



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO FACULTAD DE
INGENIERÍA MAESTRÍA EN CIENCIAS (CONSTRUCCIÓN)**

**PANEL PREFABRICADO A BASE DE BAGAZO DE CAÑA Y
MORTERO CON MÍNIMO DE PROCESOS PARA SU
ELABORACIÓN**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL

GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS (CONSTRUCCIÓN)

PRESENTA:

TONATIUH MORENO MARTÍNEZ

DIRIGIDO POR:

DR. JUAN BOSCO HERNANDEZ ZARAGOSA

CENTRO UNIVERSITARIO

QUERÉTARO, QRO.

OCTUBRE DEL 2023 MÉXICO



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Panel prefabricado a base de bagazo de caña y
mortero con mínimo de procesos para su elaboración

por

Tonatiuh Moreno Martínez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-293041



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería.
Maestría en Ciencias (Construcción)

Panel prefabricado a base de bagazo de caña y mortero con mínimo de procesos para su elaboración

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Construcción)

Presenta:

Ing. Tonatiuh Moreno Martínez

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Firma

Dr. Rubén Ramírez Jiménez

Vocal

Firma

Dr. Wilfrido Martínez Molina

Suplente 1

Firma

Dra. Teresa López Lara

Suplente 2

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)

RESUMEN

El objeto de estudio de esta investigación es proponer un panel a base de fibras procesadas del bagazo de caña cuyos valores mecánicos que se desempeñe por encima de los requisitos básicos para fibrocementos no comprimidos, evitando manejar maquinaria o equipos especializados para su producción, disminuyendo procedimientos a la mitad sin afectar la calidad del resultado final. En la elaboración de las placas de fibrocemento se omite el utilizar: trituradora, horno, prensa hidráulica o bomba de vacío; se tamizo de forma manual y se lavaron las fibras utilizando agua caliente y fría, posteriormente se utilizó como mineralizante, silicato de sodio al 22% de concentración; los resultados se cotejaron respecto a las normas mexicanas para morteros estructurales y placas de fibrocemento, respecto a los procedimientos de fabricación se realizaron investigaciones previas sobre fibras naturales cuyas características se asimilarán a las de la caña a fin de adquirir una metodología que optimice el proceso. Los resultados indican que es factible elaborar paneles de fibrocemento con valores por encima de los requisitos mínimos normativos, con la cantidad de procesos reducidos, sin afectar de forma negativa los valores físico-mecánicos del mismo. El mejor espécimen posee un espesor de 1.0 cm con dimensiones de prueba de 25.0x25.0 cm con un módulo de ruptura de 6.70 MPa (68.32 kg/cm^2), una densidad aparente de 1505.40 kg/m^3 y un aislamiento acústico del 21.5 dB para el panel con 6.0% de adición de fibra de caña respecto al peso seco del cemento, la mezcla maneja una relación agua/cemento de 0.95 en volumen y arena/cemento de 2.5 veces en masa. La prueba de permeabilidad falla en todas las pruebas con adición de fibra. Se crean nuevas oportunidades de desarrollo experimental para fibras equivalentes basado en las herramientas, materiales, técnicas y recomendaciones del proyecto, teniendo como nueva área la mejora de la durabilidad del material.

Palabras clave: Material compuesto, Fibrocemento, Fibra a base de bagazo de caña, silicato de sodio.

SUMMARY

The object of study of this research is to propose a panel based on fibers processed from sugarcane bagasse whose mechanical values that performs above the basic requirements for non-compressed fiber cement, avoiding handling machinery or specialized equipment for its production, reducing procedures by half without affecting the quality of the final result. In the elaboration of the fiber cement slabs, the use of: crusher, oven, hydraulic press or vacuum pump was omitted; the fibers were sieved manually and washed using hot and cold water, then sodium silicate at 22% concentration was used as a mineralizer; the results were compared with respect to the Mexican standards for structural mortars and fiber cement slabs, regarding the manufacturing procedures, previous research on natural fibers whose characteristics will be assimilated to those of the cane in order to acquire a methodology that optimizes the process was carried out. The results indicate that it is feasible to produce fiber cement panels with values above the minimum regulatory requirements, with a reduced number of processes, without negatively affecting the physical-mechanical values of the same. The best specimen has a thickness of 1.0 cm with test dimensions of 25.0x25.0 cm with a modulus of rupture of 6.70 MPa (68.32 kg/cm^2), a bulk density of 1505.40 kg/cm^3 and a sound insulation of 21.5 dB for the panel with 6.0% cane fiber addition with respect to the dry weight of cement, the mixture manages a water/cement ratio of 0.95 by volume and sand/cement of 2.5 times by mass. The permeability test fails in all tests with fiber addition. New experimental development opportunities are created for equivalent fibers based on the tools, materials, techniques and recommendations of the project, having as a new area the improvement of the durability of the material.

Keywords: Composite material, fiber cement, fiber based on sugarcane bagasse, sodium silicate.

**Dedicado a mis padres, hermanas y familia quienes
siempre me apoyaron en cada momento**

¡Gracias por todo!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a mis padres, hermanas y cuñados porqué siempre me aconsejaron y apoyaron en todas las formas posibles, cada quien a su forma y en su tiempo.

A todas las personas que me apoyaron en cada etapa de esta investigación, haya sido con aportación científica, financiamiento, equipos o con su apoyo moral, que aun siendo intangible esta última, termina haciendo la diferencia entre todo y nada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme becado durante mis estudios de maestría con CVU 1033551.

Agradecimientos al personal, técnicos y profesorado del laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas, al personal de la U.M.S.N.H. al igual que a los miembros que integran el laboratorio de mecánica de suelos en la U.A.Q por su contribución durante la investigación en especial a Maestro Cipriano Bernabé y a la Maestra Sandra por su desinterés y apoyo en experimentación.

Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza por su ayuda y asesoramiento para realizar este tema de tesis en todas las etapas de mi estadía en la UAQ no dejando que desistiera, al Dr. Wilfrido Martínez Molina por ayudarme a ingresar y hacer la mayor parte de mis experimentos dentro de las instalaciones de U.M.S.N.H. en plena pandemia, así como su buen genio y aliento que me ayudo en los momentos difíciles.

A mis compañeros de maestría que me acompañaron dentro del programa educativo haciendo mención especial a María De Jesús y Melissa Guadalupe, por habernos apoyado mutuamente a no abandonar nuestras metas.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	6
2.1 Hipótesis.....	6
2.2 Objetivo general.....	6
2.3 Objetivos específicos.....	6
3. REVISIÓN LITERARIA	8
3.1 Elementos prefabricados.....	8
3.2 Aplicación constructiva de diferentes tipos de panel	10
3.2.1 Muros estructurales	10
3.2.2 Muros divisorios	11
3.2.3 Losa de entepiso	11
3.2.4 Cúpula.....	12
3.2.5 Faldones	12
3.3 Paneles no estructurales	13
3.3.1 Panel de yeso	13
3.3.2 Panel de cemento	14
3.4 Paneles de fibrocemento	15
3.5 Tipos de refuerzos fibrosos en matrices cementicias.....	17
3.6 Fibras vegetales como refuerzo.....	18
3.7 Fibras vegetales aprovechables para la construcción	21
3.7.1 Sisal (Agave Sisalana).....	22
3.7.2 Yute (Corchorus Olitorius)	23
3.7.3 Abacá (Musa textiles)	25
3.7.4 Bonote (Cocos Nucifera).....	26
3.7.5 Cáñamo (Cannabis Sativa L).....	27
3.7.6 Bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum).....	28

3.8	Fibrocemento a base de fibras vegetales	30
3.9	Bagazo de caña y sus propiedades	33
3.10	Bagazo de caña como fibra de refuerzo, tratamientos y fabricación	35
4.	METODOLOGÍA	38
4.1	Determinación de la zona extracción del bagazo de caña	38
4.2	Definición y caracterización de la fibra de caña (FC)	39
4.2.1	Obtención del material	39
4.2.2	Caracterización de las fibras de caña	41
4.3	Tratamiento químico de la fibra de caña	43
4.3.1	Tratamientos químicos para la protección de la fibra	43
4.3.2	Silicato de Sodio	44
4.4	Caracterización de los elementos del mortero	46
4.4.1	Arena del Rio Huajúmbaro	46
4.4.1.1	Procedimientos de extracción y prueba	48
4.4.1.2	Prueba de cuarteo	49
4.4.1.3	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino.	52
4.4.1.4	Determinación de la masa volumétrica de los agregados	57
4.4.1.5	Análisis granulométrico de agregado fino	61
4.4.2	Cemento Hidráulico	64
4.4.2.1	Cemento Portland	64
4.4.2.1.1	Determinación de consistencia normal	65
4.4.2.1.2	Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos	68
4.4.2.1.3	Determinación de densidad	70
4.4.3	Agua	72
4.5	Diseño de la mezcla de mortero	72
4.5.1	Dosificación del mortero por volumen	72
4.5.2	Ensayo de fluidez	73
4.5.3	Ensayo a compresión simple	76
4.5.3.1	Elaboración de especímenes	76
4.5.3.2	Ensayo de compresión	77
4.6	Diseño del panel de fibrocemento	79

4.6.1	Dimensionamiento del panel.....	79
4.6.2	Dosificación del panel	80
4.6.3	Proceso de fabricación	82
4.6.3.1	Mezclado	82
4.6.3.2	Colado	83
4.6.3.3	Curado.....	85
4.7	Pruebas físico-mecánicas del panel de FC.....	86
4.7.1	Módulo de ruptura	86
4.7.2	Módulo de elasticidad estático.....	89
4.7.3	Permeabilidad	93
4.7.4	Aislamiento acústico (R)	96
4.7.5	Propiedades físicas.....	97
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	97
5.1	Caracterización de los materiales.....	97
5.1.1	Fibra de bagazo de caña	98
5.1.1.1	Mineralización de la fibra.....	100
5.1.2	Arena del rio Huajúbaro	101
5.1.2.1	Muestreo.....	101
5.1.2.2	Reducción de la muestra de agregado al tamaño requerido	102
5.1.2.3	Análisis granulométrico de agregados	103
5.1.3	Cemento Portland	105
5.1.3.1	Determinación de consistencia normal	105
5.1.3.2	Determinación de tiempo de fraguado (Método de Vicat)	105
5.1.3.3	Determinación de densidad	106
5.1.4	Agua.....	107
5.2	Diseño del mortero	108
5.2.1	Proporcionamiento por partes en volumen	108
5.2.2	Ensayo de fluidez.....	109
5.2.3	Elaboración de especímenes para ensayo de compresión	110
5.2.3.1	Resistencia a la compresión simple	110
5.3	Elaboración de elemento tipo placa solo con mortero.....	111
5.3.1	Determinación de dimensiones.....	111
5.3.2	Elaboración de moldes	112
5.3.3	Proceso de fabricación	116

5.3.3.1	Colado, compactación y curado.....	116
5.3.4	Pruebas a módulo de ruptura	116
5.4	Panel de fibrocemento compuesto por fibras de caña.....	117
5.4.1	Procedimiento	118
5.4.2	Ensayos físico-mecánicos	119
5.4.2.1	Módulo de Ruptura (MOR)	119
5.4.2.2	Módulo elástico	122
5.4.2.3	Permeabilidad	128
5.4.2.4	Aislamiento acústico.....	129
5.4.2.5	Propiedades físicas	130
5.4.3	Posibles aplicaciones del material	132
5.5	Discusión de resultados	134
6.	CONCLUSIONES	1
7.	REFERENCIAS	4

