

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

PREPARACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE
GEOPOLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CAÑA
GUADÚA ECUATORIANA

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Lilibethed Carolina Murillo Jimenez

Jenny Alexandra Quevedo Torres

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto integrador a Dios y a toda mi familia que, aunque estamos separados siempre los llevo en mi corazón son siempre mi inspiración infinita para salir adelante. A mi novio Jonathan y su mamá que han sido mi pilar este último año de universidad, gracias por toda su ayuda y amor incondicional. A todos mis amigos, por todas las hermosas experiencias que han compartido conmigo durante esta etapa universitaria. A mis queridas amigas Ana, Fernanda y Luisa que me han brindado su cariño y apoyo siempre. Finalmente dedico este proyecto integrador a todos los estudiantes que dejan su hogar y familia en otras provincias por perseguir sus sueños, quiero decirles que no se rindan, el camino es duro, pero Dios es muy sabio y te da las mejores experiencias de la vida cuando te toca luchar, cuando finalmente llegas a la meta es la satisfacción más grande que encuentras en la vida.

Lilibethed Murillo

DEDICATORIA

Este proyecto integrador está dedicado a mis padres, hermanos y amigos que han estado apoyándome incondicionalmente durante todo este tiempo.

Jenny Quevedo

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primera instancia a nuestros tutores el Ph.D. Haci Baykara y la M.Sc. Andrea Gavilanes por confiar en nosotras para desarrollar este proyecto y por compartir con nosotras su experiencia y conocimientos.

Al Ing. Tyrone Alcivar encargado de Laboratorio de hidrocarburos, quien nos facilitó instalaciones y equipos para llevar a cabo la experimentación.

Al Ing. Washington Pincay por proporcionarnos el laboratorio y su experiencia para manejar la zeolita.

Al M.Sc. Julio Cáceres y Ing. Johanna Alava por su apoyo durante la realización de los ensayos de caracterización.

Al Ph.D. Mauricio Cornejo por su apoyo para realizar el difractograma de las fibras. A todos los que conforman el Laboratorio LEMAT, quienes nos apoyaron durante todos los ensayos de caracterización.

A mí querida compañera Jenny Quevedo, por su cariño, paciencia, risas y ese apoyo incondicional durante este proyecto.

Lilibethed Murillo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida académica, a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

A nuestros tutores el Ph.D. Haci Baykara y la M.Sc. Andrea Gavilanes por compartir sus conocimientos. Al Ing. Tyrone Alcivar encargado del Laboratorio de Hidrocarburos, al Ing. Washington Pincay, al Ph.D. Mauricio Cornejo, al M.Sc. Julio Cáceres, Ing. Johanna Alava y a todo el personal del LEMAT por su ayuda brindada durante los ensayos realizados y todos sus consejos.

A mi compañera Lilibethed por haber sido el mejor apoyo durante este proyecto, agradezco su paciencia, su tiempo y sus conocimientos brindados durante la elaboración del proyecto integrador.

Jenny Quevedo

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Lilibethed Carolina Murillo Jimenez* y *Jenny Alexandra Quevedo Torres* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”


Lilibethed Carolina
Murillo Jimenez


Jenny Alexandra
Quevedo Torres

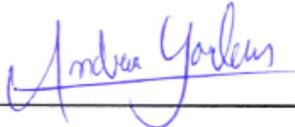
EVALUADORES



M.Sc. Miriam Checa Artos
PROFESOR DE LA MATERIA



Ph.D. Haci Baykara
PROFESOR TUTOR



M.Sc. Andrea Gavilanes Triviño
PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la factibilidad del uso de las fibras de caña *Guadúa Angustifolia* como material reforzante en geopolímeros. El proyecto se resume en 3 etapas. La primera etapa consistió en la extracción de las fibras de caña Guadúa, las cuales se obtuvieron por procesos mecánico-químicos. Además, se realizó un tratamiento alcalino con el fin de incrementar el porcentaje de celulosa en las fibras. La segunda etapa fue la elaboración de los geopolímeros a partir de zeolita natural. Los geopolímeros se prepararon usando una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio (10M) y se reforzaron con fibra de caña guadúa en 0.3, 0.5 y 1% en peso. La tercera etapa es la caracterización de los geopolímeros obtenidos mediante pruebas de resistencia a la compresión y flexión. Adicionalmente, las muestras que mostraron la mayor resistencia a la compresión se analizaron y caracterizaron mediante las técnicas FTIR, XRD, TGA-DSC y SEM-EDAX. En base a los resultados obtenidos se concluye que las fibras de caña Guadúa son un potencial material para el reforzamiento en geopolímeros ya que con la adición de 1% de fibras se logró incrementar la resistencia de compresión y flexión en comparación del geopolímero sin reforzamiento.

Palabras Clave: *Guadúa Angustifolia*, Fibras naturales, Geopolímeros reforzados, Resistencia a la compresión, Resistencia a la flexión.

ABSTRACT

The main objective of this project is to evaluate the feasibility of using the fibers of *Guadúa Angustifolia* (bamboo fibers) as a reinforcing material in geopolymers. The project will be summarized in 3 stages. The first stage consists the extraction of Guadúa fibers, which were obtained by mechanical-chemical processes. Furthermore, an alkaline treatment was carried out in order to increase the percentage of cellulose in fibers. The second stage was the elaboration of the geopolymers based on natural zeolite. The geopolymer was prepared by using a mixture of sodium silicate and sodium hydroxide (10M) and reinforced with Guadúa fibers by 0.3, 0.5 and 1% by weight. The third stage is the characterization of the obtained geopolymers by means of the compressive and flexural strength tests. Additionally, the samples showed the highest compressive strength were analyzed and characterized by FTIR, XRD, TGA-DSC and SEM-EDAX techniques. The results show that the fibers of the *Guadúa Angustifolia* are a potential material for reinforcing geopolymers since with the addition of 1% of fibers it was possible to increase the compressive and flexural strength compared to the geopolymers without reinforcement.

Keywords: *Guadúa Angustifolia, Natural fibers, Reinforced geopolymers, Compressive strength, Flexural strength.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE ANEXOS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE CUADROS	XII
CAPÍTULO 1	1
1 Introducción	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Antecedentes.....	4
1.4.2 Cemento Portland.....	5
1.4.3 Geopolímero	7
1.4.4 Zeolitas	9
1.4.5 Guadúa angustifolia.....	9
CAPÍTULO 2	13
2 Metodología.....	13
2.1 Alternativas para la extracción de la fibra de caña guadúa.....	13

2.1.1	Extracción de la fibra por procesos mecánicos.....	13
2.1.2	Extracción de la fibra por procesos químicos	14
2.1.3	Método mecánico- químico.....	15
2.1.4	Criterios para la elección del método.....	15
2.2	Preparación de materiales	15
2.2.1	Zeolita.....	15
2.2.2	Fibra de caña guadúa.....	16
2.2.3	Activadores alcalinos	18
2.3	Elaboración de geopolímeros	18
2.3.1	Preparación de la mezcla	18
2.3.2	Cubos geopoliméricos	20
2.3.3	Prismas geopoliméricos.....	21
2.4	Pruebas Mecánicas.....	21
2.4.1	Determinación de la resistencia a la compresión.....	21
2.4.2	Determinación de la resistencia a la flexión.....	22
2.5	Ensayos de caracterización	23
2.5.1	FTIR.....	24
2.5.2	XRD	25
2.5.3	TGA y DSC.....	26
2.5.4	SEM y EDAX	27
2.5.5	Microscopio óptico	28
CAPÍTULO 3		29
3	Resultados y análisis.....	29
3.1	Análisis de las pruebas mecánicas	29
3.1.1	Ensayo de resistencia a la compresión	29
3.1.2	Ensayo de resistencia a la flexión.....	32
3.2	Análisis de los ensayos de caracterización.....	35

3.2.1	FTIR.....	35
3.2.2	XRD	39
3.2.3	TGA y DSC.....	40
3.2.4	SEM y EDAX	43
3.2.5	Microscopio óptico	45
CAPÍTULO 4		47
4	Conclusiones y recomendaciones.....	47
4.1	Conclusiones	47
4.2	Recomendaciones	48
BIBLIOGRAFÍA.....		
ANEXOS		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LEMAT	Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales
ASTM	American Society for Testing and Materials
OPC	Cemento Portland
FCG	Fibras de caña guadúa
FST	Fibras sin tratamiento
FCT	Fibras con tratamiento
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier
XRD	Difracción de rayos X
TGA	Análisis termogravimétrico
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
SEM	Microscopía electrónica de barrido
EDAX	Análisis de rayos X por dispersión de energía
FICT	Facultad de ingeniería en ciencias de la tierra

SIMBOLOGÍA

g	Gramos
°C	Grados centígrados
µm	Micra
CO ₂	Dióxido de carbono
MPa	Megapascal
MJ	Megajoule
Na	Sodio
K	Potasio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Si	Silicio
O	Oxígeno
Al	Aluminio
CaO	Oxido de Calcio
[SO ₄] ⁻⁴	Iones Silicatos
[AlO ₄] ⁻⁵	Iones Aluminatos
m	Metros
mL	Mililitros
cm	Centímetros
pH	Potencial de Hidrogeno
%	Porcentaje
ha	Hectáreas
N	Normal
M	Molar
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
S _f	Resistencia a la flexión
P	Carga máxima
Θ	Theta

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo mundial de cemento.....	6
Figura 1.2 Reacción de polimerización en un medio alcalino.....	8
Figura 1.3 Localización de la caña guadúa en Ecuador.....	10
Figura 1.4 Partes del culmo de la caña guadúa.....	11
Figura 2.1 Medidor de tamaño de partícula, MASTERSIZER.....	16
Figura 2.2 Obtención de fibras de caña guadúa.....	17
Figura 2.3 Proceso para la obtención de fibra de caña guadúa.....	18
Figura 2.4 Equipo y ensayo de resistencia a la compresión.....	22
Figura 2.5 Equipo y ensayo de resistencia a la flexión.....	23
Figura 2.6 Equipo de espectroscopía infrarroja de Fourier.....	25
Figura 2.7 Equipo de difracción de rayos x.....	26
Figura 2.8 Equipo de análisis termogravimétrico.....	27
Figura 2.9 Equipo de análisis SEM/EDAX.....	28
Figura 3.1 Relación de la fuerza de compresión vs % de fibra de caña guadúa.....	30
Figura 3.2 Cubos de geopolímero.....	31
Figura 3.3 Cubos de geopolímero con tamaño de partícula 45 μm	32
Figura 3.4 Relación de la resistencia a la flexión vs % de fibra de caña guadúa.....	33
Figura 3.5 Geopolímeros sin reforzamiento y reforzados con 0.3% de FCG.....	34
Figura 3.6 Geopolímeros reforzados con 0.5 y 1% de FCG.....	35
Figura 3.7 Distribución de fibras en geopolímeros sin reforzamiento.....	45
Figura 3.8 Distribución de fibras en geopolímeros reforzados con 0.3%FCG.....	45
Figura 3.9 Distribución de fibras en geopolímeros reforzados con 0.5% FCG.....	46
Figura 3.10 Distribución de fibras en geopolímeros reforzados con 1% FCG.....	46

ÍNDICE DE ANEXOS

- Figura A.1 Análisis tamaño de partícula zeolita
- Figura AB.1 Curvas de compresión del geopolímero sin reforzamiento muestra 1
- Figura AB.2 Curvas de compresión del geopolímero sin reforzamiento muestra 2
- Figura AB.3 Curvas de compresión del geopolímero sin reforzamiento muestra 3
- Figura AB.4 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 1
- Figura AB.5 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 2
- Figura AB.6 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 3
- Figura AB.7 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 1
- Figura AB.8 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 2
- Figura AB.9 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 3
- Figura AB.10 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 1
- Figura AB.11 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 2
- Figura AB.12 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 3
- Figura AC.1 Curvas de flexión del geopolímero sin reforzamiento muestra 3
- Figura AC.2 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 1
- Figura AC.3 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 2
- Figura AC.4 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 3
- Figura AC.5 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 1
- Figura AC.6 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 2
- Figura AC.7 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 3
- Figura AC.8 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 1
- Figura AC.9 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 2
- Figura AC.10 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 3
- Figura AD.1 Espectro FTIR fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino (FST)
- Figura AD.2 Espectro FTIR fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino (FCT)
- Figura AD.3 Comparación entre espectros FST Y FCT
- Figura AD.4 Espectro FTIR zeolita
- Figura AD.5 Espectro FTIR geopolímero sin reforzamiento
- Figura AD.6 Espectro FTIR geopolímero reforzado con 0.3% FCG
- Figura AD.7 Espectro FTIR geopolímero reforzado con 0.5% FCG
- Figura AD.8 Espectro FTIR geopolímero reforzado con 1% FCG
- Figura AE.1 Difractograma fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino

Figura AE.2 Difractograma fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino
Figura AE.3 Difractograma zeolita
Figura AE.4 Difractograma de geopolímero sin reforzamiento
Figura AE.5 Difractograma geopolímero reforzado con 0.3% FCG
Figura AE.6 Difractograma geopolímero reforzado con 0.5% FCG
Figura AE.7. Difractograma geopolímero reforzado con 1% FCG
Figura AF.1. Análisis DSC-TGA de fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino
Figura AF.2. Análisis DSC-TGA de fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino
Figura AF.3. Comparación TGA fibras de caña guadúa sin y con tratamiento
Figura AF.4. Curvas DTG fibras de caña guadúa sin y con tratamiento
Figura AF.5. Análisis DSC-TGA de la zeolita
Figura AF.6. Análisis DSC-TGA geopolímero sin reforzamiento
Figura AF.7. Análisis DSC-TGA geopolímero reforzado con 0.3% FCG
Figura AF.8. Análisis DSC-TGA geopolímero reforzado con 0.5% FCG
Figura AF.9. Análisis DSC-TGA geopolímero reforzado con 1% FCG
Figura AG.1. Morfología fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino
Figura AG.2. Morfología fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino
Figura AG.3. Morfología de la zeolita natural
Figura AG.4. Morfología de la zeolita natural
Figura AG.5. Morfología geopolímero sin reforzamiento
Figura AG.6. Morfología geopolímero reforzado con 0.3% FCG
Figura AG.7. Morfología geopolímero reforzado con 0.5% FCG
Figura AG.8. Morfología geopolímero reforzado con 1% FCG
Figura AG.9. Resultado EDAX fibras de caña guadúa sin tratamiento
Figura AG.10. Resultado EDAX fibras de caña guadua con tratamiento
Figura AG.11. Resultado EDAX zeolita
Figura AG.12. Resultado EDAX geopolímero sin reforzamiento
Figura AG.13. Resultado EDAX geopolímero reforzado con 0.3% FCG
Figura AG.14. Resultado EDAX geopolímero reforzado con 0.5% FCG
Figura AG.15. Resultado EDAX geopolímero reforzado con 1% FCG

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición química de las fibras de guadúa <i>Angustifolia</i>	12
Tabla 2.1 Planificación de los cubos de geopolímero.....	19
Tabla 2.2 Planificación de los prismas de geopolímero.....	20
Tabla 3.1 Resultados del ensayo resistencia a la compresión	29
Tabla 3.2. Resultados del ensayo resistencia a la flexión	33

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1 Interpretación de los espectros FST Y FCT	36
Cuadro 3.2 Interpretación del espectro infrarrojo de la zeolita natural	37
Cuadro 3.3 Interpretación del espectro infrarrojo de la geopolímeros	38
Cuadro 3.4 Interpretación cuantitativa DRX de la zeolita y geopolímeros	40
Cuadro 3.5 Pérdida de masa dentro de intervalos de temperatura FCG.....	41
Cuadro 3.6 Pérdida de masa de la zeolita y geopolímeros	42

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

El cemento Pórtland también llamado OPC, es un aglomerante hidráulico obtenido a través del proceso de calentamiento de una mezcla de piedra caliza con arcilla pretratadas y sometidas a una temperatura próxima a los 1400°C; como resultado de este proceso se obtiene la formación de nódulos de clinker, que posteriormente pasan a una molienda donde se adiciona sulfato de calcio y una o más adiciones de puzolana hasta obtener un polvo fino y homogéneo [1].

La demanda de este material presenta un continuo incremento por su aplicación en la elaboración del concreto, el material de construcción más usado en el planeta, ya que presenta propiedades mecánicas adecuadas y es de fácil adquisición. Pero hay que considerar que en su fabricación se consumen grandes cantidades de materias primas, energía y así mismo genera gran cantidad de residuos sólidos y emisiones de CO₂ [2].

Las preocupaciones actuales sobre el medio ambiente y el cambio climático han propiciado el uso eficiente de recurso y energías, búsqueda de nuevos materiales menos contaminantes, construcción de infraestructuras que no afecten al medio ambiente y de igual modo se impulsa que las industrias adopten un enfoque de sostenibilidad [3].

Un material con características similares al cemento, llamado geopolímero ha sido evaluado en años recientes para el remplazo del OPC. Los geopolímeros son polímeros inorgánicos formados por la polimerización de alumino-silicatos con soluciones alcalinas. Estos presentan varios atributos deseables que incluyen durabilidad, son amigables con el medio ambiente, se derivan de materiales naturales, pueden prepararse a temperatura ambiente, presentan alta resistencia química, térmica y no emiten niveles altos de dióxido de carbono en comparación con la preparación del OPC [4].

El presente proyecto integrador busca evaluar el efecto en las propiedades mecánicas de geopolímeros elaborados a partir de zeolita natural, con la incorporación de fibras naturales de caña guadúa, añadidas en un 0.3, 0.5 y 1% en peso. Para llevar a cabo este estudio se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, flexión y una evaluación microestructural con técnicas de caracterización como difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido, análisis termogravimétrico y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.

1.1 Descripción del problema

Junto a las ventajas que tienen los geopolímeros se presentan algunos problemas que deben ser resueltos para ser considerados potenciales competidores del cemento Portland, estos incluyen fragilidad como la mayoría de las cerámicas, baja fuerza de tensión y flexión, que pueden conducir fácilmente a fallas catastróficas y representan el principal inconveniente que limita el uso de estos materiales [4], [5].

Por otro lado, se debe precisar que el reforzamiento de geopolímeros con fibras sintéticas ha sido un tema desarrollado e investigado extensamente, porque mejora considerablemente sus propiedades mecánicas y disminuye su fragilidad debido a que las fibras ayudan a controlar la difusión de micro y macro grietas a través del material [6], [7]. Las fibras sintéticas más utilizadas para el reforzamiento de geopolímeros han sido carbón, vidrio, acetato de polivinilo y policloruro de vinilo [4].

A pesar de que las fibras sintéticas han demostrado ser eficientes para la solución de los problemas de fragilidad de los geopolímeros, estas presentan un alto costo, lo que conllevó al remplazo de estas por fibras naturales [4].

1.2 Justificación del problema

Conscientes de la necesidad de búsqueda de materiales de construcción menos contaminantes y más ecológicos, este proyecto hará uso de fibras naturales de la

caña guadúa para el reforzamiento de los geopolímeros. Las ventajas de las fibras naturales sobre las fibras sintéticas son su baja densidad, bajo costo, menor consumo de recursos y energía durante su extracción, propiedades específicas aceptables así como la existencia y disponibilidad de una amplia gama de fibras naturales [4], [8]. De esta manera este proyecto intenta contribuir con una investigación y resultados que nos permita inferir si las fibras de caña guadúa son un material de reforzamiento adecuado para los geopolímeros.

Por otro lado, la caña guadúa ha sido reconocida a nivel mundial por sus excelentes propiedades mecánicas y amplia aplicabilidad, más en Ecuador esta especie ha sido desvalorizada limitando su uso como andamios en construcciones y como soporte para el sector bananero [9]. El uso de estas fibras como material reforzante en geopolímeros agregaría un valor comercial y económico a esta especie, beneficiando principalmente a agricultores y comunidades de nuestro país que cuentan con este recurso natural.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la factibilidad del uso de fibras de caña guadúa ecuatoriana como material reforzante en geopolímeros, mediante el análisis de los resultados de caracterización.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener la fibra natural a partir de caña guadúa ecuatoriana.
- Elaborar bloques de geopolímero a partir de zeolita natural reforzados a distintas composiciones másicas con fibra de caña guadúa ecuatoriana.
- Realizar la caracterización de los bloques elaborados de geopolímero reforzados con fibra de caña guadúa, por medio de métodos instrumentales.
- Comparar las propiedades mecánicas de los bloques de geopolímero reforzados con fibra de caña guadúa a distintas concentraciones másicas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

A continuación, se presentarán las investigaciones más relevantes acerca de la evolución del reforzamiento de geopolímeros.

- Dias & Thaumaturgo, 2005 en Brasil elaboraron geopolímeros a base de metakaolin y los reforzaron con fibras de basalto. Las fibras fueron añadidas en un 0.5% y 1% donde concluyeron que los geopolímeros reforzados con fibras de basalto a los 28 días de curado presentaban un incremento en la resistencia a la flexión en 34% para los geopolímeros reforzados con un 0.5% y 25% para geopolímeros reforzados con un 1%. A si mismo también obtuvieron una reducción en la resistencia a la compresión en un 28% para los geopolímeros reforzados con 0.5% y no encontraron cambios significativos con respecto a los geopolímeros reforzados a 1%. Todos estos valores se obtuvieron comparando los geopolímeros reforzados con fibras de basalto con los geopolímeros sin reforzamiento [10].
- Bernal et al., 2009 en Colombia analizaron geopolímeros elaborados con metacaolín y reforzados con fibra de carbono, los cuales adicionaron en porcentaje de volumen al 0.10, 0.15 y 0.21%. Concluyeron que la incorporación de fibras de carbono en geopolímeros no afecta considerablemente su resistencia a la compresión más su resistencia a la flexión a los 28 y 60 días de curado es superior comparado con el mortero sin reforzamiento con volúmenes superiores al 0.15% de fibra [11].
- Natali, Manzi, & Bignozzi, 2011 en Italia investigaron el efecto de un geopolímero elaborado con metacaolín y reforzado con 4 fibras diferentes, carbón, vidrio, acetato de polivinilo y policloruro de vinilo al 1% en peso, la fuerza de flexión del geopolímero puro fue de 6.9 MPa mientras que al adicionar las fibras se logró obtener fuerzas de compresión 11.7, 9, 11.2 y 10 MPa respectivamente a los 7 días de curado. Concluyeron que las fibras

seleccionadas para el reforzamiento tienen buenas propiedades de cohesión, capaces de controlar micro y macro fisuras a lo largo de la matriz [6].

- Korniejenko, Frączek, Pytlak, & Adamski, 2016 en Polonia estudiaron la resistencia a la compresión de un geopolímero elaborado con cenizas y reforzado con fibras naturales. El geopolímero se reforzó al 1% con fibras de coco, algodón, sisal y raphia los valores obtenidos para la fuerza de compresión a los 28 días de curado fueron de 31.16 MPa, 28.42 MPa, 25.16 MPa y 13.66 MPa respectivamente, mientras que el valor obtenido para el geopolímero puro fue de 24.78 MPa. Donde concluyeron que una apropiada adición de fibras naturales puede mejorar las propiedades mecánicas de los geopolímero [12].
- Espinoza & García Ochoa, 2017 en Ecuador elaboraron geopolímeros y los reforzaron con fibra de polipropileno variando su composición en 0 0.5 y 1% en peso. Concluyeron que el reforzamiento con polipropileno mejora poco la resistencia a la compresión con la incorporación de fibras al 0.5% el valor más alto obtenido a los 7 días de curado fue de 4.63 MPa mientras que del geopolímero sin reforzamiento fue de 4 MPa [13].

1.4.2 Cemento Portland

Las materias primas en la producción del cemento Portland son caliza, marga o creta de la cual se requiere el carbonato de calcio. Mientras que la sílice, el óxido de hierro y la alúmina se las encuentra en arena, pizarra, arcilla, mena de hierro. La extracción de las materias primas naturales se hace en canteras a cielo abierto. Estas extracciones deben de recurrir a perforaciones de roca, excavaciones, acarreo y trituraciones. Para la cocción del crudo se debe de tener en cuenta la finura y la composición del mismo para su posterior paso al horno [14].

La manufactura del cemento portland inicia principalmente con la extracción y preparación de la materia prima la cual puede realizarse por vía seca o vía

húmeda. La principal característica es que por el proceso seco utiliza mayor cantidad de energía en la molienda y el proceso húmedo en la cocción ya que debe de eliminar la mayor cantidad de agua [15]. Las materias primas ricas en óxidos de silicio, calcio, aluminio y hierro son calentadas temperaturas de alrededor de 1200 – 1400°C en hornos horizontales obteniendo el clinker, el cual pasa a trituramiento mezclado con aditivos [16].

Durante la fabricación del cemento se consume energía en la cocción de la materia prima, y energía eléctrica en las operaciones de molienda entre otros hornos. El consumo energético en la producción del cemento Portland es aproximadamente entre 2900 y 3200 MJ/ ton de clinker, esto implica que el costo energético es aproximadamente el 30% del costo de producción [14]. A nivel mundial la contaminación por emisiones de CO₂, corresponde el 8% a la producción del cemento Portland. Las empresas cementeras con respecto a las emisiones del CO₂ tiene una relación de 1:1 producen aproximadamente dos mil millones de toneladas de su producto por lo tanto están produciendo la misma cantidad de CO₂ [17]. El cemento portland es el material más utilizado a nivel mundial en lo que a construcción se refiere, en la Figura 1.1 se presenta el consumo mundial de cemento para el año 2016 que es de 4.100 millones de toneladas aproximadamente [18].

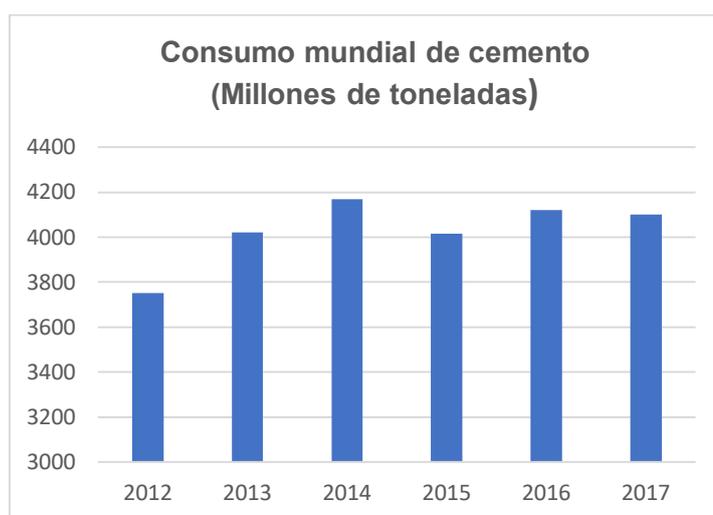


Figura 1.1 Consumo mundial de cemento

Fuente: [18]

1.4.3 Geopolímero

El estudio de los cementos alcalinos empezó desde 1930 cuando Kühl, publico su investigación sobre el establecimiento de la escoria mezclada con soluciones de potasa seca. Pero desde 1972 Davidovits realizó una búsqueda de materiales resistentes al fuego dándoles el nombre patentado de geopolímero, esto surgió porque en 1970 se produjeron varios incendios catastróficos en Francia [19].

Dentro de los avances de los geopolímeros uno de los más importantes es el desarrollo de una mezcla de cemento Portland y geopolímero el que es utilizado en la pavimentación industrial y reparación de material de autopistas ya que tiene una buena resistencia a la compresión [20]. También es utilizado para mejorar las propiedades mecánicas de los cementos y hormigones [20]. Durante los últimos años de investigación se han encontrado varios usos de los geopolímeros a continuación se nombra las aplicaciones más importantes [21]:

- Compuesto resistente al fuego y resistente al fuego para la reparación y el fortalecimiento de infraestructuras.
- Paneles de geopolímero espumados (expandidos) para aislamiento térmico.
- Aplicaciones ignífugas de alta tecnología, interiores de aeronaves y automóviles

1.4.3.1 Geopolimerización

En esta reacción se obtiene una red tridimensional de aluminosilicatos amorfo debido a la geopolimerización [2]. Una de las materias primas para obtener los geopolímeros es por medio de las zeolitas porque son aluminosilicatos cristalinos con estructura basada en unidades tetraédricas de silicio-oxígeno y aluminio-oxígeno. Estos materiales contienen cationes alcalinos intercambiables de tierras tales como el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} que mantienen una carga natural. La activación se ha realizado solo con

compuestos alcalinos [22]. La combinación que implica una reacción química entre varios óxidos de aluminio-silicato con silicatos en condiciones altamente alcalinas, son enlaces poliméricos Si–O–Al–O, que se pueden presentar esquemáticamente tal como en la Figura 1.2.

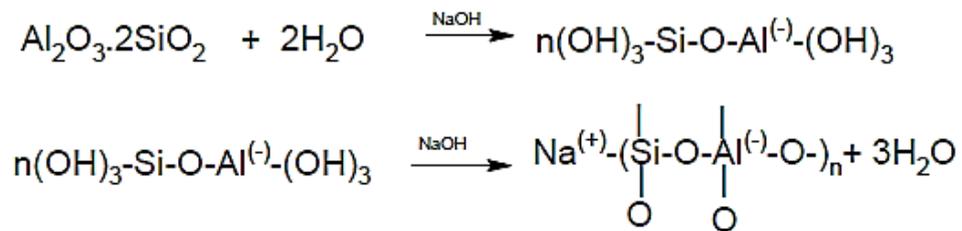


Figura 1.2 Reacción de polimerización en un medio alcalino

Fuente: [23]

En conclusión, de las dos anteriores reacciones nos indica que cualquier fuente de aluminio-silicato puede convertirse en una fuente de geopolimerización [23]. La geopolimerización tiene varios factores que se debe de tener en cuenta como es el porcentaje de CaO y la relación molar Si-Al en el material de origen, el tipo de solución alcalina, la disolución de Si la que influye significativamente en la propiedades de los geopolímero [24]

1.4.3.2 Activadores Alcalinos

Los activadores alcalinos tienen gran importancia en los geopolímeros, ya que sus propiedades mecánicas dependen de la concentración de estos. Los más utilizados son el hidróxido de sodio e hidróxido de potasio y el silicato de sodio o de potasio [25].

La relación de silicato de sodio/hidróxido de sodio aumentará la resistencia del geopolímero ya que hay una gran cantidad de SiO₂, La relación óptima es de 2,5 ya que dentro de este rango se observó una buena resistencia de compresión, pero con 3 la fuerza de compresión tiende a disminuir debido al alto contenido alcalino. Se recomienda que la cantidad de silicato de

sodio sea mayor ya que ayuda a la polimerización y a su vez a mejorar la resistencia mecánica [26].

1.4.4 Zeolitas

Las zeolitas son minerales cristalinos que se caracterizan por tener una estructura molecular tetraédrica, constituyen más del 90% de las rocas volcánicas sedimentarias y presentan características físicas y químicas siendo valiosas para el área industrial, acuícola y agrícola. El término zeolita viene del griego zéon y líthos que quiere decir piedra efervescente [27].

Químicamente son una clase de aluminosilicatos cristalinos basados en marcos rígidos con poros o canales que se encuentran bien definidos e intercomunicados los cuales forman cavidades. Estas cavidades contienen cationes metálicos intercambiables (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{+2}) y también pueden contener moléculas huéspedes como el agua [28]. La constitución principal de las zeolitas son las unidades tetraedro $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{-5}$ unidos entre sí por esquinas compartidas, formadas por puentes de oxígeno. El puente de oxígeno no suele ser lineal, el enlace Si/Al-O-Si/Al es muy flexible y su ángulo puede variar entre 120° y 180° [28].

1.4.5 Guadúa angustifolia

La Guadúa es una especie de bambú que pertenece a la familia de los pastos *Poaceae* y subfamilia *Bambusoideae*. La Guadúa angustifolia es endémica de América y se considera nativa en países como Venezuela, Colombia y Ecuador. Esta especie destaca por su alta velocidad de crecimiento, alcanza su madurez a los 4 años de ser cosechada y el tamaño de sus culmos alcanza hasta 30 m de altura y 25 cm de diámetro [9]. En la Figura 1.3 se representa las plantaciones más importantes de caña guadúa en el Ecuador, siendo estas la zona sur de Manabí y norte del Guayas. Aunque también se registran plantaciones en Pichincha y la Amazonia alcanzando las 275 ha y 300 ha respectivamente [9], [29].

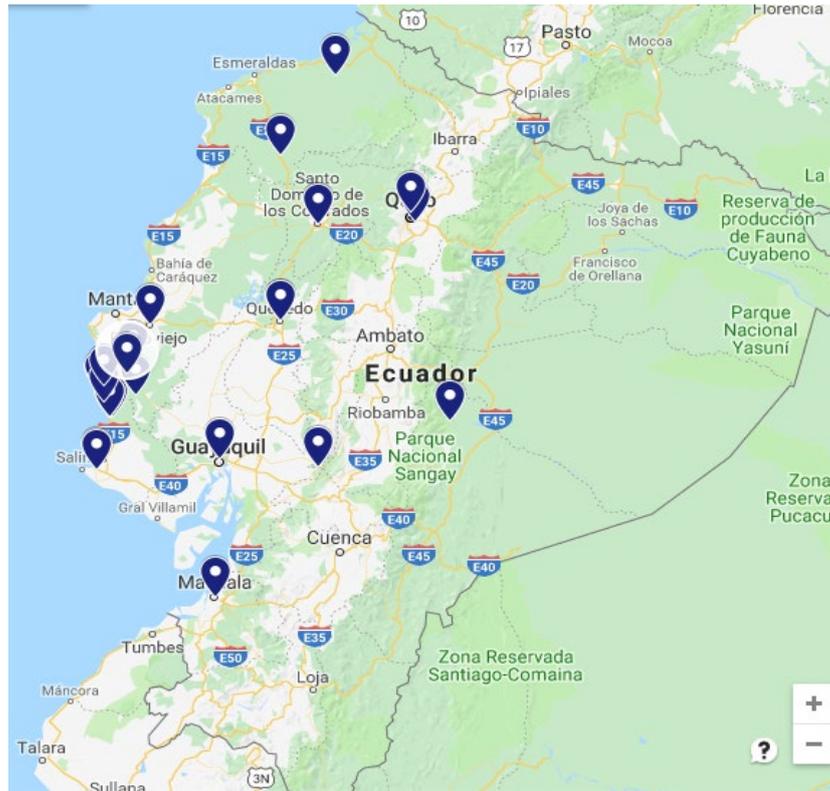


Figura 1.3 Localización de la caña guadúa en Ecuador

Fuente: [30]

1.4.5.1 Estructura externa e interna

La caña guadúa como la mayoría de las plantas está conformada por rizoma, culmo o tallo, ramas, hojas, flores y frutos. Más la parte aprovechada de la caña guadúa es el culmo o tallo debido a sus altas propiedades mecánicas y sus múltiples usos en la industria de la construcción [31]. El culmo de guadúa consta de dos partes principales que son los nudos y los entrenudos, (Figura 1.4) [32].

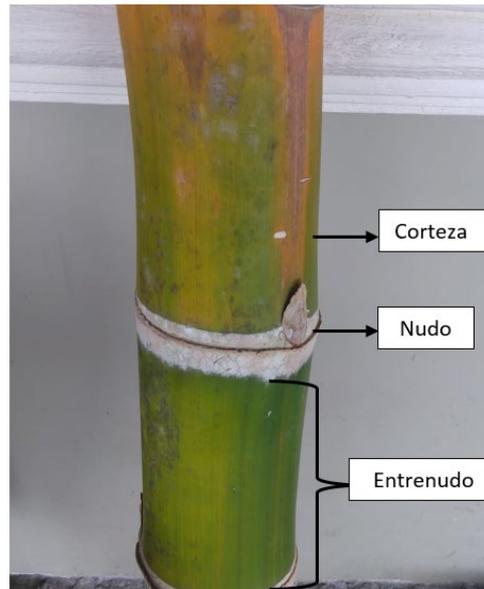


Figura 1.4 Partes del culmo de la caña guadúa.

Fuente: [32]

Los tejidos que constituyen los nudos y los entrenudos son diferentes en dirección, tamaño y densidad. Estos tejidos están formados por células de parénquima que representan un 50% del volumen total y un 50% de haces vasculares. La estructura de los haces vasculares consiste en tubos conductores de xilema y floema que se encuentran rodeados por fibras. Las fibras contribuyen con 60% a 70% del peso total se encuentran en mayor cantidad en la parte de los entrenudos donde forman una capa proyectora alrededor de los haces vasculares [32].

1.4.5.2 Estructura química

Las principales composiciones químicas de la caña guadúa son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Que ascienden al 90%. Las composiciones menores que ascienden al 10% en su composición se llaman extractivas estas se componen de resinas, taninos, ceras y sales inorgánicas [33], [34].

En comparación con las especies de madera dura, las composiciones químicas de la caña guadúa son bastante similares, excepto por el alto contenido de cenizas. La ceniza está compuesta principalmente de minerales inorgánicos, principalmente sílice, calcio y potasio además de

poseer una gran cantidad de sacáridos, almidón, grasa y proteínas que tienen un efecto negativo para la durabilidad de la caña guadúa [35] [33]. En la universidad nacional de Colombia Hurtado en 2017 [36], llevo a cabo una análisis químico de las fibras de la caña guadúa Angustifolia se presentan los resultados en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Composición química de las fibras de guadúa Angustifolia

Componente	% con respecto a base húmeda
Humedad	8.97
Celulosa	47.06%
Lignina	21.88
Hemicelulosa	11.82
Extractivos	6.47
Cenizas	3.8

Fuente: [36]

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA

2.1 Alternativas para la extracción de la fibra de caña guadúa

Para la extracción de la fibra de caña guadúa existen varios procedimientos entre ellos están:

- Proceso Químico
- Proceso Mecánico
- Proceso Químico – Mecánico

2.1.1 Extracción de la fibra por procesos mecánicos

La extracción de fibras por procesos mecánicos puede ser por explosión de vapor, trituración, laminación, molienda, proceso manual. Estos procesos se caracterizan por obtener fibras pequeñas.

- El método de explosión de vapores es un proceso que consiste en someter a los culmos de caña guadúa a un vapor sobrecalentado a 175°C durante 60 minutos y a 7-8 MPa, y elimina el vapor repentinamente para ayudar a la separación de la fibra de las lignina [37].
- El método de trituración de caña guadúa consiste en cortar en pequeños chips, y hacerla pasar por unos rodillos trituradores. Una vez obtenidas las fibras se las hace hervir durante 10 horas a 90°C y después secarlas. El principal problema es que solo se produce fibras cortas [38], [37].
- El método de molienda reside en cortar el bambú en tiras para después ponerlo en remojo en agua durante 24 horas, estas tiras son cortadas en pequeños chips, los cuales se coloca en una licuadora a máxima velocidad durante 30 minutos. Esta fibra es separada por medio de varios tamices y después colocada en la estufa durante 72 horas a 105°C [38].

- El método de laminación consiste en hacer pasar el bambú remojado durante una hora, por medio de una laminadora bajo una ligera presión y baja velocidad y con una hoja de afeitar se procede a la separación de las fibras. Las fibras son secadas a una temperaturas de 60°C, durante 2 horas [38], [39].
- El método de extracción manual radica en cortar los culmos en pequeñas tiras y retirar la corteza para dejarlos en remojo durante 3 días, pasado el tiempo estos son golpeados y después con un cuchillo se procede a rasparlos y posteriormente peinarlos. Una vez que se tiene la fibra se procede a secarla durante 2 horas a 60°C [38], [40].

2.1.2 Extracción de la fibra por procesos químicos

En este procedimiento se obtiene fibras largas, pero en algunas ocasiones pueden tener alguna alteración química si las soluciones son muy concentradas.

- El método químico asistido natural consiste en sumergir tiras delgadas de la caña guadúa en nitrato de zinc en una relación 20:1 con respecto al material, a una temperatura de 40°C durante 116 horas a un pH neutro, para después proceder a hervirlos durante una hora y después pasar las fibras a un secador [38].
- El método alcalino consiste en remojar las fibras en hidróxido de sodio a 5% de masa durante 1 hora, se realiza la neutralización de las fibras con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro, para después colocarlas a secado durante 2 horas a 105°C [35], [38].

2.1.3 Método mecánico- químico

Este método se basa principalmente en la extracción mecánica manual de las fibras utilizando los métodos mecánicos mencionados anteriormente y después las fibras obtenidas se somete a un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio al 5%, para después neutralizarlo y por ultimo someterlo a secado durante 2 horas a 105°C [38], [40].

2.1.4 Criterios para la elección del método

Para la elección del método se tomaron en cuenta los siguientes criterios

- Equipos
- El tamaño de las fibras

Encontrar los equipos es una de las principales dificultades que se presentó durante este proyecto, ya que la asociación donde se facilitó la caña guadúa solo tiene equipos para elaborar tableros y artesanías, y no para la obtención específica de fibras. Adicionalmente el tamaño de las fibras es un criterio importante ya que depende de este la correcta distribución en el geopolímero, la cual afecta directamente a las propiedades mecánicas [8].

