

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto

**MATERIALES COMPUESTOS GEOPOLIMÉRICOS REFORZADOS CON
TEJIDOS DE FIBRAS NATURALES USADOS EN INGENIERÍA CIVIL**

Autor(es):

Broncano Yambay Jonathan Mauricio

Córdova Lascano Leonardo Javier

Tutor:

Ing. Oscar Cevallos V. PhD

Riobamba – Ecuador

Año 2021

REVISIÓN

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **“MATERIALES COMPUESTOS GEOPOLIMÉRICOS REFORZADOS CON TEJIDOS DE FIBRAS NATURALES USADOS EN INGENIERÍA CIVIL”** presentado por Broncano Yambay Jonathan Mauricio - Córdova Lascano Leonardo Javier y dirigida por: Ing. Oscar Cevallos V. PhD. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Oscar Cevallos V. PhD



Firmado electrónicamente por:
**OSCAR ALFREDO
CEVALLOS
VELASQUEZ**

Director del Proyecto

Firma

Ing. Javier Palacios, MSc.



Firmado electrónicamente por:
0501325476 MARCO
**JAVIER PALACIOS
CARVAJAL**

Miembro del Tribunal

Firma

Ing. Alexis Andrade, MSc.

**ALEXIS IVAN
ANDRADE VALLE**

Firmado digitalmente por
ALEXIS IVAN ANDRADE VALLE
Fecha: 2021.04.03 16:15:21
-05'00'

Miembro del Tribunal

Firma

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Ing. Oscar Cevallos V. PhD**, en calidad de Tutor de Tesis que lleva como título: **“MATERIALES COMPUESTOS GEOPOLIMÉRICOS REFORZADOS CON TEJIDOS DE FIBRAS NATURALES USADOS EN INGENIERÍA CIVIL”**, CERTIFICO; que el informe final del trabajo investigativo, ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo a los Señores Broncano Yambay Jonathan Mauricio y Córdova Lascano Leonardo Javier para que se presente ante el tribunal de defensa respectivo para que se lleve a cabo la sustentación de su Tesis.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**OSCAR ALFREDO
CEVALLOS
VELASQUEZ**

.....
Ing. Oscar Cevallos V. PhD

TUTOR DE TESIS

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación corresponde exclusivamente a: Broncano Yambay Jonathan Mauricio, Córdova Lascano Leonardo Javier e Ing. Oscar Cevallos V. PhD. y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



.....
Sr. Broncano Yambay Jonathan Mauricio

C.I. 060437691-3



.....
Sr. Córdova Lascano Leonardo Javier

C.I. 180480916-6

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos salud y vida en medio de una pandemia mundial a cada uno de nosotros y familiares.

A nuestros padres, por brindarnos el apoyo incondicional, ya sea moral o económicamente en cada uno de nuestros hogares como en nuestra vida universitaria.

A nuestro tutor PhD. Oscar Cevallos por brindarnos la guía, el conocimiento y experiencia académica para el desarrollo de este proyecto de investigación.

En general, un agradecimiento a cada uno de nuestros amigos y allegados que intervinieron o aportaron con un granito de arena para que esta investigación pueda desarrollarse, ya sea brindándonos ánimos o parte de su conocimiento.

Broncano Yambay Jonathan Mauricio

Leonardo Javier Córdova Lascano

DEDICATORIA

A mis padres Carlos y Lourdes quienes pusieron la plena confianza y sustento a lo largo de toda mi vida estudiantil, desde el jardín hasta la universidad y durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

A mis hermanos Elizabeth y David, y a mi sobrino Emerson, quienes fueron la inspiración y la fuerza para nunca dejar de luchar hasta lograr obtener mis metas pese a las circunstancias que se presentaron en mi vida.

A familiares y amigos que ahora gozan del descanso eterno pero que sin duda alguna fueron una pieza importante para llegar a obtener este gran logro personal.

Broncano Yambay Jonathan Mauricio

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicárselo con todo mi amor a mi madre la Sra. Gladys Córdova porque, aunque estuve años lejos de casa, jamás me dejó solo y fue mi motor para seguir adelante en todo momento.

A mis abuelitos Manuel y María, por siempre estar pendientes de mi bienestar y brindarme todos su amor y cariño.

A mi hermano Alex, espero que en su momento este logro en mi vida profesional sea un estímulo para que sepa que con dedicación y esfuerzo se puede alcanzar lo que uno se proponga.

A mis tíos, Irene, Cristian, Daniel y Nelson que gracias a su apoyo incondicional siempre estuvieron presentes y no dejaron que me rinda en mis momentos más difíciles. Dios le pague madre, hermano, abuelitos y tíos.

Córdova Lascano Leonardo Javier

CONTENIDO

ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIII
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT	XIX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1 Fibras	5
3.1.1 Fibras naturales.....	7
3.1.1.1 Fibras vegetales	7
3.1.1.2 Fibras animales:.....	8
3.1.1.3 Fibras minerales:	8
3.1.2 Fibras sintéticas	9
3.1.2.1 Fibra Orgánica	9
3.1.2.2 Fibra inorgánica.....	9
3.2. Materiales compuestos	11
3.2.1. Tipos de matrices.....	13
3.2.1.1 Matriz de origen metálico.....	13
3.2.1.2 Matriz de origen cerámico o cementicios.....	13
3.2.1.3 Matriz de origen polimérico	14
3.2.2 Clasificación de los materiales compuestos	15
3.2.2.1 Compuestos reforzados con partículas	15
3.2.2.2 Compuestos reforzados con fibras.....	15
3.2.2.3 Compuestos reforzados con elementos estructurales	16
3.2.3. Propiedades de los materiales compuestos.....	17
3.2.4. Aplicaciones de los materiales compuestos.....	17
3.3. Geopolímeros	18
3.3.1. Materias primas	19
3.3.1.1. Fuente de aluminosilicatos	19
3.3.1.2. Activadores alcalinos.....	19
3.3.2. Proceso de geopolimerización	20
3.3.3. Proceso de elaboración de los geopolímeros	20
3.3.4 Curado del mortero de geopolímero	22

3.3.4.1 Curado térmico	22
3.3.4.2 Curado al ambiente.....	22
3.3.4.3 Curado por microondas	23
3.4. Material compuesto geopolimérico	23
3.4.1 Tejidos de refuerzo	25
3.4.1.1 Tipos de tejido que pueden ser usados	26
4. METODOLOGÍA.....	28
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.1. Materiales compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de fibras naturales NFRG	31
5.1.1. Tejidos de fibras naturales usadas para reforzar materiales compuestos NFRG	31
5.1.2. Métodos o técnicas para preparar los compuestos NFRG	32
5.1.3. Proceso de curado.....	33
5.1.4 Caracterización y propiedades mecánicas de los compuestos NFRG en comparación con un geopolímero simple GP sin reforzar	34
5.1.4.1 Densidades de un NFRG respecto a un GP	36
5.1.4.2 Resistencia a la compresión de un NFRG respecto a un GP	38
5.1.4.3 Resistencia a la flexión de un NFRG respecto a un GP	39
5.1.4.4 Resistencia a la tracción de un NFRG respecto a un GP	41
5.1.4.5 Resistencia al impacto y tenacidad a la fractura de un NFRG respecto a un GP	42
5.1.4.6 Dureza de un NFRG respecto a un GP.....	43
5.1.4.7 Análisis termogravimétrico TGA	44
5.1.4.8 Difracción de rayos X (XRD).....	45
5.1.4.9 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	45
5.1.5 Mecanismos de falla basados en microscopía electrónica de barrido (SEM)	46
5.1.6 Estudios de durabilidad de los tejidos de fibras naturales	48
5.1.6.1 Tratamiento de tejidos para compuestos NFRG.....	49
5.2. Usos y aplicación de los materiales compuestos NFRG	50
5.2.1 Usos y aplicaciones de geopolímeros simples.....	50
Pistas de aeropuerto	50
5.2.2 Usos y aplicaciones de geopolímeros reforzados con fibras	53
Estudio de la adherencia en el hormigón armado.....	53
5.2.3 Usos y aplicaciones geopolímeros de reforzados con tejidos.....	55
Refuerzo de vigas de hormigón con tejidos de acero y carbono	55

5.2.4 Usos y aplicaciones de geopolímeros reforzados con tejidos de fibras naturales	58
5.3 Usos potenciales de los NFRG	59
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6.1 Conclusiones	62
6.2 Recomendaciones	65
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
7. ANEXOS	92
Anexo 1. Estudio de Alomayri et al., (2013c)	92
Anexo 2. Estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)	96
Anexo 3. Estudio de Alomayri et al., (2014)	100
Anexo 4. Estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)	106
Anexo 5. Estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)	109
Anexo 6. Estudio de Alomayri et al., (2014)	113
Anexo 7. Estudio de Sankar & Kriven, (2014)	118
Anexo 9. Estudio de Trindade, Borges, et al., (2018)	125
Anexo 10. Estudio de Trindade, Silva, et al., (2017)	127
Anexo 11. Estudio de Trindade, Alcamand, et al., (2017)	132
Anexo 12. Estudio de Trindade, Arêas, et al., (2018)	139
Anexo 13. Estudio de Assaedi et al., (2014)	142
Anexo 14. Estudio de Assaedi et al., (2016a)	147
Anexo 15. Estudio de Assaedi et al., (2016b)	150
Anexo 16. Estudio de Assaedi et al. (2017)	154
Anexo 17. Estudio de Assaedi et al., (2018)	157
Anexo 18. Estudio de Assaedi et al., (2019)	161
Anexo 19. Estudio de Assaedi et al., (2015)	165
Anexo 20. Estudio de Assaedi, Alomayri, et al., (2015)	169
Anexo 21. Estudio de Sikapizye & Habanyama, (2020)	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades físicas de fibras naturales y sintéticas _____	10
Tabla 2: Propiedades mecánicas de fibras naturales y sintéticas _____	11
Tabla 3: Estudios sobre la caracterización y determinación de las propiedades de compuestos NFRG que se han venido desarrollando hasta la actualidad. _____	35
Tabla 4: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón y resultados de densidad y porosidad _____	92
Tabla 5: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con fibras de algodón _____	96
Tabla 6: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con fibras de algodón _____	100
Tabla 7: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón y resultados de densidad y porosidad _____	106
Tabla 8: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón. _____	109
Tabla 9: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón. _____	113
Tabla 10: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de yute. _____	118
Tabla 11: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de yute. _____	125
Tabla 12: Resistencia a la compresión de geopolímeros 100MK a diferentes regímenes de curado. _____	126
Tabla 13: Materiales (masa) y relaciones molares para elaboración de compuestos NFRG con tejidos de yute (con 1000g como referencia). _____	127
Tabla 14: Resistencia a la compresión realizadas a tres matrices diferentes. _____	128
Tabla 15: Resistencia a la tracción realizada a tres matrices diferentes, reforzadas con cinco capas de fibras de yute _____	129
Tabla 16: Resistencia a la flexión realizadas a dos compuestos NFRG con cinco capas de fibras de yute. _____	130
Tabla 17: Materiales y relaciones molares de la matriz de geopolímero (100MK), y (100MK + ARENA y 100MK + CHA); reforzados con 5 capas de tejidos de yute (fracción volumétrica del 10%) _____	132
Tabla 18: Resistencia a la compresión y Módulo de Young de los NFRG después de la exposición a diferentes temperaturas. _____	133
Tabla 19: Resistencia a la tracción y Módulo de Young de los compuestos NFRG después de la exposición a diferentes temperaturas. _____	136
Tabla 20: Materiales y relaciones molares de la matriz de geopolímero con 5 capas de tejidos de yute (fracción volumétrica del 10%) _____	139
Tabla 21: Resistencia a la tracción y flexión de compuestos reforzados con yute y sisal. _____	140
Tabla 22: Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejido de Lino. _____	142
Tabla 23: Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino. _____	147

Tabla 24: Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino. _____	150
Tabla 25: Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG sin y con 4.1 % en peso de tejido de Lino. _____	154
Tabla 26: Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con diferentes porcentajes de tejido de Lino y resultados de densidad y porosidad de los compuestos NFRG. _____	157
Tabla 27: Materiales (masa) de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino y NS variable. _____	161
Tabla 28: Materiales (masa) de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino y NC variable. _____	165
Tabla 29: Materiales (masa) de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejido de Lino. _____	169
Tabla 30: Materiales y relaciones de los compuestos NFRG con 5 capas de tejidos de lino, variando la orientación del tejido respecto a la carga aplicada. _____	174
Tabla 31: Resistencia a la flexión de los ensayos de flexión de tres puntos. _____	176

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1: Primera clasificación de las fibras	5
Figura 2: Clasificación de las fibras naturales y sintéticas.....	6
Figura 3: Compuesto reforzado con partículas.....	15
Figura 4: Orientación de las fibras en los materiales compuestos. a) Continuas Unidireccional b) discontinuas colocadas al azar c) con disposición ortogonal (mallas) d) en varias capas alternadas	16
Figura 5: Materiales compuestos estructurales. a) laminado, b) panel sándwich.....	17
Figura 6: Ilustración esquemática del proceso de geopolimerización: (a) reorganización de aluminosilicato, (b) formación de gel a partir de la condensación de oligómeros y (c) polimerización	20
Figura 7: Flujograma para la elaboración de un geopolímero.....	21
Figura 8: ATC (ambient temperatura cured) muestra curada a temperatura ambiente; SCG (solar cured grey) muestra pintada y cubierta con plástico de color gris (40% en la escala de grises) y SCB (solar cured black) muestra pintada y cubierta con plástico de color negro. 23	
Figura 9: Tipos de tejido, a) tela tejida, b) tela de punto y c) tela no tejida	26
Figura 10: Diagrama general de la metodología de la investigación	28
Figura 11: Resultados de las densidades de los compuestos NFRG con respecto a un GP .	36
Figura 12: Resultados de resistencia a la compresión	38
Figura 13: Resultados de resistencia a la flexión	39
Figura 14: Resultados de resistencia a la tracción.....	41
Figura 15: Resultados de resistencia al impacto.....	42
Figura 16: Resultados de la tenacidad a la fractura	42
Figura 17: Resultados de la dureza.....	43
Figura 18: Mecanismos de falla en compuestos NFRG, (a) despegado de la fibra, (b) huella y el desprendimiento de la fibra, (c) grietas de puente de la fibra, (d) y (e) adhesión entre la fibra matriz), y (f) fractura de fibra.	47
Figura 19: Patrón de DRX de las cenizas volantes. Donde, M = Mullita, Q = Cuarzo y F = Fluorita.	48
Figura 20: Resistencia a la flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejido de algodón.	93
Figura 21: Módulo de flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.....	93
Figura 22: Resistencia al impacto de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.....	94
Figura 23: Tenacidad a la fractura de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.....	94
Figura 24: Imágenes SEM de la fractura de los compuestos NFRG con fibras de algodón: (a) 1,4%, (b) 2,1%, (c) 2,8% y (d) 4,1% en peso.....	95
Figura 25: Esquemático de aplicación de la carga respecto a la orientación de los tejidos de algodón en los compuestos NFRG.	97
Figura 26: Resistencia a la flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.....	97
Figura 27: Resistencia a la compresión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.	98
Figura 28: Dureza de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de fibras de algodón.	98

Figura 29: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejidos de algodón.....	99
Figura 30: Imágenes SEM de la fractura de compuestos NFRG con tejidos de algodón: (a) 4.5, (b) 6.2 y (c) 8.3% en peso; (d) Puenteo de grietas por el tejido de algodón.....	99
Figura 31: Comportamiento de absorción de agua de los compuestos NFRG con tejidos de algodón.	101
Figura 32: Comportamiento del agua sobre la interfaz fibra-matriz.	101
Figura 33: Resistencia a la flexión de compuestos NFRG condiciones secas y húmedas.	102
Figura 34: Módulo de flexión de compuestos NFRG condiciones secas y húmedas.	102
Figura 35: Diagrama tensión-deformación de los compuestos NFRG en condiciones secas y húmedas.	103
Figura 36: Resistencia al Impacto de compuestos NFRG condiciones secas y húmedas. .	103
Figura 37: Dureza de los compuestos NFRG en condiciones secas y húmedas.....	104
Figura 38: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG en condiciones secas y húmedas.....	104
Figura 39: Imágenes SEM de: (a) desunión de las fibras de algodón en fibrillas finas, (b) grietas en la matriz, (c) extracción de la fibra y (d) trozos de matriz unidos a la fibra.	105
Figura 40: Resistencia a la flexión en base al contenido de OPC para compuestos NFRG con y sin fibras de algodón.....	107
Figura 41: Resistencia al impacto en base al contenido de OPC para compuestos NFRG con y sin tejidos de algodón.	107
Figura 42: Tenacidad a la fractura en base al contenido de OPC para compuestos NFRG con y sin tejidos de algodón.	108
Figura 43: Imágenes SEM de un compuesto NFRG con CF que contiene: (a) 5% en peso de OPC; (b) y (c) 10% en peso de OPC.	108
Figura 44: Resistencia a la flexión de compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.	110
Figura 45: Módulo de flexión de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.	110
Figura 46: Resistencia al impacto de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.....	111
Figura 47: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.....	111
Figura 48: Imágenes SEM de la superficie de fractura de los compuestos NFRG con: (a) 3.6, (b) 4.5, (c) 6.2 y (d y e) 8.3% en peso de CF; (f) se ve el relleno de la matriz en el CF, (g) es una micro fibrilación de CF y (h) se observa la propagación de grietas en compuestos NFRG con 8,3% en peso de tejidos de algodón.....	112
Figura 49: Diagrama TGA de (a) CF, (b) GP y (c) NFRG.....	114
Figura 50: Contracción por secado de los compuestos NFRG a varias temperaturas.....	114
Figura 51: Porosidad de los compuestos NFRG a varias temperaturas.....	115
Figura 52: (A) compuestos NFRG con 8.3% en peso de CF antes y después de someterlas a varias temperaturas y (B) GP con 0% en peso de CF después de someterla a 1000 °C.....	115
Figura 53: Resistencia a la compresión de los compuestos NFRG a varias temperaturas.	116
Figura 54: Resistencia a la flexión de los compuestos NFRG a varias temperaturas.	116
Figura 55: Imágenes SEM de la superficie de fractura para compuestos NFRG con 8.3% en peso de CF a varias temperaturas: (A) 200 °C, (B) 400 °C, (C) 600 °C, (D) 800 °C y (E) 1000 °C.	117

Figura 56: Muestra sometida a prueba de tracción prensada a 54 psi después de fallar debido a la delaminación. (a) y (b) compuestos NFRG con yute tal como se recibieron, (c) y (d) compuestos NFRG con yute tratado con álcali.	119
Figura 57: Diagrama tensión-deformación uniaxial de tracción para varios tipos de compuestos NFRG de yute.	120
Figura 58: (a) Resistencia a la tracción (MPa) y (b) elongación a la rotura (mm / mm) para los composites NFRG de yute.	121
Figura 59: Diagrama tensión-deformación por flexión para compuestos NFRG de yute. .	121
Figura 60: (a) resistencia a la flexión (MPa) (b) deformación a la resistencia a la flexión (mm / mm) para compuestos NFRG de yute.	122
Figura 61: Comparación de (a) carga máxima (N) (b) deflexión (mm) (c) energía absorbida durante el impacto (J) para compuestos NFRG de yute. Las barras de error indican +/- una desviación estándar. (d) De izquierda a derecha: espécimen de impacto GP de yute prensa	123
Figura 62: (a) fibra de yute tal como se recibió (b) fibra de yute tratada con álcali (c) interfaz fibra-matriz débil del NFRG de yute tal como se recibió (d) propagación de grietas y variación en el tamaño de la fibra en el compuesto de yute tratado con álcali.	124
Figura 63: Efecto del período de curado y la temperatura sobre la resistencia a la compresión del geopolímero 100MK. (b) Diagrama tensión – deformación de los tejidos de yute y demás compuestos con otras fibras.....	126
Figura 64: Diagrama de esfuerzo de compresión Vs deformación de los compuestos NFRG F3.0-100MK, F3.9-80MK20SF y F3.9- 60MK40BFS.....	128
Figura 65: Diagrama de esfuerzo de tracción Vs deformación de compuestos NFRG con yute F3.0-100MK, F3.9-80MK20SF y F3.9- 60MK40BFS.....	129
Figura 66: Compuestos que fueron sometidos a pruebas de tracción y muestran diferentes patrones de agrietamiento.....	130
Figura 67: Diagrama de resistencia a la flexión Vs deflexión de los compuestos NFRG con yute (F3.0-100MK y F3.9-60MK40BFS).	131
Figura 68: Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión para los compuestos NFRG: (a) absoluta y (b) porcentaje de pérdida de resistencia.....	134
Figura 69: Ensayo de tracción directa de los geopolímeros reforzados con fibras naturales: 100MK + SAND, 100MK + CHA y 100MK.	135
Figura 70: Resistencia a la tracción de los compuestos NFRG con tejidos de yute después de la exposición a diferentes temperaturas: (a) 100MK + ARENA, (b) 100MK + CHA y (c) 100MK.....	137
Figura 71: Sección transversal y perfiles longitudinales de las fibras de yute: (a) y (c) a temperatura ambiente tal como se reciben; (b) y (d) después de ser eliminado del compuesto 100MK + CHA expuesto a 250 ° C.....	138
Figura 72: (a) Esfuerzo de tracción Vs deformación; y (b) resistencia a la flexión Vs curvas de deflexión de compuestos NFRG con tejidos de yute y fibras de sisal.	141
Figura 73: (a) Resistencia a la flexión de los compuestos y (b) Módulo de flexión, de compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejidos lino (c) Tenacidad a la fractura de compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejido de lino.	144
Figura 74: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con tejidos de lino (A) puro, (B) 2,4 (C) 3 y (DH) 4,1% en peso; (E y F) adhesión entre la fibra y la matriz, (G) penetración de la matriz en los tejidos de lino, el puente de fibras (D) y (H)	146

Figura 75: Resultados de densidad, porosidad y absorción de agua para todos los compuestos con o sin refuerzo.	148
Figura 76: Resistencia a la flexión de todas las muestras con y sin refuerzo.....	148
Figura 77: Imágenes SEM de la superficie de fractura de geopolímero con diferentes cargas de nanoarcilla (a) geopolímero puro, (b) 1.0%, (c) 2.0% y (d) 3.0% en peso.....	149
Figura 78: Imágenes SEM de una superficie de fractura de NFRG con FF; (a) GPFNC-0, (b) GPFNC-1, (c) GPFNC-2 (d) GPFNC-3.	149
Figura 79: Densidad, porosidad y absorción de agua de nanocompuestos de geopolímeros mediante procedimientos de GPDNS mezcla seca (dry) y GPWNS húmeda (wet).....	151
Figura 80: (a) Resistencia a la flexión y (b) Resistencia a la compresión, de compuestos NFRG con tejidos de lino.	152
Figura 81: Diagramas de carga Vs deformación de: (a) nanocompuestos de geopolímero reforzado con FF preparados mediante el método de mezcla seca, (b) geopolímero reforzado con FF nanocompuestos preparados mediante el método de mezcla húmeda.	152
Figura 82: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con tejidos de lino; (a) GP / FF, (b) GPDNS-1 /FF y (c) GPWNS / FF-2.....	153
Figura 83: Resistencia a la flexión y módulo de nanocompuestos NFRG Con tejido de lino a las 4 y 32 semanas.	155
Figura 84: Diagrama de carga Vs deflexión a mitad del tramo a las 4 y 32 semanas para: (a) composite GP / FF; y (b) nanocompuestos GPNC-3 / FF	155
Figura 85: Imágenes SEM de las fibras de lino extraídas de (a) compuestos con FF a las 4 semanas, (b) GPNC-2 nanocompuestos con FF a las 4 semanas (c) compuestos con FF a las 32 semanas, y (d) GPNC-2 nanocompuestos con FF a las 32 semanas.	156
Figura 86: Resistencia a la flexión de compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejido de lino.	158
Figura 87: Módulo de flexión de compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejido de lino.	158
Figura 88: Tenacidad a la fractura de compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejido de lino.	159
Figura 89: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con contenidos variables de tejidos de lino (a) fibra desunida en EGPF-1, (b) huella de fibra y extracción en EGPF-2 y (c) grietas puente de fibra EGPF-3.....	160
Figura 90: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con contenidos variables de tejidos de lino (a) fibra desunida en EGPF-1, (b) huella de fibra y extracción en EGPF-2 y (c) grietas puente de fibra EGPF-3.....	162
Figura 91: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con tejidos de lino; (a) compuesto con lino (FF), y (b, c) GPNS-1 nanocompuestos con FF.....	163
Figura 92: (a) Diagrama de carga Vs deformación para compuesto GP / FF y (b) nanocompuestos GPNS-1 / FF a las 4 y 32 semanas.....	163
Figura 93: Imágenes SEM de las fibras de lino a las 32 semanas en: (a, b) compuestos con tejidos de lino, (c) GPNS-1 nanocompuesto con tejido de lino y (d) GPNS-3 nanocompuesto con tejido de lino.	164
Figura 94: (a), (b) Densidad, porosidad y absorción de agua para nanocompuestos de reforzados con tejidos de lino.....	166
Figura 95: Resistencia a la flexión de los compuestos con variación de nanoarcilla.	166
Figura 96: Tenacidad post-pico para todas las muestras con diferente contenido de nanoarcilla.	167

Figura 97: (a) muestra de control, (b) - (d) nanocompuestos que contienen 1-3% en peso de nanoarcilla, (e) - (f) nanopartículas aglomeradas incrustadas en la matriz GPNC-3, (g) extracción de fibras en GPFNC-1, (h) fractura de fibras en GPFNC-2 y buena adherencia.	168
Figura 98: Resistencia a la compresión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido del tejido de lino.	170
Figura 99: Diagrama tensión Vs deformación de un GP y un NFRG con diferentes contenidos de tejidos de lino.	170
Figura 100: Módulo de flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de lino.	171
Figura 101: Dureza de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de lino.	171
Figura 102: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de lino.	172
Figura 103: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con FF muestran (a) desunión de fibras, (b) extracción de fibras, (c) puenteo de grietas (d) y (e) adhesión entre fibra y matriz), y (f) fractura de fibra.	173
Figura 104: Imágenes SEM de la superficie de fractura para compuestos NFRG con (a) 2,4, (b) 3,0 y (c) 4,1% en peso de tejidos de lino.	173
Figura 105: Compuesto NFRG fracturado con el refuerzo orientado verticalmente, la dirección de la carga está fuera del plano de la página.	175
Figura 106: Compuesto NFRG fracturado con el refuerzo orientado horizontalmente, la dirección de la carga es paralela al plano de la página.	175
Figura 107: Curva representativa de tensión Vs deformación observada en la muestra de geopolímero de control (GP).	176
Figura 108: Diagramas de esfuerzo Vs deformación de los tres tipos de compuestos geopoliméricos reforzados horizontalmente.	177
Figura 109: Diagrama de tensión Vs deformación de los tres tipos de compuestos geopolímeros reforzados verticalmente.	177
Figura 110: Imagen SEM de la fracturada entre el tejido y la matriz en un compuesto NFRG con lino.	178
Figura 111: Diferencias entre los compuestos orientados vertical y horizontalmente. (CGC) compuesto de geopolimérico de control, (FRGC) reforzado con lino, (FHRGC) reforzado con cáñamo- lino (híbrido) y (HRGC) reforzado con cáñamo.	178

RESUMEN

En la búsqueda de nuevos materiales cementicios eco-amigables para la construcción, se encuentra un material denominado “Geopolímero”, mismo que pueden producirse como un material compuesto (NFRG). Para este estudio se realizó una revisión bibliográfica acerca de las diferentes fibras naturales, materias primas, procesos y técnicas para la elaboración de compuestos NFRG; además, se analizó el comportamiento físico, químico, mecánico, así como sus potenciales usos y aplicaciones en la ingeniería civil. Los tejidos de fibras naturales usados para el reforzamiento de NFRG hasta la actualidad son el algodón, yute y lino. Como fuente de aluminosilicatos se ha venido usando las cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín, caolinita y arcillas, las cuales pueden ser activadas con hidróxido de sodio o potasio, silicato de sodio o una solución combinada de las mismas. El proceso de elaboración del NFRG inicia con la producción de la matriz geopolimérica, ya sea mediante un mezclado en seco o húmedo, posteriormente se incorporan los tejidos de fibras naturales alternando las capas de geopolímero con los tejidos; para, finalmente realizar el curado ya sea térmico o al ambiente. Analizando los resultados de los compuestos NFRG, se pudo observar una variación favorable en sus propiedades en comparación de un GP. Sin embargo, al ser un material que está en fase de pruebas experimentales, no se ha podido encontrar estudios donde se hayan aplicado en algún proyecto de construcción en la realidad, pero en base a sus propiedades y estudios similares, se puede atribuir usos potenciales en la ingeniería civil.

Palabras clave: Fibras, Materiales compuestos, Estructuras, Geopolímero, Geopolímero reforzado, Tejidos de fibras naturales, Tejidos de algodón, Yute, Lino, Tratamiento de fibras.

ABSTRACT

In searching for new eco-friendly cementitious materials for construction, a material called “Geopolymer” was found it producing as a composite material (NFRG). For this study, a bibliographic review was carried out on the various natural fibers, raw materials, processes, and techniques for elaborating NFRG compounds; Furthermore, the physical, chemical, and mechanical behavior was analyzed, and its potential uses and applications in civil engineering. The natural fiber fabrics used to reinforce NFRG to date are cotton, jute, and linen. As a source of aluminosilicates, fly ash, blast furnace slag, metakaolin, kaolinite, and clays have been used, which can be activated with sodium or potassium hydroxide, sodium silicate, or a combined solution thereof. The NFRG elaboration process starts with the geo-polymeric matrix production, either employing dry or wet mixing. Subsequently, the natural fiber fabrics are incorporated, alternating the geopolymer layers with the fabrics; to carry out the curing, whether thermal or ambient finally. Analyzing the NFRG compounds results, it was possible to observe a favorable variation in their properties than a GP. However, being a material in the experimental testing phase, it has not been possible to find studies where they have been applied in a construction project in reality, but based on their properties and similar studies, potential uses can be attributed to civil engineering.

Keywords: Fibers, Composed materials, Structures, Geopolymer, Reinforced geopolymer, Natural fiber fabrics, Cotton fabrics, Jute, Linen, Fiber treatment.

Reviewed by:

Lic. Yesenia Merino Uquillas
ENGLISH PROFESSOR c.c.
0603819871

1. INTRODUCCIÓN

Los productos a base de cemento portland ordinario OPC, son los más utilizados dentro del mundo de la construcción, debido a que presentan un bajo costo de producción y a las elevadas propiedades físicas y químicas que estos ofrecen. Lo que favorece a que tengan una alta demanda y aceptación en el mercado (Espinoza Espinoza & García Ochoa, 2017).

Por otra parte, la producción global de cemento en el 2012 alcanzó los 3.6 billones de toneladas. Esta exorbitante cifra va acompañada de una realidad que no es ajena a la industria del cemento como las emisiones de CO₂. De acuerdo con el informe estadístico presentado por Federación Interamericana del Cemento, las empresas cementeras son responsables del 5% del total de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, tomando en cuenta que tras el proceso de manufactura también intervienen el consumo de energía y la minería para extraer las materias primas (FICEM, 2013).

En la búsqueda de nuevos materiales para la construcción y con el objetivo de minimizar los impactos ambientales causados por esta industria, se ha dado un mayor interés en la investigación para impulsar el uso de fibras naturales en compuestos de matrices geopoliméricas.

De esta manera, nacen los llamados materiales compuestos que resultan de la combinación de varias materias primas, cuya combinación ofrecen propiedades diferentes y mejores a las de sus constituyentes. Los materiales compuestos están formados por: la matriz y el refuerzo. La matriz es la fase donde se encuentra alojado el refuerzo, mismo que puede ser distinguido a simple vista por ser el medio continuo del compuesto. Así mismo, la matriz aporta al material compuesto ductilidad, tenacidad y se encarga de transferir las tensiones al

refuerzo, para que este pueda soportar en gran parte las cargas aplicadas (Guerrero et al., 2013).

El término geopolímero fue implementado por el francés Joseph Davidovits en 1978, para representar materiales conformados por cadenas o redes de moléculas inorgánicas (Davidovits, 1989). Estos nuevos compuestos geopoliméricos están formados por una matriz, misma que está constituida por una fuente de aluminosilicatos, activados mediante una solución alcalina de hidróxido de sodio o potasio, silicato de sodio, o la combinación de estas; estos compuestos pueden ser curados a condiciones ambientales o a temperaturas ligeramente elevadas (Davidovits, 2005).

Además, a estos compuestos se debe prestar una mayor atención a su microestructura, procesos de producción, propiedades físicas, químicas y mecánicas. La producción de los compuestos geopoliméricos a más de requerir menos energía y bajas emisiones de CO₂, poseen propiedades únicas como la ganancia de resistencia a tempranas edades y durabilidad a largo plazo, con respecto al cemento portland tradicional (Omeman & Nehdi, 2007).

Según Restrepo et al., (2016) hoy en día, las fibras vegetales se están convirtiendo en una alternativa en varias aplicaciones, debido a su bajo costo, peso ligero y por ser un recurso renovable con propiedades superiores a otros materiales cuando se los utiliza como refuerzo. Por otra parte, gracias a la consistencia y uniformidad que presentan los tejidos de las fibras vegetales, estas pueden ser orientadas y distribuidas uniformemente en toda la matriz geopolimérica, lo que ayuda a conseguir una mayor resistencia mecánica en diferentes direcciones (Estrella, 2016).

Esta investigación está dirigida a una búsqueda bibliográfica mediante herramientas informáticas como repositorios virtuales, revistas académicas, bases de datos científicos, entre otras; enfocando a la recopilación de información acerca de fibras, materiales compuestos, geopolímeros, compuestos geopoliméricos, compuestos NFRG (geopolímeros reforzados con tejidos de fibras naturales), así como usos y aplicaciones potenciales de estos materiales en el campo de la construcción e ingeniería civil; para lo cual se usó palabras clave en inglés y español, posteriormente la información fue clasificada y seleccionada de acuerdo a un mayor número de citas y a la aportación a la línea de investigación del presente estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Realizar una revisión del desarrollo de los materiales compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de fibras naturales, mediante una investigación bibliográfica para establecer una línea base de los avances conseguidos.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar acerca de las fibras naturales que se han usado para producir materiales compuestos geopoliméricos.
- Estudiar las materias primas que se han usado para producir matrices geopoliméricas y su interacción con el refuerzo en materiales compuestos.
- Analizar procesos y técnicas usadas en la producción de materiales compuestos geopoliméricos.
- Comprender el comportamiento físico, químico y mecánico de los materiales compuestos geopoliméricos, reforzados con tejidos de fibras naturales, y presentar los tipos de pruebas usadas para su caracterización.
- Discutir acerca de los usos de los materiales compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de fibras naturales en la Ingeniería Civil, que han sido propuestos en investigaciones.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Fibras

Debido a la escasa información validada y poca concordancia de los criterios que tienen los autores para clasificar las fibras, Lilholt & Lawther, (2000) presentan una primera clasificación en dos grandes grupos: fibras naturales y fibras sintéticas o artificiales. Sin embargo, las fibras sintéticas no presentan una clasificación tan detallada; por lo que, los autores explican que hay superposiciones de varias fibras dentro de su clasificación; por ejemplo, las fibras de asbesto pueden ser consideradas de origen natural-mineral o de origen artificial, así como la limitada presencia de más tipos de materiales productores de fibras vegetales y su respectiva clasificación.

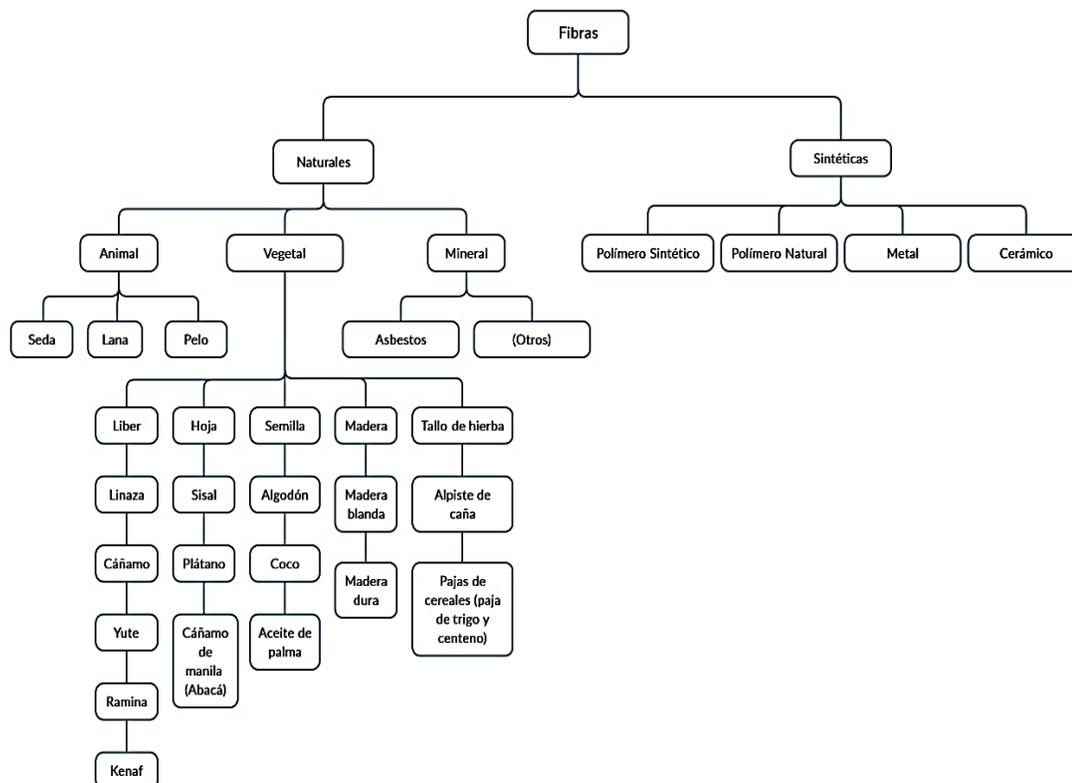


Figura 1: Primera clasificación de las fibras

Fuente: Lilholt & Lawther, (2000)

Años más tarde, Jawaid & Abdul Khalil, (2011), presentan una clasificación similar a la **Figura 1**, donde concuerda la clasificación general en fibras naturales y artificiales. Sin embargo, se categoriza de mejor manera tanto a las fibras celulósicas como a las fibras sintéticas, mismas que son subdivididas en orgánicas e inorgánicas, donde se han integrado una variedad de materiales productores de fibras. Del mismo modo, en la investigación de Yan et al., (2016) se incluye una clasificación de las fibras en concordancia con lo que presentan Jawaid & Abdul Khalil, misma que servirá como guía para desarrollar el presente estudio.

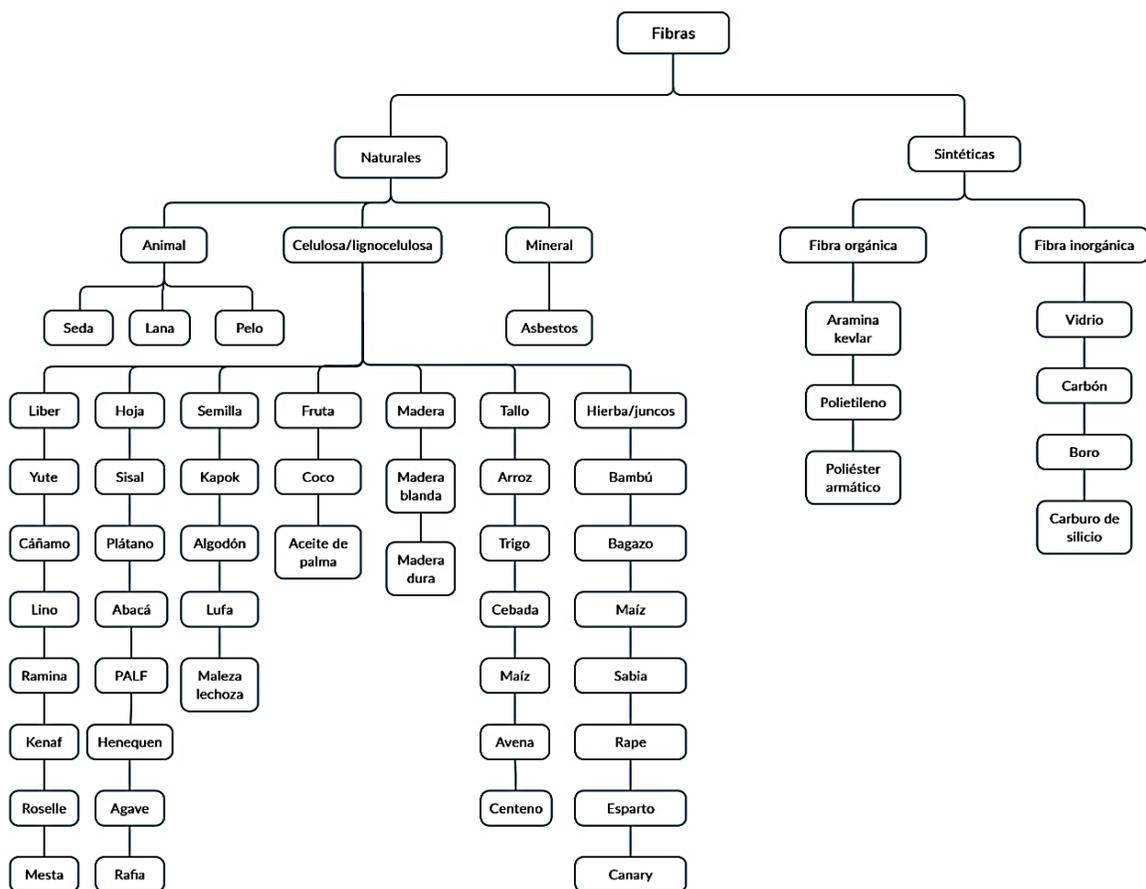


Figura 2: Clasificación de las fibras naturales y sintéticas

Fuente: Jawaid & Abdul Khalil, (2011)

3.1.1 Fibras naturales

Las fibras naturales están conformadas por todas aquellas que se encuentran en estado natural, estas deben pasar por un proceso de purificación o limpieza para poder ser hiladas hasta obtener hebras, hilos y tejidos. Por esta razón, su uso es una opción sostenible, ya que su proceso de reciclaje no demanda mayor esfuerzo convirtiéndolas en un recurso renovable y biodegradable de bajo costo (Faruk et al., 2014; Monteiro et al., 2009). Las principales propiedades físicas y mecánicas de las fibras se presentan en las **Tablas 1 y 2**; y, en cuanto a su clasificación se las puede dividir según la naturaleza del reino de donde se las obtiene (Bismarck et al., 2005; Chandramohan & Marimuthu, 2011; Lilholt & Lawther, 2000; Yan et al., 2016):

3.1.1.1 Fibras vegetales

Son aquellas que se componen principalmente de celulosa y se extraen de los tallos, raíces, hojas, frutos, juncos y semillas de la planta. Por ejemplo: sisal, cáñamo, yute, algodón, lino, coco, banano, etc.

La obtención y producción de fibras de origen vegetal dependerá de varios factores tales como clima, condiciones del suelo, edad de la planta y proceso de extracción. El cultivo de las plantas puede darse en climas cálidos, húmedos y fríos. El tiempo de cosecha de la fibra va desde los 3 a 4 meses (para cáñamo, lino y yute), de 5 a 6.5 meses (para coco y algodón) y de 2 a 2.5 años para el sisal. En cuanto a la obtención de la fibra se la puede realizar por procesos físicos y mecánicos, posteriormente se secan al ambiente y se realiza su clasificación (Rowell, 2008).

3.1.1.2 Fibras animales:

Se obtienen a partir del pelo, lana, plumas y la seda de algunos animales, tales como: caballo, aves, cabras, ovejas, llamas, alpacas, vicuñas y el gusano de seda.

El proceso de obtención y producción de este tipo de fibra se registra entre el 2do y 3er año de vida del animal, y a partir de esa edad se la realiza una vez por año mediante el trasquilado, ya sea con tijeras o con máquinas de corte; para que finalmente, la fibra sea lavada, secada y clasificada (Quispe et al., 2009). La fibra de seda es un filamento continuo a base de proteínas que el gusano utiliza para elaborar su capullo donde se alojará durante su transformación. A partir de la cuarta muda de su piel, el gusano empieza a tejer alrededor de sí mismo el capullo y al décimo día, los capullos se retiran de las hojas y se las despoja de impurezas; finalmente, la crisálida se ahoga con vapor o aire caliente, y si es necesario los capullos se secan y seleccionan para su venta o hilado (Llangostera, 2004).

3.1.1.3 Fibras minerales:

Se fabrican a partir de una ligera modificación a los minerales naturales, de los cuales se producen algunas variedades de asbestos como: serpentina (fibras curvas) y anfíboles (fibras rectas).

Según Abú-Shams & Pascal, las actividades mineras que se desarrollan para la extracción y preparación del asbestos, se hacen mediante explotación superficial y explotación profunda. Una vez extraídos los minerales se procede a las maniobras de triturado y pulverizado, para luego ser transportados en contenedores cerrados herméticamente para evitar roturas y fugas del polvo. Una vez desempacado el polvo, empieza un proceso de preparación para ser cardado, hilado o tejido (Abú-Shams & Pascal, 2005).

3.1.2 Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas también son conocidas con fibras químicas o manufacturadas, las cuales son producidas mediante un proceso químico a partir de productos fabricados en la industria petroquímica y minera, pero a su vez, guardan la arquitectura inicial de las fibras naturales (Parisot, 1962; Porcel & Artetxe, 2016).

Las fibras sintéticas han sido implementadas en aplicaciones estructurales e industriales (Guerrero et al., 2013), en carrocerías de vehículos (Collier & Collier, 1998), morteros y planchas de fibrocemento (Nawrath, 2016), aislamiento térmico (Blanxart, 1993), en la industria automotriz (Unterweger et al., 2013) y en la industria textil (Porcel & Artetxe, 2016).

3.1.2.1 Fibra Orgánica

Entre las fibras orgánicas más comúnmente usadas están el nailon, poliésteres, poliolefinas, poliuretanos, poliacrilonitrilos y otros polímeros vinílicos y copolímeros (Porcel & Artetxe, 2016). El proceso de hilado se logra al forzar el paso de las materias primas en estado líquido, a través de pequeños agujeros en una placa de metal provista de una boquilla y permitiendo que se endurezcan a su salida (Gordon, 1984).

3.1.2.2 Fibra inorgánica

Las fibras más comúnmente usadas tenemos la fibra de vidrio, carbón, boro y el carburo de silicio (Jawaid & Abdul Khalil, 2011; Yan et al., 2016).

La obtención de la fibra de vidrio se logra estirando a muy alta temperatura un filamento o una mecha de vidrio fundido y posteriormente su inmediata solidificación (Comino Almenara, 1996). Las fibras de carbono se obtienen a partir de la quema del

oxígeno, nitrógeno y otros elementos diferentes al carbono de la fibra precursora (PAN, rayón y precursores de alquitrán), dejando solo el carbono en el material, hasta obtener un producto primario conocido como filamentos de carbono con diámetros que oscilan entre 5 y 8 micras (μm) (Llano, 2014).

Las propiedades de los materiales compuestos dependerán principalmente de las propiedades físicas y mecánicas que posean las fibras, las cuales serán presentadas en las **Tablas 1 y 2.**

Tabla 1: *Propiedades físicas de fibras naturales y sintéticas*

Fibra	D (μm)	L (m)	δ (g/m^3)	% Humedad	α Fibrilar
Sisal	8 - 200	1.2 - 1.7	0.7 - 0.8	56	16 - 25
Cáñamo	25 - 600	2 - 4	1.2	12	6.2
Yute	20 - 200	1 - 4	1.4	17	8.1
Algodón	10 - 45	0.042	1.55	8.5	25
Lino	12 - 600	0.09	1.4	12	10
Coco	10 - 460	0.1 - 0.3	1.15 - 1.5	20 - 50	2 - 6.2
Seda	10 - 13	500 - 1500	-	50 - 55	-
Asbestos	< 3	> 5 μm	2.4 - 3.3	-	-
Metales	-	-	4.65 - 7.85	-	-
E-vidrio	250 - 3000mm	6 - 12	2.1 - 2.6	-	-
Carbono	5 - 10	F	1.7 - 2.1	-	-
Nailon	23 - 400	F	1.15	-	-
Poliéster	10 - 200	F	1.22 - 1.38	-	-
Poliiolefinas	150 - 640	F	0.91	-	-

Nota: D= corresponde al diámetro del filamento, L= longitud de filamento, δ = densidad absoluta y α = ángulo de microfibrilla.

Fuente: Yan et al., (2014, 2016)

Tabla 2: *Propiedades mecánicas de fibras naturales y sintéticas*

Fibra	(Resistencia a la tensión (MPa))	Módulo E (GPa)	Módulo específico (GPa*cm ³ /g)	% Deformación
Sisal	363 - 700	9 - 38	17	2 - 7
Cáñamo	270 - 900	23.5 - 90	40	1 - 3.5
Yute	320 - 800	30	30	1 - 1.8
Algodón	287 - 800	5.5 - 12.6	6	3 - 10
Lino	343 - 2000	27.6 - 103	45	1.2 - 3.3
Coco	95 - 230	2.8 - 6	4	15 - 51.4
Seda	-	-	-	-
Asbestos	-	-	-	-
Metales	34 - 2850	200 - 210	-	0.5 - 3.5
E-vidrio	3310 - 4800	52 - 84	-	4.8 - 5.5
Carbono	2400 - 4800	250 - 800	-	0.2 - 1.4
Nailon	750 - 100	4100 - 5200	-	16 - 20
Poliéster	230 - 1200	10000 - 18000	-	10 - 50
Poliiolefinas	275	2700	-	15

Nota: módulo o rigidez específicos (E/γ) (rigidez/peso específico) \rightarrow (GPa/(g/cm³))

Fuente: Yan et al., (2014, 2016)

3.2. Materiales compuestos

Se define como material compuesto a todo conjunto que resulta de la combinación o unión de dos o más materiales simples con características diferentes, que dan lugar a un nuevo material con mejores propiedades a las de sus componentes individuales. Por otro lado, Van Suchtelen, (1972) describió que estos nuevos materiales son homogéneos y, por lo tanto,

poseen las mismas características y propiedades en cualquier punto de su estructura. En los materiales compuestos se pueden identificar fases principales como son: la matriz, el refuerzo y la superficie de conexión entre estos que se denomina interfaz (Daniel & Ishai, 1994).

