de hidratación.

Figura 55. Micrografía fibrocemento con adición de microsílíce al 5%



a)

b)

## 9 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron diferentes formas de sílice y porcentajes de adición en el fibrocemento con el fin de conocer la respuesta mecánica del material frente a este aditivo; se busca dar un valor agregado a la cascarilla de arroz como residuo agroindustrial al establecer las características de su uso en esta aplicación. De las diferentes fases del trabajo se obtienen las siguientes conclusiones:

- El proceso de lixiviación de la ceniza de cascarilla de arroz con HCl mostró ser efectivo en la remoción de impurezas inorgánicas. No se evidenciaron cambios significativos en la composición de la sílice con el empleo de diferentes concentraciones de este ácido.
- Por medio de SEM se observó que la cascarilla de arroz posee superficies abaxiales las cuales están separadas por surcos. También se observaron macropelos unicelulares. En cuanto a las micrografías de las micropartículas de sílice, se observaron aglomerados en forma esférica.
- En el análisis termogravimétrico se observaron varias zonas asociadas a la descomposición del fibrocemento: eliminación de humedad, deshidratación de componentes propios del cemento como la tobermorita, los aluminatos y aluminosilicatos de calcio hidratados, deshidroxilación de la portlandita y descarbonatación  $\text{CaCO}_3$ .
- En los resultados de difracción de rayos X tanto para la muestra control como para las adicionadas con sílice se evidenciaron algunas fases tales como portlandita, silicato tricálcico, silicato dicálcico, así como los asociados a calcita, usingita y tobermorita.
- Se encontró que la formulación que presentó mayor módulo elástico fue con adición de cascarilla al 3% -aumento de 9,4%- respecto a la muestra control. Desde un punto de vista estadístico no se evidenciaron diferencias significativas en la resistencia máxima a la flexión con ninguna de estas variables (tipo de aditivo,

porcentaje de aditivo o la combinación entre ambos) para los porcentajes empleados en este trabajo.

- La densidad del fibrocemento estuvo alrededor  $1,62 \text{ g/cm}^3$  y la absorción alrededor del 20% y la humedad en promedio del 10%, valores que están de acuerdo con los reportes y fichas técnicas para el fibrocemento.
- Los valores de densidad y absorción presentaron una relación inversa, lo cual es entendible ya que si hay menor densidad implica mayor porosidad en el material y por tanto hay más espacios para que haya absorción de agua. Este comportamiento fue más notorio para la mezcla con cascarilla de arroz, ya que tiene mayor grosor que las partículas del cemento, lo cual favorece la absorción de agua.
- En los análisis SEM del fibrocemento, se observaron componentes como silicio, oxígeno, calcio, aluminio, hierro que corroboran las fases identificadas en los difractogramas de rayos X. Se observan apilamientos de placas de cristales del gel de tobermorita y otras estructuras como la alita, productos que favorecen a la resistencia del material. También se evidenciaron en menor proporción productos de hidratación como la etringita
- De acuerdo con los resultados de este trabajo se puede decir que una adición de cascarilla de arroz al 3% favorece el módulo elástico y la absorción de probetas de fibrocemento.

## 10 RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones se recomienda utilizar porcentajes de adición menores y mayores a los empleados en este trabajo para determinar si se encuentra un valor óptimo a partir del cual las propiedades mecánicas alcancen su máximo, especialmente con cascarilla de arroz que fue la que arrojó mayores valores en la resistencia a la compresión.
- Se sugiere además explorar otros valores de fibra de vidrio para conocer el efecto de esta fibra y contrastar con otras comúnmente utilizadas como las fibras de PVA.
- Se recomienda hacer un análisis de costo para un posible escalado o aplicación industrial al usar cascarilla de arroz en la elaboración de placas de fibrocemento.