En base a los métodos revisados para la obtención de la fibra y en los criterios para la selección, el método mecánico – químico fue seleccionado para la obtención de las fibras en este proyecto.

2.2 Preparación de materiales

2.2.1 Zeolita

La zeolita natural que se utilizó para la elaboración de los geopolímeros es de origen comercial de la empresa INDAMI. Antes de ser utilizada esta fue secada en una estufa a una temperatura de 100 °C por un periodo de 24 horas para eliminar la humedad. Posteriormente se llevó una muestra para

evaluar el tamaño de partícula de la zeolita usando el equipo Malvern ® MASTERSIZER 2000 del Laboratorio LEMAT Figura 2.1 donde se obtuvo que el tamaño medio (d50) de partícula era aproximadamente 343 μm (Anexo A, Figura A.1).



Figura 2.1 Medidor de tamaño de partícula, MASTERSIZER.

Autores: Quevedo & Murillo

2.2.2 Fibra de caña guadúa

La caña guadúa utilizada en este proyecto se la obtuvo de la federación de barrios del cantón Salinas provincia de Santa Elena, Ecuador. Los pasos realizados para la obtención de las fibras de caña guadúa se nombran en la Figura 2.3 y se detallan a continuación.

Primero se procedió a cortar longitudinalmente los culmos en 8 partes iguales, obteniendo tiras de aproximadamente 30cm de largo, posteriormente se les retiró la corteza y los nudos presentes [39]. Para ablandar las tiras estas se colocaron en remojo durante 48 horas, fuera del alcance de la luz solar y a temperatura ambiente. Pasado este tiempo se llevaron las tiras a un proceso de mercerización para facilitar la extracción de las fibras, las que se obtuvieron golpeando con un martillo y después separándolas manualmente. Luego de obtener las fibras estas se dejaron secar a temperatura ambiente para pesarlas y aplicar el tratamiento alcalino [39], [40].

Para eliminar la lignina de las fibras se realizó un tratamiento químico utilizando una solución de hidróxido de sodio al 0,1 N con una relación de 15:1, donde se sumergieron las fibras durante una hora [22]. Este procedimiento es muy utilizado en las industrias de papel ya que la lignina se disocia en hidróxido de sodio, rompiéndose en segmentos más pequeños [40], [41]. Por otra parte la eliminación de la lignina incrementa la cristalinidad de las fibras, favoreciendo la adhesión de las fibras a la matriz geopolimérica [42]. Posteriormente se neutralizaron las fibras con lavados de agua desionizada, y midiendo el pH con un potenciómetro OAKTON hasta alcanzar un pH neutro.

Una vez neutralizadas las fibras, estas se colocaron durante dos horas en una estufa MERMET modelo U-40 a una temperatura de 105°C [22]. Para evaluar la pérdida de masa obtenida durante el tratamiento químico y el secado, se pesaron las fibras en una balanza analítica ADAM modelo PW254 y se comparó con el peso inicial dando como resultado la pérdida del 25% aproximadamente [43]. Finalmente se procedió a cortar manualmente las fibras a un tamaño de 2 a 4 cm aproximadamente y luego se las hizo pasar por una zaranda para separar partículas grandes y el polvo residual Figura 2.2.



Figura 2.2 Obtención de fibras de caña guadúa.

Autores: Quevedo & Murillo

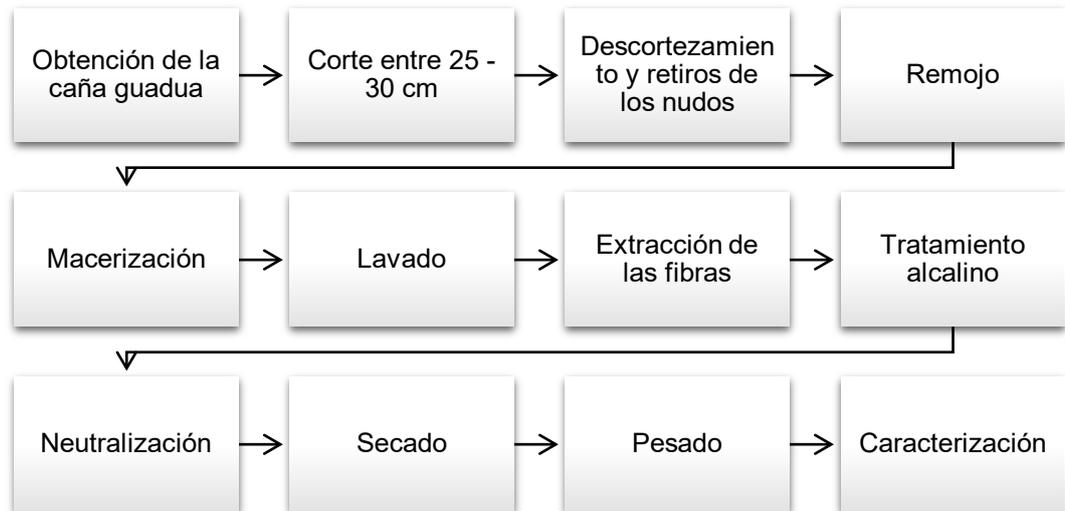


Figura 2.3 Proceso para la obtención de fibra de caña guadúa

Autores: Quevedo & Murillo

2.2.3 Activadores alcalinos

Como activadores alcalinos se utilizó Na_2SiO_3 y NaOH 10M. El silicato de sodio de procedencia Proquiandinos S.A, tenía las siguientes especificaciones 51 °Bé a 25 °C, 14.13% Na_2O y 31.19% SiO_2 [44]. El NaOH 10M, se preparó a partir de perlas de hidróxido de sodio marca ALCRON con una pureza de 98%, para la preparación de la solución de hidróxido de sodio se utilizó una balanza analítica marca ADAM modelo PW254, sorbona, matraces volumétricos, vasos de precipitación, agitadores y agua destilada.

2.3 Elaboración de geopolímeros

2.3.1 Preparación de la mezcla

Para la elaboración de los geopolímeros se realizó una mezcla de zeolita, fibra de caña guadúa y activador alcalino $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. De acuerdo a la literatura revisada [13], [44], se utilizó las relaciones activador/zeolita de 0.5, silicato/hidróxido de 2 y la cantidad de fibra de caña guadúa se varió en un 0%, 0.3%, 0.5% y 1% en peso con respecto a la zeolita. Todos los especímenes elaborados tuvieron una repetitividad de 3 para disminuir

errores e incertidumbres experimentales, en total se elaboraron 24 especímenes geopoliméricos [45].

El procedimiento de mezclado se basó en la norma ASTM-C305 [46], el cual se detalla a continuación:

1. En un recipiente se agregó hidróxido de sodio, silicato de sodio y se batió hasta que se homogenizó.
2. Se incorporó la zeolita y la fibra al recipiente del activador y se dejó reposar por 30 segundos.
3. Pasado este tiempo de reposo se empezó a batir la mezcla por 30 segundos
4. Luego se paró y durante 15 segundos se arrastró la mezcla adherida a las paredes del recipiente hacia el fondo.
5. Finalmente se mezcló por 60 segundos más.

En las Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se detalla las cantidades utilizadas para la elaboración de los geopolímeros cúbicos y los prismáticos.

Tabla 2.1 Planificación de los cubos de geopolímero

Código	Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Activador/zeolita (mL/g)	% Fibra de caña guadúa	Cantidad de Zeolita (g)	Cantidad de Na_2SiO_3 (mL)	Cantidad de NaOH (ml)
0	2	0,5	0	180	60	30
03			0,3			
05			0,5			
1			1			

Autores: Quevedo & Murillo

Tabla 2.2 Planificación de los prismas de geopolímero.

Código	Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Activador/zeolita (mL/g)	% Fibra de caña guadúa	Cantidad de Zeolita (g)	Cantidad de Na_2SiO_3 (mL)	Cantidad de NaOH (ml)
0	2	0,5	0	340	113.33	56.67
03			0,3			
05			0,5			
1			1			

Autores: Quevedo & Murillo

2.3.2 Cubos geopoliméricos

Los moldes cúbicos utilizados en la elaboración de los geopolímeros tenían dimensiones 5x5x5cm de acuerdo a la norma ASTM-C109 [47], método de ensayo estándar para la determinación de la resistencia a la compresión para morteros de cemento hidráulico.

Para la preparación de los moldes se recubrió las paredes con un plástico adherente con el fin de que los geopolímeros no se peguen a la superficie de los moldes. Para el llenado se colocó primero una capa de mezcla del geopolímero que no sobrepase la mitad del compartimiento y luego se apisonó para evitar la formación de burbujas. Finalmente se completó el llenado del compartimiento y se retiró los excesos con una espátula metálica. Se repitió el mismo proceso hasta llenar 12 compartimentos.

Una vez llenado todos los compartimentos de los moldes cúbicos se procedió con el respectivo curado de los geopolímeros. Se ingresaron los moldes a una estufa de marca MERMET modelo U-40 a la temperatura de 60°C por 24 h recubiertos con una lámina de plástico impermeable para evitar la pérdida de agua. Posteriormente se sacaron los moldes de la estufa y se dejó reposar hasta enfriarse a temperatura ambiente. Por último, se desmoldaron todos los geopolímeros cúbicos y se colocaron en una habitación por un periodo de 60

horas, para continuar con el proceso de secado antes de ingresar a ensayos de caracterización y pruebas mecánicas [45], [48]. La habitación utilizada para el secado tenía una humedad relativa de 42% y una temperatura de 21°C.

2.3.3 Prismas geopoliméricos

Para la elaboración de los prismas se prepararon moldes de dimensiones 4X4X16 cm de acuerdo a la norma ASTM-C348 [49], método de ensayo estándar para la determinación de la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. Para el llenado de los moldes prismáticos se utilizó el mismo procedimiento mencionado para los moldes cúbicos.

2.4 Pruebas Mecánicas

2.4.1 Determinación de la resistencia a la compresión

La norma ASTM-C109 [47], se usó como base para la determinación de la resistencia máxima de compresión. Para este ensayo se usaron los moldes cúbicos después de 84h de curado. Antes de ingresarlos, las caras de todos los cubos se lijaron para asegurar que estén totalmente lisas y luego se midieron con la ayuda de un vernier para obtener el área. Posteriormente se colocó uno a uno en el centro del equipo de ensayo de compresión con una velocidad de 1 mm/min. El equipo utilizado fue de marca SHIMADZU modelo UH-600KNI (ver Figura 2.4).



Figura 2.4 Equipo y ensayo de resistencia a la compresión

Autores: Quevedo & Murillo

2.4.2 Determinación de la resistencia a la flexión

Los especímenes de prueba que se utilizaron en este ensayo fueron los prismas previamente elaborados y se curaron por 84 h. El procedimiento descrito en la Norma ASTM C-348 [49], fue utilizado y el equipo usado para realizar el ensayo fue el mismo que de compresión (ver Figura 2.5). Antes de ingresar al ensayo se lijaron todas las caras para evitar cualquier curvatura que pueda afectar en el ensayo, posteriormente se determinó el punto central del prisma para ubicarlo correctamente sobre los puntos de apoyo y aplicar correctamente la carga central.

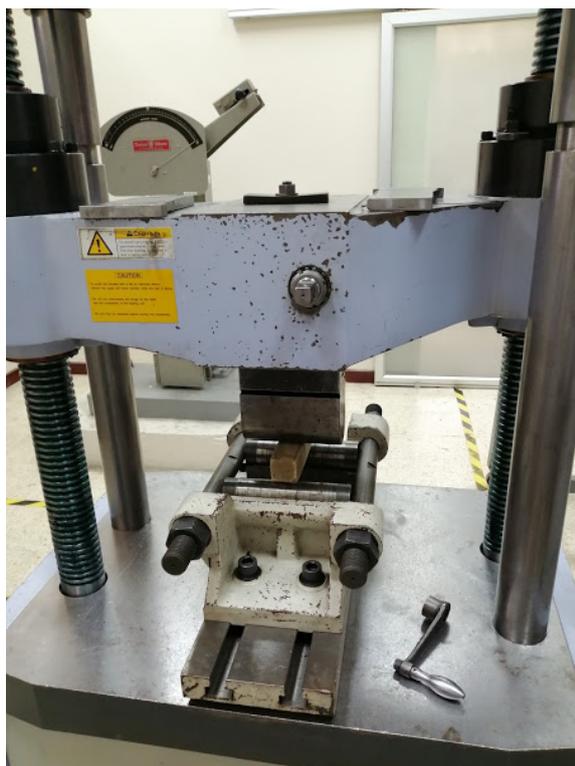


Figura 2.5 Equipo y ensayo de resistencia a la flexión.

Autores: Quevedo & Murillo

2.4.2.1 Cálculo de la resistencia a la flexión

Para el cálculo de la resistencia a la flexión, se registra la máxima carga total aplicada para cada espécimen 12 en total y se utiliza la siguiente Ecuación 2.1:

$$S_f = 0.0028 P \quad (2.1)$$

Donde S_f es la resistencia a la flexión en MPa y P es la carga máxima aplicada en N.

2.5 Ensayos de caracterización

Para determinar la composición y morfología tanto de las materias primas como de los geopolímeros se les realizó los siguientes análisis de caracterización.

- Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

- Difracción de rayos X (XRD)
- Análisis termogravimétrico y Calorimetría diferencial de barrido (TGA/DSC)
- Microscopía electrónica de barrido y Análisis de rayos X por dispersión de energía (SEM/EDAX)

Para llevar a cabo estos análisis se extrajo una muestra de los cubos que presentaron mayor fuerza de compresión. A continuación, se procederá a describir cada análisis indicando el procedimiento realizado.

2.5.1 FTIR

La espectroscopía IR es un método que estudia la absorción o emisión de energía radiante que se origina por la interacción de radiación electromagnética con la muestra [13]. Para este ensayo se utilizó el equipo de LEMAT, marca Perkin Elmer modelo Spectrum 100 (ver Figura 2.6)

La muestra a analizar debe tener un tamaño máximo de 38 μm ya que para este ensayo se necesita formar unos discos con bromuro de potasio al 5%. Para lograr el tamaño de partícula requerido se ingresaron las muestras a un micronizador por 20 min aproximadamente. Luego se mezcló 0,200g de bromuro de potasio con 0,002g de la muestra obtenida del micronizador y en un mortero se molió hasta que se homogenizó completamente. Posteriormente se llenó un porta muestras con la mezcla obtenida y se llevó a una prensa para preparar los discos. Finalmente se ingresaron los discos al equipo.



Figura 2.6 Equipo de espectroscopía infrarroja de Fourier.

Autores: Quevedo & Murillo

2.5.2 XRD

La difracción de rayos X es una técnica común para el estudio de estructuras alcalinas y espaciamentos atómicos, para identificar la fase de un material cristalino proporcionando información sobre las dimensiones de las celdas unitarias [50]. Este método permiten la determinación de las estructuras cristalinas, la fase cuantitativa, análisis cualitativo, el estudio de fase, el tamaño de los cristalitos y tensiones internas en la muestra [51].

Se utilizó un difractómetro de rayos X marca PANalytical modelo X'Pert PRO (ver Figura 2.7) con tubos catódicos de Co y el software usado fue el Highscore Plus. Para la preparación de la muestra se ingresaron las muestras a un micronizador, para el caso de las fibras estas se micronizaron por 25 minutos mientras que para la zeolita y los geopolímeros durante 15 minutos. Posteriormente se procedió a tamizar, alcanzado un tamaño máximo de partícula de 45 μ m. Luego se pesó 0,007g de óxido de zinc y 0,7g de la muestra y se molieron en un mortero hasta que se homogenizo, finalmente se colocó todo en un porta muestras y se presionó con un cilindro para formar un disco con un diámetro de 10mm el cual es colocado en el equipo [13].



Figura 2.7 Equipo de difracción de rayos x.

Autores: Quevedo & Murillo

2.5.3 TGA y DSC

El análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido son ensayos que se realizan simultáneamente, estos se utilizan principalmente para caracterizar los materiales que presentan pérdidas de peso o ganancia por descomposición y oxidación. De una forma adicional también indica si la reacción se produce en forma endotérmica o exotérmica [52].

El equipo utilizado para realizar el análisis termogravimétrico es Analizador Térmico Simultáneo SDT, de marca TA Universal Analysis 4.54 software, modelo Q600 (ver Figura 2.8). Lo primero que se realizó es tarar el equipo el cual se realizó colocando un porta muestras limpio y seco de alúmina en el equipo y se estableció los parámetros con un intervalo de temperatura de 25 a 1000 °C, para geopolímeros, zeolita y de 25 a 700°C para las fibras naturales. Posteriormente se estableció una rampa de 10 °C/min y por último un flujo de nitrógeno de 50 mL/min. Para preparar la muestra a analizar se pesó de 10 a 15 mg de muestra de los geopolímeros o de las materias primas y se colocó

en una porta muestras limpio y seco de alúmina, con la ayuda de pinzas se colocó en el horno del equipo y se abrió la llave de paso del nitrógeno, este ensayo tuvo un tiempo de duración de aproximadamente de 49 minutos.

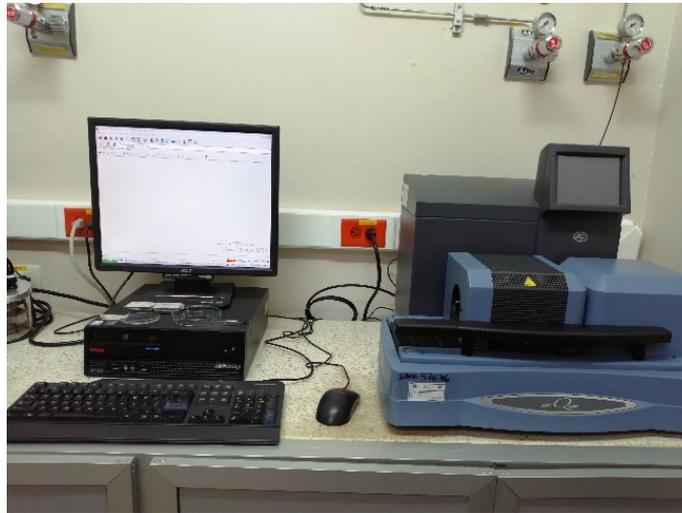


Figura 2.8 Equipo de análisis termogravimétrico.

Autores: Quevedo & Murillo

2.5.4 SEM y EDAX

La microscopía electrónica de barrido y el análisis de rayos X por dispersión de energía son ensayos que se realizan en un mismo equipo e utilizan una fuente de señales en la superficie de las muestras sólidas, las señales que derivan de las interacciones electrones-muestra pueden revelar información sobre el ejemplar, incluida la morfología externa, la composición química, la estructura cristalina y la orientación de los materiales que componen la muestra [53].

El equipo utilizado para el SEM-EDAX es marca FEI, modelo INSPECTS perteneciente al laboratorio LEMAT (ver Figura 2.9). Primero se colocó en un porta muestras un adhesivo que contiene carbón conductor y posteriormente la muestra a analizar. Luego este se recubrió con oro durante 120 segundos, y una vez que se obtuvo la muestra se la colocó en el equipo, donde se hace pasar los haces de electrones controlando parámetros que son importantes para tener una imagen nítida como son presión, tensión de aceleración, spot,

contraste y el brillo. Las áreas de interés serán las siguientes 1000x, 2000x y 5000x [13].



Figura 2.9 Equipo de análisis SEM/EDAX

Autores: Quevedo & Murillo

2.5.5 Microscopio óptico

Debido a la dificultad que se presentó para obtener la morfología de los geopolímeros con la presencia de fibra en los ensayos SEM-EDAX se optó el uso de un microscopio óptico de la FICT ESPOL marca MEIJI TECHNO, modelo EMZ-13TR para poder visualizar la distribución de las fibras en los geopolímeros. Los problemas derivaron principalmente por la longitud de las fibras utilizadas para realizar los análisis SEM-EDAX correctamente.

CAPÍTULO 3

3 Resultados y análisis

3.1 Análisis de las pruebas mecánicas

3.1.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia de compresión en los geopolímeros se consideró el promedio de los tres ensayos realizados después de 84h de curado, para cada una de las composiciones (ver Anexo B, Figura AB1-Figura AB.12). Estos resultados se resumen en la Tabla 3.1 y Figura 3.1, presentados a continuación:

Tabla 3.1 Resultados del ensayo resistencia a la compresión

Código	Porcentaje de Fibra de caña guadúa %	COMPRESIÓN (MPa)			PROMEDIO
		1	2	3	
0.0	0,00	0,66	0,62	0,70	0,66
0.3	0,3	0,65	0,62	0,61	0,63
0.5	0,5	0,53	0,50	0,72	0,59
1.0	1	0,70	1,21	0,66	0,86

Autores: Quevedo & Murillo

Se puede observar, según la Figura 3.1, que la resistencia a la compresión incrementa a medida que aumenta la cantidad de fibra, presentando un mejor resultado aquellos bloques que tenían un porcentaje de fibra de 1% con una compresión promedio de 0,86 MPa, concordando con el estudio realizado por Assedi et al, donde se utilizó fibra de lino de 0 a 4 % en geopolímeros elaborados a base de ceniza volante y se obtuvo mejores resultados a medida que se aumentó la cantidad de fibra con valores entre 19.4 y 91 MPa con un curado de 28 días. Estos resultados los asocia con la capacidad que tienen las fibras para absorber el estrés transferido a la matriz [8].

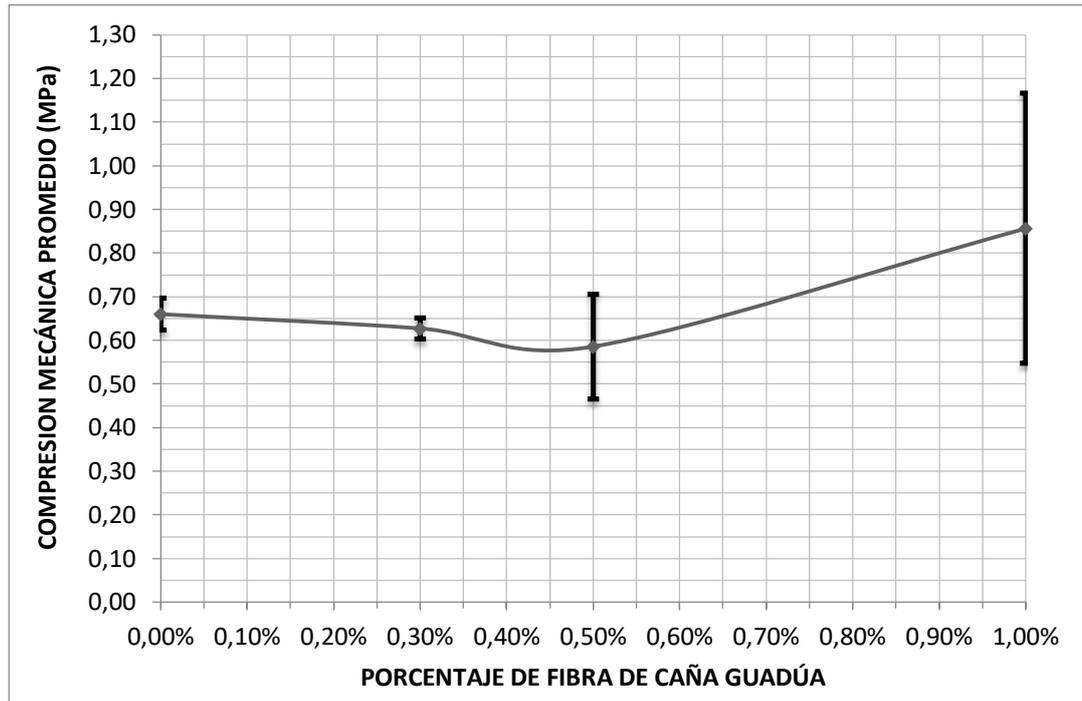


Figura 3.1 Relación de la fuerza de compresión vs % de fibra de caña guadúa

Autores: Quevedo & Murillo

En cuanto a la desviación de los datos, este incrementó con el aumento de la fibra de caña guadúa en la matriz polimérica, esto se debe, principalmente, al tamaño de las fibras utilizadas; entre más grande sean estas, mayor dificultad presentarán en la homogenización, por lo tanto existirán acumulaciones en ciertas partes del bloque provocando que su porosidad aumente, ya que no existe una apropiada unión entre las fibras y la matriz [54] lo que hizo que cada bloque tenga una distribución diferente.

Por otra parte los valores obtenidos en este proyecto son menores en comparación con otros estudios realizados acerca del reforzamiento de geopolímeros con fibras naturales, ya que estos presentaron una resistencia de compresión de 31,10 y 13,66 MPa con fibra de coco y de rafia respectivamente, a los 28 días de curado utilizando ceniza volante como materia prima [12]. En otro estudio, con la adición de fibra de madera se obtuvo 29,96 MPa en 28 días de curado y con ceniza volante de clase F [54]. Si se toma en consideración la resistencia de compresión del geopolímero puro, es muy bajo con relación al ensayo realizado por Yahya et al ya que

obtuvo un valor de 12 MPa en un día de secado utilizando hidróxido de sodio 10M y ceniza volante clase F [55].

Los resultados obtenidos en este ensayo se relacionan principalmente con el tamaño de partículas que se utilizó para la elaboración de los geopolímeros el cual fue $343\mu\text{m}$ aproximadamente, en un estudio realizado por Antoni et al., se encontró que al utilizar un tamaño de partícula grande, este incidía en la resistencia de compresión provocando una disminución del 55% de la que se podía lograr con un tamaño de partículas de $63\mu\text{m}$ [56], Rosas Casarez et al. afirma que entre más pequeña sea la partícula, mayor será el área de contacto que existirá entre la zeolita y los activadores alcalinos aumentando la reactividad y mejorando la polimerización en corto tiempo, pero para partículas grandes el tiempo de curado debe ser mayor para lograr un mejor grado de polimerización y por ende mejorar la resistencia a la compresión [57].



Figura 3.2 Cubos de geopolímero.

Autores: Quevedo & Murillo

Cabe añadir que se utilizó este tamaño de partícula en este proyecto ya que con un tamaño menor de $45\mu\text{m}$ los geopolímeros presentaban fisuras en toda su estructura lo que es asignado a la deformación autógena por contracción, esto se da por la deshidratación, la cual forma grietas en la matriz, y es más

notorio en compuestos más compactos ya que prácticamente destruye la matriz [58] (ver Figura 3.3).



Figura 3.3 Cubos de geopolímero con tamaño de partícula 45 μm .

Autores: Quevedo & Murillo

3.1.2 Ensayo de resistencia a la flexión

Los resultados obtenidos del ensayo resistencia a la flexión para los geopolímeros prismáticos después de 24h de curado a 60°C y 60h a temperatura ambiente se adjunta en el Anexo C (Figura AC.1-Figura AC.10) y en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.4 se resumen los resultados. En el análisis del efecto de la fibras en los geopolímeros se observó que de manera general, la adición de fibras a la matriz incrementa la resistencia a la flexión en comparación del geopolímero sin reforzamiento confirmando los estudios realizados por Assaedi et al y Natali et al [6], [8]. El incremento obtenido en la resistencia a la flexión con la adición de 0.3%, 0.5% y 1% de fibras es 187%, 65% y 258% en comparación con el valor de resistencia del geopolímero sin reforzamiento. Este incremento en la resistencia a la flexión con la incorporación de fibras se debe a que estas soportan la mayor parte de la tensión interna formada por la carga aplicada durante el ensayo, retrasando el proceso de fractura y la propagación de grietas [59]–[61].

Tabla 3.2. Resultados del ensayo resistencia a la flexión

Código	% Fibra de caña guadúa	Resistencia a la flexión (MPa)			Promedio (MPa)
		1	2	3	
0	0,00%	0	0	0,19	0,06
03	0,30%	0,13	0,18	0,23	0,18
05	0,50%	0,05	0,13	0,14	0,10
1	1,00%	0,18	0,32	0,18	0,23

Autores: Quevedo & Murillo

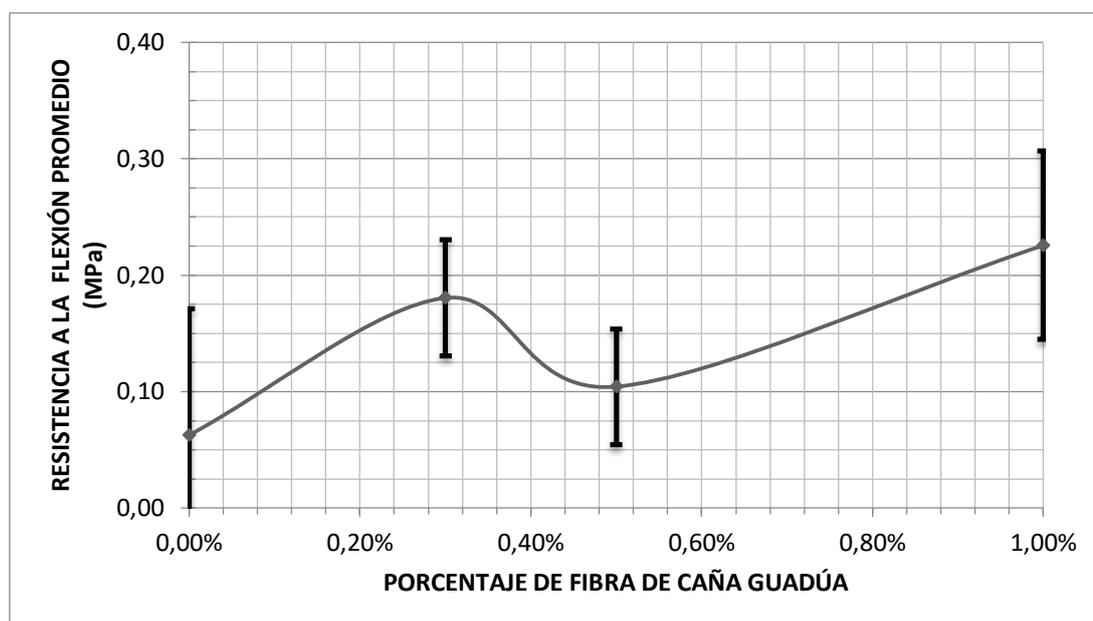


Figura 3.4 Relación de la resistencia a la flexión vs % de fibra de caña guadúa

Autores: Quevedo & Murillo

Por otro lado los valores obtenidos para la resistencia a la flexión en este proyecto son menores en comparación con otros estudios realizados por Livi, Soares y Villa García, los cuales obtuvieron valores de 1 , 0.3 y 1.29 MPa respectivamente en geopolímeros elaborados a partir de ceniza volante sin reforzamiento al primer y tercer día de curado [62]–[64]. En otros estudios donde se refuerza geopolímeros con fibras naturales, Natali et al, obtuvo valores de resistencia a la flexión para el geopolímero sin reforzamiento de 6.9 MPa, mientras que al reforzarlos con 1% de fibras de naturales obtuvo valores de 9, 10 y 11 MPa a los 7 días de curado [6]. Chen et al, obtuvo valores de 3.6 MPa en geopolímeros sin reforzamiento y con reforzamiento al 2% de fibra natural 5.5 MPa a los 7 días de curado [60].

Estos bajos valores se atribuyen al tamaño de partícula utilizado en este proyecto (343 μm) y al tiempo de curado de 84h, como se analizó en el ensayo de compresión, al utilizar un tamaño de partícula grande se disminuye la reactividad de la zeolita en medio alcalino y por ende se necesita un mayor tiempo de curado para lograr un mejor grado de polimerización el cual tiene incidencia directa en las propiedades mecánicas del geopolímero [56], [57].

Además antes de realizar el ensayo de flexión se visualizaron grietas en la superficie de los prismas (Figura 3.5 – Figura 3.6), esta variable es importante ya que afecta considerablemente las propiedades mecánicas de los geopolímeros, la formación de estas se encuentra asociado a la contracción por pérdida de agua, en un estudio realizado por Kuenzel et al, se observó que la contracción por pérdida de agua era más uniforme en muestras pequeñas como cubos, más si estas muestras eran más grandes como los prismas la contracción no era uniforme y por ende se generaban altas presiones capilares en la red micro-porosa las cuales iniciaban la propagación de grietas [58].

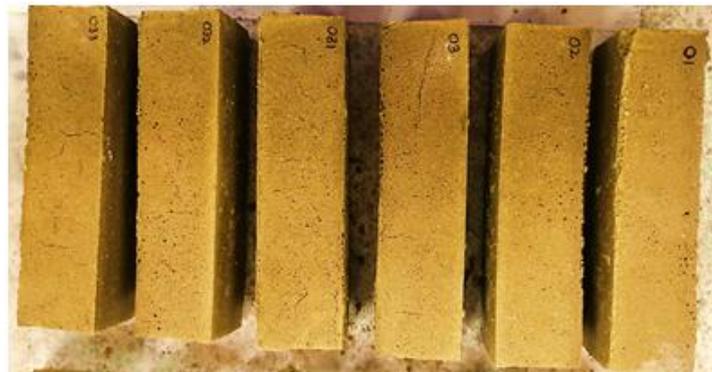


Figura 3.5 Geopolímeros sin reforzamiento y reforzados con 0.3% de FCG

Autores: Quevedo & Murillo



Figura 3.6 Geopolímeros reforzados con 0.5 y 1% de FCG.

Autores: Quevedo & Murillo

De los anterior, se atribuye que la formación de grietas en los geopolímeros contribuyó al desplome de la resistencia de flexión en los geopolímeros reforzados con 0.5% de fibra, ya que estos fueron los que más grietas presentaron en su superficie. Conviene subrayar que una consecuencia de los aspectos expuestos anteriormente fue las altas desviaciones en los valores obtenidos.

3.2 Análisis de los ensayos de caracterización

3.2.1 FTIR

3.2.1.1 Fibras de caña guadúa

Mediante la técnica FTIR se obtuvo los respectivos espectros de las fibras de caña guadúa sin tratamiento (FST) y fibras con tratamiento (FCT), identificando los posibles cambios ocurridos después del tratamiento alcalino, las gráficas del ensayo se adjuntan en el Anexo D (Figura AD.1-Figura AD.3).

En el cuadro 3.1 se presentan los picos encontrados en los espectros FST y FCT e la interpretación de cada uno de ellos:

Cuadro 3.1 Interpretación de los espectros FST Y FCT

Numero de onda FST cm⁻¹	Numero de onda FCT cm⁻¹	Asignamiento	Grupo	Referencia
3416	3444	Tensión y estiramiento O-H	Agua, celulosa, hemicelulosa y lignina	[42], [65], [66].
2919	2921	Estiramiento C-H alifático	Celulosa, hemicelulosa, lignina	[65], [66].
1735	-	Estiramiento C=O	Lignina	[67]
1637	1635	Flexión del enlace H-O-H	Agua absorbida	[68], [69]
1605-1514	1511	Vibración por estiramiento C=C	Anillo aromático lignina	[67]
1462.61	-	Flexión del plano -CH ₃	Grupo O-CH ₃ en Lignina	[70]
1424.28	1424.85	Deformación simétrica CH ₂	Celulosa	[69], [71]
1383.72	1383.98	Deformación grupo C-H	Celulosa	[70], [72]
1248.06	1264.00	Vibración C-O	Hemicelulosa y grupos acetilo lignina	[65], [71], [73]
1162.81	1162.37	Vibración C-OH	Celulosa	[68]
1051.92	1051.33	Tensión C-O-C	Celulosa y hemicelulosa.	[65], [66]
898.51	898.23	Tensión en enlaces β-glucosídicos	Celulosa y hemicelulosa	[74], [75]

Autores: Quevedo & Murillo

Realizando una comparación de los espectros de las fibras sin y con tratamiento alcalino, se observan varios cambios entre los que detallamos,

la banda 3416 cm^{-1} del espectro FST, en comparación con la banda 3444 cm^{-1} del espectro FST es mucho más estrecha y existe una reducción en su pico. Los picos $2919, 1605, 1514, 1248, 1051\text{ cm}^{-1}$ del espectro FST han disminuido considerablemente su longitud en el espectro FCT, la formación de estos picos se atribuye al estiramiento C=C, C-H presentes en la lignina y estiramiento C-O e C-O-C presentes en hemicelulosa [65]–[67], [71]. Los picos 1735 y 1462 cm^{-1} del espectro FST, han desaparecido en el espectro FCT, estos picos se forman por la presencia de grupos carbonilos y enlaces CH_3 presentes en la lignina [42], [66], [70]. De lo anterior se puede concluir que de manera superficial se removió hemicelulosa y lignina presente en las fibras.

3.2.1.2 Zeolita y geopolímeros

En el Anexo D (Figura AD.4) se presenta el espectro obtenido para la zeolita y a continuación en el Cuadro 3.2 se detallan los resultados encontrados.

Cuadro 3.2 Interpretación del espectro infrarrojo de la zeolita natural

Numero de Onda (cm^{-1})	Asignamiento
3429	Estiramiento O-H [22]
1636	Flexión de las moléculas de agua que se encuentra intermolecularmente en la estructura amorfa de la zeolita agua [76]
1431	Estiramiento de los carbonatos [76] por la relacionado con la calcita presente en la zeolita
1039	Tensión asimétrica de los enlaces Si=O ó Al =O [77]
877,76	Vibraciones del estiramiento del cuarteto AlO_4 [78]
779- 798	Estiramiento simétrico de los enlaces de Si-O-Si Doblete característico del cuarzo [77]

Numero de Onda (cm⁻¹)	Asignamiento
515 - 695	Asimétrico en el arreglo de Al/Si- O-Si [57]
470	Flexión de las moléculas de Si-O-Si y O-Si-O [78]

Autores: Quevedo & Murillo

En el Cuadro 3.3 se presenta la interpretación de los ensayos de infrarrojo de los geopolímeros reforzados en distintos porcentajes de fibra de caña guadúa que presentaron una mejor resistencia a la compresión. El esquema de los infrarrojos se encuentra en los Anexo D Figura AD.5-Figura AD.8.

Cuadro 3.3 Interpretación del espectro infrarrojo de la geopolímeros

0	0.3%	0.5%	1%	Numero de Onda (cm⁻¹)
				Asignamiento
3448	3436	3438	3439	Estiramiento O-H [22]
1641	1639	1640	1639	Flexión de las moléculas de agua intermolecular [76].
1458	1456	1461	1486	Estiramiento de los carbonatos [76] relacionados con la carbonatación
-	1419	1417	1427	Vibraciones de la celulosa [78] provenientes de la fibra de caña guadúa
1030	1041	1034	1035	tensión asimétrica de los enlaces Si=O ó Al =O [79] esta banda indica que si ocurrió la reacción
875	875	879	879	Vibraciones de estiramiento del AlO ₄ [78]
798 - 779	798-779	799-779	798- 779	Estiramiento simétrico de los enlaces de Si-O-Si doblete característico del cuarzo [77]
695	695	696	695	Vibraciones de los enlaces Si/Al-O de los tetraedros unidos formando anillos de 4 eslabones [77]

0	0.3%	0.5%	1%	Numero de Onda (cm ⁻¹)
				Asignamiento
470	489	469		Vibraciones de flexión de los enlaces Si-O [78] indica la deformación de estos enlaces

Autores: Quevedo & Murillo

3.2.2 XRD

3.2.2.1 Fibras de caña guadúa

En el Anexo E, Figura AE.1 -Figura AE.2 se presenta los difractogramas obtenidos para las FST y FCT, de donde se encontró en ambos difractogramas la presencia de celulosa I en la posición 2θ 22° y 26.5°. Así mismo se encontró que después de aplicar el tratamiento alcalino en las fibras, la intensidad en los picos asociados con la región cristalina aumentó [34], [42], se asocia este efecto al incremento de la concentración de celulosa en la fibra al eliminar hemicelulosa y lignina, lo que concuerda con el resultado obtenido en FTIR. Esto incluso se lo puede corroborar en la cuantificación de celulosa presente en las FST el cual es de 16,4% más cuando se aplicó el tratamiento este porcentaje aumento a 20,9%.

3.2.2.2 Zeolita y geopolímeros

Los resultados correspondientes al análisis cuantitativo de los difractogramas de la zeolita y los geopolímeros utilizando el refinamiento de Rietveld y método de Chebyshev se mencionan en el Cuadro 3.4 y sus respectivos difractogramas se encuentran en el Anexo E (Figura AE.3-Figura AE.7).

Cuadro 3.4 Interpretación cuantitativa DRX de la zeolita y geopolímeros

ESTRUCTURA	PORCENTAJE (%)					°2Theta [°2θ]
	ZEOLITA	0	0.3	0.5	1	
SILICA	19.8	13.8	14.0	13.9	14.0	20.804, 26.582
MORDENITA	26.2	17.1	21.7	21.8	22.9	9.807, 13.38, 19.689, 22.226, 25.557, 27.557, 34.484
HEULANDITA	22.6	12.3	15.4	18.9	20.4	9.720, 19.603, 31.758, 36.226, 47.606
AMORFOS	21.4	46.7	38.9	35.4	32.7	Entre 19 – 31

Autores: Quevedo & Murillo

A partir de estos resultados se pudo observar que se tiene la presencia de la Mordenita y la Heulandita con un porcentaje total de 49,20%, las que fueron las fuentes de Aluminosilicatos para la elaboración del geopolímero. También se tuvo la presencia de un pequeño porcentaje de calcita con 1,20% y una cantidad significativa de amorfos con un 27%.