La matriz es el componente que da la consistencia y continuidad al material compuesto e influye en las propiedades mecánicas, físicas y químicas; además de, englobar a los elementos de refuerzo, transfiere los esfuerzos, da soporte lateral bajo la aplicación de cargas, protege de la abrasión y de los efectos del medio ambiente (José Dávila et al., 2011; Guerrero et al., 2013).

El refuerzo es el componente disperso en el interior de la matriz, que ayuda a soportar la carga y aporta con propiedades estructurales al material compuesto. Los refuerzos pueden ser partículas, fibras o elementos estructurales como lo afirman (Chawla, 2012c; Dandekar & Shin, 2012; Dávila et al., 2011; Taya & Arsenault, 1989).

La interfaz es la superficie que se forma entre la matriz y el refuerzo. Cuando el refuerzo está firmemente adherido a la matriz, la interfaz se considera buena (José Dávila et al., 2011). Además, Korniejenko et al., (2016) señalan que el tamaño y las características del refuerzo influyen de manera directa en la unión fibra / matriz, afectando así las propiedades mecánicas del material compuesto. Si la interfaz es débil, la que soporte la mayor carga será la matriz, lo que provocará fallas prematuras o porosidades que pueden llevar a la fractura del material. Varios factores como la superficie de la fibra, la temperatura de curado, la dispersión del agente reforzante, la humedad y el tamaño de la fibra, serían los responsables para que se dé una unión perfecta entre la matriz y la fibra (Alomayri, Shaikh, et al., 2014a, 2014b; Alomayri & Low, 2013).

3.2.1. Tipos de matrices

Existen tres tipos de matrices que se han venido estudiando durante décadas, y de acuerdo con Dandekar & Shin, (2012) se clasifican en:

3.2.1.1 Matriz de origen metálico

Generalmente, los compuestos de matriz metálica están formados por al menos dos componentes: uno de ellos es la aleación metálica que es la matriz, y el segundo es un compuesto inter metálico, un óxido, un carburo o un nitruro (José Dávila et al., 2011). El uso de este tipo de compuestos ha sido desarrollado principalmente en la industria aeroespacial (Hooker & Doorbar, 2000) y automotriz (Allison & Cole, 1993), ya que poseen alta resistencia, bajo peso y soportan altas temperaturas. Además, las aleaciones de aluminio, titanio, magnesio, cobre y los compuestos inter metálicos, son también usados como matrices metálicas (Chawla, 2012b; Da Costa et al., 2000).

3.2.1.2 Matriz de origen cerámico o cementicios

Los materiales cerámicos son muy duros y quebradizos, por lo general, consisten en la combinación de uno o más metales con un no metal (oxígeno, carbono o nitrógeno), entre los más típicos tenemos el Al_2O_3 , MgO y CaO (Schaffer et al., 2000). Además, ofrecen un comportamiento estable a temperaturas elevadas, alta resistencia a los choques térmicos, alto módulo, resistencia a la corrosión y una baja densidad. Sin embargo, estos materiales están propensos a la rápida formación de grietas, razón por la cual se deben reforzar para aumentar la tenacidad a la fractura (Chawla, 2012a; J Dávila et al., 2010; Mallick, 1993).

Dentro de este campo tenemos a los materiales cementicios y a los geopolímeros, mismos que están compuestos de aluminosilicatos. En 1978, Davidovits fue quien desarrollo y patento un aglutinante que resultó de la activación alcalina de aluminosilicatos y que los

llamo "geopolímeros"; además, los considero como un material cerámico que puede destinarse a un sin número de usos y aplicaciones (Davidovits, 1989; Low, 2018; Martínez, 2015; Fernando Pacheco-Torgal et al., 2008). Es así, que durante estas décadas se han llevado a cabo investigaciones con geopolímeros para el almacenaje de residuos químicos tóxicos o radiactivos (Davidovits, 2002; Zhang et al., 2008), fabricación de hormigones e ingeniería civil (Nawaz et al., 2020), moldes para la manufactura de termoplásticos (Davidovits & Davidovics, 1991), en la industria automotriz y aeroespacial (Davidovits, 2005), etc.

3.2.1.3 Matriz de origen polimérico

Los polímeros están formados estructuralmente por grandes cadenas de moléculas con átomos de carbono unidos por enlaces covalentes, mismos que están conformados mediante un proceso de polimerización, que son el resultado de la unión de varios monómeros formando bloques de polímeros (Askeland, 1998; Chawla, 2012c). Los polímeros pueden ser usados en una gran variedad de aplicaciones y en grandes cantidades, debido a su baja densidad y facilidad de procesamiento con costos relativamente bajos (Besednjak, 2005; J Dávila et al., 2010). Además, los polímeros tienen excelentes propiedades a temperatura ambiente; sin embargo, están limitadas a soportar temperaturas elevadas y a disolventes que pueden provocar cambios en sus propiedades físicas y mecánicas (Chawla, 2012c). Este tipo de matrices de igual manera pueden ser reforzadas con fibras naturales (Monteiro et al., 2009; Oksman et al., 2003) y con fibras sintéticas (Luo & Chung, 1999).

3.2.2 Clasificación de los materiales compuestos

3.2.2.1 Compuestos reforzados con partículas

Según Callister & Rethwisch, existen compuestos reforzados con partículas grandes y con partículas por dispersión. Los primeros se estudian a un nivel macroscópico con el fin de indicar la interacción que existe entre la matriz y la partícula. Las partículas pueden ser variables en su geometría, pero deben ser aproximadamente equiaxiales, lo que la diferencia de las fibras. Del mismo modo, las partículas son las encargadas de restringir el movimiento de la matriz debido a la proximidad entre ellas. Por otra parte, los compuestos reforzados con partículas por dispersión se estudian a un nivel atómico molecular (10 a 250 nm de diámetro). Al incorporar las partículas en la matriz de forma dispersa, estas no deben reaccionar químicamente la una con la otra. En este caso, la matriz será la encargada de soportar la mayor parte de las fuerzas aplicadas y las partículas impedirán el movimiento de la matriz en ciertas zonas; por tanto, la resistencia a la tracción y la fluencia se ven mejoradas (Callister & Rethwisch, 2007).

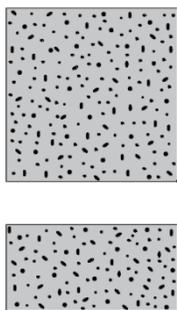


Figura 3: *Compuesto reforzado con partículas*

Fuente: José Dávila et al., (2011)

3.2.2.2 Compuestos reforzados con fibras

Estos compuestos reforzados con fibras son considerados los más importantes, ya que brindan mejores propiedades mecánicas como resistencia a la fatiga, mejor rigidez y relación

entre la resistencia-peso, debido a que las fibras son las que soportarán gran parte de los esfuerzos que son transferidos por la matriz (Callister & Rethwisch, 2007; José Dávila et al., 2011). El tipo, cantidad y orientación de las fibras, juega un papel muy importante ya que influirá en las características y propiedades del material compuesto, ya sea en la densidad específica, resistencia a la compresión, tracción, fatiga, y su costo (Callister & Rethwisch, 2007; Mallick, 1993).

Las fibras pueden estar orientadas de diferentes formas en el interior de la matriz (Callister & Rethwisch, 2007; Mallick, 1993; Olivares et al., 2003):

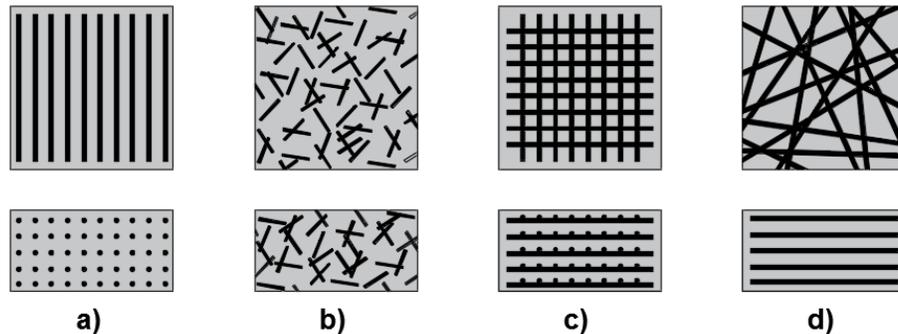


Figura 4: *Orientación de las fibras en los materiales compuestos. a) Continuas Unidireccional b) discontinuas colocadas al azar c) con disposición ortogonal (mallas) d) en varias capas alternadas*

Fuente: Olivares et al., (2003)

3.2.2.3 Compuestos reforzados con elementos estructurales

Los compuestos estructurales más usados pueden ser del tipo laminados o tipo sándwich. Estos dos tipos de compuestos están constituidos por el apilamiento alternado de láminas paralelas de materiales homogéneos y la matriz. Este material compuesto se usa cuando se aplican esfuerzos multidireccionales sobre un mismo plano (Callister & Rethwisch, 2007; Mallick, 1993; Olivares et al., 2003).

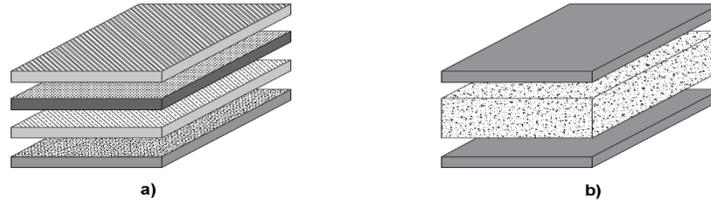


Figura 5: *Materiales compuestos estructurales. a) laminado, b) panel sándwich*

Fuente: Callister & Rethwisch, (2007)

3.2.3. Propiedades de los materiales compuestos

Las propiedades mecánicas y físicas de los materiales compuestos están directamente relacionadas con diferentes factores que afectan su desempeño. Estos factores pueden ser el tipo de refuerzo, volumen, orientación, longitud, tipo de matriz implementada, interfaz entre ellos, propiedades tanto del material para la matriz como para el reforzamiento de la misma, manufactura empleada, el tipo y dirección de la carga aplicada (González, 2014).

3.2.4. Aplicaciones de los materiales compuestos

Los materiales compuestos se han venido usando en diferentes industrias con la finalidad de obtener materiales con mejores características que los materiales simples o comúnmente usados. A continuación, se mencionarán algunos estudios donde se han implementado gran parte de los materiales compuestos.

Tal es el caso del uso de una matriz polimérica, reforzada con varios tipos de fibras en el campo de la industria aeroespacial, misma que se ha empleado con el fin de que los vehículos sean más livianos, fuertes y el consumo de combustible sea muy eficiente (Kesarwani, 2017). Por otra parte, en la industria eléctrica y electrónica, las matrices metálicas reforzadas con partículas o fibras han sido usadas para crear elementos ligeros de bajo costo, pero con un alto rendimiento (Fernández et al., 2006). Otro de las industrias donde

se ha probado la eficiencia de materiales compuestos termo endurecibles reforzados con fibras cortas y continuas, es en la industria automotriz (Friedrich & Almajid, 2013); así mismo, Puglia et al., (2004) enfatiza su revisión bibliográfica en los resultados obtenidos en el proceso de manufactura y propiedades finales de compuestos de matrices poliméricas (termoplásticos, termoestables y biodegradables) reforzados con fibras naturales para la creación de piezas automotrices.

En la industria de la construcción, ya sea para el reforzamiento o construcción de nuevas obras civiles, se ha tratado de buscar un material compuesto cementicio con mejores propiedades mecánicas, respecto a un material simple o comúnmente elaborado (Colin, 2001). De igual manera, se ha puesto mayor atención en un nuevo material que podría llegar a sustituir al cemento portland ordinario, ya que ofrecería iguales o mejores prestaciones como es el caso de los geopolímeros, que de igual manera abre la posibilidad de desarrollar un material compuesto al momento de reforzarlo (Shaikh, 2013).

3.3. Geopolímeros

El término “geopolímero” fue adoptado en los años 70 por el científico e ingeniero francés Prof. Joseph Davidovits, que definió a los geopolímeros como polímeros inorgánicos que están formados por un material sólido, compuesto por la reacción de un polvo a base de aluminosilicatos con una solución alcalina activadora (Davidovits, 1991). Este material presenta importantes ventajas como sus altas propiedades mecánicas, durabilidad, estabilidad a altas temperaturas, no inflamable, rentable, sostenible y amigable con el ambiente (Davidovits, 2015; Norkhairunnisa & Fariz, 2015). Se lo denomina un material con gran potencial que se puede utilizar en muchas aplicaciones, como ya se discutió anteriormente en el **apartado 3.2.1.2.**

3.3.1. Materias primas

3.3.1.1. Fuente de aluminosilicatos

Como se informa en la literatura, los materiales a base de aluminosilicatos utilizados en la geopolimerización se pueden dividir en dos grandes grupos principales, (1) materiales calcinados tales como cenizas volantes, metacaolín, escorias, residuos de construcción, desechos puzolánicos, etc. (Davidovits, 1991, 1994; Palomo, Blanco-Varela, et al., 1999; Palomo, Grutzeck, et al., 1999; Usherov-Marshak et al., 1998) y, (2) materiales no calcinados como caolinita, feldspatos, arcillas, minerales de aluminosilicatos de tipo roca y relaves de procesamiento de mineros (Van Jaarsveld et al., 2000; Xu et al., 2001; Xu & Van Deventer, 2000).

3.3.1.2. Activadores alcalinos

Los activadores alcalinos se pueden dividir en dos categorías, a saber (1) álcalis, como hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), carbonato de sodio (Na₂CO₃) y carbonato de potasio (K₂CO₃); y (2) aditivos de silicato como silicato de sodio (Na₂SiO₃) y silicato de potasio (K₂SiO₃) (Duxson et al., 2007; Fernández-Jiménez et al., 2013). Entre los más usados tenemos el hidróxido de sodio o potasio y silicato de sodio o una combinación de ellas, mismas que son disueltas en agua y son las responsables de que esta reacción química se lleve a cabo con las fuentes de alúmina y sílice. El activador alcalino actúa mediante el proceso de geopolimerización, donde se produce la lixiviación tanto del silicio como del aluminio presentes en las materias primas, formando el gel geopolimérico (Muduli et al., 2013).

3.3.2. Proceso de geopolimerización

La geopolimerización se produce cuando las fuentes de aluminosilicato reaccionan y se disuelven con las soluciones alcalinas líquidas (Gharzouni et al., 2015). En general, el proceso de geopolimerización implica tres fases principales: (a) la disolución o lixiviación del sílice y alúmina en un entorno altamente alcalino, (b) transporte de los minerales disueltos que se coagularán para la formación del gel; y (c) la formación de redes tridimensionales de estructuras de aluminosilicatos mediante la policondensación (P. De Silva et al., 2007; Komnitsas & Zaharaki, 2007; Singh & Middendorf, 2020; Xu & Van Deventer, 2000).

Según Davidovits, (1994), estas redes tridimensionales de estructuras de aluminosilicatos pueden ser de tres tipos: poli (sialato) (Si-O-Al-O-), poli (sialato-siloxo) (Si-O-Al-O-Si-O-) y poli (sialato-disiloxo) (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-).

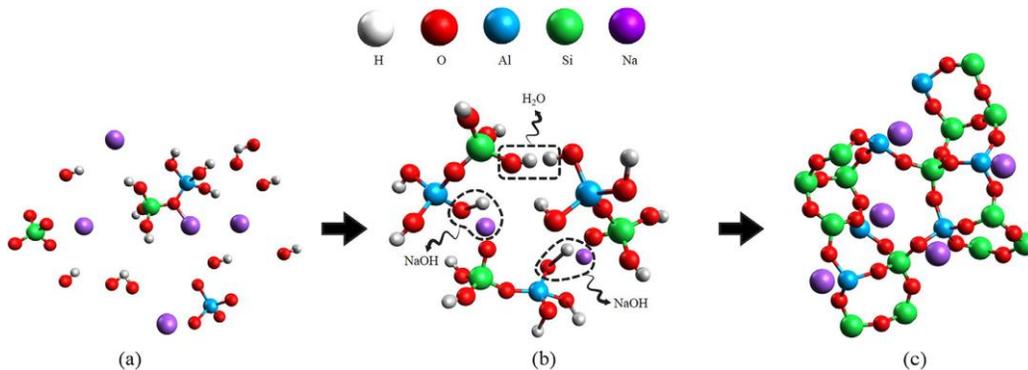


Figura 6: *Ilustración esquemática del proceso de geopolimerización: (a) reorganización de aluminosilicato, (b) formación de gel a partir de la condensación de oligómeros y (c) polimerización*

Fuente: Xu & Van Deventer, (2000)

3.3.3. Proceso de elaboración de los geopolímeros

El proceso de elaboración de un geopolímero se puede realizar mediante dos métodos (Assaedi et al., 2016b), el cual consiste en un mezclado en seco y un mezclado húmedo.

El mezclado en seco es uno de los métodos más usados por los investigadores, el cual se detalla en la **Figura 7**. Donde la fuente de aluminosilicatos se mezcla en estado seco con algún otro tipo de agregado si fuere el caso, y el activador alcalino de igual forma, se prepara por separado un día antes del mezclado dejándolo reposar a temperatura ambiente; o a su vez, se puede preparar el mismo día del mezclado, pero, enfriando el contenedor del activador sobre agua fría hasta que la solución alcance la temperatura ambiente (Trindade, Borges, et al., 2018); para finalmente estas dos materias primas sean mezcladas hasta formar la matriz. Mientras que el método de mezclado en húmedo consiste en verter en un recipiente todas las materias primas al mismo tiempo sin ninguna preparación previa y realizar el mezclado hasta alcanzar la homogeneidad de la pasta (Assaedi et al., 2016b).

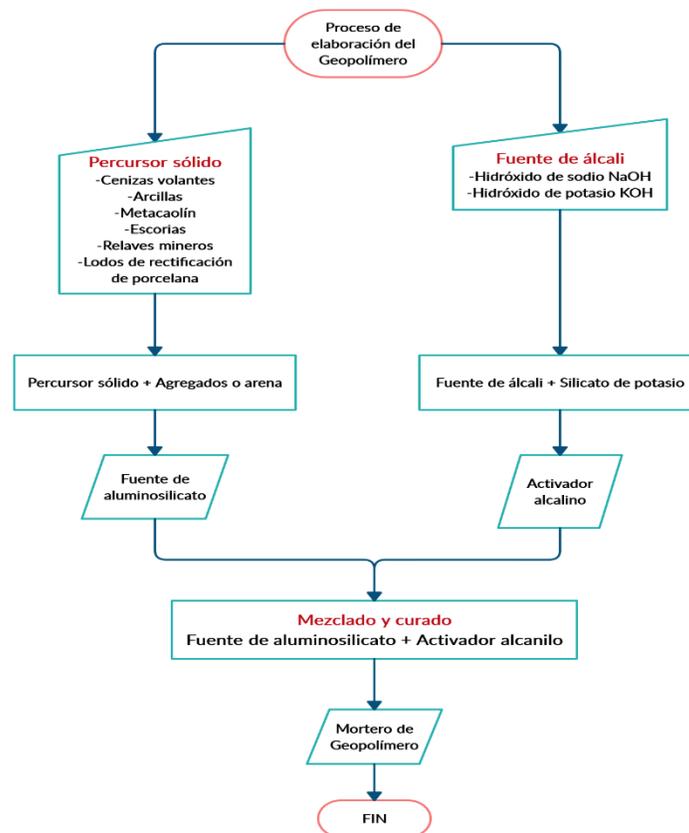


Figura 7: *Flujograma para la elaboración de un geopolímero*

Fuente: Singh & Middendorf, (2020)

3.3.4 Curado del mortero de geopolímero

El proceso de geopolimerización se puede ver afectado mediante un tratamiento térmico o en base a las condiciones del entorno en donde reposaran los especímenes.

3.3.4.1 Curado térmico

En el proceso de curado térmico se debe tener precaución en no sobrepasar el rango óptimo de temperatura, debido a que, si se aplica una temperatura mayor a 90 °C, internamente en el compuesto aumentará aún más la temperatura producto de la reacción exotérmica, produciendo tensiones internas, debido a la contracción del material cuando pierde agua y esto conllevará a una disminución de las resistencias mecánicas (Okoye et al., 2015; Yuan et al., 2016). Sin embargo, para Mohamed, (2015) si el curado se realiza a una temperatura más baja que 75 °C y durante periodos amplios de tiempo (> 24 horas), en el compuesto empezarán a formarse microgrietas que conllevarán a un deficiente desempeño del geopolímero.

3.3.4.2 Curado al ambiente

Este método fue probado por Dong et al., (2017), el cual determinó la influencia de la energía solar en el curado de los geopolímeros, mediante la elaboración de tres muestras; la primera fue de control, la cual se curó a temperatura ambiente controlada de 21 °C y a una humedad del 95%; segunda muestra se pintó de un tono gris correspondiente al 40% y se cubrió con plástico del mismo color y, la última muestra se pintó de negro al 100%, para luego cubrirlos con film alveolar con las burbujas mostradas al sol y, cuya capa interior también se encontraba pintada de negro para lograr un efecto invernadero. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión para las muestras pintadas de negro al 100%, mejoraron sustancialmente; alcanzando los 49.2 MPa en un día de curado, respecto a los 25.5

MPa de la muestra de control. Estos resultados se deben gracias a que los cilindros absorbieron una gran cantidad de energía solar alcanzando los 65 °C bajo el sol.

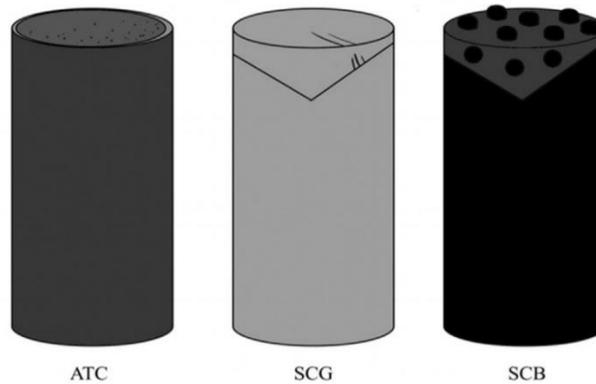


Figura 8: *ATC (ambient temperatura cured) muestra curada a temperatura ambiente; SCG (solar cured grey) muestra pintada y cubierta con plástico de color gris (40% en la escala de grises) y SCB (solar cured black) muestra pintada y cubierta con plástico de color negro.*

Fuente: Dong et al., (2017)

3.3.4.3 Curado por microondas

Este método se basó en el curado por medio de un microondas; sin embargo, no siempre es confiable este tipo de tratamiento, ya que el rango de alcance de las ondas de radio de alta frecuencia suele llegar hasta una cierta profundidad y el proceso de curado fracasa (Graytee et al., 2018; Ranjbar et al., 2017).

3.4. Material compuesto geopolimérico

El desarrollo de materiales compuestos geopoliméricos, parte de la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas y minimizar los factores que afectan a la misma, como la retracción de la matriz, formación de grietas y la fragilidad, que son producto de la reacción exotérmica de los aluminosilicatos con el activador alcalino y, por esta razón la matriz sufre una rápida pérdida de agua (Collins & Sanjayan, 2000, 2001).

De tal manera, hasta la actualidad se han desarrollado compuestos a base de escorias reforzadas con fibras de vidrio, las cuales redujeron un 20% la retracción del material sin alterar las propiedades mecánicas del compuesto (Alcaide et al., 2007). Del mismo modo, en otro estudio, al compuesto se han agregado fibras de polipropileno, en el cual se observó un mejoramiento de la resistencia a la fractura, pero también se evidenció la pérdida de un 11% en los valores de compresión y flexión (Puertas et al., 2006). Por otra parte, al agregar fibras de carbón en longitudes de 3 mm, las propiedades mecánicas del compuesto a base de escorias no se vieron afectadas (Dias & Thaumaturgo, 2005). Todos estos resultados muestran que aún existen deficiencias que deben seguirse estudiando a profundidad, con el fin de lograr un equilibrio entre la matriz y el refuerzo.

El proceso industrial para la obtención de las distintas fibras sintéticas comerciales es uno de los muchos problemas que acarrea en este sector, ya que no contribuyen al cuidado del ambiente y a la economía. Por esta razón, se ha puesto mayor interés en el uso de fibras naturales celulósicas como refuerzo de materiales compuestos geopoliméricos; ya que, ofrecen propiedades mecánicas similares a las sintéticas, existen en una amplia disponibilidad y son rentables, por lo que las hacen aptas para usarlas en este medio (Yan et al., 2014b, 2014a; Yan & Chouw, 2013).

Sin embargo, Yan et al., (2016) deduce que pueden existir algunas deficiencias al utilizar fibras celulósicas en materiales compuestos geopoliméricos a una escala industrial, para lo cual, se han considerado las más importantes:

- Las sospechas de durabilidad para la implementación a gran escala es una de las mayores interrogantes, debido a la existencia de poca información que demuestre la

eficiencia en las diferentes industrias (Toledo et al., 2000; Wan Jo et al., 2015; Wei & Meyer, 2015; Yan et al., 2014c).

- El añadir pequeñas cantidades de fibras al compuesto podría conducir a un efecto de reforzamiento limitado (Ardanuy et al., 2011, 2015; Mohr et al., 2005, 2006; Toledo et al., 2003; Wan Jo et al., 2015; Wei & Meyer, 2015); o el exceso de refuerzo, provocaría problemas en el mezclado, distribución y trabajabilidad del compuesto (Ardanuy et al., 2011, 2015; Mohr et al., 2005, 2006).
- La variación en su composición química, longitud, diámetro y rugosidad de las fibras celulósicas, conllevan a una dispersión de resultados en las propiedades mecánicas dentro de su misma especie y, por ende, en las propiedades de los materiales compuestos geopoliméricos (Charlet et al., 2009; Defoirdt et al., 2010; Fernando Pacheco-Torgal & Jalali, 2011; Prasad & Rao, 2011; Shahzad, 2012).

Por las razones antes mencionadas, ha surgido la idea de implementar los tejidos de fibras celulósicas para el reforzamiento de compuestos geopoliméricos.

3.4.1 Tejidos de refuerzo

Los tejidos están formados por hilos, fibras o monofilamentos retorcidos en conjunto, para luego estos ser entrecruzados hasta formar los tejidos (Yan, 2012; Yan et al., 2012). Es recomendable mantener un proceso estandarizado en la manufactura de los tejidos, con la finalidad de tener un control sobre la calidad y propiedades a lo largo de todo el tejido. Ya que estos factores tendrán efectos en la caracterización de las propiedades de los compuestos NFRG (Yan et al., 2016).

3.4.1.1 Tipos de tejido que pueden ser usados

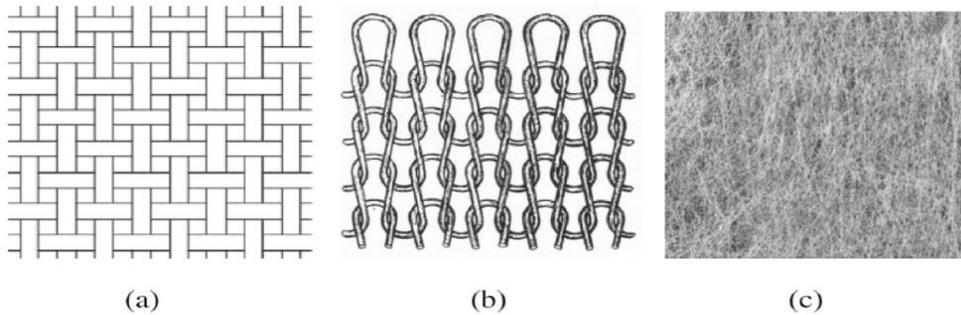


Figura 9: *Tipos de tejido, a) tela tejida, b) tela de punto y c) tela no tejida*

Fuente: Misnon et al., (2014)

a) Las telas tejidas están compuestas por dos juegos de hilos entrelazados que forman un ángulo recto entre ellas. La “urdimbre” son hilos que recorren la parte longitudinal del tejido y los ganchos de “trama” son los que recorren de orilla a orilla de la parte transversal de la tela (Sondhelm, 2000).

b) Las telas de punto están formadas por un solo hilo que puede ser en dirección de trama o urdimbre (Anand, 2000).

c) La tela no tejida está considerada en este campo ya que presenta una estructura textil, debido a que el haz de fibras se une o entrelazan por medios mecánicos, químicos, térmicos y combinaciones de estos procesos (Misnon et al., 2014).

Las principales ventajas al usar tejidos de fibras en materiales compuestos son los siguientes (Yan et al., 2016):

- Uniformidad en las propiedades mecánicas
- Proporciona esfuerzos efectivos en múltiples direcciones
- Se puede usar tanto en la superficie como en el interior de las matrices

- Presenta compatibilidad con muchos materiales de construcción.

4. METODOLOGÍA

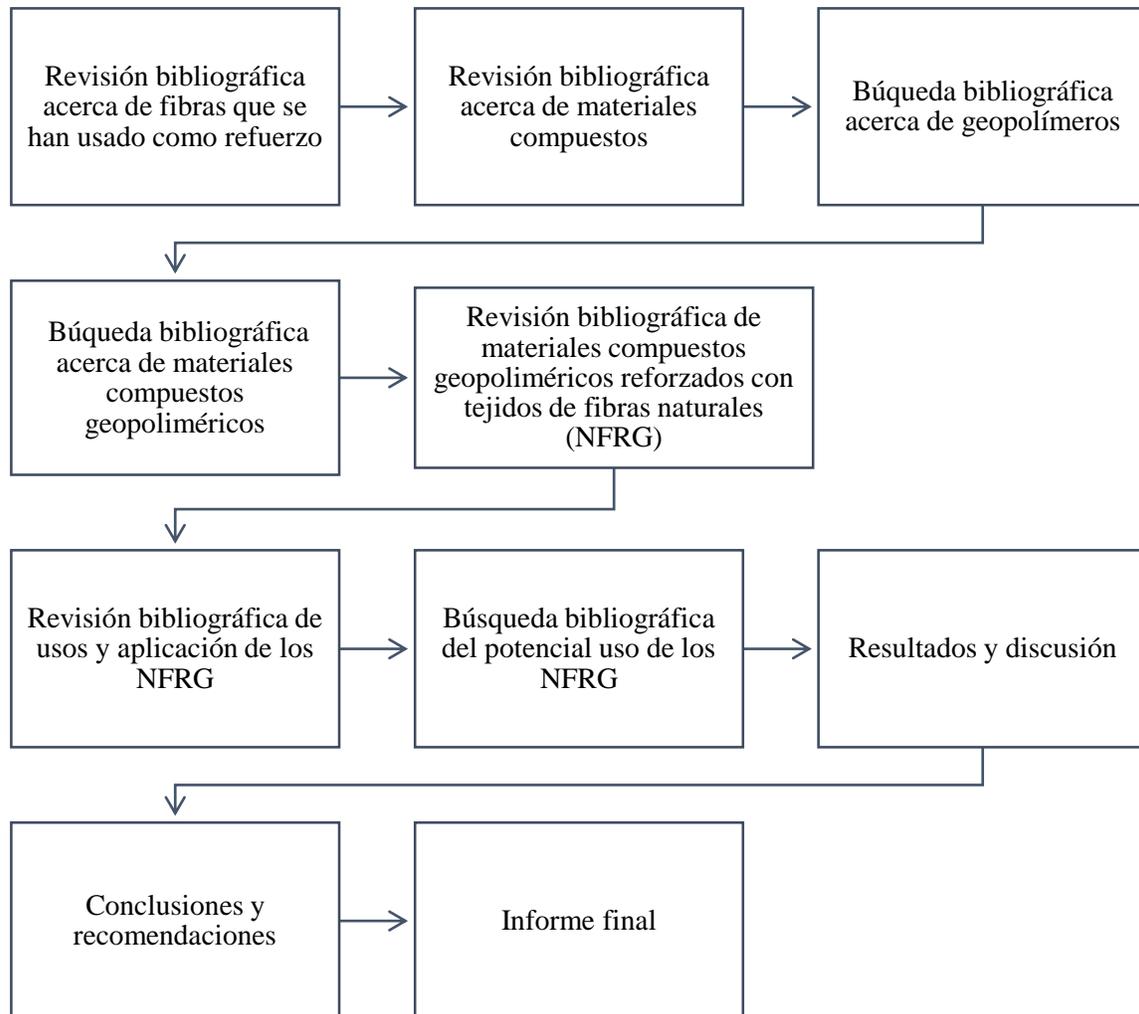


Figura 10: *Diagrama general de la metodología de la investigación*

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

En este trabajo de investigación se usaron herramientas informáticas como Scielo, Scopus, ScienceDirect, Google-Academic, Researchgate, entre otras, que fueron la base para realizar la búsqueda de la literatura que proporcionaría los datos para lograr cumplir los objetivos planteados. La búsqueda de información se realizó mediante el uso de palabras

clave en inglés y español, con las que se logró hallar un amplio campo de información. Sin embargo, gran parte de la información fue seleccionada de acuerdo con el mayor número de citas del estudio y que tengan relación al tema de la presente investigación.

Se realizó una revisión bibliográfica acerca de las fibras, donde se presentaba su clasificación de acuerdo con su naturaleza y analizadas de una forma general. Se describió varios parámetros como su procedencia, producción y su proceso de manufactura hasta llegar a obtener la fibra misma. También, se ha obtenido información acerca de las propiedades principales de cada una de las fibras y se presentan en las Tablas 1 y 2. Esta información se realizó mediante el uso de palabras claves como “fibras-clasificación-producción-propiedades”.

En la búsqueda bibliográfica acerca de materiales compuestos, se encontró información en la que se describe su definición, estructura, materias primas usadas y su clasificación. Se prestó mayor atención a las fibras naturales que podían ser usadas como refuerzo de los materiales compuestos. Además, se describió las condiciones del refuerzo que son implementadas en los compuestos e inciden en sus propiedades y, finalmente, se investigó acerca de los campos de aplicación para estos materiales, los cuales han ganado un amplio mercado desde sus inicios. Las palabras clave que se utilizaron para adquirir esta información son “materiales compuestos-estructura-clasificación-materiales-aplicaciones”.

En cuanto la búsqueda bibliográfica para geopolímeros se encontró información que data desde los años 70 hasta la actualidad; donde, se ha venido generando una gran cantidad de estudios como patentes, artículos científicos, tesis, entre otros documentos. Esta información parte desde la definición que le otorgó su creador; además, describe las materias primas, su proceso de elaboración y tipos de curado. Así mismo, se investigó acerca de los

compuestos geopoliméricos, dando un énfasis en los diferentes refuerzos utilizados. En las bases de datos científicas se usaron palabras clave como “geopolímero- materiales-elaboración-refuerzos”.

La revisión bibliográfica acerca de los NFRG se basó en determinar los tejidos de fibras naturales más comunes para el reforzamiento de estos compuestos; así como los métodos o técnicas para su elaboración, la cual es un paso fundamental para el buen desempeño de estos materiales. Así mismo, se ha analizado las principales propiedades físicas y mecánicas; las cuales, los diferentes investigadores obtuvieron mediante ensayos mecánicos y observaciones microscópicas, permitiendo visualizar el comportamiento y los mecanismos de falla de estos compuestos. Otra parte muy importante que también se investigó, es acerca de la durabilidad de los tejidos y el tratamiento que se pueden realizar a la fibra para que exista una buena unión con la matriz. En cuanto al uso y aplicación en el sector de la construcción, se ha realizado una búsqueda exhaustiva tanto para geopolímeros puros y reforzados con diferente fibras y tejidos; y finalmente, se ha descrito el uso potencial propuesto en los estudios analizados acerca de los NFRG en la industria de la construcción. Para investigar toda esta información se usaron palabras clave en los buscadores de las bases de datos científicas como “geopolímeros reforzados-tejidos de fibras naturales-tejidos de algodón-yute-lino-tratamiento de fibras-aplicaciones”.

Finalmente, esta información fue analizada de acuerdo con el enfoque propuesto en el presente estudio, mediante la tabulación de resultados, así como la discusión de estos, de lo cual se abrirá un gran panorama para desarrollar las conclusiones y recomendaciones planteadas en los objetivos de esta investigación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Materiales compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de fibras naturales NFRG

5.1.1. Tejidos de fibras naturales usadas para reforzar materiales compuestos NFRG

En los últimos años se ha venido realizando investigaciones sobre el uso de las fibras celulósicas tejidas como refuerzo de materiales compuestos geopoliméricos, a base de aluminosilicatos y activadores alcalinos mencionados en el **apartado 3.3.1**, mismos que han mostrado resultados prometedores en cuanto a sus principales propiedades y características. A continuación, se realizará una revisión de estudios realizados de acuerdo con el tejido de fibras naturales más utilizadas para reforzar materiales compuestos geopoliméricos.

Los tejidos de algodón se han usado para reforzar compuestos geopoliméricos hechos a base de FA y activados por (NaOH) y (Na₂SiO₃) (Alomayri et al., 2014; Alomayri, Shaikh, et al., 2014a, 2014c; Alomayri & Low, 2013; Assaedi et al., 2014) y, también existen estudios donde a estos compuestos se ha agregado OPC (Alomayri, Shaikh, et al., 2014b).

Por otra parte, los tejidos de lino también han sido usados como una fuente viable para reforzar compuestos geopoliméricos a base FA y con los mismos activadores (Assaedi et al., 2014, 2016a, 2018; Assaedi, Alomayri, et al., 2015; Assaedi, Shaikh, et al., 2015; Sikapizye & Habanyama, 2020). Así mismo, a estos compuestos se los puede mejorar con partículas de nanoarcilla (Assaedi et al., 2017) o con nano sílice (Assaedi et al., 2016a, 2019).

Los tejidos de yute han sido otro material importante para el reforzamiento de compuestos geopoliméricos a base de MK, activados por soluciones alcalinas (Sankar & Kriven, 2014), a los cuales se les puede agregar arena de río o chamota 70 (Trindade et al.,

2019; Trindade, Alcamand, et al., 2017; Trindade, Arêas, et al., 2018; Trindade, Borges, et al., 2018) y mejorarlos con polvos de humo de sílice (SF) o escorias de altos de horno (BFS) (Trindade, Silva, et al., 2017).

5.1.2. Métodos o técnicas para preparar los compuestos NFRG

El proceso para la elaboración de los compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de fibras naturales, está basado en la misma secuencia de elaboración de los geopolímeros simples (sin reforzar) descrito en el flujograma de la **Figura 7**, hasta donde se obtiene la pasta geopolimérica. Sin embargo, el proceso de elaboración de los compuestos se extiende debido a la preparación y colocación de los tejidos.

Este proceso extra consiste en verter una fina capa de pasta geopolimérica sobre los moldes de madera o acero previamente engrasados o cubiertos de plástico para evitar adherencias. Posteriormente, con la ayuda de un rodillo se coloca el tejido previamente humedecido en la misma pasta elaborada, este proceso se repite alternado las capas de geopolímero con los tejidos hasta obtener el número de capas o la cantidad en peso de tejidos deseada. Luego, las muestras son colocadas sobre una mesa vibratoria por un período corto de tiempo, con la finalidad de eliminar el aire atrapado, ya sea en la matriz o entre las aberturas del tejido. Finalmente, las muestras son expuestas a un peso de 20 o 25 kg por un tiempo de 3 horas aproximadamente, para lograr una mejor compactación de los compuestos (Alomayri, Shaikh, et al., 2014a; Assaedi et al., 2019; Sankar & Kriven, 2014; Sikapizye & Habanyama, 2020; Trindade et al., 2019). En general, el dimensionamiento de las muestras para ensayos de flexión y tracción estará basada en las diferentes normas que cada autor utilizó para su investigación.

En cuanto a ensayos de compresión, una gran mayoría de investigadores realizan estas pruebas en compuestos no reforzados (Assaedi et al., 2016b; Trindade et al., 2019). Sin embargo, existe un mínimo grupo de autores que determinaron valores de resistencia a la compresión en compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de algodón (Alomayri et al., 2014; Alomayri, Shaikh, et al., 2014a; Assaedi et al., 2014) y con tejidos de lino (Assaedi, Alomayri, et al., 2015).

5.1.3. Proceso de curado

Existen una gran variedad de procesos de curado como se describe en el **apartado 3.3.4**; sin embargo, en los estudios acerca de materiales compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de fibras naturales, revelan dos procesos de curado principales, como lo es un curado térmico y un curado a temperatura ambiente.

Curado térmico

El proceso de curado térmico consiste en cubrir las muestras con una película plástica, luego son colocadas en hornos eléctricos a una cierta temperatura y rango de tiempo, lo cual será descrito posteriormente. Una vez retiradas de los hornos, las muestras reposan a temperatura ambiente antes de ser desmoldadas. Finalmente, se las deja envejecer hasta el día que se realizaran los respectivos ensayos, dependiendo los períodos de tiempo que cada autor haya considerado.

Las temperaturas a las que han sido expuestas las muestras para el proceso de curado van desde los 60 °C (Sikapizye & Habanyama, 2020), 80 °C (Alomayri, Shaikh, et al., 2014a, 2014c; Assaedi et al., 2014, 2016a, 2016b, 2018; Assaedi, Alomayri, et al., 2015; Assaedi, Shaikh, et al., 2015), para lo cual las muestras permanecieron en el horno por un período de

3 horas. Por otra parte, Sankar & Kriven, (2014) realizaron un proceso de curado más prolongado (24 h) a una temperatura de 50 °C. Inclusive, para estudiar el efecto de las altas temperaturas sobre los compuestos reforzados, Alomayri, Assaedi, et al., (2014) sometió las muestras a temperatura que van desde los 200 °C a los 1000 °C por un período de tiempo de dos horas.

Curado a temperatura ambiente

El proceso de curado a temperatura ambiente es muy similar al proceso térmico, con la diferencia que las muestras son curadas en lugares cerrados a una temperatura controlada de 25 ± 2 °C por un período de tiempo que los autores hayan considerado necesario hasta ser desmoldadas. Finalmente, las muestras se envuelven en plástico y se dejan envejecer a las mismas condiciones ambientales, durante los días que a continuación consideró cada autor.

Tal es el caso de Trindade, Borges, et al., (2018), el cual realizó un proceso de envejecimiento por seis días; así mismo, se dejaron envejecer por siete días (Trindade, Alcamand, et al., 2017; Trindade, Silva, et al., 2017). Sin embargo, existen tiempos más prolongados de envejecimiento, que van desde los 28 días (Alomayri, Shaikh, et al., 2014b; Trindade et al., 2019; Trindade, Arêas, et al., 2018) o hasta que la pasta llegue a una consistencia adecuada.

5.1.4 Caracterización y propiedades mecánicas de los compuestos NFRG en comparación con un geopolímero simple GP sin reforzar

Tabla 3: *Estudios sobre la caracterización y determinación de las propiedades de compuestos NFRG que se han venido desarrollando hasta la actualidad.*

Código (NFRG)	Autor	Tejido	Composición del NFRG
A1	Alomayri et al., (2013c)	Algodón	NFRG con 2.1% en peso de tejido, curado a 105 °C por 3h, respecto a un GP y para el caso de R. impacto el NFRG CON 2.2% en peso de tejido
A2	Alomayri et al., (2014)	Algodón	NFRG con 8.3% en peso de tejido, curado a 200 °C, respecto a un GP curado a 200 °C
A3	Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)	Algodón	NFRG con 8.3% en peso de tejido orientado horizontalmente y curado a 80 °C por 3 h, respecto a un GP
A4	Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)	Algodón	NFRG adicionado de OPC y tejidos, respecto a un GP
A5	Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)	Algodón	NFRG con 8.3% en peso de tejido orientado horizontalmente y curado a 80 °C por 3 h, respecto a un GP
A6	Alomayri, Assaedi, et al., (2014)	Algodón	NFRG con 8.3% en peso, proceso de envejecimiento en seco, respecto a un GP (seco).
Y1	Sankar & Kriven, (2014)	Yute	NFRG con 0.3 tejidos de yute sin tratar, pero con más pasta geopolimérica, respecto con un NFRG con 0.5 de tejidos de yute tratado
Y2	Trindade et al., (2019)	Yute	NFRG con arena de río, con tejido y curado al ambiente, respecto a un GP
Y3	Trindade, Borges, et al., (2018)	Yute	NFRG con arena de río, con tejido y curado al ambiente, respecto a un GP de igual forma curado al ambiente.
Y4	Trindade, Silva, et al., (2017)	Yute	NFRG adición de 40% de BFS con 60% MK y 5 capas de tejido, respecto a un GP, y para el caso de tracción con un NFRG con 20% de sílice y 80% MK
Y5	Trindade, Alcamand, et al., (2017)	Yute	NFRG con arena de río, con tejido y curado al ambiente, respecto a un GP de igual forma curado al ambiente.
Y6	Trindade, Arêas, et al., (2018)	Yute	NFRG con arena de rio, reforzado con 5 capas de tejido, respecto a un NFRG solo con fibras de sisal.
L1	Assaedi et al., (2014)	Lino	NFRG con 4.1% en peso de tejidos, respecto a un GP
L2	Assaedi et al., (2016a)	Lino	NFRG con 2.0% en peso de nanoarcilla y tejido, respecto a un GP
L3	Assaedi et al., (2016b)	Lino	NFRG con partículas de nano sílice y tejidos, respecto a un GP
L4	Assaedi et al., (2017)	Lino	NFRG con nanoarcilla y tejidos y secado por 4 semanas, respecto un GP
L5	Assaedi et al., (2018)	Lino	NFRG con 4.1% en peso de tejidos, respecto a un GP
L6	Assaedi et al., (2019)	Lino	NFRG con nano sílice, tejidos y secado por 4 semanas, respecto a un GP
L7	Assaedi, Shaikh, et al., (2015)	Lino	NFRG con 2.0% en peso de nanoarcilla y tejido, respecto a un GP
L8	Assaedi, Alomayri, et al., (2015)	Lino	NFRG con 4.1% en peso de tejidos, respecto a un GP
L9	Sikapizye & Habanyama, (2020)	Lino	NFRG con tejidos orientados horizontalmente, respecto a un GP

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

La Tabla 3, representa todos los estudios que se han logrado recopilar hasta la actualidad sobre el diseño de mezclas de compuestos NFRG con tejidos de fibras naturales como el algodón, yute y lino. Cada campo describe la cita del autor, la fibra utilizada, los compuestos NFRG que presentaron un mejor comportamiento a comparación de un geopolímero sin reforzar; además, se asignó un código a cada investigación para facilitar la tabulación y elaboración de graficas de barras que ayuden a comprender la variación de los resultados entre ellas. A continuación, se presentan las abreviaciones que se le han asignado a cada término.

CF: fibra de algodón

JF: fibra de yute

FF: fibra de lino

GP: geopolímero común (sin reforzar)

NFRG: geopolímero reforzado con fibras naturales

5.1.4.1 Densidades de un NFRG respecto a un GP

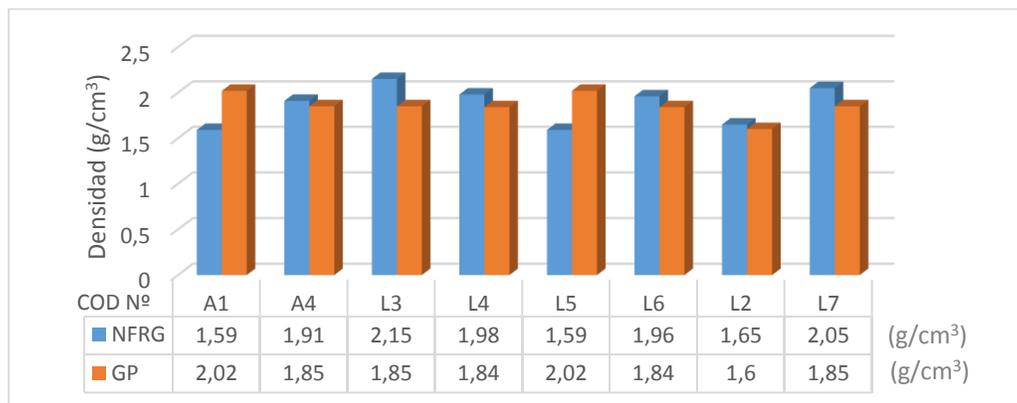


Figura 11: Resultados de las densidades de los compuestos NFRG con respecto a un GP

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

Para verificar si la densidad sufre algún cambio en los compuestos luego de ser reforzados con tejidos o al añadir nanoarcillas y nano sílice, se realiza el cálculo de la densidad mediante la relación de la masa seca de la muestra entre el volumen de esta y, el cálculo de la porosidad se determinó mediante el principio de Arquímedes de acuerdo con la norma ASTM C20, (2017). Los diferentes resultados de todos los compuestos realizados por cada autor se pueden revisar en los **Anexos 1, 4 y del 14 al 19**.

Como se puede observar en la **Figura 11**, los compuestos NFRG sin la adición de algún agregado a la fuente de aluminosilicatos, la densidad del compuesto disminuye a medida que la cantidad de tejidos aumenta (Alomayri & Low, 2013; Assaedi et al., 2018). Sin embargo, en los compuestos que se añade algún tipo de mejora a la fuente de aluminosilicatos, la densidad de los compuestos NFRG aumenta como en el caso cuando se agregó OPC (Alomayri, Shaikh, et al., 2014b), nano sílice (Assaedi et al., 2016b, 2019) o nanoarcilla (Assaedi et al., 2016a, 2017, 2018); la adición de estas partículas reduce la porosidad, rellorando los espacios vacíos presentes en la pasta y mostrando densidades más altas que las pastas de control, en consecuencia exhiben una menor absorción de agua.

5.1.4.2 Resistencia a la compresión de un NFRG respecto a un GP

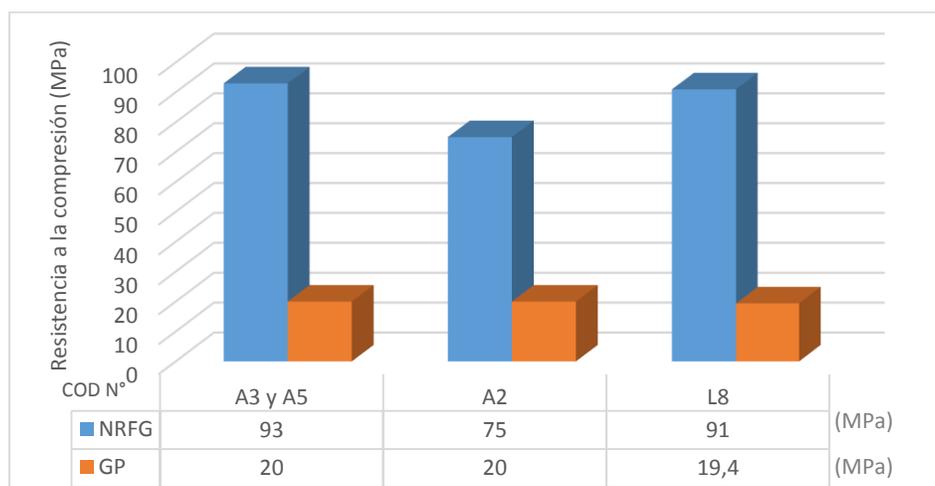


Figura 12: Resultados de resistencia a la compresión

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

Las resistencias a compresión en compuestos NFRG es muy limitada, ya que gran parte de los autores solo realizan ensayos a la compresión en muestras GP; sin embargo, existe una mínima cantidad de estudios, mostrados en la **Figura 12**, así como en los **Anexos 2 al 5**, en los cuales se realizaron los ensayos a compresión en NFRG utilizando las normas (ASTM C109, 2002; ASTM C39/C39M-20, 2015).