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Construcción de módulos habitables (EMMEDUE, 2022).....	10
Figura 2 Muros divisorios de concreto (LBS, 2022).....	11
Figura 3 Sistema de panel constructivo para para losa de mampostería (Hebel, 2022).....	11
Figura 4 Domos habitacionales en Honduras (Fernando Martínez, 2013).....	12
Figura 5 Colocación de paneles de concreto para faldones (Grupo FRERES, 2020).	12
Figura 6 Aplicación de panel de yeso.....	14
Figura 7 Panel de cemento aplicaciones. Fuente: Quiroz Hábitat.....	15
Figura 8 Método Hatschek para fabricación de fibrocementos de amianto-cemento.	16
Figura 9 Fibras de refuerzo y sus clasificaciones (Cobrerros Rodríguez, 2009). ...	18
Figura 10 Clasificación de fibras naturales vegetales (Suddel & Rosemaund, 2009).	19
Figura 11 Planta de Agave Sisalana (FAO, Fibras del futuro, 2023).....	23
Figura 12 Fibras de Yute secas (FAO, Fibras del futuro, 2023).	24
Figura 13 Fibra de Abacá (Wikimedia Commons, 2023).....	25
Figura 14 Fibra de Bonote (Adobe Stock, 2023).....	26
Figura 15 Cosecha de cáñamo (López Moreno, 2017).	27
Figura 16 Procesamiento de la caña de azúcar al bagazo (Panoramaagrario.com, 2023).	28
Figura 17 Bagazo de caña procesado (TRUPAL, 2022).	33

Figura 18 Ubicación de los principales ingenios azucareros cercanos a laboratorio (Google Earth, 2023).....	39
Figura 19 Tambor alineador.	40
Figura 20 Concha desfibradora.	40
Figura 21 Rodillos dentados exprimidores.	40
Figura 22 Serie de rodillos finales.	40
Figura 20 Bagazo de caña seco aglomerado	41
Figura 21 Silicato de sodio preparado al 22% p/p.	45
Figura 22 Fibras de bagazo de caña tratadas con silicato de sodio.	46
Figura 23 Ubicación del banco de material "El Cuervo".	47
Figura 24 Muestreo y extracción en banco de material "El cuervo".....	48
Figura 25 Secado de arena de rio en laboratorio.	48
Figura 26 Cuarteador colocado en piso para prueba.	50
Figura 27 Vaciado de arena en cuarteador.	51
Figura 28 Material vertido a ambos lados del cuarteador y nuevo vaciado del material restante.....	51
Figura 29 Aplanado de la parte superior del montículo con pala.....	52
Figura 30 Trazado de líneas divisorias en montículo para posterior descarte.	52
Figura 31 División en 4 partes del montículo, para descartar las diagonales.....	52
Figura 32 Secado de arena hasta alcanzar secado superficial.	55
Figura 33 Apisonado de arena en molde tronco cónico.	55
Figura 34 Prueba visual de disgregación.	55

Figura 35 Registro de Mi.	55
Figura 36 Llenado de recipiente con arena superficialmente seca.....	55
Figura 37 Registro del peso del recipiente más agua y arena, Mii.....	55
Figura 38 Arena en condición saturada y superficialmente seca.	57
Figura 39 Prueba de humedad en arena con placa de vidrio.	57
Figura 40 Registro de masa de arena totalmente seca final <i>Ms</i>	57
Figura 41 Cuarteo de arena por método manual.....	59
Figura 42 Llenado del recipiente con masa y volumen conocido.	59
Figura 43 Enrase con varilla punta de bala del recipiente.....	59
Figura 44 Se vacía el material de esquinas opuestas dejando caer a 5 cm la arena.	60
Figura 45 Varillado entre capas con un total de 25 por cada una.	60
Figura 46 Se enraso con la varilla punta de bala el material.....	60
Figura 47 Muestra representativa para análisis granulométrico.....	63
Figura 48 Tamices ordenadas y colocadas en el agitador para prueba.	63
Figura 49 Pesado de material de cada una de las mallas retenidas.	63
Figura 50 Distribución de partículas según lo retenido en los tamices.....	63
Figura 51 Cráter formado con cemento siendo hidratado.	67
Figura 52 Amasado de la pasta cementicia.	67
Figura 53 Movimiento de pasta entre manos.	67
Figura 54 Pasta colocada en molde, enrasado.	67
Figura 55 Colocación de pasta, en el aparato Vicat.....	67

Figura 56 Penetración de aguja Vicat después de 30 segundos.....	67
Figura 57 Preparación de la mezcla en molde.	69
Figura 58 Colocación de la pasta en cuarto húmedo.	69
Figura 59 Medición de fraguado final.	69
Figura 60 Frasco sumergido y siendo girado para liberar aire	71
Figura 61 Introducción del cemento por medio de embudo.	71
Figura 62 Toma del valor que se encuentra por debajo del menisco.	71
Figura 63 Mezclado mecánico del mortero.....	75
Figura 64 Apisonado de la primera capa.....	75
Figura 65 Enrasado del mortero.....	75
Figura 66 Mortero listo para la prueba de los 25 golpes.	75
Figura 67 Medición del diámetro extendido de la mezcla de mortero.	75
Figura 68 Apisonado de los especímenes	77
Figura 69 Especímenes fraguando.	77
Figura 70 Colocación del espécimen cubico en prensa hidráulica.	78
Figura 71 Aplicación de carga al espécimen cubico.....	78
Figura 72 Falla del espécimen cúbico.	78
Figura 73 Especímenes de prueba para definir testigo de 3, 2 y 1 cm.....	79
Figura 74. Paneles descimbrados de 3.0, 2.0 y 1.0 cm.....	80
Figura 75 Prueba de Módulo de ruptura en cada grupo de prueba.....	80
Figura 76 Tamizado del bagazo de caña.	82