La poca disminución del porcentaje de Mordenita y Heulandita indicó que el componente reactivo encontrado en la zeolita no intervino en la reacción quedando material sin reaccionar y por lo tanto disminuyó la resistencia de compresión [80] lo que concordó con el ensayo de compresión donde el valor más alto fue de 0,85 MPa.

3.2.3 TGA y DSC

3.2.3.1 Fibras de caña guadúa

Por medio del análisis termogravimétrico se determinó la masa total perdida por la fibra con y sin tratamiento al exponerla a un rango de temperatura de 25 hasta 700°C y se evaluó la degradación de la fibra ocurrida en este intervalo de temperatura. Se adjunta en el Anexo F los resultados obtenidos por este método (Figura AF.1 - Figura AF.4).

En el Cuadro 3.5 se presenta la masa perdida para la fibra de caña guadúa con y sin tratamiento alcalino en 3 rangos de temperatura. Se observó que

hubo una mayor pérdida de masa total en las fibras sin tratamiento en comparación con las fibras con tratamiento alcalino así mismo si se compara la masa perdida en el rango de 125°C a 475°C donde se degrada la hemicelulosa, celulosa y lignina [81], [82], la pérdida de masa es mayor en las fibras sin tratamiento. De lo que se puede inferir que durante el tratamiento alcalino hubo pérdida de lignina y hemicelulosa.

Cuadro 3.5 Pérdida de masa dentro de intervalos de temperatura FCG

MUESTRA	25-125°C	125-475°C	475-700°C	Total
FIBRAS SIN TRATAMIENTO	7,585	70,48	3,485	81,55
FIBRAS CON TRATAMIENTO	6,510	68,64	4,086	79,24

Autores: Quevedo & Murillo

En la Figura AF.4 se presenta las curvas DTG para las fibras de caña guadúa con y sin tratamiento alcalino, se identificó que en la curva DTG de las fibras sin tratamiento existen 3 picos representativos mientras que en la de las fibras con tratamiento solo existen 2 picos. El primer pico encontrado es a los 55.01°C aproximadamente este pico está relacionado con la evaporación de agua superficial y la pérdida de materiales volátiles [83]. El segundo pico se forma a partir de los 304.13°C la formación de este pico se atribuye a la despolimerización de hemicelulosa, pectinas y glucosídicos [84] en la curva de las fibras con tratamiento alcalino no fue encontrado este pico por lo que se puede aseverar que el tratamiento alcalino en la fibras eliminó hemicelulosa y parte de la lignina. La formación del 3 pico que se forma a los 358°C aproximadamente se asigna por la degradación de celulosa y lignina [81].

3.2.3.2 Zeolita y geopolímeros

El ensayo termogravimétrico realizado a la zeolita y a los geopolímeros se detalla en la Cuadro 3.6 y en el Anexo F (Figura AF.5 - Figura AF.9) se adjunta los resultados obtenidos por este método.

Cuadro 3.6 Pérdida de masa de la zeolita y geopolímeros

CÓDIGO	INTERVALOS						TOTAL
	27-100 °C	100-200 °C	200-300 °C	300-450 °C	450-750 °C	750-1000 °C	
ZEOLITA	2,89	3,17	1,64	1,28	1,91	0,16	11,09
0	3,96	4,00	2,01	1,49	1,33	0,28	13,08
0,3	6,54	4,14	1,80	1,24	1,26	0,18	14,81
0,5	6,91	4,15	1,99	1,40	1,36	0,17	15,90
1	6,64	4,16	1,99	1,30	1,52	0,10	15,75

Autores: Quevedo & Murillo

De los resultados obtenidos del ensayo termogravimétrico para la zeolita y geopolímeros se pudo observar que durante el primer intervalo de 27-100 °C se pierde un porcentaje significativo de masa, relacionado con la pérdida de agua superficial, mientras que en el segundo rango de 100-200°C es asignado a la pérdida de agua intermolecular [77]. Según Alzeer et al, los geopolímeros reforzados con fibra de caña guadúa tienen una pérdida de masa entre los intervalos 100–300°C la cual es asignada a la degradación de las fibras que se encuentran dentro del material [85] esto se corroboró por el aumento en la pérdida de masa en este rango, con valores de 6,164 y 6,021 % para el geopolímero con 1% de fibra y el geopolímero puro respectivamente.

Además, en el intervalo de 200-300°C según Musyoka et al, lo asocia a la pérdida de agua en los complejos de hidratación formados con cationes intercambiables en la zeolita [86], Mientras en el intervalo de 300-400°C, Cornejo sugirió que está relacionado con la deshidroxilación tanto en la zeolita como en el geopolímero [87]. Así mismo, en el intervalo de 450-750°C se da a una pérdida de masa, relacionada con la descarbonatación tanto en la zeolita como en el geopolímero afirmando los resultados del ensayo de XRD donde indica la presencia de calcita en la zeolita y una reacción de carbonatación en los geopolímeros. El intervalo de 750-1000°C según Auqui está relacionado con la pérdida de masa por el colapso

estructural de la zeolita y en los geopolímeros por reordenamiento y cristalización de los compuestos [88].

El ensayo de DSC se puede observar un pico endotérmico ubicados entre 110°C – 143°C relacionado con la eliminación de agua superficial con un calor necesario de 188 J/g, en la zeolita y 116,4 – 261 J/gr en los geopolímero y un pico exotérmico el que está relacionado con el colapso estructural de la zeolita a los 932 °C con una energía de 73,36 J/g y por la recristalización o reordenamiento de las estructuras que se encuentran presentes en la matriz polimérica entre 886 – 960°C con un calor necesario de 72,22 – 4,234 J/g [87], [88].

3.2.4 SEM y EDAX

3.2.4.1 Fibras de caña guadúa

Cambios en la estructura de las fibras después del tratamiento alcalino, fueron observados mediante las imágenes obtenidas del método de barrido electrónico SEM. En el Anexo G (Figura AG.1- Figura AG.2) se presenta la morfología de las fibras naturales sin tratamiento, de donde se visualizó que estas presentan una superficie relativamente lisa y cubierta con muchos materiales, probablemente pectinas, ceras y otras impurezas [71].

Por otro lado se visualizó que las fibrillas de celulosa se encuentran unidas por un material sólido asociado a hemicelulosa y lignina [35]. Posterior al tratamiento alcalino, se observó que las fibras presentan una superficie más rugosa y esto se asocia con la pérdida de cera, tejido epidérmico, hemicelulosa y pectinas [89]. Así mismo también se advirtió que existe un desprendimiento de fibras individuales, fenómeno que denota la eliminación de lignina y hemicelulosa [90], [91].

3.2.4.2 Zeolita y geopolímeros

En el Anexo G (Figura AG. 3 - Figura AG.4) se muestra el resultado del análisis obtenido para la zeolita natural de donde se observó la presencia de silicio y aluminio con los más altos porcentajes. Estos elementos son comunes en la zeolita las cuales son ricos en aluminosilicatos [28], [44]. También se evidenció la presencia de Ca lo que confirmo el resultado obtenido del XRD donde se encontró un porcentaje de calcita 1.1%. Por otra parte, en el Anexo G (Figura AG.5 - Figura AG.15) se presenta el resultado SEM-EDAX para los para los geopolímeros que presentaron más alto resultado de resistencia a la compresión, siendo para 0% (contenido de fibras) la muestra 3, 0.3% la muestra 1, 0.5% la muestra 3 y 1% la muestra 2 (ver Tabla 3.1).

De las Figura AG.5 - Figura AG.8 se advirtió que de manera general las muestras no son homogéneas y presentan una superficie con diferentes dimensiones y formas irregulares, estas se atribuyen a la presencia de estructuras cristalinas y zeolita sin reaccionar que se han aglomerado [44]. La cantidad de material sin disolver se debió al tamaño de partícula utilizado de 343 μ m, ya que al ser muy grande la disolución de las fases reactivas de la zeolita disminuye, una consecuencia de esto es la formación de estructuras menos complejas y por ende menos resistentes lo que concuerda con el análisis del ensayo de compresión [57], [56].

Además, también se pudo distinguir claramente la parte amorfa representada por una matriz compacta y parcialmente homogénea [45]. De los análisis EDX para los geopolímeros se visualizó un incremento en el contenido de sodio con respecto a la zeolita y además un aumento de la relación Si/Al, atribuido a la incorporación de los activadores [64].

3.2.5 Microscopio óptico

A continuación, en las Figura 3.7 - Figura 3.10, se presentan las imágenes obtenidas a través del microscopio óptico en las cuales se observó una buena distribución de las fibras en la matriz, así mismo se evidencio que existe una buena adhesión de las fibras en la matriz geopolimérica especialmente en los geopolímeros con adición de fibras al 1%, esto atribuido al tratamiento alcalino realizado [35], por otro lado se observó también que los geopolímeros presentan una superficie porosa.



Figura 3.7 Distribución de fibras en geopolímeros sin reforzamiento

Autores: Quevedo & Murillo



Figura 3.8 Distribución de fibras en geopolímeros reforzados con 0.3%FCG

Autores: Quevedo & Murillo

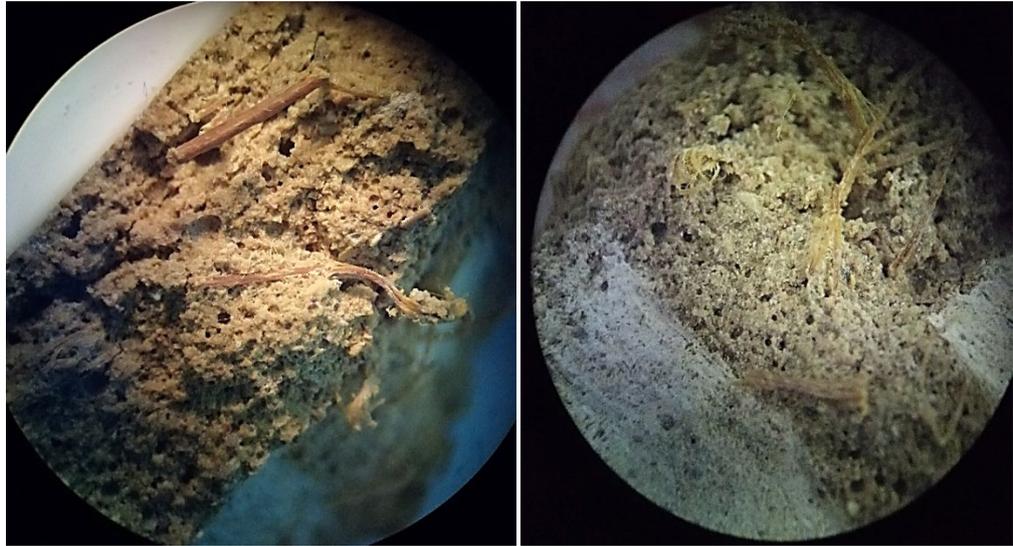


Figura 3.9 Distribución de fibras en geopolímeros reforzados con 0.5% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

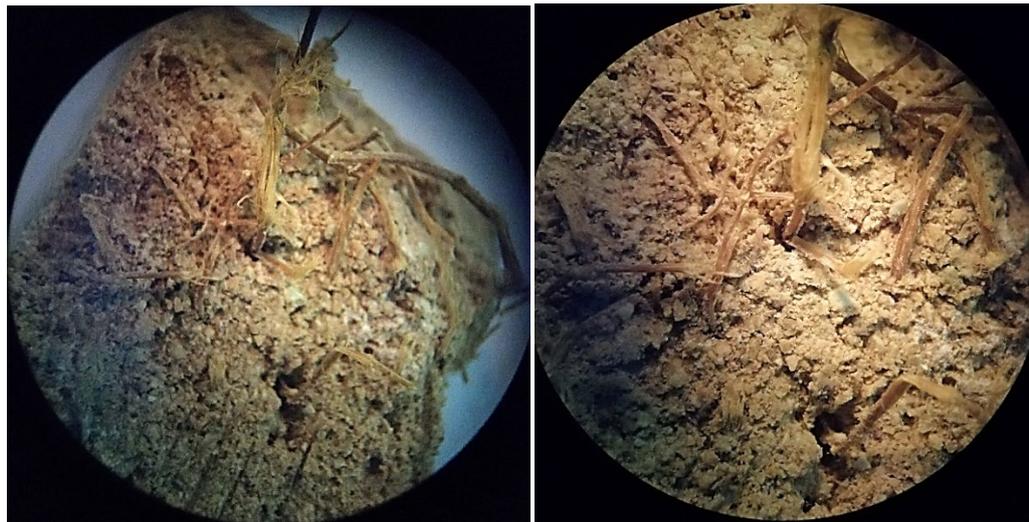


Figura 3.10 Distribución de fibras en geopolímeros reforzados con 1% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las fibras de la caña Guadúa Angustifolia se extrajeron por el método mecánico químico y por medio de métodos de caracterización XRD, FTIR, y TGA-DSC se determinó que la composición principal de estas son celulosa, hemicelulosa y lignina. Aunque también existen otros compuestos en menor proporción como pectinas, ceras y otro tipo de impurezas. Así mismo también por los mismos métodos se evaluó el tratamiento alcalino aplicado, el cual fue efectivo removiendo hemicelulosa y lignina.
- De la elaboración de los geopolímeros se puede concluir que al utilizar un mayor tamaño de partícula de la zeolita se necesita de un mayor tiempo de curado para lograr un óptimo grado de polimerización, el cual tiene incidencia directa en las propiedades mecánicas [56], [57].
- Del análisis de la resistencia a la compresión se determinó que el valor más alto obtenido para este ensayo fue de 0,875 MPa al reforzar los geopolímeros con 1% de fibra de caña guadúa. Así mismo con la adición 1% de fibras de caña guadúa en geopolímeros elaborados a partir de zeolita natural se obtuvo un incremento en la resistencia a la flexión de 285% con respecto al valor obtenido del geopolímero sin reforzamiento. Se atribuye este efecto debido a que las fibras en la matriz geopolimérica resisten la mayor parte de la tensión acumulada por la acción de carga, es decir absorben más energía y por ello se necesita mayor esfuerzo para la rotura del geopolímero reforzado [59].
- En base a los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión y flexión se concluye que el reforzamiento de geopolímeros con 1% de fibra de caña guadúa es la más óptimo presentando las siguientes condiciones para su elaboración: hidróxido de sodio 10M, razón $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2, activador/zeolita 0.5, temperatura de curado de 60°C por 24 horas y 60 horas de curado a

temperatura ambiente (21°C) y 42% de humedad relativa, con un tamaño de partícula de 343µm de zeolita.

- El análisis termogravimétrico demostró que en el rango de 100-300°C se presenta la mayor pérdida de masa en los geopolímeros reforzados con fibra de caña guadúa, debido a la degradación de las fibras naturales que se encuentran en la matriz, con valores aproximados de 6,164%, demostrando que las fibras están protegidas térmicamente por la matriz polimérica, lo que incrementa las posibilidades para ser considerado como un material ignífugo amigable con el medio ambiente [85].
- De los aspectos expuestos anteriormente se concluye que las fibras naturales de la planta Guadúa Angustifolia muestran ser un excelente material de reforzamiento ya que soportan gran parte de la tensión generada en la matriz del geopolímero al estar expuesta a una fuerza externa, previniendo la integridad del geopolímero, su rotura e incrementando sus propiedades mecánicas.

4.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio previo de las materias primas a utilizar, principalmente de la zeolita para saber si tiene la cantidad óptima de material cristalino para la elaboración de los geopolímeros.
- Evaluar la resistencia a la compresión y a la flexión con un tiempo de curado mayor a 84h.
- Se recomienda variar la razón de activador/zeolita para realizar una comparación y determinar cuál es óptima para futuros estudios.
- Para la elaboración de los geopolímeros se utilizó materiales perjudiciales para la salud, por lo que se recomienda siempre utilizar equipos de protección personal.

- La utilización de moldes plásticos sería una alternativa para ahorrar tiempo porque se evitaría la película plástica que se utiliza para que no se adhiera el geopolímero al molde.
- Tratar de que las fibras de caña guadúa sean lo más pequeñas posibles para aumentar la homogeneidad de la matriz.
- Realizar un estudio de la influencia del tamaño de partícula en la elaboración de los geopolímeros bajo las mismas condiciones que se utilizó en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Andrade, I. Garcia, and M. Castellote, “Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH,” Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2011. < <https://eprints.ucm.es/14424/>.>
- [2] N. Singh, “Fly Ash-Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material,” *Minerals*, vol. 8, no. 7, p. 299, 2018. <<http://www.mdpi.com/2075-163X/8/7/299>>
- [3] F. Almagro Vázquez and F. Venegas-Martínez, “Crecimiento y desarrollo con sustentabilidad ambiental,” *Econ. y Soc.*, vol. XIV, pp. 79–103, 2009. < <https://www.redalyc.org/pdf/510/51011904005.pdf>.>
- [4] T. Alomayri, H. Assaedi, F. U. A. Shaikh, and I. M. Low, “Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites,” *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 2, no. 3, pp. 223–230, 2014. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2014.05.005>.>
- [5] T. Lin, D. Jia, P. He, and M. Wang, “Effects of fiber length on mechanical properties and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 9, pp. 2404–2407, 2008. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.12.004>>
- [6] A. Natali, S. Manzi, and M. C. Bignozzi, “Novel fiber-reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix,” *Procedia Eng.*, vol. 21, pp. 1124–1131, 2011. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2120> >
- [7] B. Nematollahi, J. Sanjayan, and F. U. A. Shaikh, “Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 54–64, 2014. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.085>>
- [8] H. Assaedi, T. Alomayri, F. U. A. Shaikh, and I. M. Low, “Advances in geopolymer composites with natural reinforcement,” *Adv. Ceram. Matrix*

Compos., pp. 461–474, 2018. <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102166-8.00019-0>>

- [9] M. Añazco Romero and S. Rojas, “Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie *Guadua angustifolia*,” *Red Int. Bambú Y Ratán, Inbar*, p. 193, 2015. <<https://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/GABAR-Cadena-Bambu-Ecuador.pdf>>
- [10] D. P. Dias and C. Thaumaturgo, “Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 1, pp. 49–54, 2005. < 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044 >
- [11] S. Bernal, J. Esguerra, J. Galindo, E. Rodríguez, M. Gordillo, and S. Delvasto, “Morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono basados en un sistema binario de un subproducto industrial,” vol. 1, no. 2, pp. 587–592, 2009. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044> >
- [12] K. Korniejenko, E. Frączek, E. Pytlak, and M. Adamski, “Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers,” *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 388–393, 2016. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.395>>
- [13] A. Espinoza Espinoza and E. García Ochoa, “Preparación, Caracterización Y Evaluación De Concreto De Geopolímero Reforzado Con Fibra De Polipropileno,” Escuela Politecnica del Litoral (ESPOL), 2017. <<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/42508>>
- [14] M. Á. Sanjuán Barbudo and S. Chinchón Yepes, “Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland,” in *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*, no. January 2014, España, 2014, pp. 41–51. < <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/45347>>
- [15] S.j.navarro, “Proceso, fabricacion del cemento.” 2015. <<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>>
- [16] N. Zealand, Q. Limestone, C. The, N. Zealand, and I. Concrete, “The manufacture of portland cement,” 2015.

<<https://nzc.org.nz/app/uploads/2017/10/9B.pdf> >

- [17] C. Shi, A. F. Jiménez, and A. Palomo, “New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 750–763, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>>
- [18] FICEM/Federacion interamericana del cemento, “INFORME ESTADÍSTICO 2018,” 2018. [Online]. Available: <https://ficem.org/estadisticas/informe-estadistico/>. [Accessed: 23-Jan-2019]. <<https://ficem.org/estadisticas/informe-estadistico/>>
- [19] Davidovits J., “Geopolymers. Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis..pdf,” *J. Therm. Anal.*, vol. 37, pp. 1633 – 1656, 1991. <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01912193> >
- [20] R. A. Sá Ribeiro, M. G. Sá Ribeiro, and W. M. Kriven, “Review of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites,” *J. Ceram. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 307–321, 2017. < 10.4416/JCST2017-00048>
- [21] P. J. Davidovits, “Summary for Policymakers,” *Clim. Chang. 2013 - Phys. Sci. Basis*, pp. 1–30, 2002. <https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf><https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A009/type/book_part >
- [22] C. Villa, E. T. Pecina, R. Torres, and L. Gómez, “Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 11, pp. 2084–2090, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052>>
- [23] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000. < [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5) >
- [24] J. Brown, L. Camporota, E. H. Street, and J. Brown, “Jo and Luigi statement,” pp. 1–3, 2015.ISN 0000370649
- [25] V. Živica, M. T. Palou, and M. Križma, “Geopolymer Cements and Their Properties: A Review,” *Build. Res. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 85–100, 2015.

<<http://www.degruyter.com/view/j/brj.2014.61.issue-2/brj-2014-0007/brj2014-0007.xml>>

- [26] F. N. Degirmenci, "Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on durability of geopolymer mortars containing natural and artificial pozzolans," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 4, pp. 340–350, 2017. <<http://dx.doi.org/10.13168/cs.2017.0033>>
- [27] F. Morante, "Zeolitas Naturales del Ecuador: geología, caracterización y aplicaciones," no. November, p. 278, 2011.
- [28] L. Smart and E. Moree, *SOLID STATE CHEMISTRY*, Third Edit. London, 2005. <http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_10_10256_250.pdf>
- [29] G. Poveda, Z. Franco, M. Pilco, M. Suriaga, G. Rivera, and D. Sacoto, *Construcción de Viviendas con Caña Guadua en el Ecuador, una realidad amigable y sustentable*. 2016. <<http://www.eumed.net/librosgratis/actas/2016/filosofia/construccionviviendas-guido-poveda.pdf>>
- [30] L. Murillo and J. Quevedo, "Localización de la caña guadúa en Ecuador," *Google Maps*, 2019. [Online]. Available: https://drive.google.com/open?id=1rXO72R1Imm4VOJ8MU6Ejq_NoqwlquSC2&usp=sharing. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [31] V. Rubén, G. Martha, I. Zaragoza, A. Borja, and J. Zamudio, "Bamboo culms anatomy (*Guadua aculeata* rupestris) of the north-east region of Puebla state, Mexico, 2014. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000300008>
- [32] M. Estrada, F. Ramirez, A. Maldonado, and J. F. Correal, "Caracterización mecánica de las fibras del bambú colombiano, *Guadua angustifolia*," *Prim. Simp. bambú y madera laminada*, no. February, pp. 1–10, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.06.066>>
- [33] P. Chaowana and M. C. Barbu, *Bamboo: Potential material for biocomposites*. Elsevier Ltd., 2017. <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08100959-8.00013-5>>
- [34] Y. Liu and H. Hu, "X-ray diffraction study of bamboo fibers treated with

- NaOH,” *Fibers Polym.*, vol. 9, no. 6, pp. 735–739, 2008.
< <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-008-0115-0>>
- [35] M. Das and D. Chakraborty, “Influence of alkali treatment on the fine structure and morphology of bamboo fibers,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 102, no. 5, pp. 5050–5056, 2006. ISBN 000370649
- [36] S. Hurtado, “Estandarizacion del proceso de obtencion de fibra de angustifolia kunth como materia prima para material compuesto,” 2017. ISBN 10.1007/s10853-007-1994
- [37] R. Tokoro, D. M. Vu, K. Okubo, T. Tanaka, T. Fujii, and T. Fujiura, “How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers,” *J. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 775–787, 2008. SBN 10.1007/s10853-007-1994
- [38] S. Subash, S. J. R. B, and E. R. D. J, “A Review on Extraction of Bamboo Fibres and Its Properties 1 1,2,3,” p. 6, 2017.
<http://www.irdindia.in/journal_ijacsa/pdf/vol5_iss2/4.pdf>
- [39] C. Ramprasad, P. K. Kushwaha, and S. Vidyashankar, “Optimization and Extraction of Natural Long Bamboo,” vol. VII, no. I, pp. 85–88, 2018.
<<https://www.ijltemas.in/DigitalLibrary/Vol.7Issue1/85-88.pdf>>
- [40] J. A. Taborda-rios, L. A. Cañas-mendoza, and J. L. Trisancho-reyes, “Comparative study of the mechanical properties of the polyester resin reinforced with bamboo fiber as the substitute material fiberglass” vol. 84, no. 202, pp. 35–41, 2017.< <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v84n202/0012-7353-dyna-84-202-00035.pdf>>
- [41] A. P. Deshpande, M. B. Rao, and C. L. Rao, “Extraction of Bamboo Fibers and Their Use as,” pp. 83–92, 1999. < [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(20000404\)76:1<83::AID-APP11>3.0.CO;2-L](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(20000404)76:1<83::AID-APP11>3.0.CO;2-L)>
- [42] M. L. Sánchez, W. A. Aperador, and G. Capote, “Influence of the delignification process on the properties of panels made with Guadua fibers and plant resin,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 125, no. December 2017, pp. 33–40, 2018. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.084>>
- [43] A. P. Deshpande, M. Bhaskar Rao, and C. Lakshmana Rao, “Extraction of

- bamboo fibers and their use as reinforcement in polymeric composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 76, no. 1, pp. 83–92, 2000. < http://www.irdindia.in/journal_ijacsa/pdf/vol5_iss2/4.pdf>
- [44] N. A. Ulloa, H. Baykara, M. H. Cornejo, A. Rigail, C. Paredes, and J. L. Villalba, “Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 138–149, 2018. < <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-017-1057-z>>
- [45] H. Baykara, M. H. Cornejo, R. Murillo, A. Gavilanes, C. Paredes, and J. Elsen, “Preparation, characterization and reaction kinetics of green cement: Ecuadorian natural mordenite-based geopolymers,” *Mater. Struct.*, vol. 50, 2017. < <http://dx.doi.org/123456789/42508> >
- [46] ASTM/American Association State, “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars ASTM C305,” West Conshohocken, 2009.
- [47] ASTM/American Association State, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars ASTM C109,” West Conshohocken, 2007.
- [48] R. A. Sá Ribeiro, M. G. Sá Ribeiro, K. Sankar, and W. M. Kriven, “Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material,” *Constr. Build. Mater.*, Oct. 2016. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>>
- [49] ASTM/American Association State, “Flexural strength of hydraulic-cement mortars ASTM C348,” West Conshohocken, 2002.
- [50] A. A. Bunaciu, E. gabriela Udriștioiu, and H. Y. Aboul-Enein, “X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications,” *Crit. Rev. Anal. Chem.*, vol. 45, no. 4, pp. 289–299, 2015. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>>
- [51] E. Jumate and D. L. Manea, “Application of X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) methods to the Portland cement hydration processes,” *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 2(15), no. 1, pp. 35–42, 2012. <<https://pdfs.semanticscholar.org/e239/20201015d02a12948f2966bc23af393>

f98b0.pdf >

- [52] K. Mohomed, "Thermogravimetric Analysis (TGA) Theory and Applications," *TA Instruments*, pp. 4–235, 2016. < https://www.tainstruments.com/practical_series_thermal/ >
- [53] O. P. Choudhary and P. ka, "Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components," *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 1877–1882, 2017. < <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.207> >
- [54] S. N. Sarmin, "The Influence of Different Wood Aggregates on the Properties of Geopolymer Composites," *Key Eng. Mater.*, vol. 723, no. February, pp. 74–79, 2016. < <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.723.74> >
- [55] Z. Yahya, M. M. A. B. Abdullah, S. Z. A. Talib, and R. A. Razak, "Comparative study on early strength of sodium hydroxide (NaOH) activated fly ash based geopolymer," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1887, 2017. < <http://dx.doi.org/10.1063/1.5003542> >
- [56] Antoni, D. Wiyono, A. Vianthi, P. Putra, G. Kartadinata, and D. Hardjito, "Effect of Particle Size on Properties of Sidoarjo Mud-Based Geopolymer," *Mater. Sci. Forum*, vol. 803, no. January, pp. 44–48, 2014. < <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.803.44> >
- [57] C. A. Rosas-Casarez *et al.*, "Influence of Size Reduction of Fly Ash Particles by Grinding on the Chemical Properties of Geopolymers," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 365, 2018. < <http://dx.doi.org/10.3390/app8030365> >
- [58] C. Kuenzel, L. J. Vandeperre, S. Donatello, A. R. Boccaccini, and C. Cheeseman, "Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking in," *Am. Ceram. Soc.*, vol. 95, no. 10, pp. 3270–3277, 2012. < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05380.x> >
- [59] A. Bhutta, P. H. R. Borges, C. Zanotti, M. Farooq, and N. Banthia, "Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 80, pp. 31–40, 2017. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.014> >
- [60] R. Chen, S. Ahmari, and L. Zhang, "Utilization of sweet sorghum fiber to

- reinforce fly ash-based geopolymer,” *J. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 2548–2558, 2014. < <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-013-7950-0> >
- [61] T. Lin, D. Jia, P. He, and M. Wang, “In situ crack growth observation and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 9, pp. 2404–2407, 2010. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.12.004> >
- [62] C. Livi, “Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198341952017000601174.>
- [63] P. Soares, A. T. Pinto, V. M. Ferreira, and J. A. Labrincha, “Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros Geopolymerization of lightweight aggregate waste,” vol. 58, pp. 23–34, 2008. <<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/105/144>.>
- [64] C. I. Villa García, “Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos minerales,” Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 2013. < <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/19>>
- [65] A. M. Dzul Ek, “Efecto de un agente de acoplamiento natural sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto polipropileno/henequén,” Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2015. < <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/410> >
- [66] M. Zimniewska, W. Rozańska, A. Gryszczynska, B. Romanowska, and A. Kicinska, “Antioxidant potential of hemp and flax fibers depending on their chemical composition,” *Molecules*, vol. 23, no. 8, 2018. < <http://dx.doi.org/10.3390/molecules23081993> >
- [67] R. Rodríguez and M. Ordóñez, “Síntesis y Caracterización de Biocompuestos reforzados con fibra de Bambú Ecuatoriano,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014. < <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/42316> >

- [68] J. Zara, F. Yegres, N. Vargas, S. Morales, and L. Cubillan, "Empleo de la Espectroscopia Infrarroja (FT-IR-ATR) como herramienta para la Caracterización del bagazo de caña proveniente de la Sierra Falconiana," *Química Viva*, vol. 16, no. 3, pp. 17–24, 2017. < <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86354619003> >
- [69] J. Huang, L. Zhang, Y. Zhou, M. Huang, and Y. Sha, "Study on the suitability of bamboo fiber for manufacturing insulating presspaper," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 6, pp. 3641–3651, 2016. < <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2016.005679> >
- [70] C. Tovar, I. Astudillo, A. Ortíz, M. Fortich, and C. Badel, "Aprovechamiento del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la síntesis de carboximetilcelulosa," *Rev. Cuba. Química*, vol. 30, no. 2, pp. 211–221, 2018. <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222454212018000200003>
- [71] K. Zhang, F. Wang, L. Wenyan, Z. Wang, Z. Duan, and Y. Bin, "Thermal and mechanical properties of short fiber-reinforced epoxy composites," *Polym.*, vol. 33, no. 6, pp. 530–536, 2018. < <http://dx.doi.org/10.3390/polym10060608> >
- [72] Y. A. Salas, M. C. Colque, A. B. Lazo, R. C. Cormanaya, and Celina Luízar Obregón, "Obtención y caracterización fisicoquímica y funcional de las fibras dietéticas del níspero común (*Mespilus germanica*)," *Rev. Quim. del Perú*, vol. 74, no. 4, pp. 269–281, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jradio.2012.01.022>>
- [73] M. Muñoz, M. Hidalgo, and J. Mina, "Fique Fiber an Alternative for Reinforced Plastics. Influence of Surface Modification," *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 12, no. 2, pp. 60–70, 2014. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S169235612014000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=es>.
- [74] M. L. Sánchez, L. Y. Morales, and J. D. Caicedo, "Physical and mechanical properties of agglomerated panels made from bamboo fiber and vegetable

resin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 330–339, 2017. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.003> >

- [75] J. L. Suárez Castañeda, J. W. Restrepo Montoya, A. Quinchía Figueroa, and F. A. Mercado Navarro, “Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica,” *Rev. Tecnura*, vol. 21, no. 51, p. 57, 2016. <<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/10312>>.
- [76] R. M. Hamidi, Z. Man, and K. A. Azizli, “Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer,” *Procedia Eng.*, vol. 148, pp. 189–193, 2016. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.568>.>
- [77] G. Kovalchuk, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, “Activación alcalina de cenizas volantes . Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza Alkali-activated fly ash . Relationship between mechanical strength gains and initial ash chemistry,” *Mater. Construcción*, vol. 58, no. 291, pp. 35–52, 2008. < <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.101>>
- [78] H. Assaedi, F. U. A. Shaikh, and I. M. Low, “Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 412–422, 2016. < <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102166-8.00019-0>.>
- [79] E. Ul Haq, S. Kunjalukkal Padmanabhan, and A. Licciulli, “Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers-A comparative study,” *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 2, pp. 2965–2971, 2014. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.012>.>
- [80] S. Özen and B. Alam, “Compressive strength and microstructural characteristics of natural zeolite-based geopolymer,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 62, no. 1, pp. 64–71, 2018. <<http://dx.doi.org/10.3311/PPci.10848>>
- [81] S. S. Kim, A. Shenoy, and F. A. Agblevor, “Thermogravimetric and kinetic study of Pinyon pine in the various gases,” *Bioresour. Technol.*, vol. 156, pp. 297–302, 2014. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.066>.>
- [82] J. J. Alvarado Flores and J. G. Rutiaga Quiñones, “Estudio de cinética en

procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos,” *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 20, no. ahead, pp. 0–0, 2018 <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718221X2018005002601&lng=en&nrm=iso&tlng=en >

- [83] M. Muñoz, M. Hidalgo, and J. Mina, “Fibras de Fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos,” *Rev. Bio. Agro*, vol. 12, no. 2, pp. 60–70, 2014. ISSN 1692-3561
- [84] W. Mora Espinoza and B. RamónValencia, “Caracterización térmica, mecánica y morfológica de fibras naturales colombianas con potencial como refuerzo de biocompuestos TT - Thermal, mechanical, and morphological characterization of Colombian natural fibers as potential reinforcement for biocompos,” *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 41, no. 161, pp. 479–489, 2017. < <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.525> >
- [85] M. Alzeer and K. MacKenzie, “Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax),” *Appl. Clay Sci.*, vol. 75–76, pp. 148–152, 2013. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.010> >
- [86] N. M. Musyoka, L. F. Petrik, E. Hums, A. Kuhnt, and W. Schwieger, “Thermal stability studies of zeolites A and X synthesized from South African coal fly ash,” *Res. Chem. Intermed.*, vol. 41, no. 2, pp. 575–582, 2015. < <http://dx.doi.org/10.1007/s11164-013-1211-3> >
- [87] M. H. Cornejo, J. Elsen, C. Paredes, and H. Baykara, “Thermomechanical treatment of two Ecuadorian zeolite-rich tuffs and their potential usage as supplementary cementitious materials,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 115, no. 1, pp. 309–321, 2014. < <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-013-3345-3> >
- [88] N. U. Auqui, H. Baykara, A. Rigail, M. H. Cornejo, and J. L. Villalba, “An investigation of the effect of migratory type corrosion inhibitor on mechanical properties of zeolite-based novel geopolymers,” *J. Mol. Struct.*, vol. 1146, pp. 814–820, 2017. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.06.066> >
- [89] P. J. Herrera-Franco and A. Valadez-González, “A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites,” *Compos. Part B*

Eng., 2005. ISBN 1359-8368

- [90] M. George, D. C. Bressler, V. Taneli, and N. Jaramillo Quiceno, "Efecto del proceso de mercerización en el comportamiento de la fibra de hoja de piña (FHP) como refuerzo en una matriz de polipropileno," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, p. 88, 2017. <<http://www.bdigital.unal.edu.co/56169/%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.091>>
- [91] P. Luna, J. Lizarazo-Marriaga, and A. Mariño, "Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 116, pp. 93–97, 2016. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.139>.