Alomayri, Shaikh, et al., (2014a, 2014c) determinaron la resistencia a la compresión más alta en compuestos NFRG con 8.3% en peso de tejidos de algodón (CF), obtuvieron una resistencia de 93.0 MPa respecto a los 20 MPa de un GP. Esta mejora se atribuye a que los tejidos colocados horizontalmente, absorben y distribuyen la carga de manera uniforme en toda la sección transversal del compuesto. Sin embargo, en los compuestos NFRG con el 8.3% de CF mostraron una decaída de la resistencia con curado a 200 °C; esta caída drástica de la resistencia se debe al deterioro de los hidratos de geopolímero, por efecto del aumento

de la temperatura y a su vez observándose un incremento de la porosidad (Alomayri et al., 2014).

Del mismo modo, se obtuvo una buena resistencia en compuestos NFRG con un 4.1% en peso de tejido de lino (FF), llegando a alcanzar los 91.0 MPa, respectó a los 19.4 MPa de un GP; atribuyendo esta mejora a que la interfaz entre la tela / matriz no está expuesta a carga de cizallamiento, lo que a su vez reduce la posibilidad, los desprendimientos de la tela o delaminación de la matriz con cargas elevadas (Assaedi, Alomayri, et al., 2015).

5.1.4.3 Resistencia a la flexión de un NFRG respecto a un GP

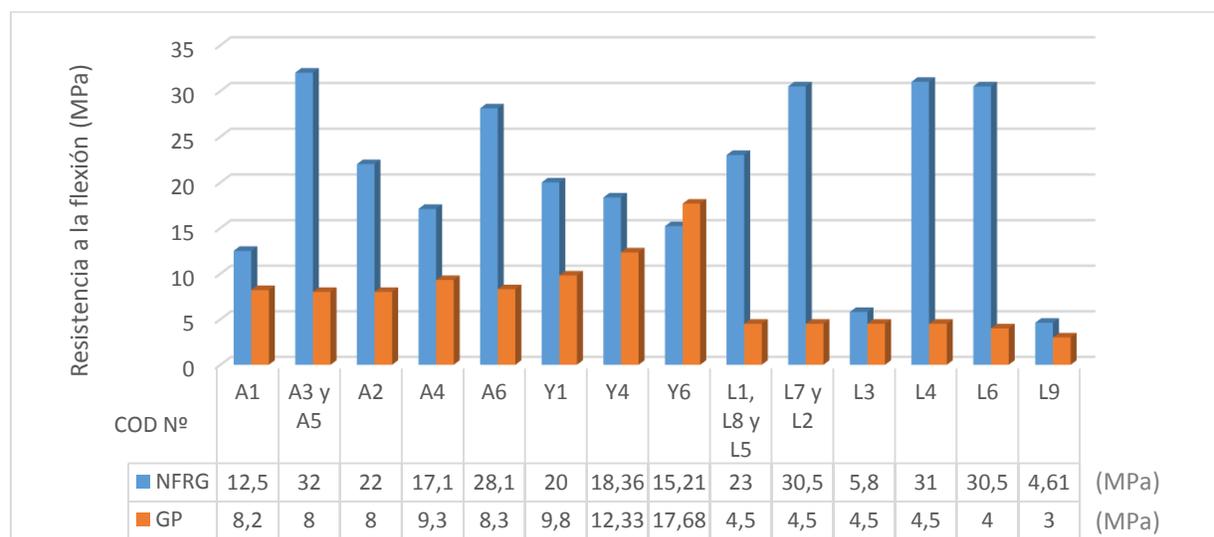


Figura 13: Resultados de resistencia a la flexión

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

Los resultados de estudios del comportamiento a esfuerzos de flexión en los NFRG se pueden observar en la **Figura 13**, así como en los **Anexos 1 al 21**. Para poder determinar el valor de resistencia a flexión se han empleado normas vigentes como las (ASTM 1341, 2013; ASTM C78, 2002; ASTM D790, 2015) o basándose en ecuaciones descritas en (Low et al., 2007).

Alomayri, Shaikh, et al., (2014a, 2014c) obtuvieron un aumento en la resistencia en los compuestos NFRG con 8.3% en peso de CF colocados horizontalmente y curados a 80°C por 3 horas, alcanzando los 32.0 MPa, respecto a los 8.0 MPa de un GP. La orientación del tejido de forma horizontal otorga una buena resistencia, debido a que la carga se distribuye de mejor manera por toda el área del tejido y, por ende, mientras más capas tenga, mejor se comportará el material. Además, se pudo notar una gran caída de las resistencias debido a la cantidad de CF y a la temperatura de curado que fue mucho mayor 105 °C por 3 horas (Alomayri & Low, 2013).

En el estudio realizado por Sankar & Kriven, (2014), obtuvieron la mejor resistencia en un compuesto NFRG con un 0.3 de fracción de masa de JF sin tratar, alcanzando los 20.0 MPa en comparación a los 9.80 MPa con compuesto NFRG con 0.5 de fracción de masa de JF tratado; esta mejora de resistencia en el compuesto con menor contenido de tejido sin tratar, se debería a que la fibra es muy flexible y por esta razón se aumentó la cantidad de pasta geopolimérica para producir mejores propiedades de flexión, mientras que los compuestos con tejidos de fibras tratadas no presentaban buena flexibilidad; sin embargo, se redujo la absorción de agua y se incrementó la rugosidad, lo cual condujo a una menor contracción y una mejor interfaz fibra-matriz.

El mejor resultado de resistencia a flexión en compuestos NFRG con tejidos de lino (FF) se obtuvo al incorporar un 2.0% de nanoarcilla; con esto, se logró una resistencia de 31.0 MPa a las 4 semanas de envejecimiento en comparación los 4.50 MPa del GP (Assaedi et al., 2017). Así mismo, se presentaron similares resultados al anterior estudio, donde esta mejora de las resistencias se debe a que los nanocompuestos de NFRG adquirieron una mayor densidad conduciendo a una mejor adhesión entre de los FF y la matriz (Assaedi et al., 2019).

5.1.4.4 Resistencia a la tracción de un NFRG respecto a un GP

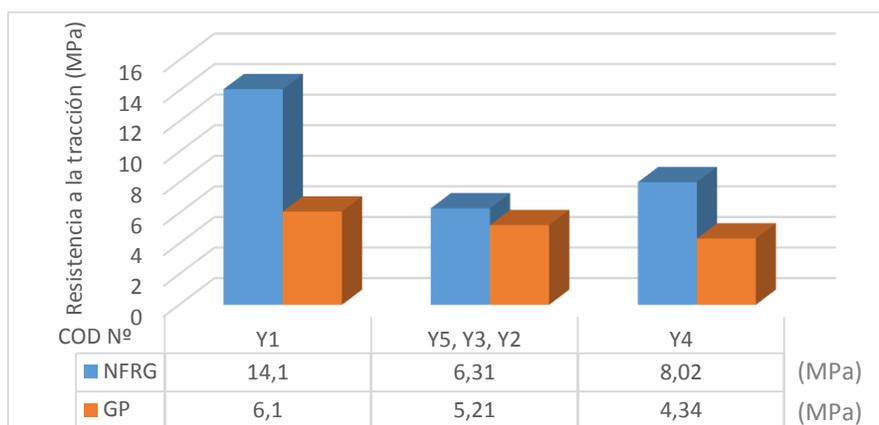


Figura 14: Resultados de resistencia a la tracción

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

Otro de los ensayos que ha ayudado a comprender la interacción de los tejidos con los compuestos NFRG, es el ensayo a tracción, cuyos resultados se muestran en la **Figura 14** y **Anexos 7 al 11**. En los estudios de resistencia a tracción se han seguido las recomendaciones de las normas (ASTM C1275, 2011; ASTM C1557, 2015).

No existen muchos estudios en los que se obtenga la resistencia a la tracción en compuestos NFRG con tejidos de yute (JF). Sankar & Kriven, (2014) determinaron la mayor resistencia a tracción en compuestos NFRG, preparados con 0.5% en peso de JF y tratados con álcali. En este estudio se obtuvo un incremento de resistencia a tracción considerable, alcanzando 14.10 MPa aproximadamente, en comparación con los compuestos NFRG con 0.3% en peso de JF sin tratar, mismos que alcanzaron tan solo 6.10 MPa. Esta mejora en la resistencia se atribuye a que el JF tratado con álcali redujo el ángulo de microfibrilla y la eliminación de la hemicelulosa, volviéndolas hidrófobas, permitiendo que las fibras tengan una menor contracción en el compuesto durante las pruebas de tracción.

5.1.4.5 Resistencia al impacto y tenacidad a la fractura de un NFRG respecto a un GP

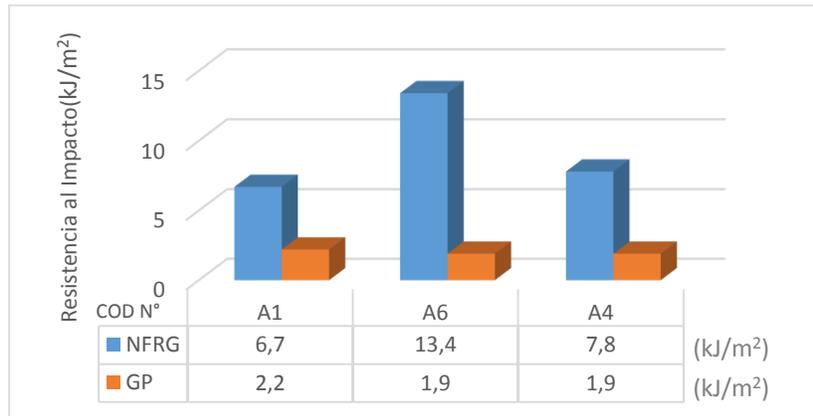


Figura 15: Resultados de resistencia al impacto

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

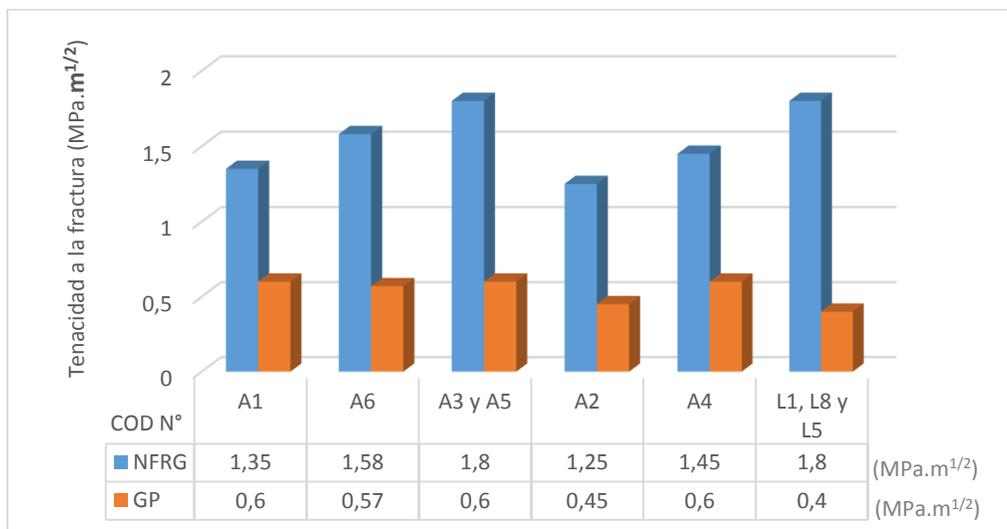


Figura 16: Resultados de la tenacidad a la fractura

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

La resistencia al impacto de los diferentes estudios se ha realizado de acuerdo a la norma ASTM D3763, (2003) y la tenacidad a la fractura siguiendo la norma ASTM C1018, (1997). Donde, en las **Figuras 15 y 16** o a su vez en los **Anexos 1 al 6 y 13,17,20** se muestran la variación de resultados de estas dos propiedades mecánicas.

Como se puede observar, los ensayos para determinar la resistencia al impacto son mínimos de la bibliografía analizada. Se obtuvo el reporte de una resistencia al impacto alta con un 8.3% en peso de CF, los cuales fueron sometido a un proceso de envejecimiento en seco; alcanzando los 13.4 kJ/m² en comparación con los 1.9 kJ/m² de un GP con el mismo curado (Alomayri et al., 2014). Sin embargo, la mayor tenacidad a la fractura se observó en el informe de Alomayri, Shaikh, et al., (2014a, 2014c), donde se determinó que a medida que aumenta el contenido de CF, el valor de tenacidad a la fractura también aumenta; tal es el caso de un compuesto NFRG con el 8.3% en peso de CF orientados horizontalmente, donde alcanzó los 1.8 MPa.m^{1/2} respecto a los 0.6 MPa.m^{1/2} de un GP. Esta tenacidad a la fractura máxima que se obtuvo anteriormente, también se puede ver reflejada en los compuestos NFRG con 4.1% en peso de FF (Assaedi et al., 2014, 2018; Assaedi, Alomayri, et al., 2015). Esta mejora se atribuye a la capacidad de las fibras para resistir la deflexión, el desprendimiento y el puenteo de las grietas, la cual ralentiza la propagación de estas en los compuestos con fibras y, por lo tanto, aumenta la energía de fractura (Reis, 2006; F. de A. Silva et al., 2009, 2010).

5.1.4.6 Dureza de un NFRG respecto a un GP

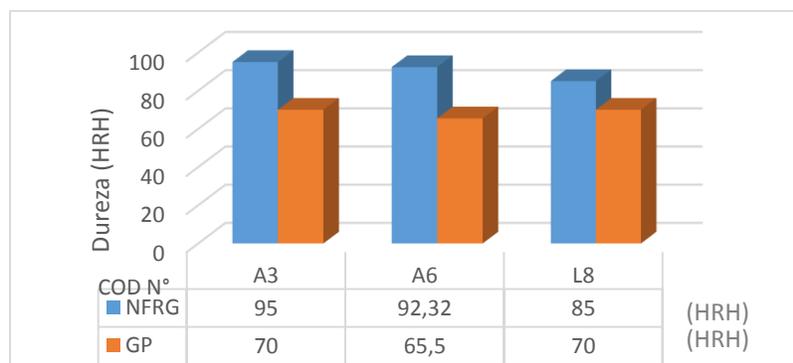


Figura 17: Resultados de la dureza

Fuente: Broncano J. & Córdova L.

Los resultados de la variación de la dureza de los compuestos NFRG reforzados con distintos tejidos, obtenidos en diferentes estudios, se presentan en el **Figura 17**, como en los **Anexos 2, 3 y 19**. La dureza se estudió mediante la escala Rockwell.

La propiedad de dureza mejoró en todos los compuestos NFRG, independiente del tipo de tejido que se le haya añadido. Así es que, el estudio que presentó la durabilidad más alta en los compuestos NFRG con el 8.3% en peso de CF orientados horizontalmente, alcanzó los 95.0 HRH, respecto a los 70.0 HRH de un GP. Este aumento de dureza en los geopolímeros reforzados tanto con CF o FF orientados horizontalmente, podría deberse a una distribución uniforme de la carga sobre los tejidos, la cual disminuyó la penetración de la bola de prueba en el material compuesto (Alomayri, Shaikh, et al., 2014a).

5.1.4.7 Análisis termogravimétrico TGA

Gran parte de los estudios revelan pérdida de peso por etapas, tanto de las fibras, de los GP y en los NFRG; donde cada autor describe los límites de cada etapa en sus respectivos estudios, pero en definitiva la gran mayoría se asemejan. Las fibras muestran una pérdida de peso drásticamente en tres etapas: la primera ocurre de 50 a 250 °C, producto de la pérdida de humedad retenida en las fibras de algodón; la segunda etapa va de 250 a 370 °C donde pierde peso debido a la degradación de la celulosa y la tercera etapa, ocurre sobre los 370 °C, ya que la fibra de algodón comienza a descomponerse. Los termogramas realizados a un GP muestran una pérdida de peso a temperaturas que van de 50 a 300 °C, causada por la evaporación del agua libre, posteriormente tiene otra pérdida de peso por encima de 300 °C debido a la deshidroxilación del agua unida químicamente. Mientras que los compuestos NFRG mostraron una pérdida de peso a una temperatura de aproximada de 250°C, debido a la evaporación de la humedad; consecutivamente se registra otras dos pequeñas pérdidas de

peso a temperaturas de 250 a 800 °C, atribuyéndose a la descomposición de las fibras. Los distintos compuestos NFRG ya sea con CF, JF o FF mostraron pérdidas de peso similares y bajos. Esta pérdida de peso baja se debe a que la matriz geopolimérica protege a la fibra de la degradación térmica, impidiendo la entrada de aire y evitando la degradación oxidativa resultante (Alomayri, Shaikh, et al., 2014c; Assaedi et al., 2018; Sankar & Kriven, 2014).

5.1.4.8 Difracción de rayos X (XRD)

Los Difractómetros de rayos X del estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014b), revelaron que si reaccionó el OPC con la ceniza volante, creando una reacción puzolánica y produciendo gel de hidrato silicato de calcio (C-S-H), lo cual ayudó a reducir la porosidad de los compuestos. Mientras que Sankar & Kriven, (2014), dedujeron que la concentración de hidróxido de sodio utilizada era muy baja para el tratamiento de los tejidos, así mismo se pudo observar pequeñas cantidades de impurezas en el polvo de metacaolín, las cuales no reaccionaron y no participaron en el proceso de geopolimerización. Estas impurezas también fueron descritas en (Assaedi et al., 2016a, 2016b, 2017, 2019; Assaedi, Shaikh, et al., 2015; Trindade, Arêas, et al., 2018; Trindade, Silva, et al., 2017).

5.1.4.9 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía obtenida mostró un pico fuerte a $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$, característico del estiramiento asimétrico de Al – O y Si – O que es la huella de la geopolimerización. Otro pico se mostró a 1418 cm^{-1} el cual se atribuye a la presencia de la fibra de lino en los compuestos NFRG. Las bandas en 3385 y 1653 cm^{-1} aumentan debido al agua absorbida en las fibras celulósicas (Assaedi et al., 2016a; Assaedi, Alomayri, et al., 2015; Assaedi, Shaikh, et al., 2015). Así mismo, se mostró un pico aproximado de $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$, la cual indicó que existió el proceso de geopolimerización; pero, a las 32 semanas, se vio un cambio en el mismo

pico que fue más ancho y bajo a 3400 cm^{-1} , indicando que la reacción continuó a baja velocidad consumiendo más grupos OH y permitiendo que el compuesto se vuelva más fuerte (Assaedi et al., 2017, 2019).

5.1.5 Mecanismos de falla basados en microscopía electrónica de barrido (SEM)

Los escaneos SEM ayudaron a determinar los mecanismos de falla, como el comportamiento de la fibra en cuanto a la rotura, el desprendimiento, puenteo de grietas, la huella que deja la fibra luego de practicar los distintos ensayos mecánicos a los compuestos, la interacción de la fibra con la matriz y también permitió observar las fallas que sufre la matriz. Tales mecanismos de falla que se presentarán en la **Figura 18** (Assaedi, Alomayri, et al., 2015) que servirán como referencia para poder describir y comparar los mecanismos de falla que presentaron los estudios de compuestos NFRG.

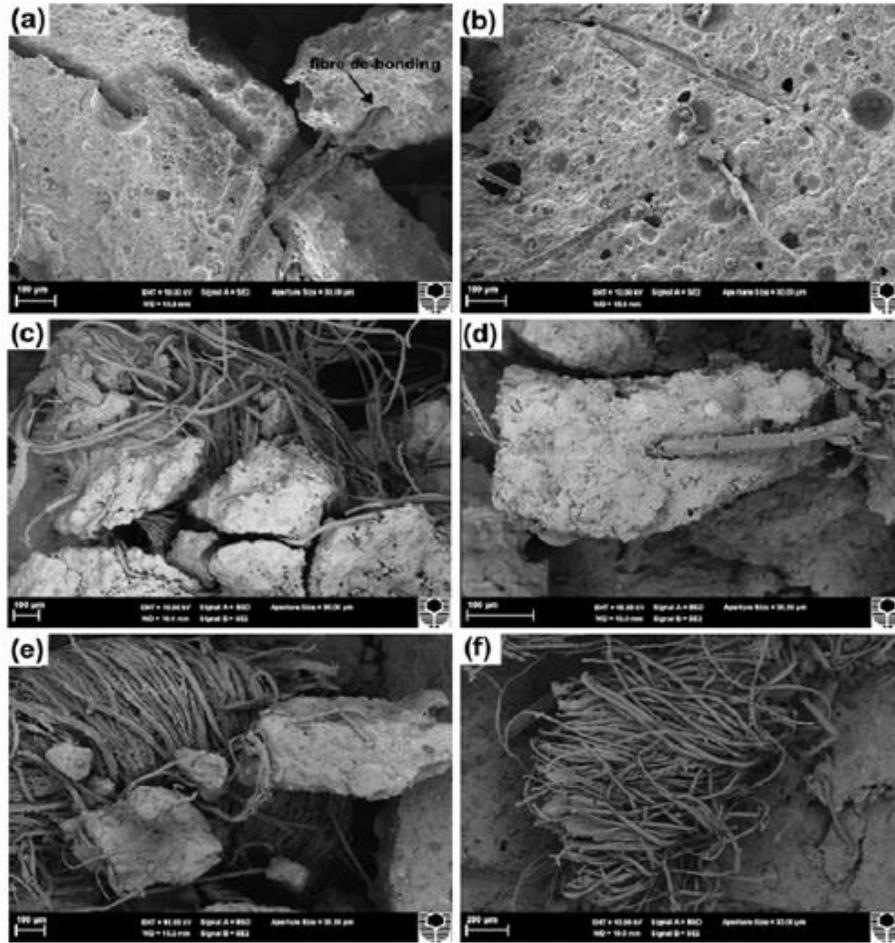


Figura 18: *Mecanismos de falla en compuestos NFRG, (a) despegado de la fibra, (b) huella y el desprendimiento de la fibra, (c) grietas de puente de la fibra, (d) y (e) adhesión entre la fibra matriz), y (f) fractura de fibra.*

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

En la gran mayoría de estudios se mostró que la unión fibra-matriz presentó un comportamiento muy débil, existiendo espacios entre la fibra y la matriz (Alomayri & Low, 2013; Assaedi et al., 2014; Sankar & Kriven, 2014; Sikapizye & Habanyama, 2020). Así mismo, se pudo observar el puenteo de grietas al someter las muestras bajo la acción de carga (Alomayri, Shaikh, et al., 2014b). Además, se pudo evidenciar el desprendimiento y la huella que deja la fibra en el momento que empezó a degradarse producto de la exposición a altas temperaturas (Alomayri et al., 2014; Assaedi et al., 2014; Assaedi, Alomayri, et al., 2015;

Trindade, Alcamand, et al., 2017). Por otro lado, las fallas en la matriz producto de la porosidad y las micro fisuras, se crearon a las primeras horas de curado cuando el agua en el interior de la matriz buscó una salida (Assaedi et al., 2016a, 2017; Assaedi, Shaikh, et al., 2015; Trindade et al., 2019; Trindade, Arêas, et al., 2018; Trindade, Borges, et al., 2018). En cuanto Assaedi et al., (2016b), pudo evidenciar partículas de las cenizas volantes en especial mullita y cuarzo sin reaccionar; sin embargo, estas partículas actuaron como relleno en la matriz, como se muestra en las imágenes SEM de la **Figura 19**.

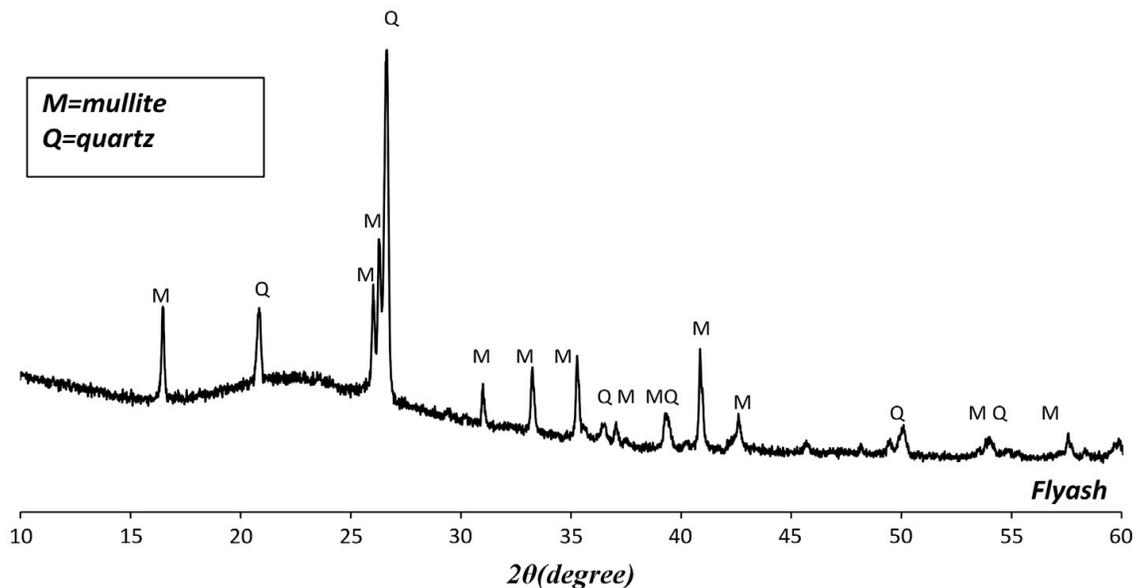


Figura 19: Patrón de DRX de las cenizas volantes. Donde, *M* = Mullita, *Q* = Cuarzo y *F* = Fluorita.

Fuente: Assaedi et al., (2016b)

5.1.6 Estudios de durabilidad de los tejidos de fibras naturales

La finalidad de realizar tratamientos a las fibras naturales y tejidos en conjunto nace de la necesidad de mejorar la unión interfacial entre las fibras y la matriz, ya sea por efecto de que las fibras son hidrófilas y absorben grandes cantidades de agua de la matriz, o como la presencia de pectinas y sustancias cerosas que impiden una correcta interacción con la

matriz (Yan et al., 2014b). Ya que se ha podido evidenciar en los anteriores estudios estos mecanismos de falla en los compuestos NFRG de algodón, yute y lino.

Sin embargo, la escasa información sobre los tratamientos de los tejidos de fibras celulósicas para reforzar compuestos geopoliméricos, impiden realizar un análisis de resultados y determinar si esta hipótesis sobre el mejoramiento de los tejidos tratados pueda ser validada por un gran grupo de investigadores; por lo cual, se abre un gran nicho de investigación referente a este tema. Así mismo, Yan et al., (2016) especifica la escasa información de la durabilidad de los compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos celulósicos tratados; por lo que recomienda que se usen los mismos tratamientos que se realizaron para los compuestos de cemento reforzados con fibras o tejidos celulósicos FRC, teóricamente hablando, es decir nada comprobado hasta el momento en compuestos NFRG.

Uno de los tratamientos químicos más usados, es el que se realizó por el medio del tratamiento “alcalino”, el cual Belgacem & Gandini, (2005) describe que por medio de la acción química se reduce el número de grupos hidroxilos que son reactivos con la matriz cementante. También provocan la eliminación de hemicelulosa y otros azúcares soluble permitieron la división de la fibra en fibrillas, aumentando el área superficial efectiva para la unión entre las fibras y la matriz (Sedan et al., 2008; Wan Jo et al., 2015).

5.1.6.1 Tratamiento de tejidos para compuestos NFRG

Solo se ha podido acceder a un estudio, en el cual se aplica este tratamiento alcalino usado en compuestos NFRG. Sankar & Kriven, (2014) elaboraron un compuesto geopolimérico con tejidos de yute tratados en un medio alcalino; para lo cual, los tejidos se colocaron en un horno a 70 °C por 24 h y después se cortaron para humedecerlos en una solución de hidróxido de sodio al 0.5 % en p/v, a una relación fibra: solución de 1:30, para

que finalmente los tejidos reposen durante 24 horas más. Luego, la tela se lavó en agua desionizada para alcanzar un pH de 7 y luego puedan ser secadas al ambiente ~22°C durante 48 h y volver a colocarlas en un horno a 55 °C por 24 h más.

Obteniendo resultados como un aumento considerable de la resistencia a la tracción, cuyos valores se mostraron en la **Figura 14**, con la finalidad de apreciar la variación de resultados con los demás estudios. El alargamiento a la rotura de igual forma se ve afectado, así como también se pudo observar que las fibras se vuelven menos hidrófilas, lo que reduce la absorción de humedad de la matriz y por ende se aumente el área de contacto para la interfaz, dando como resultado que se otorguen mejores propiedades mecánicas a los compuestos (Roy et al., 2012).

De igual manera, Yan et al., (2016) describe que indirectamente la matriz geopolimérica actúa como un agente protector de la fibra celulósica o de la degradación por efecto de las altas temperaturas, lo que impide la entrada de aire y por ende se dé la degradación oxidativa resultante; así como se demostró en los estudios de Alomayri, Trindade y Assaedi, donde realizó un curado de las muestras a temperaturas elevadas.

5.2. Usos y aplicación de los materiales compuestos NFRG

5.2.1 Usos y aplicaciones de geopolímeros simples

Pistas de aeropuerto

Glasby et al., (2015) realizó la aplicación más grande de un nuevo hormigón en el mundo, el cual colocó 40.000 m³ de geopolímero de 435 mm de espesor en el nodo de giro, plataforma y calles de rodaje del aeropuerto Brisbane West Wellcamp (BWWA). Este hormigón geopolimérico está compuesto a base de cenizas volantes con escorias de alto

horno como fuente de aluminosilicatos, una relación de 0.41 (agua: ligante), activador químico, agregado grueso con un tamaño máximo nominal de 40 mm y un aditivo reductor de agua patentado. La colación de este material se realizó de manera similar al concreto convencional, el cual se transportó en volquetas desde una planta de producción y se depositó sobre la extendidora de encofrado deslizante; del mismo modo, las juntas se realizaron con una sierra de 1 a 5 horas después de que se colocó el material. Este geopolímero patentado como Earth Friendly Concrete (EFC), debía prestar altas resistencias a la flexión, baja contracción y características de trabajabilidad; la cual los ingenieros consultores obtuvieron buena trabajabilidad y logró una resistencia a la flexión de 4.8 MPa a los 28 días; sin embargo, alcanzaron los 5.8 MPa con una desviación estándar de 0.6 MPa.

Elementos prefabricados para puentes y rampas de botes

Wagners Global Services es una empresa australiana, la cual hasta el 2012 había vertido un volumen total de más de 3000 m³ de concreto de geopolímero, ya sea en aplicaciones prefabricadas o in situ, debido a que cumple con los requisitos de desempeño relevantes de las normas australianas. Este concreto geopolimérico está fabricado a base de cenizas volantes y GGBS con un agregado de tamaño máximo de 10 mm.

En el año 2009, la empresa Wagners construyó el puente en la Planta Murrarie – Australia, que consta de vigas de fibra de vidrio pultruidas y que soportan una losa de concreto geopolimérico grado 40 ($f'c = 40$ MPa). Toda la estructura fue prefabricada en la planta de producción y posteriormente se trasladó para su colocación. Por otra parte, la misma empresa en el año 2011, se adjudicó el reemplazo de la rampa para botes mediante unidades de tabloncillos prefabricados grado 40 y, reforzados con una barra de fibra de vidrio. Las unidades de rampa prefabricadas se prepararon por lotes en la ciudad de Toowoomba mismas

que fueron unidas mediante la fundición de concreto geopolimérico elaborado in situ; para lo cual, se transportó por separado la fuente de alúmina y sílice que, finalmente fueron activadas químicamente en el sitio de la construcción (Aldred & Day, 2012).

Columnas y vigas de hormigón geopolimérico

Albitar et al., (2017) realizó un estudio experimental en miembros estructurales como columnas y vigas de hormigón geopolimérico, con el fin de determinar el comportamiento a un nivel próximo a ser implementado in situ. Este geopolímero fue elaborado a base de cenizas volantes con escorias de la fundición del plomo granulado (GLSS) como fuente de aluminosilicatos, activados mediante una solución de (Na_2SiO_3) e (NaOH) a 14 M, también se usó agregado grueso piedra azul con un tamaño máximo de 10 mm. Antes de analizar las columnas y vigas, se determinó la resistencia a la compresión de la matriz en probetas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, alcanzado los 35 MPa y en columnas delgadas fue de 30 MPa; sin embargo, no se podía deducir que se obtendrían las mismas resistencias en los elementos estructurales a gran escala. Las secciones de las vigas y las columnas contaban con reforzamiento longitudinal y transversal con barras de acero corrugadas, tal como una de OPC. Una vez realizadas las diferentes pruebas en los miembros estructurales de geopolímero, se pudo observar que el modo de falla y la respuesta estructural es similar a los elementos estructurales a base de OPC. Además, se pudo observar que las cargas axiales en las columnas cortas se reducían a medida que se aumentaba la excentricidad, este comportamiento también se observó en las columnas esbeltas. Por lo tanto, se estableció que las normas para el diseño de columnas de OPC, pueden adaptarse para el diseño de columnas de geopolímero a base de cenizas y escorias; sin embargo, Albitar et al., sugieren formular

más investigaciones para determinar el comportamiento mecánico de los elementos estructurales a una escala macro o en volúmenes más grandes.

5.2.2 Usos y aplicaciones de geopolímeros reforzados con fibras

Estudio de la adherencia en el hormigón armado

Los compuestos de matriz geopolimérica reforzados con fibras de acero (S-FRGM) se han estudiado como una nueva herramienta para reforzamiento de estructuras de hormigón armado (RC). Por esta razón, Carabba et al., (2017) estudió el comportamiento de adherencia mediante la variación de la concentración molar de la solución activadora en el compuesto. La franja de material compuesto estaba elaborada por una capa de fibras de acero colocadas unidireccionalmente y pasta de geopolímero que se unían al hormigón conjuntamente. Los nuevos sistemas se cubrieron con plástico y se almacenaron por 7 días hasta el día de la prueba. A la edad de 28 días se alcanzaron los valores más altos de flexión (5.6 MPa) y compresión (33.6 MPa) de los compuestos con la concentración más alta de activador (8M). Finalmente, se evaluó la adherencia mediante el ensayo de corte directo para lo cual, el sistema con una concentración de 4M de activador mostró una falla interlaminar y alcanzó una máxima carga de tensión de 8.65 kN; así mismo, lo confirmaron las observaciones SEM, donde también se determinó una adecuada compatibilidad y adherencia entre el compuesto geopolimérico y el hormigón; ya que, el tipo de falla identificada explica que la capa externa de la matriz fue quien se desunió, mientras que la capa interna de la matriz permaneció unida junto con las fibras de acero a la superficie del hormigón. De tal manera, el autor concluye que este sistema de refuerzo en estructuras de hormigón es fiable y aplicable en este sector por su buen desempeño.

Vigas de hormigón de geopolímero con fibras de acero

Tran et al., (2019) estudiaron el comportamiento a flexión de vigas de hormigón de geopolímero reforzado con fibras de acero. Para lo cual, el geopolímero se elaboró a base de cenizas volantes bajas en calcio y escorias granuladas de alto horno, activadas mediante una combinación de hidróxido de sodio 12M y silicato de sodio grado D; el agregado grueso tuvo un tamaño de 7 mm junto con arena de sílice. Al concreto de geopolímero se agregaron fibras de acero de 35 y 60 mm en fracciones de volumen de 0.0, 0.375, 0.75 y 1.50%; la viga de 150 x 200 x 1700 mm fue armado con varillas de 10 mm para refuerzo longitudinal y transversal. Una vez terminada la fundición, las vigas se desencofraron a los 3 días para luego envolverlas con plástico y finalmente, almacenarlas por dos meses a temperatura ambiente. Los resultados demostraron que la viga con 0 a 0.375% en fibra, tuvo un aumento en la capacidad de carga; sin embargo, la máxima capacidad de carga se observó en la viga con 0.75% de fracción de volumen de fibra llegando a alcanzar los 39 kN; por otra parte, la viga con 1.5% mostró una reducción de capacidad del 18.0% en comparación con la viga con 0.75% de fracción de volumen. Así mismo, también se demostró que la fibra con una longitud de 35mm es suficiente para evitar que sea extraída antes que la viga se rompa. Estos resultados se compararon con los obtenidos para una viga tradicional mediante los métodos de análisis que rigen en las ASTM; sin embargo, se evidenciaron algunas inconsistencias en los resultados de las vigas de concreto de geopolímero, debido a las propiedades de los materiales usados. De tal manera, los autores concluyeron que estos métodos si son aceptables para determinar dichas propiedades, pero para más exactitud se recomienda profundizar en el tema.

Aplicación de impresoras 3D

Kinga Korniejenko et al., (2020) elaboraron un geopolímero reforzado con diferentes tipos de fibra para ser aplicado en impresión 3D y que pueda ser usada en la ingeniería civil. Este compuesto está formado a base de cenizas volantes clase F mezcladas con arena que fueron activados por una solución de hidróxido de sodio a 10 M con silicato de sodio y, reforzada con fibras de lino verde entre 30 y 50 mm de longitud o fibras de carbono 5 mm y un diámetro de 8 μm . Las muestras fueron realizadas por simulación de inyección del proceso de impresiones 3D, mismas que se curaron por 7 y 28 días, obteniendo pastas con una fluidez adecuada para trabajar en la simulación de impresión 3D además de obtener una pequeña disminución de la densidad a los 28 días (1.48 g / cm^3 para los compuestos con lino y 1.58 g / cm^3 con carbono), respecto al geopolímero sin reforzar (1.62 g / cm^3). Se obtuvo una resistencia a la compresión aproximadas entre las muestras de simulación 3D de 48 MPa (F. Carbono), 39 MPa (F. Lino) y 47 MPa (sin refuerzo), así como la resistencia a la flexión que fue de 7.7 MPa (F. Carbono), 6.6 MPa (F. Lino) y 7.3 MPa (sin refuerzo); todas estas resistencias a los 7 días. Estos resultados demuestran la efectividad y la compatibilidad del método de simulación de impresión 3D con la de fundido tradicional, así mismo de apostar con los compuestos de lino a crear materiales amigables con el ambiente. Sin embargo, Korniejenko describe que se necesita de más investigación para desarrollar y optimizar el compuesto geopolimérico.

5.2.3 Usos y aplicaciones geopolímeros de reforzados con tejidos

Refuerzo de vigas de hormigón con tejidos de acero y carbono

Menna et al., (2013) desarrolló un geopolímero a base de metacaolín con agregado de polvo de sílice que fueron activados por hidróxido y silicato de sodio. Se evaluaron muestras

cúbicas de 50 mm que a los 28 días los resultados de densidad y compresión fueron de 1.9 g/cm³ y 98 MPa respectivamente. El refuerzo de las vigas se lo realizó mediante dos sistemas; en el primero, se utilizó cordones de acero de un diámetro de 250 μ m aproximadamente, estos cordones se sujetaron mediante filamentos textiles tejidos perpendiculares para alinear los cordones longitudinalmente. Por otro lado, se utilizó tejido de fibras de carbono con un espesor de fibra de 0.064 mm y una densidad de superficie de 238 g/m² y los hilos de carbono se colocaron cada 5 mm en la dirección de la urdiembre. Las vigas fueron fundidas de 0.40 x 0.20 x 3.80 m, con una resistencia del hormigón de 25 MPa y un límite elástico del acero de refuerzo de 450 MPa; las vigas fueron armadas con 2 y 5 barras de acero de 10 mm con estribos de 8 mm cada 100 y 50 mm. El reforzamiento de las vigas para cada sistema empezó con la aplicación de una capa de geopolímero más fluida y al día siguiente se colocó la pasta de geopolímero descrita en el procedimiento; luego se colocó la cinta de acero o carbono (200 o 300mm) de acuerdo con la longitud de diseño y se presionó para asegurar su anclaje, se colocó una capa adicional de pasta sobre el refuerzo; finalmente, se cubrió con una capa de PVC y se mantuvo así durante 28 días. Las pruebas de flexión para el sistema de reforzamiento con cordones de acero presentaron los mejores resultados y comportamiento, alcanzado una carga final de 86 kN y una deformación de 107.5 mm en comparación con la viga de control que arrojó una carga última de 42.6 kN y una deformación final de 142.2 mm. Este sistema no presentó desprendimiento entre la matriz y el concreto, debido a que el geopolímero es capaz de formar una unión fuerte y continua entre la superficie de concreto y la fibra. Sin embargo, el sistema con tejidos de carbono, pese a no haber presentado desprendimientos, los autores dedujeron que la falla se debería a la desunión entre las fibras y la matriz, ya que por la fluidez limitada de la resina esta no penetró en los hilos de

filamentos de la fibra, provocando la baja capacidad de transferencia de carga hacia el refuerzo.

Aplicaciones para resistencia al fuego

Lyon et al., (1997) probaron a altos niveles de calor, un compuesto geopolimérico a base de aluminosilicatos de sílice más óxido de potasio y reforzado con tejidos de fibra de carbono, comparándolo con un compuesto de matriz orgánica como el poliéster reforzado con fibras de vidrio o carbono, vinilo, entre otros refuerzos; mismos que son usados en transporte, equipos militares e infraestructuras resistentes al fuego. Los compuestos geopoliméricos fueron colocados en el interior de bolsas al vacío y curados a 80 °C por 3 horas; luego se sacaron de las bolsas y se las volvió a secar a 100 °C por 24 horas más. Para comparar estos materiales fueron sometidos a 50 kW/m² (fuego bien desarrollado), donde se pudo observar que los compuestos de poliéster reforzados se encienden con mucha facilidad, liberando humo y calor; mientras que, los compuestos geopoliméricos reforzados con tejidos de carbono no participaron de la combustión, tampoco liberaron humo y solo observaron un cambio de color a blanco sin llegar a encenderse. Además, éste geopolímero luego de haber soportado una gran exposición al fuego, retuvo un 67% de la resistencia a la flexión y para el compuesto a temperatura ambiente alcanzó una resistencia de 245 MPa.

Reparación y rehabilitación de vigas de hormigón armado

Balaguru et al., (1997) ha realizado pruebas en vigas de hormigón armado tradicionales, mismas que han sido reforzadas con matriz geopolimérica y tejidos de fibra de carbono, en lugar de usar matrices de polímeros orgánicos para adherir los tejidos de carbono al hormigón. Las vigas de hormigón armado fueron preparadas mediante el esmerilado y

aplicando un chorro de arena para eliminar el hormigón débil o residual, con el fin que parte del agregado quede expuesto y lograr obtener una superficie rugosa. Se reforzó con 0, 2, 3 y 5 capas de tejidos de carbono impregnadas con la matriz geopolimérica para evitar pérdida de pasta en los tejidos. Estos tejidos se aplicaron por medio de una primera capa de matriz geopolimérica sobre la cara inferior de la viga donde se encuentran las tensiones y posteriormente colocar las capas de tejido humedecidas con la matriz; para finalmente ser curadas a una temperatura de 80 °C por 24 horas. Las vigas se ensayaron bajo una cara de cuatro puntos y simplemente apoyadas. Se observó que tanto el geopolímero con los tejidos y el hormigón son compatibles, ya que tuvo una buena adherencia entre los diferentes materiales. La falla de las vigas con los diferentes contenidos de tejidos se dio cuando las telas se rompieron; llegando a determinar un mejor comportamiento de la interfaz del geopolímero con los tejidos, en comparación a la interfaz de un concreto reforzado con un tejido, ya que la falla más común en estos compuestos es la delaminación. Además, el geopolímero a más de ser compatible con el hormigón, este funcionó como una barrera contra el fuego, siendo duradero bajo la degradación ante la luz ultravioleta o la intemperie, no es tóxico porque es a base de agua y el sobrante se puede desechar como cualquier otro residuo de construcción.

5.2.4 Usos y aplicaciones de geopolímeros reforzados con tejidos de fibras naturales

En la actualidad no existen estudios de compuestos NFRG aplicados en las diferentes industrias, debido a que es un material que necesita de mucha más investigación para ser implementados en la vida real. Sin embargo, este nuevo material aún está pasando por varias fases experimentales de laboratorio (probetas), en los que se ha obtenido un igual o mejor comportamiento en sus propiedades mecánicas y físicas, en comparación a un geopolímero

simple, uno reforzado con fibras artificiales (AFRG) o incluso un hormigón de cemento portland ordinario (OPC). Así mismo, no se pueden encontrar estudios, donde se hayan implementado los compuestos NFRG en algún campo de la ingeniería civil y demás industrias; lo cual, abre un amplio campo de investigación sobre la aplicación de los compuestos geopoliméricos reforzados y aún más los compuestos NFRG en las diferentes industrias y, así mismo, en el campo de la construcción y la ingeniería civil, a la cual se ha enfocado este estudio.

5.3 Usos potenciales de los NFRG

Si bien es cierto que en la actualidad no se han encontrado estudios donde se implementen los compuestos NFRG en la construcción, ingeniería civil o las demás industrias, se podría identificar las potenciales aplicaciones a las que se podrían destinar estos materiales, de acuerdo con resultados obtenidos en los estudios sobre compuestos NFRG que se han revisado en esta investigación, sabiendo de antemano que las investigaciones experimentales solo se centran en el diseño de la mezcla del compuesto. Se tiene conocimiento que existe un déficit de información acerca del desempeño de los compuestos NFRG a nivel de miembros estructurales o aplicaciones en los diferentes campos de la construcción en la vida cotidiana.

Las aplicaciones potenciales citadas a continuación son de estudios donde tan solo sugieren y observan el posible fin del material para su uso, mas no afirman sobre una verás aplicación, ya que de igual forma este compuesto se encuentra en un punto donde solo se ha realizado ensayos experimentales de laboratorio en probetas.

Uno de los principales usos potenciales, y a lo que todo autor apunta en las investigaciones que realizan sobre compuestos geopoliméricos reforzados y sin reforzar; es

ser uno de los principales materiales sustituto del cemento portland ordinario OPC (Albitar et al., 2017; Alomayri, Shaikh, et al., 2014b; Assaedi et al., 2019; McLellan et al., 2011; F. Pacheco-Torgal et al., 2012). Sugiriendo que este material compuesto NFRG sea considerado como una alternativa natural y ecológica del hormigón tradicional (Alomayri, Shaikh, et al., 2014a; Alomayri & Low, 2013).

Un geopolímero posee altas resistencias a la compresión, incluso pueden llegar a ser mayores a la resistencia de un OPC; sin embargo, este material geopolimérico sufre una falla frágil, por lo que se necesita el reforzamiento con fibras o tejidos ya sean naturales o sintéticos, mismos que ayudarán a aumentar tanto la resistencia a la compresión y mucho más las resistencias a la flexión, tracción y tenacidad, volviéndolas más dúctiles e incluso más duraderas (Trindade, Borges, et al., 2018). Según anteriores estudios experimentales de laboratorio, un geopolímero sin reforzar alcanzaba una resistencia alrededor de los 20 MPa, al momento de reforzarlos con tejidos de algodón estos llegaban a los 93 MPa, siendo una resistencia incluso mucho mayor a la de un hormigón ordinario de 21 MPa o incluso de uno a altas resistencias de 28-50 MPa; Del mismo modo, se puede observar en el apartado 5.1.4.2 y 5.1.4.3, que la resistencia a la flexión y tracción en la gran mayoría de compuestos NFRG aumenta respecto a un GP e incluso a un OPC (Alomayri, Shaikh, et al., 2014a, 2014c).

Observando estas mejoras al integrar fibras o tejidos de fibras celulósicas en los geopolímeros, Assaedi et al., (2014, 2016b) describen a este material con un gran potencial para ser usado como materiales de la construcción y la edificación. Tal es el caso, en el cual se usó un compuesto geopolimérico reforzado con tejidos de fibras de carbono, que presentó un buen comportamiento al someterlo al fuego (Lyon et al., 1997), llevándonos a señalar que el compuesto NFRG es un material prometedor para ser usado como barrera contra el fuego

ya que en estudios anteriores se pudo observar que la matriz geopolimérica protege los tejidos a las altas temperaturas (Alomayri, Shaikh, et al., 2014b).

En el estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014c) establecen la posibilidad de aplicar un geopolímero reforzado con tejidos de algodón, como un material de bajo costo ya sea en estructuras de edificios, losas, ciertos tipos de techos, tejas de revestimiento, tuberías, torres de enfriamiento, revestimiento de estructuras o tecnología que pueda estar expuesta a temperaturas altas como un incendio forestal, estructuras subterráneas y donde deban soportar grandes esfuerzos como túneles, carreteras, prefabricados, entre otras (Alomayri et al., 2014; Trindade, Arêas, et al., 2018).

Uno de los mayores enfoques que los investigadores buscan obtener con el mejoramiento de las propiedades de los compuestos NFRG, es para que sea un material potencialmente útil para ser aplicado en la construcción de edificaciones, concretamente en la parte estructural; además, que comparta un ideal al crear materiales respetuosos con el medio ambiente (Alomayri et al., 2014; Assaedi et al., 2016a, 2018; Assaedi, Alomayri, et al., 2015; Trindade, Silva, et al., 2017).

Otro de los posibles usos potenciales de los compuestos NFRG, muy a parte de la construcción y la ingeniería civil, también podría ser destinado al uso en la aeronáutica y en la industria automotriz, donde se necesitan compuestos o piezas donde puedan soportar la energía de impacto y altas temperaturas (Frydrych et al., 2019).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Entre las fibras que se han usado hasta la actualidad para el reforzamiento de materiales compuestos geopoliméricos, tenemos a las fibras sintéticas tales como, fibra de carbono, vidrio, polipropileno y metálicas; sin embargo, la producción y la utilización de este tipo de fibras, demanda un alto costo y riesgo para la salud si no se manipulan adecuadamente, además de ser un material no amigable con el ambiente. Por esta razón, en los últimos años se ha venido implementando el uso de las fibras naturales celulósicas como fibras de yute, algodón, lino, sisal, cáñamo, coco, bambú, lana y rafia, para el reforzamiento de compuestos geopoliméricos, de los cuales se han obtenido similares resultados que los compuestos con fibras sintéticas.
- Para la elaboración de un material compuesto geopolimérico se pueden usar distintas fuentes de aluminosilicatos que en su composición química tengan un alto contenido de alúmina y sílice tales como cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín, caolinita y arcillas; mismos que pueden mezclados con agregados finos como arena de río que actúa como un relleno o nanopartículas de arcilla y sílice para el mejoramiento de las propiedades de la matriz geopolimérica. Por otra parte, para lograr la activación de los aluminosilicatos, se ha venido usando precursores a base de hidróxido de sodio o potasio y silicato de sodio o la combinación de estas, de lo cual, esta última ha sido la más empleada en los estudios analizados. En cuanto a la interacción entre la matriz y el refuerzo, a lo cual se lo denomina técnicamente “interfaz”, esto dependerá de múltiples factores como el volumen, tamaño,

propiedades y orientación, tanto de las fibras como de los tejidos; así del mismo modo, estará relacionado a la temperatura de curado del compuesto.