Figura 77 Fibra secada y enjuagada.	82
Figura 78 Fibra saturando por 24 h.	82
Figura 79 Homogenización a mano.	83
Figura 80 Utilización de mezcladora eléctrica para adición de FC.	83
Figura 81 Engrasado de moldes.	85
Figura 82 Eliminación de excedentes con regla.	85
Figura 83 Apisonado con prisma acrílico.	85
Figura 84 Panel terminado fraguando.	85
Figura 85. Colocación de paneles en recipiente hermético para curado a 7 y 28 días.	86
Figura 86 Aditamento para prueba a flexión (NMX-C-234-ONNCCE, 2015).....	88
Figura 87 Mediciones de espesores en especímenes (NMX-C-234-ONNCCE, 2015).	88
Figura 88 Acomodo de apoyos y aditamentos prueba de MOR.	89
Figura 89 Prueba de Módulo de ruptura en placas.	89
Figura 90 Placa fallada en ambos sentidos perpendiculares.	89
Figura 91 Medición del espesor por la línea de falla.	89
Figura 92 Base para vaciado de azufre.	91
Figura 93 Preparación para una de las áreas de contacto del cilindro.	91
Figura 94 Especímenes cilíndricos con base de azufre en áreas de contacto.	91
Figura 95 Colocación del espécimen cilíndrico para ensayo a compresión.	92
Figura 96 Falla del espécimen cilíndrico a compresión.	92

Figura 97 Fijado del espécimen con aditamento para medir deformaciones.	92
Figura 98 Aplicación de carga en el espécimen cilíndrico ya instrumentalizado. ...	92
Figura 99 Corte de placas con sierra de concreto.....	94
Figura 100 Marco acrílico de 20.5 x 25.5 x 5.0 cm.....	94
Figura 101 Sellado de placa en los bordes.	95
Figura 102 Colocación de agua a 20mm por encima de la placa.....	95
Figura 103 Inspección visual de formación de gotas en la parte inferior.....	95
Figura 104 Cajas de prueba para aislamiento acústico.....	96
Figura 105 Calibración de la fuente de ruido a 55 dB.	97
Figura 106 Prueba de aislamiento acústico.....	97
Figura 107 Inicio de tamizado.	99
Figura 108 Cúmulos de bagazo de caña.....	99
Figura 109 Fibra de caña utilizable.	99
Figura 110 Fibras sumergidas en agua por 24 h.....	99
Figura 111 Ecurrimiento de fibras.....	99
Figura 112 Saturación de la fibra por 24 h.	100
Figura 113 Vaciado de agua pasadas 24 h.....	100
Figura 114 Tratamiento con silicato de sodio.....	100
Figura 115 Comparativa entre fibra tratada y no tratada.....	100
Figura 116 Fibra de caña mineralizada.....	100
Figura 117 Recolección de arena del Rio Huajúmbaro.....	102

Figura 118 Secado de arena.....	102
Figura 119 Almacenamiento en sacos de la arena.	102
Figura 120 Resultado del análisis granulométrico de la arena de rio Huajúmbaro.	105
Figura 121 Gráfica de resistencia a compresión simple a 28 días para morteros con 1 parte de cemento y 2.25 a 4 partes de arena del rio de Huajúmbaro.....	111
Figura 122 Modelo de moldes metálicos de la investigación de paneles prefabricados de paja de cereal y tierra estabilizada (Cobrerros Rodríguez, 2015).	113
Figura 123 Elaboración de prototipo de molde con apertura lateral y abertura superior para vaciado.....	113
Figura 124 Vista de parte superior (acomodo de láminas verticales removibles).	113
Figura 125 Desmolde de cinco especímenes de prueba.	113
Figura 126 Alta adherencia de los panes de mortero a las placas de acero.	114
Figura 127 Molde final para vaciado de mortero de 1 cm de grosor.	115
Figura 128 Moldes metálicos de 3.0, 2.0 y 1.0 cm para prueba para determinar el espesor de testigo.	115
Figura 129 Módulo de ruptura promedio para cada grupo de prueba a 7 y 28 días.	119
Figura 130 Comportamiento a módulo de ruptura de especímenes a 7 y 28 días.	120
Figura 131 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PT.....	124
Figura 132 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PFC3%.....	125

Figura 133 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PFC6%.....	125
Figura 134 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PFC12%.....	126
Figura 135 Gráfica esfuerzo-deformación promediadas de cada grupo de prueba.	127
Figura 136 Reporte fotográfico de la inspección visual de los cuatro grupos de análisis en la prueba de permeabilidad.	128
Figura 137 Contenido de humedad y absorción de agua de los especímenes. ...	131
Figura 138 Densidad aparente seca y ambiente de cada espécimen.	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de la fibra del Bagazo de caña de Azúcar. (Sera, 1990).	34
Tabla 2 Propiedades mecánicas del mortero.	34
Tabla 3 Análisis de laboratorio del silicato de sodio a utilizar.	44
Tabla 4 Normativas, métodos y cantidades para ensayos.	48
Tabla 5 Normativas para características del cemento hidráulico.	64
Tabla 6 Tipos de morteros y sus proporciones por volumen en estado seco y suelto (N-CMT-2-01-004/02, 2002).	73
Tabla 7 Dosificación del grupo de prueba para producir un panel de fibrocemento.	80
Tabla 8 Resultados de la caracterización de la arena del Rio de Huajúbaro. ..	101
Tabla 9 Reducción de muestras para cada tipo de prueba de caracterización de agregado fino.	103
Tabla 10 Análisis granulométrico de arena del Rio Huajúbaro.	103
Tabla 11 resultado del ensayo de consistencia normal.	105
Tabla 12 Resultados del ensayo de tiempos de fraguado.	106
Tabla 13 Especificaciones a cumplir en tiempos de fraguado inicial y final.	106
Tabla 14 Resultado de la prueba de densidad en el cemento portland CPC30 RS.	106
Tabla 15 Resultados de laboratorio realizados al agua utilizada en la elaboración de mortero.	107
Tabla 16 Diseño experimental de mezcla de mortero en partes por volumen (N-CMT-2-01-004/02, 2002).	109