ANEXOS

ANEXO A

Particle Name: Zeolite	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.503	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 4.75 %
Dispersant Name: Dry dispersion	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.464 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0097 %Vol	Span : 2.680	Uniformity: 0.819	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0932 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 64.360 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 430.284 um	
d(0.1): 33.426 um	d(0.5): 342.993 um	d(0.9): 952.750 um	

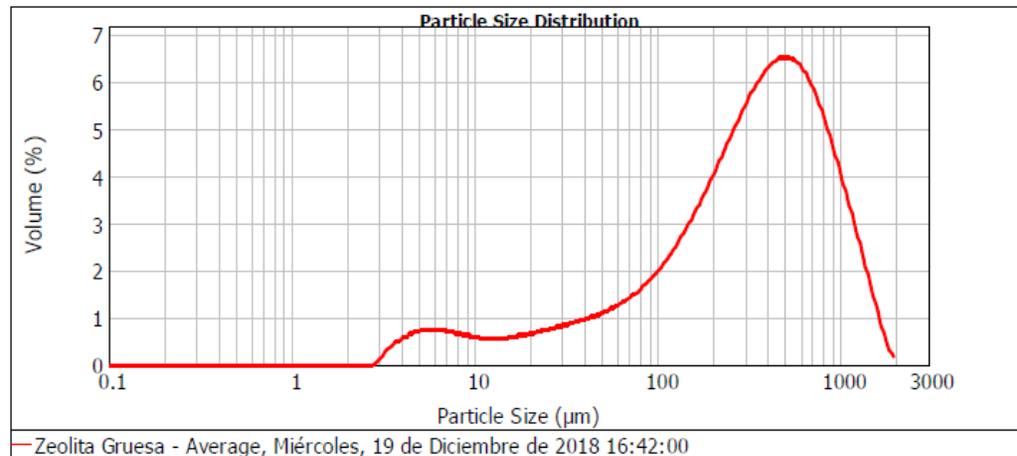


Figura A.1 Análisis tamaño de partícula zeolita

Autores: Quevedo & Murillo

ANEXO B

Resistencia a la compresión

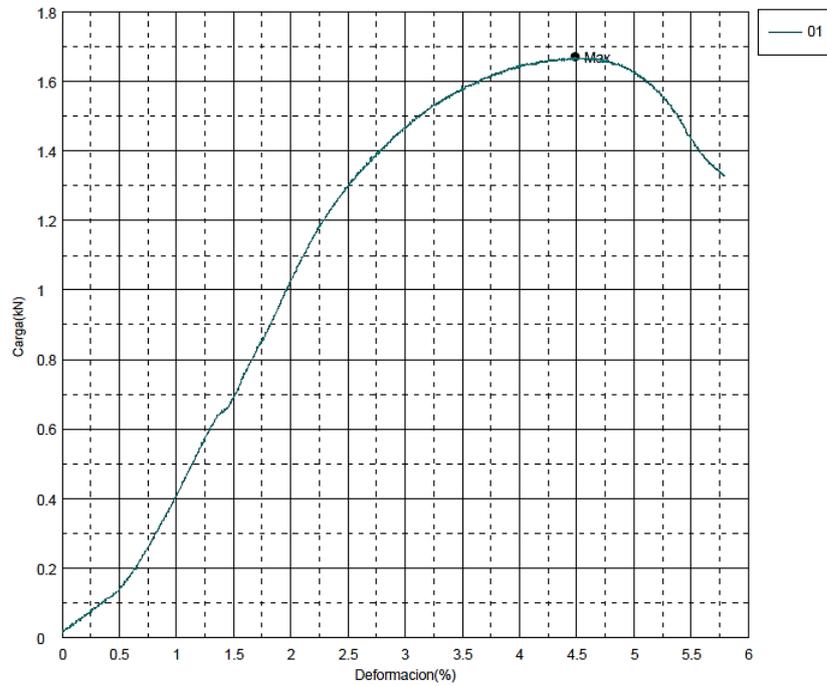


Figura AB.1 Curvas de compresión del geopolímero sin reforzamiento muestra 1

Autores: Quevedo & Murillo

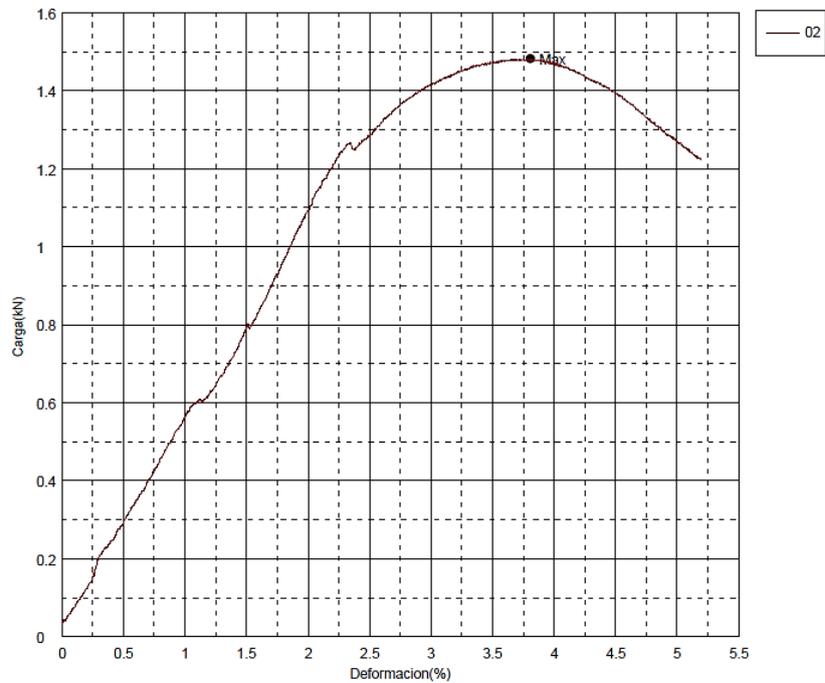


Figura AB.2 Curvas de compresión del geopolímero sin reforzamiento muestra 2

Autores: Quevedo & Murillo

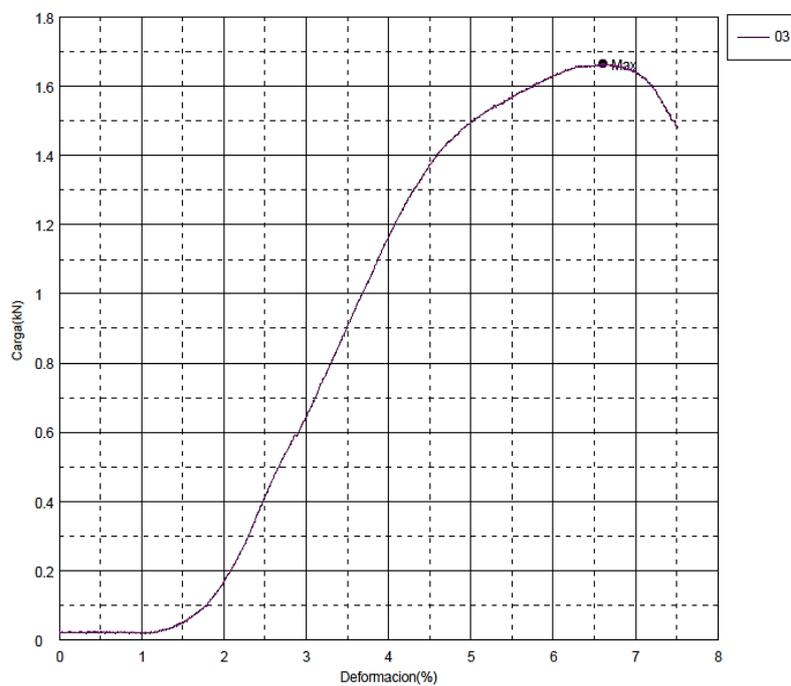


Figura AB.3 Curvas de compresión del geopolímero sin reforzamiento muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

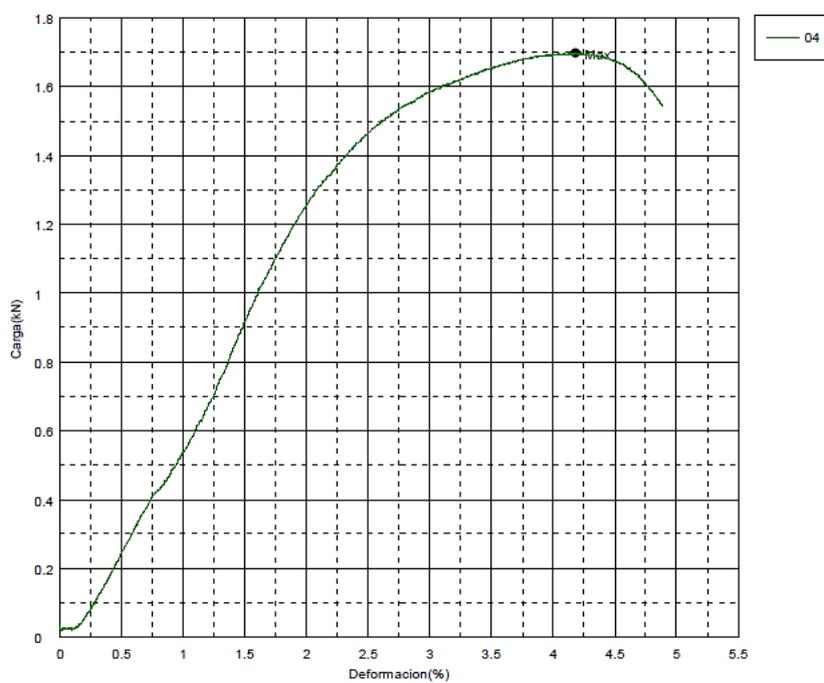


Figura AB.4 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 1

Autores: Quevedo & Murillo

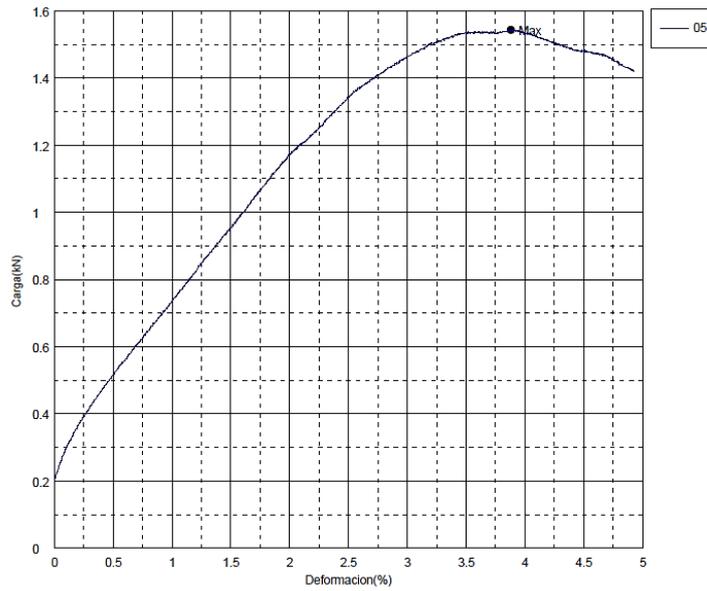


Figura AB.5 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 2

Autores: Quevedo & Murillo

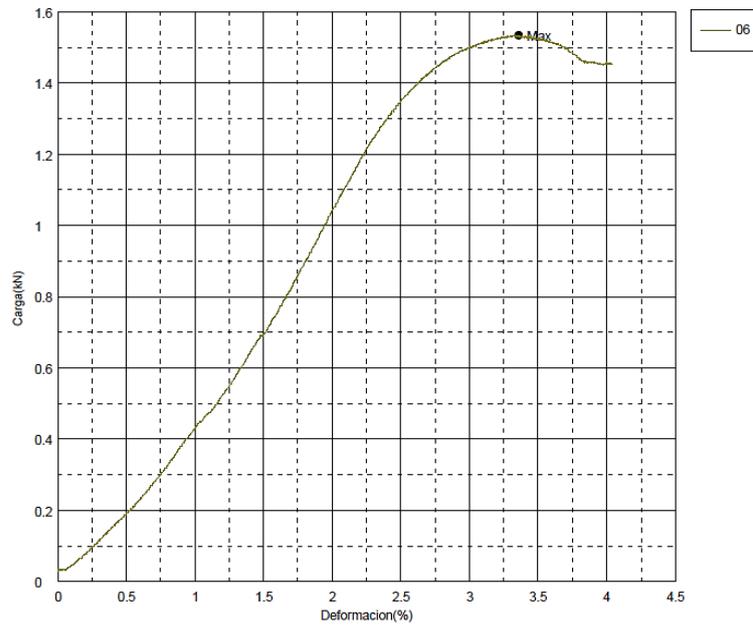


Figura AB.6 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

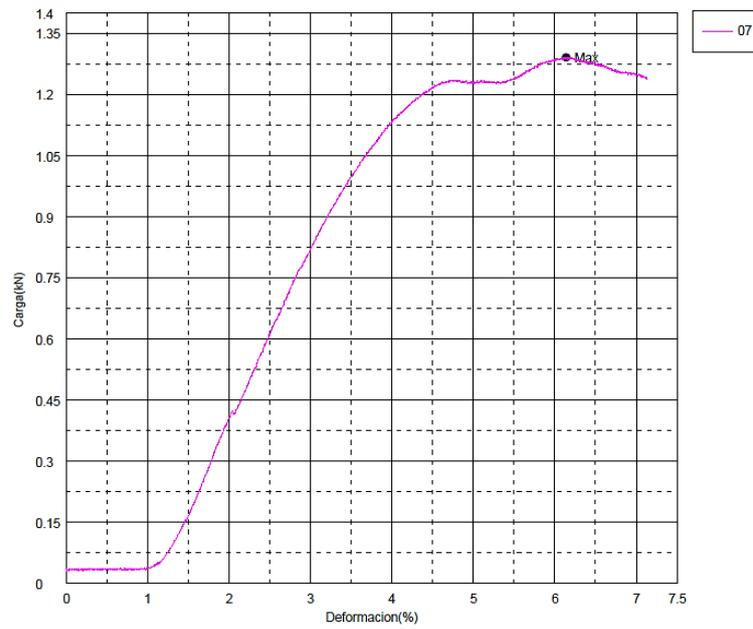


Figura AB.7 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 1
 Autores: Quevedo & Murillo

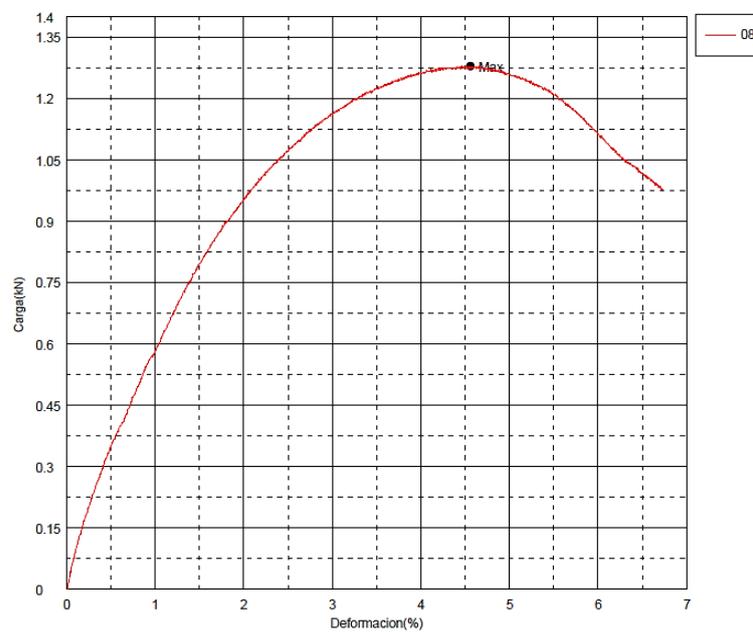


Figura AB.8 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 2
 Autores: Quevedo & Murillo

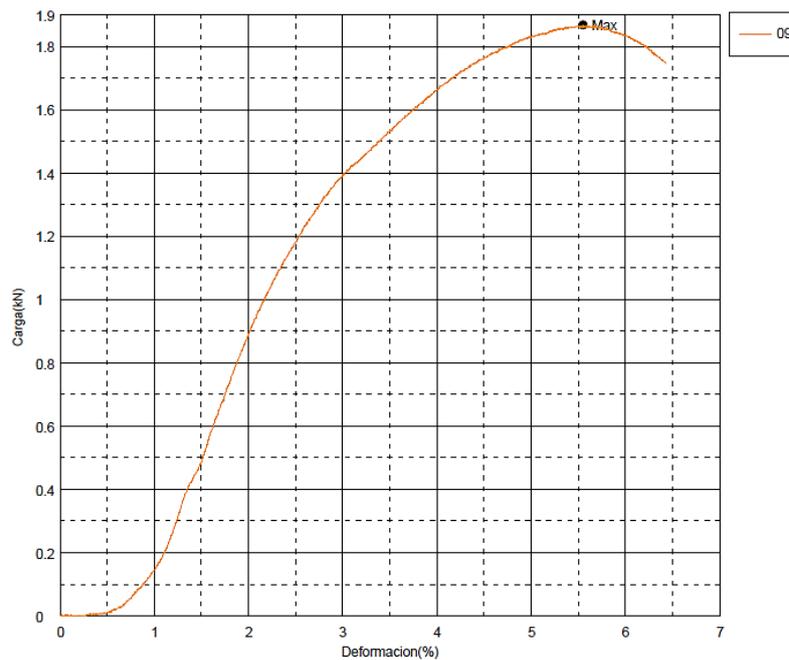


Figura AB.9 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

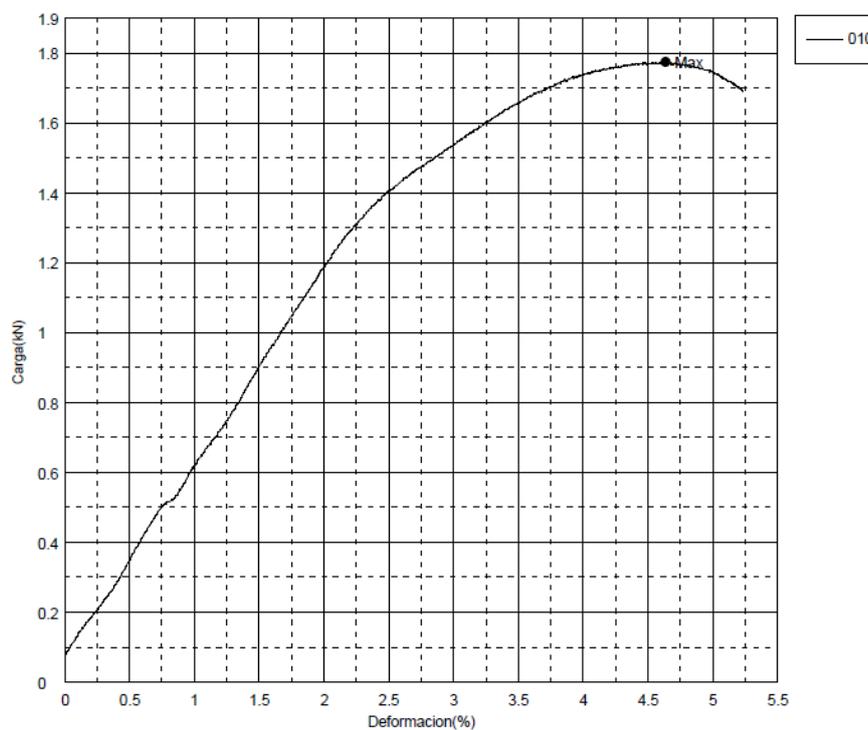


Figura AB.10 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 1

Autores: Quevedo & Murillo

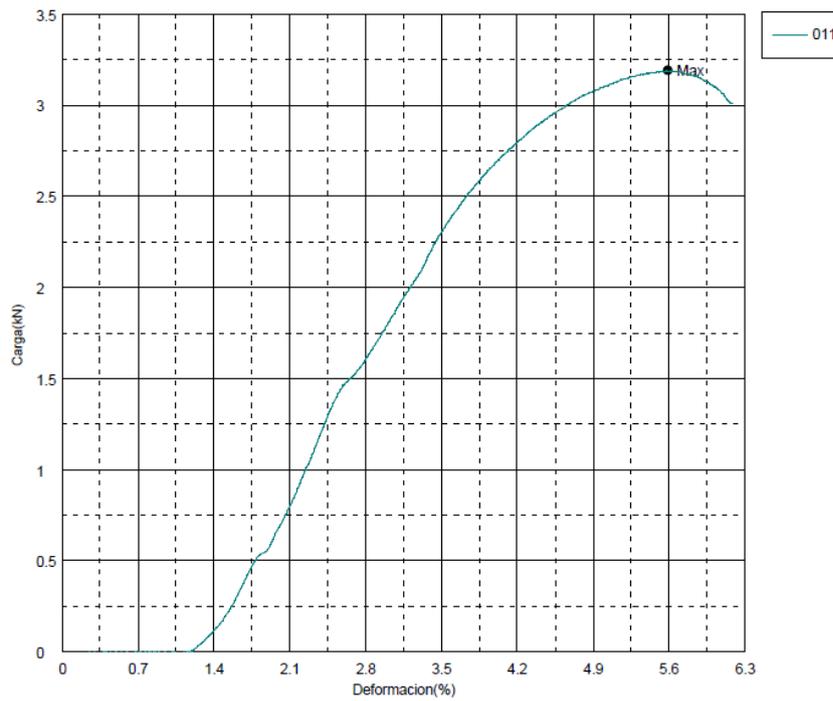


Figura AB.11 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 2

Autores: Quevedo & Murillo

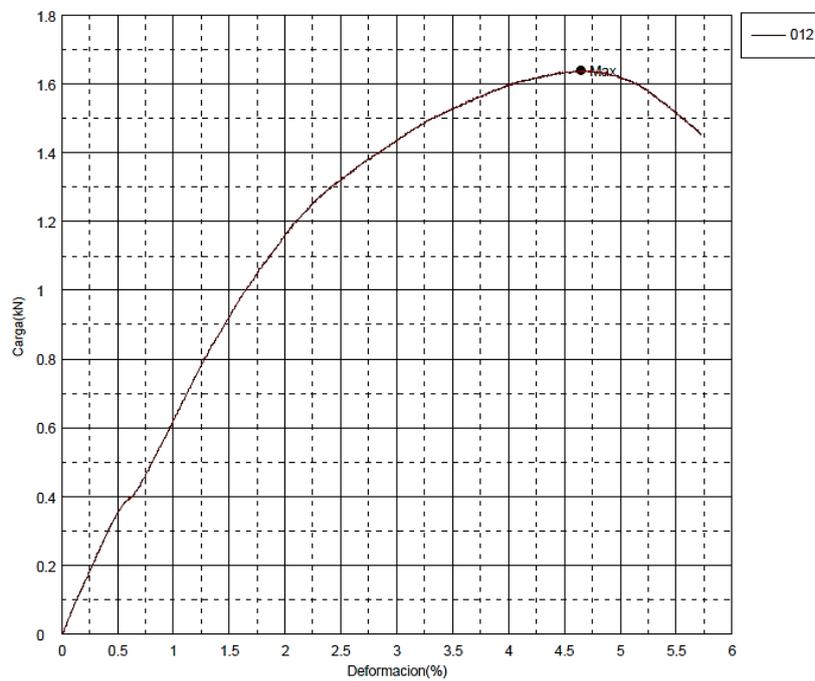


Figura AB.12 Curvas de compresión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

ANEXO C

Resistencia a la flexión

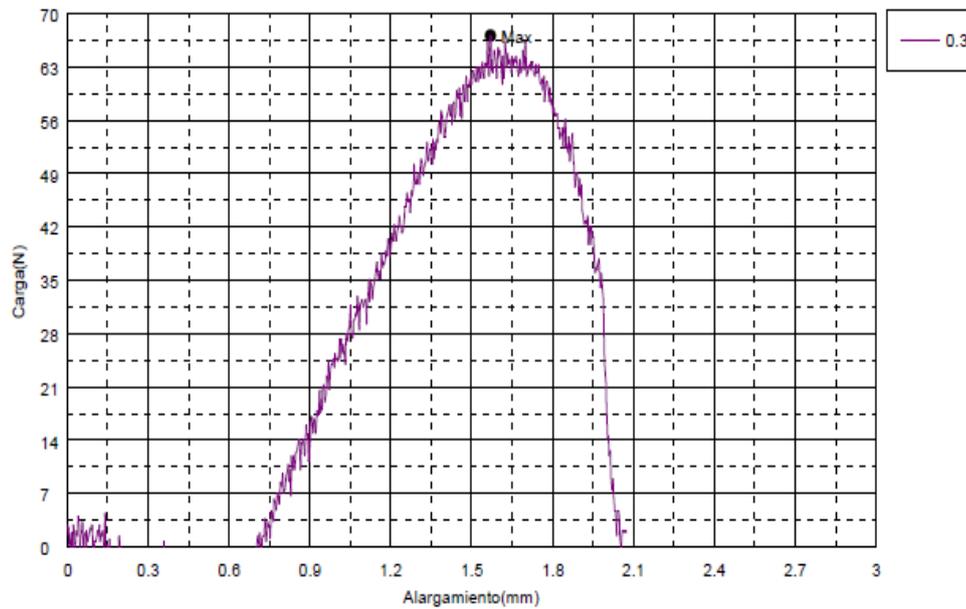


Figura AC.1 Curvas de flexión del geopolímero sin reforzamiento muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

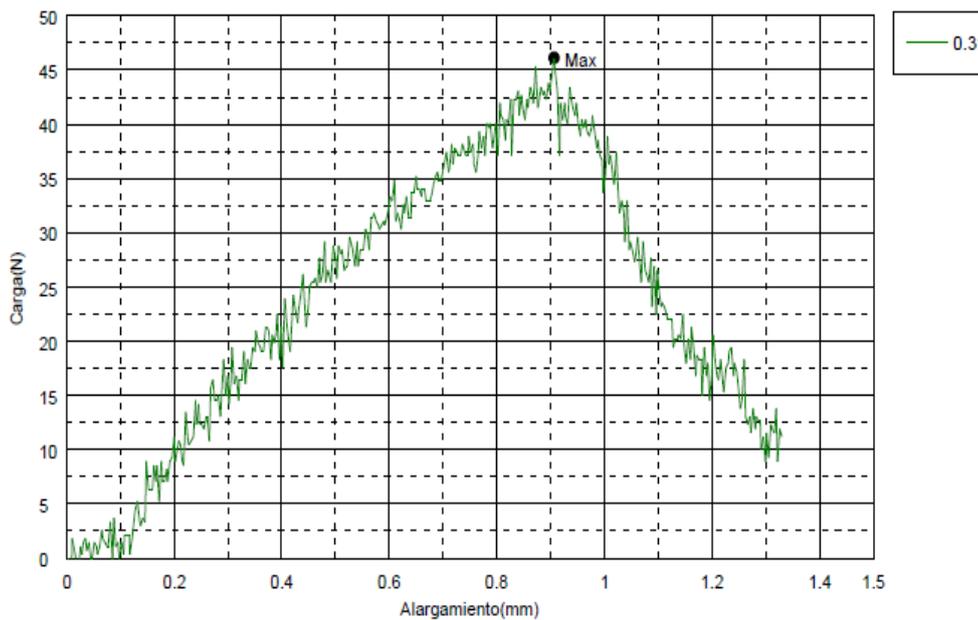


Figura AC.1 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 1

Autores: Quevedo & Murillo

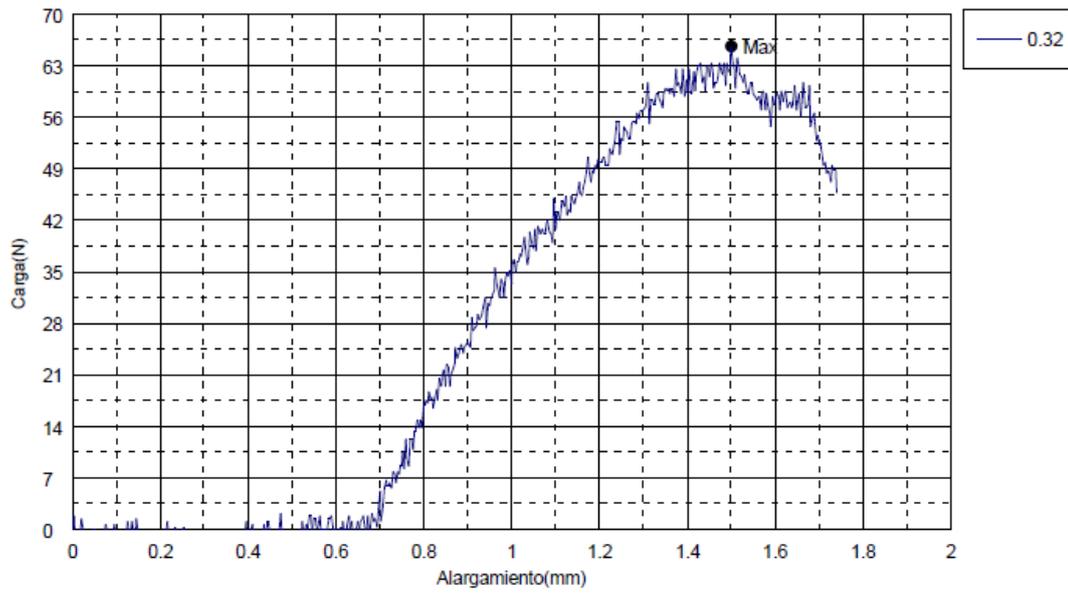


Figura AC.2 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 2

Autores: Quevedo & Murillo

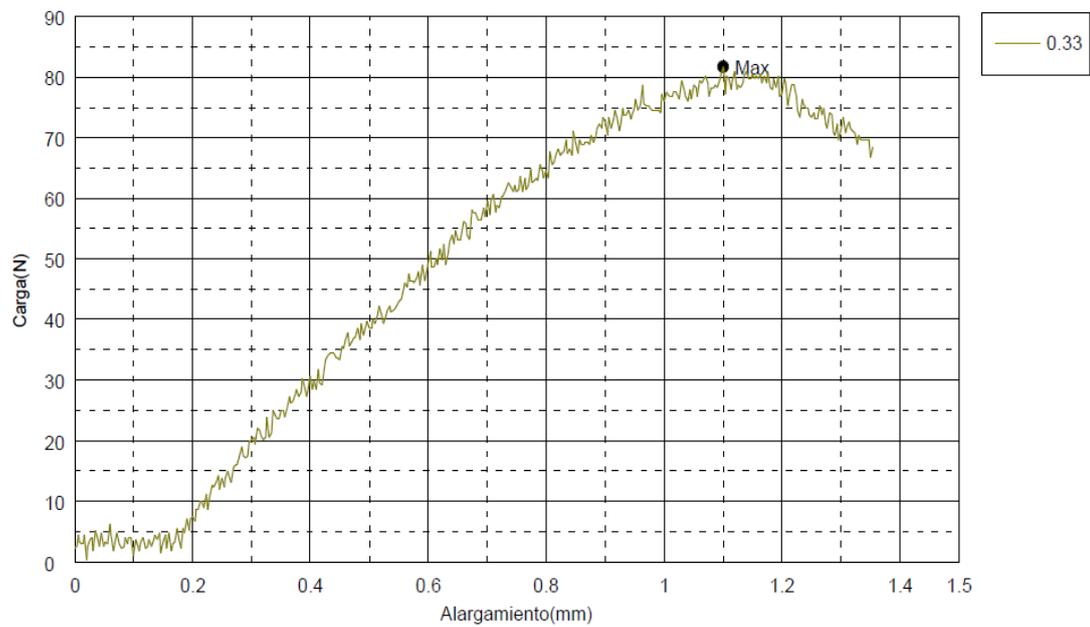


Figura AC.3 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.3% FCG muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

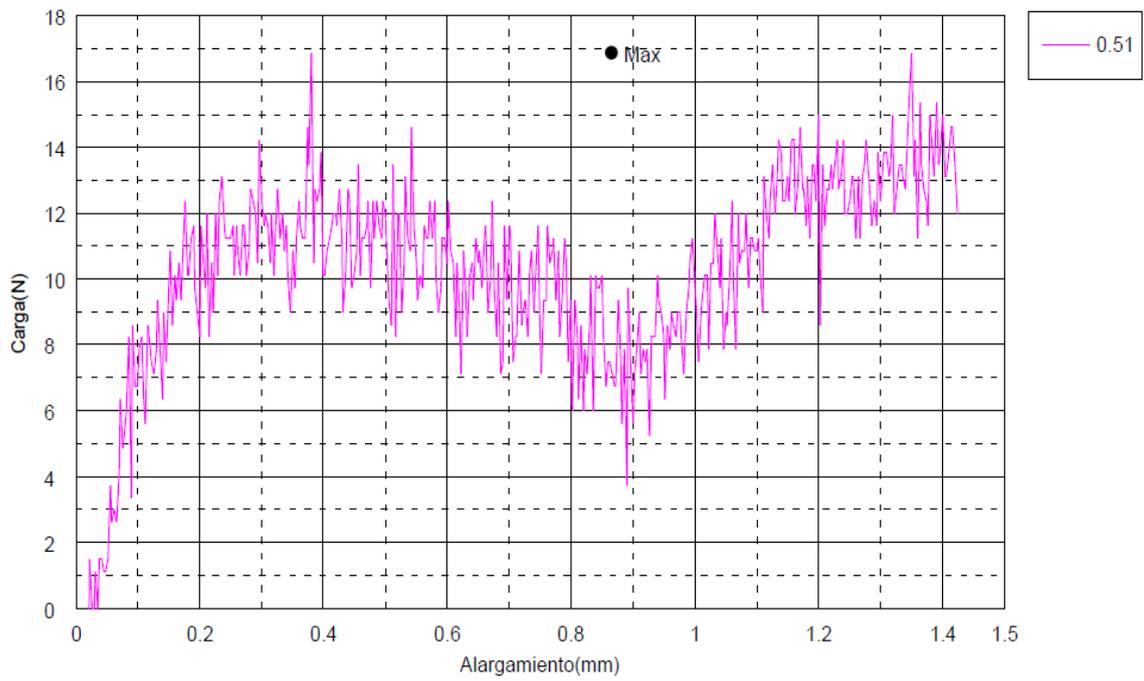


Figura AC.4 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 1

Autores: Quevedo & Murillo

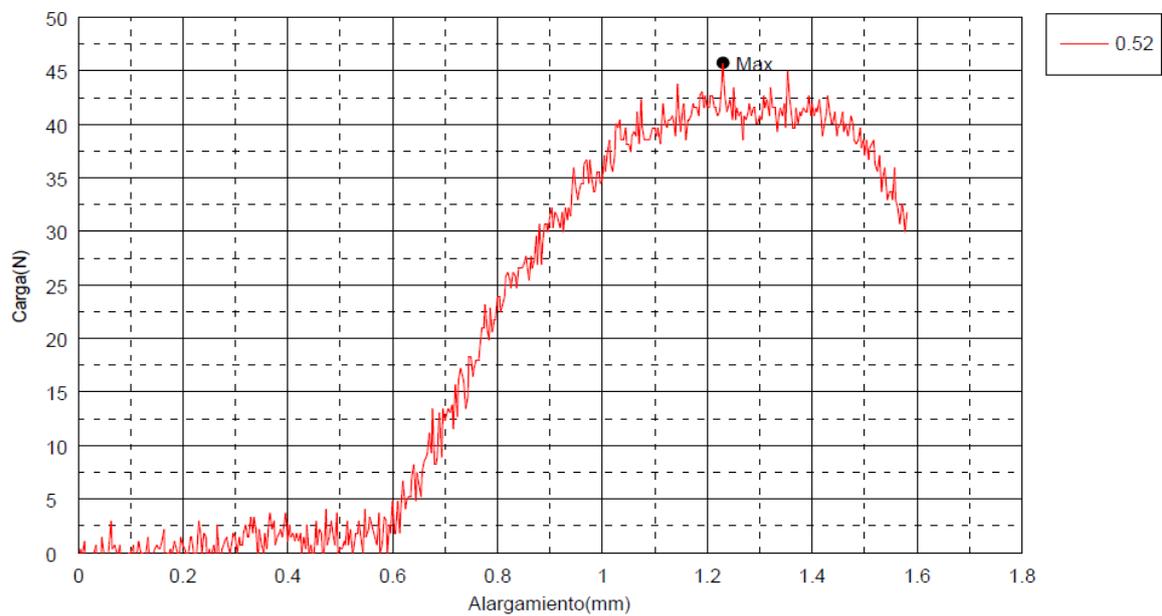


Figura AC.5 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 2

Autores: Quevedo & Murillo

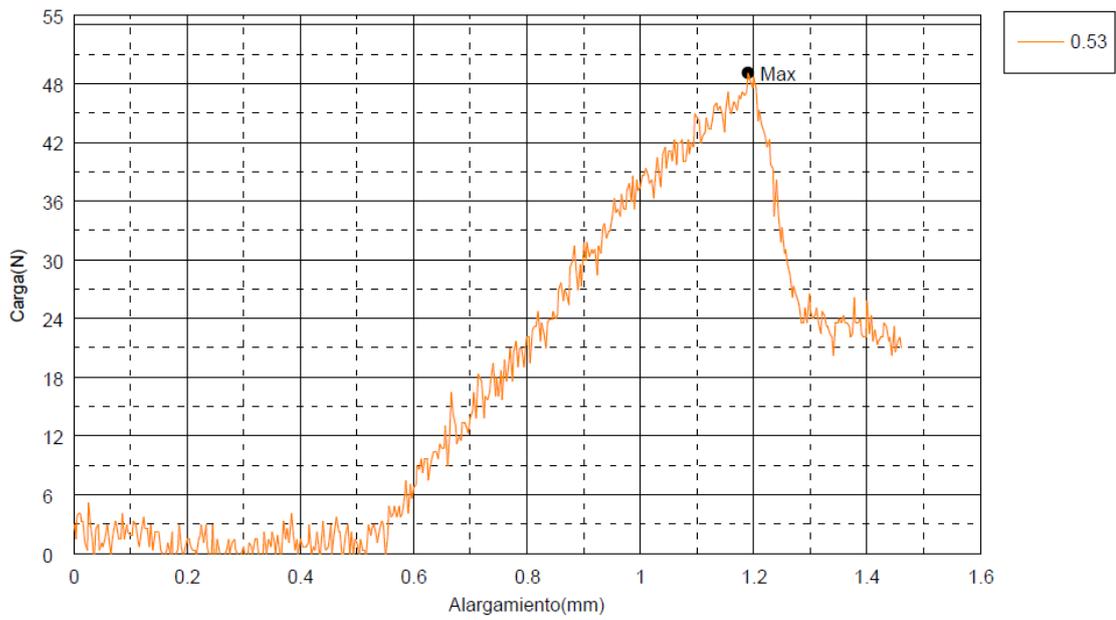


Figura AC.6 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 0.5% FCG muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