- El proceso de elaboración de un compuesto geopolimérico parte de la elaboración de la matriz geopolimérica, la cual se la realiza mediante un mezclado en seco, donde se prepara la fuente de aluminosilicatos mediante un mezclando manual en estado seco con algún agregado en el caso de que se incorpore, y en cuanto a la preparación del activador, ya sea combinando hidróxido y silicato de sodio en base a las concentraciones molares establecidas; estos dos componentes son colocados en un mezclador mecánico y son incorporados hasta formar una pasta homogénea. Así mismo, se puede realizar un mezclado en estado húmedo, el cual consiste en verter en un solo recipiente las materias primas de aluminosilicatos con las del activador para mezclarlo todo en conjunto. Posteriormente, para que se considere un material compuesto geopolimérico, debe estar provisto por un refuerzo; ya sea con fibras, las cuales se incorporarán durante el proceso de mezclado de la matriz para que se distribuya en toda la pasta; o se pueden utilizar tejidos de fibras, para lo cual, estas se colocarán después de una primera capa de pasta de geopolímero con la ayuda de un rodillo, este proceso se realizará hasta alcanzar el número de capas de tejido deseadas. Finalmente, los compuestos geopoliméricos son curados ya sea por métodos térmicos o a temperatura ambiente; y, en algunos casos, aparte de usar cualquiera de estos dos métodos, se puede aplicar una carga para eliminar vacíos y resulte un compuesto más compacto.
- Se ha determinado que el comportamiento físico en cuanto a la densidad en la mayoría de los compuestos de NFRG, sufre una disminución a medida que se va aumentando

el contenido de tejido; mientras que, en los compuestos en los cuales se agregó nanopartículas, la densidad aumenta relativamente, debido a que el gel extra que se produce ayuda a disminuir la porosidad en el interior de la matriz. Por otra parte, la exposición de los NFRG a altas temperaturas, sufren pequeñas pérdidas de peso en dos etapas; la primera se observa a una temperatura aproximada a los 250 °C, debido a la evaporación del agua y, en la otra etapa, la pérdida de peso se ve reflejada cuando se superan los 250 °C hasta los 800 °C, donde se produce la degradación de los tejidos. Esta baja disminución de peso se atribuye a que la matriz protege de la degradación térmica de los tejidos. Con respecto al comportamiento químico, los análisis demostraron que aún se encontraban partículas de impurezas que no reaccionaron durante el proceso de geopolimerización, debido a la baja concentración de los activadores. Así mismo, en los compuestos de NFRG donde se añadían OPC, se observó que durante la reacción se produce un gel extra de hidrato silicato de calcio, que también contribuyó a la disminución de la porosidad de los compuestos tal como sucedió en los NFRG con nanopartículas. En cuanto al comportamiento mecánico, se evidenció un aumento en las resistencias de los NFRG a la compresión, flexión, tracción y demás propiedades características de estos materiales, como se puede observar en el apartado de resultados. En fin, la metodología para caracterizar y determinar las propiedades de los NFRG se ha desarrollado en base a normativa para compuestos de OPC como lo son las ASTM.

- Los compuestos NFRG en la actualidad se encuentran en una fase prematura, ya que está en una etapa experimental de diseño de mezclas del material compuesto en laboratorios; por lo que, no se ha encontrado estudios donde se haya aplicado a un

nivel macro o en miembros estructurales en las diferentes industrias y, mucho menos en la construcción e ingeniería civil.

- Los usos potenciales a los que podría destinarse este material compuesto, basándonos en los resultados de estudios similares con tejidos de fibras sintéticas y a los resultados de estudios experimentales en muestras de NFRG son: la elaboración de miembros estructurales de una edificación, el reforzamiento de miembros estructurales de OPC, la implementación en vías, losas, mampuestos, tejas, túneles, puentes, rampas vehiculares, paneles refractarios, moldes de fundición y la creación de prefabricados.

6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda tomar estas grandes brechas de investigación y extenderlas para desarrollar futuros estudios experimentales, ya sea diseñando mezclas de estos compuestos NFRG con más tejidos de fibras naturales o para determinar el comportamiento de este compuesto en situaciones reales aplicándolas en el campo de la construcción e ingeniería civil, basándose en esta revisión bibliográfica acerca de los compuestos NFRG desarrollados hasta la actualidad.
2. El geopolímero al ser un material que se ha venido desarrollando desde hace muchos años atrás, sería recomendable trabajar en una normativa que regule el diseño y procesos de producción de este material; para que, en base a esta se puedan desarrollar futuras investigaciones sobre materiales compuestos, como los NFRG ya que es un tema aún en auge, ya sea por motivos que promuevan el encontrar un nuevo material sustituto del cemento o por la introducción de un material amigable con el ambiente.

3. Se recomienda retomar el hilo de esta investigación, enfocándose a tratamiento de fibras y tejidos naturales, mediante un estudio práctico con la finalidad de mejorar la interfaz entre el refuerzo y la matriz; ya que, como se puede observar existe una escasa información acerca de este tema.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abú-Shams, K., & Pascal, I. (2005). Características, propiedades, patogenicidad y fuentes de exposición del asbesto. *Anales Del Sistema Sanitario de Navarra*, 28(SUPPL. 1), 7–11. <https://doi.org/10.4321/s1137-66272005000200002>
- Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., & Visintin, P. (2017). Experimental study on fly ash and lead smelter slag-based geopolymer concrete columns. *Construction and Building Materials*, 141, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.014>
- Alcaide, J. S., Alcocel, E. G., Puertas, F., & Garcés, R. L. P. (2007). Carbon fibre-reinforced , alkali-activated slag mortars. *Materiales de Construcción*, 57(288), 33–48. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/63/76>
- Aldred, J., & Day, J. (2012). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete ? 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, August, 1–14.
- Allison, J., & Cole, G. (1993). Metal · Matrix Composites in the Automotive Industry : Opportunities and Challenges. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 45(1), 19–24. <https://doi.org/10.1007/BF03223361>
- Alomayri, T., Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014). Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.jascr.2014.05.005>
- Alomayri, T., & Low, I. M. (2013). Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*,

1(1), 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2013.01.002>

Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014a). Effect of fabric orientation on mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites. *Materials and Design*, 57, 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.036>

Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014b). Mechanical and thermal properties of ambient cured cotton fabric-reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Ceramics International*, 40, 14019–14028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.05.128>

Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014c). Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 60, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.12.036>

Alomayri, T., Vickers, L., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014). Mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites at 200–1000 °C. *Journal of Advanced Ceramics*, 3(3), 184–193. <https://doi.org/10.1007/s40145-014-0109-x>

Anand, S. C. (2000). Technical fabric structures-2. Knitted fabrics. In A. R. Horrocks & S. C. Anand (Eds.), *Handbook of Technical Textiles* (First, pp. 95–129). Woodhead Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781855738966.372>

Ardanuy, M., Claramunt, J., García, J., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. *Construction and Building Materials*, 18, 281–289. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>

Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo, R. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites : A review of recent. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>

Askeland, D. R. (1998). Polimeros. In M. Toledo, R. Garay, & P. de la Garza (Eds.), *Ciencia e Ingeniería de los Materiales (Tercera, pp. 449–507)*. An International Thomson Publishing Company.

<https://chirinosilveroger.files.wordpress.com/2012/05/ciencia-e-ingenieria-de-los-materiales-askeland-3-edicion.pdf>

Assaedi, H., Alomayri, T., Shaik, F. U. A., & Low, I. M. (2014). Synthesis and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Advances in Materials Research*, 3(3), 151–161. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12989/amr.2014.3.3.151>

Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2015). Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites. *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4), 272–281. <https://doi.org/10.1007/s40145-015-0161-1>

Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2018). Advances in geopolymer composites with natural reinforcement. In *Advances in Ceramic Matrix Composites: Second Edition (2nd ed., pp. 461–474)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102166-8.00019-0>

Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2019). Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Materials*, 12(9), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma12091459>

Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2015). Utilization of nanoclay to reinforce flax fabric-geopolymer composites. *International Journal of Chemical, Molecular,*

Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 9(12), 1405–1413.

<https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.1110473>

Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2016a). Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 95, 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.007>

Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2016b). Influence of mixing methods of nano silica on the microstructural and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 123, 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.049>

Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2017). Effect of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 5(1), 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2017.01.003>

ASTM 1341. (2013). Standard test method for flexural properties of continuous fiber-reinforced advanced ceramic composites. ASTM International, 15. <https://worldwidestandard.net/wp-content/uploads/2019/02/C-1341.pdf>

ASTM C1018. (1997). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM International, 04(October), 7. <https://doi.org/10.1520/C1018-97>

ASTM C109. (2002). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in or [50 mm] cube specimen). ASTM International. https://kupdf.net/download/astm-c109_5c2baac7e2b6f5c14d04844c_pdf

ASTM C1275. (2011). Standard test method for monotonic tensile behavior of continuous

fiber-reinforced advanced ceramics with solid rectangular cross-section test specimens at ambient temperature. ASTM International, 00(2005), 1–21.

<https://worldwidestandard.net/wp-content/uploads/2019/02/C-1275.pdf>

ASTM C1557. (2015). Standard test method for tensile strength and Young ' s modulus of fibers. ASTM International, 1–10. <https://doi.org/10.1520/C1557-14.2>

ASTM C20. (2017). Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water 1. ASTM International, Reapproved 2015, 20–22.

<https://doi.org/10.1520/C0020-00R10>

ASTM C39/C39M-20. (2015). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/C39.htm>

ASTM C78. (2002). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). ASTM International, 04.02, 1–3.

https://kupdf.net/download/astm-c78_59f9b4f2e2b6f5832c26b0f9_pdf

ASTM D3763. (2003). Standard test method for high speed puncture properties of plastics using load and displacement sensors. ASTM International, 14, 1–10.

<https://worldwidestandard.net/wp-content/uploads/2019/02/D-3763.pdf>

ASTM D790. (2015). Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulation materials. ASTM Standards, 1–11.

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Standard+Test+Methods+for+Flexural+Properties+of+Unreinforced+and+Reinforced+Plastics+and+Electrical+Insulating+Materials#0>

- Balaguru, P. N., Kurtz, S., & Rudolph, J. (1997). Geopolymer for repair and rehabilitation of reinforced concrete beams. Geopolymer Institute. www.geopolymer.org
- Belgacem, M. N., & Gandini, A. (2005). The surface modification of cellulose fibres for use as reinforcing elements in composite materials. *Composite Interfaces*, 12(1–2), 41–75. <https://doi.org/10.1163/1568554053542188>
- Besednjak, A. (2005). *Materiales Compuestos. Procesos de Fabricación de Embarcaciones* (J. Girona (ed.); Primera). Ediciones UPC. <http://hdl.handle.net/2099.3/36804>
- Bismarck, A., Mishra, S., & Lampke, T. (2005). Plant fibers as reinforcement for green composites. In K. Mohanty, M. Misra, & L. Drzal (Eds.), *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites* (Vol. 6, pp. 37–108). <https://doi.org/10.1201/9780203508206.ch2>
- Blanxart, A. F. (1993). Las fibras alternativas al amianto: consideraciones generales (Patent No. 306). <http://www.saludlaboral.ugtcyl.es/archivos/amianto/ntp306-las-fibras-alternativas-al-amianto-consideraciones-generales.pdf>
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2007). *Materials science and engineering. An introduction*. In K. Santor, F. Lyman, & J. Hayton (Eds.), *Journal of Materials Science* (Séptima, Vol. 26, Issue 14). Techbooks/GTS, York. <https://doi.org/10.1007/BF01184995>
- Carabba, L., Santandrea, M., Carloni, C., Manzi, S., & Bignozzi, M. C. (2017). Steel fiber reinforced geopolymer matrix (S-FRGM) composites applied to reinforced concrete structures for strengthening applications: A preliminary study. *Composites Part B: Engineering*, 128, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.007>
- Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *Academic*

Research Publishing Agency, 8(2), 194–206. <https://doi.org/10.1089/aid.1996.12.1427>

Charlet, K., Jernot, J. P., Gomina, M., Bréard, J., Morvan, C., & Baley, C. (2009).

Influence of an Agatha flax fibre location in a stem on its mechanical, chemical and morphological properties. *Composites Science and Technology*, 69(9), 1399–1403.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.002>

Chawla, K. K. (2012a). Ceramic matrix composites. In *Composite Materials: Science and*

Engineering, Third Edition (pp. 249–292). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>

Chawla, K. K. (2012b). Metal matrix composites. In *Composite Materials: Science and*

Engineering, Third Edition (pp. 197–245). Springer Science+Business Media New

York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>

Chawla, K. K. (2012c). Polymer matrix composites. In *Composite Materials: Science and*

Engineering, Third Edition (pp. 137–195). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>

Colin, J. (2001). *Fiber-reinforced cements and concretes* (Vol. 3). Taylor & Francis Group.

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=r01ZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=fiber-reinforced+cements&ots=->

[JvJKdgrBg&sig=yP2HEGnv0yIoDVnbAANPekfZ3Sk#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=r01ZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=fiber-reinforced+cements&ots=-JvJKdgrBg&sig=yP2HEGnv0yIoDVnbAANPekfZ3Sk#v=onepage&q&f=false)

Collier, J., & Collier, B. (1998). Process for obtaining cellulosic fiber bundles at least 2.5

cm long from plant stalk rind (Patent No. 5718802).

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12033/1/UPS-CT005840.pdf>

Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2000). Cracking tendency of alkali-activated slag concrete

subjected to restrained shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 30, 791–798.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888460000243X>

- Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2001). Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 23, 345–352.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946501000038>
- Comino Almenara, P. I. (1996). GRC: Composite material from an inorganic matrix reinforced with AR glass fibres. *Materiales de Construcción*, 1996(242–243), 79–89.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-3643097343&partnerID=40&md5=634ea1b10e8f9f57aa6eb44c12f3cb23>
- Da Costa, C. E., Velasco, F., & Torralba, J. M. (2000). Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones. *Revista de Metalurgia*, 36(3), 179–192. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2000.v36.i3.570>
- Dandekar, C. R., & Shin, Y. C. (2012). Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 102–121.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006>
- Daniel, I., & Ishai, O. (1994). Engineering mechanics of composite materials. In *Materials & Design* (Segunda, Vol. 17, Issue 2). Oxford University Press, Inc.
[https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(97\)87195-6](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(97)87195-6)
- Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of Thermal Analysis*, 35, 429–441. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01904446>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131–149.

Davidovits, J. (2002). Environmentally driven geopolymer cement applications.

Geopolymer 2002 Conference, 6, 1–9.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/43915282/ENVIRONMENT.pdf?1458470840=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEnvironmentally_Driven_Geopolymer_Cement.pdf&Expires=1605824668&Signature=ArFP1G7gRgLJW0IL4N~Sp6l7e8CtZlIsZlSe-Pzi~nH0l4y46uo5DTCx

Davidovits, J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly

(sialate) terminology: a ver useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. In J. Davidovits (Ed.), Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions (p. 236). Institut Géopolymère.

https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=wIFo7L_zO8AC&oi=fnd&pg=PA9&dq=Davidovits+J.+Geopolymer+chemistry+and+sustainable+development.+2005&ots=FoWpnG4NgY&sig=BrK_sqLs5i3eSLAmsMxOtGOpdPE#v=onepage&q=Davidovits+J.+Geopolymer+chemistry+and+sustainable

Davidovits, J. (2015). Polymers and geopolymers. In J. Davidovits (Ed.), Geopolymer chemistry and applications (4th ed., Issue January 2008, pp. 4–5). Institut Géopolymère.

Davidovits, J., & Davidovics, M. (1991). Geopolymer. Ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), 36(pt 2), 1939–1949.

https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/TOOLING.pdf

- Dávila, J, Guerrero, V. H., Galeas, S., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayora, V., & Valdivieso, C. (2010). Materiales compuestos. In V. H. Guerrero (Ed.), *Nuevos materiales. Aplicaciones estructurales e industriales* (Primera, pp. 45–72). Elsevier.
[https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(15\)72112-8](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(15)72112-8)
- Dávila, José, Galeas, S., Guerrero, V., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). Nuevos materiales aplicaciones estructurales e industriales. In V. Guerrero (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Primera ed). impreffp.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>
- Defoirdt, N., Biswas, S., Vriese, L. De, Tran, L. Q. N., Acker, J. Van, Ahsan, Q., Gorbatikh, L., Vuure, A. Van, & Verpoest, I. (2010). Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(5), 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.005>
- Dias, D. P., & Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Materiales de Construcción*, 27, 49–54.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044>
- Dong, M., Feng, W., Elchalakani, M., Li, G. (Kevin), Karrech, A., & May, E. F. (2017). Development of a high strength geopolymer by novel solar curing. *Ceramics International*, 43(14), 11233–11243. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.173>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van

- Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Espinoza Espinoza, A., & García Ochoa, E. (2017). Preparación, caracterización y evaluación de concreto de geopolímero reforzado con fibra de polipropileno. *Escuela Superior Politécnica del Litoral*.
- Estrella, S. (2016). Estudio de un material compuesto a base de fibras naturales de cabuya para mejorar las propiedades mecánicas de elementos de concretos reforzado [Universidad Nacional de Chimborazo].
<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6680>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2014). Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9–26.
<https://doi.org/10.1002/mame.201300008>
- Fernández-Jiménez, A., Zibouche, F., Boudissa, N., García-Lodeiro, I., Abadlia, M. T., & Palomo, A. (2013). “Metakaolin-slag-clinker blends.” the role of Na⁺ or K⁺ as alkaline activators of these ternary blends. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(6), 1991–1998. <https://doi.org/10.1111/jace.12272>
- Fernández, P., Martínez, V., Valencia, M., & Cruz, J. (2006). Applications of metal matrix composites in electric and electronic industries. *Dyna*, 73(149), 131–140.
<https://www.redalyc.org/pdf/496/49614912.pdf>
- FICEM. (2013). Informe Estadístico 2013.
https://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- Friedrich, K., & Almajid, A. A. (2013). Manufacturing aspects of advanced polymer

composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 20(2), 107–128. <https://doi.org/10.1007/s10443-012-9258-7>

Frydrych, M., Hýsek, Š., Fridrichová, L., Van, S. Le, Herclík, M., Pechociaková, M., Chi, H. Le, & Louda, P. (2019). Impact of flax and basalt fibre reinforcement on selected properties of geopolymer composites. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/SU12010118>

Gharzouni, A., Joussein, E., Samet, B., Baklouti, S., & Rossignol, S. (2015). Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 410, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.12.021>

Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). EFC geopolymer concrete aircraft pavements at brisbane west wellcamp wirport. *Concrete 2015 Conference*, 11(1), 1–9. https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/GP-AIRPORT.pdf

González, M. (2014). Optimización de las propiedades mecánicas de compositos de resina poliéster reforzados con fibras de vidrio y cargas de carbonato de calcio [Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/4165/1/1080253846.pdf>

Gordon, J. (1984). *Handbook of Textile Fibres - 1st Edition: Vol. II*. <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-textile-fibres/gordon-cook/978-1-85573-485-2?aaref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

Graytee, A., Sanjayan, J. G., & Nazari, A. (2018). Development of a high strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing. *Ceramics International*, 44(7), 8216–8222. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.001>

- Guerrero, V., Pontón, P., Tamayo, A., Villacís, H., Delgado, F., & Galeas, S. (2013).
Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y sintéticas.
Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE, 8(1), 70–74.
- Hooker, J. A., & Doorbar, P. J. (2000). Metal matrix composites for aeroengines. *Materials Science and Technology*, 16, 725–731. <https://doi.org/10.1179/026708300101508414>
- Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Kesarwani, S. (2017). Polymer composites in aviation sector. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(06), 518–525.
<https://doi.org/10.17577/ijertv6is060291>
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261–1277.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>
- Korniejenko, K., Frączek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388–393. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.395>
- Korniejenko, Kinga, Łach, M., Chou, S., Lin, W., Cheng, A., Hebdowska-Krupa, M., Gadek, S., & Mikula, J. (2020). Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods : A comparative study. *MDPI Materials*, 13(579). <https://www.mdpi.com/journal/materials>
- Lilholt, H., & Lawther, J. M. (2000). Natural Organic Fibers. In A. Kelly & C. Zweben

- (Eds.), *Comprehensive Composite Materials* (pp. 303–325). Elsevier Science.
<https://doi.org/10.1016/b0-08-042993-9/00048-6>
- Llangostera, E. (2004). La seda china y la ruta de la seda. *Boletín de La Asociación Española de Orientalistas*, 40, 243–249. <https://biblioteca.org.ar/libros/140466.pdf>
- Llano, C. (2014). Fibra De Carbono, presente y futuro de un material revolucionario. *Igarss* 2014, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Low, I. M. (2018). *Advances in ceramic matrix composites* (G. Jones (ed.); Segunda). Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=kyosDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=+ceramic+matrix+\(geopolymer\)&ots=CGxEZLb3-a&sig=WPU-EFRtHRhMctNvjqoaJMk_Zy8#v=onepage&q&f=true](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=kyosDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=+ceramic+matrix+(geopolymer)&ots=CGxEZLb3-a&sig=WPU-EFRtHRhMctNvjqoaJMk_Zy8#v=onepage&q&f=true)
- Low, I. M., McGrath, M., Lawrence, D., Schmidt, P., Lane, J., Latella, B. A., & Sim, K. S. (2007). Mechanical and fracture properties of cellulose-fibre-reinforced epoxy laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), 963–974.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.06.019>
- Luo, X., & Chung, D. D. L. (1999). Electromagnetic interference shielding using continuous carbon-fiber carbon-matrix and polymer-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 30(3), 227–231. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00065-1)
- Lyon, R. E., Balaguru, P. N., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J., & Davidovics, M. (1997). Fire resistant aluminosilicate composites. *Fire and Materials*, 21, 67–73.
- Mallick, P. K. (1993). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design* (Segunda). Marcel Dekker, Inc.

https://books.google.com.ec/books?id=z0MIzzOFMqkC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=parti&f=false

Martínez, C. (2015). Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland [Universidad Nacional de Colombia].

http://www.bdigital.unal.edu.co/49278/1/Carolina_Martinez_Lopez.pdf

McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>

Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., Cioffi, R., & Manfredi, G. (2013). Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1667–1676.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.019>

Mison, M. I., Islam, M. M., Epaarachchi, J. A., & Lau, K. tak. (2014). Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications. *Materials and Design*, 59, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.022>

Mohamed, A. (2015). *Advanced Ceramic Processing*. In Tech.

[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=_GmQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Microwave+Fast+Sintering+of+Double+Perovskite+Ceramic+Materials,+in:+A.+Mohamed+\(Eds.\),+Advanced+Ceramic+Processing,+2015.&ots=p_KmZgE3wK&sig=ZdfQ6CsIfjOA8Ql6ORPIcqa2DfM#v=onepag](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=_GmQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Microwave+Fast+Sintering+of+Double+Perovskite+Ceramic+Materials,+in:+A.+Mohamed+(Eds.),+Advanced+Ceramic+Processing,+2015.&ots=p_KmZgE3wK&sig=ZdfQ6CsIfjOA8Ql6ORPIcqa2DfM#v=onepag)

- Mohr, B. J., Biernacki, J. J., & Kurtis, K. E. (2006). Microstructural and chemical effects of wet / dry cycling on pulp fiber – cement composites. *Cement and Concrete Research*, 36, 1240–1251. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.020>
- Mohr, B. J., Nanko, H., & Kurtis, K. E. (2005). Durability of kraft pulp fiber – cement composites to wet / dry cycling. *Cement & Concrete Composites*, 27, 435–448. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006>
- Monteiro, S. N., Lopes, F. P. D., Ferreira, A. S., & Nascimento, D. C. O. (2009). Natural-fiber polymer-matrix composites: Cheaper, tougher, and environmentally friendly. *Jom*, 61(1), 17–22. <https://doi.org/10.1007/s11837-009-0004-z>
- Muduli, S., Sadangi, J., Nayak, B., & Mishra, B. (2013). Effect of NaOH concentration in manufacture of geopolymer fly ash building brick. *Greener Journal of Physical Sciences*, 3(6), 204–211. https://www.researchgate.net/profile/Jitendra_Sadangi/publication/301788824_Effect_of_NaOH_Concentration_in_Manufacture_of_Geopolymer_Fly_Ash_Building_Brick/links/572868f708ae262228b59bad.pdf
- Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction - recent developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472>
- Nawrath, S. (2016). Estudio de la sepiola y PVA en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del fibrocemento reforzado con fibra de ulex europaeus [Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/bmfcin329e/doc/bmfcin329e.pdf>

- Norkhairunnisa, M., & Fariz, M. (2015). Geopolymer: A review on physical properties of inorganic aluminosilicate coating materials. *Materials Science Forum*, 803(August 2014), 367–373. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.803.367>
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2015). Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 685–691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.009>
- Oksman, K., Skrifvars, M., & Selin, J. F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1317–1324. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00103-9)
- Olivares, M., Galán, C., & Roa, J. (2003). Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de La Construcción*, 54(484), 45–62. <https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>
- Omeman, Z., & Nehdi, M. (2007). El cemento de geopolímeros en el hormigón: un nuevo conglomerante para el futuro. Undefined. <https://www.semanticscholar.org/paper/El-cemento-de-geopolímeros-en-el-hormigón%3A-un-nuevo-Omeman-Nehdi/ded2083c1fd1d6ed7b933fbfad3b429837946c27>
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., Jamshidi, M., & Ding, Y. (2012). Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? *Construction and Building Materials*, 30, 400–405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017>
- Pacheco-Torgal, Fernando, Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and

hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305–1314.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>

Pacheco-Torgal, Fernando, & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575–581.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>

Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T., & Grutzeck,

M. W. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin -

Isothermal conduction calorimetry study. *Cement and Concrete Research*, 29, 997–

1004. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00074-5)

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A

cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)

Parisot, A. (1962). Relaciones entre la estructura química y las propiedades de las fibras

artificiales y sintéticas (pp. 65–104). Escuela Técnica Superior de Ingenieros

Industriales.

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/5503/Article04a.pdf?sequence=1&](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/5503/Article04a.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/5503/Article04a.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Porcel, A., & Artetxe, E. (2016). Una introducción a los textiles artificiales en las

colecciones de indumentaria del siglo XX y su conservación. *Ge-Conservacion*, 9, 31–

44. <https://ge-iic.com/ojs/index.php/revista/article/view/276/pdf>

Prasad, A. V. R., & Rao, K. M. (2011). Mechanical properties of natural fibre reinforced

polyester composites : Jowar, sisal and bamboo. *Materials and Design*, 32(8–9), 4658–

4663. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.015>

Puertas, F., Gil-Maroto, A., Palacios, M., & Amat, T. (2006). Alkali-activated slag mortars reinforced with ar glassfibre . Performance and properties. *Materiales de Construcción*, 56(283), 79–90.

<https://digital.csic.es/bitstream/10261/2502/1/puertas.pdf>

Puglia, D., Biagiotti, J., & Kenny, J. M. (2004). A review on natural fibre-based composites - Part II: Application of natural reinforcements in composite materials for automotive industry. *Journal of Natural Fibers*, 1(3), 23–65.

https://doi.org/10.1300/J395v01n03_03

Quispe, E. C., Rodríguez, T. C., Iñiguez, J. P., & Mueller, L. R. (2009). Producción de fibra de alpaca , llama , vicuña y guanaco en Sudamérica. *Animal Generic Resources Information*, 45, 1–14. <https://doi.org/10.1017/S1014233909990277>

Ranjbar, N., Mehrali, M., Maheri, M. R., & Mehrali, M. (2017). Hot-pressed geopolymer. *Cement and Concrete Research*, 100(October 2016), 14–22.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.010>

Reis, J. M. L. (2006). Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 20(9), 673–678.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.008>

Restrepo, S., Arroyave, G., & Vásquez, D. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *SENA Centro Nacional de Asistencia Técnica a La Industria*, 80, 77–86.

- Rowell, R. M. (2008). Natural fibres: Types and properties. In L. K. Pickring (Ed.), *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites* (pp. 3–66). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845694593.1.3>
- Roy, A., Chakraborty, S., Kundu, S. P., Basak, R. K., Basu Majumder, S., & Adhikari, B. (2012). Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the Weibull distribution model. *Bioresource Technology*, 107, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.073>
- Sankar, K., & Kriven, W. M. (2014). Sodium geopolymer reinforced with jute weave. In C. Lewinsohn, Y. Zhou, J. Wang, K. Kriven, T. Hwang, & D. Zhu (Eds.), *Developments in Strategic Materials and Computational Design V* (8th ed., pp. 39–60). American Ceramic Society. <https://experts.illinois.edu/en/publications/sodium-geopolymer-reinforced-with-jute-weave>
- Schaffer, J., Saxena, A., Antolovich, S., Sanders, T., & Warner, S. (2000). *Ciencia y diseño de ingeniería de los materiales (Segunda)*. Compañía Editorial Continental. <http://biblio.upmx.mx/library/index.php/41476>
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., & Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>
- Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites- a review. *Journal of Composite Materials*, 46, 973–986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>

- Shaikh, F. U. A. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 43, 37–49.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.026>
- Sikapizye, E., & Habanyama, A. (2020). Synthesis and characterization of hemp and flax fiber reinforced geopolymer composites. *Journal of Chemical Engineering and Materials*, 11(2), 10–23. <https://doi.org/10.5897/JCEMS2019.0340>
- Silva, F. de A., Filho, R. D. T., Filho, J. de A. M., & Fairbairn, E. de M. R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777–785.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>
- Silva, F. de A., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2009). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Sondhelm, W. S. (2000). Technical fabric structures – 1. Woven fabrics. In A. R. Horrocks & S. C. Anand (Eds.), *Handbook of Technical Textiles* (First, pp. 62–94). Woodhead Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781855738966.62>
- Taya, M., & Arsenault, R. J. (1989). *Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior* (British Library (ed.); I). BPC Wheaton Ltd.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=VnAvBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&>

dq=TYPES+OF+COMPOSITE+MATERIALS+MATRICES&ots=lOjYdyUzSA&sig
=h8mdqntix5KWwchkohcUoQhIm04#v=onepage&q=TYPES OF COMPOSITE
MATERIALS MATRICES&f=false

Toledo, R., Ghavami, K., England, G., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre – mortar composites of improved durability. *Cement & Concrete Composites*, 25, 185–196.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946502000185>

Toledo, R., Scrivener, K., England, G., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement & Concrete Composites*, 22, 127–143.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946599000396>

Tran, T. T., Pham, T. M., & Hao, H. (2019). Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with steel fibers. *Engineering Structures*, 200(March), 109707.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109707>

Trindade, A. C., Alcamand, H. A., Borges, P. H., & Silva, F. de. (2017). Influence of elevated temperatures on the mechanical behavior of jute-textile-reinforced geopolymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 389–398.

<https://doi.org/10.4416/JCST2017-00045>

Trindade, A. C., Arêas, I. O., Almeida, D. C., Alcamand, H. A., Borges, P. H., & Silva, F. A. (2018). Mechanical behavior of geopolymeric composites reinforced with natural fibers. *Strain-Hardening Cement-Based Composites*, 15, 383–391.

<https://doi.org/10.1007/978-94-024-1194-2>

Trindade, A. C., Borges, P. H., & Silva, F. de. (2018). Mechanical response of Geopolymer composites reinforced with distinct types of fibers. 1, 505–512.

<https://doi.org/10.21452/bccm4.2018.08.01>

Trindade, A. C., Borges, P. H., & Silva, F. de. (2019). Mechanical behavior of strain-hardening geopolymer composites reinforced with natural and PVA fibers. *Materials Today: Proceedings*, 8, 753–759. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.017>

Trindade, A. C., Silva, F. de, Alcamand, H. A., & Borges, P. H. (2017). On the durability behavior of natural fiber reinforced geopolymers. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 38(3), 215–228. <https://doi.org/10.1002/9781119474746.ch20>

Unterweger, C., Brüggemann, O., & Früst, C. (2013). Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: properties and characterization. *Polymers and Polymer Composites*, 16(2), 101–113. <https://doi.org/10.1002/pc>

Usharov-Marshak, A., Perhina, L., & Krivenko, P. (1998). Calorimetric studies of hydration of sementitious materials varying in basicity. *Journal of Thermal Analysis*, 54, 57–61. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010152415616>

Van Jaarsveld, J. G. S., Lukey, G. C., Van Deventer, J. S. J., & Graham, A. (2000). The stabilisation of mine tailings by reactive geopolymerisation. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*, 5, 363–372.
https://www.academia.edu/4655979/The_Stabilisation_of_Mine_Tailings_by_Reactive_Geopolymerisation

Van Suchtelen, J. (1972). *Product properties: A new application of composites materials.*

Philips Research Reports, 27, 28–37.

Wan Jo, B., Chakraborty, S., & Kim, H. (2015). Efficacy of alkali-treated jute as fibre reinforcement in enhancing the mechanical properties of cement mortar. *Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0560-3>

Wei, J., & Meyer, C. (2015). Degradation mechanisms of natural fibre in the matrix of cement composites. *Cement and Concrete Research*, 73, 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.019>

Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)

Xu, H., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2001). Effect of alkali metals on the preferential geopolymerization of stilbite/kaolinite mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(17), 3749–3756.
<https://doi.org/10.1021/ie010042b>

Yan, L. (2012). Effect of alkali treatment on vibration characteristics and mechanical properties of natural fabric reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 887–896.
<https://doi.org/10.1177/0731684412449399>

Yan, L., & Chou, N. (2013). Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application. *Materials and Design*, 51, 629–640.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.014>

Yan, L., Chou, N., & Jayaraman, K. (2014a). Composites : Part B Lateral crushing of empty and polyurethane-foam filled natural flax fabric reinforced epoxy composite

tubes. *COMPOSITES PART B*, 63, 15–26.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.013>

Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014b). Effect of triggering and polyurethane foam-filler on axial crushing of natural flax / epoxy composite tubes. *JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN*, 56, 528–541. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.068>

Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014c). Flax fibre and its composites - A review. *Composites Part B: Engineering*, 56, 296–317.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>

Yan, L., Chouw, N., & Yuan, X. (2012). Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 425–437. <https://doi.org/10.1177/0731684412439494>

Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94–132.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>

Yuan, J., He, P., Jia, D., Yang, C., zhang, Y., Yan, S., Yang, Z., Duan, X., Wang, S., & Zhou, Y. (2016). Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. *Ceramics International*, 42(14), 16184–16190. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.139>

Zhang, J., Provis, J. L., Feng, D., & Van Deventer, J. S. J. (2008). Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.053>

7. ANEXOS

Anexo 1. Estudio de Alomayri et al., (2013c)

Titulado: Propiedades térmicas y mecánicas de los compuestos de geopolímero reforzado con tela de algodón.

Tabla 4: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón y resultados de densidad y porosidad*

Muestra	Contenido				Resultados		
	Cenizas volantes (% en peso)	Contenido de NaOH (% en peso)	Contenido en Na ₂ SiO ₃ (% en peso)	Contenido de Capas de tela	Contenido de fibras (% en peso)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)
CFG0	74.1	7.4	18.5	0	0	2.02 ± 0,03	21.1
CFG2	74.1	7.4	18.5	2	1.4	1.84 ± 0,02	24.8
CFG3	74.1	7.4	18.5	3	2.1	1.76 ± 0,02	26.2
CFG4	74.1	7.4	18.5	4	2.8	1.68 ± 0,03	29.6
CFG6	74.1	7.4	18.5	6	4.1	1.59 ± 0,05	32.6

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

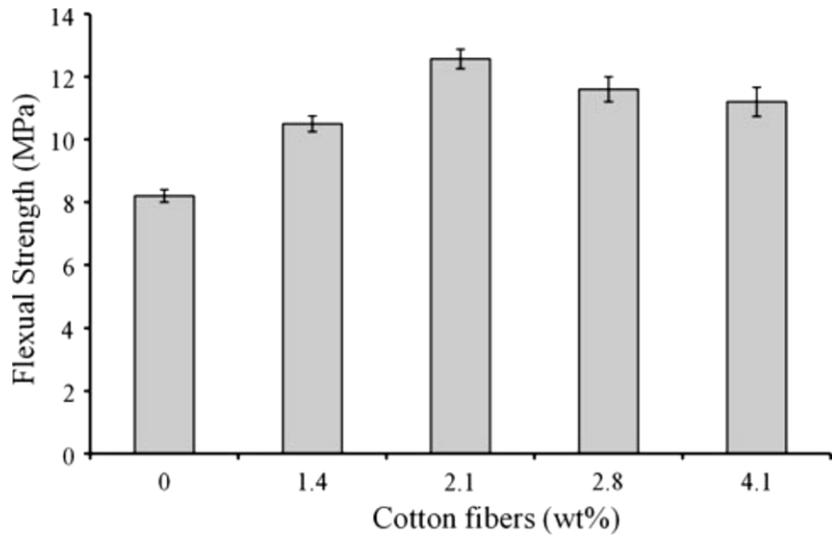


Figura 20: Resistencia a la flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejido de algodón.

Fuente: Alomayri et al., (2013c)

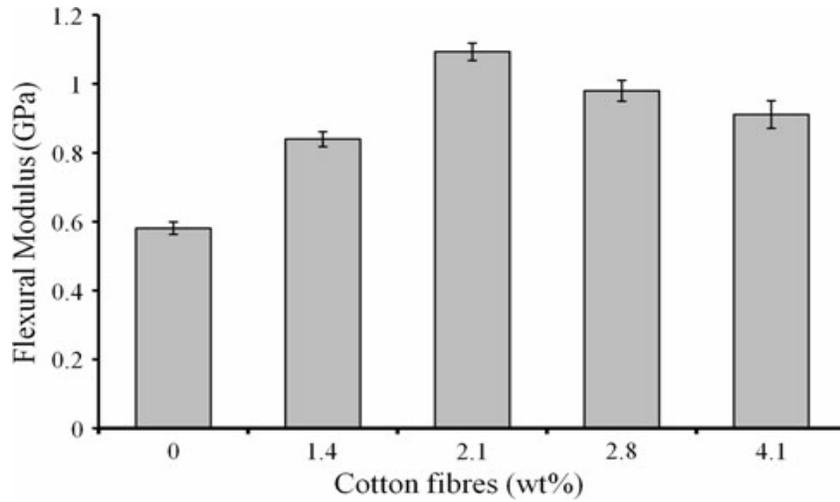


Figura 21: Módulo de flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri et al., (2013c)

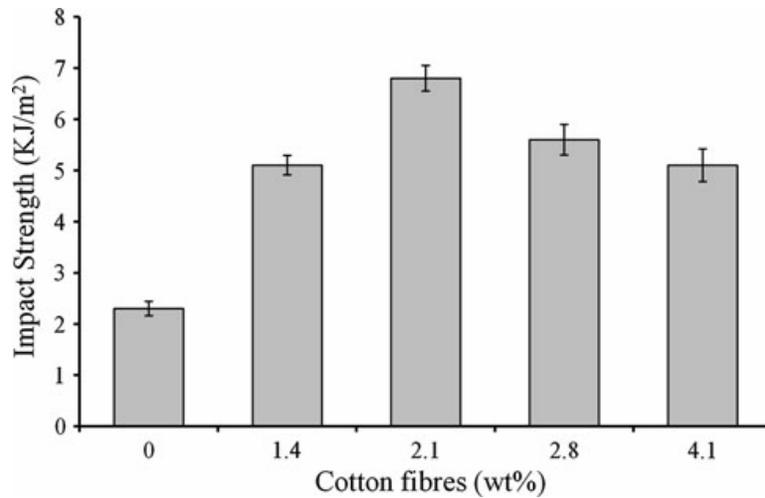


Figura 22: Resistencia al impacto de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri et al., (2013c)

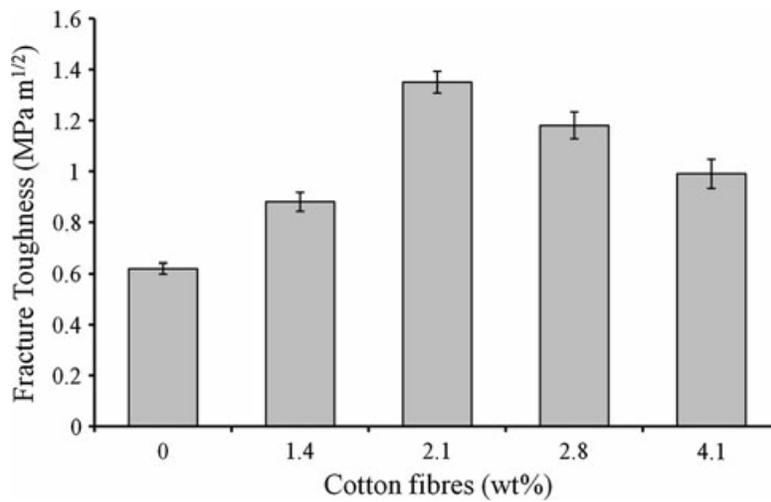


Figura 23: Tenacidad a la fractura de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri et al., (2013c)

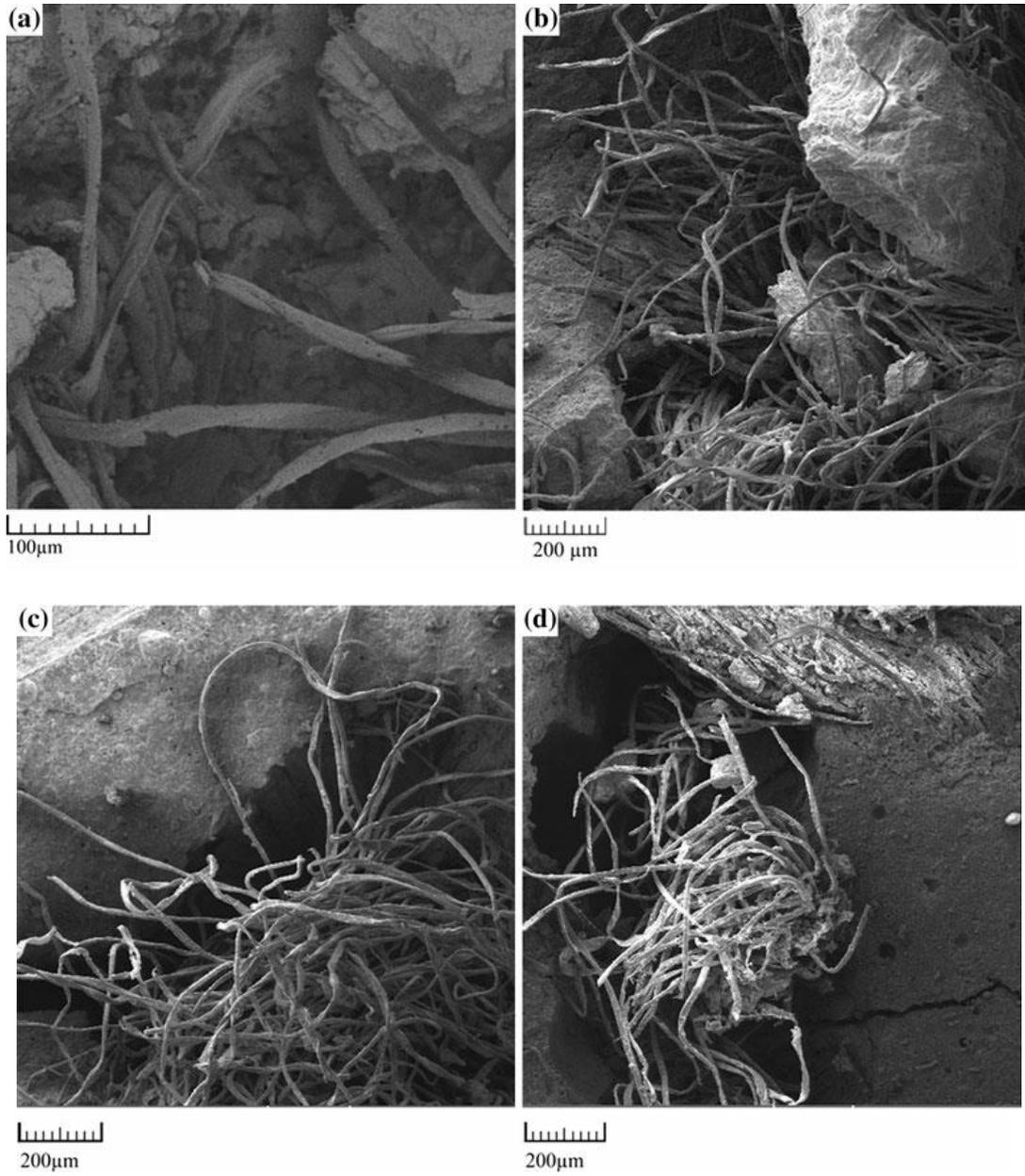


Figura 24: *Imágenes SEM de la fractura de los compuestos NFRG con fibras de algodón: (a) 1,4%, (b) 2,1%, (c) 2,8% y (d) 4,1% en peso*

Fuente: Alomayri et al., (2013c)

Anexo 2. Estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

Titulado: Efecto de la orientación del tejido sobre las propiedades mecánicas de los compuestos de geopolímero reforzado con tejido de algodón.

Tabla 5: Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con fibras de algodón

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Capas de tela	Contenido de fibras (% en peso)
Composite 0	14.7	29.4	55.9	0	0
Composite 1	14.7	29.4	55.9	10	4.5
Composite 2	14.7	29.4	55.9	20	6.2
Composite 3	14.7	29.4	55.9	40	8.3

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

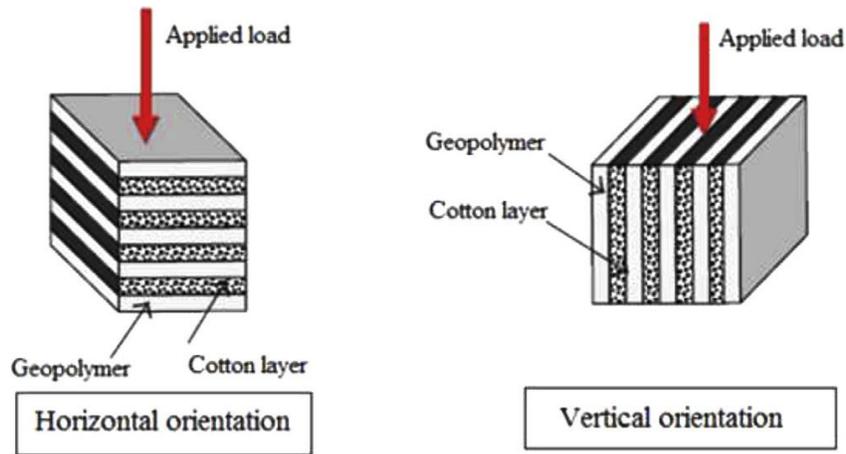


Figura 25: Esquemático de aplicación de la carga respecto a la orientación de los tejidos de algodón en los compuestos NFRG.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

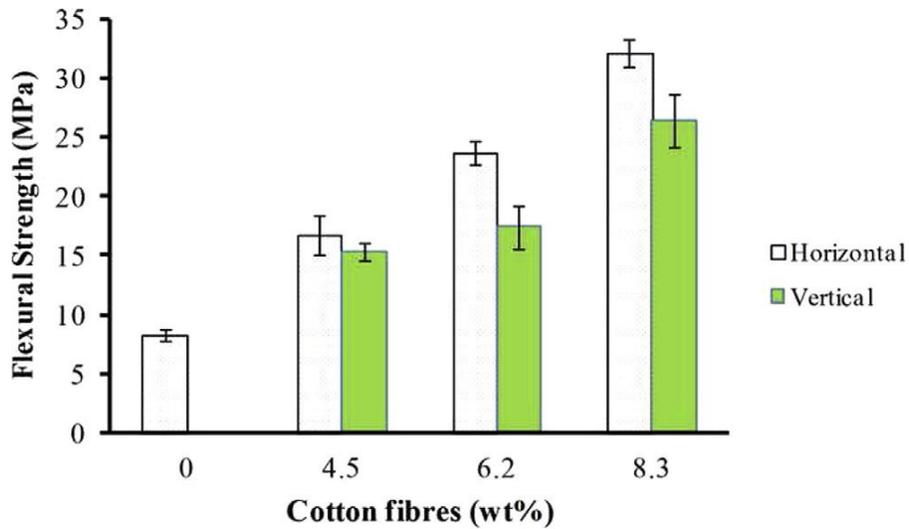


Figura 26: Resistencia a la flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

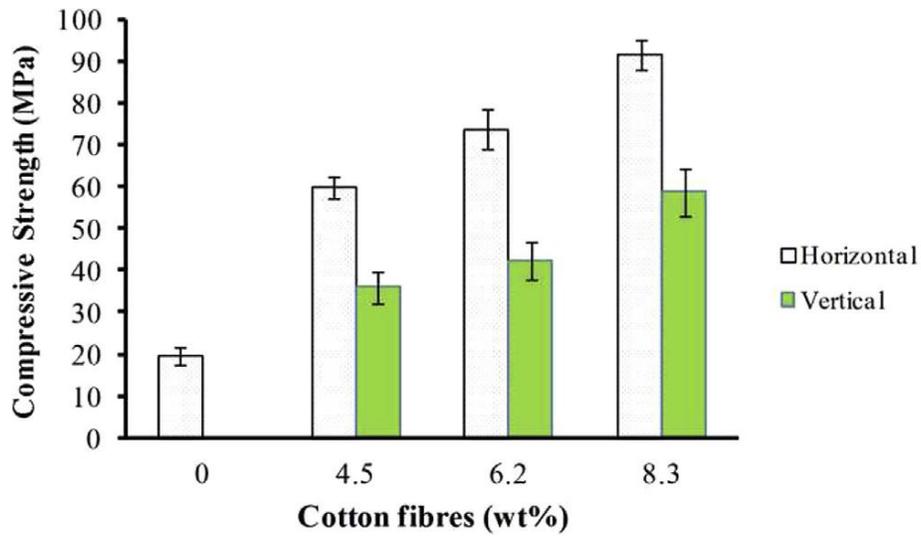


Figura 27: Resistencia a la compresión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

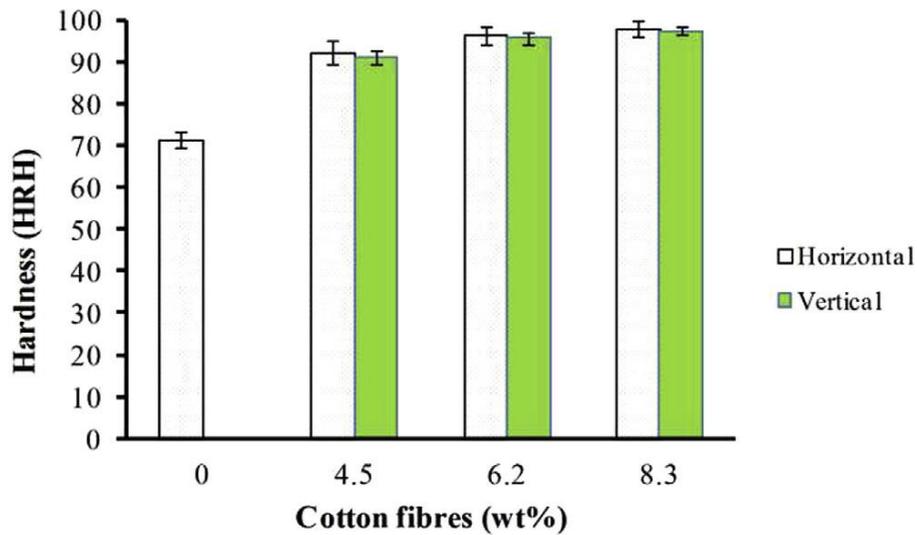


Figura 28: Dureza de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de fibras de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

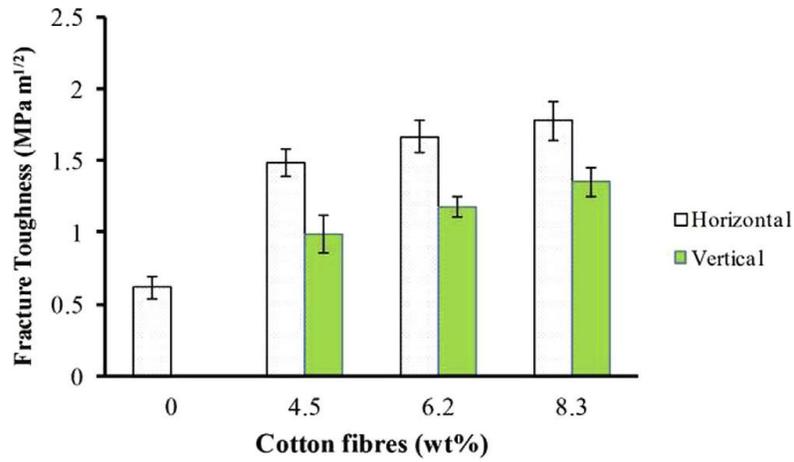


Figura 29: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

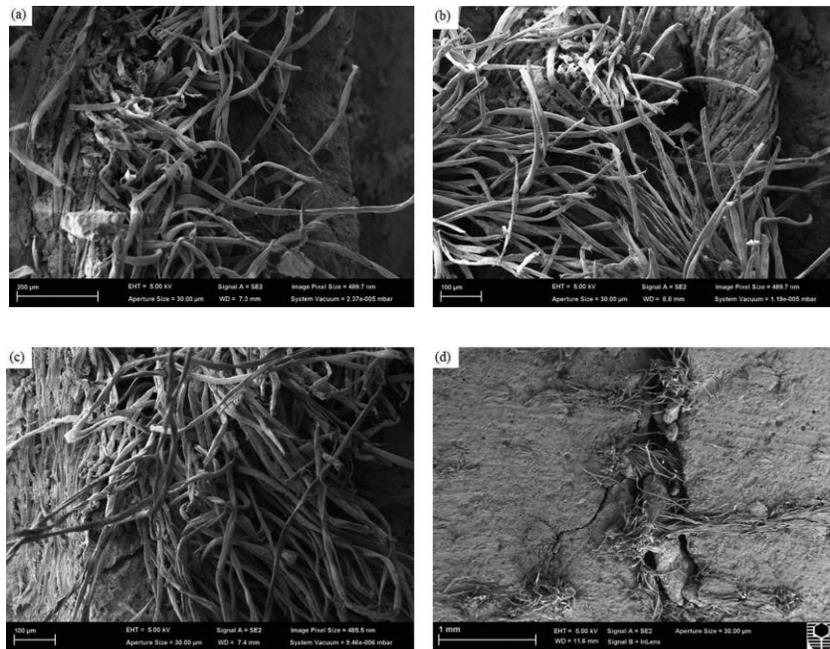


Figura 30: Imágenes SEM de la fractura de compuestos NFRG con tejidos de algodón: (a) 4.5, (b) 6.2 y (c) 8.3% en peso; (d) Puenteo de grietas por el tejido de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014a)

Anexo 3. Estudio de Alomayri et al., (2014)

Titulado: Efecto de la absorción de agua en las propiedades mecánicas de compuestos de geopolímero reforzado con tejido de algodón.