## 11 DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Durante el desarrollo de esta investigación se participó en los siguientes eventos:

- Ciclo de Conferencias sobre innovación y proyectos de investigación programa SENNOVA del Centro Atención Sector Agropecuario y Tecnoparque nodo Pereira “Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en materiales de construcción”.
- Congreso Internacional de Física y Tecnologías Emergentes 2021 “Efecto de la adición de diferentes formas de sílice obtenidas a partir de la cascarilla de arroz sobre propiedades físico-química y mecánicas del fibrocemento”
- Congreso Internacional de Física y Tecnologías Emergentes 2021 Proceso de extracción de diferentes formas de sílice a partir de la cascarilla de arroz.

En cuanto a la generación de nuevo conocimiento se está consolidando la escritura de un artículo científico para revista indexada.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- Abd.el.aleem, S., Heikal, M., & Morsi, W. M. (2014). Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica. *Construction and Building Materials*, 59, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.039>
- Abú Shams, K., & Pascal, I. (2005). *Características, propiedades, patogenicidad y fuentes de exposición del asbesto*.
- Aguilar, J. (2009). *Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz*. Universidad de Sucre.
- Allauca, L., Hugo, A., & Lung, J. (2012). Uso de Sílice en hormigones de Alto Desempeño. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Facultad de Ingeniería En Ciencias de La Tierra*, 1, 1–8. [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/7684/1/Usode silice en hormigones de alto desempeño.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/7684/1/Usode%20silice%20en%20hormigones%20de%20alto%20desempe%C3%B1o.pdf)
- Angulo, B. A. J. A. (2018). Evaluación de ceniza de cascarilla de arroz y tipos de agregados finos sobre la compresión, sorptividad y densidad de morteros de cemento portland tipo I, Trujillo 2017. *Universidad Privada Del Norte*, 20. <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13124>
- Arcos, C., Macías, D., & Rodríguez, J. (2007). Revista Facultad de Ingeniería. In *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (Issue 41). Universidad de Antioquia. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302007000300001&lng=en&nrm=iso&tlng=](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302007000300001&lng=en&nrm=iso&tlng=)
- Arcos, C., Pinto, D., & Rodríguez, J. (2007). La cascarilla de arroz como fuente de SiO<sub>2</sub>. Husk of rice as source of SiO<sub>2</sub>. In *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. N. o (Vol. 41).
- ASTM-C293. (2015). C293 - 15 Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). *ASTM International*, 1–3. <https://doi.org/10.1520/C0293>
- ASTM C109/109M -16a. (2016). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or cube specimens). *Annual Book of ASTM*

*Standards, 04*, 1–10. <https://doi.org/10.1520/C0109>

ASTM C305 -20. (2020). *ASTM C305 - 20 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*.  
<https://www.astm.org/c0305-20.html>

ASTM C78/C78M – 21. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete ( Using Simple Beam with Third-Point Loading ) 1. *Hand The, C78-02(C)*, 1–4.  
<https://doi.org/10.1520/C0078>

Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., & Sebastiani, M. (2012). Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 35, 666–675.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>

Blanxart, A. F. (1991). *NTP 306: Las fibras alternativas al amianto: consideraciones generales*.

Cahuana, A. (2014). *Sílice: el aliado oculto y estratégico para el desarrollo empresarial de la industria nacional*.

Calleja, J. (2001). La “portlandita” - hidróxido de calcio - y la “tobermorita” - silicatos de calcio hidratados - de la pasta de cemento: tratamiento estequiométrico de sus compartimentos. *Cemento Hormigón, ISSN 0008-8919, N°. 824, 2001, Págs. 526-542, 824, 526–542*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5528283>

Castellanos Araujo, R. (2008). Propiedades Mecánicas : curva Esfuerzo – Deformación. *Facultad de Ingenierías*, 8, 67–72.  
<http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema 08.pdf>

Cedex. (2012). *Ficha Técnica: Humo de Sílice* (pp. 1–14).