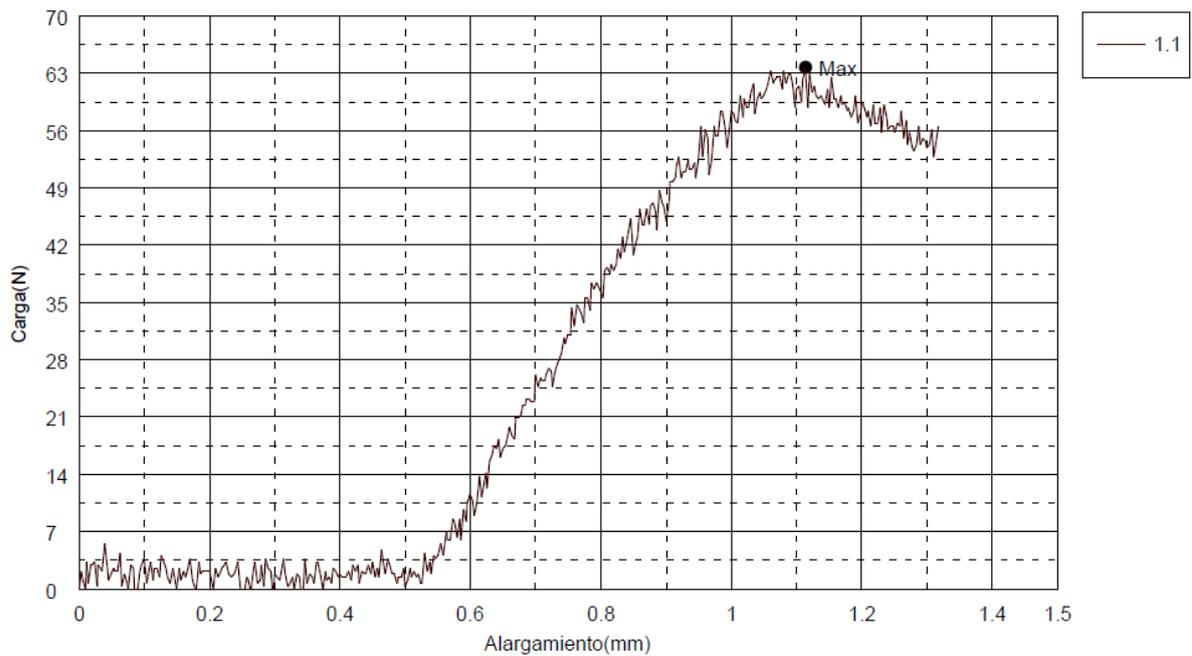


Figura AC.7 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 1

Autores: Quevedo & Murillo

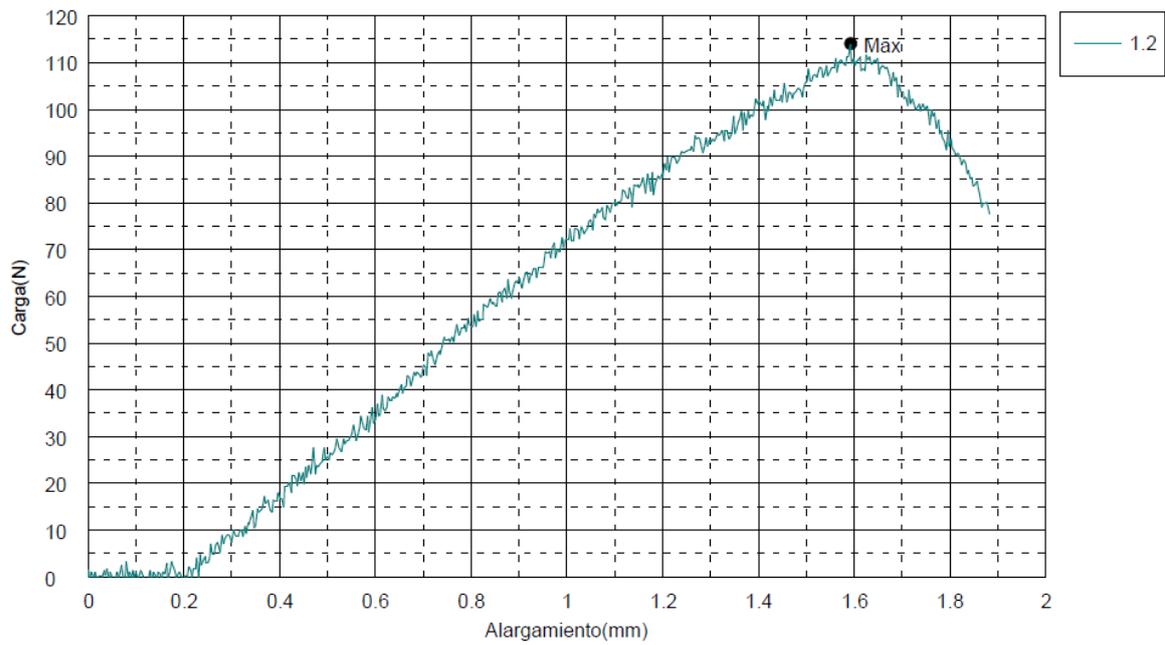


Figura AC.8 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 2

Autores: Quevedo & Murillo

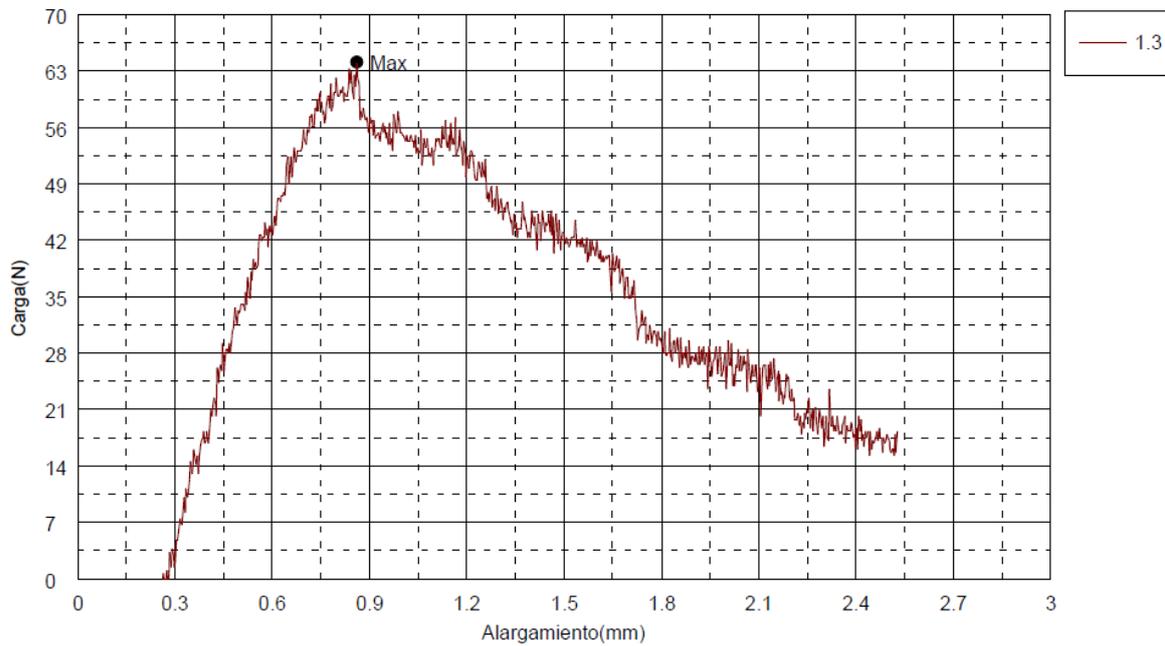


Figura AC.9 Curvas de flexión del geopolímero reforzado 1% FCG muestra 3

Autores: Quevedo & Murillo

ANEXO D

FTIR

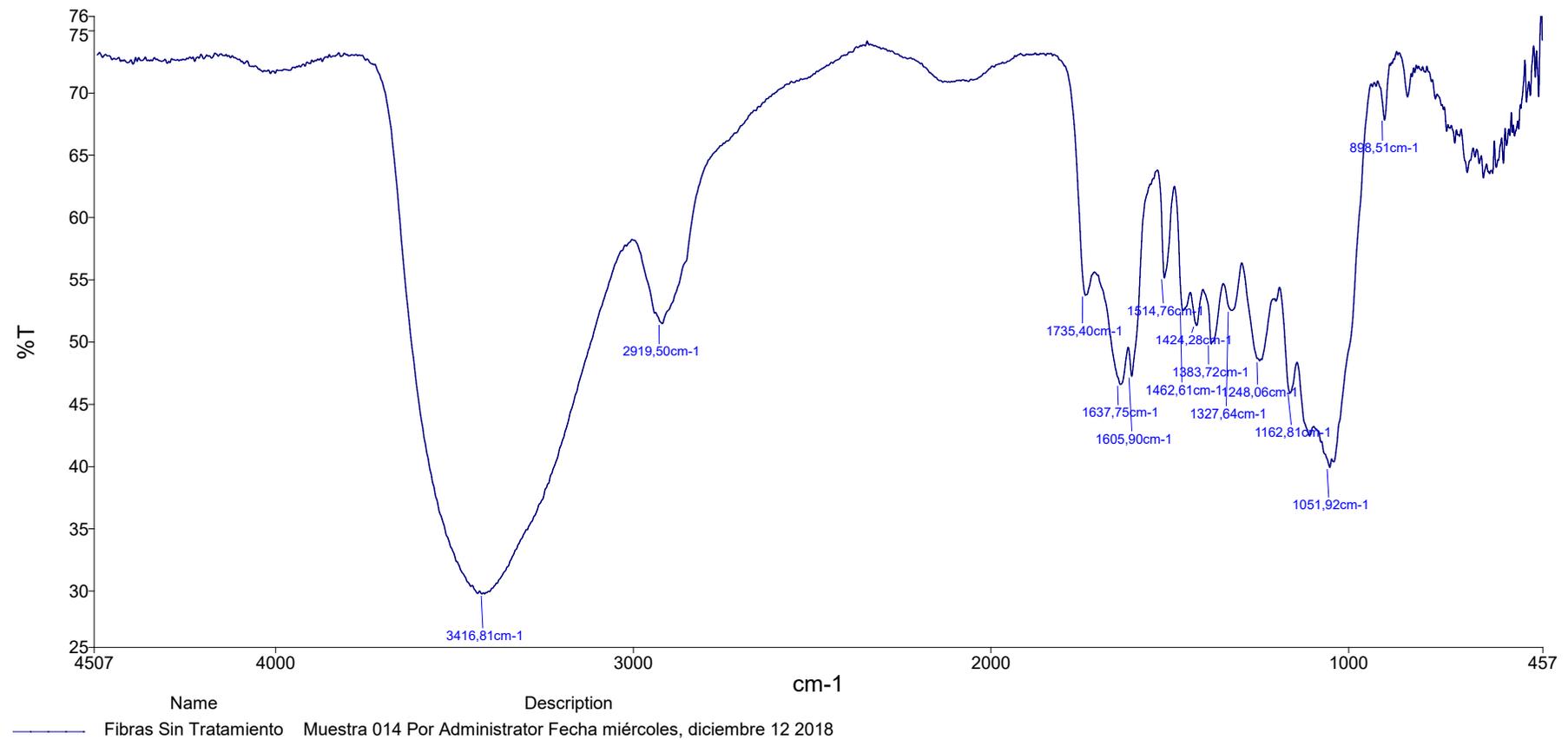
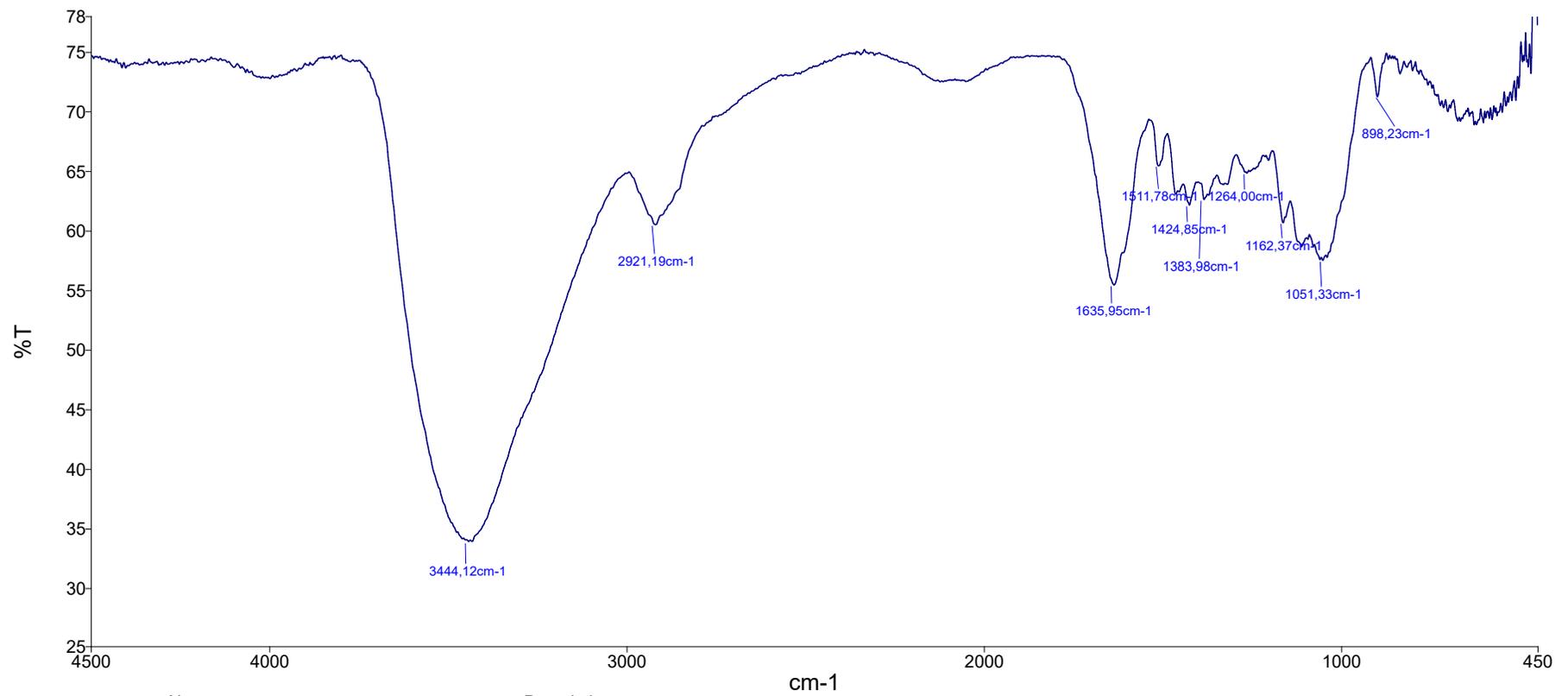


Figura AD.1 Espectro FTIR fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino (FST)

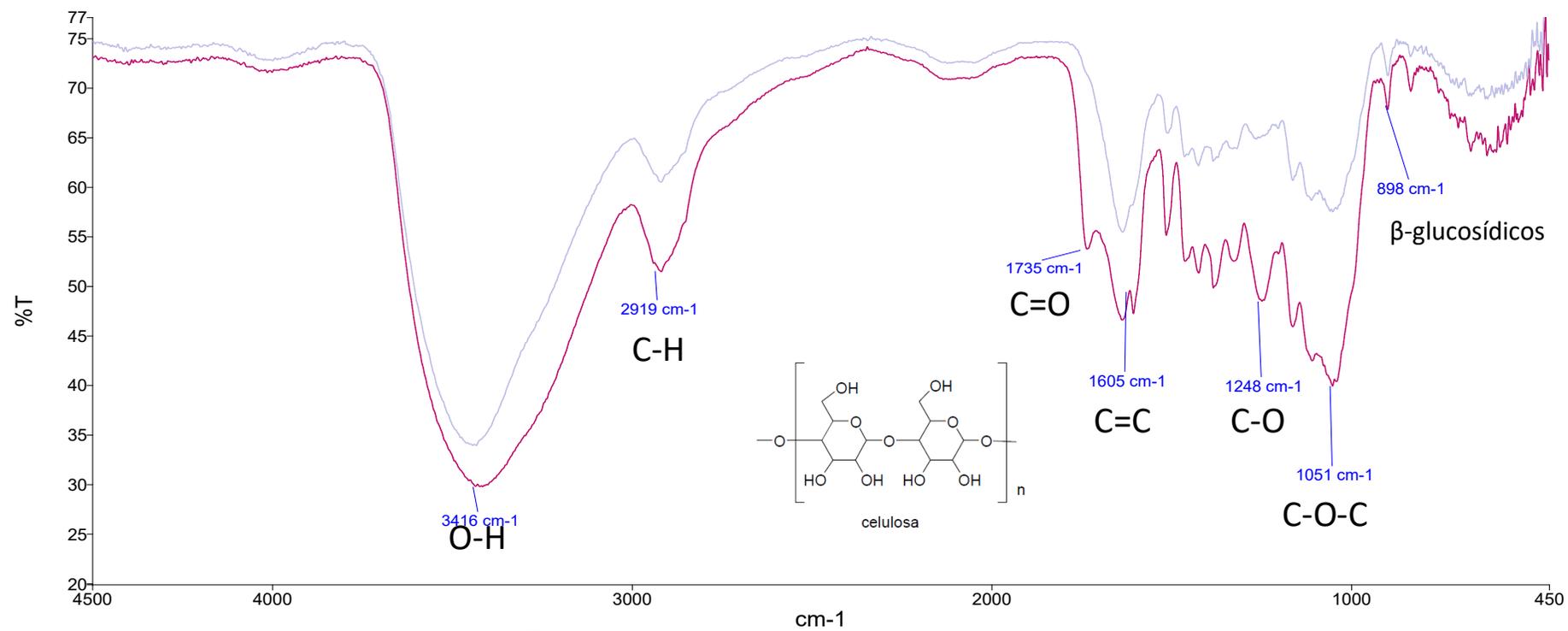
Autores: Quevedo & Murillo



Name: Fibras con Tratamiento
 Description: Muestra 015 Por Administrator Fecha miércoles, diciembre 12 2018

Figura AD.2 Espectro FTIR fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino (FCT)

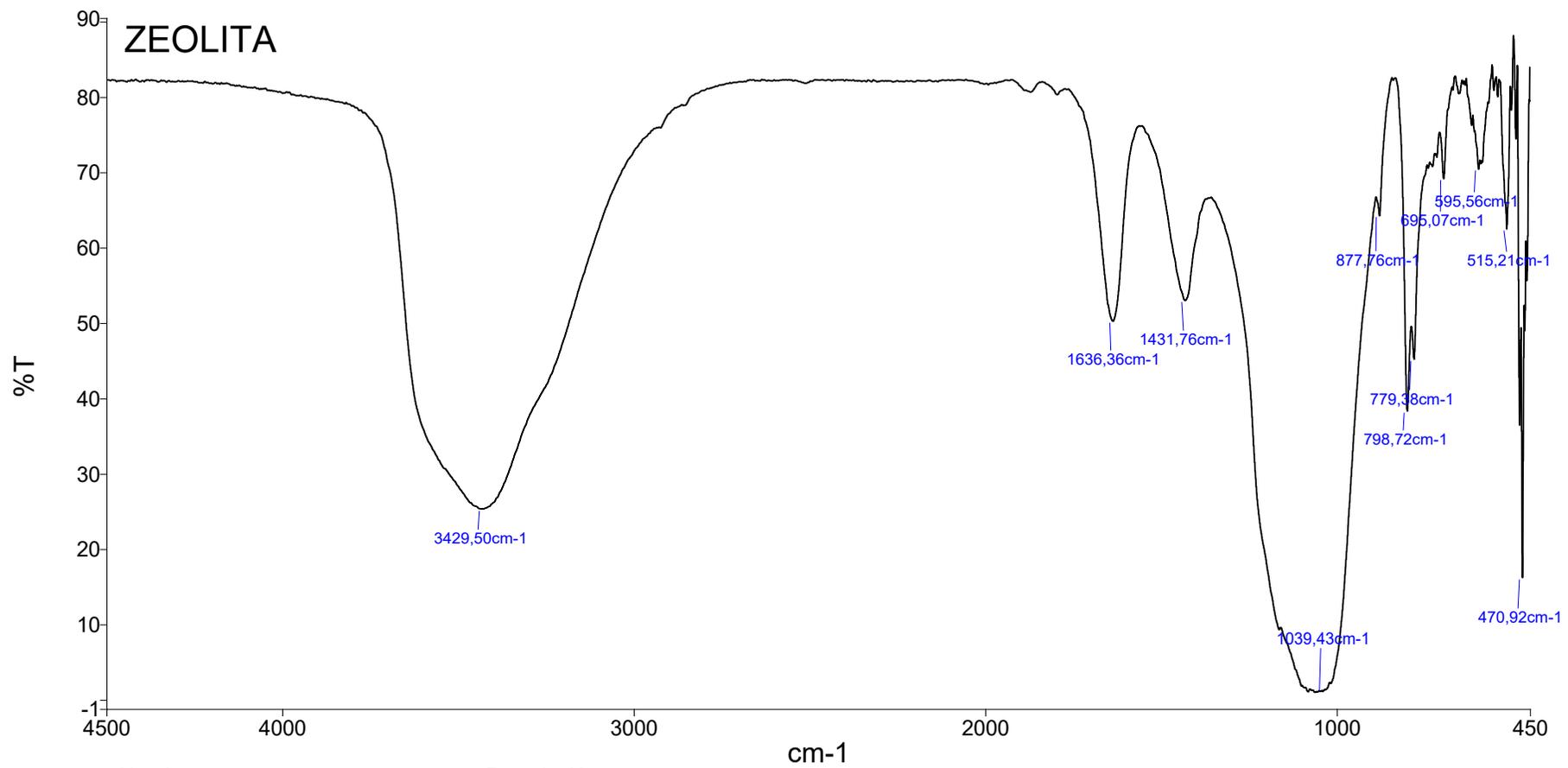
Autores: Quevedo & Murillo



Name	Description
Fibras Sin Tratamiento	Muestra 014 Por Administrator Fecha miércoles, diciembre 12 2018
Fibras con Tratamiento	Muestra 015 Por Administrator Fecha miércoles, diciembre 12 2018

Figura AD.3 Comparación entre espectros FST Y FCT

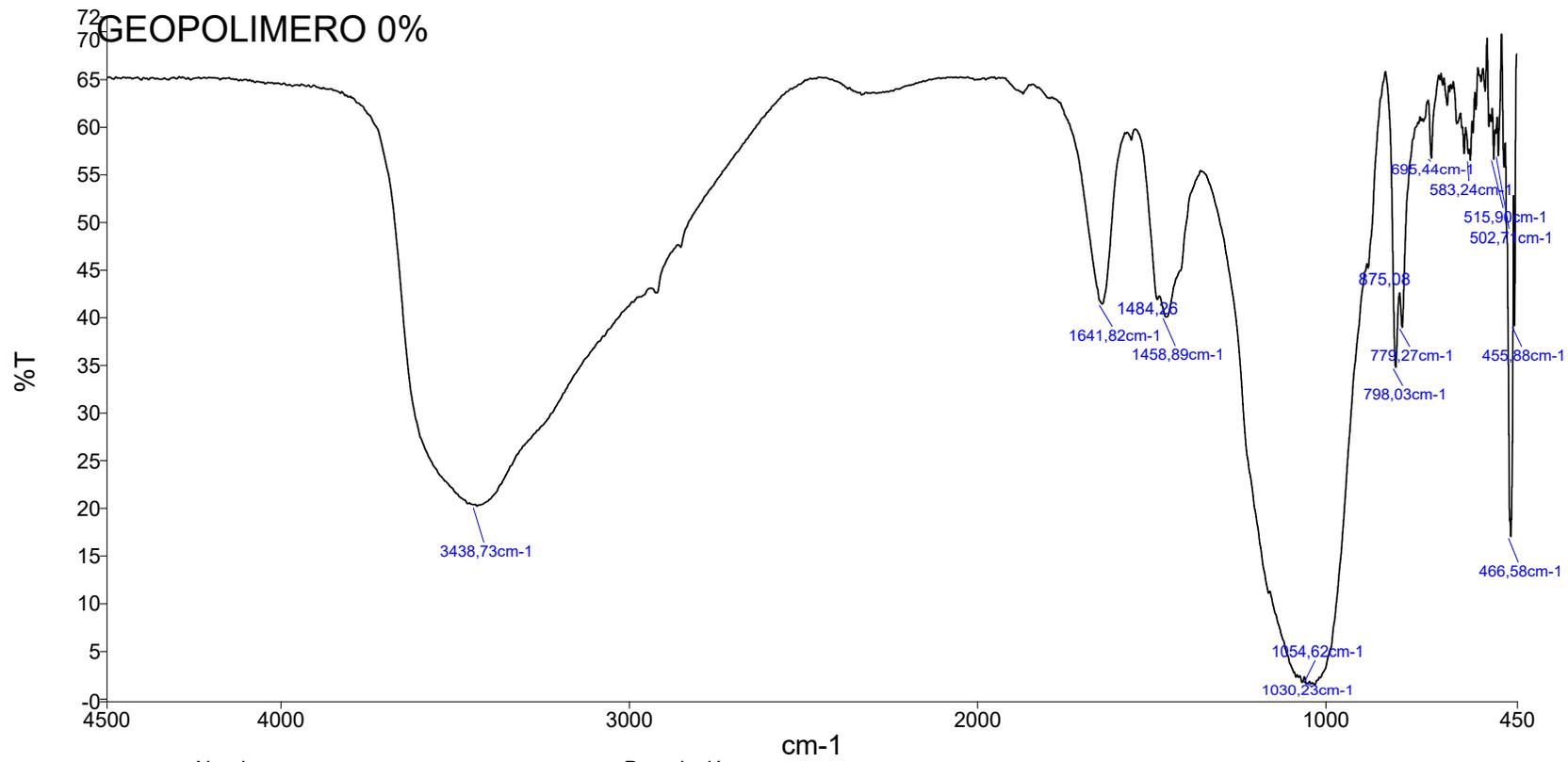
Autores: Quevedo & Murillo



Nombre	Descripción
Zeolita	Muestra 016 Por Administrator Fecha miércoles, diciembre 12 2018

Figura AD.4 Espectro FTIR zeolita

Autores: Quevedo & Murillo



Nombre Descripción
 GEOPOLIMERO-0% (1) Muestra 038 Por Administrator Fecha viernes, diciembre 28 2018

Figura AD.5 Espectro FTIR geopolímero sin reforzamiento

Autores: Quevedo & Murillo

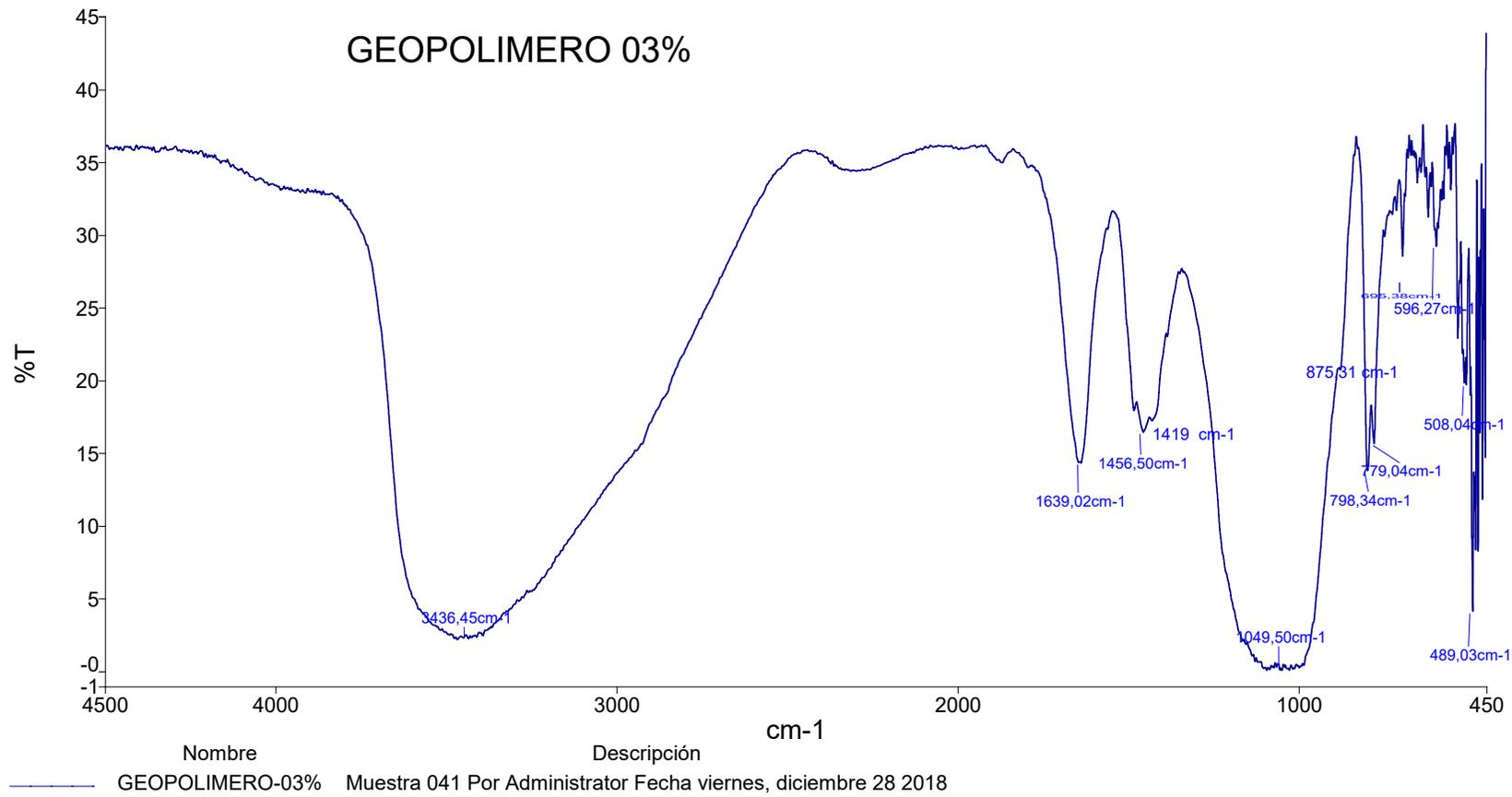
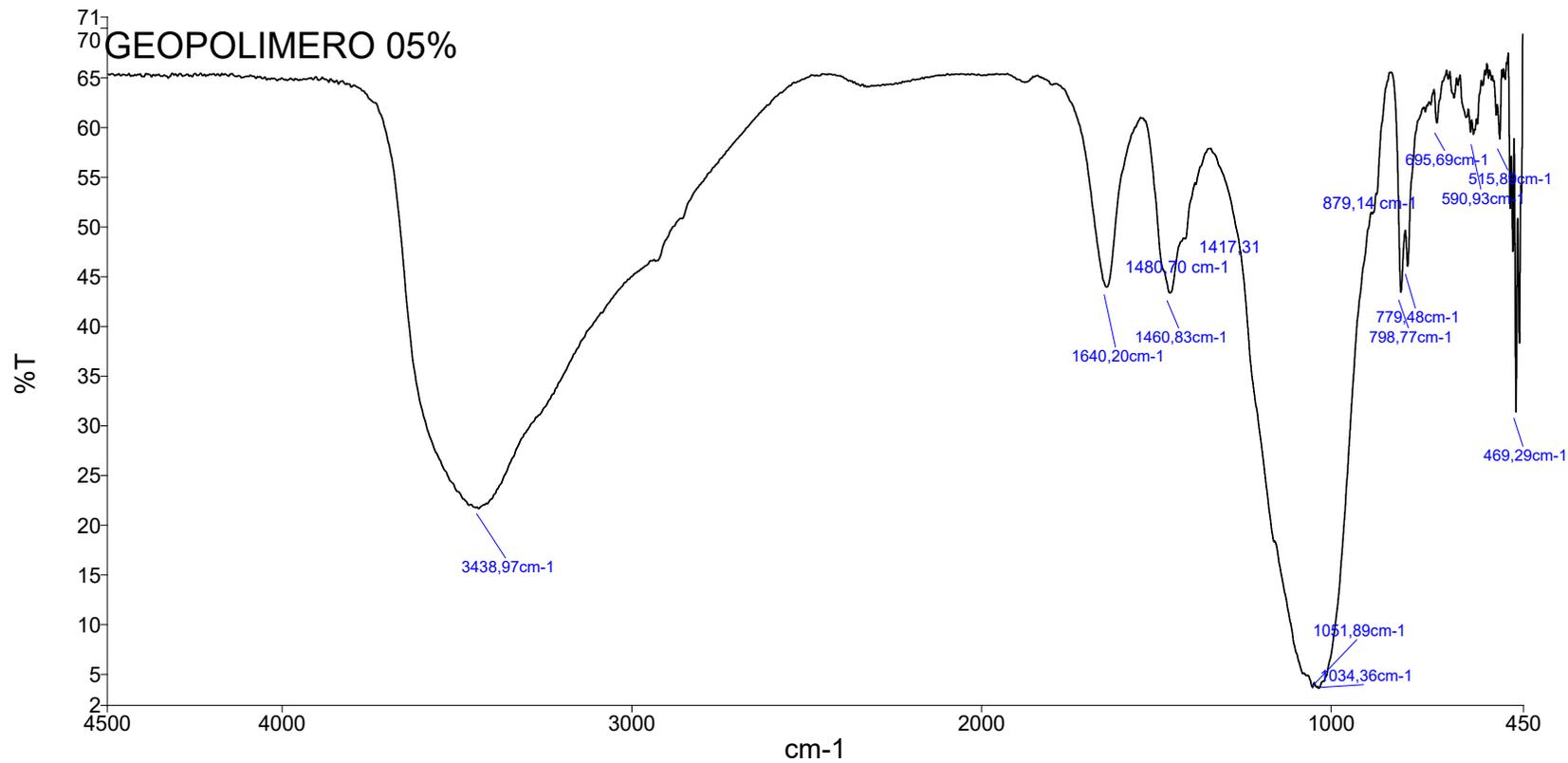


Figura AD.6 Espectro FTIR geopolímero reforzado con 0.3% FCG

Autores: Quevedo & Murillo



Nombre Descripción
 GEOPOLIMERO-05% Muestra 042 Por Administrator Fecha viernes, diciembre 28 2018

Figura AD.7 Espectro FTIR geopolimero reforzado con 0.5% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

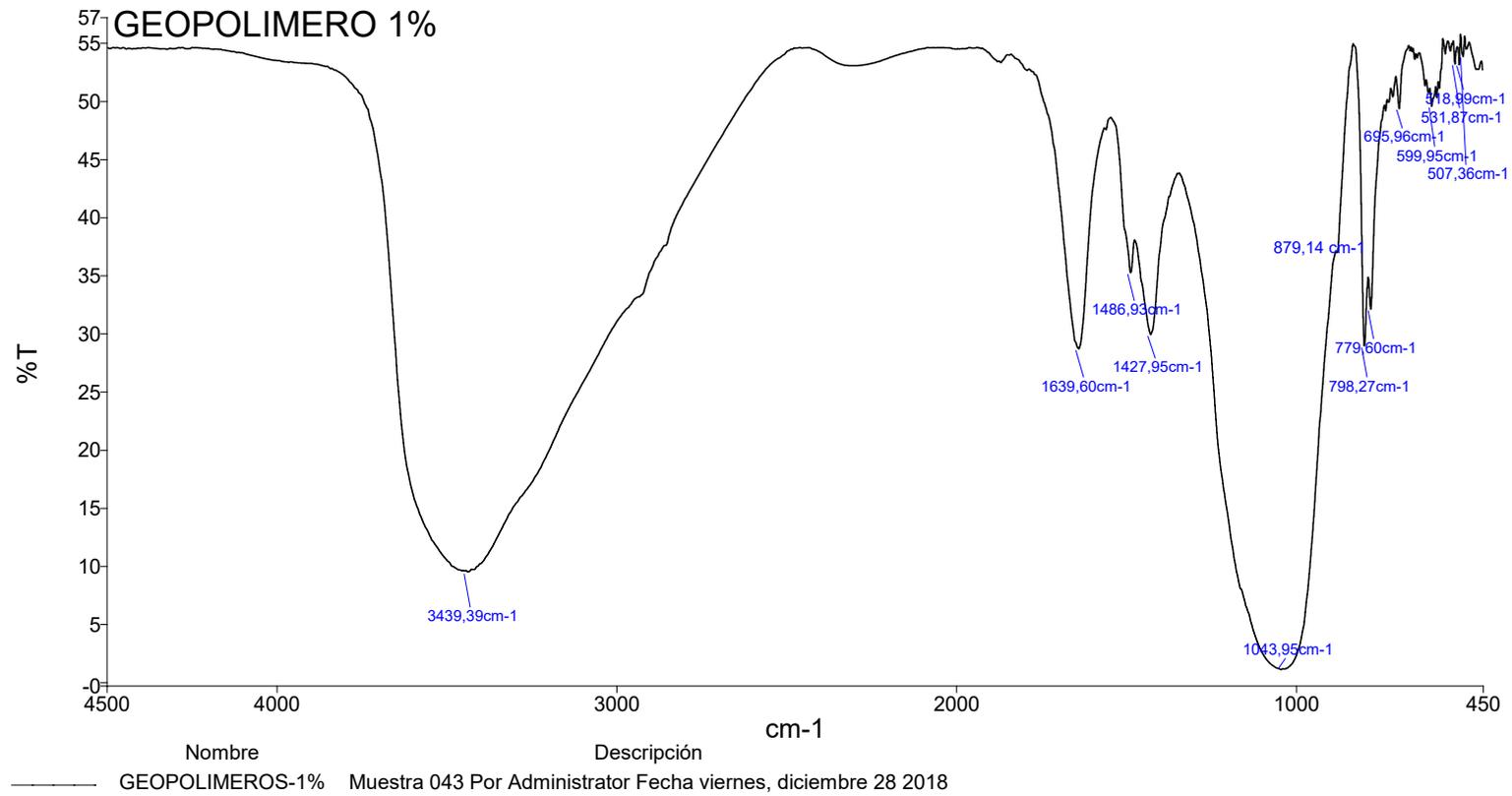


Figura AD.8 Espectro FTIR geopolímero reforzado con 1% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

ANEXO E

Difracción de rayos x

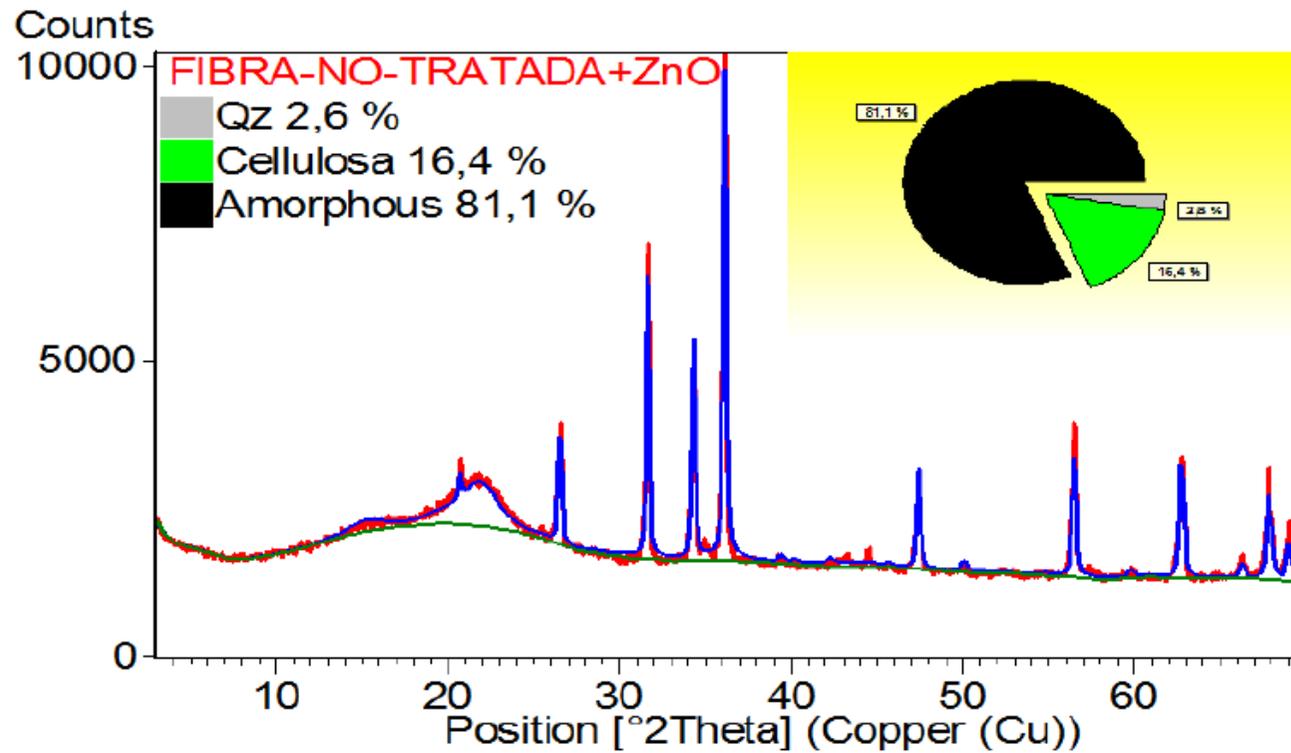


Figura AE.1 Difractograma fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino

Autores: Quevedo & Murillo

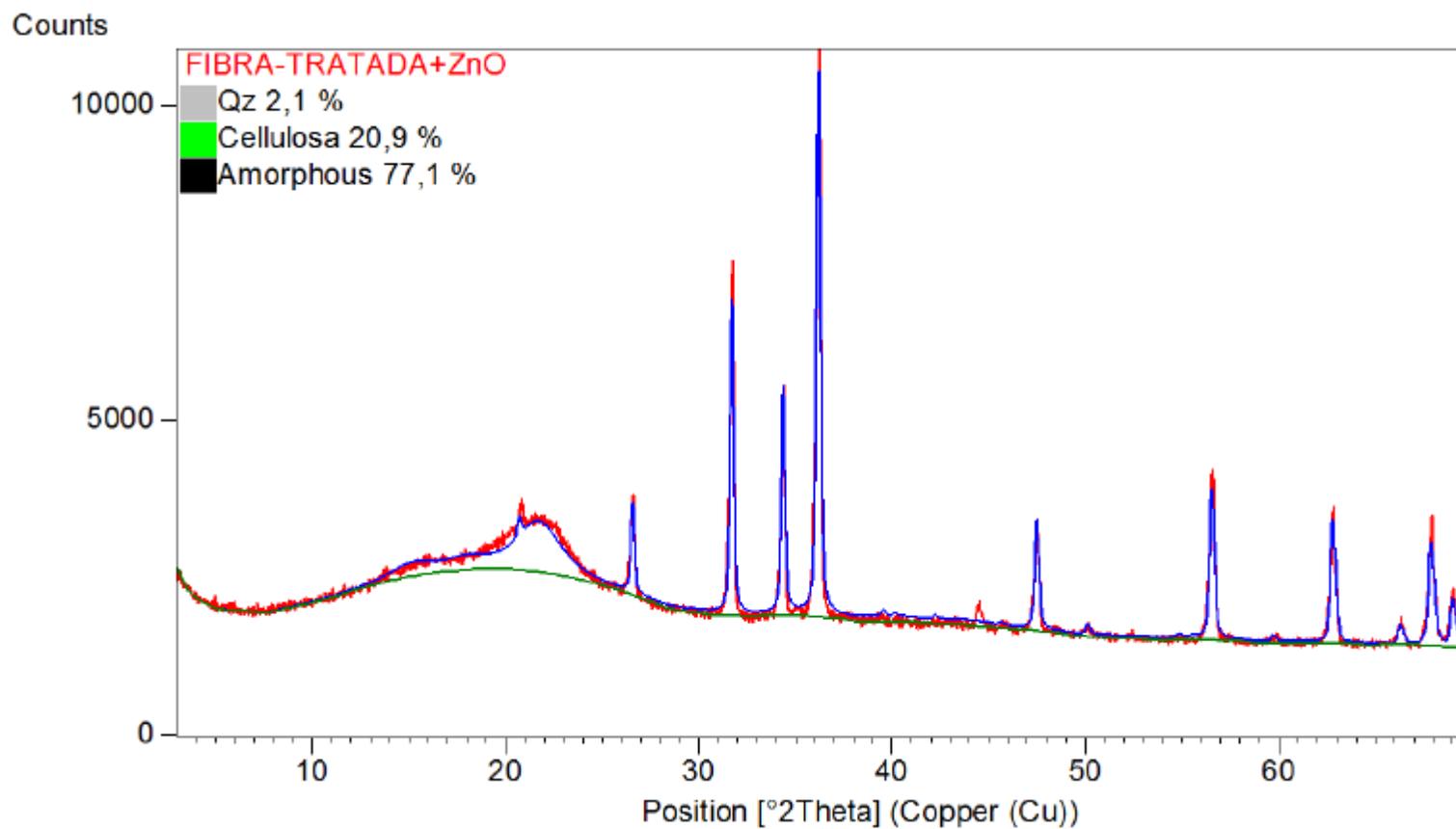


Figura AE.2 Difractograma fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino

Autores: Quevedo & Murillo

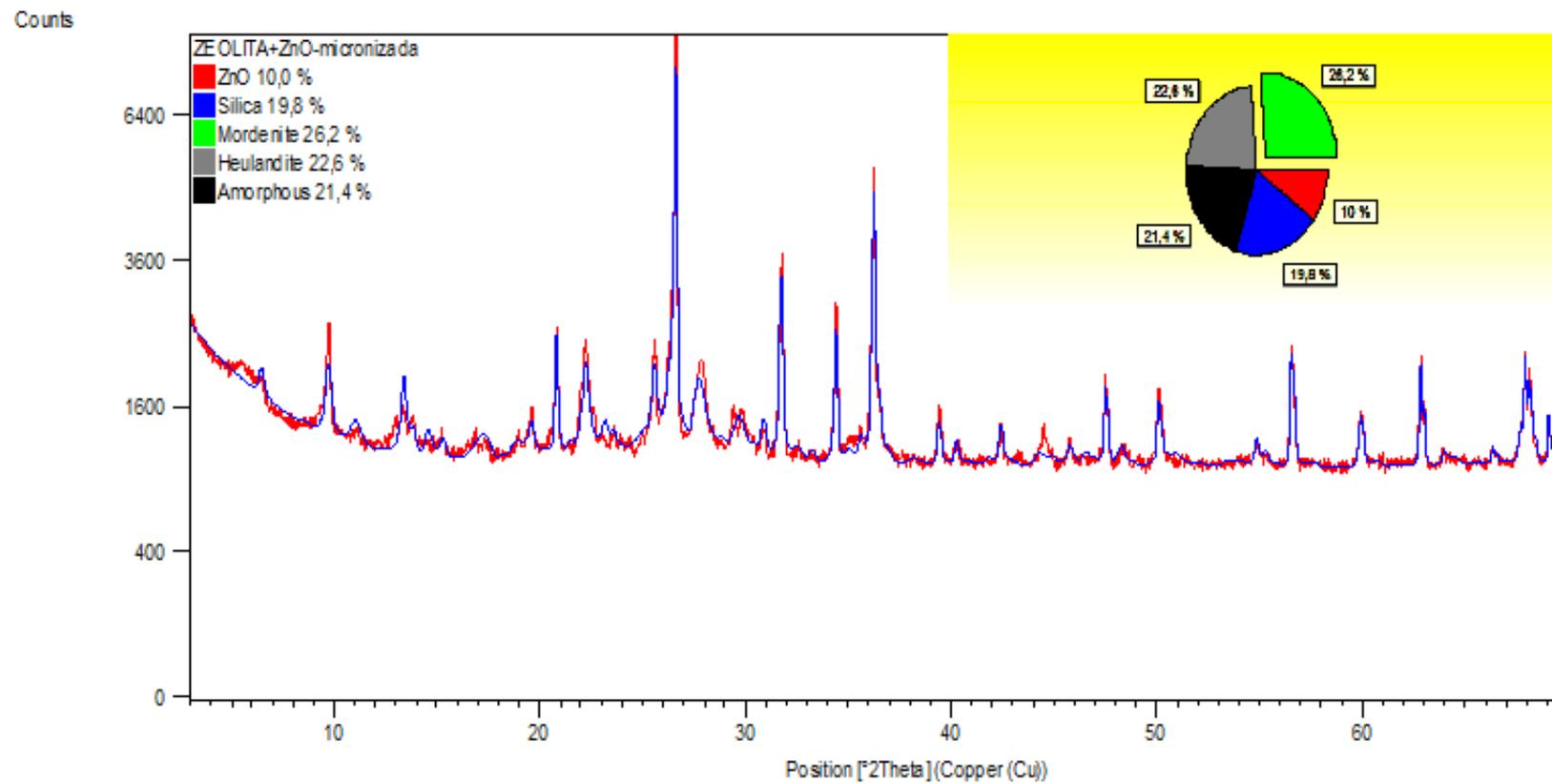


Figura AE.3 Difractograma zeolita

Autores: Quevedo & Murillo

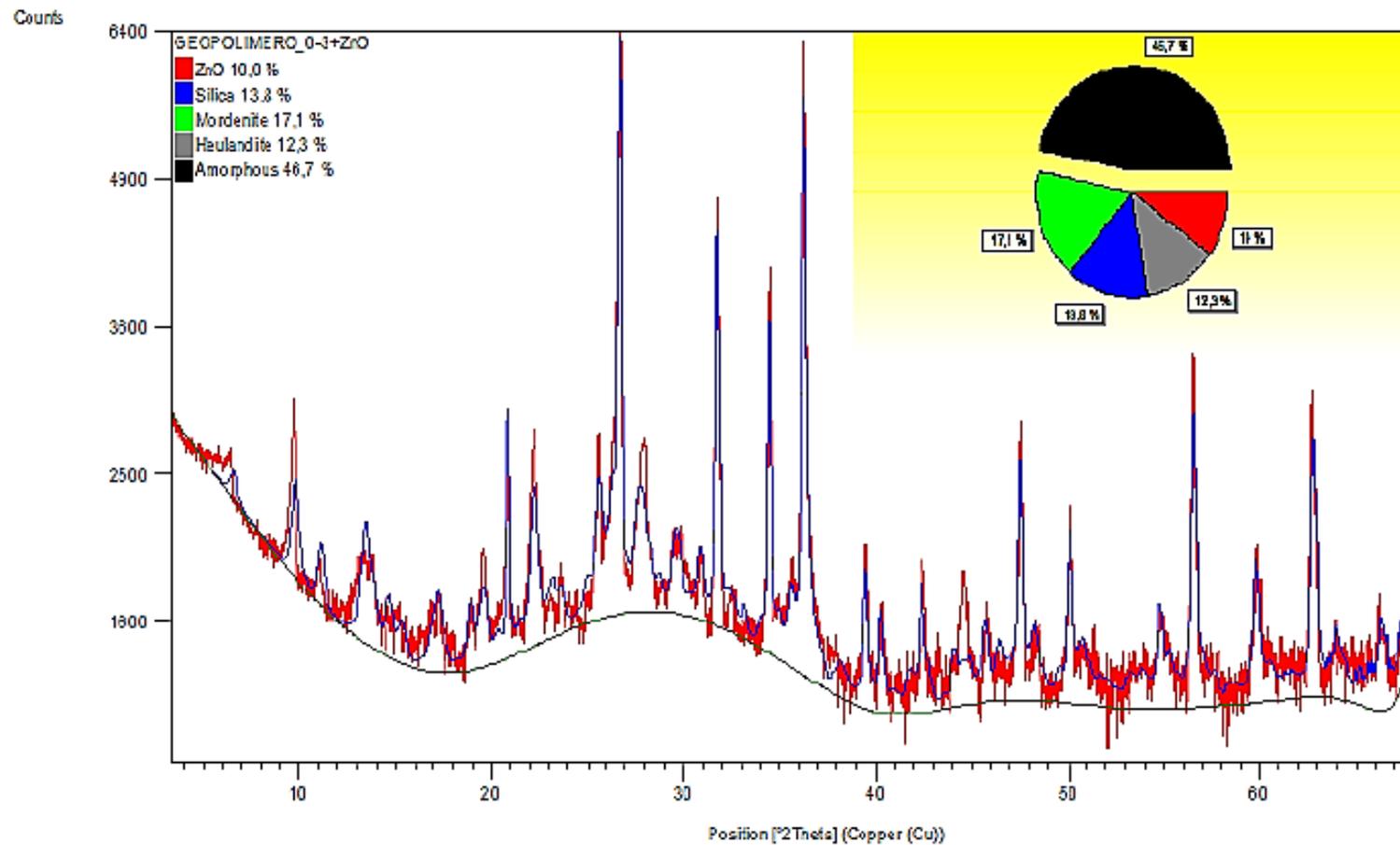


Figura AE.4 Difractograma de geopolímero sin reforzamiento

Autores: Quevedo & Murillo

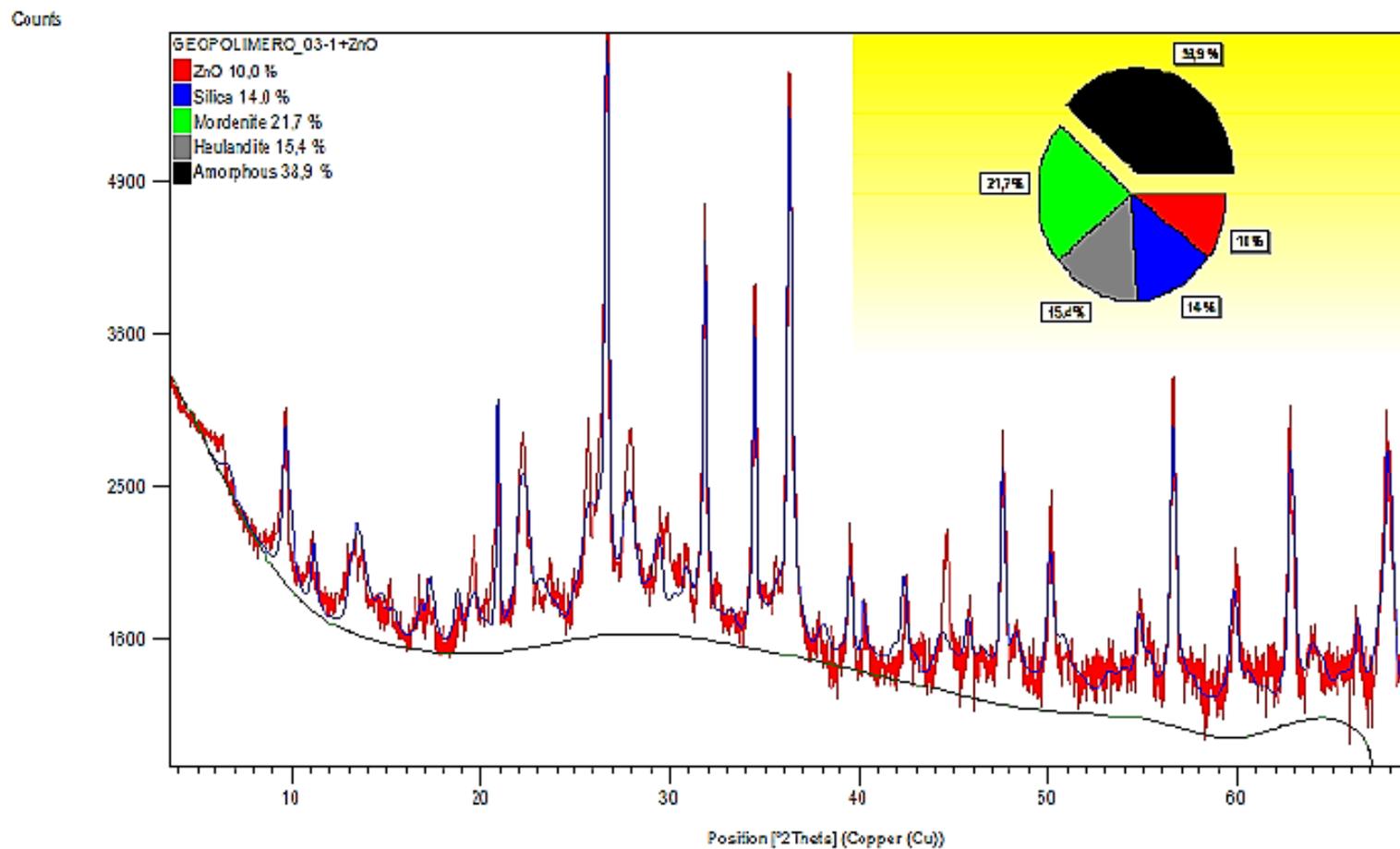


Figura AE.5 Difractograma geopolimero reforzado con 0.3% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

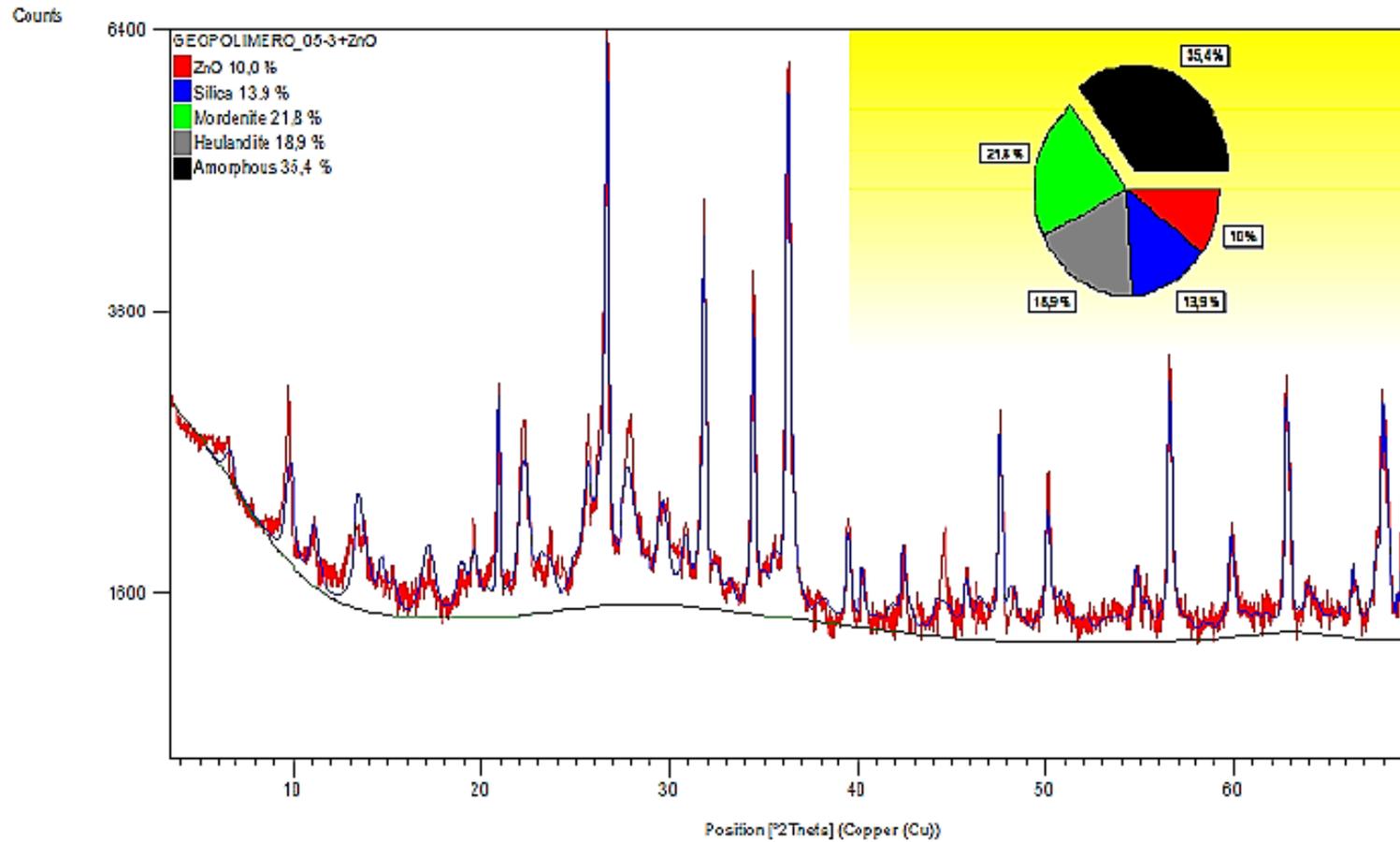


Figura AE.6 Difractograma geopolimero reforzado con 0.5% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

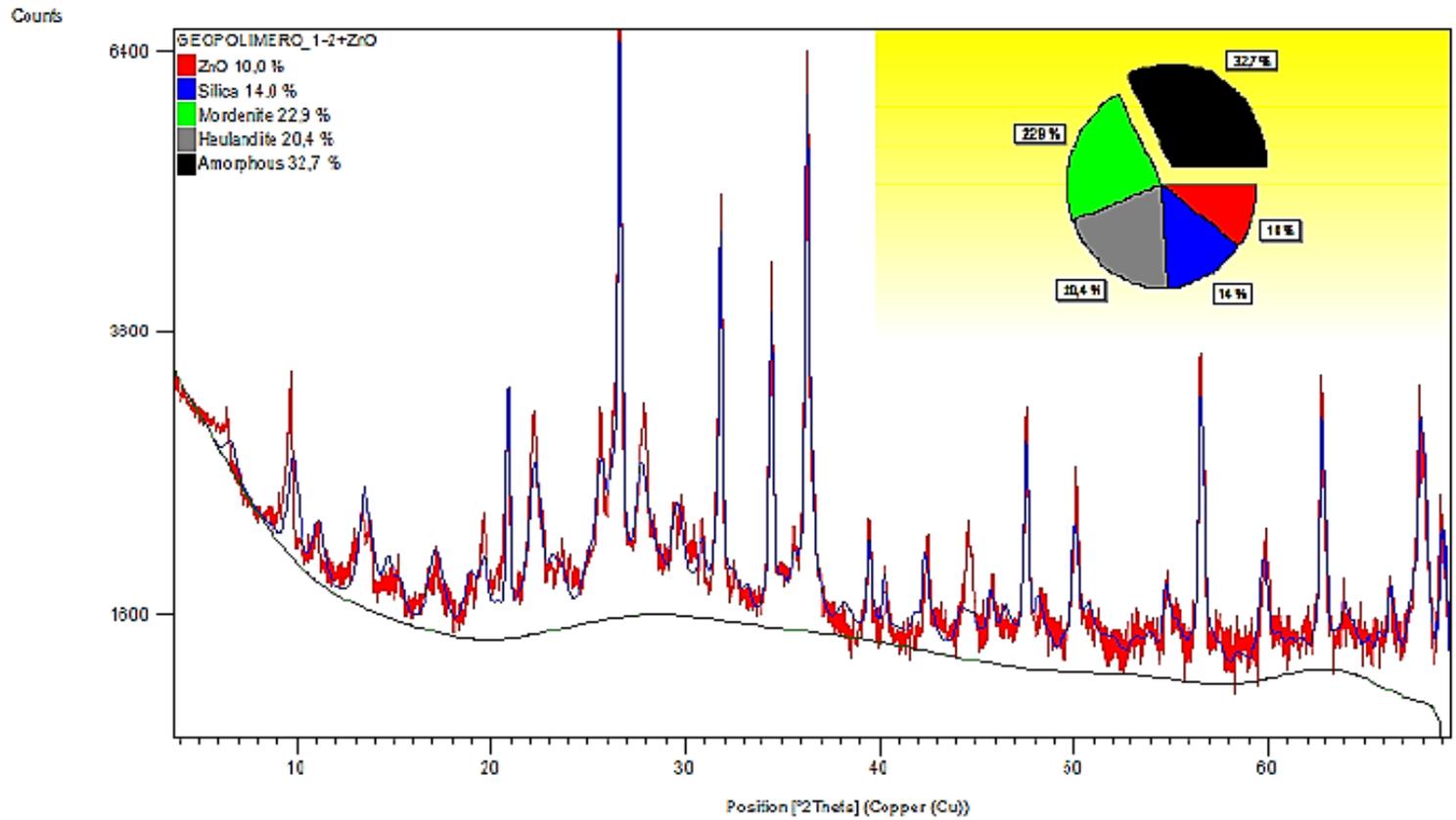


Figura AE.7. Difractograma geopolimero reforzado con 1% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

ANEXO F

Análisis TGA-DSC

Sample: FIBRAS SIN TRATAR
Size: 8.8100 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...FIBRAS SIN TRATAR ANALISIS 2.001
Operator: JC
Run Date: 12-Dec-2018 09:42
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

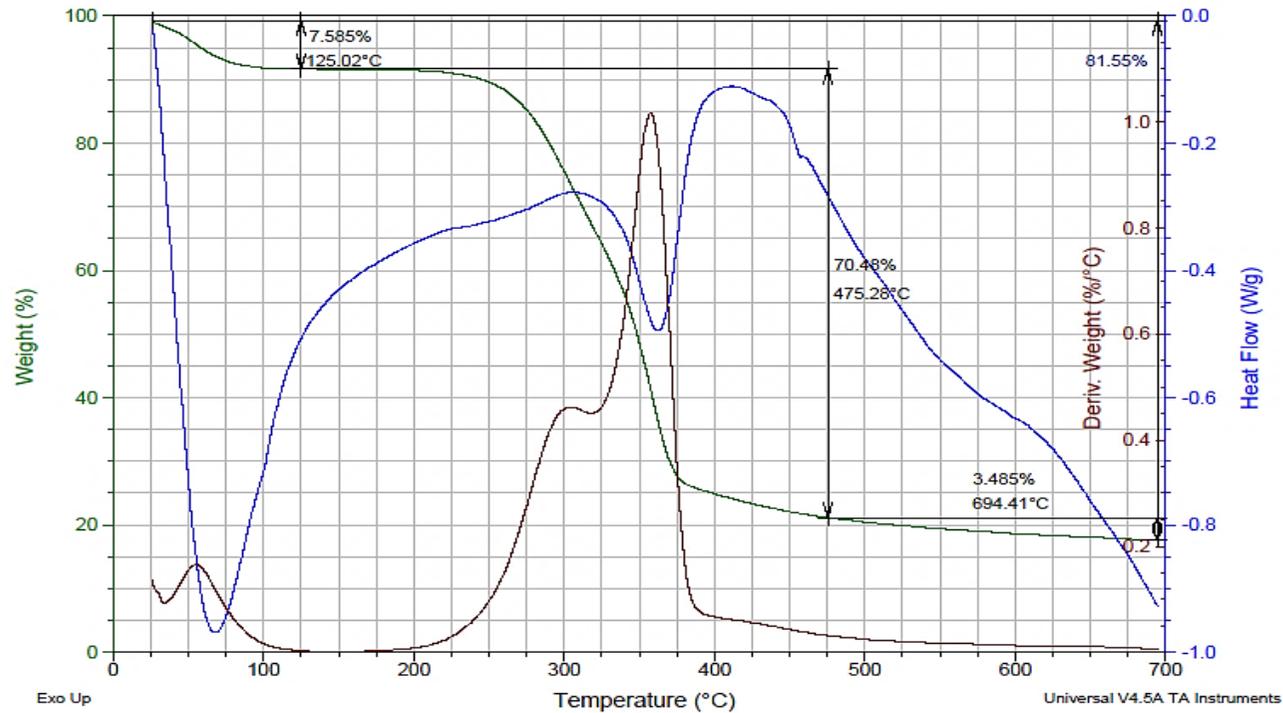


Figura AF.1 Análisis DSC-TGA de fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino

Autores: Quevedo & Murillo

Sample: FIBRAS TRATADAS
Size: 8.7900 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...TGA\FIBRAS TRATADAS 2.001
Operator: JC
Run Date: 12-Dec-2018 12:31
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

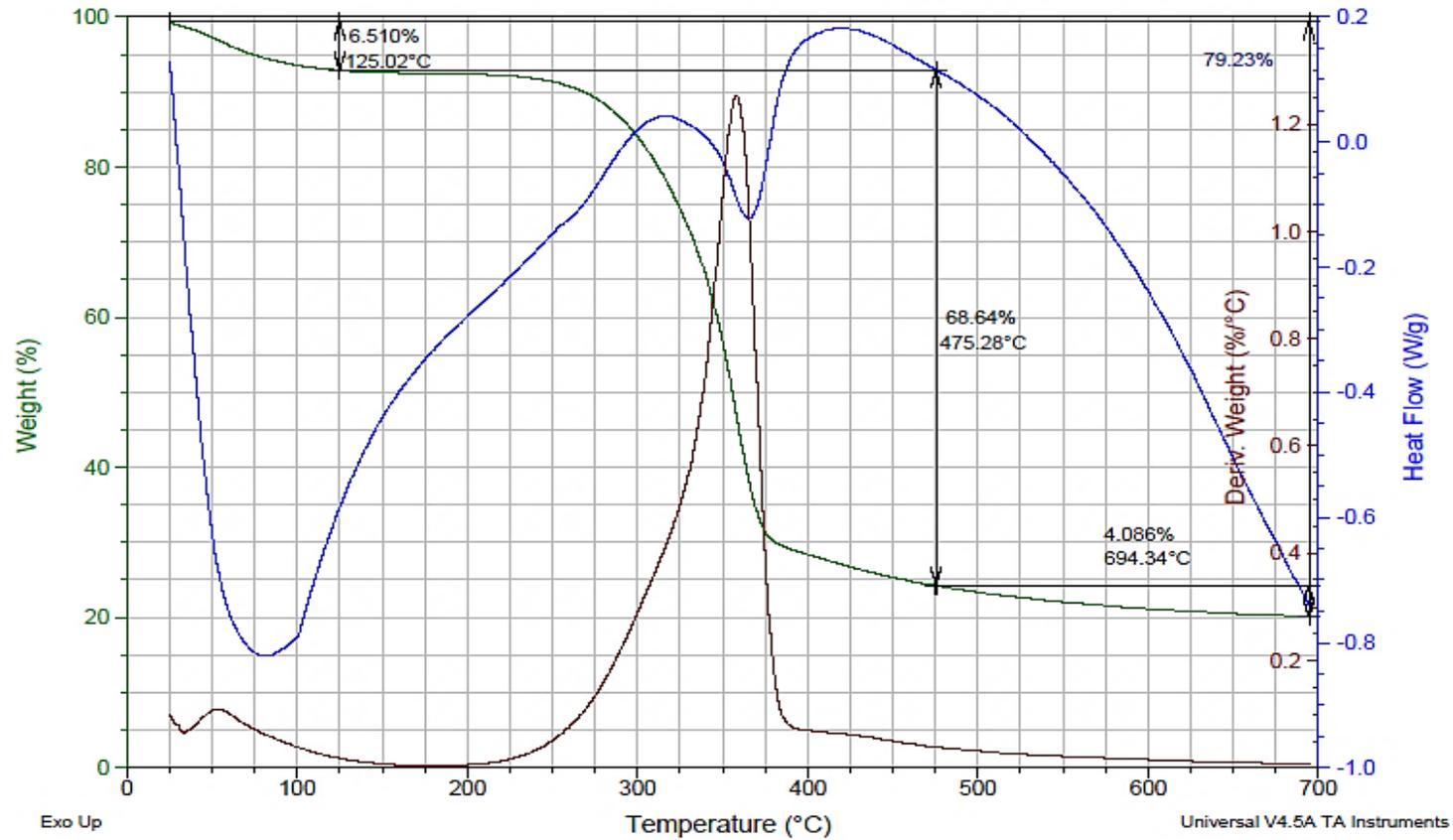


Figura AF.2 Análisis DSC-TGA de fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino

Autores: Quevedo & Murillo

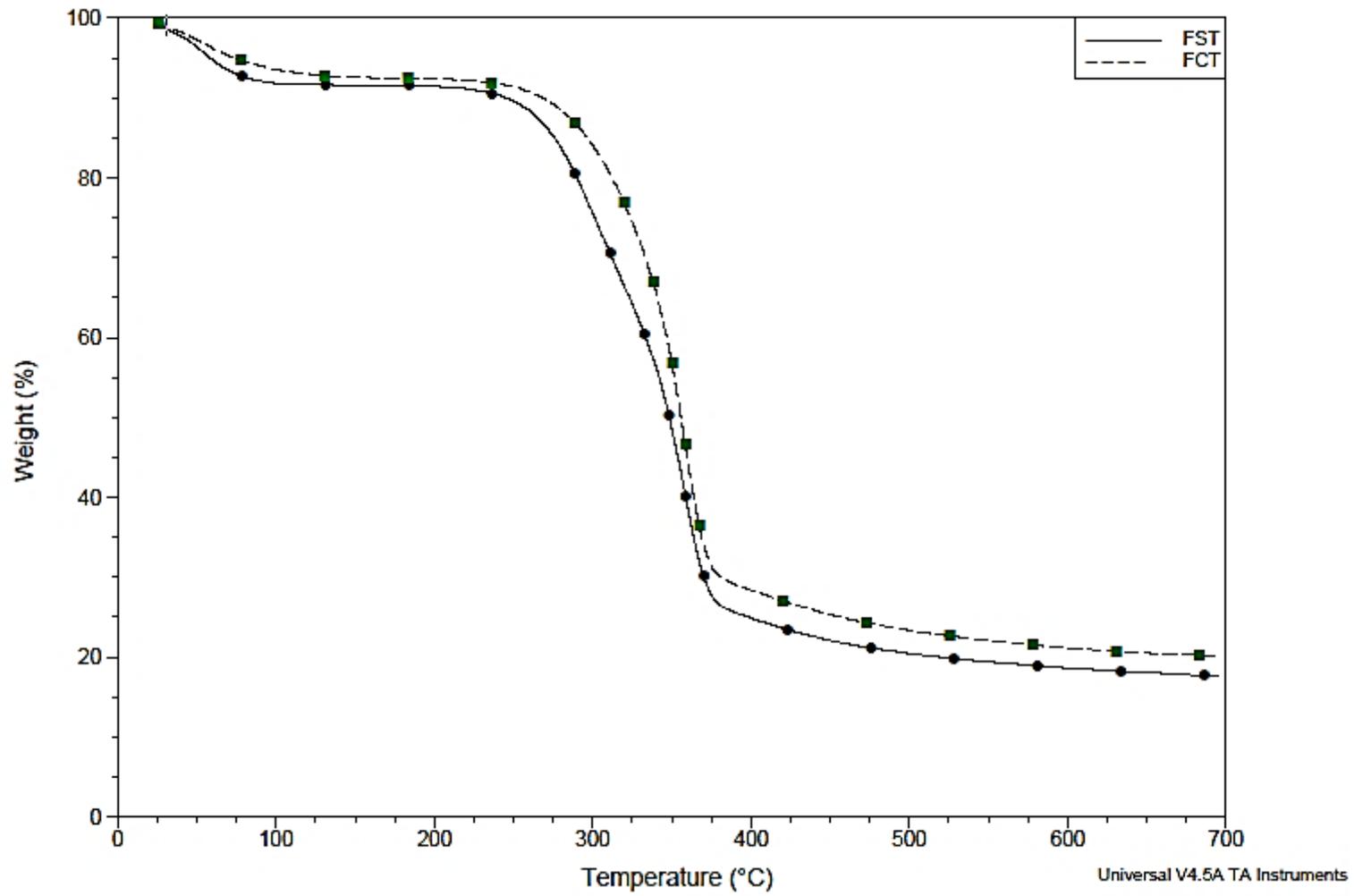


Figura AF.3 Comparación TGA fibras de caña guadúa sin y con tratamiento

Autores: Quevedo & Murillo

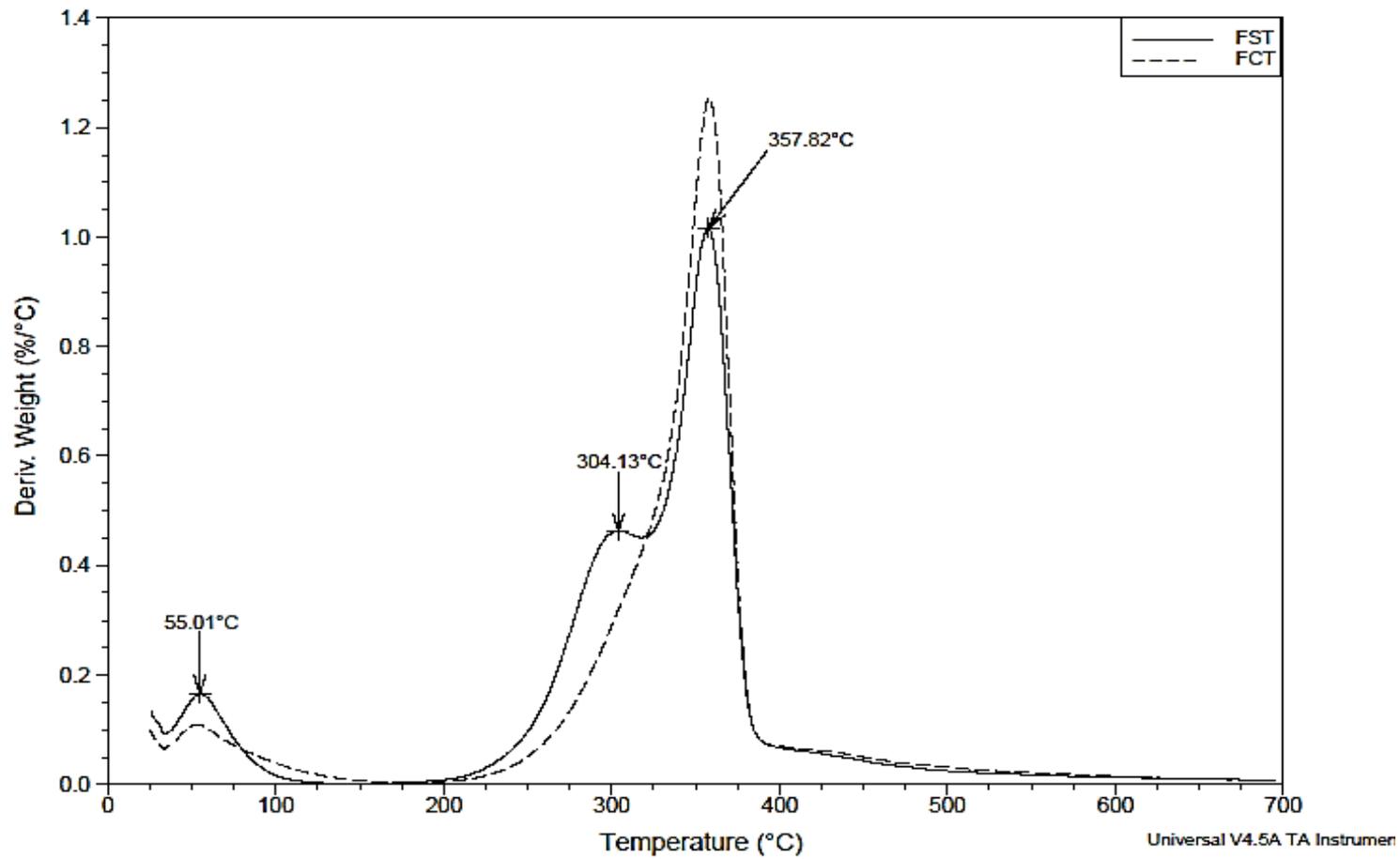


Figura AF.4 Curvas DTG fibras de caña guadúa sin y con tratamiento

Autores: Quevedo & Murillo

Sample: ZEOLITA
Size: 10.1930 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...Desktop\resultados\TGA\ZEOLITA.001
Operator: JC
Run Date: 11-Dec-2018 10:09
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

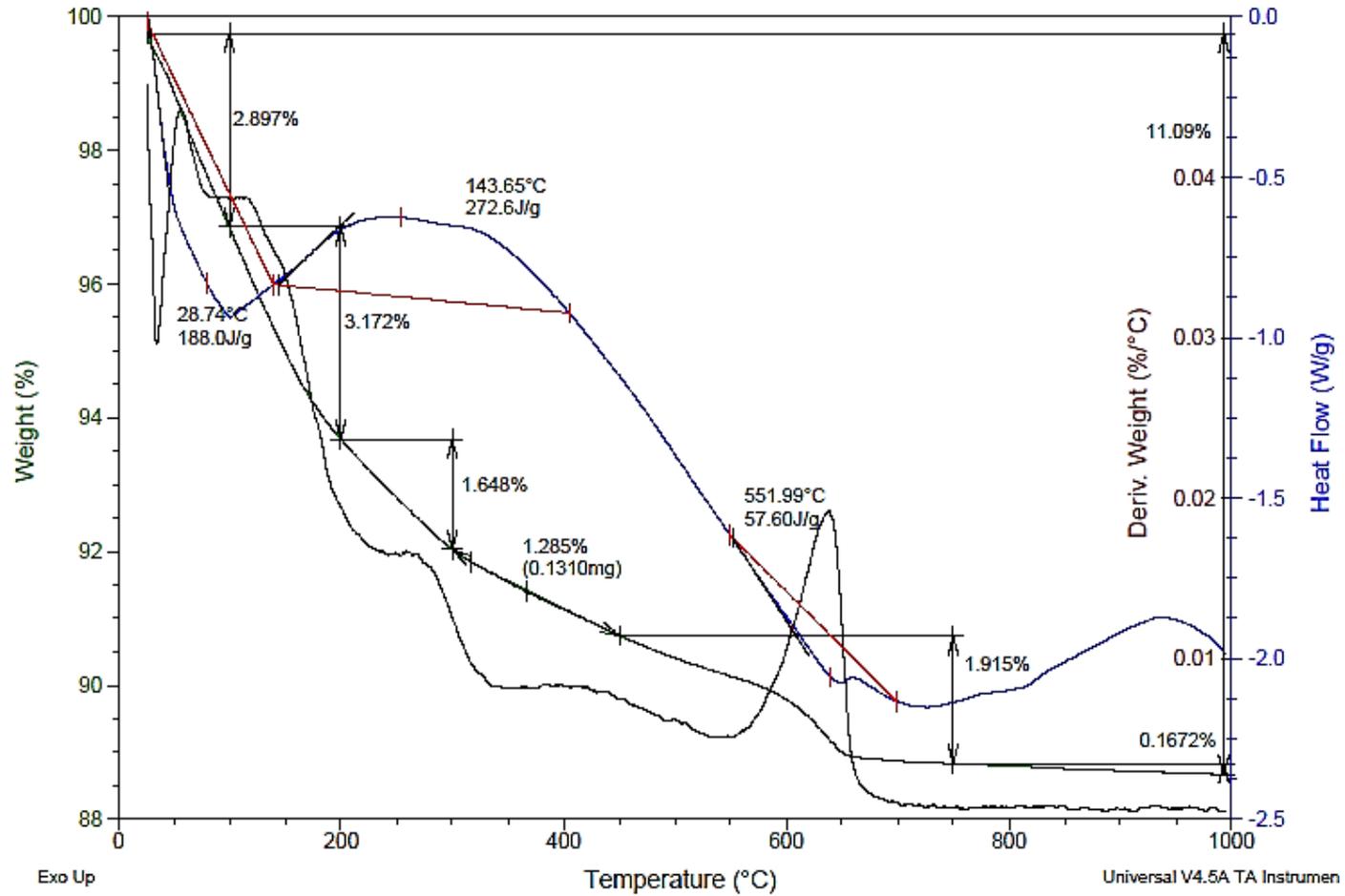


Figura AF.5 Análisis DSC-TGA de la zeolita

Autores: Quevedo & Murillo

Sample: Muestra 0-3
Size: 10.3840 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...resultados\TGAMuestra 0-3.001
Operator: JC
Run Date: 08-Jan-2019 09:46
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

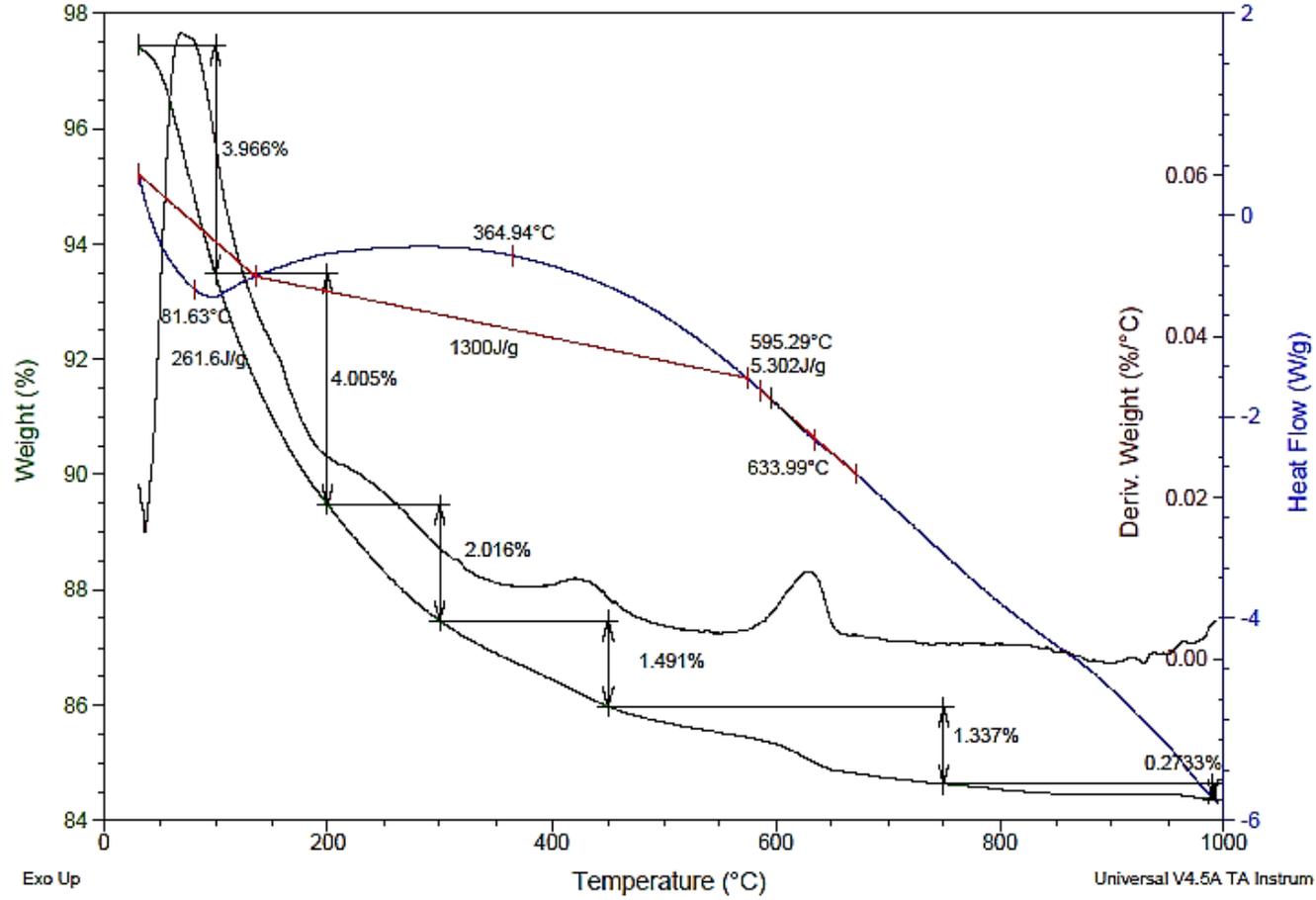


Figura AF.6 Análisis DSC-TGA geopolímero sin reforzamiento

Autores: Quevedo & Murillo

Sample: Muestra 03-1
Size: 10.5520 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...resultados\TGA\Muestra 03-1.002
Operator: JC
Run Date: 08-Jan-2019 13:26
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