Tabla 17	Proporcionamientos utilizados en la determinación de la mezcla con la mínima cantidad de agua que cumplen con la fluidez.	110
Tabla 18	Módulos de ruptura a 7 días para definición de espécimen prototipo. .	117
Tabla 19	Dosificación de los grupos de prueba para elaborar una pieza.	118
Tabla 20	Módulos de ruptura promedio de los diferentes especímenes a 7 y 28 días.	119
Tabla 21	Comparativa en porcentaje de módulo de ruptura a 7 días respecto a diferentes especímenes de prueba.	121
Tabla 22	Comparativa en porcentaje de módulo de ruptura a 28 días respecto a diferentes especímenes de prueba.	121
Tabla 23	Diferencia en porciento de módulo de ruptura respecto a PT a 7 y a 28 días.	122
Tabla 24	Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PT.	122
Tabla 25	Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PFC3%.	123
Tabla 26	Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PFC6%.	123
Tabla 27	Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PFC12%.	123
Tabla 28	Esfuerzo-deformación de los diferentes grupos de prueba promediados en base a los resultados previos.	126
Tabla 29	Diferencia promedio porcentual de esfuerzo respecto de PT para generar la misma deformación en un punto cualquiera para los demás grupos de prueba.	127
Tabla 30	Tabla comparativa de los grupos de prueba a la permeabilidad durante 24 h.	128
Tabla 31	Cantidad de agua que permea de 1000 ml a través de los especímenes en un lapso de 24 horas.	129

Tabla 32 Mediciones a cada 5 segundos para cada grupo de prueba en el ensayo de aislamiento acústico.	129
Tabla 33 Resumen de resultados del Aislamiento acústico (R).	130
Tabla 34 Densidad y capacidad de absorción de los grupos de prueba.	130
Tabla 35 Comparación porcentual respecto a PT respecto a los especímenes en propiedades de contenido de humedad, absorción agua y densidad.....	132
Tabla 36 Aplicaciones y categorías de placas planas NT.	133
Tabla 37 Valores mínimos a Módulo de Ruptura en base a la categoría del panel.	133
Tabla 38 Clasificación de paneles tipo B de acuerdo a su MOR.....	135
Tabla 39 Posibles usos para las placas de fibrocemento no comprimidas del tipo B.	135

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros comienzos del concreto proceden del año 7.000 a.C. en concreto de la antigua Babilonia, otros atribuyen este comienzo en el norte de Chile por el año 3.000 a.C., con el descubrimiento de ejemplares de un concreto rudimentario. Aun así, el primer uso masivo del concreto data de la época del Imperio Romano, y aún hoy se conservan numerosas obras (Fernández-Ordóñez & López Vidal, 2015). Partiendo de lo anterior fueron los primeros iniciadores de los prefabricados, ya que ellos vertiendo cemento en moldes para construir una complicada red de acueductos, sistemas de drenaje y túneles, por lo cual el concepto no es nuevo como se creía (Socarrás Cordoví & Vidaud Quintana, 2017).

Posteriormente aparecieron los métodos de prefabricación junto con los nuevos materiales de la revolución industrial, como el acero y el vidrio, teniendo un gran impacto comenzando la industrialización (Menegotto, 2015).

Ya hacía 1891 volvió el uso del concreto en elementos prefabricados, cuando una empresa francesa prefabrico el primer forjado de vigas de hormigón en Biarritz; en 1904 el mismo país construye el primer edificio de grandes paneles y para 1905 comienza con otro edificio igual en Liverpool, Inglaterra. Aunque no se promovió en toda Inglaterra, esta técnica fue muy popular en otras regiones, especialmente en Europa del Este y Escandinavia (Socarrás Cordoví & Vidaud Quintana, 2017).

Posterior a la Segunda Guerra Mundial, Europa y la enorme escasez de: moradas, mano de obra y materia prima, genero un cambio en el desarrollo de procesos de edificación desplazando los sistemas tradicionales por otros más económicos y de mayor disponibilidad. Así la variedad de materiales nuevos incorporados a los preexistentes, promovieron una serie de innovaciones en la forma de construir diversificando y creando “sistemas de construcción” para cada caso (Bender, 1976).

Según (Reid, 1980) la introducción de materiales nuevos impulso el cambio, precisamente en un momento en que los fabricantes buscaban el cómo resaltar las

peculiaridades de sus nuevas propuestas para atraer la atención de potenciales compradores. Los materiales y sus métodos de instalación fueron inicialmente rechazados por algunos usuarios, principalmente por aspectos culturales; ya que la necesidad de seguridad y estabilidad en ese entonces estaba representado en elementos sólidos o macizos. Siendo así que los elementos livianos tales como la madera, elemento muy comúnmente usado se catalogaba como inversiones de poca duración, por no decir que la introducción de los nuevos productos al mercado causaba mayor rechazo, omitiendo por completo todas las virtudes y comodidades que daban los modernos sistemas de construcción.

Así, el impulso necesario para introducir nuevos métodos constructivos proviene de dos fuentes: el análisis de las obras constructivas tradicionales y los nuevos métodos o técnicas; generando una síntesis de los dos, es decir, el uso consistente de tecnologías de construcción apropiadas, con el tiempo los prefabricados encontraron un nuevo espacio donde poder expandirse, de pasar a los elementos portantes en edificaciones a desarrollándose ahora para uso no estructural fungiendo como elementos divisorios, cielos rasos, revestimientos, etc. Por esta razón, se ha utilizado una gran cantidad de laminados en la construcción a lo largo de los años, siendo los más famosos el contrachapado, el tablero de yeso, el tablero de partículas y los laminados de plástico y vinilo, acelerando los procesos de construcción (Cevallos Orbe, 2011).