Centenero, R. (2013). *Efecto de la sepiolita y de nuevas fibras alternativas celulósicas en el comportamiento de suspensiones de fibrocemento*. Universidad Complutense de Madrid.

- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2018). CONPES 3934: Política de Crecimiento Verde. *Departamento de Planeación Nacional - DNP-*, 1–114. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3934.pdf>
- Coordinación general de minería. (2014). *Perfil del mercado del sílice*.
- Da Silva, J., Da Cunha, C. R., De Carvalho, F. L. S., Rodrigues Filho, U. P., Oliveira, P. R., & Segatto Silva, M. A. (2010). Obtaining high purity silica from rice hulls. *Quimica Nova*, 33(4), 794–797. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422010000400005>
- DANE. (2022). *Estadísticas de concreto premezclado*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado>
- Danso, H., & Manu, D. (2020). Influence of coconut fibres and lime on the properties of soil-cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00316>
- Deboucha, W., Leklou, N., Khelidj, A., & Oudjit, M. N. (2017). Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. *Construction and Building Materials*, 146, 687–701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.132>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016a). Documento CONPES 3874. Política Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Sólidos. *Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP)*, 1–73. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3874.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016b). Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. *Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP)*, 01(01), 1–73. <https://doi.org/10.18259/ing.2016001>
- Duque, S., Hernández, N., Ortiz, P., Toro, A., Forero, O., Pulido, Á., Ramos, H., Díaz, A., & Velásquez, M. (2019). *Línea base cadena productiva del cultivo de arroz*.

- Duralit. (1993). *Fibro cemento (Cemento-Crisolito)*. 0–1.
- El Nuevo Siglo. (2017). *Colombia consume 24 mil toneladas de asbesto al año*.  
<https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/11-2017-colombia-consume-24-mil-toneladas-de-asbesto-al-ano>
- Esquinas, Á. (2019). *El fibrocemento como recurso material al diseño de productos de uso colectivo. (Tesis de maestría)*. 136. <https://riunet.upv.es/handle/10251/126350>
- Esquinas, Á., & González, E. (2019). *Apuntes para una breve introducción a la resitencia de materiales y temas relacionados*.
- Fortes, M., & Garza, B. (2006). Asbesto: un peligro latente para la salud. In *Méx* (Vol. 7).
- Franquet, J., & Borràs, C. (2004). Variedades y mejora del arroz (*Oryza sativa* L.). *Variedades y Mejora Del Arroz (Oryza Sativa,L)*., 454.
- Galeano, M., Becerra, L., & Piñeros, M. (2016). *La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero*.
- García, F. (2005). *Descomposición durante la cocción del carbonato cálcico contenido en el soporte crudo de los azulejos*. Universitat Jaume I De Castelló.
- Garcia, L. (2018). Concreto de alto desempeño utilizando hormigón con adición de microsilice y superplastificante en la ciudad de Huancayo. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4908>
- Giraldo, M., & Tobón, I. (2006). Mineralogical Evolution of Portland Cement During Hydration Process. *Dyna*, 73(148), 69–81.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532006000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Guilbaud, J. P., Carvalho, H., Baroghel-Bouny, V., & Raharinaivo, A. (2000). Study of the moisture content gradient in a cementitious material by measuring its impedance and gamma-densitometry. *Materiales de Construcción*, 2000(257), 5–13.  
<https://doi.org/10.3989/mc.2000.v50.i257.414>