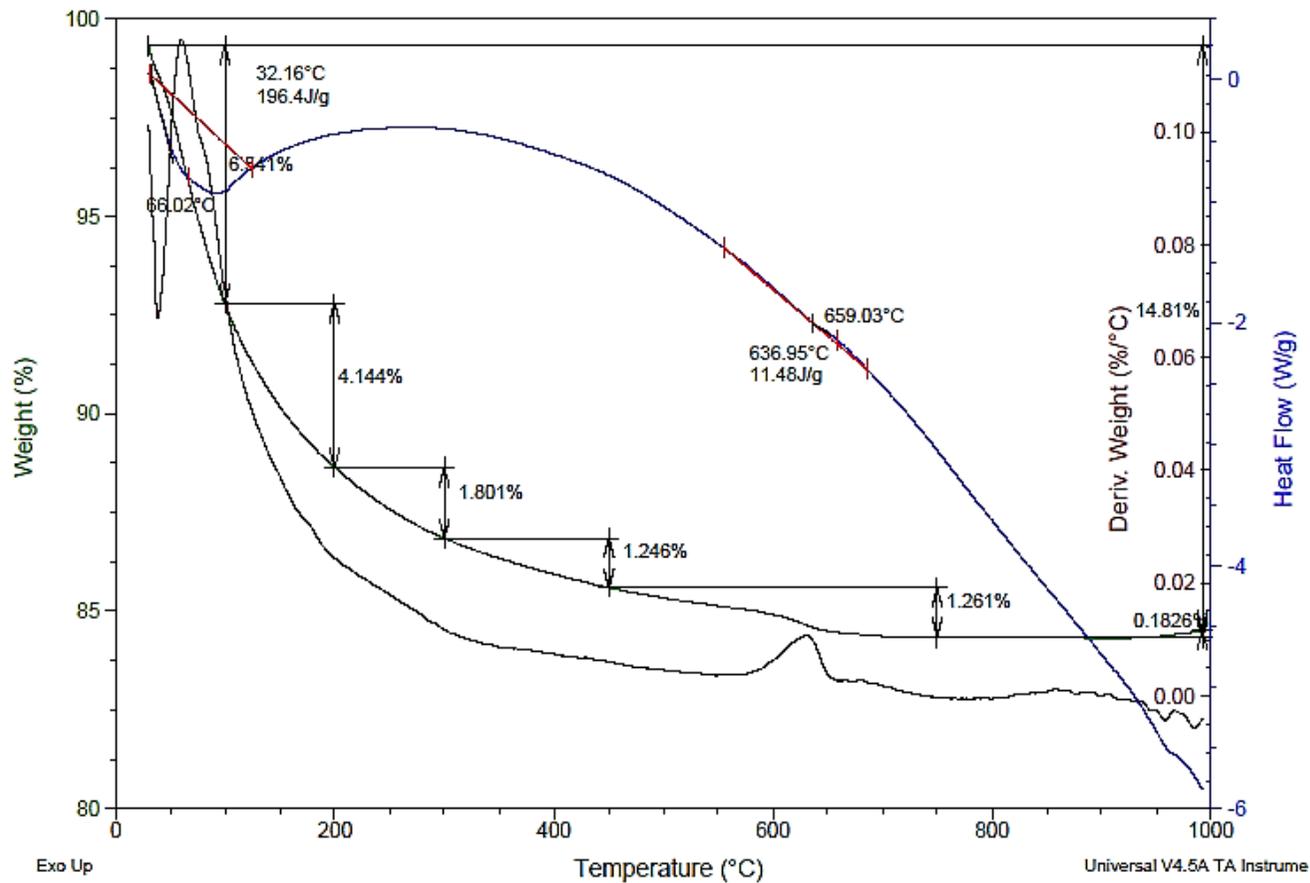


Figura AF.7 Análisis DSC-TGA geopolímero reforzado con 0.3% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

Sample: Muestra 05-3
Size: 10.4730 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...\resultados\TGAMuestra 05-3.001
Operator: JC
Run Date: 09-Jan-2019 09:31
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

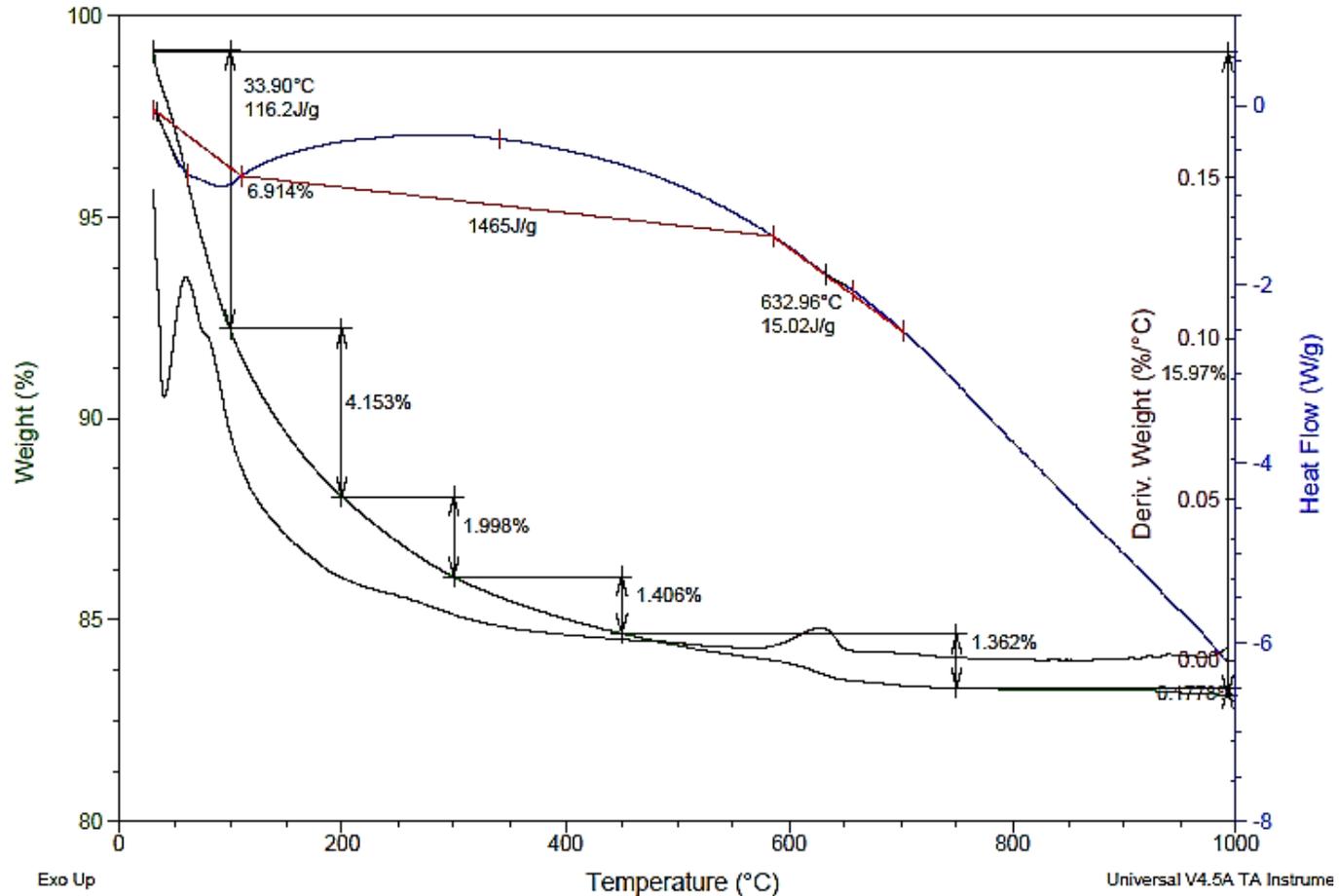


Figura AF.8 Análisis DSC-TGA geopolímero reforzado con 0.5% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

Sample: Muestra 1-2
Size: 10.3900 mg
Method: Apagado

DSC-TGA

File: C:\...resultados\TGA\Muestra 1-2.001
Operator: JC
Run Date: 09-Jan-2019 13:50
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

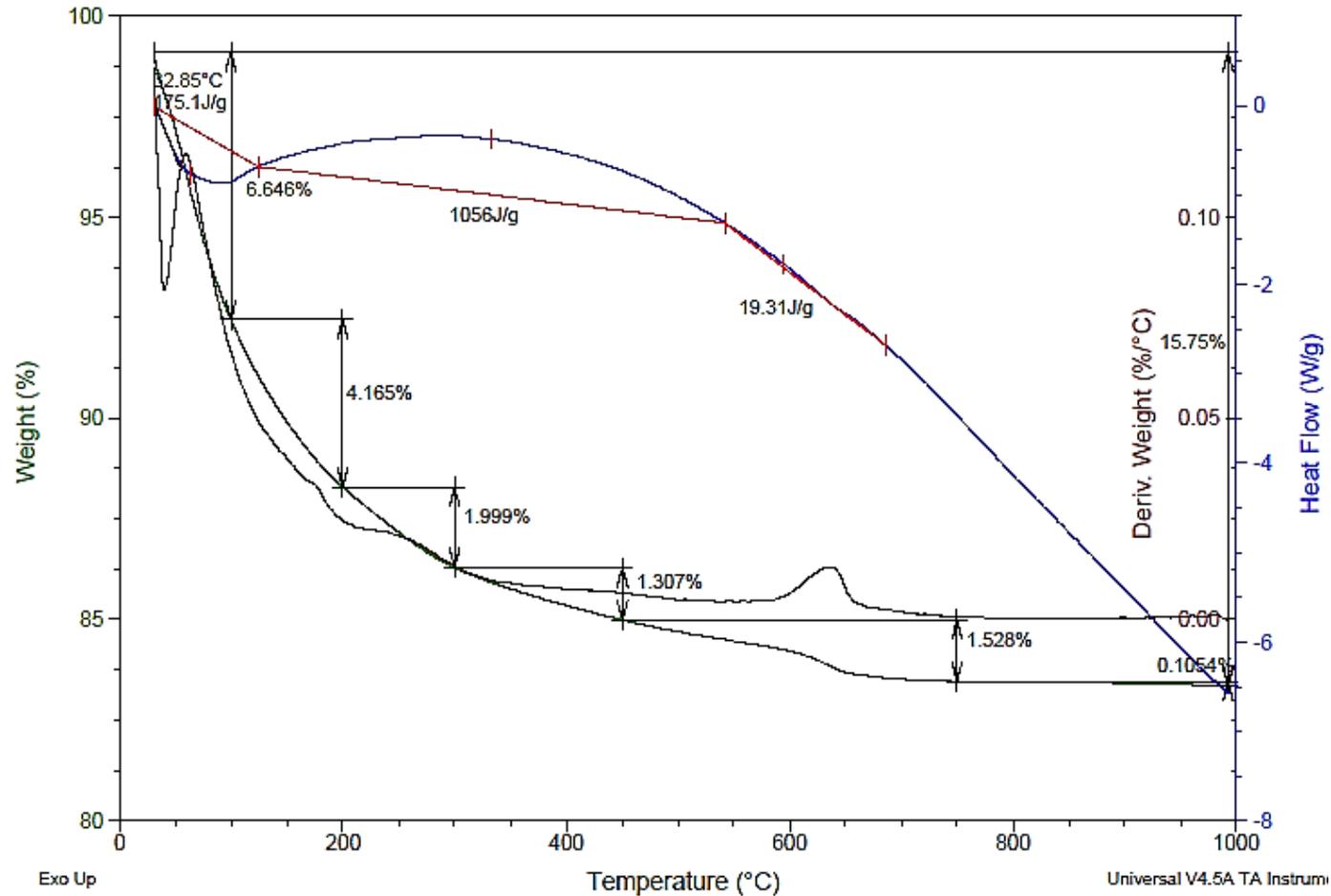


Figura AF.9 Análisis DSC-TGA geopolímero reforzado con 1% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

ANEXO G

SEM-EDAX

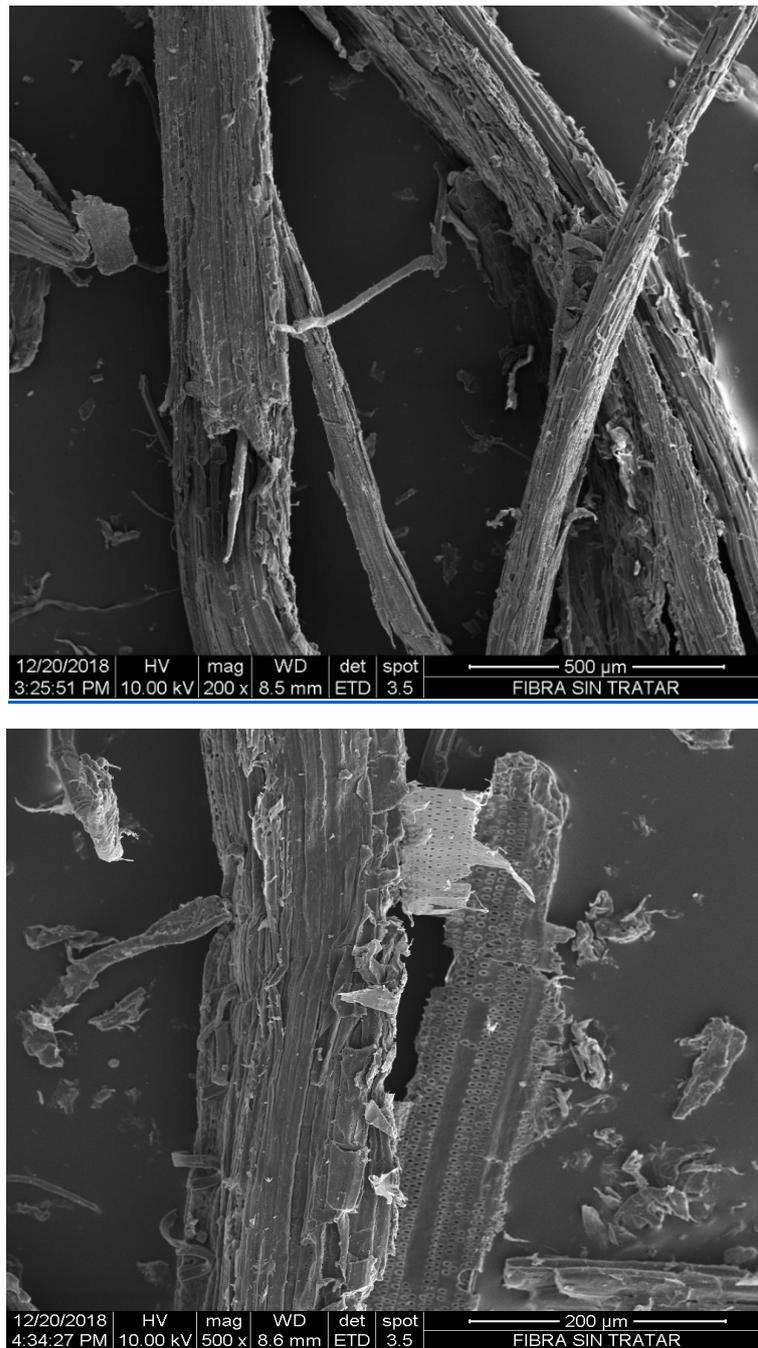


Figura AG.1 Morfología fibras de caña guadúa sin tratamiento alcalino

Autores: Quevedo & Murillo

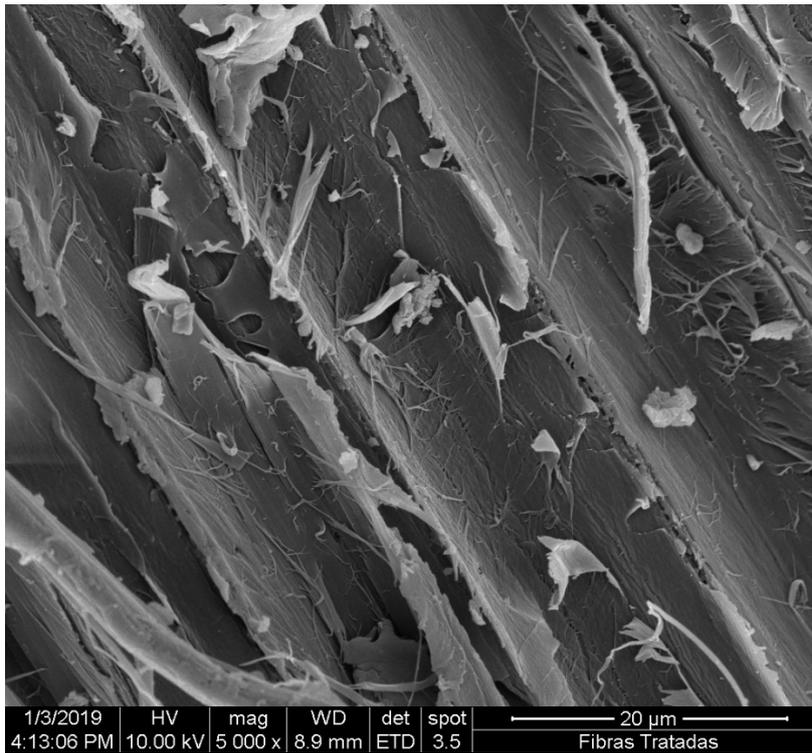
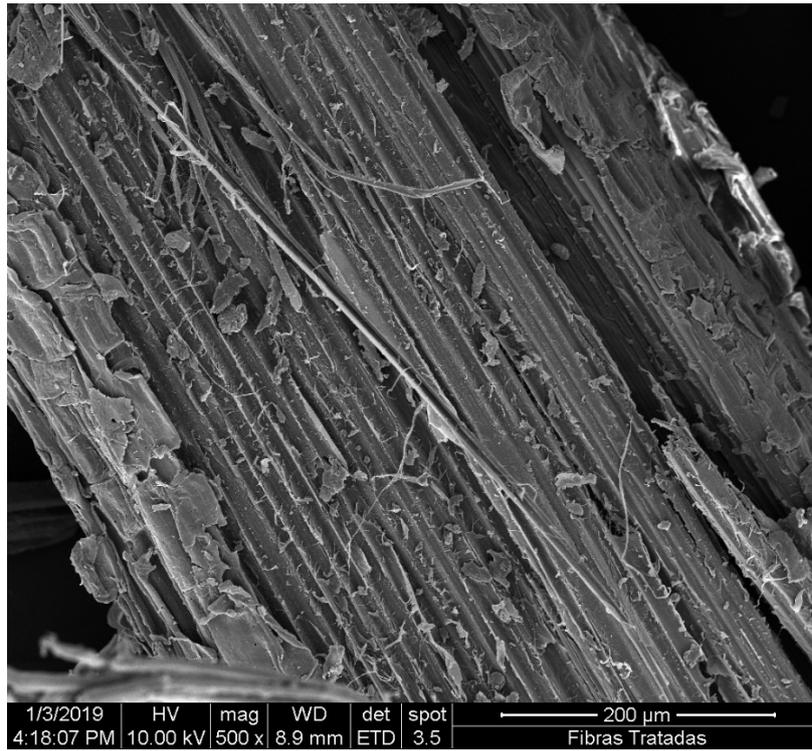


Figura AG.2 Morfología fibras de caña guadúa con tratamiento alcalino

Autores: Quevedo & Murillo

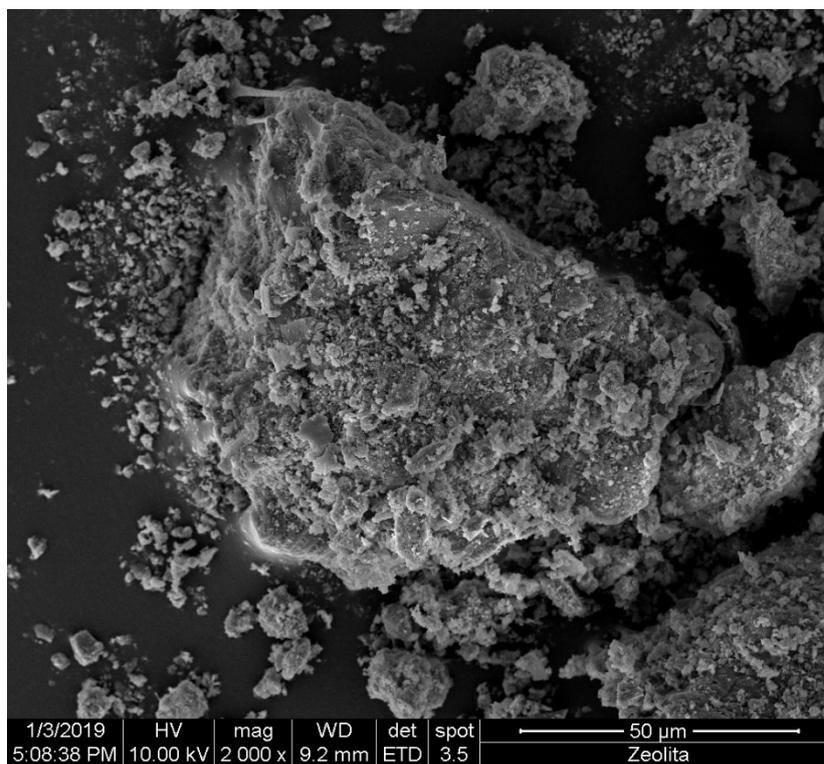
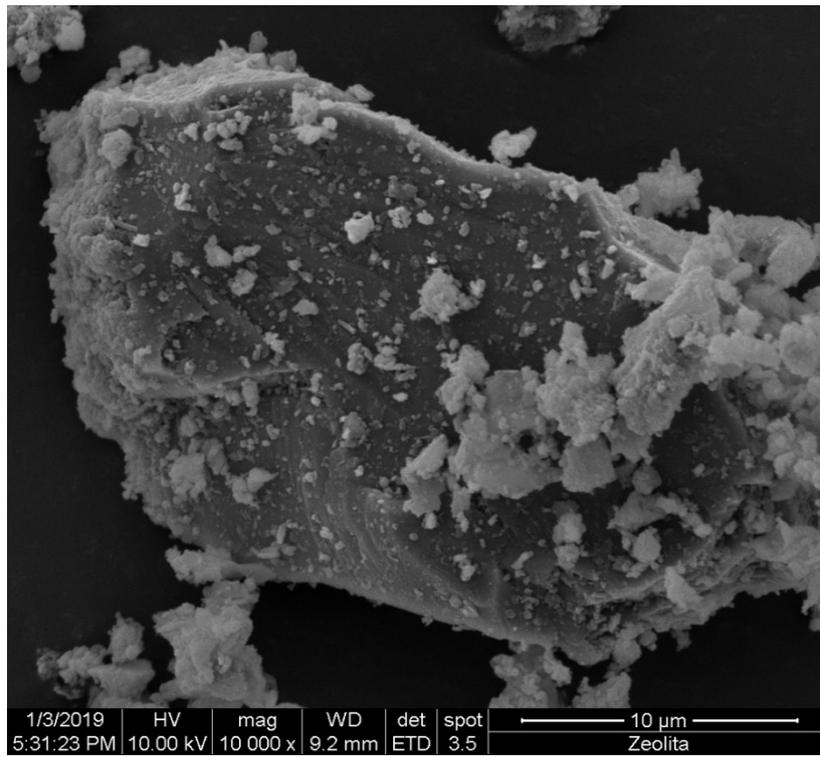


Figura AG.3 Morfología de la zeolita natural

Autores: Quevedo & Murillo

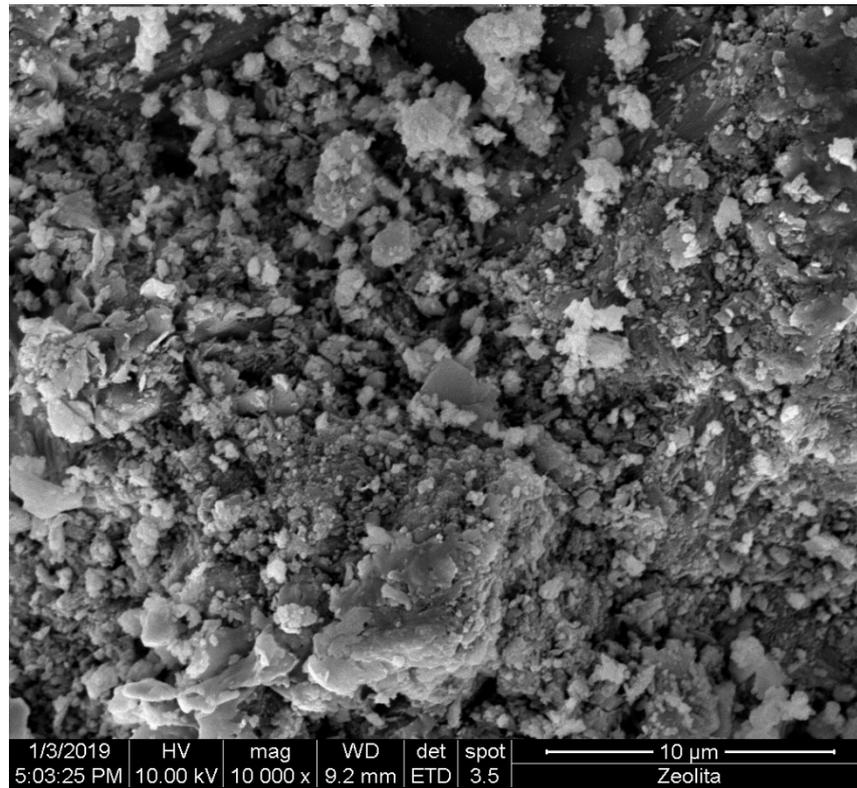
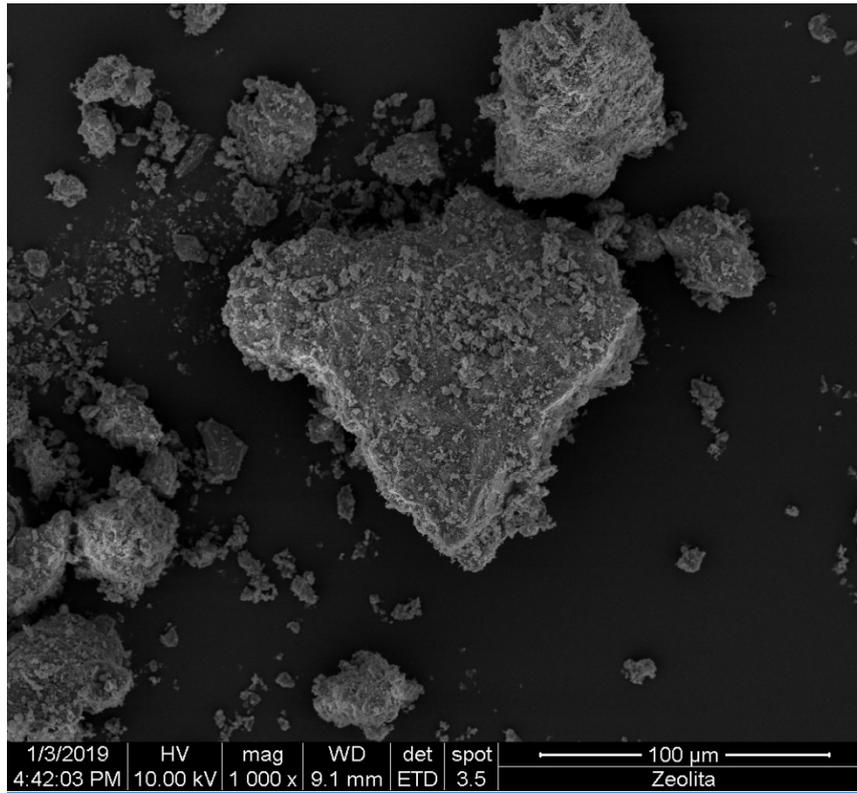


Figura AG.4 Morfología de la zeolita natural

Autores: Quevedo & Murillo

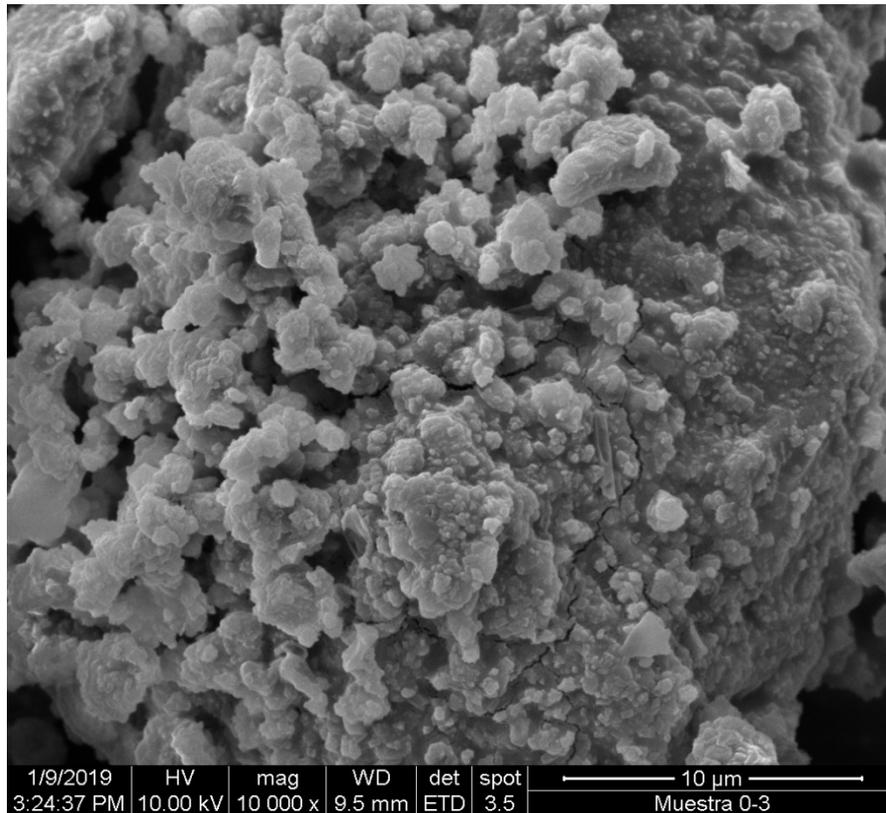
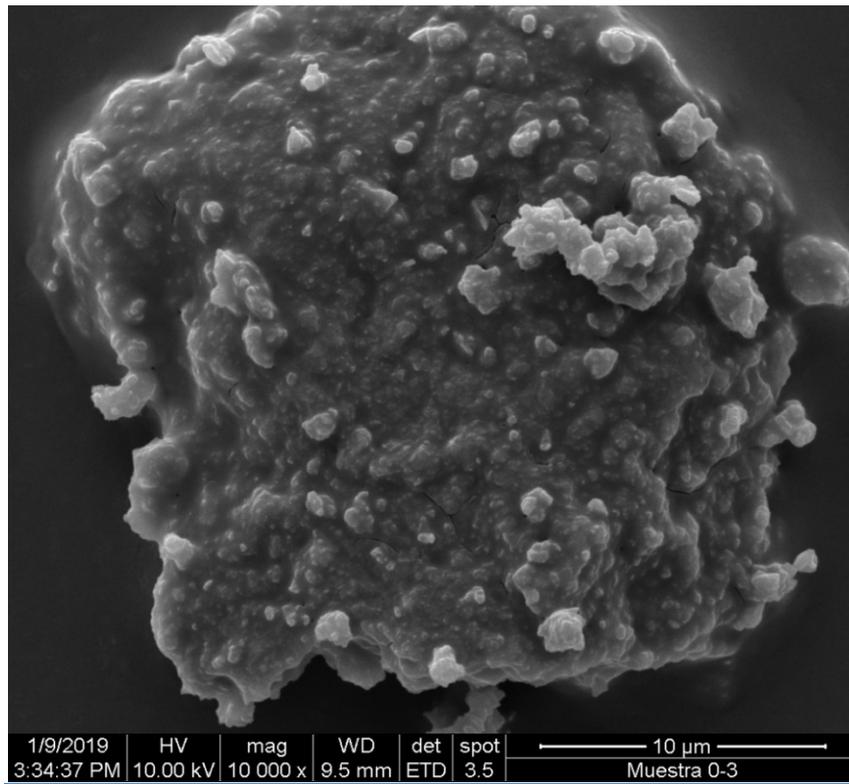


Figura AG.5 Morfología geopolímero sin reforzamiento

Autores: Quevedo & Murillo

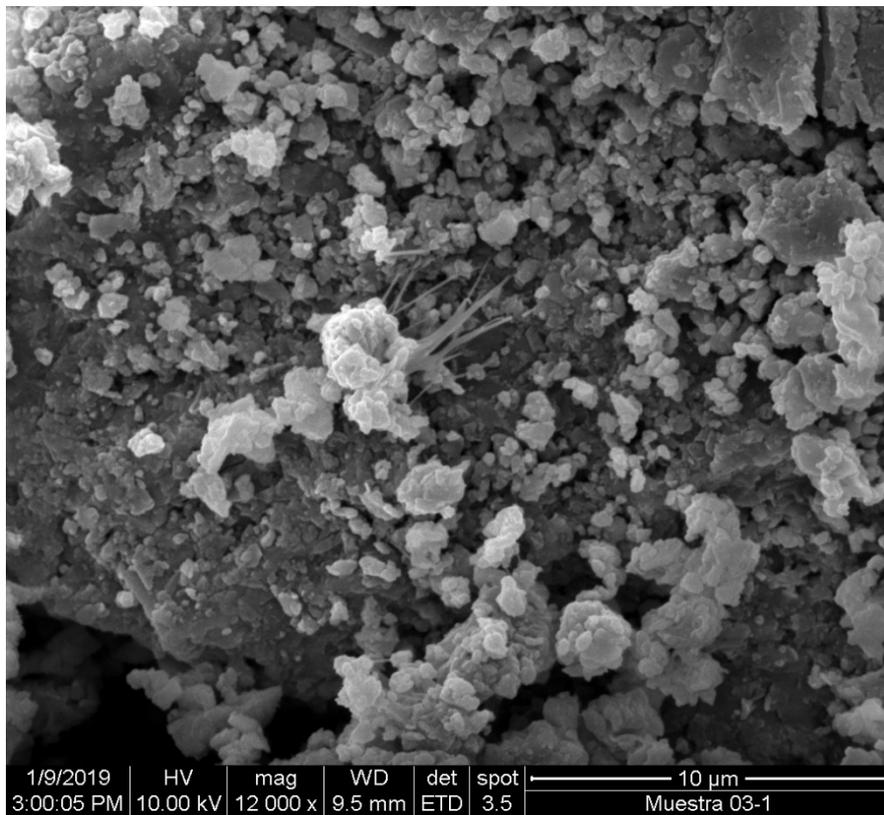
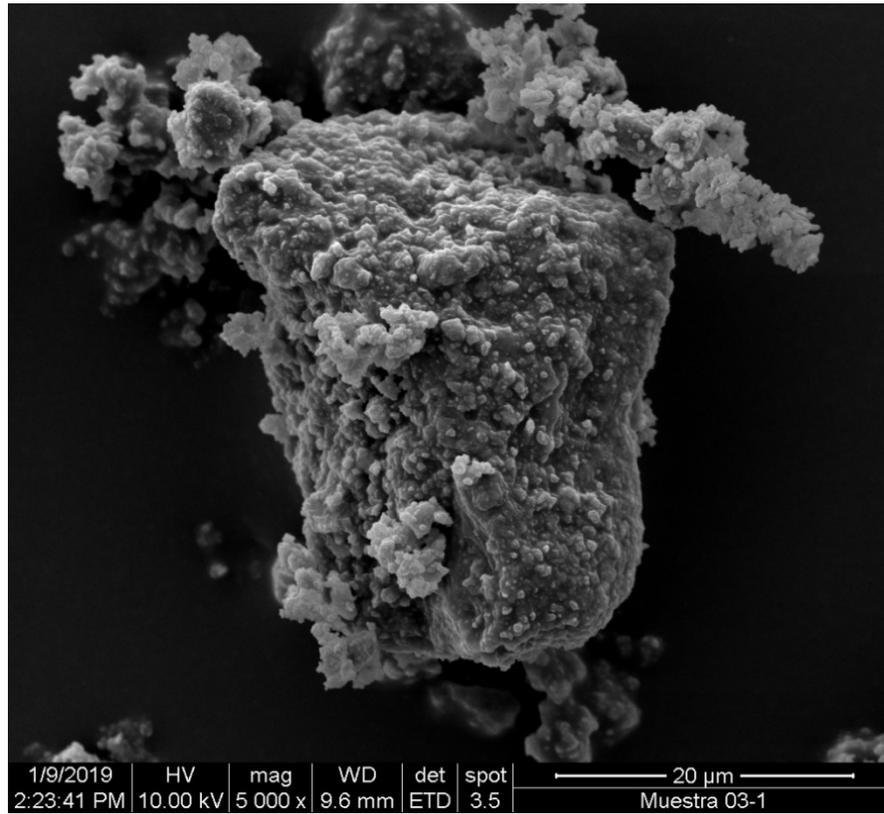


Figura AG.6 Morfología geopolímero reforzado con 0.3% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

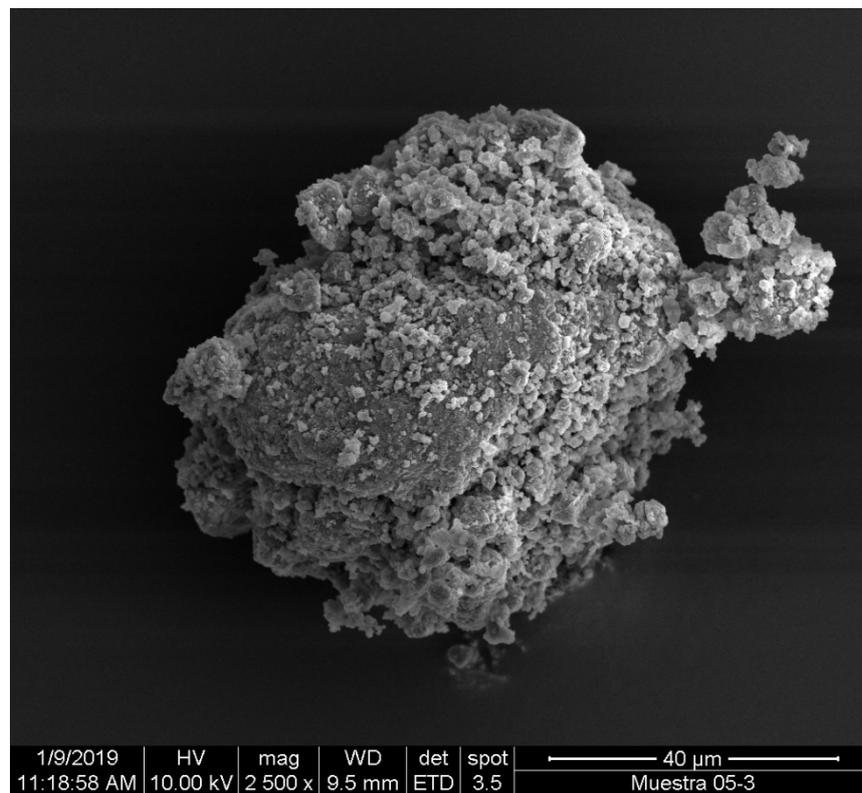
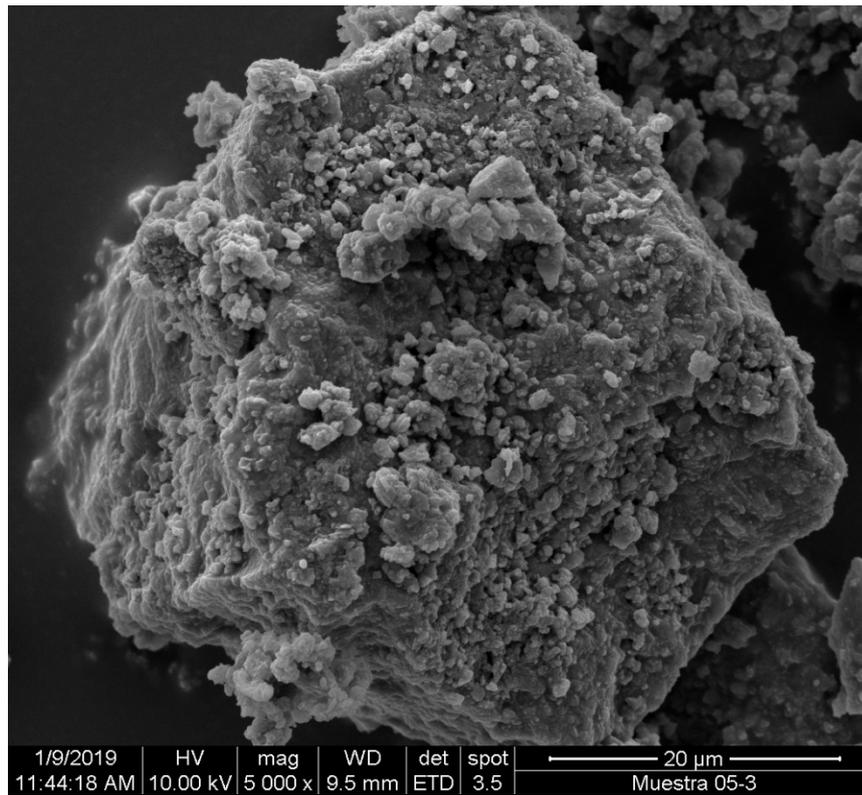