Al observar los orígenes del prefabricado se tiene una serie de vertientes muy fascinantes en la actualidad, más aún en el mundo globalizado, en base a lo anterior entonces se puede definir a los prefabricados en palabras de (Cuevas Pérez, 2012) como “un sistema constructivo basado en el diseño y producción de componentes y subsistemas elaborados en serie en una fábrica fuera de su ubicación final y que, en su posición definitiva, tras una fase de montaje simple, precisa y no laboriosa, conforman el todo o una parte de un edificio o construcción”.

Sin embargo, se debe hacer una mención, la prefabricación es anterior a la industrialización, conceptos usualmente asociados y dependientes, pero diferentes,

como ejemplo se tiene a un ladrillo que puede ser prefabricado fuera de obra de manera artesanal y sin maquinaria con sistemas que se han prolongado a través del tiempo, hasta nuestros días (Díaz, 2003).

Entonces los elementos prefabricados poseen un carácter no necesariamente industrializado, teniendo la posibilidad de ser hecho en taller o hasta de forma manual por obrería, por ello una definición más abierta que englobe el significado sería la manejada por (Novas Cabrera, 2010) como “elementos prefabricados elaborados previamente a su utilización y en un lugar distinto al de su emplazamiento definitivo para su montaje posterior”.

Ahora en años recientes estos prefabricados se han volcado a la innovación de nuevos retos, el cuidado ambiental propicio una amplia investigación de materiales ecológicos. Poniendo atención al uso de fibras obtenidas de fuentes vegetales renovables para materiales compuestos (Biagiotti, *et al.*, 2008; John & Thomas, 2008; Faruk, *et al.*, 2012). La combinación de interesantes propiedades mecánicas y físicas, además de los beneficios ambientales, ha sido el principal impulsor detrás de su uso como alternativa a los refuerzos tradicionales (Ardanuy, *et al.*, 2015).

Por lo cual, aunque los materiales de construcción frágiles llevan tiempo siendo reforzados con fibras vegetales (FV) desde la antigüedad, el concepto se estudió y documentó por primera vez en la década de 1940, cuando éstas se evaluaron como posibles sustitutos debido a que las fibras de amianto, que era el material popular de la época demostró ser tóxico para el ser humano (Tonali, *et al.*, 2011).

Por lo tanto, las aplicaciones de compuestos de cemento con adiciones de fibras vegetales comenzaron a ganar relevancia, y en el área de la construcción se han establecido como elementos no estructurales debido a su fragilidad y capacidad baja de carga, pero teniendo usos aun, así como: paredes delgadas, productos de chapa fina para tabiques, envolventes de edificios o techos, laminas planas, tejas y componentes prefabricados en general (Roman, *et al.*, 2008).

De ahí que varios estudios se enfocarán en buscar cual fibra vegetal demostraba ser la más ideal para obtener dicha resistencia; Hay alrededor de 50 variedades de plantas que son fuentes de fibras vegetales aptas para la construcción (Cobrerros Rodríguez, 2009). Entre los que usualmente se analizan y se pueden obtener de forma más fácil en México son el Jute, fibra de coco, sisal, bambú, fibra de madera, hoja de palma, hoja de palma de coco, polvo de coco y algodón, los cuales han sido utilizados como refuerzos fibrosos (Prabakar & Sridhar, 2002).

Visto lo anterior se aprecia el poco interés en el estudio de fibras de bagazo de caña (FBC) la baja documentación científica respecto a las mismas abre oportunidades de propuesta para paneles de fibrocemento, utilizando algunos métodos propuestos que sigue la mayoría de las fibras como procesos base o estándar en su producción y acoplamiento en una matriz cementicia. El bagazo de caña pese a eso presenta propiedades mecánicas destacables similares o mejores a otras FV como virutas, lana o celulosa de madera, coníferas y otros materiales lignocelulósicos como la cáscara de arroz, el tallo del algodón, cáñamo, fibra de coco, yute, sisal, etc. Por lo tanto, es importante crear más alternativas de usos y métodos (Fernández Rodríguez & Díaz Hernández, 2017).

Las investigaciones sobre el tratamiento del Bagazo de caña (BC) comparten similitudes con varias FV desde su corte, separación, limpieza, secado y mineralización, todos ellos con diferentes medios mecánicos, físicos o químicos durante el proceso para poder tener una fibra que sea posible de incorporar a la mezcla de cemento, para la fabricación en su totalidad como panel los mismos métodos son casi en su mayoría idénticos, desde el mezclado, sus porcentajes de componentes, algunos aditivos, vaciado, vibrado, compactado, drenado y curado.

El presente trabajo propone una metodología de fabricación en elementos divisorios de recubrimiento para este tipo de fibra, a fin de poder replicar de forma plausible paneles de fibrocemento a base de fibra proveniente del bagazo de caña, con la mitad de los procesos que usualmente se utilizan para elaborar uno en base

a lo recomendado en FV similares y de forma manual no industrializada, con pocos elementos; por consiguiente el procedimiento aquí presentado tendría utilidad en futuros proyectos homólogos para otras FV con características similares a fin de contrastar la viabilidad del método y sus límites.

Dentro del desarrollo se manejarán las técnicas y consideraciones que se tomaron en base a los resultados preliminares y la información proporcionada de las diferentes investigaciones con materiales cementicios y fibras naturales.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

Un panel prefabricado a base de bagazo de caña tratada y mortero obtiene valores mayores a flexión que los establecidos a las normas para fibrocementos, utilizando una cantidad menor de procesos para su elaboración, respecto a paneles semejantes optimizando recursos.

2.2 Objetivo general

Establecer una metodología con la menor cantidad de procesos que permita producir un panel de mortero y bagazo de caña de calidad utilizando como parámetro de control la NMX-C-234-ONNCCE-2015, siendo el indicador de éxito el Módulo de Ruptura resultante y siendo contrastado con la norma de fibrocementos no comprimidos. Además, caracterizar las propiedades complementarias tanto del panel como de la mezcla.