- Gutiérrez, M. A., Disciplinar, A., & Velasquez, L. S. (2017). *Análisis de la resistencia a la compresión y flexión en morteros activados alcalinamente con ceniza volante sin la utilización de cemento portland.*
- Ham-Hernández, S., Sánchez-De Jesús, F., Bolarín-Miró, A. M., Aguilar-Garib, J. A., Torres-Villaseñor, G., & Hernández-Cruz, L. E. (2019). *Efecto de la molienda mecánica y los tratamientos térmicos en la obtención de compuestos de NiO y MnO.*
- Henhapl, W., & Jones, C. B. (1971). A run-time mechanism for referencing variables. *Information Processing Letters*, *1*(1), 14–16. [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(71\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0020-0190(71)90015-9)
- Hincapié, D., Pineda, P., & Guapacha, J. (2020). Effect of silica nanoparticles on the mechanical and physical properties of fibercement boards. *Journal of Building Engineering*, *31*(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101332>
- Hincapié, D., Rosales, A., & Pineda, P. (2018). Synthesis and characterisation of submicron silica particles from rice husk. *Green Materials*, *6*(1), 15–22. <https://doi.org/10.1680/jgrma.17.00019>
- Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid. (2010). *Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid Laboratorio de microscopía*. 3. [https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/posters/FOTON-Materiales opticos1.pdf](https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/posters/FOTON-Materiales%20opticos1.pdf)
- Jain, J., & Neithalath, N. (2009). Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water. *Cement and Concrete Composites*, *31*(3), 176–185. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.01.003>
- Johnson, W. (2019). Elasticidad. *La Postura de La Meditación*, 81–106. <https://doi.org/10.2307/j.ctvt9jzwn.8>
- Khorami, M., Ganjian, E., Mortazavi, A., Saidani, M., Olubanwo, A., & Gand, A. (2017). Utilisation of waste cardboard and Nano silica fume in the production of fibre cement board reinforced by glass fibres. *Construction and Building Materials*, *152*, 746–755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.061>

- Liou, T. H. (2004). Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk. *Materials Science and Engineering A*, 364(1–2), 313–323.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.045>
- López, C. (2015). *Residuos agroindustriales e industriales para la conformación de compuestos empleados como materiales de construcción*.
- Macías, E., Eljach, G., Giraldo, A., & Mantilla, J. (2019, July 11). *Ley No 1968 del 11 de julio de 2019*. [https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY 1968 DEL 11 DE JULIO DE 2019.pdf](https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%201968%20DEL%2011%20DE%20JULIO%20DE%202019.pdf)
- Mohammed, B. H., Sherwani, A. F. H., Faraj, R. H., Qadir, H. H., & Younis, K. H. (2021). Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1557–1567.  
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.008>
- Monteagudo, S. (2014). *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones*.  
<https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjBxcOviObgAhVSKawKHYS1D3wQFjAMegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Frepository.usta.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2F11634%2F9326%2FSilvaIngrid2017.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllo>
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G. 2681-P/Rev. In *Revista de Derecho Ambiental* (Issue 10). <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2018.52077>
- Nazari, A., & Riahi, S. (2021). Retraction notice: “The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength self compacting concrete” (Composites Part B (2011) 42(3) (570–578), (S1359836810001666), (10.1016/j.compositesb.2010.09.025)). *Composites Part B: Engineering*, 219(May), 108989. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108989>
- NTC 176. (2019). *Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad*

- específica*) y la absorción del agregado grueso. <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=76463>
- NTC 5069. (2002). *Paneles prefabricados de fibrocemento. Ensayo de compresión*. <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=4267>
- Perera, A. G., & Sancha, P. (2016). Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la producción de cemento . *Innovar*, 26(60), 51–66. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532.citaci>
- Prato, N. (2007). Química del cemento. In *Química del cemento*. [www.ancap.com.uy/...concursos/.../CURSO ABRIL 2007-2.PDF%5Cn](http://www.ancap.com.uy/...concursos/.../CURSO ABRIL 2007-2.PDF%5Cn)
- Ribeiro, S., Oliveira, P., Vieira, L., Panzera, T., Freire, R., & Scarpa, F. (2018). Hybrid bio-composites reinforced with sisal-glass fibres and Portland cement particles: A statistical approach. *Composites Part B: Engineering*, 149(April), 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.019>
- Serrano, T., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., & Payà, J. (2012). *Morteros aligerados con cascarilla de arroz: diseño de mezclas y evaluación de propiedades lightweight mortars with rice husk: mix design and properties evaluation*. 79, 128–136.
- Shih, J. Y., Chang, T. P., & Hsiao, T. C. (2006). Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering A*, 424(1–2), 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.010>
- Simón, M., & Golik, S. (2020). Cereales de verano. In E. de la U. de la Plata (Ed.), *Cereales de verano*. <https://doi.org/10.35537/10915/68613>
- Sun, L., & Gong, K. (2001). Silicon-based materials from rice husks and their applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(25), 5861–5877. <https://doi.org/10.1021/ie010284b>
- Tejas Borja. (2008). *Ficha técnica placa de fibrocemento europa perfil 234,8. 2*.
- Tobón, J., Restrepo, O., & Payá, J. (2007). *Adición de nanopartículas al cemento portland*.