Tabla 6: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con fibras de algodón*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Capas de tela	Contenido de fibras (% en peso)	M _∞ (%)	D × 10 ⁻⁶ (mm ² /s)
Geopolímero (GP)	14.7	29.4	55.9	0	0	4.72	4.26
CF / GP1	14.7	29.4	55.9	10	4.5	11.74	5.42
CF / GP2	14.7	29.4	55.9	20	6.2	17.98	6.16
CF / GP3	14.7	29.4	55.9	40	8.3	22.32	8.4

M_∞= contenido de agua de equilibrio, D= coeficiente de difusión

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

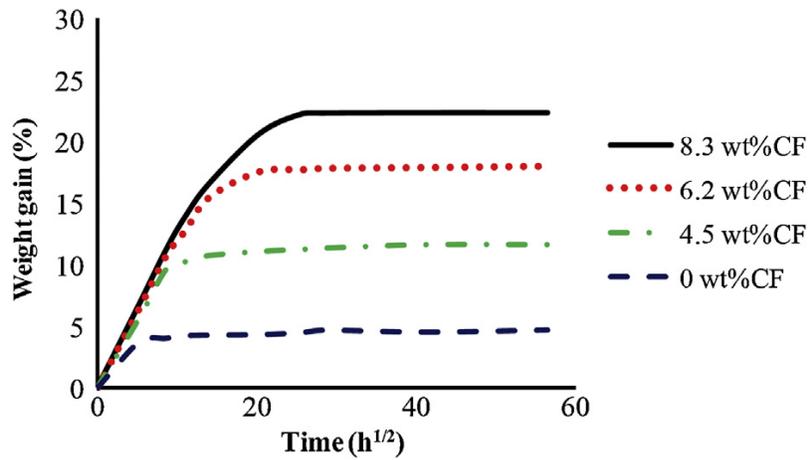


Figura 31: *Comportamiento de absorción de agua de los compuestos NFRG con tejidos de algodón.*

Fuente: Alomayri et al., (2014)

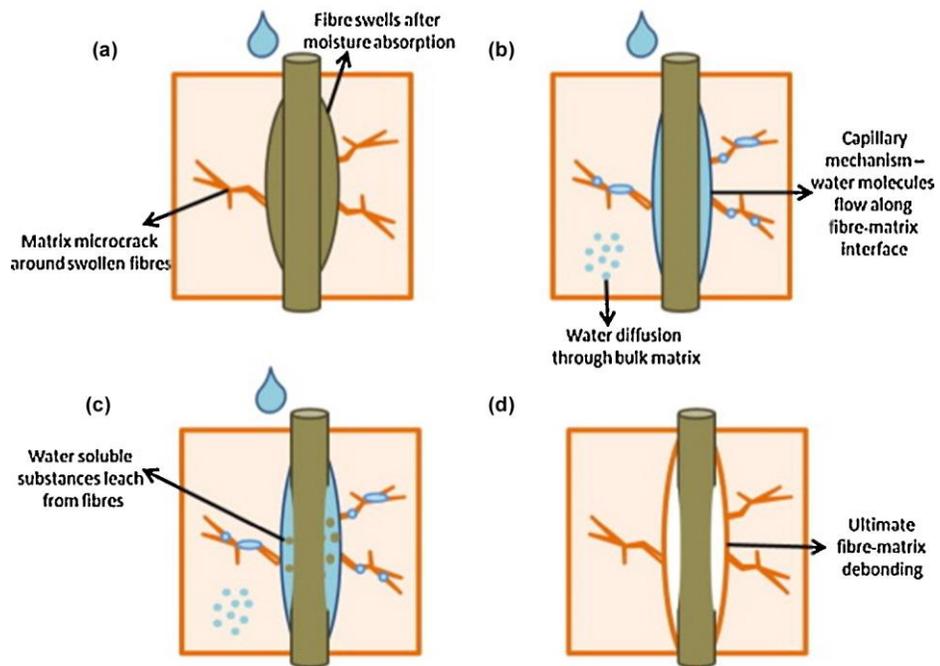


Figura 32: *Comportamiento del agua sobre la interfaz fibra-matriz.*

Fuente: Alomayri et al., (2014)

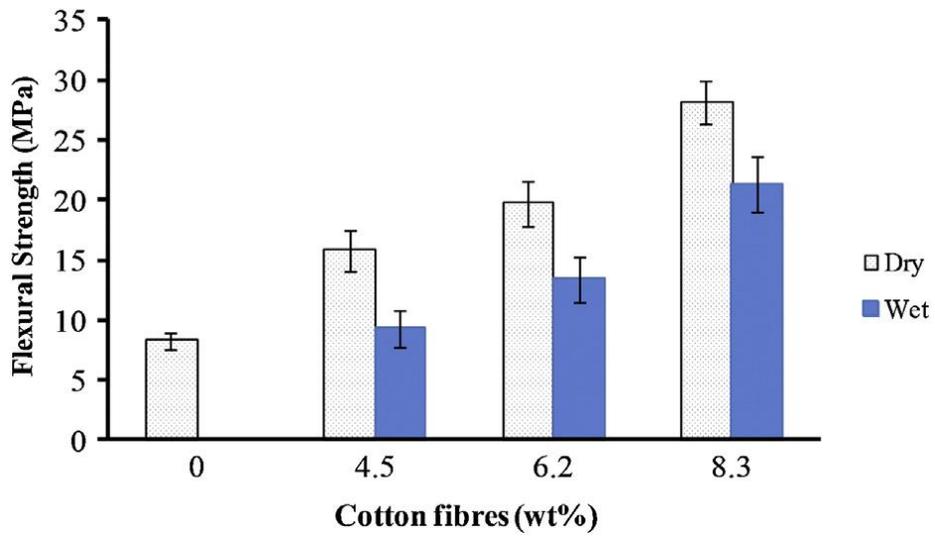


Figura 33: Resistencia a la flexión de compuestos NFRG condiciones secas y húmedas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

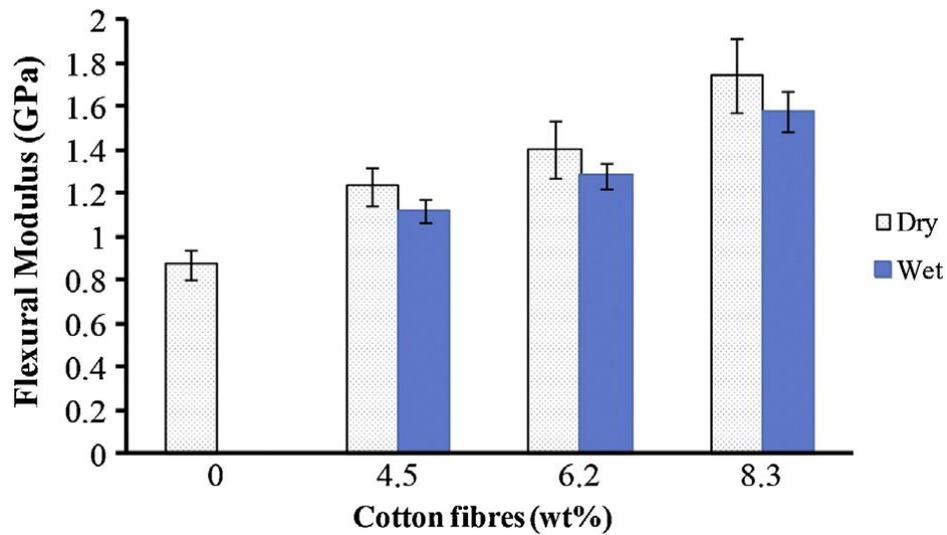


Figura 34: Módulo de flexión de compuestos NFRG condiciones secas y húmedas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

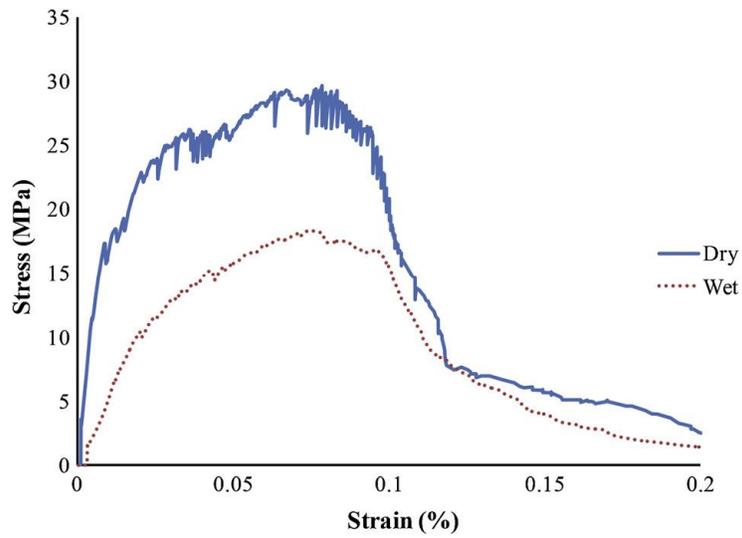


Figura 35: Diagrama tensión-deformación de los compuestos NFRG en condiciones secas y húmedas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

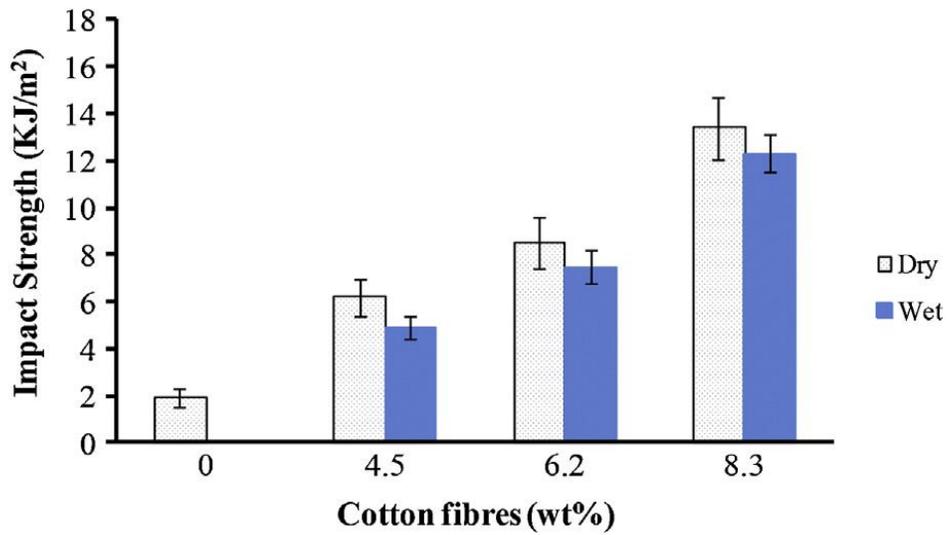


Figura 36: Resistencia al Impacto de compuestos NFRG condiciones secas y húmedas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

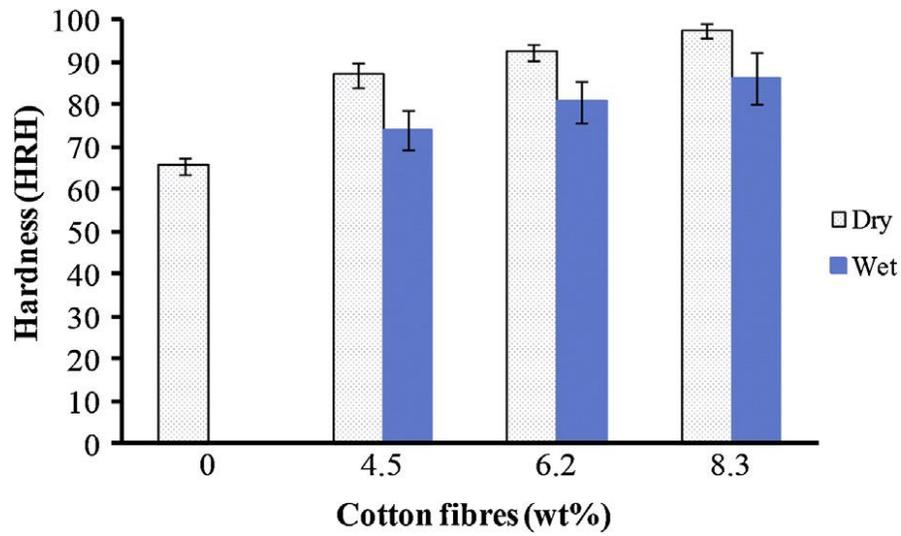


Figura 37: Dureza de los compuestos NFRG en condiciones secas y húmedas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

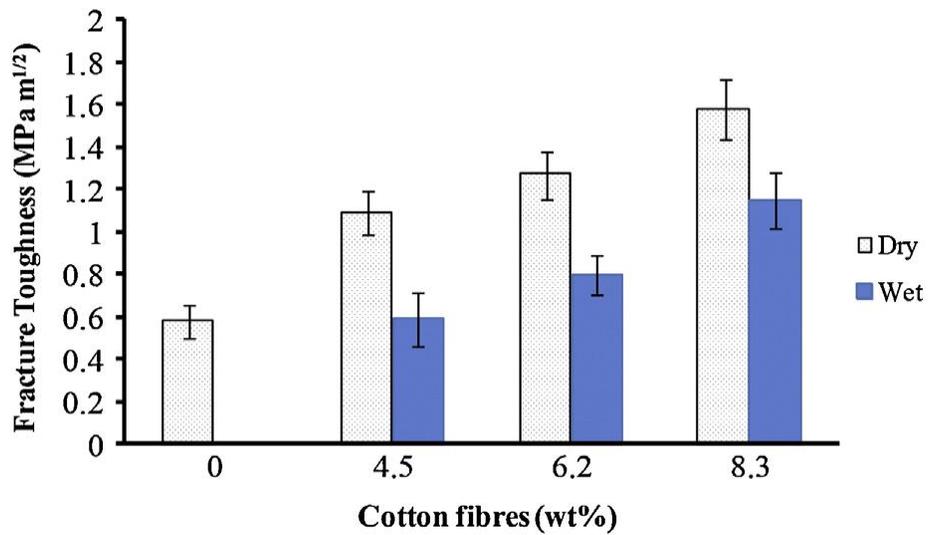


Figura 38: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG en condiciones secas y húmedas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

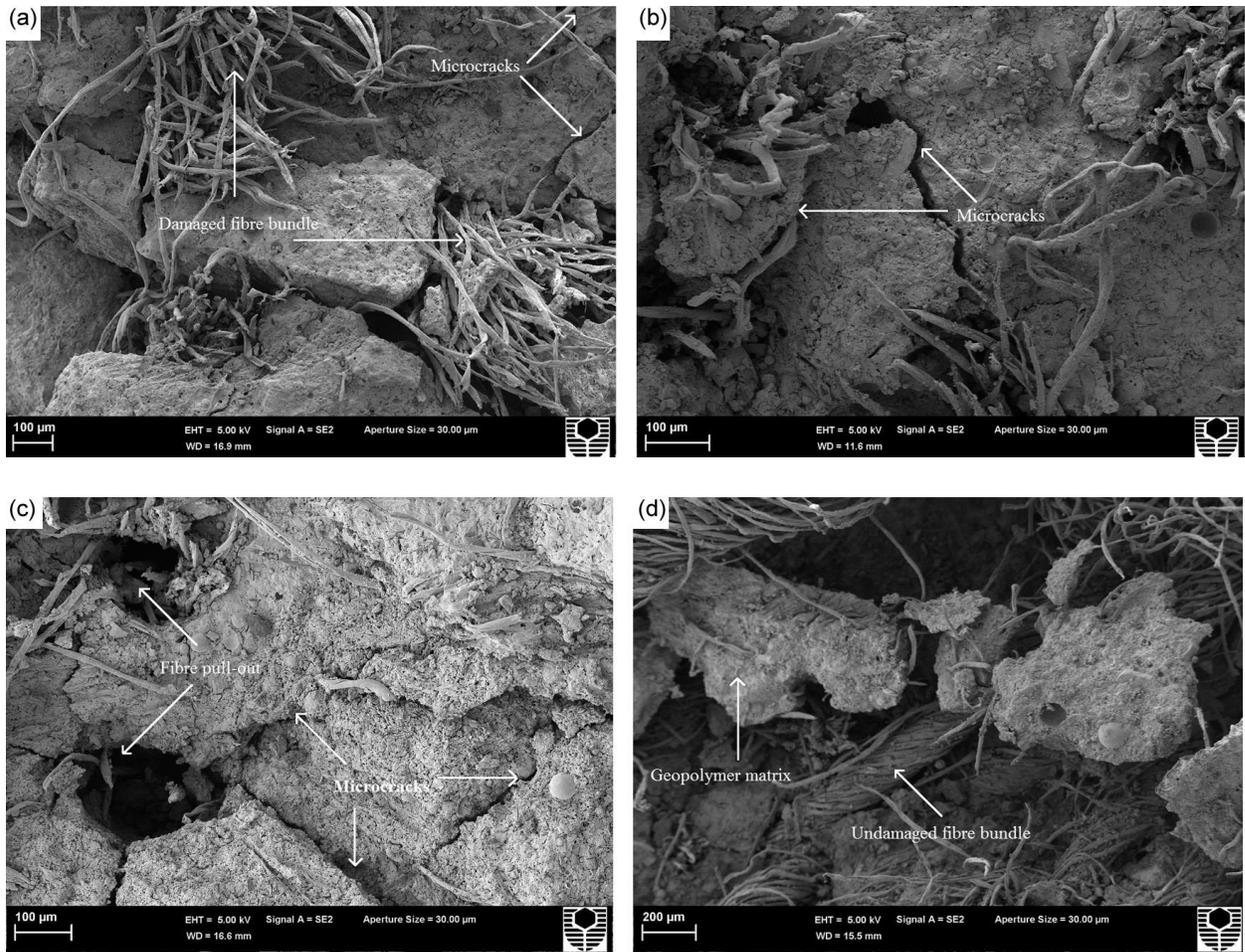


Figura 39: Imágenes SEM de: (a) desunión de las fibras de algodón en fibrillas finas, (b) grietas en la matriz, (c) extracción de la fibra y (d) trozos de matriz unidos a la fibra.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

Anexo 4. Estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)

Titulado: Propiedades mecánicas y térmicas de compuestos de geopolímero a base de cenizas volantes reforzados con tejidos de algodón curado al ambiente.

Tabla 7: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón y resultados de densidad y porosidad*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Contenido OPC (% en peso)	Capas de tejido de CF	Contenido de fibras (% en peso)	Densidad (g / cm ³)	Porosidad (%)
GP / CF	14.7	29.4	55.9	0	3	17.2	1,78 ± 0,02	26,6
GP / CF / OPC5	14.7	29.4	55.9	5	3	17.2	1,84 ± 0,04	24,5
GP / CF / OPC8	14.7	29.4	55.9	8	3	17.2	1,89 ± 0,02	22,5
GP / CF / OPC10	14.7	29.4	55.9	10	3	17.2	1,91 ± 0,03	21,7

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

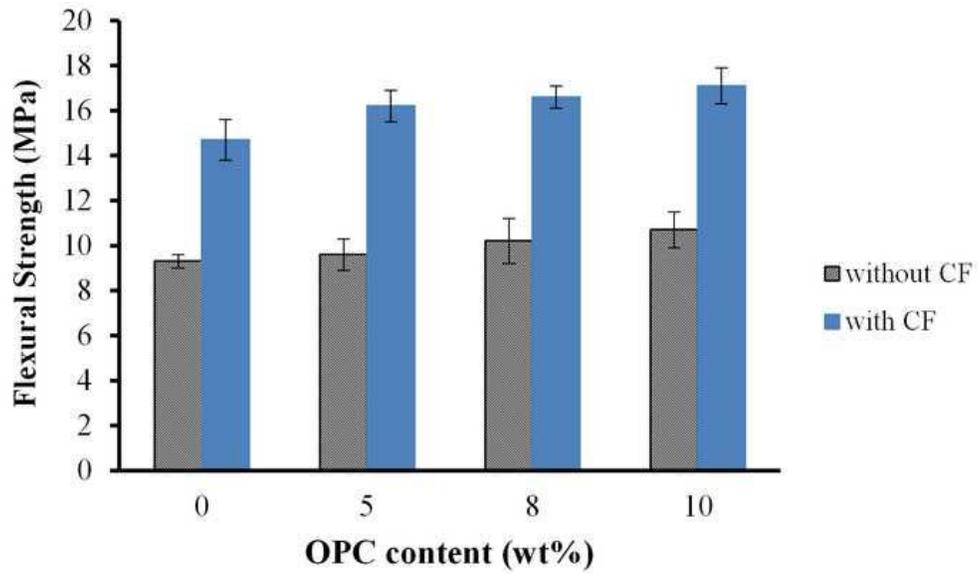


Figura 40: Resistencia a la flexión en base al contenido de OPC para compuestos NFRG con y sin fibras de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)

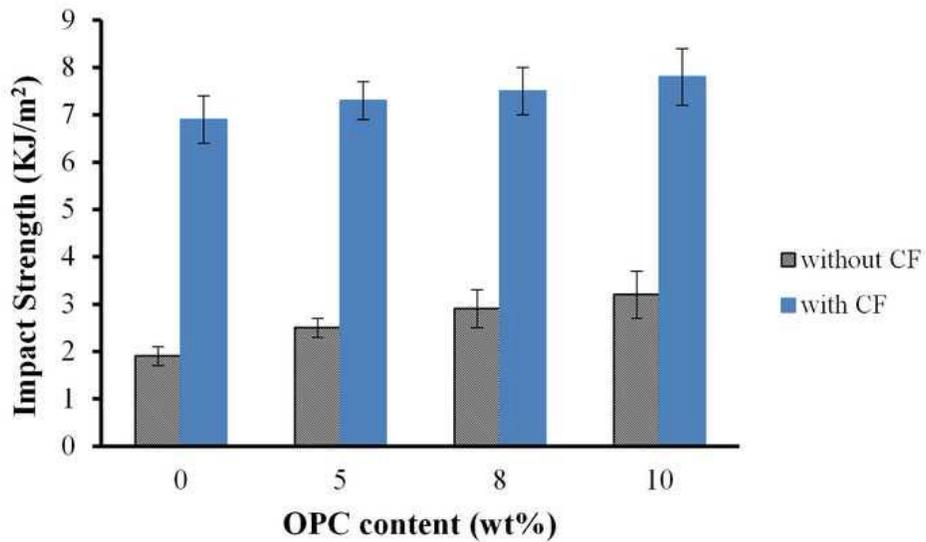


Figura 41: Resistencia al impacto en base al contenido de OPC para compuestos NFRG con y sin tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)

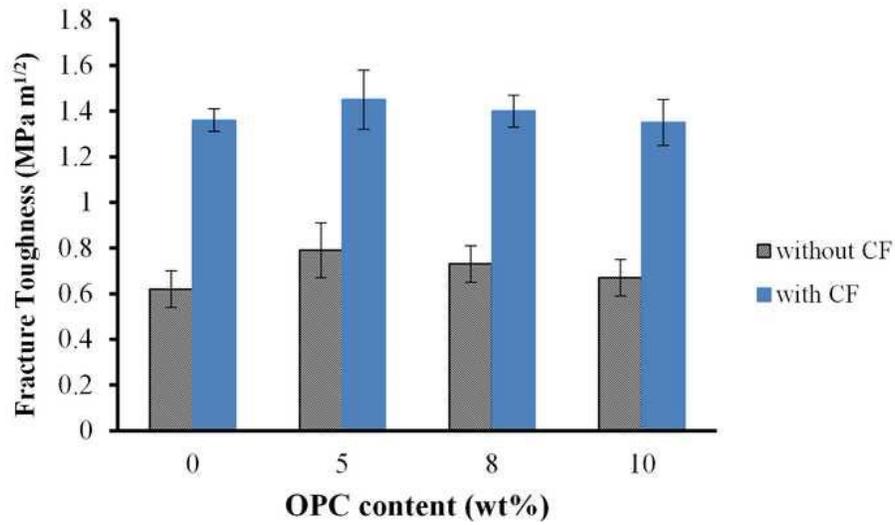
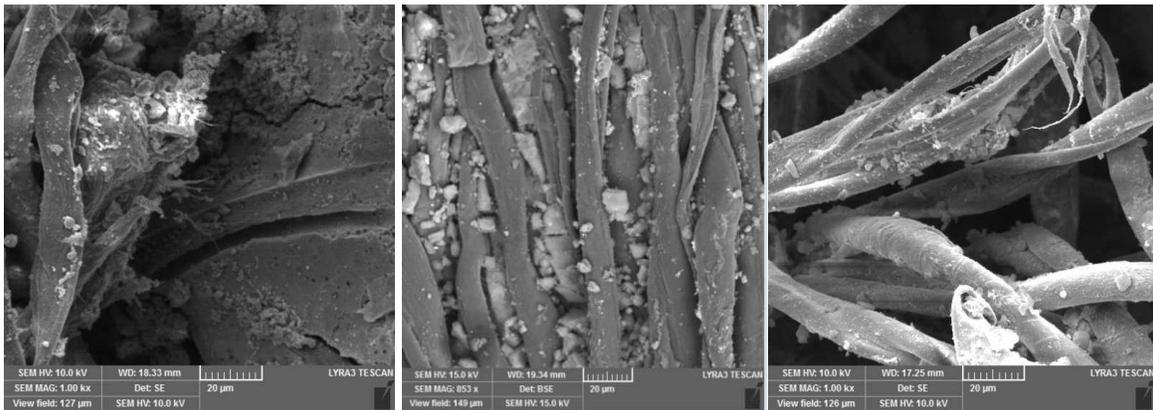


Figura 42: Tenacidad a la fractura en base al contenido de OPC para compuestos NFRG con y sin tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)



(a)

(b)

(c)

Figura 43: Imágenes SEM de un compuesto NFRG con CF que contiene: (a) 5% en peso de OPC; (b) y (c) 10% en peso de OPC.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014b)

Anexo 5. Estudio de Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)

Titulado: Síntesis y propiedades mecánicas de los compuestos de geopolímero reforzado con tejidos de algodón.

Tabla 8: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón.*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Capas de tejido de CF	Contenido de fibras (% en peso)
Compuestos 0	14.7	29.4	55.9	0	0
Compuestos 1	14.7	29.4	55.9	5	3.6
Compuestos 2	14.7	29.4	55.9	10	4.5
Compuestos 3	14.7	29.4	55.9	20	6.2
Compuestos 4	14.7	29.4	55.9	40	8.3

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

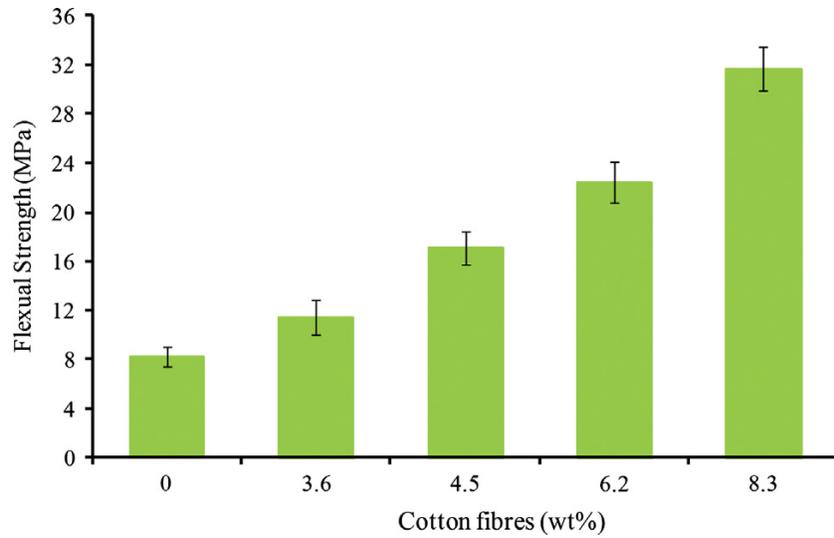


Figura 44: Resistencia a la flexión de compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)

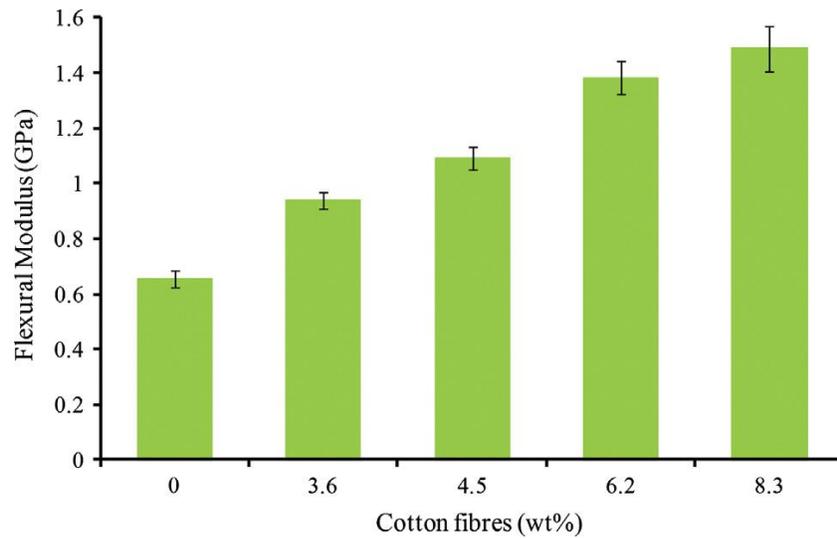


Figura 45: Módulo de flexión de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)

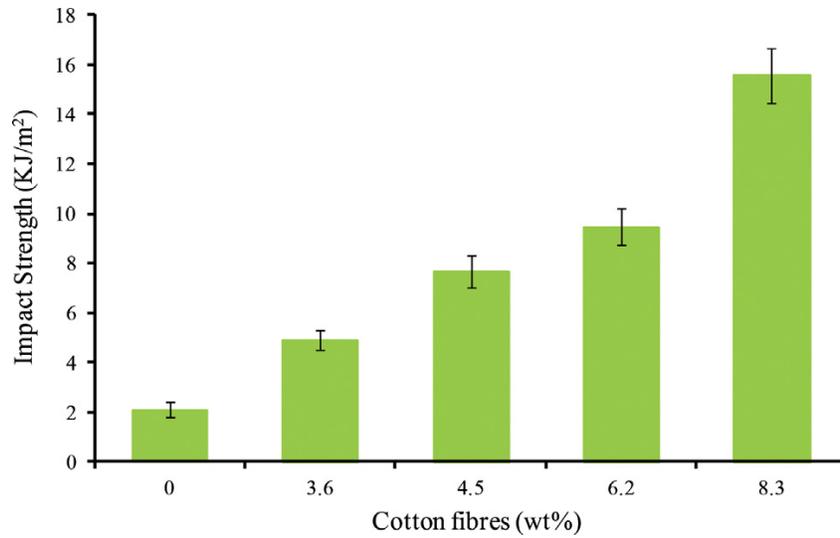


Figura 46: Resistencia al impacto de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)

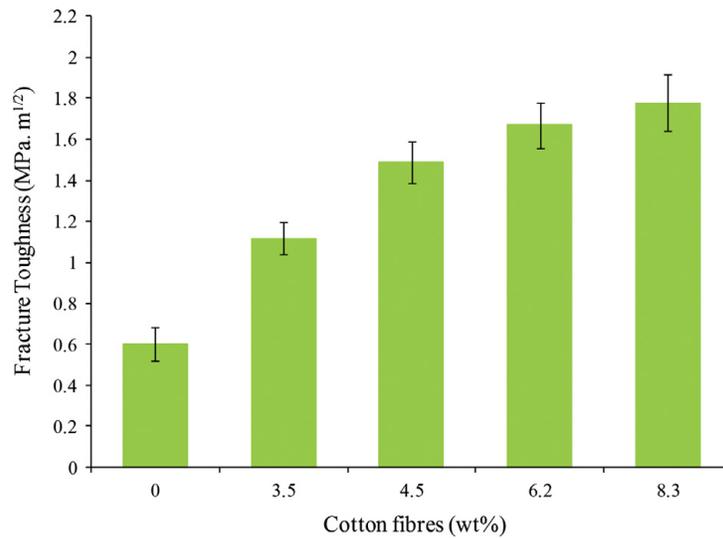


Figura 47: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)

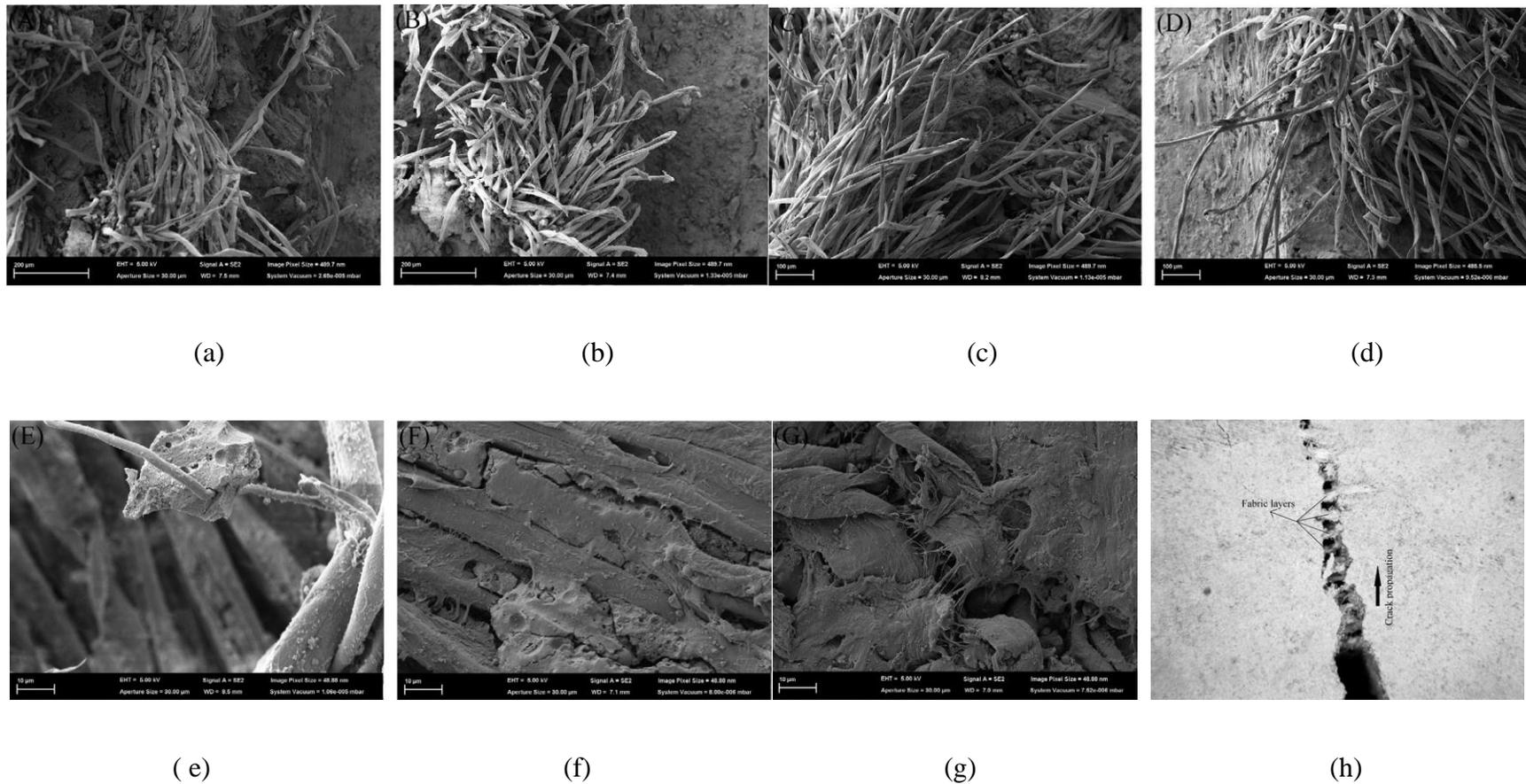


Figura 48: Imágenes SEM de la superficie de fractura de los compuestos NFRG con: (a) 3.6, (b) 4.5, (c) 6.2 y (d y e) 8.3% en peso de CF; (f) se ve el relleno de la matriz en el CF, (g) es una micro fibrilación de CF y (h) se observa la propagación de grietas en compuestos NFRG con 8,3% en peso de tejidos de algodón.

Fuente: Alomayri, Shaikh, et al., (2014c)

Anexo 6. Estudio de Alomayri et al., (2014)

Titulado: Propiedades mecánicas de los compuestos de geopolímero reforzado con tela de algodón a 200–1000 °C

Tabla 9: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de algodón.*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Capas de tejido de CF	Contenido de fibras (% en peso)
Compuestos 0	14.7	29.4	55.9	0	0
Compuestos 4.5 CF	14.7	29.4	55.9	10	4.5
Compuestos 6.2 CF	14.7	29.4	55.9	20	6.2
Compuestos 8.3 CF	14.7	29.4	55.9	40	8.3

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

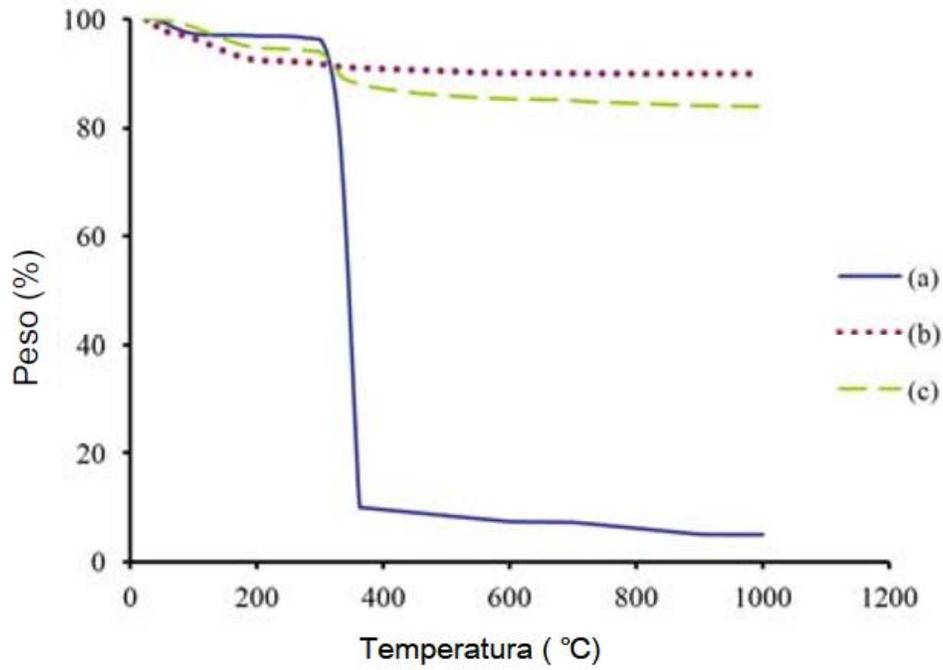


Figura 49: Diagrama TGA de (a) CF, (b) GP y (c) NFRG

Fuente: Alomayri et al., (2014)

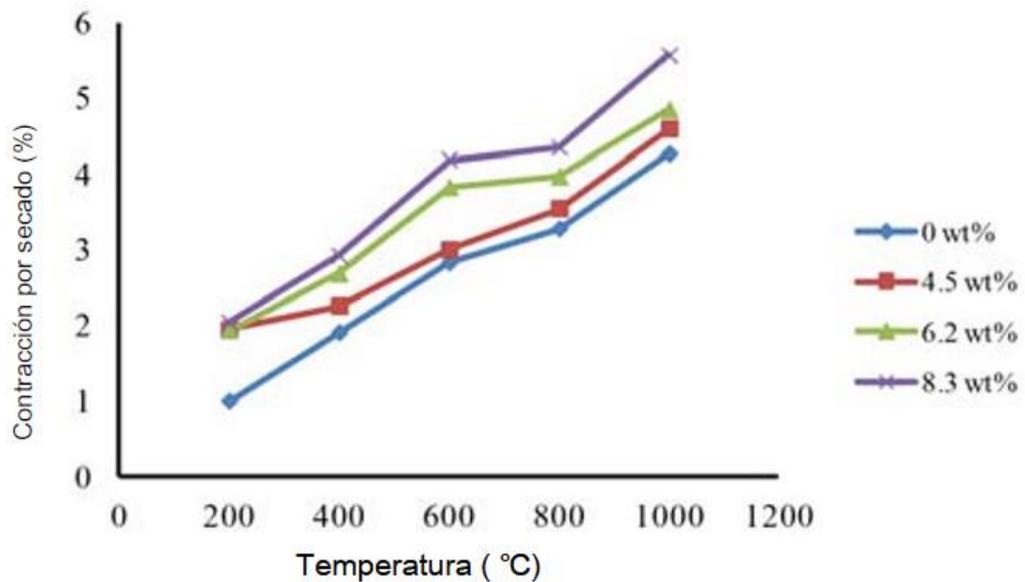


Figura 50: Contracción por secado de los compuestos NFRG a varias temperaturas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

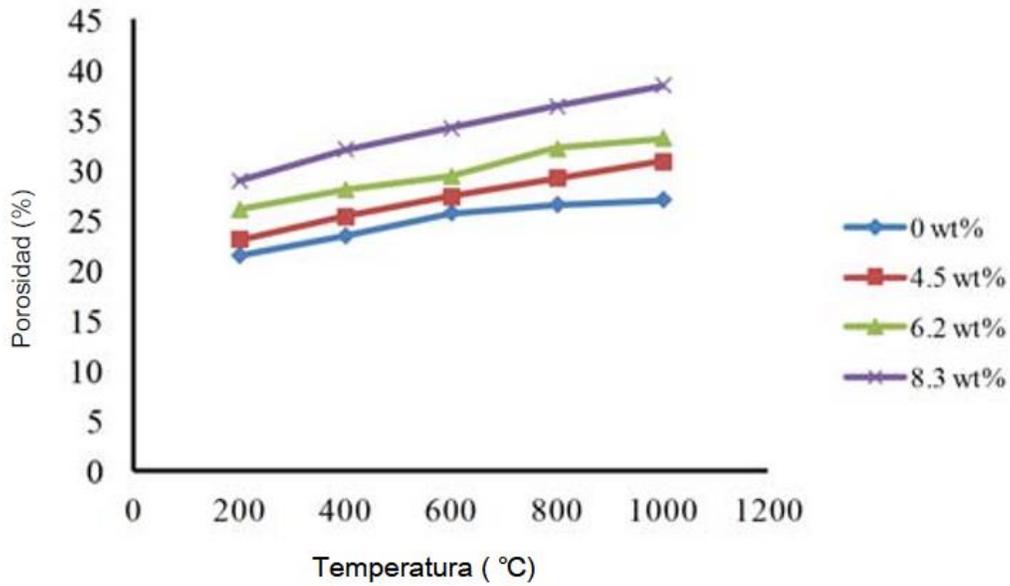


Figura 51: Porosidad de los compuestos NFRG a varias temperaturas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

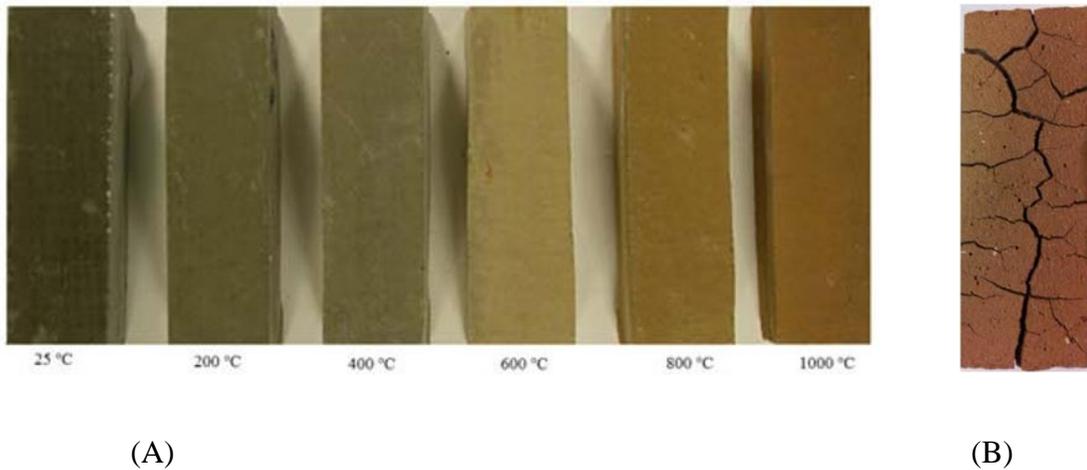


Figura 52: (A) compuestos NFRG con 8.3% en peso de CF antes y después de someterlas a varias temperaturas y (B) GP con 0% en peso de CF después de someterla a 1000 °C

Fuente: Alomayri et al., (2014)

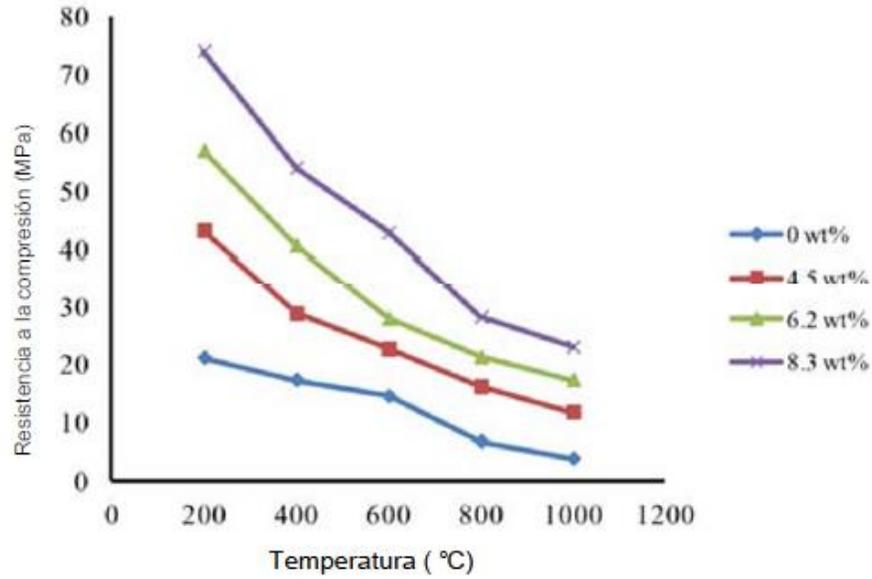


Figura 53: Resistencia a la compresión de los compuestos NFRG a varias temperaturas.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

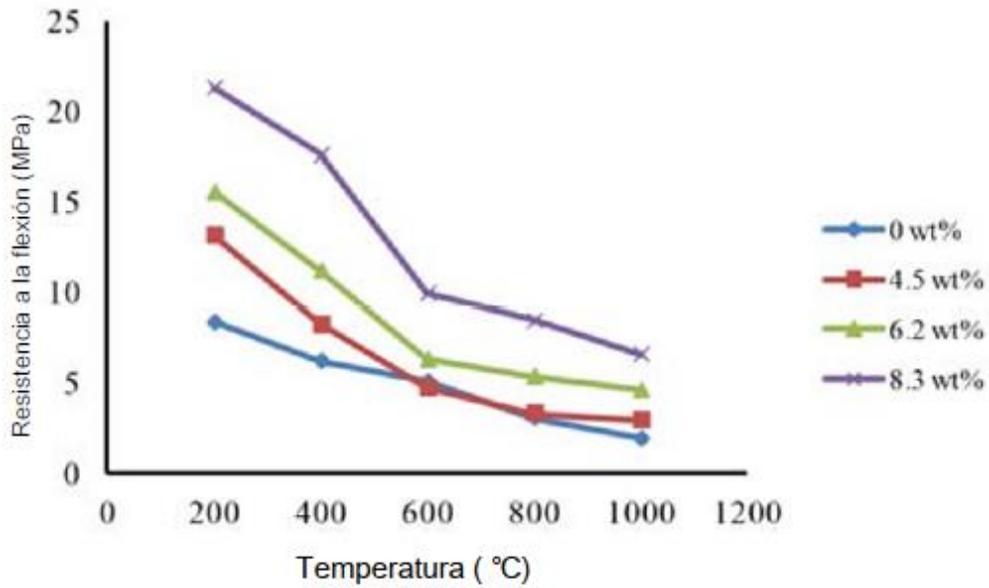
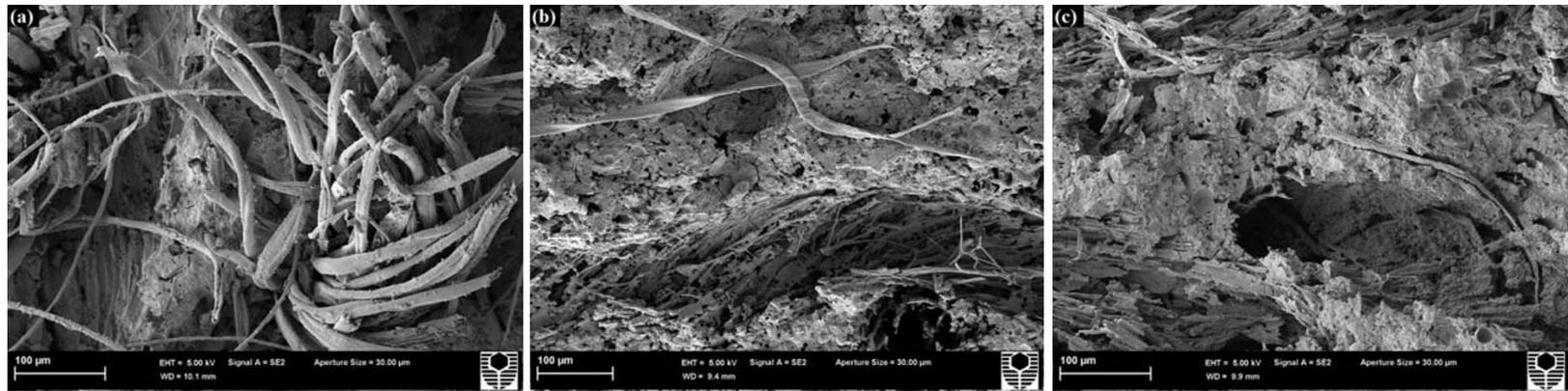


Figura 54: Resistencia a la flexión de los compuestos NFRG a varias temperaturas.