2.3 Objetivos específicos

- Determinar dimensionamiento de fibras, con un tamaño funcional que evite el uso de trituradora, cortadora o molino.
- Establecer el tratamiento químico y físico de más óptimo para que la fibra logre una interacción favorable dentro del mortero, teniendo como puntos importantes una buena trabajabilidad, hidratación y protección al medio alcalino de la mezcla de mortero.
- Definir el espesor del panel testigo sin adición de fibras que satisfaga el calor mínimo de entrada de un MOR de 4 MPa, que sirva como punto de control para partir con las adiciones de FC.
- Establecer un procedimiento de vaciado el cual no utilice compactación, bombas de vacío o equipos electro-mecánicos y que a su vez que asegure la consolidación y expulsión de vacíos de los especímenes, además de eliminar la porosidad y el efecto de boleo en las fibras.

- Experimentar con tres diferentes dosificaciones de FC a fin de contrastar y obtener una conclusión sobre el espécimen que proyecta mejores resultados mecánicos una vez definida la metodología de fabricación.
- Analizar propiedades y características de diferentes grupos de prueba para ser contrastados con valores de referencia normados, tanto para el mortero y el panel producto del mismo.

3. REVISIÓN LITERARIA

3.1 Elementos prefabricados

Es complicado establecer un inicio para la prefabricación, para comenzar se tiene que manejar un concepto íntimamente ligado a éste, que es el de modulación, perfección de montaje, cálculo anticipado de elementos, proyecto integral y producción en serie. Los inicios de los prefabricados como tal se remontan a la Grecia del siglo V, en donde la problemática de una construcción más rápida y eficiente, con menos fallas en el proceso constructivo ya estaban resueltas, se conoce así debido a que la historia de la prefabricación de los griegos se encontraba escrita en las minas de sus templos (Zacatenco Aguilar, 1996). Su innovación consistió en dos partes, el concreto y la segunda el vaciado de éste en moldes prefabricados que les facilitaba la fabricación de varias piezas de un mismo elemento y poder montar una tras otra para así construir sus complejas redes de acueductos, sistemas de drenaje y túneles (Socarrás Cordoví & Vidaud Quintana, 2017).

Otro antecedente que le da continuidad a los prefabricados que estuvo profundamente ligado a la prefabricación en la construcción, data del siglo XVI, producto de una serie de acontecimientos cuyo origen tiene diferentes razones, pero coincidiendo a resultados impresionantes. El más notorio destacó por su modernidad e innovación en un proyecto realizado en 1516 por Leonardo da Vinci, su obra consto en construir ciudades para la región de Loire. Estos proyectos partían de un modelo base de casa en vecindad, que permitían la simplificación de una construcción en conjunto teniendo a su vez una gran flexibilidad y susceptibilidad de poder ser modificadas con facilidad sin afectar la interacción con las demás casas. Para su construcción se planteó un taller donde se fabricaron los elementos, in situ, principalmente cimientos, para finalmente transportar las piezas desde la fábrica a la obra, quedando la vivienda construida con unas simples operaciones de montaje y ensamble (Zacatenco Aguilar, 1996).

Por esta razón, a lo largo de la historia, la humanidad siempre se ha esforzado por lograr algún tipo de progreso, por lo general siempre optando por la optimización de materiales y mano de obra. De ahí el surgimiento de los diferentes tipos de procesos de construcción. Los prefabricados del pasado son el resultado de estas necesidades socioeconómicas del país. Se puede decir que el advenimiento de la prefabricación fue la fuente de la industrialización con la aparición del trabajo mecánico y organizado en el siglo XVIII; lo que dio como resultado un ascenso de producción de esta tecnología cambiando la vida cotidiana y los conceptos de la construcción. Es cierto que la prefabricación ha existido en el pasado, pero no fue hasta llegados los comienzos del siglo XIX donde se comenzó este gran auge que aumento hasta culminar con su mayor potencial en el siglo XX, siendo denominado a este periodo “la revolución industrial”, estos precursores históricos marcaron notablemente lo que ahora conocemos como sistemas prefabricados. Trágicamente la evolución de la prefabricación encontró crecimiento en la necesidad de Europa a causa de la primera y la segunda guerra mundial, generando una conciencia de optimización de recursos. La falta de ellos y el entorno económico experimentado obligaron a los ingenieros de la época a cuestionar todos sus conocimientos para desarrollar e innovar en nuevos sistemas que realmente fueran óptimos, pero que cumplieran con los estándares de calidad cada vez más estrictos de la época (Guerra Hernández , 2004).

Pasado el tiempo en 1891 con el regreso del concreto en elementos prefabricados, las empresas comenzaron a darle mayor propagación a estos elementos, ejemplos como la prefabricación del primer forjado de vigas de hormigón en Biarritz por una empresa de origen francés motivaron a otros; la construcción del primer edificio de grandes paneles 1904 y un año más tarde en 1905 con otro igual en Liverpool Inglaterra por el arquitecto John Brodie. Aunque no se promovió en todo el país, esta técnica fue muy popular en otras regiones, especialmente en Europa del Este y Escandinavia, que pronto con el tiempo irradiaron la confianza en estos sistemas para ser adoptados por los demás (Socarrás Cordoví & Vidaud Quintana, 2017).

Con el tiempo los prefabricados cubrieron otro campo dentro de la construcción, para el uso no estructural, fungiendo como elementos divisorios, cielos rasos, revestimientos, etc. Por esta razón, se ha utilizado una gran cantidad de laminados en la construcción a lo largo de los años, siendo los más famosos el contrachapado, el tablero de yeso, el tablero de partículas y los laminados de plástico y vinilo, esto es para acelerar el proceso de construcción (Cevallos Orbe, 2011).