152, 277–291.

Toptec. (2020). *Sistema constructivo en seco placas dryboard* (Vol. 2507, Issue February).

Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. *Construction and Building Materials*, 178, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.104>

Upme. (2015). *Evaluación de la contribución económica del sector de hidrocarburos colombiano frente a diversos escenarios de producción subdirección*.  
[http://www1.upme.gov.co/hidrocarburos/estudios 2014-2016/resumen\\_fedesarrollo\\_mme\\_final.pdf](http://www1.upme.gov.co/hidrocarburos/estudios%202014-2016/resumen_fedesarrollo_mme_final.pdf)

Wang, W. C., Wang, H. Y., Chang, K. H., & Wang, S. Y. (2020). Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118387.  
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118387>

Zhang, T., Ma, B., Jiang, D., Jiang, Q., & Jin, Z. (2021). Comparative research on the effect of various mineral admixtures on the early hydration process of cement. *Construction and Building Materials*, 301(April), 124372.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124372>

Zuñiga, T. (2016). *Estudio térmico, eléctrico y morfológico de membranas nanoestructuradas basadas en polivinil alcohol (PVA), quitosan (Cs), ácido hipofosforoso H<sub>3</sub>PO<sub>2</sub> y óxido de niobio Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>*. Universidad del Valle.

## 13 ANEXOS

### ANEXO A



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ  
VICERRECTORÍA DE SEDE  
DIRECCIÓN DE LABORATORIOS

LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Bogotá D.C., mayo 14 de 2021

[B-DL-XRF-046-2021]

Señores  
**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MANIZALES**  
Atn. Francy Nelly Jiménez García  
Docente  
Departamento Física y Matemáticas  
Facultad de Ingeniería  
Tel. 3206617067  
Sede Manizales  
Correo: [francy@autonoma.edu.co](mailto:francy@autonoma.edu.co)

Respetados Señores:

Me permito reportar el resultado semicuantitativo destructivo de tres (03) muestras sólidas (Polvo color blanco) aproximadamente 8.0g de cada una. Remitidas por el señor Daniel Hincapié el día 04 de mayo de 2021 con el nombre "M-HCL 01 M-HCL 02 y M-HCL 03" y codificadas por este laboratorio como:

- |            |          |             |
|------------|----------|-------------|
| • XRF-7756 | M-HCL 01 | Uniautónoma |
| • XRF-7757 | M-HCL 02 | Uniautónoma |
| • XRF-7758 | M-HCL 03 | Uniautónoma |

Las muestras en polvo fueron secadas a 105°C por un periodo de 12 horas. Posteriormente mezcladas con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra : Cera de 10:1; homogenizadas por agitación, llevadas a una prensa hidráulica a 320 kN por un minuto generando tres pastillas prensadas de 37mm de diámetro que fueron medidas en la aplicación SEMIQ 2017.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemIQ 5, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW - 2440 Philips (WDXRF) equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 100ppm (0.01%) en la detección de elementos pesados metálicos.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

(Página 1 de 3)  
Elaboro: Wilson

Carrera 30 No. 45 - 03  
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1°, Oficina 114  
Teléfono Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596  
Bogotá, Colombia  
Correo electrónico: [labfux\\_csfibog@una.edu.co](mailto:labfux_csfibog@una.edu.co)

PROYECTO  
CULTURAL,  
CIENTÍFICO  
Y COLECTIVO  
DE NACIÓN

Los resultados obtenidos en forma de elementos y de compuestos, se transcriben a continuación.