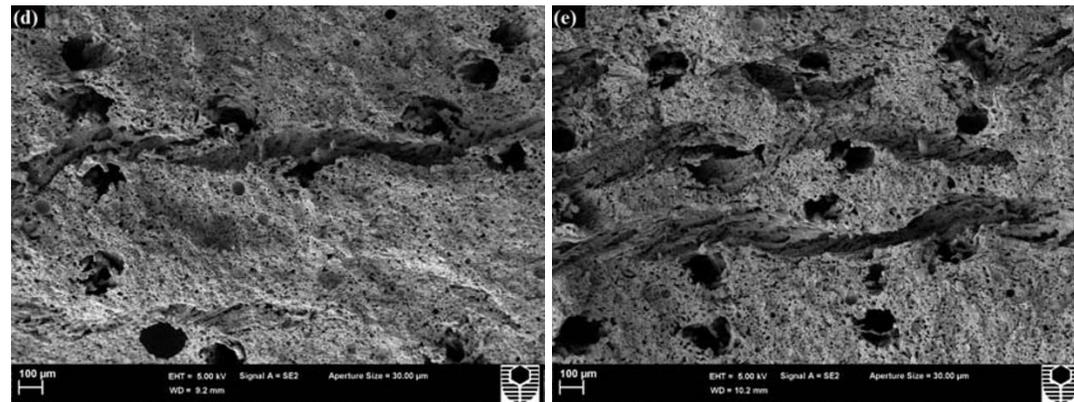
Fuente: Alomayri et al., (2014)



(A)

(B)

(C)



(D)

(E)

Figura 55: Imágenes SEM de la superficie de fractura para compuestos NFRG con 8.3% en peso de CF a varias temperaturas: (A) 200 °C (B) 400 °C (C) 600 °C (D) 800 °C y (E) 1000 °C.

Fuente: Alomayri et al., (2014)

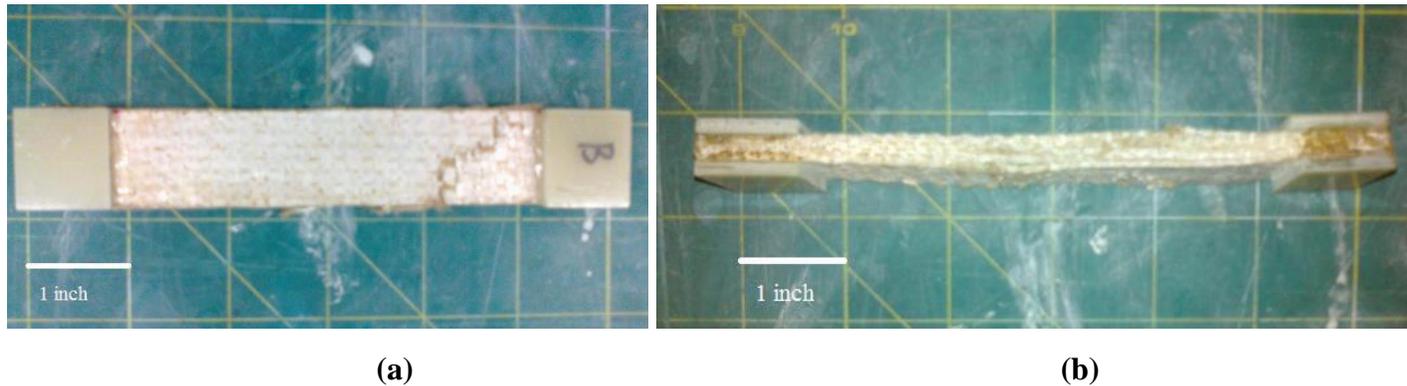
Anexo 7. Estudio de Sankar & Kriven, (2014)

Titulado: Geopolímero de sodio reforzado con tejido de yute.

Tabla 10: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de yute.*

Composición del geopolimero a base de metacaolin es:	$\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 4\text{SiO}_2 : 11\text{H}_2\text{O} (1: 1: 4: 11)$
La reacción de geopolimerización es la siguiente:	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O} + 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Tejidos de yute:	Se colocó un tejido de yute de 8 x 6 pulgadas, en 5 capas de tejido de yute tratadas con alkali e impregnadas de geopolimero y alternando la matriz con el refuerzo

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.





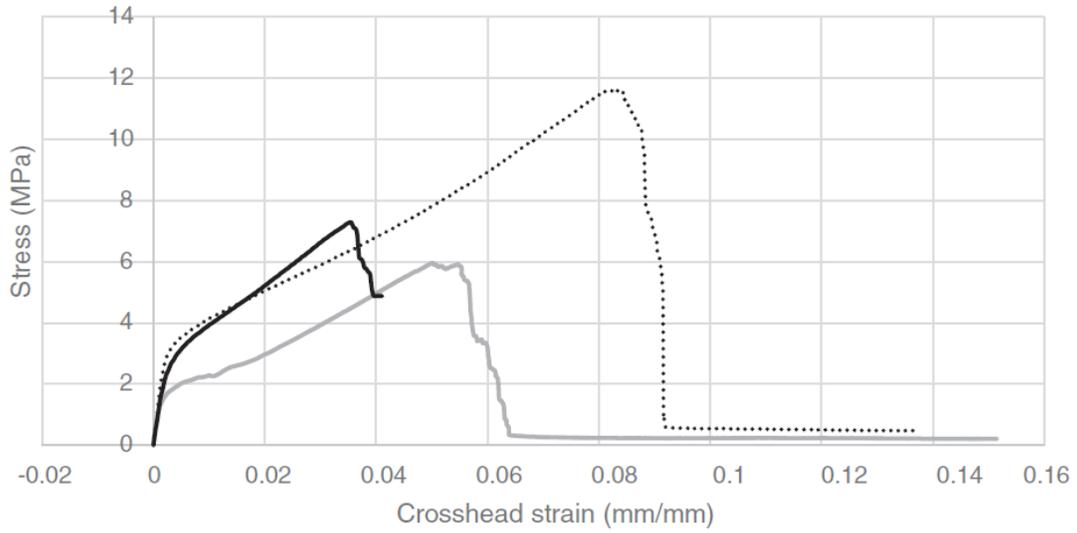
(c)



(d)

Figura 56: *Muestra sometida a prueba de tracción prensada a 54 psi después de fallar debido a la delaminación. (a) y (b) compuestos NFRG con yute tal como se recibieron, (c) y (d) compuestos NFRG con yute tratado con álcali.*

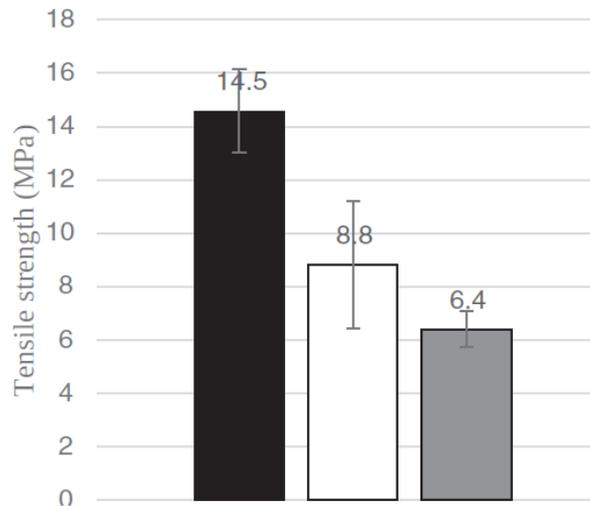
Fuente: Sankar & Kriven, (2014)



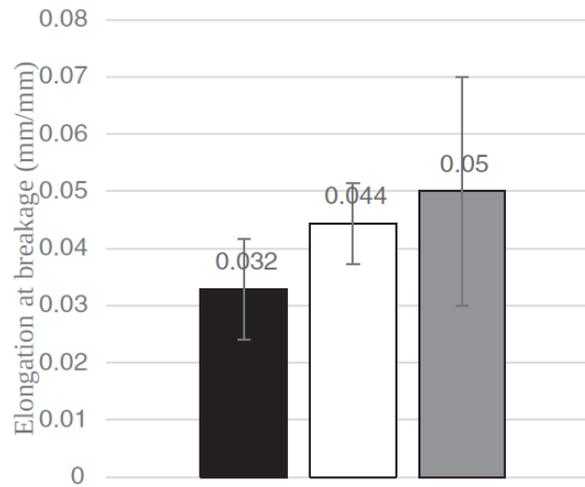
Composite “prensado” tratado con álcali ($M_f=0.3$)
 Composite “prensado” con yute tal como se recibió ($M_f=0.5$) —————
 Composite “sin prensar” con yute tal como se recibió ($M_f= 0.3$) —————

Figura 57: Diagrama tensión-deformación uniaxial de tracción para varios tipos de compuestos NFRG de yute.

Fuente: Sankar & Kriven, (2014)



(a)



(b)

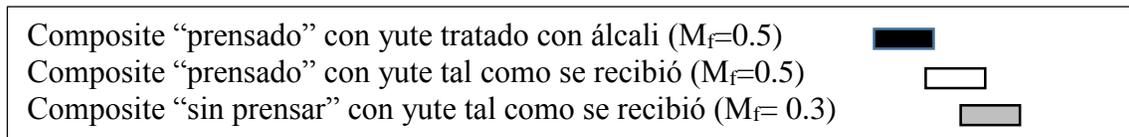


Figura 58: (a) Resistencia a la tracción (MPa) y (b) elongación a la rotura (mm / mm) para los composites NFRG de yute.

Fuente: Sankar & Kriven, (2014)

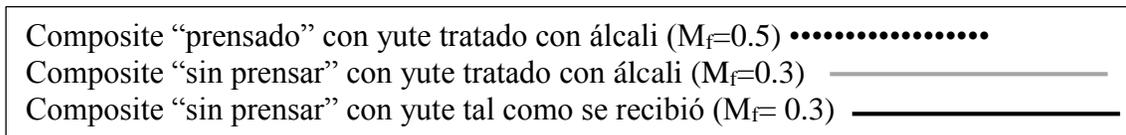
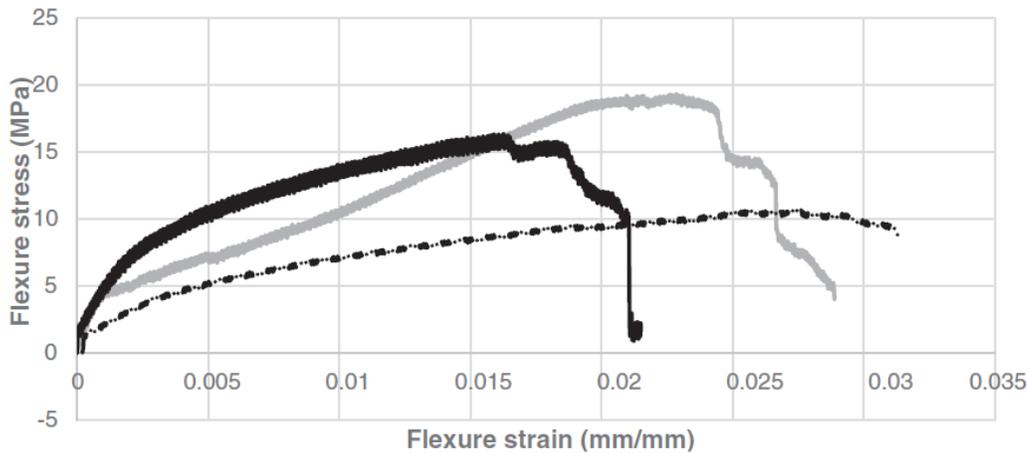


Figura 59: Diagrama tensión-deformación por flexión para compuestos NFRG de yute.

Fuente: Sankar & Kriven, (2014)

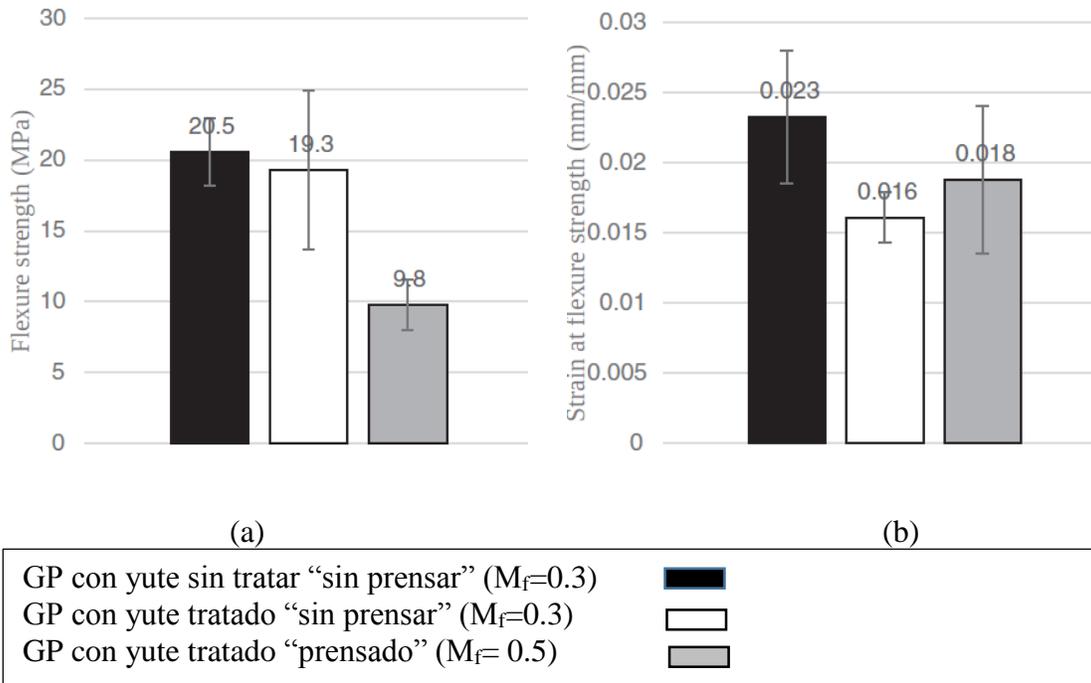
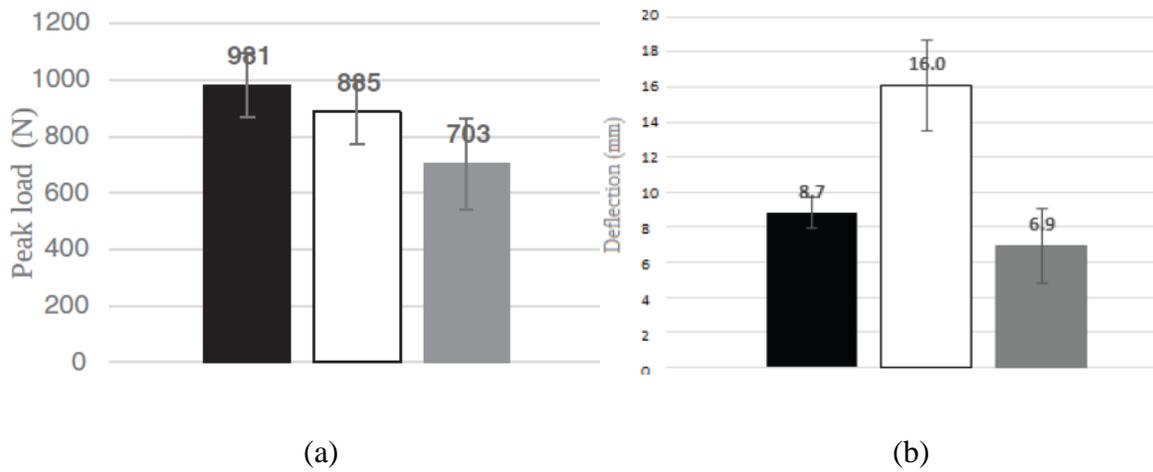
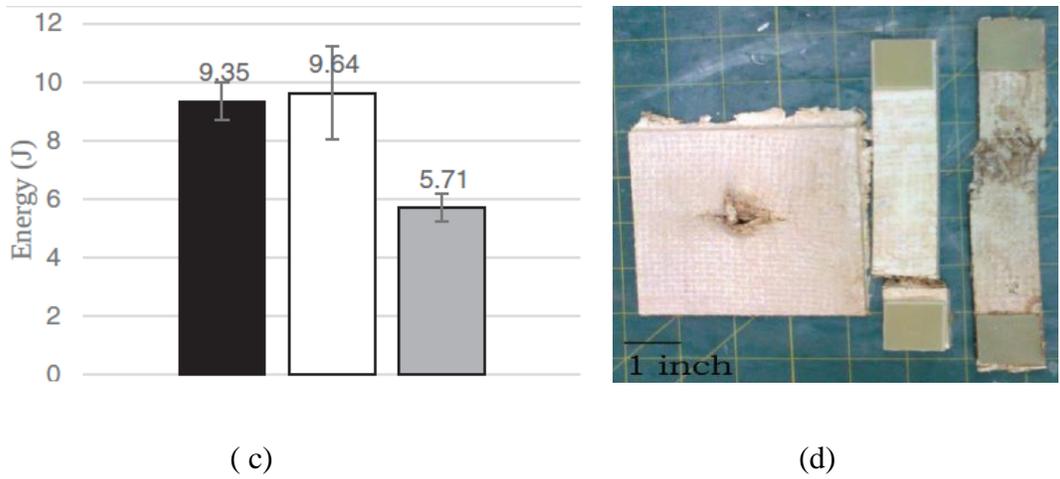


Figura 60: (a) resistencia a la flexión (MPa) (b) deformación a la resistencia a la flexión (mm / mm) para compuestos NFRG de yute.

Fuente: Sankar & Kriven, (2014)

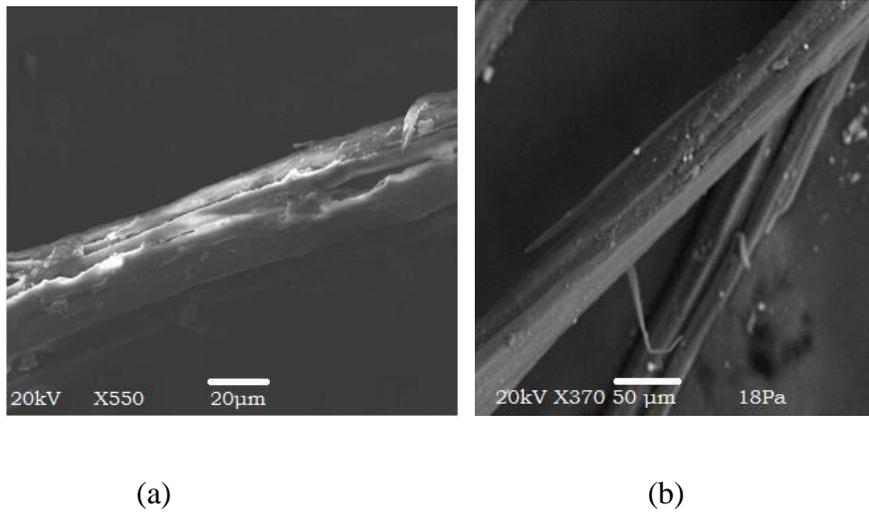


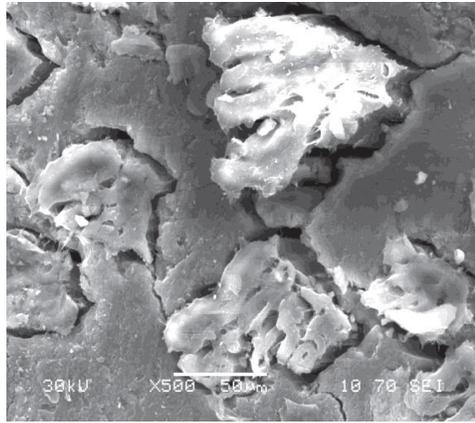


Compuesto con yute sin tratar "presado"	
Compuesto con yute tratado alcalinamente "presado"	
Compuesto con yute tratado alcalinamente "sin presado"	

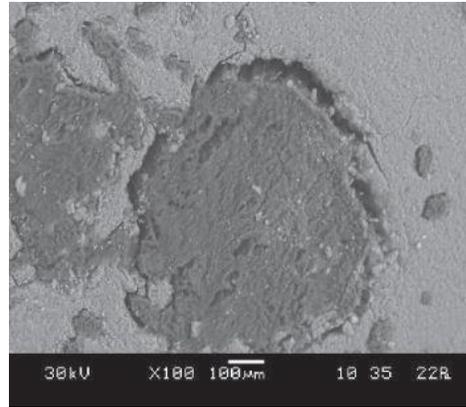
Figura 61: Comparación de (a) carga máxima (N) (b) deflexión (mm) (c) energía absorbida durante el impacto (J) para compuestos NFRG de yute. Las barras de error indican +/- una desviación estándar. (d) De izquierda a derecha: espécimen de impacto GP de yute prensa

Fuente: Sankar & Kriven, (2014)





(c)



(d)

Figura 62: (a) fibra de yute tal como se recibió (b) fibra de yute tratada con álcali (c) interfaz fibra-matriz débil del NFRG de yute tal como se recibió (d) propagación de grietas y variación en el tamaño de la fibra en el compuesto de yute tratado con álcali.

Fuente: Sankar & Kriven, (2014)

Anexo 8. Estudio de Trindade et al., (2019)

Titulado: Comportamiento mecánico de compuestos de geopolímeros endurecibles por deformación reforzados con fibras naturales y PVA.

Anexo 9. Estudio de Trindade, Borges, et al., (2018)

Titulado: Respuesta mecánica de los compuestos de geopolímero reforzados con distintos tipos de fibras.

Tabla 11: *Contenido de materiales para la elaboración del compuesto NFRG con tejidos de yute.*

Fuente de aluminosilicatos:	Metacaolín ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)
Solución alcalina a base de hidróxido de sodio y silicato:	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Agregado natural:	Arena de río, con densidad de 2.68 g / cm^3 y diámetro máximo de 1,18 mm.
Tejido:	El tejido de yute se incorporó tal como se recibió en un 10% en peso.

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

Tabla 12: Resistencia a la compresión de geopolímeros 100MK a diferentes regímenes de curado.

Efecto del período de curado y la temperatura sobre la resistencia a la compresión (MPa)									
Periodo de curado (horas y días)		2h	4h	8h	24h	48h	7d	14d	28d
Temperatura de curado	25°C	1,8	32,7	32,9	48	51,2	72,7	73,4	74,1
	60°C	5	39,8	49,2	54,5	59,6	78,6	79,3	81,2

Fuente: Broncano Y. Jonathan M. – Córdova L. Leonardo J.

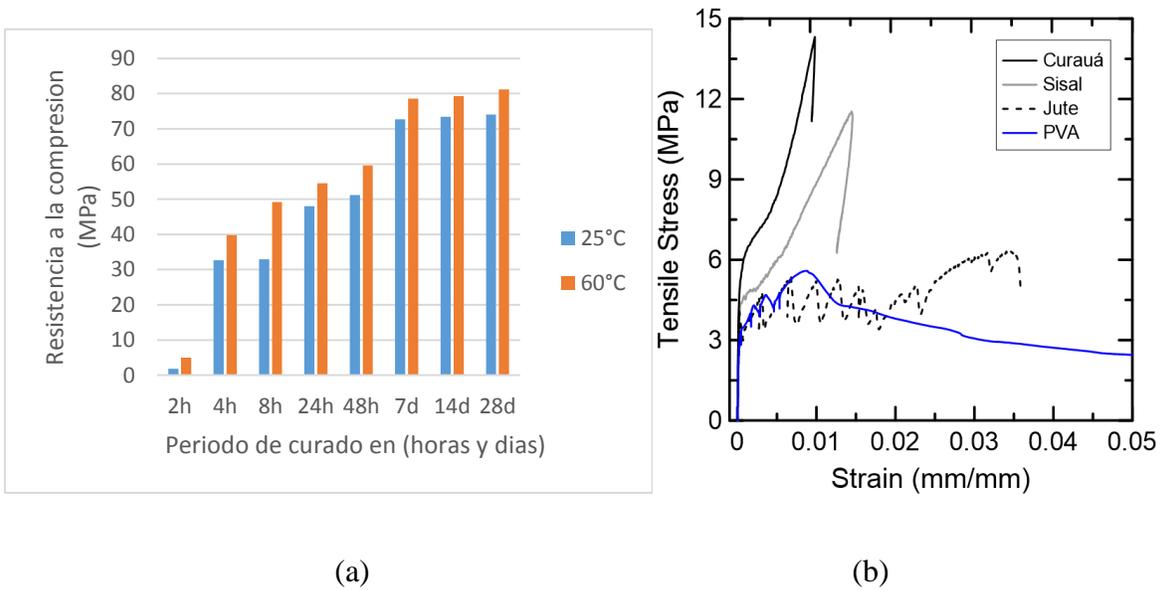


Figura 63: Efecto del período de curado y la temperatura sobre la resistencia a la compresión del geopolímero 100MK. (b) Diagrama tensión – deformación de los tejidos de yute y demás compuestos con otras fibras.

Fuente: Trindade, Borges, et al., (2018), Trindade et al., (2019)

Anexo 10. Estudio de Trindade, Silva, et al., (2017)

Titulado: Sobre el comportamiento de durabilidad de los geopolímeros reforzados con fibras naturales.

Tabla 13: *Materiales (masa) y relaciones molares para elaboración de compuestos NFRG con tejidos de yute (con 1000g como referencia).*

Muestra	Capas de tejido de yute	Masa(g)				Relación Molar					
		MK	SF	BFS	TOTAL	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	H ₂ O/ Na ₂ O	Na ₂ O/ SiO ₂	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃	SiO ₂ / CaO	Al ₂ O ₃ / CaO
F3.0-100MK	5	1000	-	-	1000	3	11	0.25	0.75	-	-
F3.9-80MK20SF	5	800	200	-	1000	3.9	11	0.25	0.98	-	-
F3.9-60MK40BFS	5	600	-	400	1000	3.9	11	0.25	0.98	4.03	1.03

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

Tabla 14: Resistencia a la compresión realizadas a tres matrices diferentes.

Muestra	Pruebas de compresión		
	σ_{max}	ϵ_{max}	E_c
	(MPa)	($\mu\epsilon$)	(GPa)
F3.0-100MK	72.7	4543.4	14.26
	(2.1)	(314.3)	(1.87)
F3.9-80MK20SF	51.24	6223.5	12.05
	(1.4)	(478.9)	(1.56)
F3.9-60MK40BFS	81.98	4342.05	23.94
	(3.2)	(305.6)	(3.15)

(Los valores entre paréntesis se refieren a la desviación estándar).

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

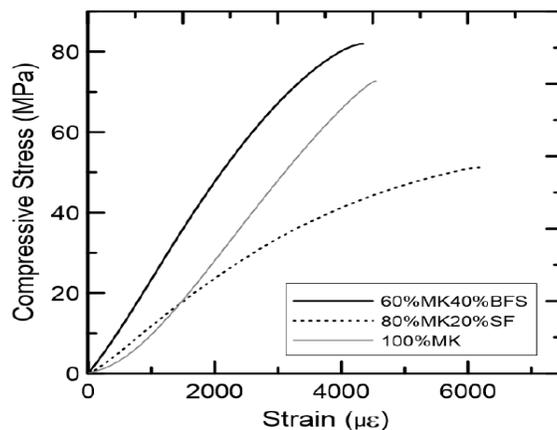


Figura 64: Diagrama de esfuerzo de compresión Vs deformación de los compuestos NFRG F3.0-100MK, F3.9-80MK20SF y F3.9- 60MK40BFS.

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

Tabla 15: Resistencia a la tracción realizada a tres matrices diferentes, reforzadas con cinco capas de fibras de yute

Muestra	Ensayos a traccion				
	σ_{lf}	ϵ_{lf}	σ_u	ϵ_u	E_u
	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)	(GPa)
F3.0-100MK+5L	4.13 (0.51)	0.0007	6.31 (0.78)	0.034	14.92 (1.37)
F3.9-80MK20SF+5L	2.51 (0.37)	0.0004	4.34 (0.55)	0.036	13.84 (1.09)
F3.9-60MK40BFS+5L	4.37 (0.34)	0.0012	8.02 (1.13)	0.037	16.64 (1.15)

(los valores entre paréntesis se refieren a la desviación estándar)

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

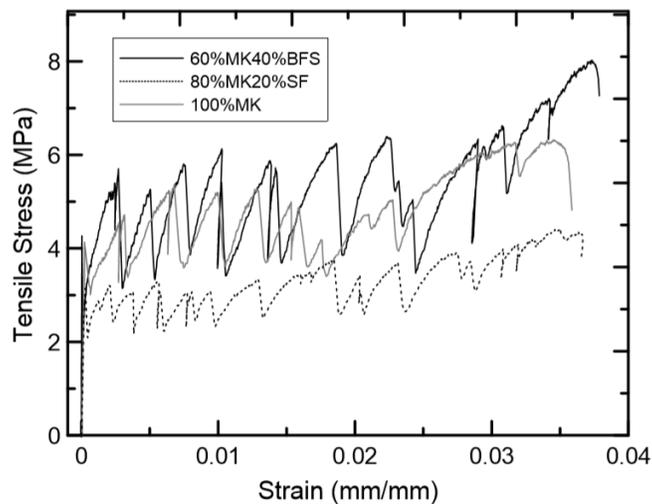


Figura 65: Diagrama de esfuerzo de tracción Vs deformación de compuestos NFRG con yute F3.0-100MK, F3.9-80MK20SF y F3.9-60MK40BFS.

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

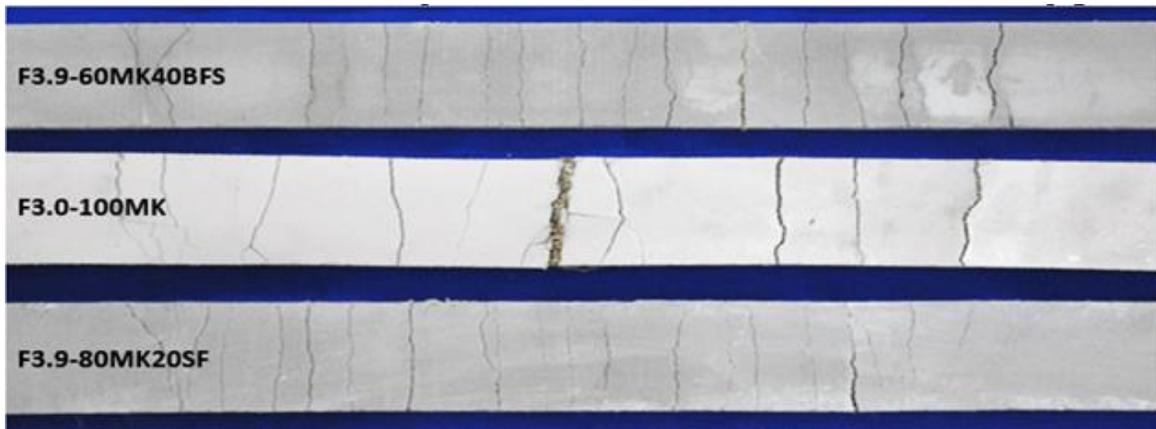


Figura 66: *Compuestos que fueron sometidos a pruebas de tracción y muestran diferentes patrones de agrietamiento.*

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

Tabla 16: *Resistencia a la flexión realizadas a dos compuestos NFRG con cinco capas de fibras de yute.*

Muestra	Pruebas de flexión				
	P_{lf}	σ_{lf}	δ_{lf}	σ_u	δ_u
	(kN)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)
F3.0-100MK+5L	0.215	7.49 (0.72)	0.20	12.33 (0.61)	21.57
F3.9-60MK40BFS+5L	0.275	9.57 (0.56)	0.31	18.36 (1.80)	19.74

(los valores entre paréntesis se refieren a la desviación estándar)

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

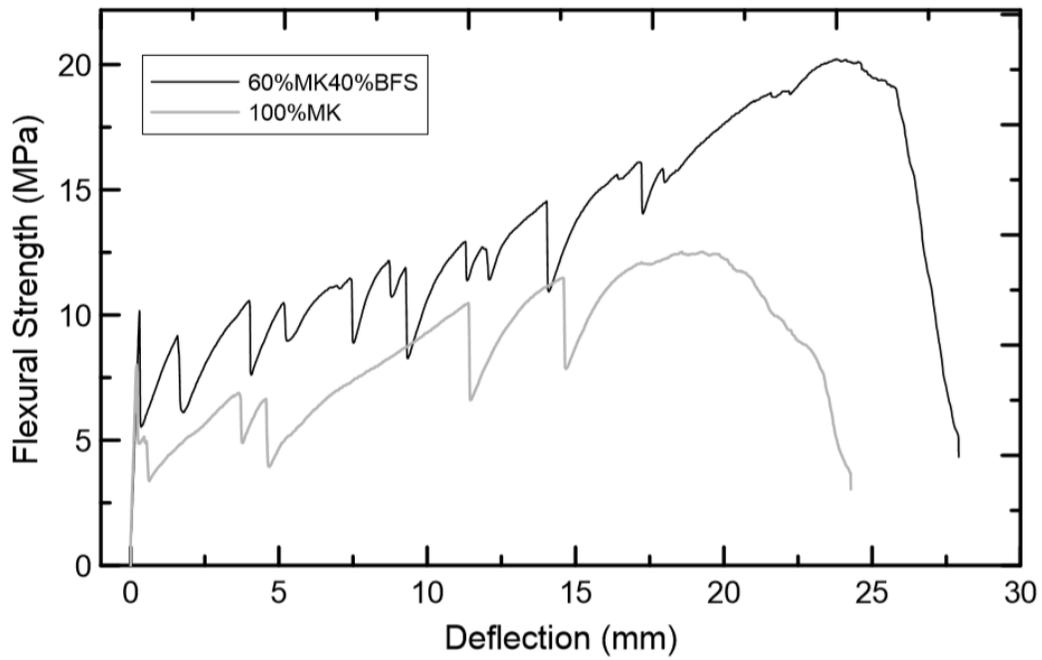


Figura 67: Diagrama de resistencia a la flexión Vs deflexión de los compuestos NFRG con yute (F3.0-100MK y F3.9-60MK40BFS).

Fuente: Trindade, Silva, et al., (2017)

Anexo 11. Estudio de Trindade, Alcamand, et al., (2017)

Titulado: Influencia de las temperaturas elevadas en el comportamiento mecánico de geopolímeros reforzados con tejidos de yute.

Tabla 17: *Materiales y relaciones molares de la matriz de geopolímero (100MK), y (100MK + ARENA y 100MK + CHA); reforzados con 5 capas de tejidos de yute (fracción volumétrica del 10%)*

Muestra	MK/Arena	MK/CHA	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	H ₂ O/ Na ₂ O	Na ₂ O/ SiO ₂	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃	Capas de tejido.
100MK +Arena	1.00	-	3.0	11.0	0.25	0.75	5
100MK +CHA	-	0.50	3.0	11.0	0.25	0.75	5
100MK	-	-	3.0	11.0	0.25	0.75	5

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

Tabla 18: Resistencia a la compresión y Módulo de Young de los NFRG después de la exposición a diferentes temperaturas.

Muestra	Temperatura							
	25 °C		100 °C		300 °C		500 °C	
	σ_{\max} (MPa)	E_c (GPa)						
100MK +Arena	72.70	14.26	64.03	11.01	25.53	2.91	18.88	1.63
	(± 2.12)		(± 3.65)		(± 2.0)		(± 3.5)	
100MK +CHA	61.73	14.70	56.7	12.06	42.3	5.78	38.86	3.99
	(± 2.96)		(± 3.54)		(± 2.91)		(± 3.3)	
100MK	45.65	10.61	38.81	8.10	21.94	2.35	16.35	1.54
	(± 2.75)		(± 4.01)		(± 3.02)		(± 2.04)	

σ_{\max} = fuerza máxima; E_c = El módulo de Young. (valores de desviación estándar entre paréntesis)

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

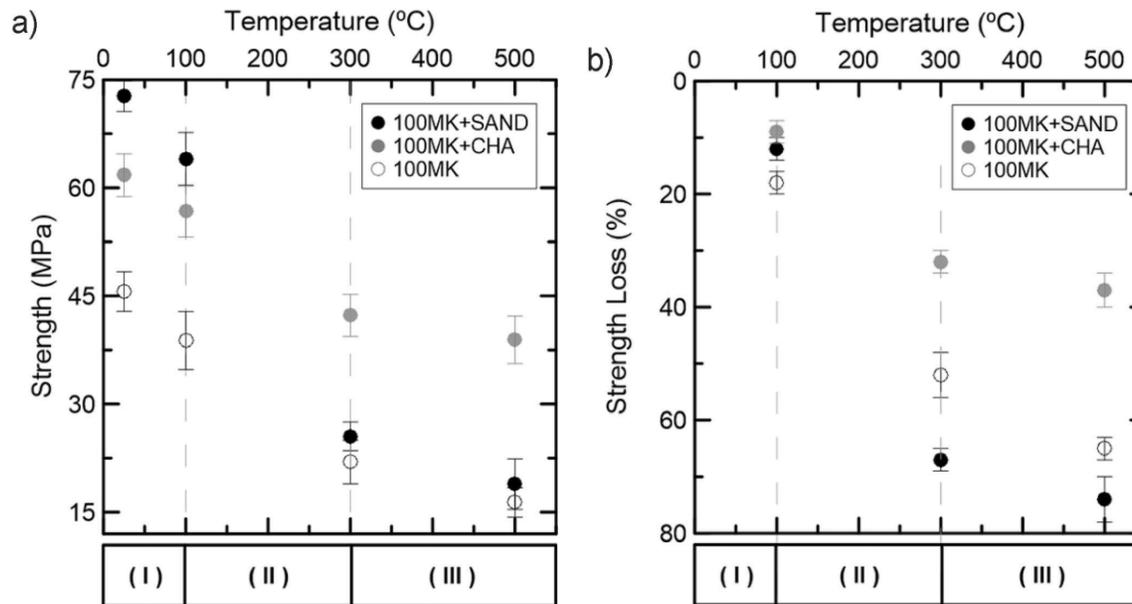


Figura 68: Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión para los compuestos NFRG: (a) absoluta y (b) porcentaje de pérdida de resistencia.

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

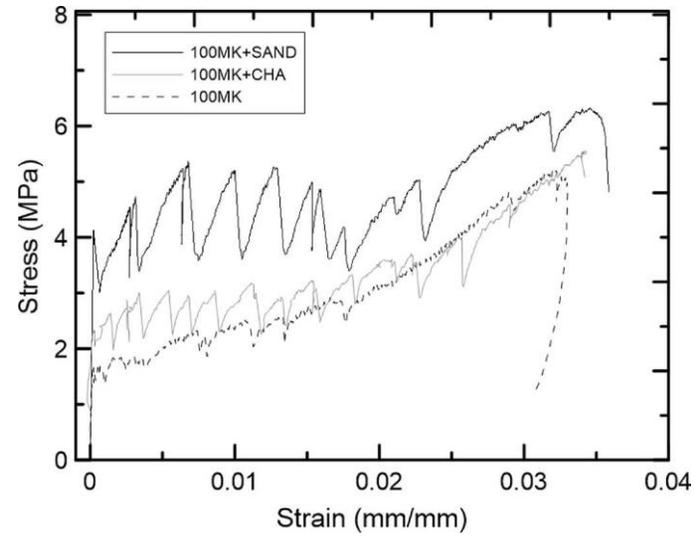


Figura 69: *Ensayo de tracción directa de los geopolímeros reforzados con fibras naturales: 100MK + SAND, 100MK + CHA y 100MK.*

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

Tabla 19: Resistencia a la tracción y Módulo de Young de los compuestos NFRG después de la exposición a diferentes temperaturas.

Muestra	Temperatura														
	25 °C			100 °C			150 °C			200 °C			250 °C		
	σ_{lf} (MPa)	σ_u (MPa)	E_t (MPa)	σ_{lf} (MPa)	σ_u (MPa)	E_t (MPa)	σ_{lf} (MPa)	σ_u (MPa)	E_t (MPa)	σ_{lf} (MPa)	σ_u (MPa)	E_t (MPa)	σ_{lf} (MPa)	σ_u (MPa)	E_t (MPa)
100MK +Arena	4.13 (± 0.51)	6.31 (± 0.78)	14.92 (± 1.37)	1.43 (± 0.42)	3.86 (± 0.67)	9.35 (± 0.96)	1.05 (± 0.38)	2.26 (± 0.78)	5.39 (± 0.71)	-	-	-	-	-	-
100MK +CHA	2.31 (± 0.29)	5.54 (± 0.48)	14.04 (± 1.06)	2.10 (± 0.27)	3.67 (± 0.62)	10.42 (± 1.19)	1.87 (± 0.34)	2.86 (± 0.81)	10.03 (± 1.11)	1.16 (± 0.18)	2.39 (± 0.63)	8.01 (± 0.95)	0.41 (± 0.09)	1.53 (± 0.56)	4.22 (± 0.43)
100MK	1.37 (± 0.18)	5.21 (± 0.76)	10.53 (± 1.18)	1.24 (± 0.12)	3.84 (± 0.88)	8.67 (± 1.02)	0.76 (± 0.07)	3.15 (± 1.01)	6.76 (± 0.85)	0.60 (± 0.09)	2.11 (± 1.01)	5.30 (± 1,33)	-	-	-

σ_{lf} (MPa)= tensión de tracción en la primera fisura; σ_u (MPa)= tensión de tracción máxima; E_t (MPa)= El módulo de Young.
(valores de desviación estándar entre paréntesis)

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

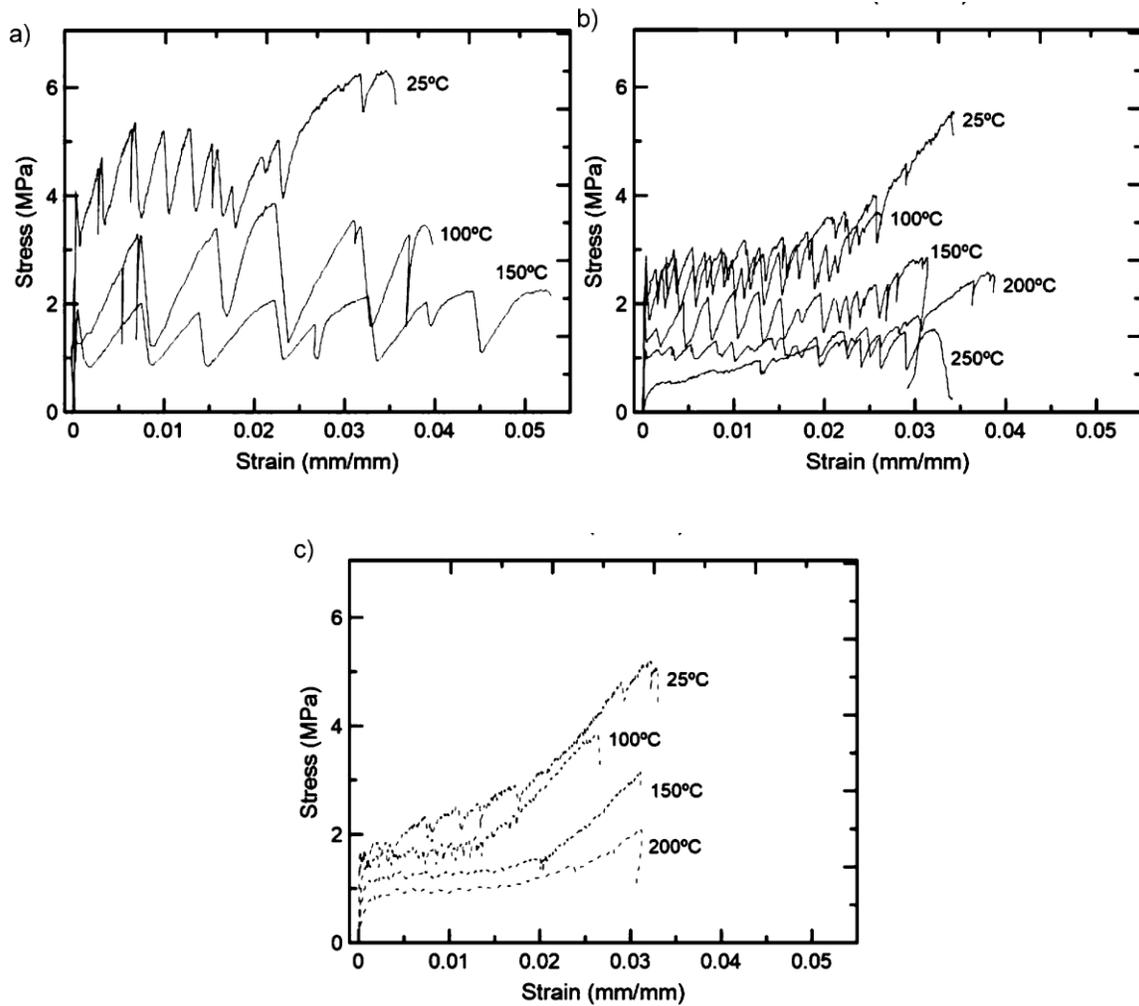


Figura 70: Resistencia a la tracción de los compuestos NFRG con tejidos de yute después de la exposición a diferentes temperaturas: (a) 100MK + ARENA, (b) 100MK + CHA y (c) 100MK.

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

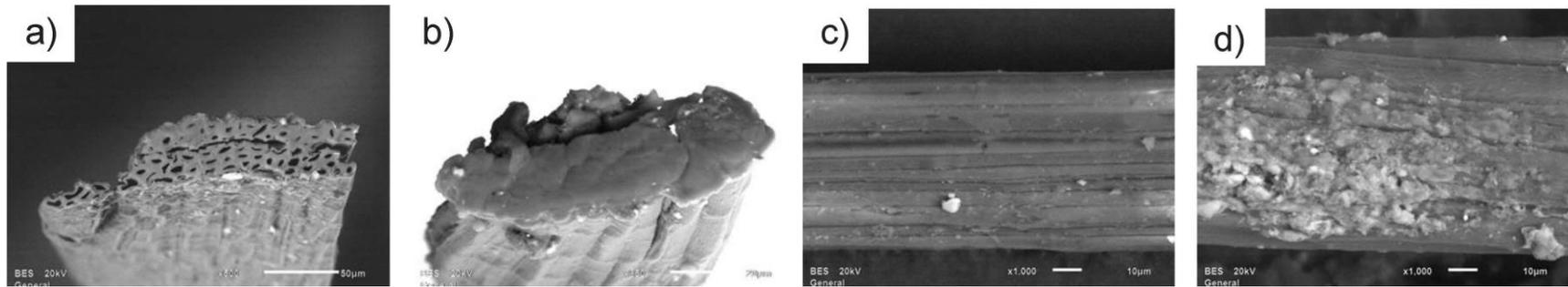


Figura 71: Sección transversal y perfiles longitudinales de las fibras de yute: (a) y (c) a temperatura ambiente tal como se reciben; (b) y (d) después de ser eliminado del compuesto 100MK + CHA expuesto a 250 ° C.