Figura AG.7 Morfología geopolímero reforzado con 0.5% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

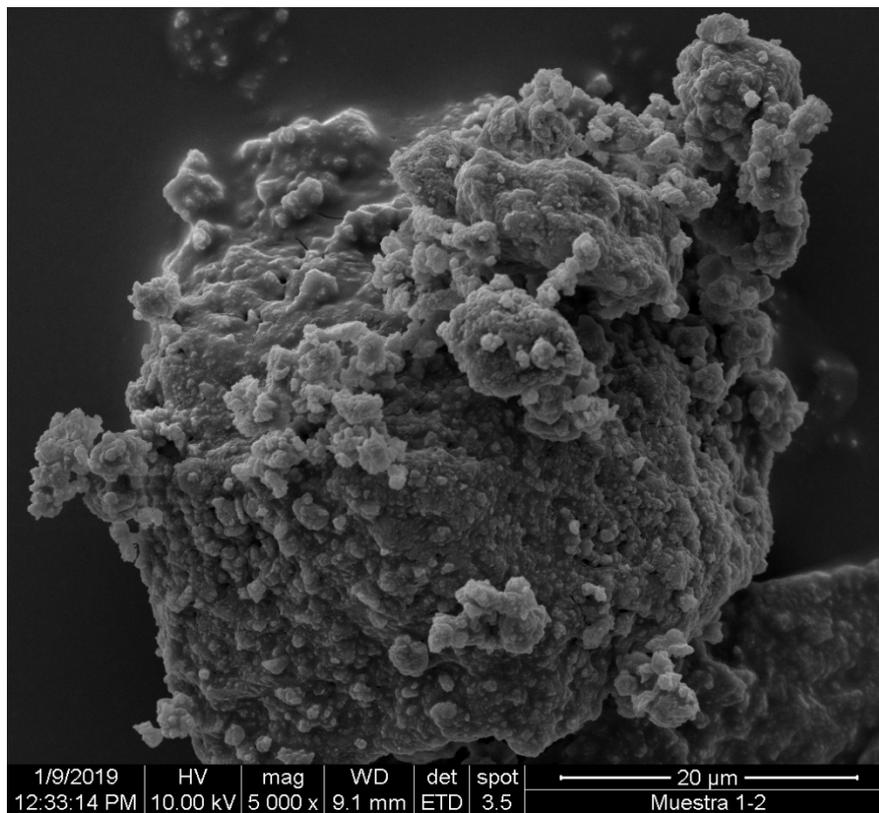
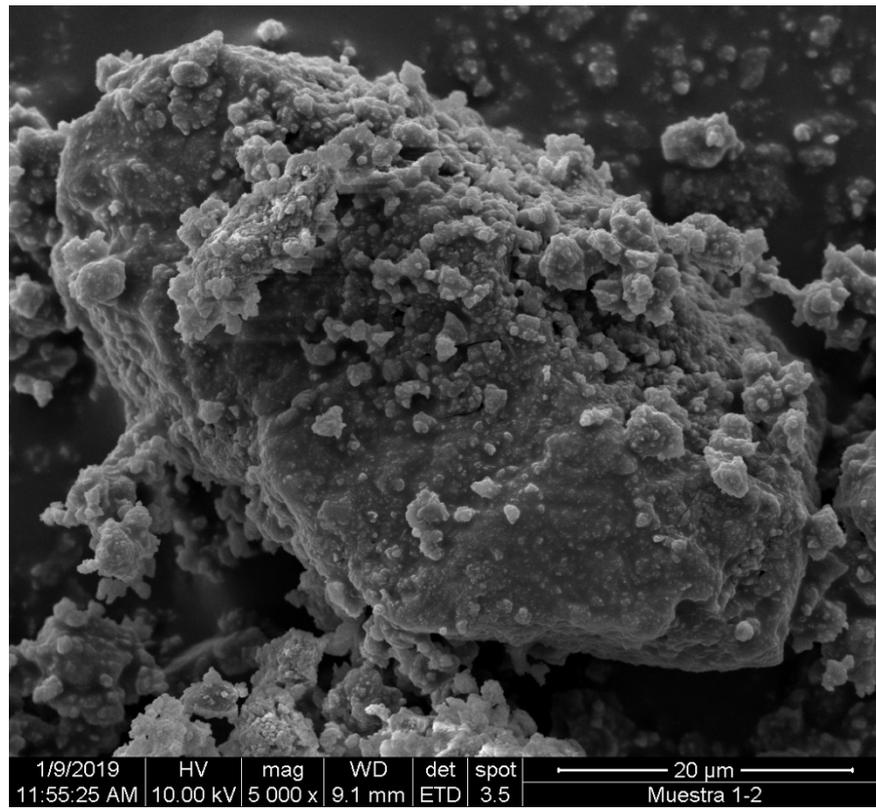
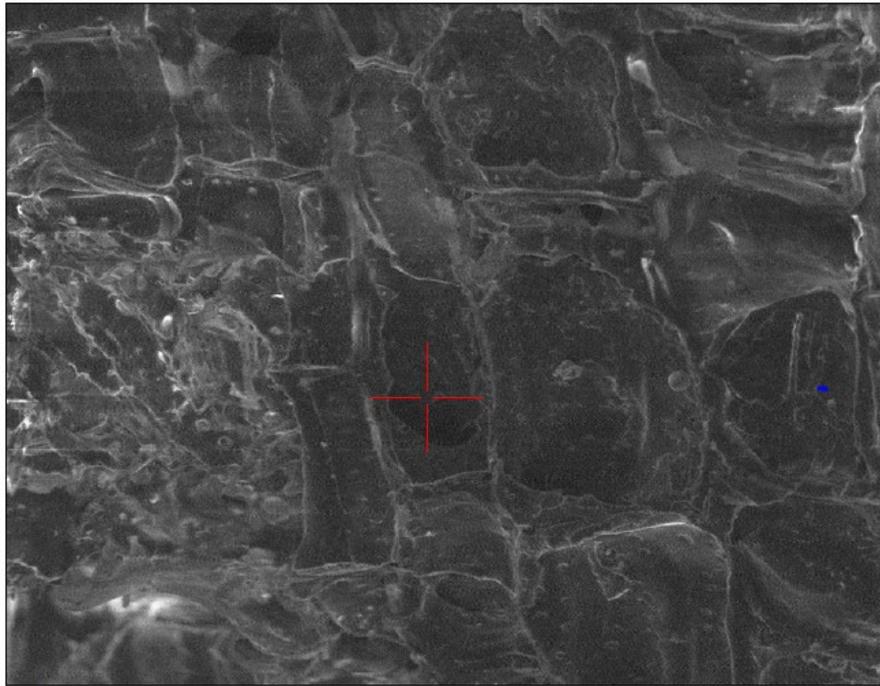


Figura AG.8 Morfología geopolímero reforzado con 1% FCG

Autores: Quevedo & Murillo



EDS Quantitative Results		
Element	Wt%	At%
CK	85.06	90.06
OK	9.49	7.54
NaK	0.12	0.07
MgK	0.25	0.13
AlK	1.71	0.81
SiK	2.44	1.11
CaK	0.92	0.29

SE1

20um

1450x

D:\2018\DR HACI\GP-BAMBU\SIN TRATAMIENTO\F-SINTRATAMIENTO-TEST3-PUNTO2.SPC

kV:10.0 Tilt:0.00 Tkoff:31.64 Reso:130.96 Amp.T:25.6

FS : 5002 LSec : 46.9 Prst:50C 19-Dec-2018 15:21:54

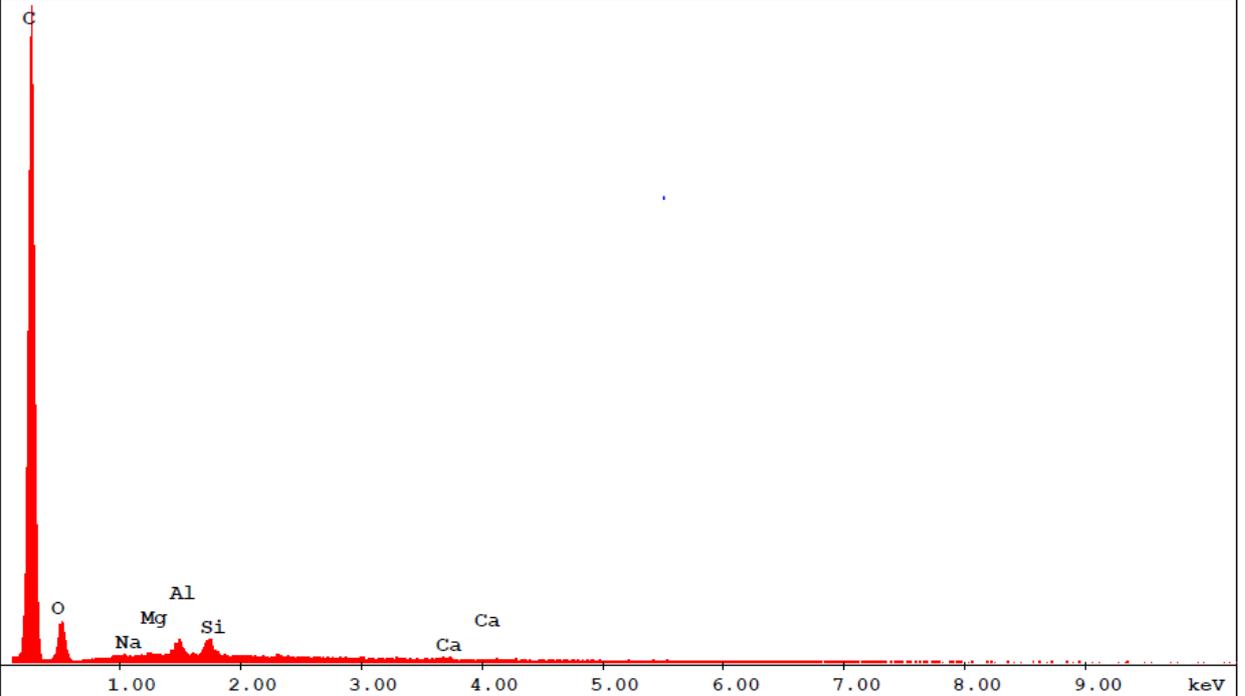
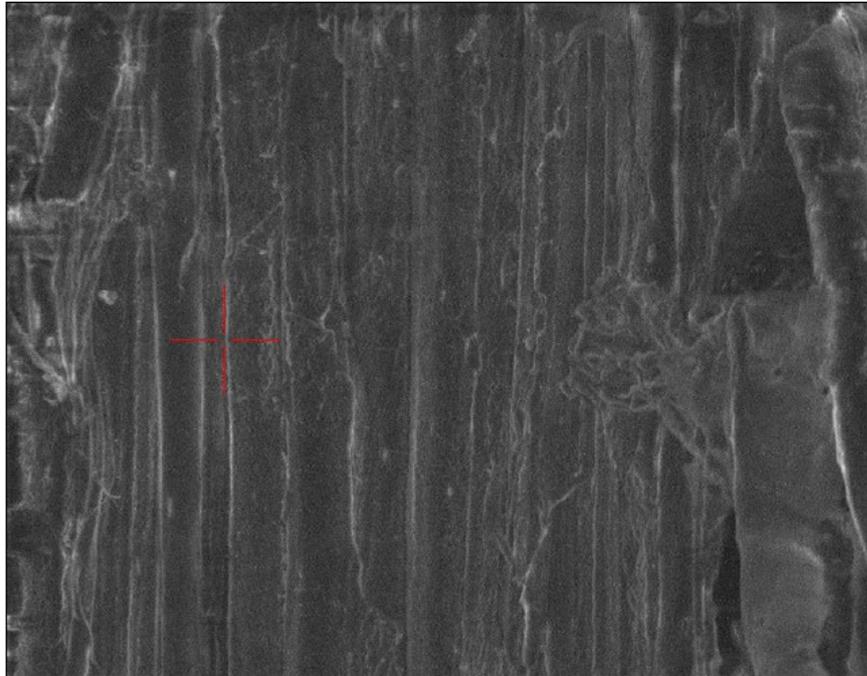


Figura AG.9 Resultado EDAX fibras de caña guadúa sin tratamiento

Autores: Quevedo & Murillo



EDS Quantitative Results		
Element	Wt%	At%
CK	71.07	81.13
OK	15.09	12.93
NaK	0.12	0.07
MgK	0.35	0.20
AlK	5.18	2.63
SiK	1.58	0.77
CaK	6.61	2.26

D:\2018\DR HACI\GP-BAMBU\CON TRATAMIENTO\F-CON TRATAMIENTO-TEST1-PUNTO3.SPC

kV:15.0 Tilt:0.00 Tkoff:31.93 Reso:130.96 Amp.T:25.6
 FS : 1054 LSec : 46.4 Prst:50C 19-Dec-2018 15:37:22

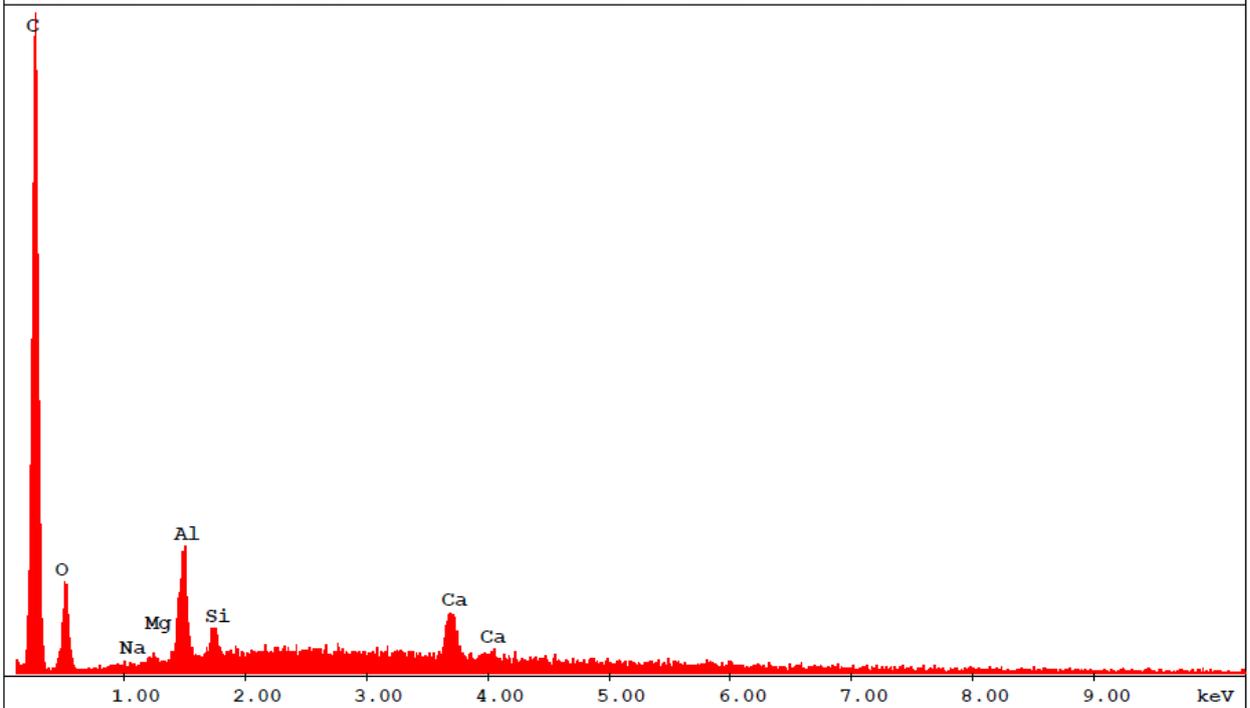
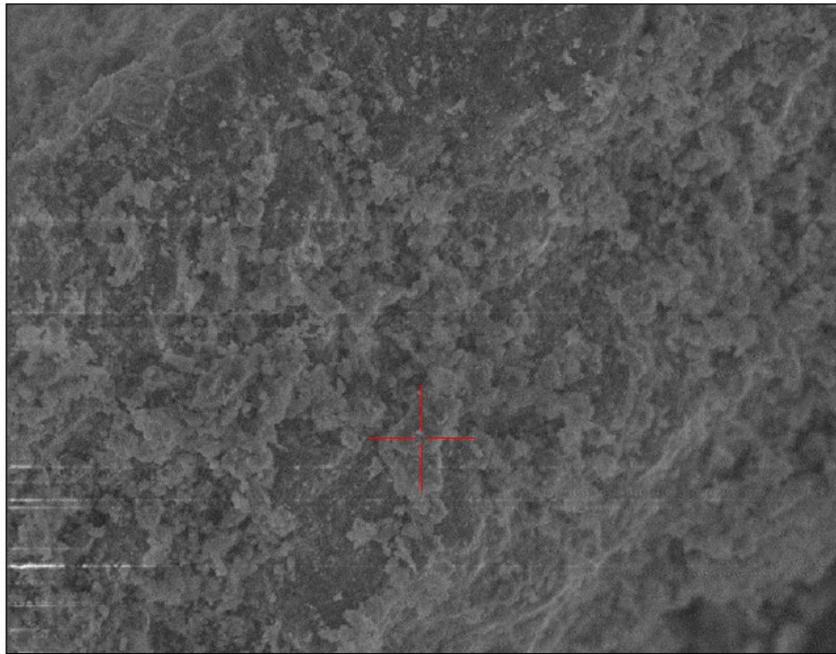


Figura AG.10 Resultado EDAX fibras de caña guadua con tratamiento

Autores: Quevedo & Murillo



EDS Quantitative Results		
Element	Wt%	At%
CK	3.87	7.43
OK	25.05	36.10
NaK	0.35	0.35
MgK	0.88	0.84
AlK	9.35	7.99
SiK	52.83	43.37
KK	0.39	0.23
CaK	4.21	2.42
FeK	3.08	1.27

SE1 10um 1982x

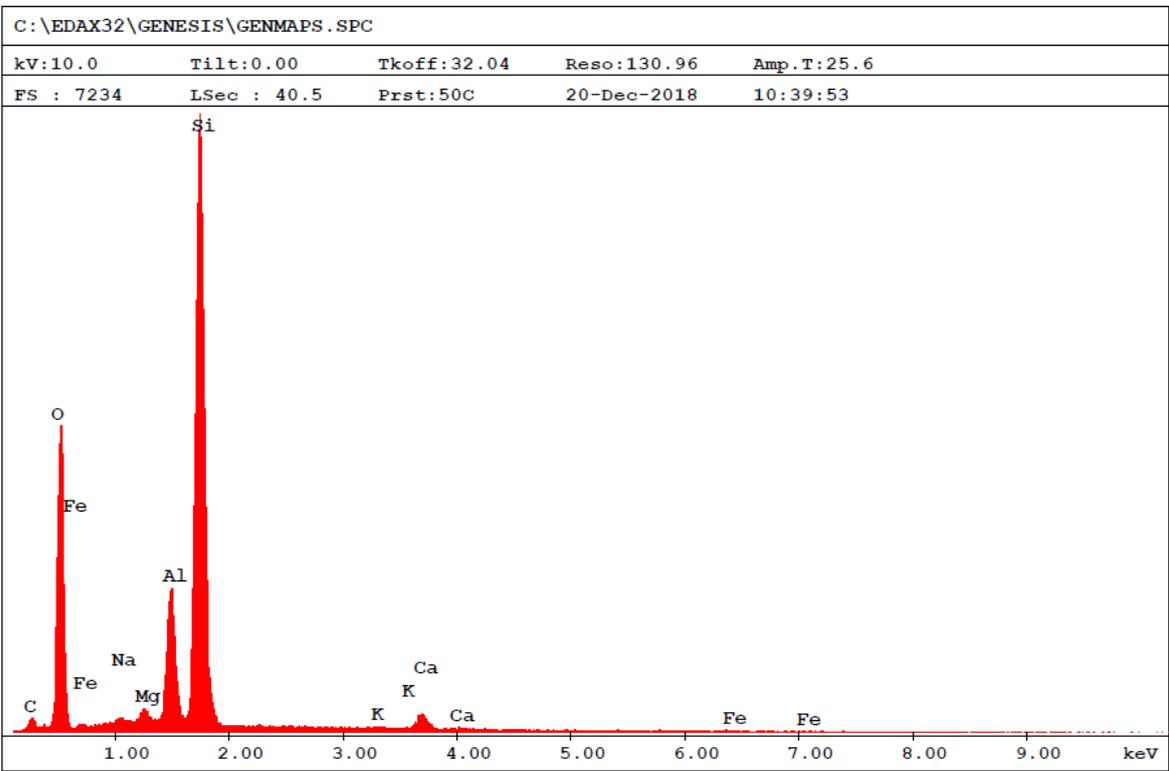


Figura AG.11 Resultado EDAX zeolita

Autores: Quevedo & Murillo

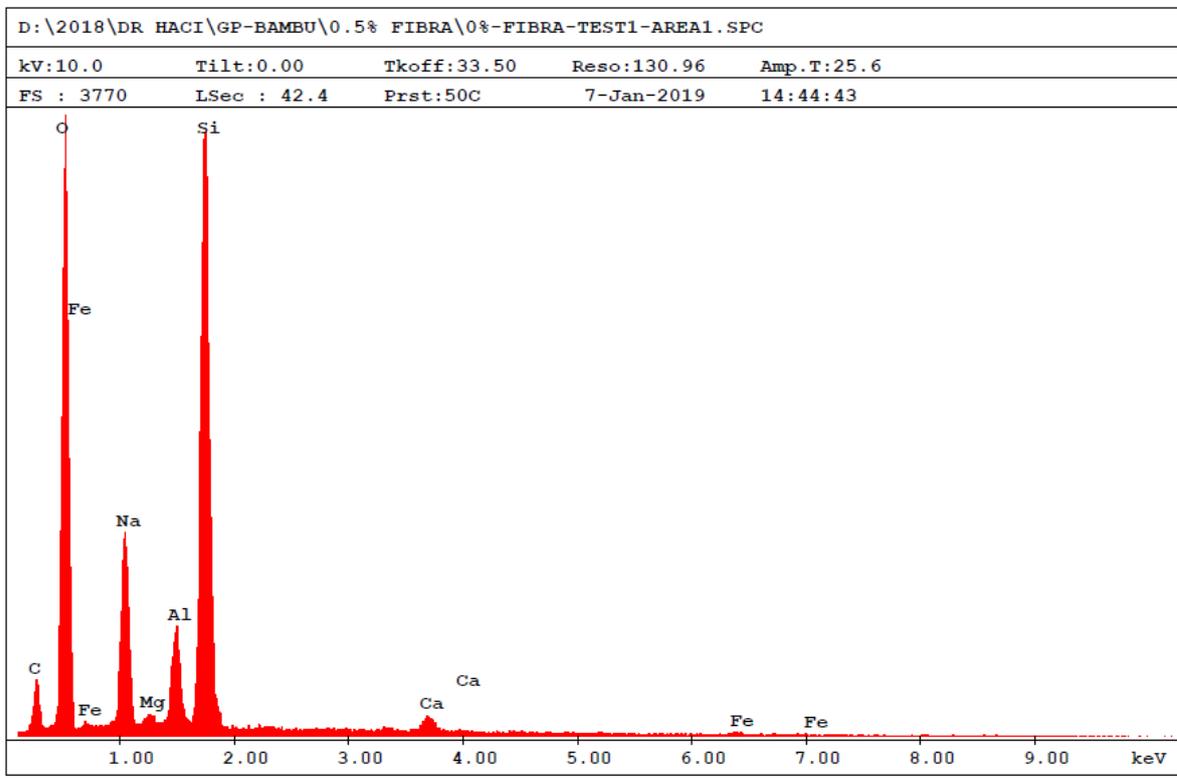
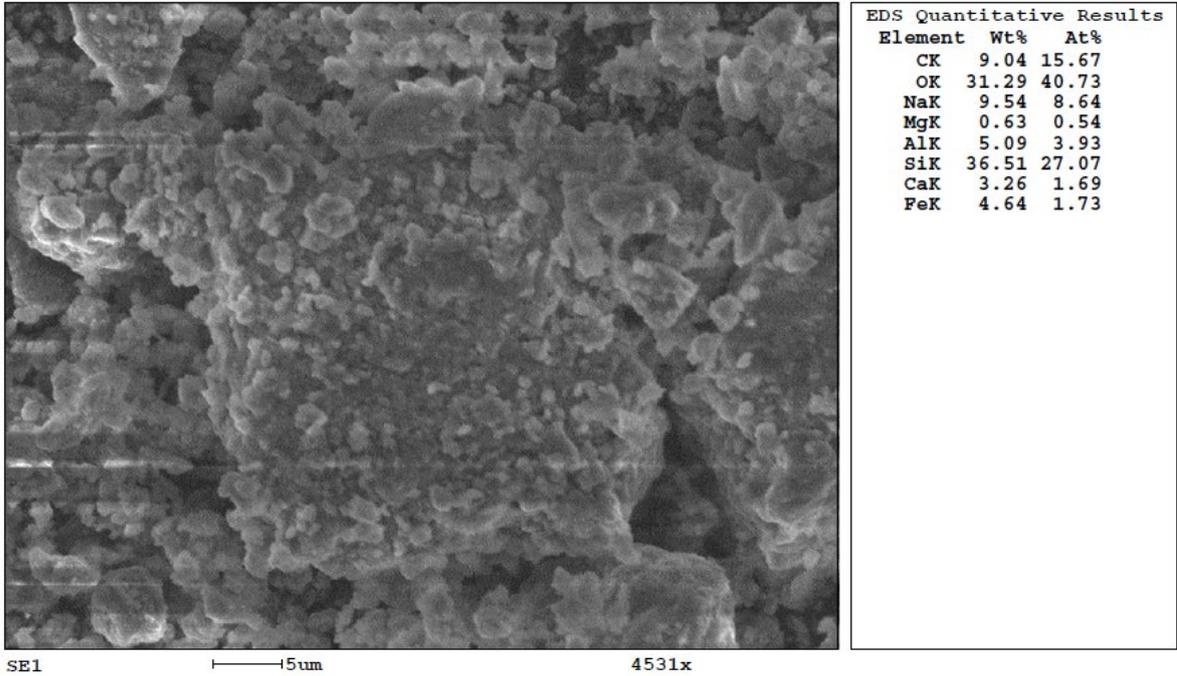
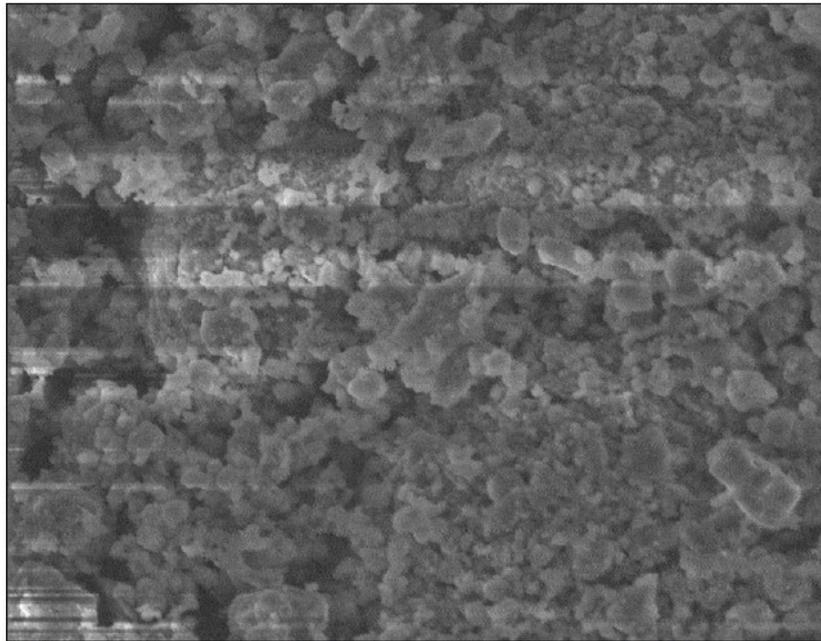


Figura AG.12 Resultado EDAX geopolímero sin reforzamiento

Autores: Quevedo & Murillo



EDS Quantitative Results		
Element	Wt%	At%
CK	7.38	13.25
OK	29.47	39.72
NaK	7.73	7.25
MgK	0.60	0.53
AlK	5.86	4.68
SiK	39.64	30.43
CaK	3.52	1.90
FeK	5.81	2.24

SE1 5um 4531x

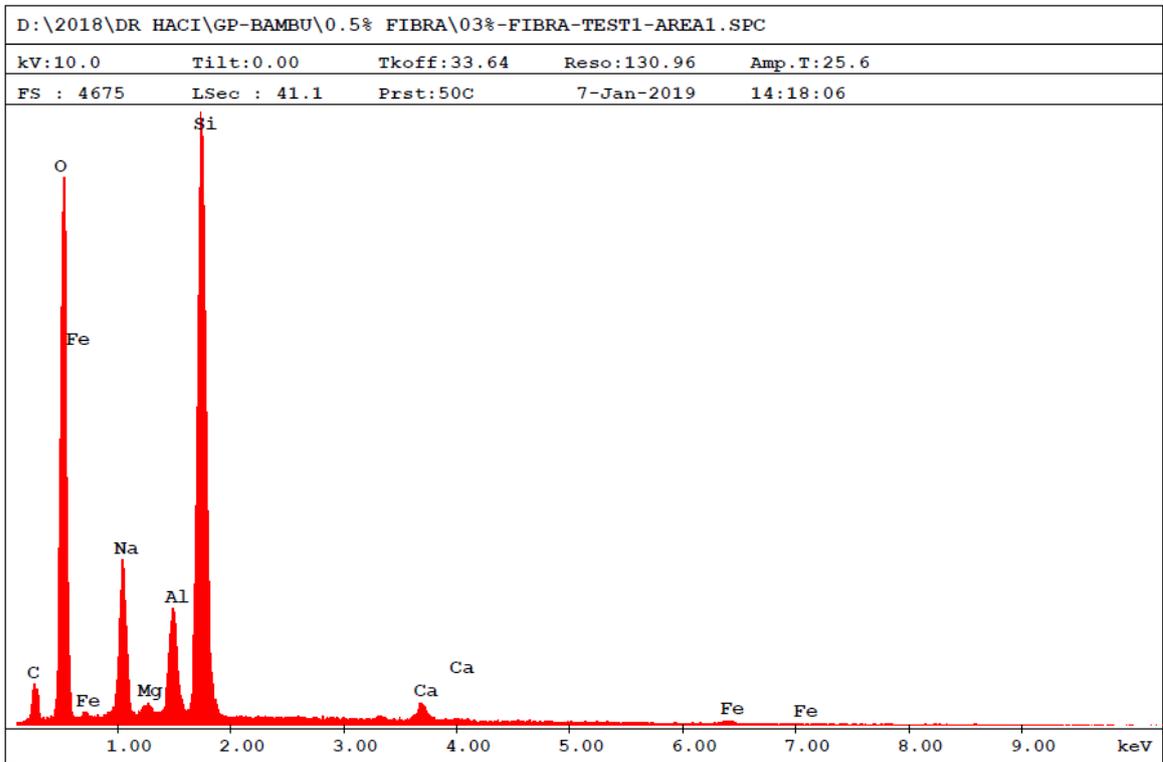
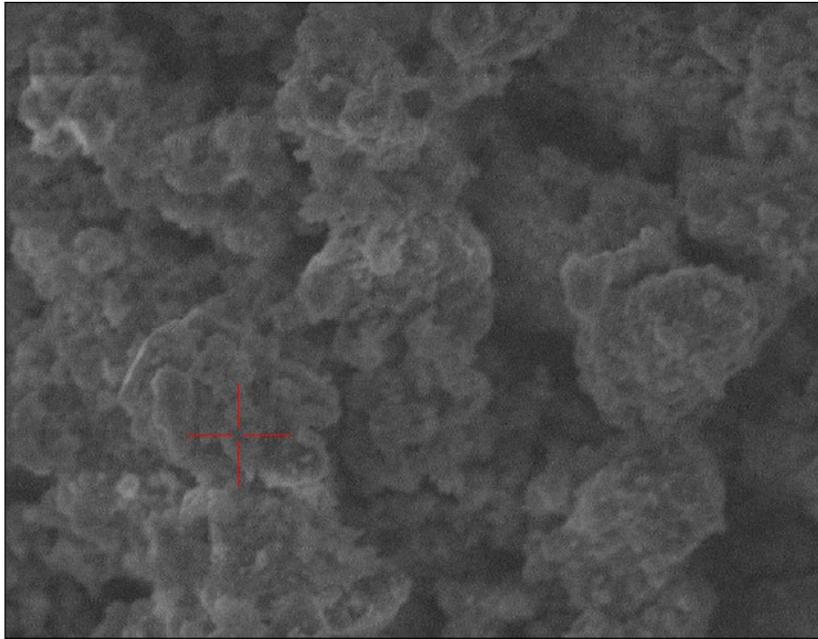


Figura AG.13 Resultado EDAX geopolimero reforzado con 0.3% FCG

Autores: Quevedo & Murillo



EDS Quantitative Results		
Element	Wt%	At%
CK	6.31	11.12
OK	33.89	44.81
NaK	8.34	7.67
MgK	0.63	0.55
AlK	4.92	3.86
SiK	37.46	28.22
CaK	3.83	2.02
FeK	4.61	1.75

SE1 5um 4531x

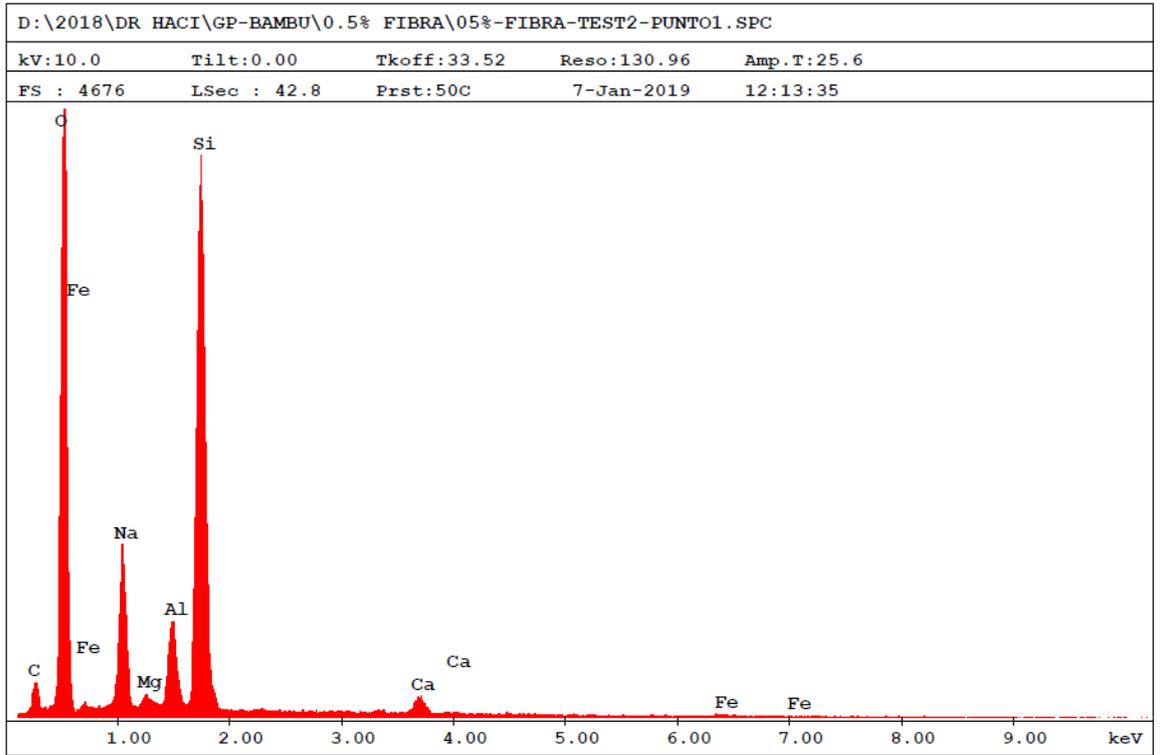


Figura AG.14 Resultado EDAX geopolímero reforzado con 0.5% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

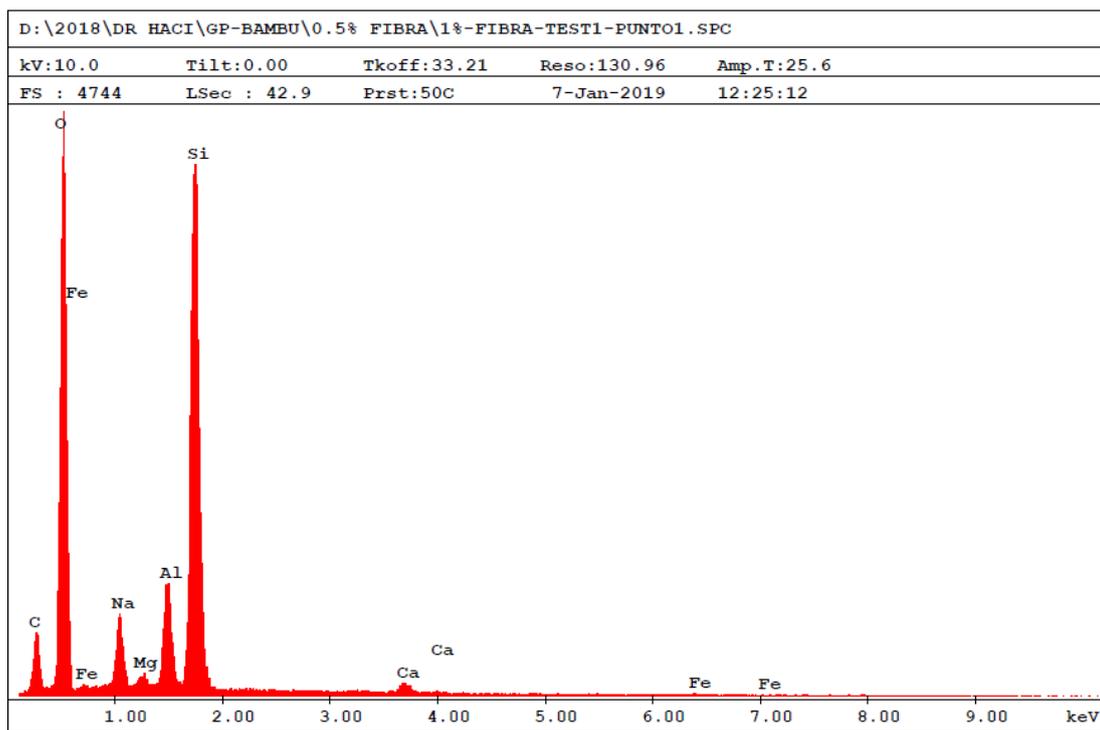
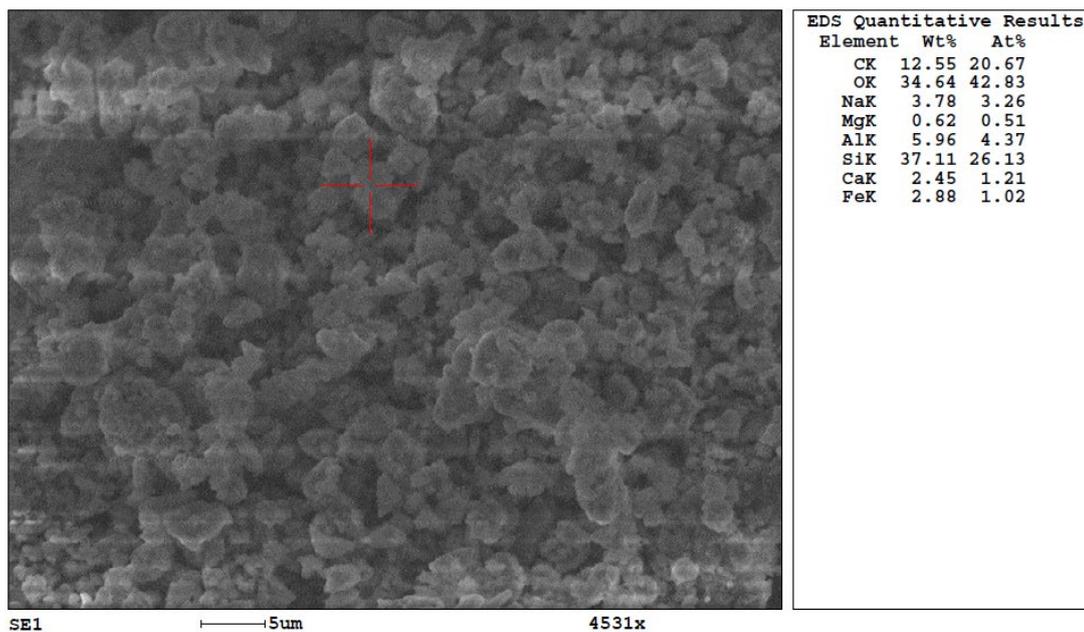


Figura AG.15 Resultado EDAX geopolímero reforzado con 1% FCG

Autores: Quevedo & Murillo