Universidad  
Nacional  
de Colombia

Nombre	Elemento y/o Compuesto	XRF-7756 M- HCL01 Uniautonoma - (% en peso)
Silicio	SiO <sub>2</sub>	98,54%
Potasio	K <sub>2</sub> O	0,69%
Calcio	CaO	0,24%
Magnesio	MgO	0,13%
Manganeso	MnO	0,10%
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08%
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06%
Cloro	Cl	0,05%
Azufre	SO <sub>2</sub>	0,05%
Fosforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04%
Sodio	Na <sub>2</sub> O	0,02%
Plomo	Pb	74 ppm
Zinc	Zn	35 ppm
Rubidio	Rb	17 ppm

\*Los valores en negrilla son informativos.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	XRF-7757 M- HCL02 Uniautonoma - (% en peso)
Silicio	SiO <sub>2</sub>	98,64%
Potasio	K <sub>2</sub> O	0,65%
Calcio	CaO	0,23%
Magnesio	MgO	0,14%
Manganeso	MnO	0,09%
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06%
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05%
Azufre	SO <sub>2</sub>	0,04%
Cloro	Cl	0,04%
Fosforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04%
Sodio	Na <sub>2</sub> O	0,02%
Zinc	Zn	47 ppm
Plomo	Pb	36 ppm
Rubidio	Rb	30 ppm

\*Los valores en negrilla son informativos.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	XRF-7758 M- HCL03 Uniautonoma (% en peso)
Silicio	SiO <sub>2</sub>	98,64%
Potasio	K <sub>2</sub> O	0,63%
Calcio	CaO	0,23%
Magnesio	MgO	0,14%
Manganeso	MnO	0,08%
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06%
Azufre	SO <sub>3</sub>	0,05%
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05%
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04%
Cloro	Cl	0,04%
Sodio	Na <sub>2</sub> O	0,02%
Zinc	Zn	66 ppm
Plomo	Pb	51 ppm
Rubidio	Rb	21 ppm

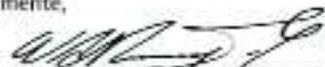
\*Los valores en negrilla son informativos.

**Nota:** El resultado analítico presentado corresponde exclusivamente a las muestras recibidas y no a otro material de la misma procedencia. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe. La modificación parcial o total del presente informe, invalida los resultados presentados en el mismo.

Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 30 días posteriores a la entrega de este informe. La conservación y los resultados de preparación serán almacenados por un período de 45 días. El laboratorio no se hace responsable de la disposición del material.

**Nota de confidencialidad:** El laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos.

Cordialmente,

  
Ing. WILSON ROMERO M.  
Profesional de Apoyo

## ANEXO B

Inicialmente se realiza una comparación de resultados entre los métodos de medición de densidad para verificar cuál resulta ser más apropiado, los resultados estadísticos base de la comparación entre las densidades es mostrado en la Tabla 9.