Fuente: Trindade, Alcamand, et al., (2017)

Anexo 12. Estudio de Trindade, Arêas, et al., (2018)

Titulado: Comportamiento mecánico de los compuestos geopoliméricos reforzados con fibras naturales.

Tabla 20: *Materiales y relaciones molares de la matriz de geopolímero con 5 capas de tejidos de yute (fracción volumétrica del 10%)*

Muestra	MK/Arena	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	H ₂ O/ Na ₂ O	Na ₂ O/ SiO ₂	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃	Capas de tejido.
F3.0-100MK	1.00	3.0	11.0	0.25	0.75	5

Fuente: Trindade, Arêas, et al., (2018)

Tabla 21: Resistencia a la tracción y flexión de compuestos reforzados con yute y sisal.

Muestra	Ensayos de tracción				Ensayos de flexión		
	σ_{lf}	σ_u	ϵ_u	E_t	σ_{lf}	σ_u	δ_u
	(MPa)	(MPa)	(mm/mm)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(mm/mm)
Yute GC	4.13	6.31	0.034	14.92	8.36	15.21	28.34
(tejidos)	(0.51)	(0.78)	(0.003)	(1.37)	(0.63)	(2.01)	(2.89)
Sisal GC	4.37	11.53	0.014	14.14	5.23	17.68	15.65
(fibras)	(0.26)	(0.46)	(0.004)	(0.68)	(0.48)	(2.87)	(1.89)

(los valores entre paréntesis se refieren a la desviación estándar)

Fuente: Trindade, Arêas, et al., (2018)

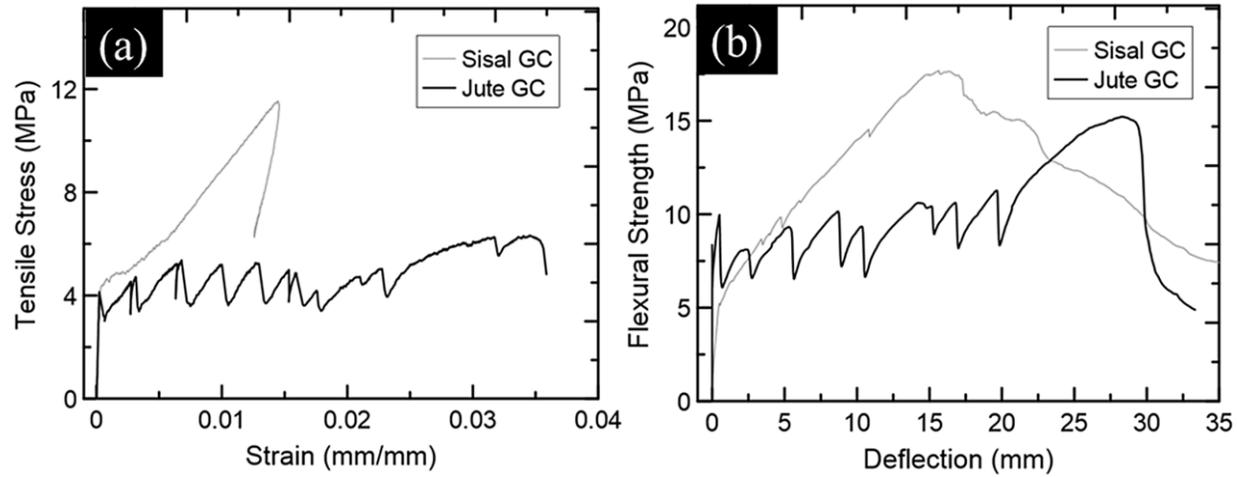


Figura 72: (a) Esfuerzo de tracción Vs deformación; y (b) resistencia a la flexión Vs curvas de deflexión de compuestos NFRG con tejidos de yute y fibras de sisal.

Fuente: Trindade, Arêas, et al., (2018)

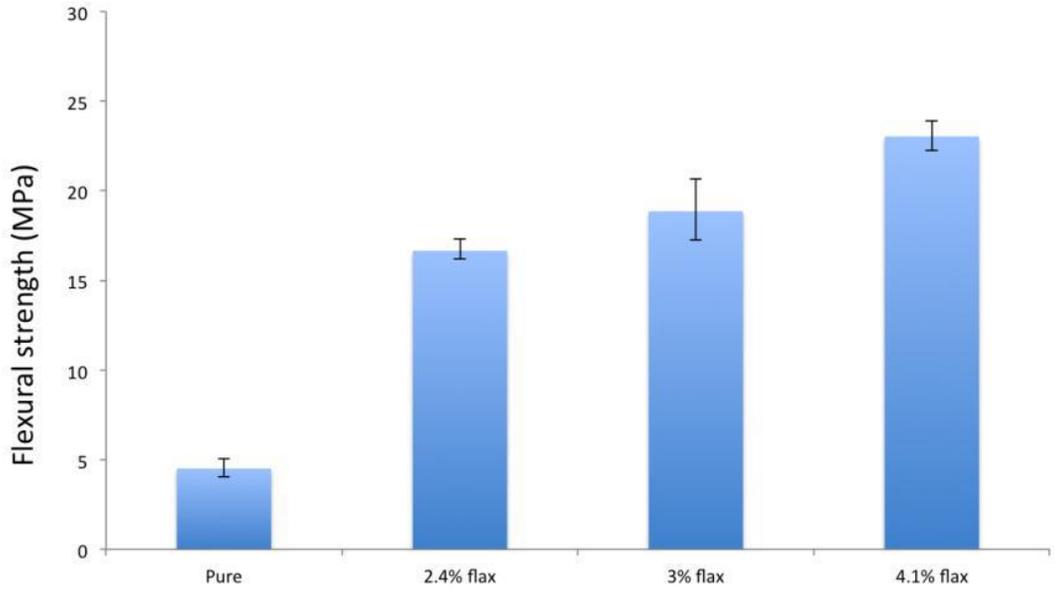
Anexo 13. Estudio de Assaedi et al., (2014)

Titulado: Síntesis y propiedades mecánicas de compuestos de geopolímero reforzado con tejido de lino.

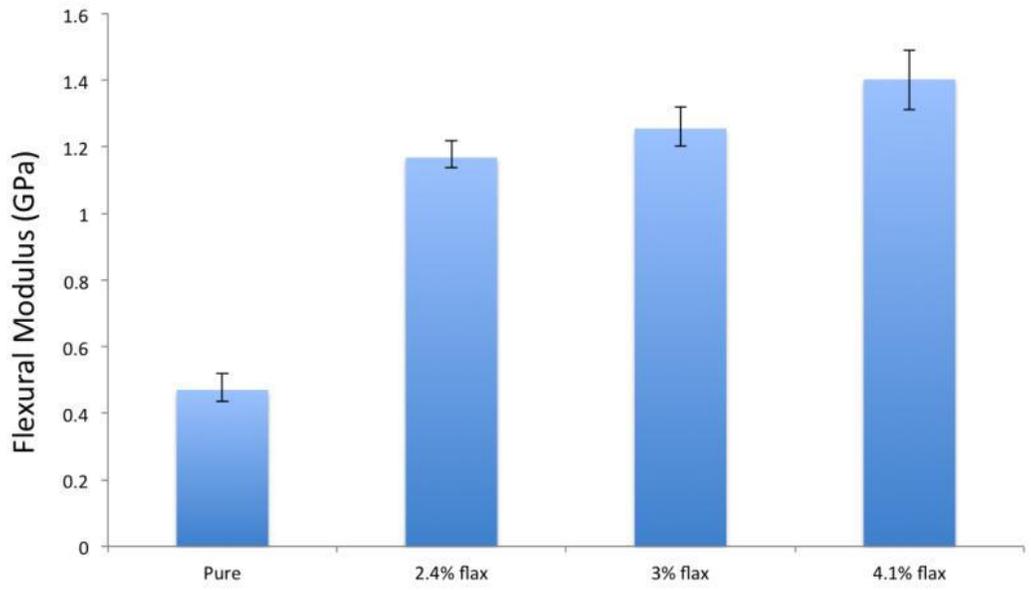
Tabla 22: *Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejido de Lino.*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Relación (solución alcalina a cenizas volantes)	Contenido de fibras (% en peso)
GP	14.7	29.4	55.9	0.75	0
GPNS-2.4FF	14.7	29.4	55.9	0.75	2.4
GPNS-3.0FF	14.7	29.4	55.9	0.75	3.0
GPNS-4.1FF	14.7	29.4	55.9	0.75	4.1

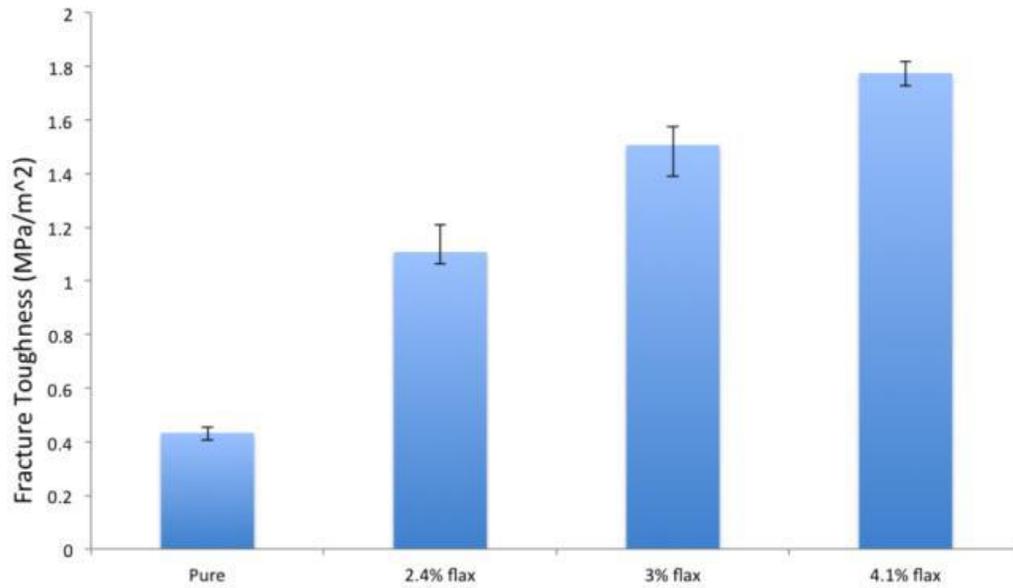
Fuente: Assaedi et al., (2014)



(a)



(b)



(c)

Figura 73: (a) Resistencia a la flexión de los compuestos y (b) Módulo de flexión, de compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejidos lino (c) Tenacidad a la fractura de compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejido de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2014)

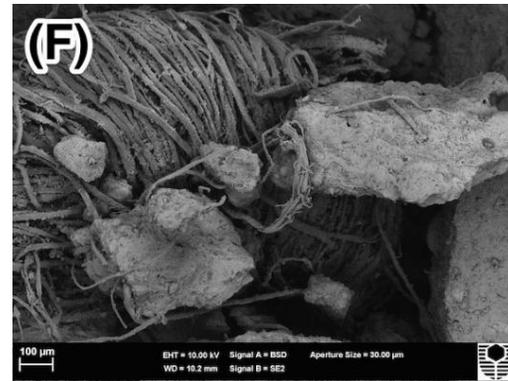
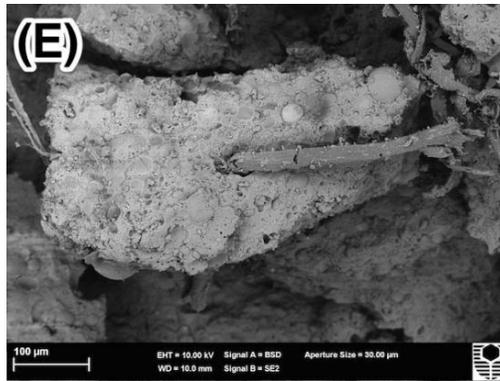
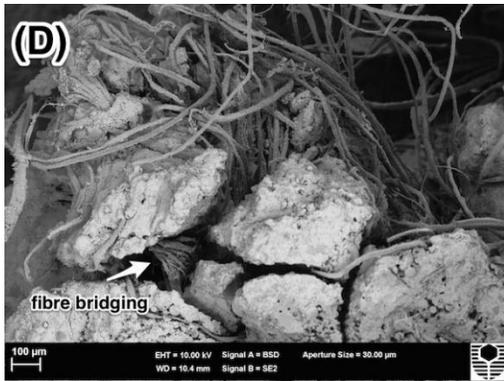
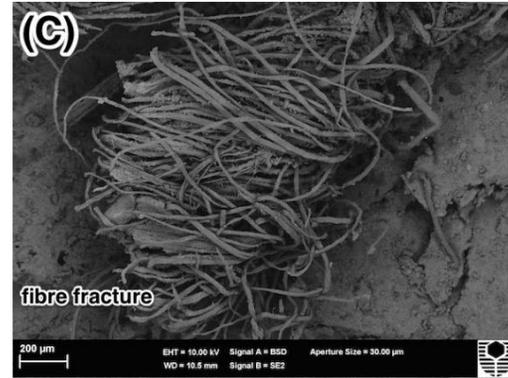
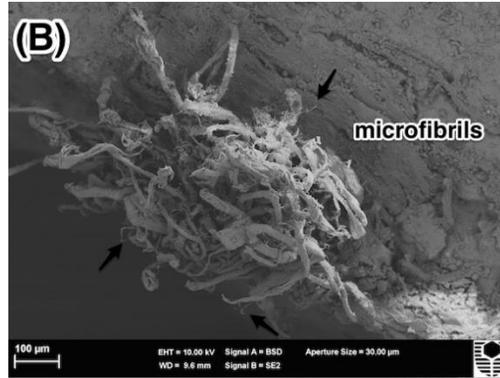




Figura 74: *Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con tejidos de lino (A) puro, (B) 2,4 (C) 3 y (DH) 4,1% en peso; (E y F) adhesión entre la fibra y la matriz, (G) penetración de la matriz en los tejidos de lino, el puente de fibras (D) y (H)*

Fuente: Assaedi et al., (2014)

Anexo 14. Estudio de Assaedi et al., (2016a)

Titulado: Caracterizaciones de compuestos de nanoarcillas y geopolímeros reforzados con tejido de lino.

Tabla 23: *Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino.*

Muestra	Cenizas volantes (g)	Solución de NaOH (g)	Solución de Na ₂ SiO ₃ (g)	Nanoarcilla (g)	Contenido de FF (% en peso)
GP	1000	214.5	535.5	0	0
GPNC-1	1000	214.5	535.5	10	0
GPNC2	1000	214.5	535.5	20	0
GPNC-3	1000	214.5	535.5	30	0
GPFNC-0	1000	214.5	535.5	0	4.1
GPFNC-1	1000	214.5	535.5	10	4.1
GPFNC-2	1000	214.5	535.5	20	4.1
GPFNC-3	1000	214.5	535.5	30	4.1

Fuente: Assaedi et al., (2016a)

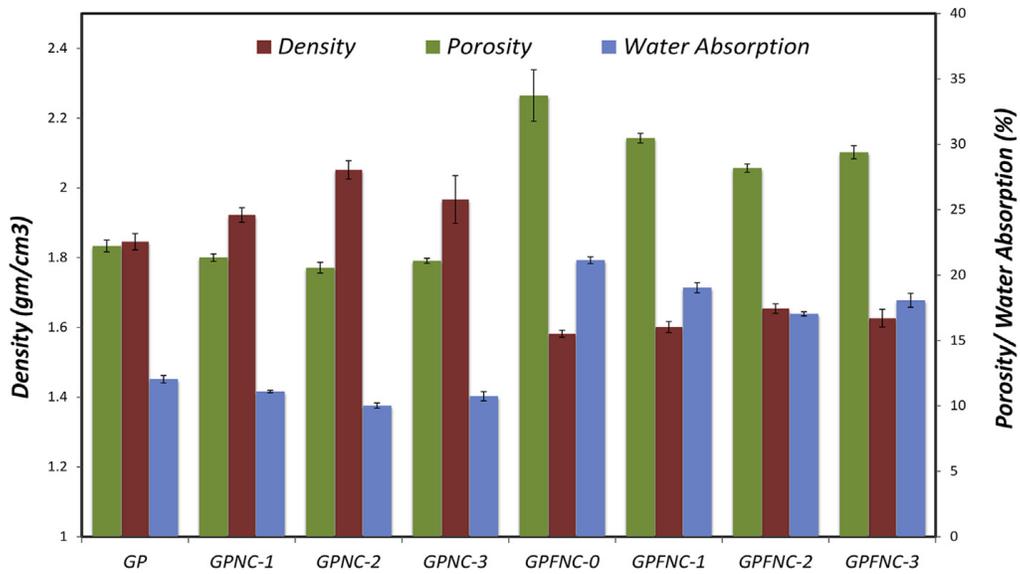


Figura 75: Resultados de densidad, porosidad y absorción de agua para todos los compuestos con o sin refuerzo.

Fuente: Assaedi et al., (2016a)

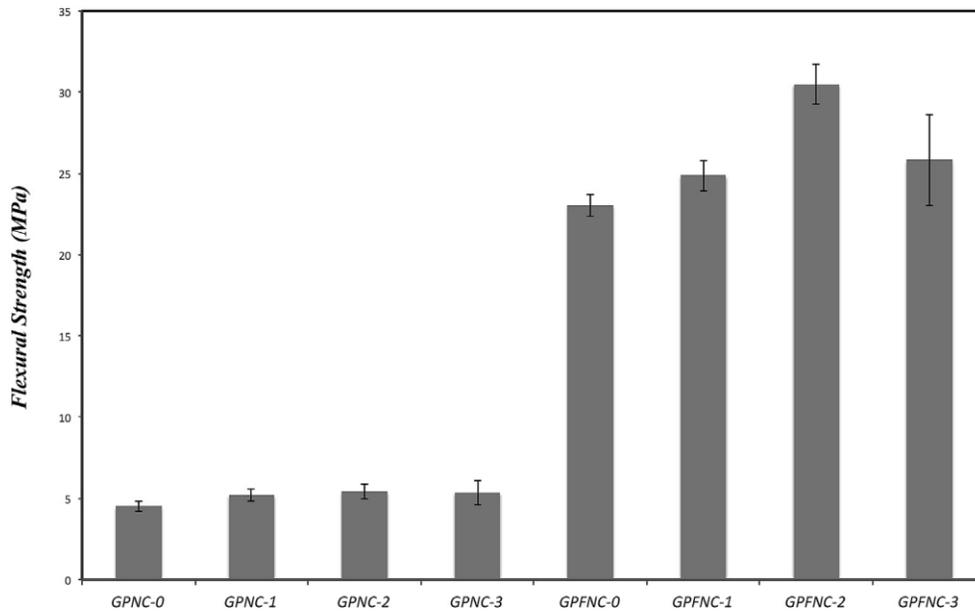


Figura 76: Resistencia a la flexión de todas las muestras con y sin refuerzo.

Fuente: Assaedi et al., (2016a)

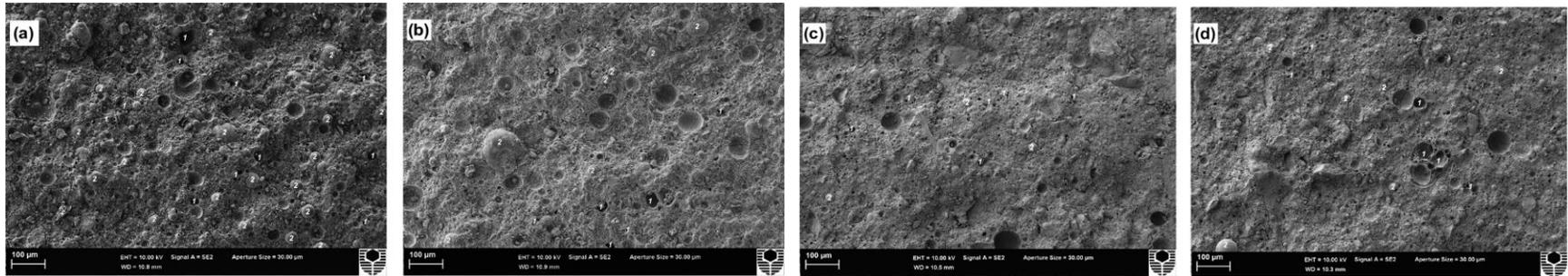


Figura 77: Imágenes SEM de la superficie de fractura de geopolímero con diferentes cargas de nanoarcilla (a) geopolímero puro, (b) 1.0%, (c) 2.0% y (d) 3.0% en peso.

Fuente: Assaedi et al., (2016a)

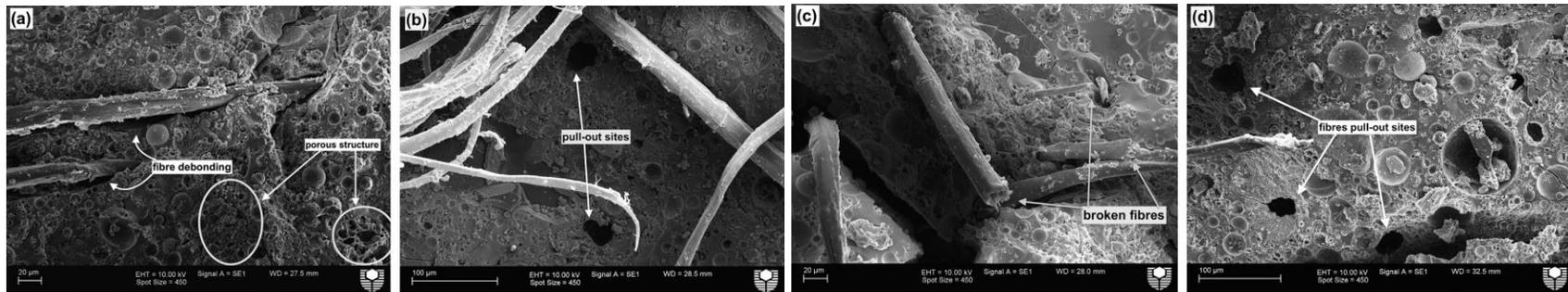


Figura 78: Imágenes SEM de una superficie de fractura de NFRG con FF; (a) GPFNC-0, (b) GPFNC-1, (c) GPFNC-2 (d) GPFNC-3.

Fuente: Assaedi et al., (2016a)

Anexo 15. Estudio de Assaedi et al., (2016b)

Titulado: Influencia de los métodos de mezcla de nano sílice en las propiedades microestructurales y mecánicas de los compuestos de geopolímeros reforzados con tejido de lino.

Tabla 24: *Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino.*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Cenizas volantes (g)	Contenido de fibras (% en peso)
GP	14.7	29.4	55.9	0	4.1
GPNS-0.5	14.7	29.4	55.9	5	4.1
GPNS-1.0	14.7	29.4	55.9	10	4.1
GPNS-2.0	14.7	29.4	55.9	20	4.1
GPNS-3.0	14.7	29.4	55.9	30	4.1

Fuente: Assaedi et al., (2016b)

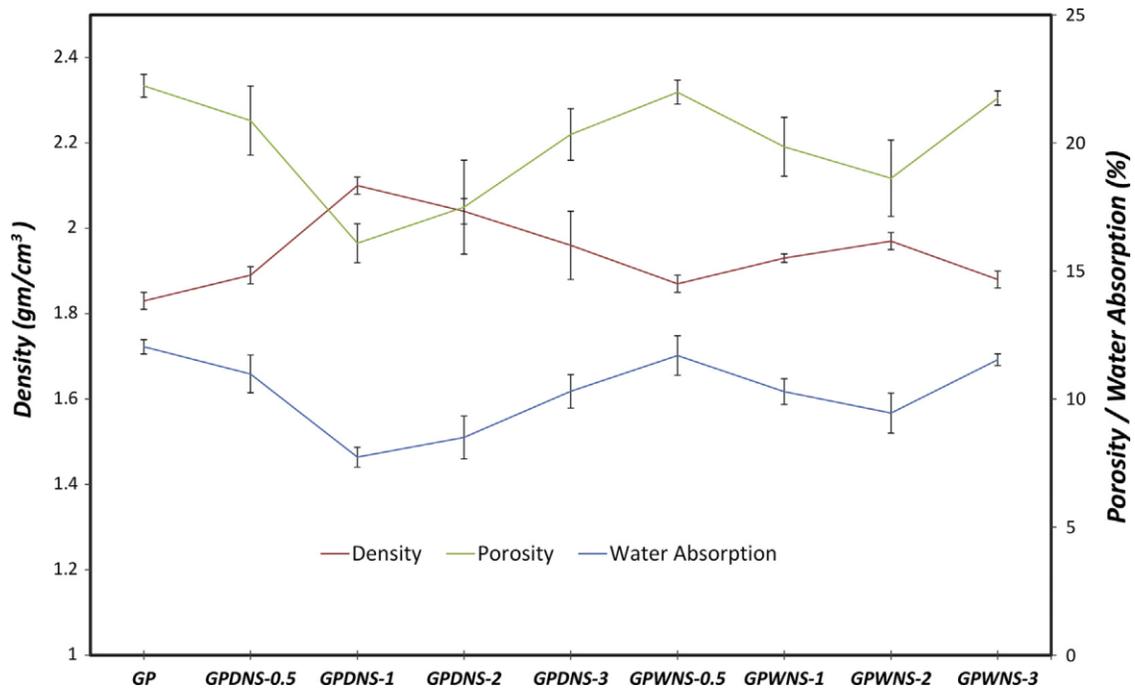
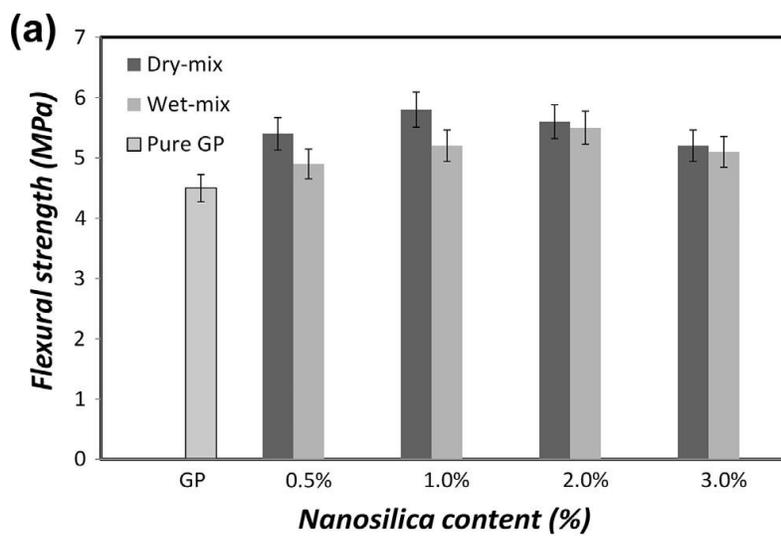


Figura 79: Densidad, porosidad y absorción de agua de nanocompuestos de geopolímeros mediante procedimientos de GPDNS mezcla seca (dry) y GPWNS húmeda (wet)

Fuente: Assaedi et al., (2016b)



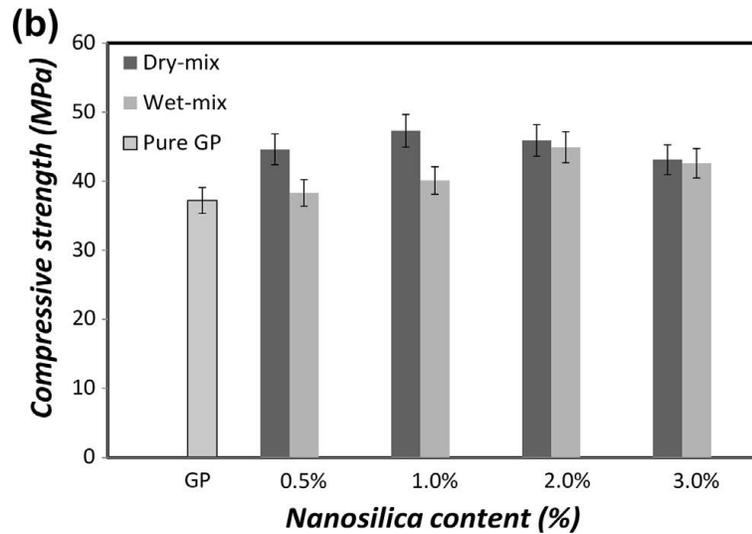


Figura 80: (a) Resistencia a la flexión y (b) Resistencia a la compresión, de compuestos NFRG con tejidos de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2016b)

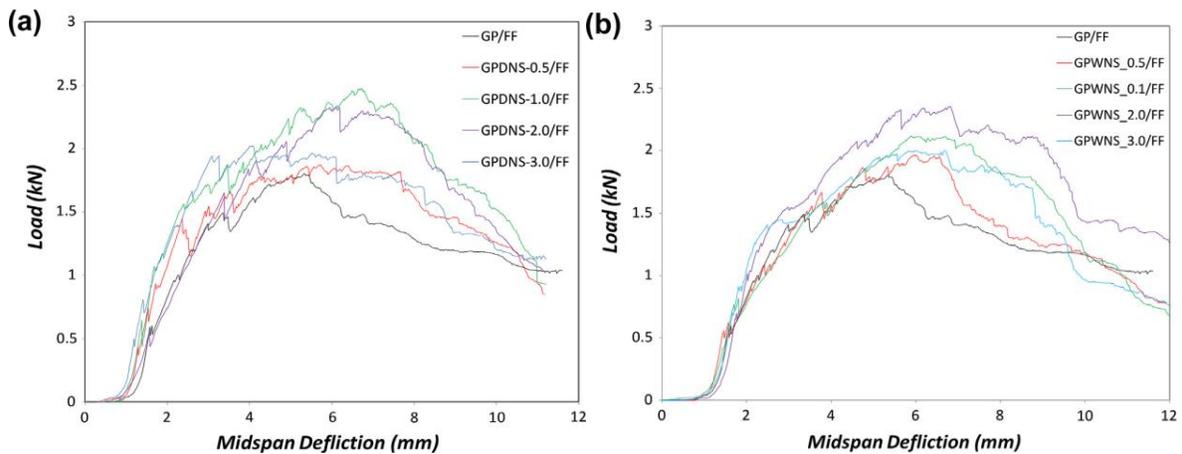


Figura 81: Diagramas de carga Vs deformación de: (a) nanocompuestos de geopolímero reforzado con FF preparados mediante el método de mezcla seca, (b) geopolímero reforzado con FF nanocompuestos preparados mediante el método de mezcla húmeda.

Fuente: Assaedi et al., (2016b)

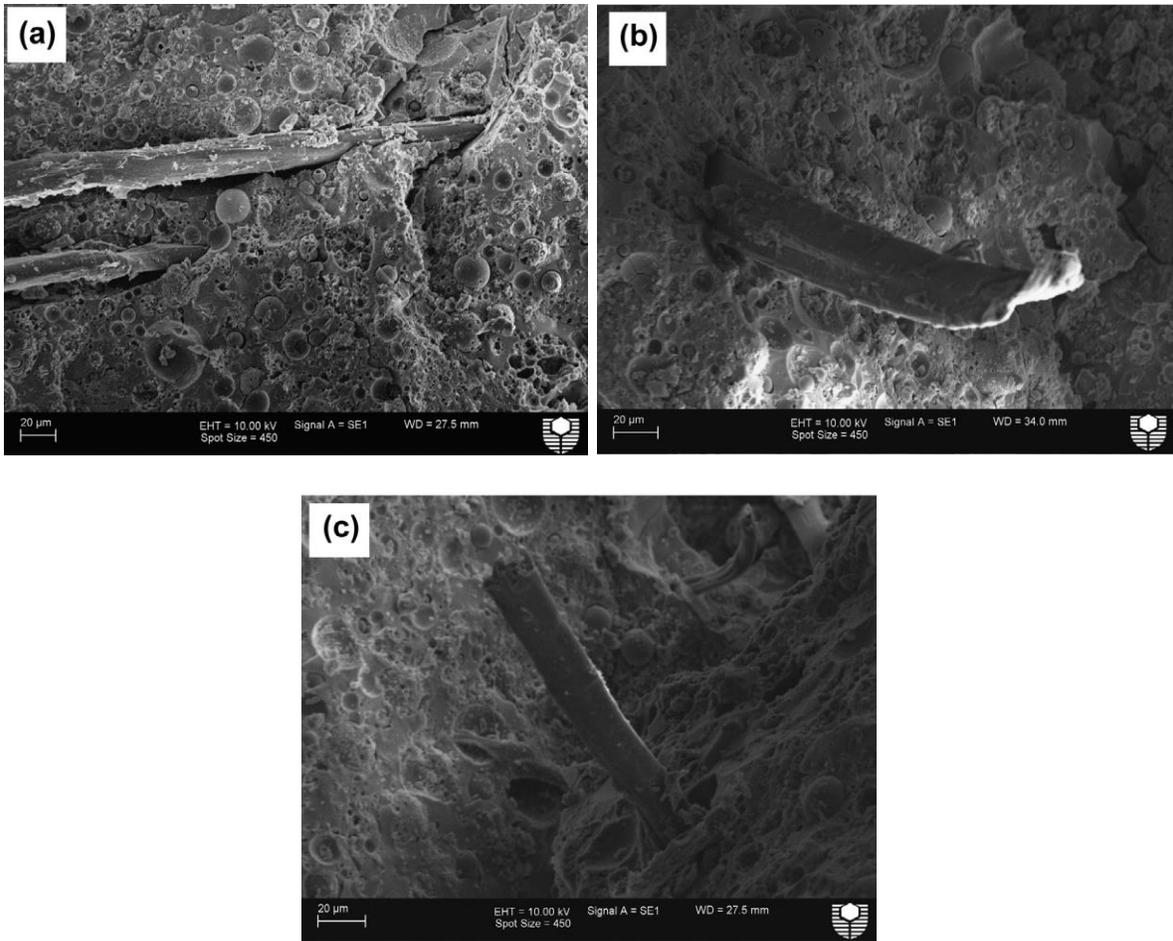


Figura 82: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con tejidos de lino; (a) GP / FF, (b) GPDNS-1 / FF y (c) GPWNS / FF-2.

Fuente: Assaedi et al., (2016b)

Anexo 16. Estudio de Assaedi et al. (2017)

Titulado: Efecto de la nanoarcilla sobre la durabilidad y las propiedades mecánicas de los compuestos geopolímeros reforzados con tejido de lino.

Tabla 25: *Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG sin y con 4.1 % en peso de tejido de Lino.*

Muestra	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Nanoarcilla (g)	Contenido de FF (% en peso)
GP	14.7	29.4	55.9	0	0
GPNC-1	14.7	29.4	55.9	10	0
GPNC2	14.7	29.4	55.9	20	0
GPNC-3	14.7	29.4	55.9	30	0
GP/FF	14.7	29.4	55.9	0	4.1
GPFNC-1/FF	14.7	29.4	55.9	10	4.1
GPFNC-2/FF	14.7	29.4	55.9	20	4.1
GPFNC-3/FF	14.7	29.4	55.9	30	4.1

Fuente: Assaedi et al. (2017)

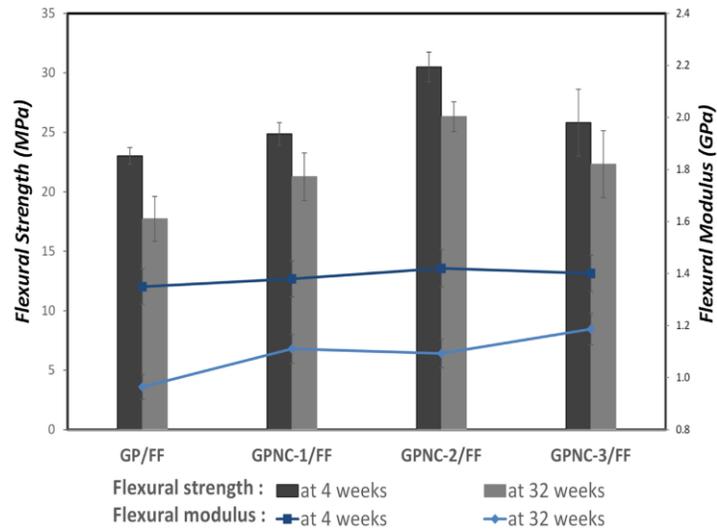


Figura 83: Resistencia a la flexión y módulo de nanocompuestos NFRG Con tejido de lino a las 4 y 32 semanas.

Fuente: Assaedi et al. (2017)

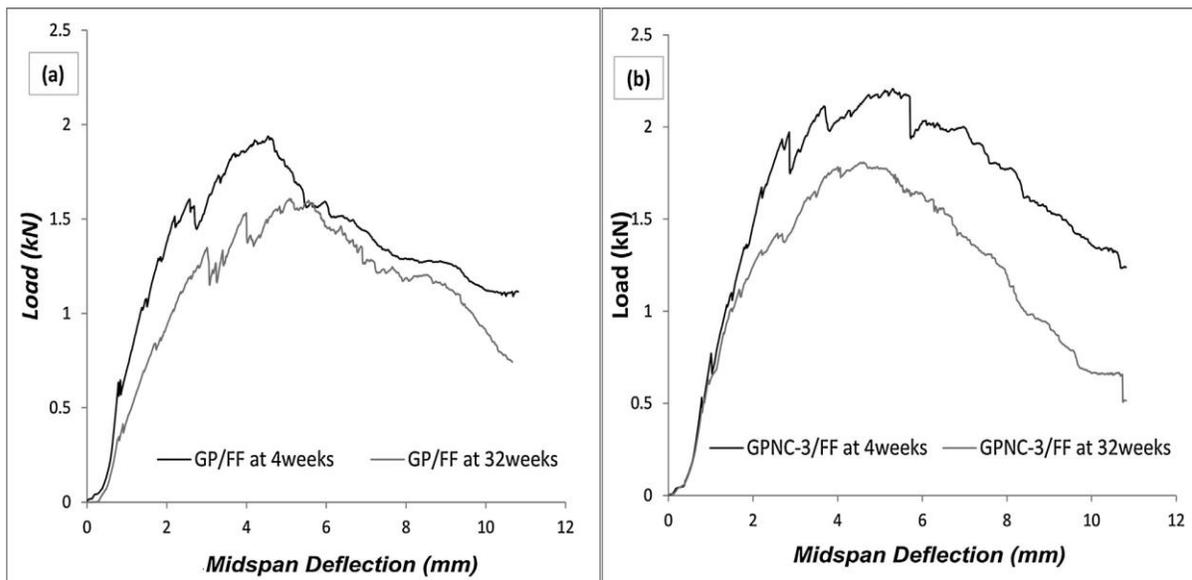


Figura 84: Diagrama de carga Vs deflexión a mitad del tramo a las 4 y 32 semanas para: (a) composite GP / FF; y (b) nanocompuestos GPNC-3 / FF

Fuente: Assaedi et al. (2017)

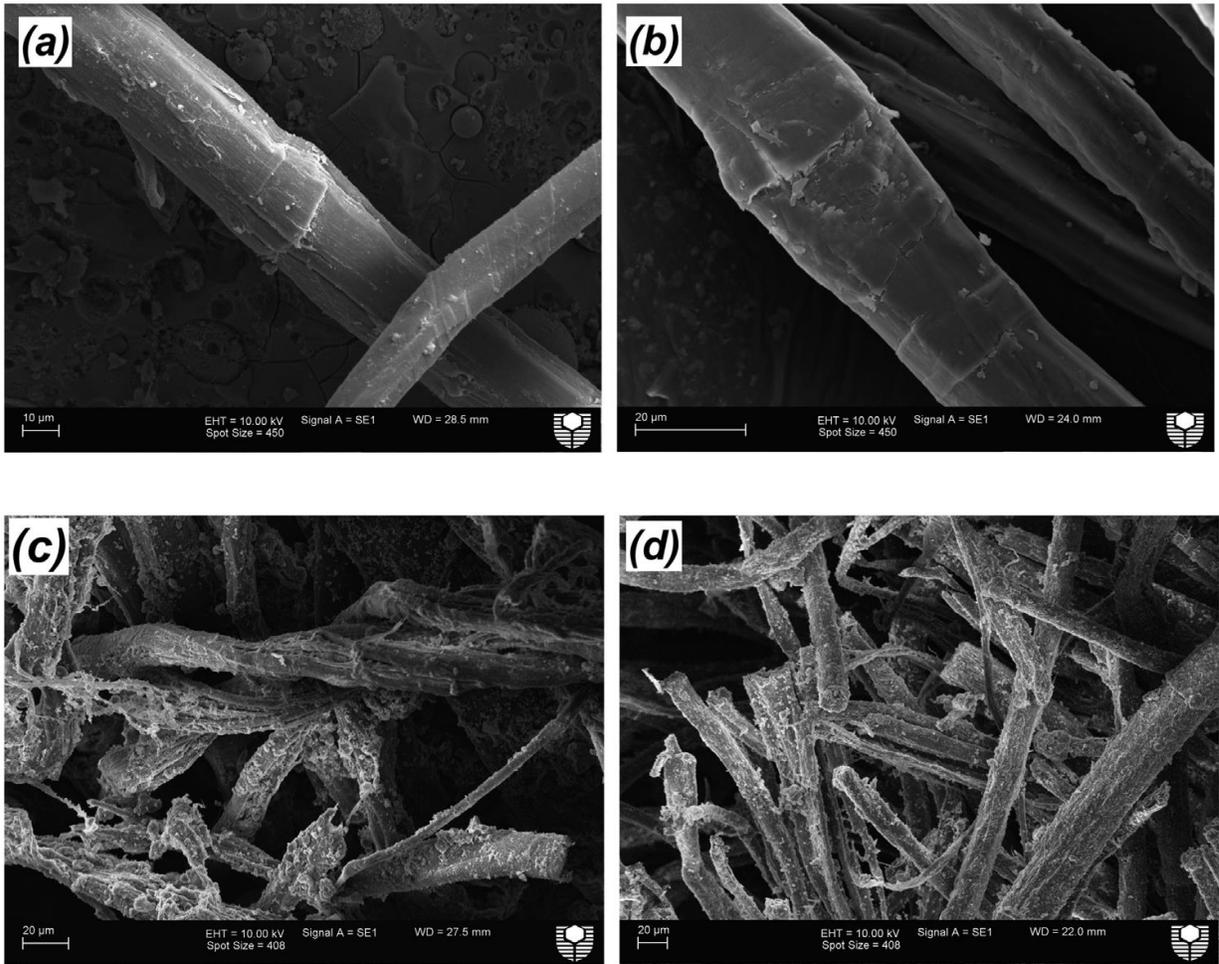


Figura 85: Imágenes SEM de las fibras de lino extraídas de (a) compuestos con FF a las 4 semanas, (b) GPNC-2 nanocompuestos con FF a las 4 semanas (c) compuestos con FF a las 32 semanas, y (d) GPNC-2 nanocompuestos con FF a las 32 semanas.

Fuente: Assaedi et al. (2017)

Anexo 17. Estudio de Assaedi et al., (2018)

Titulado: Avances en compuestos geopoliméricos con refuerzo natural

Tabla 26: *Materiales y relaciones molares de los compuestos NFRG con diferentes porcentajes de tejido de Lino y resultados de densidad y porosidad de los compuestos NFRG.*

Muestra	Cenizas volantes (g)	Solución de NaOH (g)	Solución de Na ₂ SiO ₃ (g)	Capas de FF	Contenido de FF (% en peso)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)
EGP	1000	214.5	535.5	0	0	1.84 ± 0.02	22.2
EGPFF-1	1000	214.5	535.5	5	2.4	1.72 ± 0.04	26.7
EGPFF-2	1000	214.5	535.5	7	3.0	1.63 ± 0.02	31.2
EGPFF-3	1000	214.5	535.5	10	4.1	1.58 ± 0.02	33.7

Fuente: Assaedi et al., (2018)

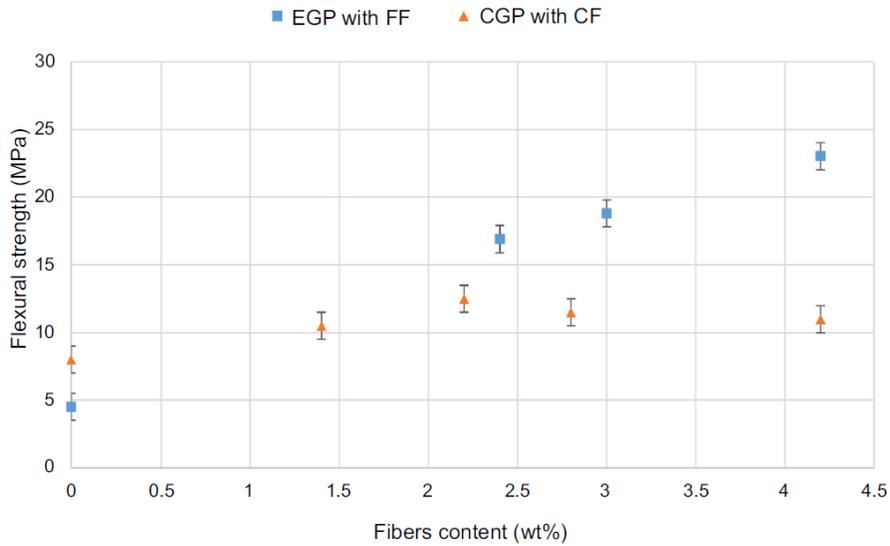


Figura 86: Resistencia a la flexión de compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejido de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2018)

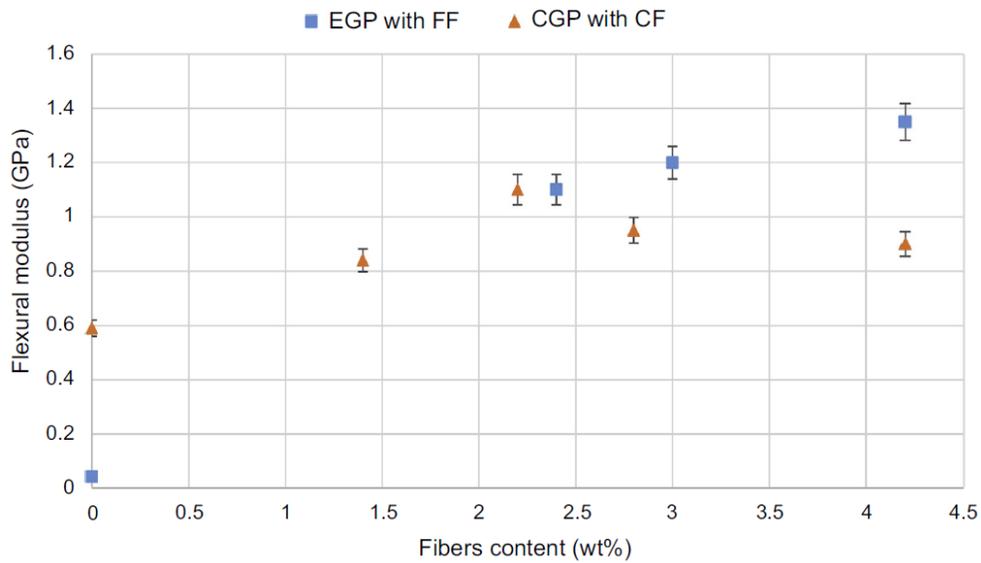


Figura 87: Módulo de flexión de compuestos NFRG de acuerdo al contenido de tejido de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2018)

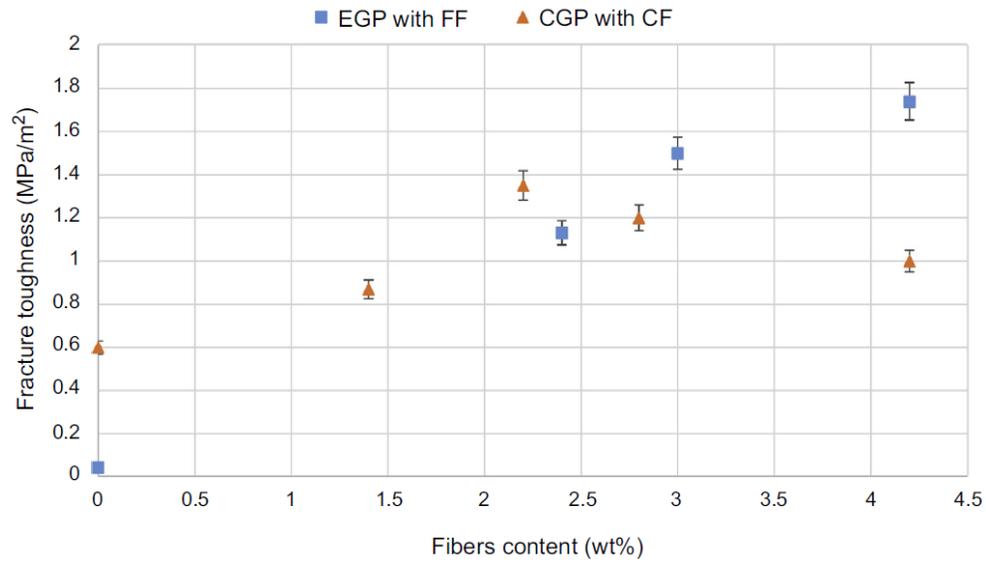


Figura 88: Tenacidad a la fractura de compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejido de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2018)

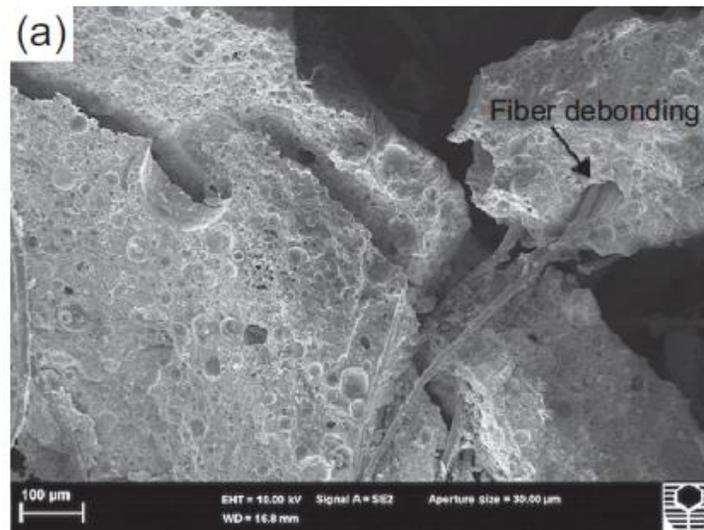




Figura 89: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con contenidos variables de tejidos de lino (a) fibra desunida en EGPF-1, (b) huella de fibra y extracción en EGPF-2 y (c) grietas puente de fibra EGPF-3.