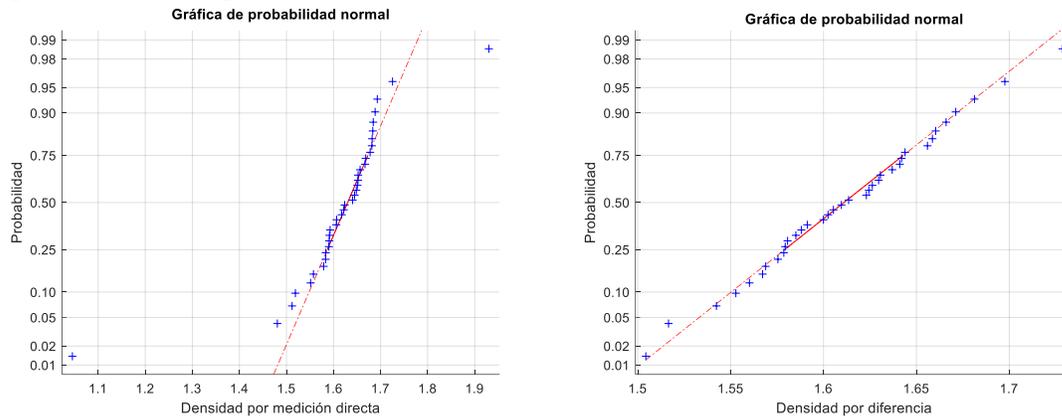
Tabla 9. Estadísticos de la comparación de la medida de la densidad.

	Densidad por diferencia	Densidad Directa
<b>Muestras</b>	36	36
<b>Promedio</b>	1,61221	1,61599
<b>Desviación estándar</b>	0,0493575	0,123624
<b>Coefficiente de variación</b>	3,06%	7,65%
<b>Mínimo</b>	1,50435	1,04516
<b>Máximo</b>	1,72869	1,93
<b>Rango</b>	0,224341	0,884839
<b>Sesgo estandarizado</b>	0,067569	-6,12272*
<b>Curtosis estandarizada</b>	0,00666519	16,7622*

\*Valores que indican una desviación severa de la normalidad.

Dado que los valores del sesgo estandarizados y de la curtosis estandarizada de la densidad directa están fuera del intervalo  $[-2, 2]$ , hay evidencia de que sus medidas provienen de una distribución no normal lo que invalida las pruebas de comparación de la varianza. Por otra parte, las medidas de la densidad por diferencia provienen de una distribución normal. Las gráficas de probabilidad normal de la medida de la densidad por diferencia y de la densidad directa se muestran en la Figura 56. Para verificar el comportamiento de las distribuciones se realizó una prueba de Lilliefors con confianza de 95% sobre cada grupo de datos y el valor-p se determinó usando simulaciones MonteCarlo con error de estimación de  $1(10^{-4})$ .

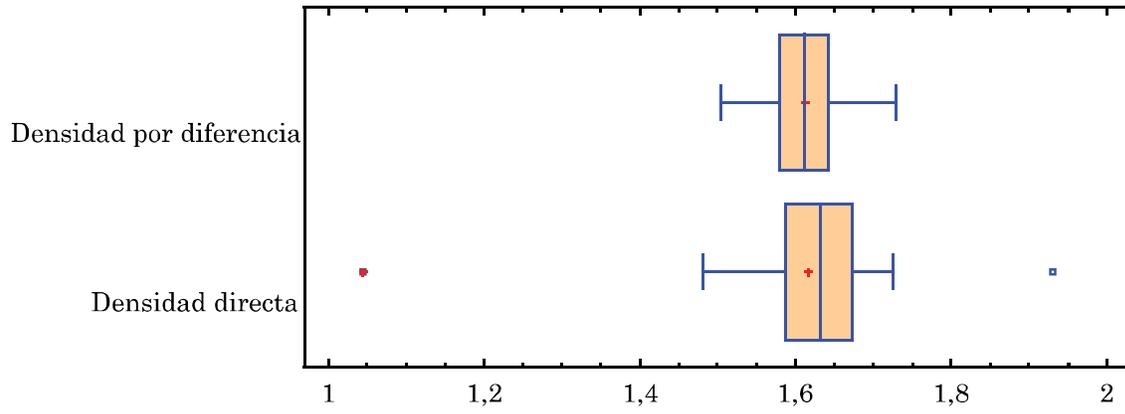
**Figura 56. Gráficas de probabilidad normal de las medidas de la densidad.**



A la izquierda se muestran los datos de la densidad por medición directa donde los valores atípicos hacen que la distribución se salga de la normalidad. A la derecha se muestran los datos de la densidad por diferencia, la gráfica muestra normalidad de los datos.