Fuente: Assaedi et al., (2018)

Anexo 18. Estudio de Assaedi et al., (2019)

Titulado: Influencia de las partículas de nano sílice en la durabilidad de los compuestos de geopolímero reforzados con tela de lino.

Tabla 27: *Materiales (masa) de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino y NS variable.*

Muestra	Cenizas volantes (g)	Solución alcalina (g)	NS (g)	Agua (g)	Contenido de FF (% en peso)
GP/FF	1000	750	0	50	4.1
GPNS-0.5/FF	1000	750	5	50	4.1
GPNS-1.0/FF	1000	750	10	50	4.1
GPNS-2.0/FF	1000	750	20	50	4.1
GPNS-3.0/FF	1000	750	30	50	4.1

Fuente: Assaedi et al., (2019)

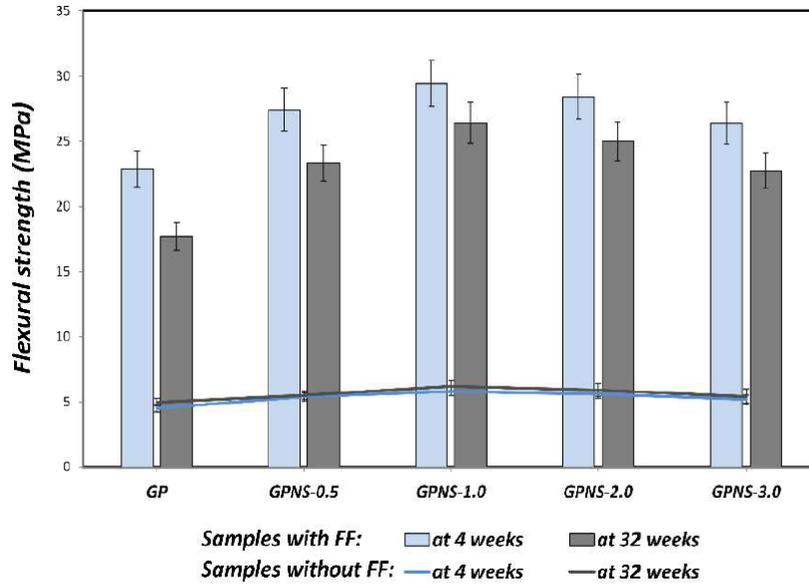
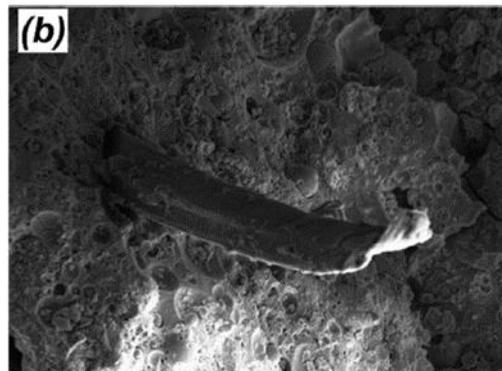
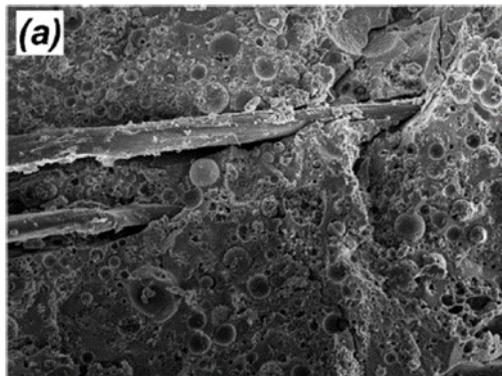


Figura 90: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con contenidos variables de tejidos de lino (a) fibra desunida en EGPF-1, (b) huella de fibra y extracción en EGPF-2 y (c) grietas puente de fibra EGPF-3.

Fuente: Assaedi et al., (2019)



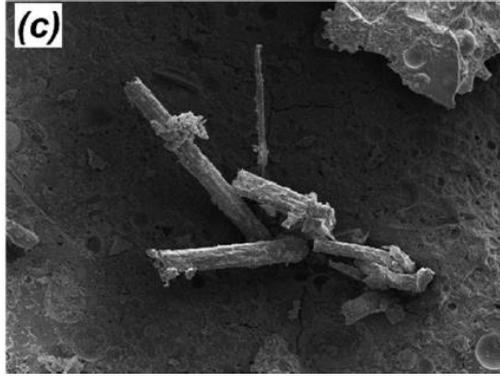


Figura 91: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con tejidos de lino; (a) compuesto con lino (FF), y (b, c) GPNS-1 nanocompuestos con FF.

Fuente: Assaedi et al., (2019)

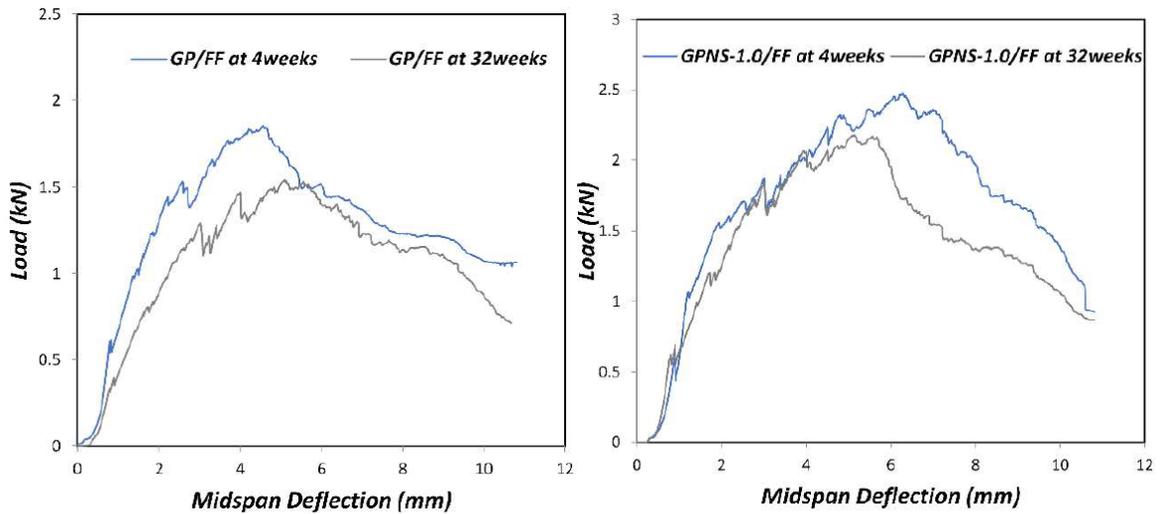


Figura 92: (a) Diagrama de carga Vs deformación para compuesto GP / FF y (b) nanocompuestos GPNS-1 / FF a las 4 y 32 semanas.

Fuente: Assaedi et al., (2019)

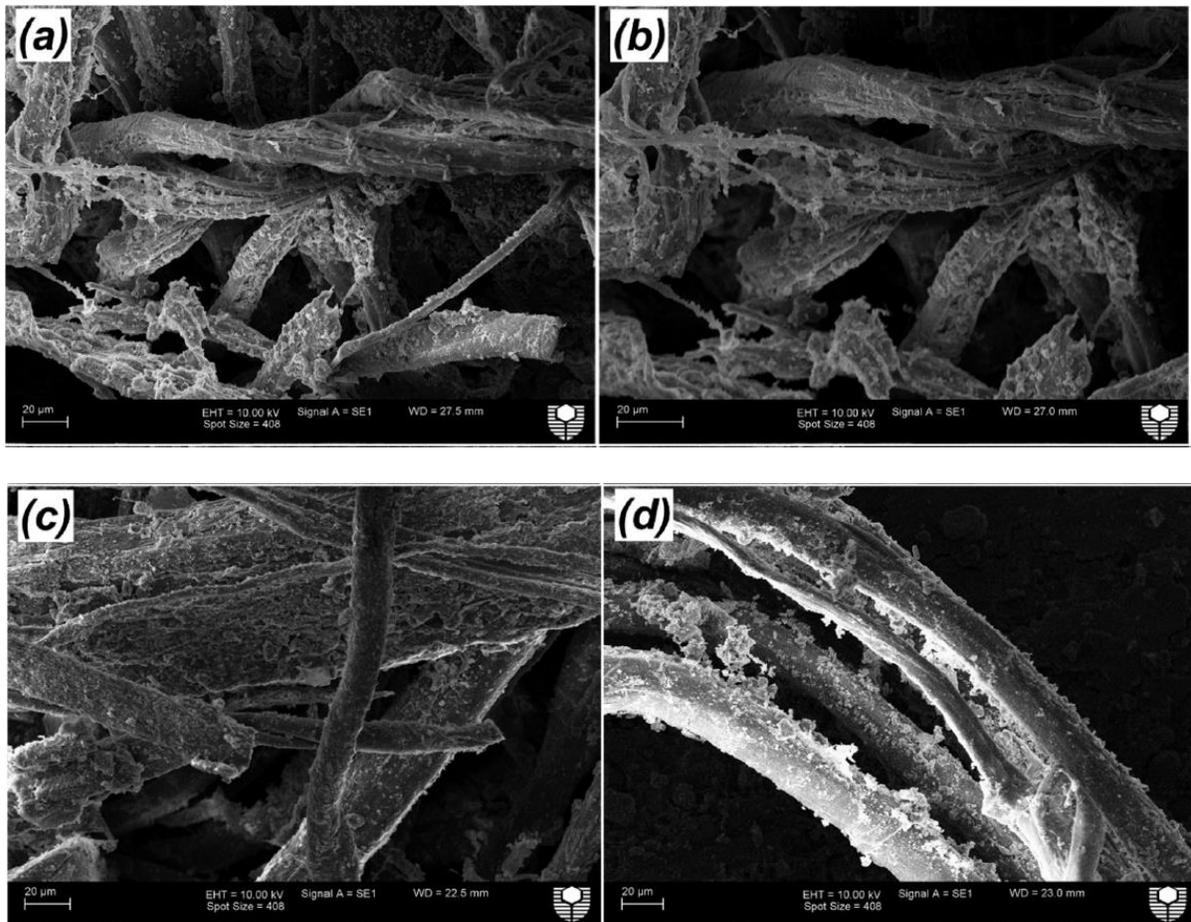


Figura 93: Imágenes SEM de las fibras de lino a las 32 semanas en: (a, b) compuestos con tejidos de lino, (c) GPNS-1 nanocompuesto con tejido de lino y (d) GPNS-3 nanocompuesto con tejido de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2019)

Anexo 19. Estudio de Assaedi et al., (2015)

Titulado: Utilización de nanoarcilla para reforzar compuestos de geopolímero- tejidos de lino

Tabla 28: *Materiales (masa) de los compuestos NFRG con 4.1 % en peso de tejido de Lino y NC variable.*

Muestra	Cenizas volantes (g)	Solución de NaOH (g)	Solución de Na ₂ SiO ₃ (g)	Nanoarcilla (g)	Contenido de FF (% en peso)
GPFNC-0	1000	214.5	535.5	0	4.1
GPFNC-1	1000	214.5	535.5	10	4.1
GPFNC-2	1000	214.5	535.5	20	4.1
GPFNC-3	1000	214.5	535.5	30	4.1

Fuente: Assaedi et al., (2015)

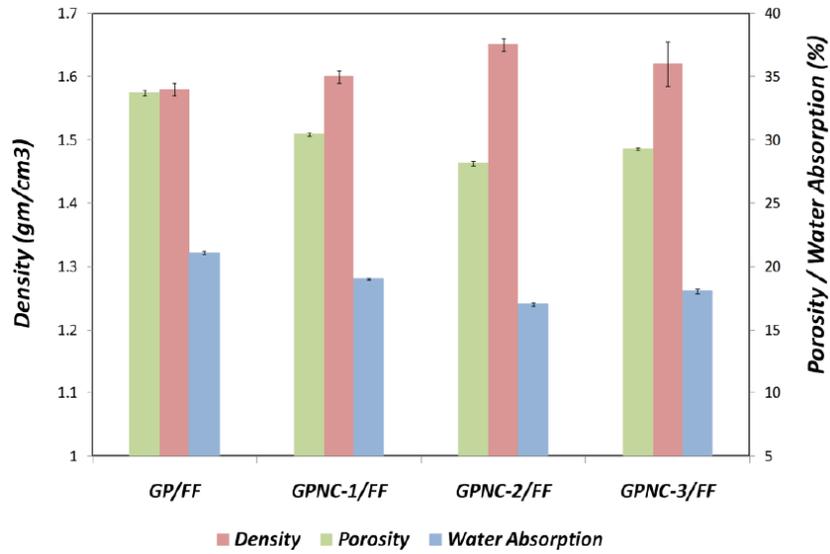


Figura 94: (a), (b) Densidad, porosidad y absorción de agua para nanocompuestos de reforzados con tejidos de lino.

Fuente: Assaedi et al., (2015)

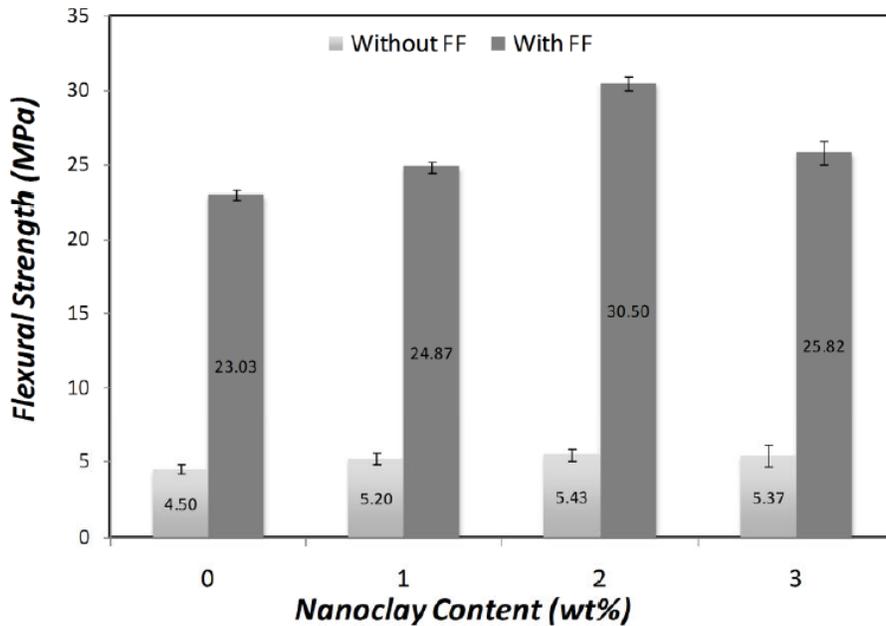


Figura 95: Resistencia a la flexión de los compuestos con variación de nanoarcilla.

Fuente: Assaedi et al., (2015)

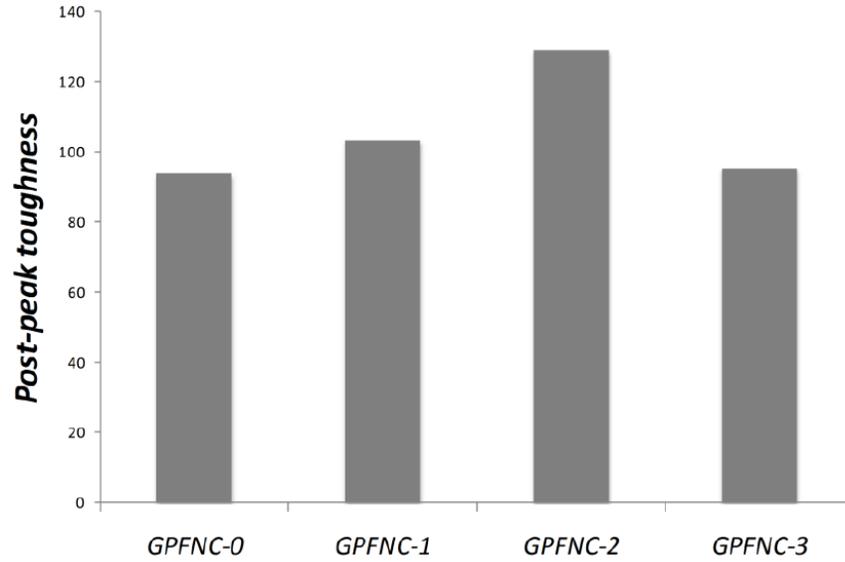
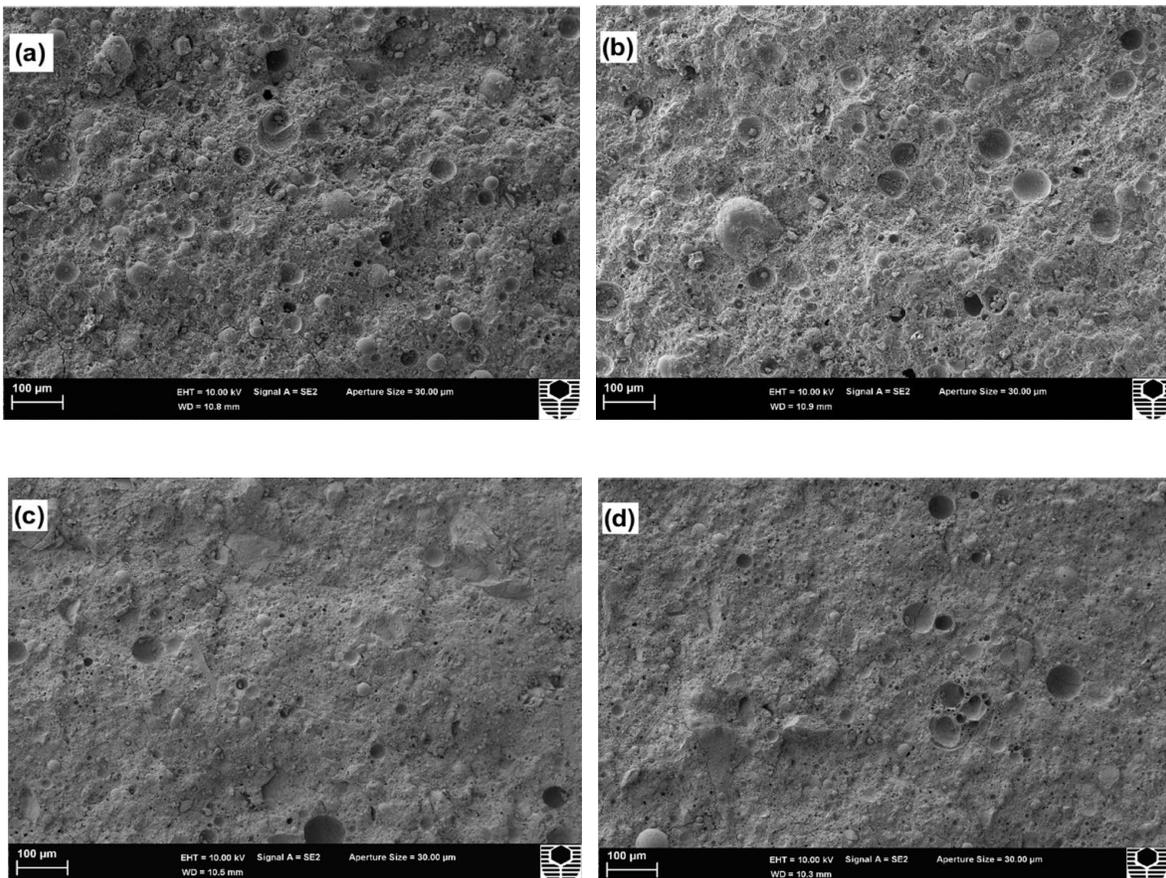


Figura 96: Tenacidad post-pico para todas las muestras con diferente contenido de nanoarcilla.

Fuente: Assaedi et al., (2015)



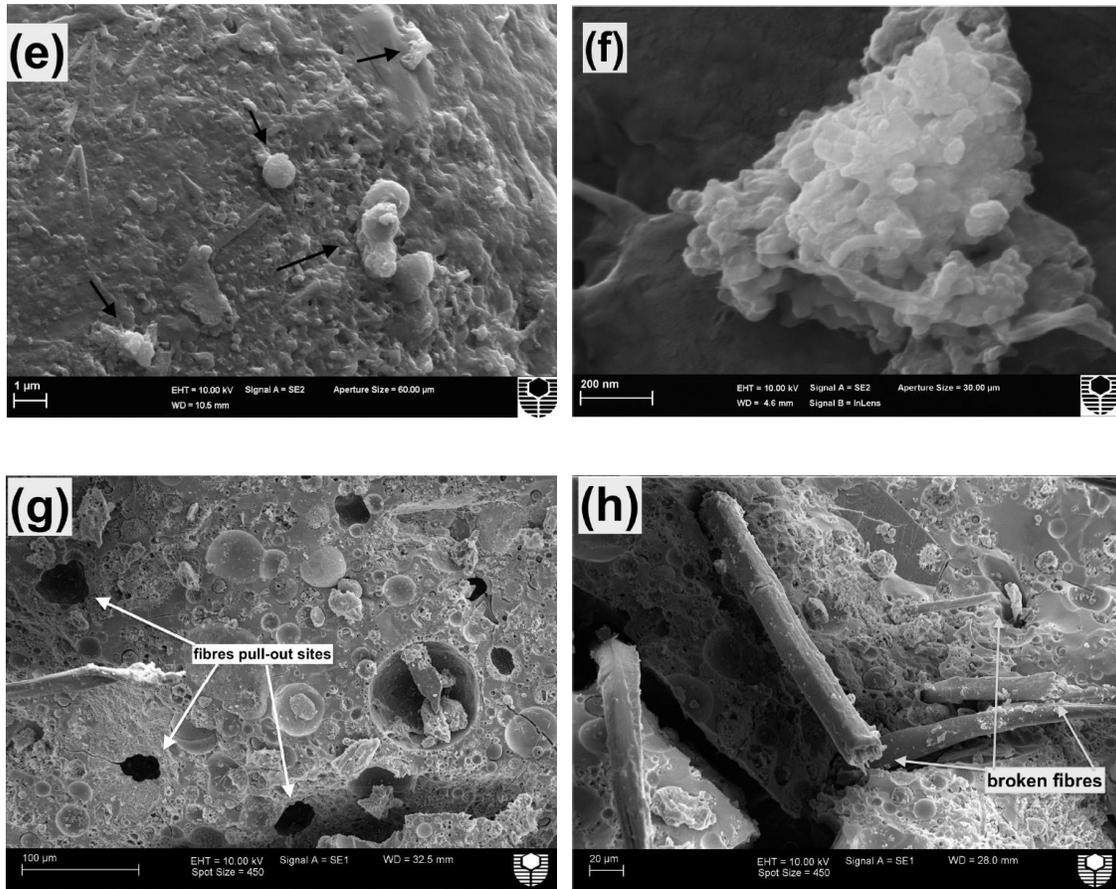


Figura 97: (a) muestra de control, (b) - (d) nanocompuestos que contienen 1-3% en peso de nanoarcilla, (e) - (f) nanopartículas aglomeradas incrustadas en la matriz GPNC-3, (g) extracción de fibras en GPFNC-1, (h) fractura de fibras en GPFNC-2 y buena adherencia.

Fuente: Assaedi et al., (2015)

Anexo 20. Estudio de Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

Titulado: Caracterización de propiedades mecánicas y térmicas en compuestos de geopolímero reforzado en lino.

Tabla 29: *Materiales (masa) de los compuestos NFRG con diferentes contenidos de tejido de Lino.*

Muestra	Cenizas volantes (g)	Solución de NaOH (g)	Solución de Na ₂ SiO ₃ (g)	Capas de FF	Contenido de FF (% en peso)
1	1000	214.5	535.5	0	0
2	1000	214.5	535.5	5	2.4
3	1000	214.5	535.5	7	3.0
4	1000	214.5	535.5	10	4.1

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

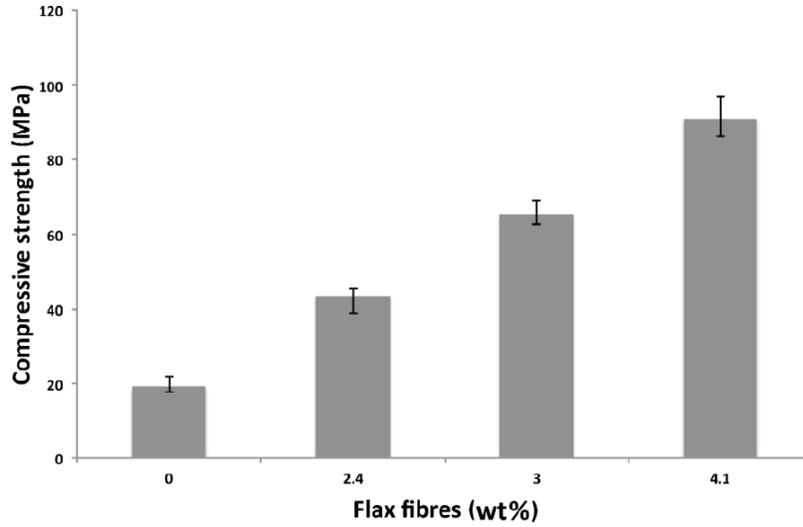


Figura 98: Resistencia a la compresión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido del tejido de lino.

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

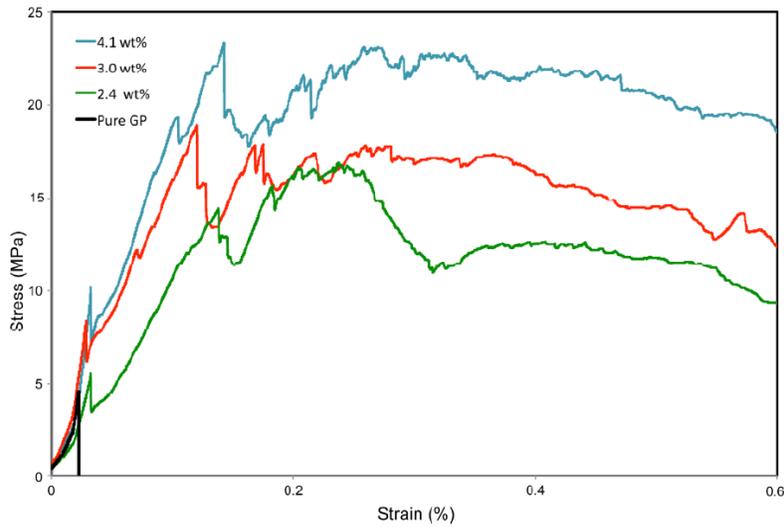


Figura 99: Diagrama tensión Vs deformación de un GP y un NFRG con diferentes contenidos de tejidos de lino.

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

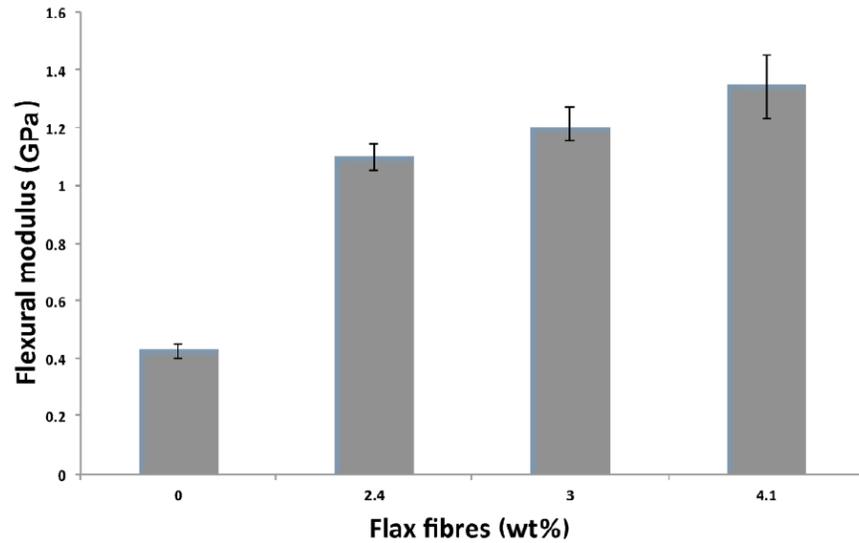


Figura 100: *Módulo de flexión de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de lino.*

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

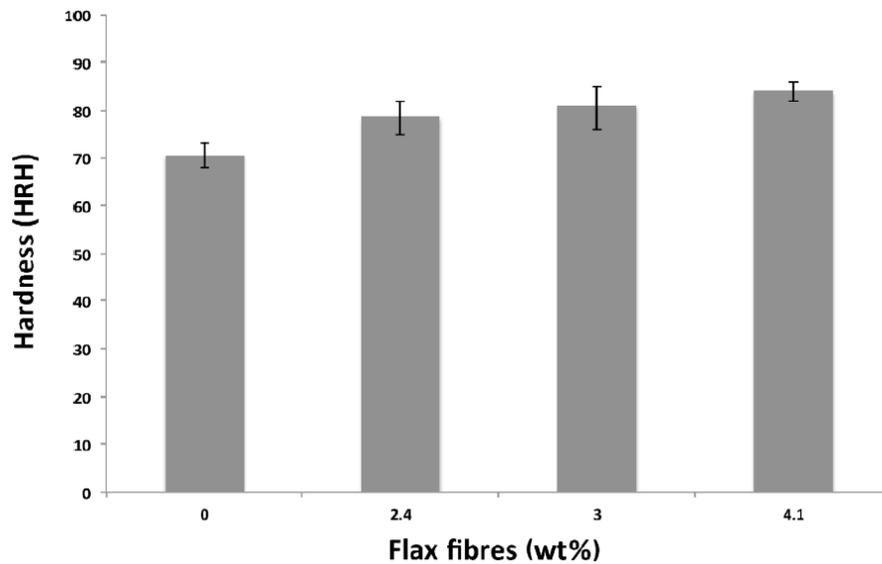


Figura 101: *Dureza de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de lino.*

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

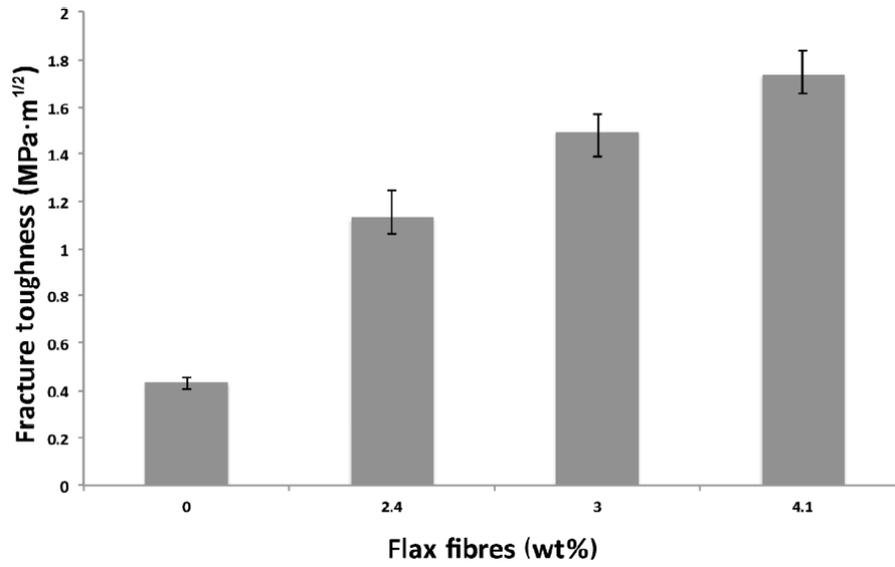
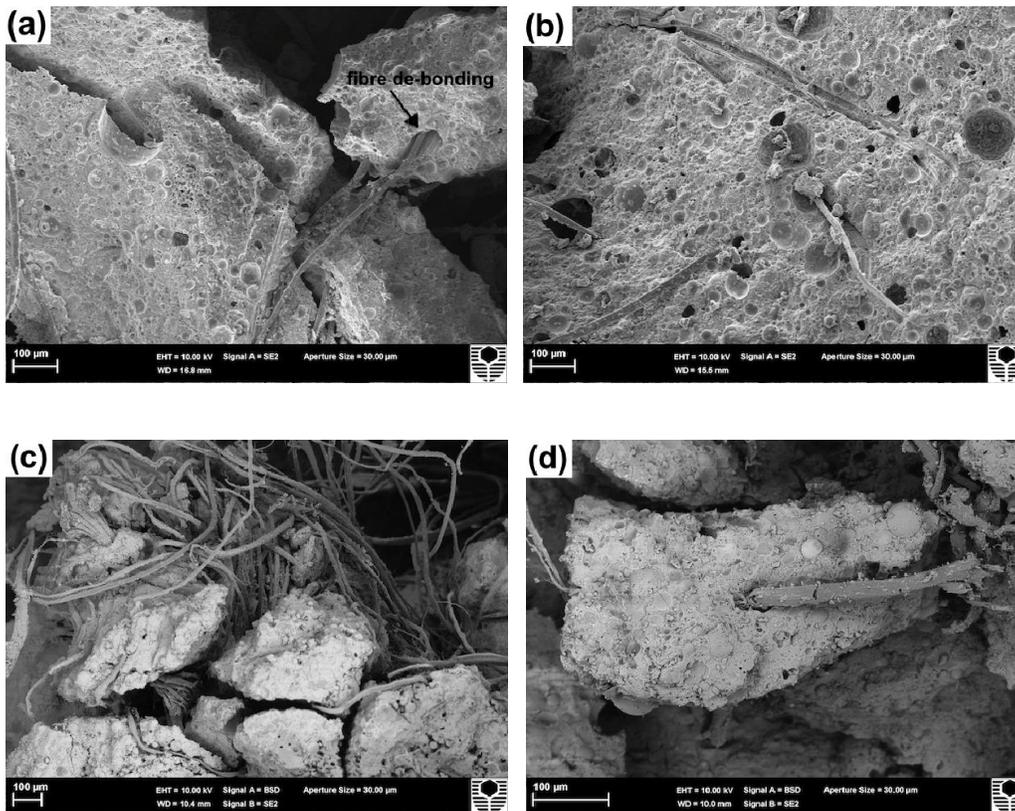


Figura 102: Resistencia a la fractura de los compuestos NFRG de acuerdo con el contenido de tejidos de lino.

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)



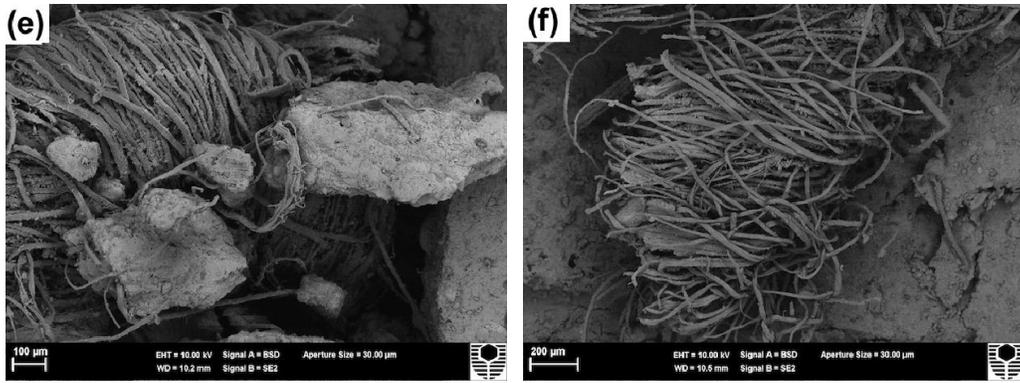


Figura 103: Imágenes SEM de la superficie de fractura de compuestos NFRG con FF muestran (a) desunión de fibras, (b) extracción de fibras, (c) puenteo de grietas (d) y (e) adhesión entre fibra y matriz, y (f) fractura de fibra.

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

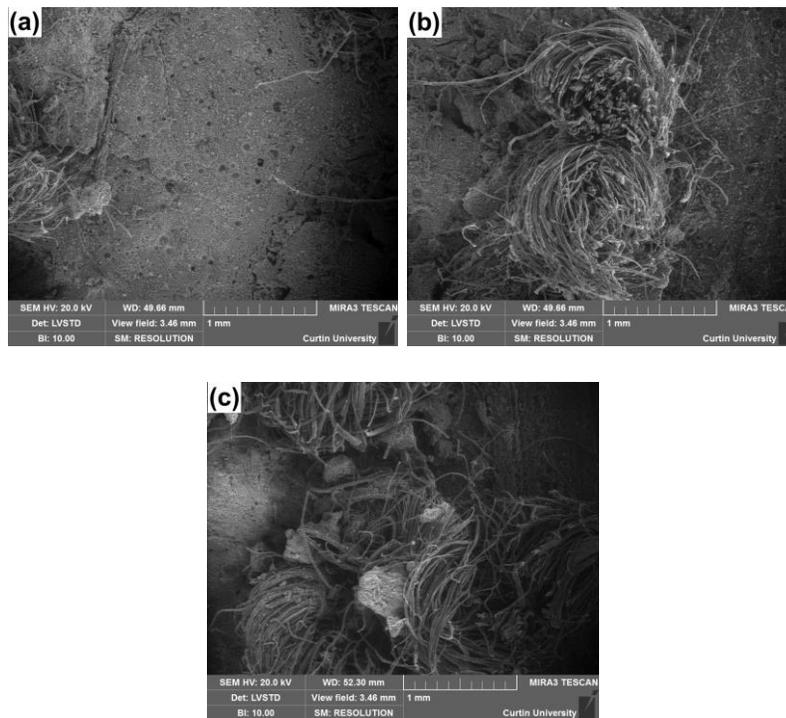


Figura 104: Imágenes SEM de la superficie de fractura para compuestos NFRG con (a) 2.4, (b) 3.0 y (c) 4,1% en peso de tejidos de lino.

Fuente: Assaedi, Alomayri, et al., (2015)

Anexo 21. Estudio de Sikapizye & Habanyama, (2020)

Titulado: Síntesis y caracterización de compuestos geopoliméricos reforzados con fibra de cáñamo y lino.

Tabla 30: *Materiales y relaciones de los compuestos NFRG con 5 capas de tejidos de lino, variando la orientación del tejido respecto a la carga aplicada.*

Muestra	Cenizas volantes (g)	Contenido de Na ₂ O (% en peso)	Contenido de SiO ₂ (% en peso)	Contenido de H ₂ O (% en peso)	Solución alcalina (g)	Capas de tejido
Muestra de control	1000	14.7	29.4	55.9	600	5
Reforzado con lino horizontal	1000	14.7	29.4	55.9	600	5
Reforzado con lino vertical	1000	14.7	29.4	55.9	600	5

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

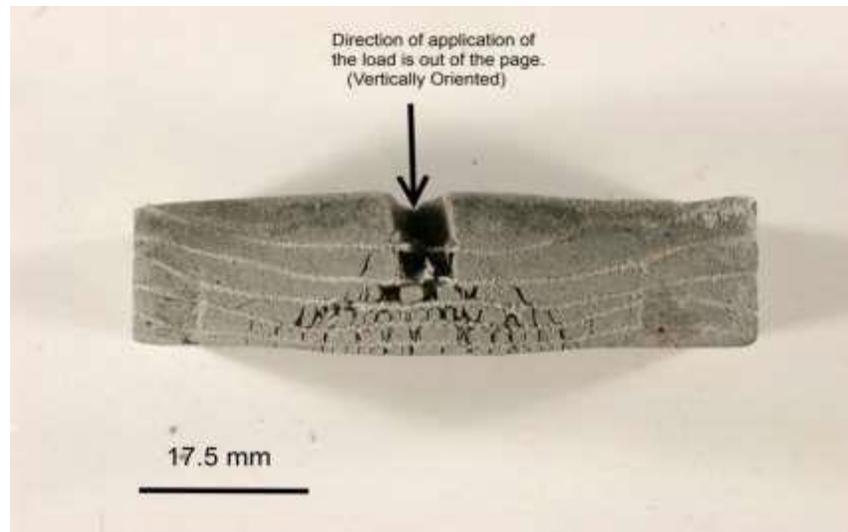


Figura 105: *Compuesto NFRG fracturado con el refuerzo orientado verticalmente, la dirección de la carga está fuera del plano de la página.*

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

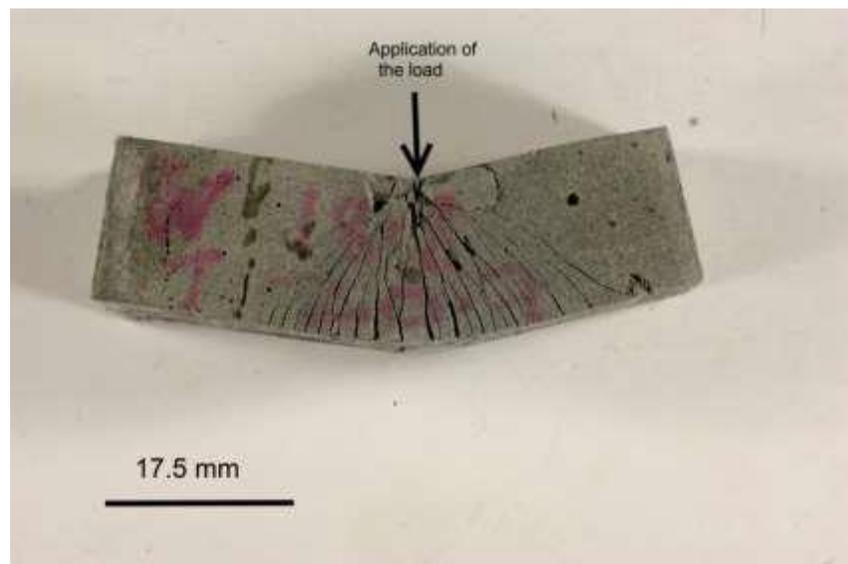


Figura 106: *Compuesto NFRG fracturado con el refuerzo orientado horizontalmente, la dirección de la carga es paralela al plano de la página.*

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

Tabla 31: Resistencia a la flexión de los ensayos de flexión de tres puntos.

Muestra	Orientación del tejido	Valores medios de la tensión máxima (MPa)	Error estándar para la tensión máxima (MPa)
Muestra de control	-	3.03	0.14
Reforzado con lino	Horizontal	4.61	0.42
Reforzado con lino	Vertical	2.82	0.11

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

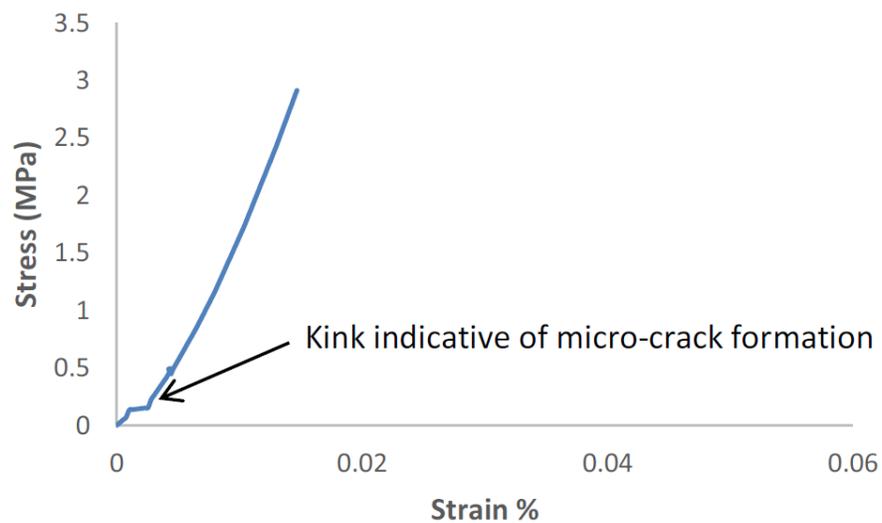


Figura 107: Curva representativa de tensión Vs deformación observada en la muestra de geopolímero de control (GP).

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

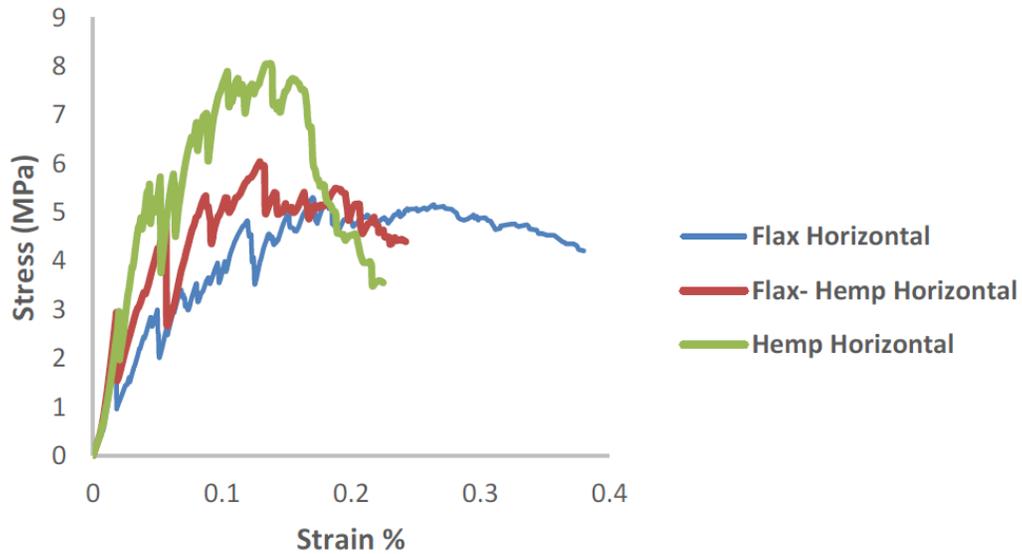


Figura 108: *Diagramas de esfuerzo Vs deformación de los tres tipos de compuestos geopoliméricos reforzados horizontalmente.*

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

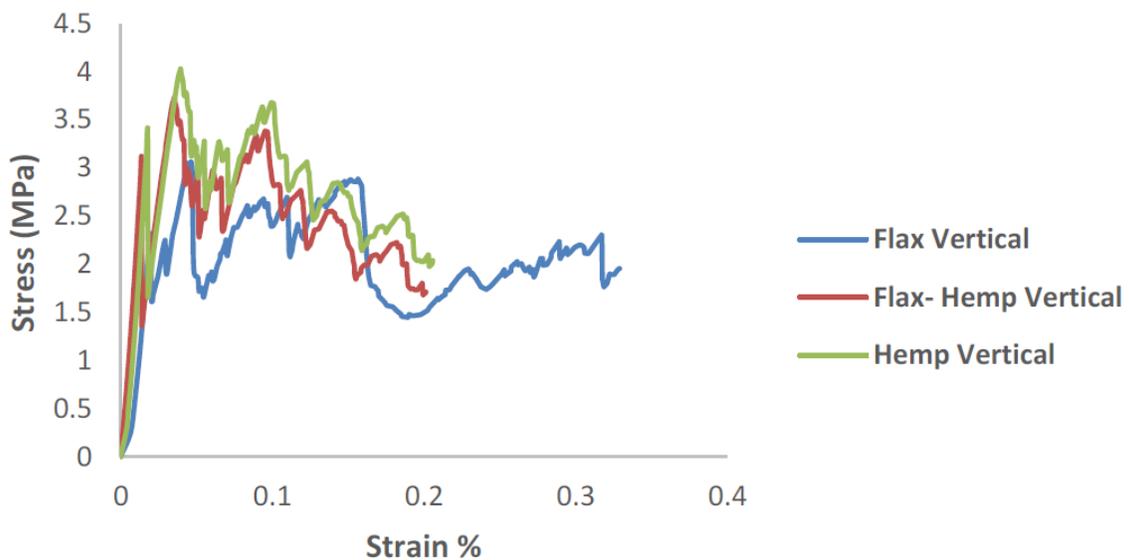


Figura 109: *Diagrama de tensión Vs deformación de los tres tipos de compuestos geopolímeros reforzados verticalmente.*

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

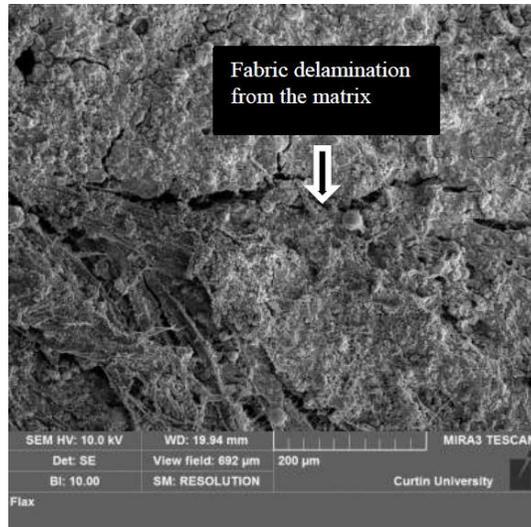


Figura 110: *Imagen SEM de la fracturada entre el tejido y la matriz en un compuesto NFRG con lino.*

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)

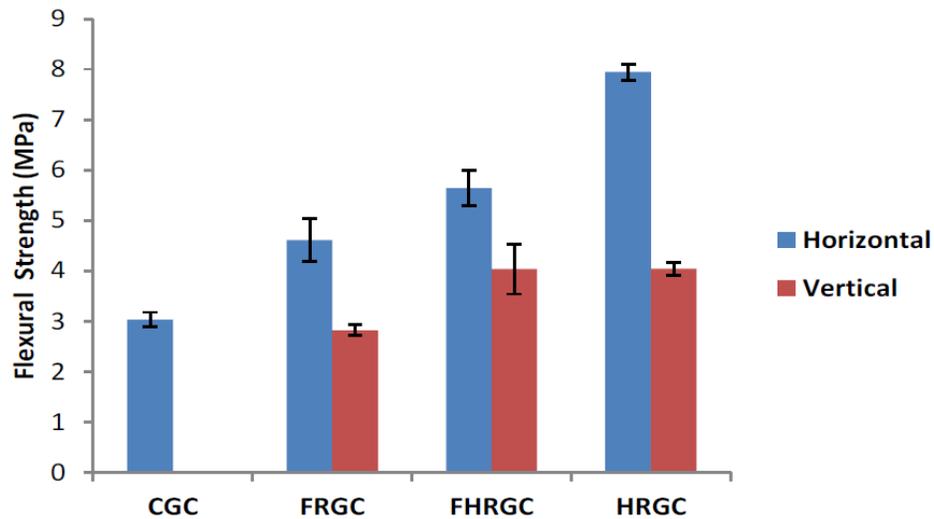


Figura 111: *Diferencias entre los compuestos orientados vertical y horizontalmente. (CGC) compuesto de geopolimérico de control, (FRGC) reforzado con lino, (FHRGC) reforzado con cáñamo- lino (híbrido) y (HRGC) reforzado con cáñamo.*

Fuente: Sikapizye & Habanyama, (2020)