Las pruebas Lilliefors establecieron efectivamente que los datos de densidad por medición directa no provienen de una distribución normal con p-valor  $1,5833(10^{-4})$ , mientras que los datos de densidad por diferencia provienen de una distribución normal con p-valor 0,9887. Debido entonces a la no normalidad de los datos de densidad directa, se eliminará esta variable de respuesta del experimento. En la Figura 57, se muestra un gráfico de caja y bigotes para las medidas de las densidades donde se observa la medida centralizada normal con baja variabilidad para los datos de las medidas de densidad por diferencia mientras que las medidas de densidad directa muestran una alta variabilidad debido a la presencia de datos atípicos lo que produce el sesgo en la distribución.

Figura 57. Gráfico de caja y bigotes para la medición de las densidades.



## ANEXO C

**Tabla 10. Niveles completos de experimentos y mediciones de variables de respuesta.**

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de mezcla</b>	<b>Resistencia a la compresión</b>	<b>Resistencia a la flexión</b>	<b>Densidad por diferencia</b>	<b>Densidad directa</b>	<b>Absorción</b>
	<b>%</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
Cascarilla	3	580,32	13,13	1,66	1,68	17,53
Cascarilla	3	660,35	13,57	1,60	1,65	18,34
Cascarilla	3	522,70	4,75	1,58	1,58	20,28
Cascarilla	3	383,10	11,72	1,58	1,62	20,81
Cascarilla	5	296,39	5,79	1,52	1,52	22,45
Cascarilla	5	357,58	8,82	1,54	1,48	22,27
Cascarilla	5	380,20	9,44	1,57	1,61	20,64
Cascarilla	5	460,87	8,52	1,59	1,59	20,52
Cascarilla	7	403,55	10,61	1,59	1,51	20,54
Cascarilla	7	529,32	10,43	1,58	1,55	20,81
Cascarilla	7	501,93	5,68	1,55	1,56	20,99
Cascarilla	7	439,11	12,10	1,59	1,58	20,83
Ceniza	3	388,31	9,79	1,64	1,67	20,52
Ceniza	3	354,25	9,57	1,67	1,05	19,66
Ceniza	3	256,84	10,02	1,64	1,68	19,78
Ceniza	3	577,17	14,74	1,61	1,65	20,63
Ceniza	5	414,93	11,58	1,56	1,59	20,44
Ceniza	5	536,05	10,69	1,61	1,58	20,17
Ceniza	5	484,53	15,12	1,63	1,69	19,85
Ceniza	5	371,73	10,54	1,57	1,59	20,21
Ceniza	7	350,03	7,36	1,66	1,65	20,14
Ceniza	7	331,97	10,63	1,67	1,68	19,31
Ceniza	7	494,18	10,29	1,64	1,64	19,28
Ceniza	7	435,07	10,03	1,58	1,59	20,59
Microsílice	3	282,27	9,36	1,64	1,64	19,65
Microsílice	3	314,78	10,79	1,62	1,62	19,23
Microsílice	3	396,93	10,87	1,60	1,62	19,67
Microsílice	3	223,15	12,26	1,63	1,65	20,00
Microsílice	5	299,67	7,18	1,68	1,69	19,71
Microsílice	5	520,52	5,87	1,66	1,67	19,75
Microsílice	5	391,24	11,21	1,73	1,93	18,85
Microsílice	5	640,12	10,19	1,63	1,66	19,70
Microsílice	7	261,83	6,24	1,62	1,68	18,99

Microsílice	7	345,13	12,30	1,70	1,68	19,43
Microsílice	7	335,55	11,98	1,50	1,73	19,19
Microsílice	7	235,42	10,87	1,61	1,61	20,43

---