3.2 Aplicación constructiva de diferentes tipos de panel

A continuación, se muestran los diferentes usos constructivos en distintos tipos de paneles para ampliar la perspectiva de la utilidad en diferentes áreas de la construcción (Girón Figueroa, 2014):

3.2.1 Muros estructurales

Son elementos verticales masivos, donde son calculados y estudiados previamente, para poder recibir cargas puntuales o distribuidas para trasladarlas a vigas, cimientos o zapatas. Estos se planean estratégicamente para que actúen dentro de un diseño de forma funcional y a veces estético.



Figura 1 Construcción de módulos habitables (EMMEDUE, 2022).

Aplicaciones más comunes

- Módulos habitables (diseño completo, Figura 1)
- Edificios multiplanta (muros de cerramiento interiores y exteriores)

- Naves industriales
- Viviendas

3.2.2 Muros divisorios



Figura 2 Muros divisorios de concreto (LBS, 2022).

Se distingue como un elemento vertical, que tiene como función principal dividir espacios o ambientes (Figura 2). Este tipo de muro no transmite cargas a los cimientos o vigas, teniendo solo un uso divisorio, este puede ser eliminado o trasladado si fuera necesario sin afectar la integridad estructural de la construcción.

3.2.3 Losa de entrepiso



Figura 3 Sistema de panel constructivo para para losa de mampostería (Hebel, 2022).

Este tipo de panel es un elemento horizontal que tiene como función dividir entre pisos funcionando como losa, distribuyendo la carga de la estructura y lo que tenga encima hacia las columnas o vigas de la construcción.

3.2.4 Cúpula



Figura 4 Domos habitacionales en Honduras (Fernando Martínez, 2013).

La cúpula o domo, representada en su mayoría como media esfera suele cubrir una parte o en su totalidad la edificación o parte de él por medio de arcos de perfil semicircular, parabólico u ovoidal, rotados respecto de un punto central de simetría (Figura 4).

Utilizadas usualmente en pequeños ambientes como salas o antesalas, como elemento decorativo en las fachadas.

3.2.5 Faldones



Figura 5 Colocación de paneles de concreto para faldones (Grupo FRERES, 2020).

Este es un elemento exterior, en su mayoría vertical, que modela la fachada o cubre la estructura principal, también se utiliza como remate de la losa final, llamado también cenefa (Figura 5).

3.3 Paneles no estructurales

Los paneles no estructurales son aquellos que no tienen uso o finalidad de recibir carga o transmitirla, usualmente estos son livianos, de baja resistencia mecánica y se utilizan como muros divisorios, plafones, cubiertas o con fines estéticos dentro de la construcción. Hoy día el mercado se ha diversificado con el fin de ofrecer más prestaciones, como propiedades acústicas, térmicas, facilidades de montaje, resistencias frente a agentes agresivos o ignífugos.

Continuando, esta investigación se centra en definir una metodología de panel a base de fibras naturales como de bagazo de caña que aterrice por sus características como un panel divisorio, la cual es establecer una metodología para generar paneles de fibrocemento con fibras de caña (FC) que cumpla con los requisitos necesarios en su categoría por las normativas mexicanas, de ahí los usos o aplicaciones variarán de acuerdo a los resultados y a la resistencia del Módulo de ruptura que obtenga el mejor espécimen, pero en su defecto se plantea para uso como muro divisorio o de recubrimiento, que no tenga finalidad estructural.

A continuación, se aborda brevemente a los principales paneles no estructurales más comunes en la construcción.

3.3.1 Panel de yeso

El uso y aplicación del yeso en la construcción y su desarrollo histórico son el resultado de diferentes periodos revolucionarios (neolítico o artesanal, industrial y posindustrial o el tercero) con características diferentes y un tanto contradictorias. (García Matos, 2016).

Hoy conocido como panel de yeso laminado, se originó en 1888, hace más de 100 años en los Estados Unidos, como resultado de la investigación de Augustine Sackett y Fred L. Cain para la American Coal and Asphalt Company.

Los tableros o placas son los componentes básicos de todo sistema constructivo (Figura 6). Las placas de yeso laminado están compuestas por un núcleo de yeso recubierto con dos capas de celulosa especial multicapa, fabricada y suministrada en láminas de varias longitudes y tamaños. La construcción final de los paneles se realiza mediante un proceso industrial continuo, totalmente automatizado y controlado por ordenador.



Figura 6 Aplicación de panel de yeso.

Principales características del yeso (García Matos, 2016):

- Material muy poroso.
- Aislante térmico y acústico (mala conducción de calor, electricidad y sonido).
- Excelente material conglomerante aéreo.
- Excelente adherencia y estabilidad volumétrica.
- Fraguado rápido y modificable
- Baja transferencia de calor.
- Baja densidad (2.3 g/cm^3).
- Bajo costo de producción (se cuece a menor temperatura que el cemento).
- Facilidad de reproducción superficial de formas.
- Baja solubilidad en agua.

3.3.2 Panel de cemento

Tiene la misma función que la placa de yeso, pero este es adecuado para uso en exteriores, esta placa rectangular consta de un núcleo de cemento portland

liviano, respaldado por dos capas de malla de fibra de vidrio polimérica en ambas caras, generalmente con bordes redondeados y lisos, tiene una superficie frontal rugosa y una parte posterior lisa que da como resultado una superficie súper duradera que puede resistir la humedad o la intemperie (Figura 7). Las características principales que lo destacan frente al panel de yeso son su fácil instalación, ligereza, uso para exterior y además de que permite recibir acabados diversos debido a su perfil de anclaje que proporciona una base estable para losetas cerámicas, piedras naturales, mosaicos, mármol, cantera, piedra delgada, ladrillos delgados, así como pinturas y empastados (López Flores, 2019).



Figura 7 Panel de cemento aplicaciones. Fuente: Quiroz Hábitat.

3.4 Paneles de fibrocemento

Paralelamente a la aparición del hormigón armado, nació el fibrocemento, como suele denominarse, compuesto por cemento hidráulico reforzado con fibras de amianto, pero gradualmente fue migrando a otras alternativas de refuerzo fibroso (Llerena Encalada, 2014).

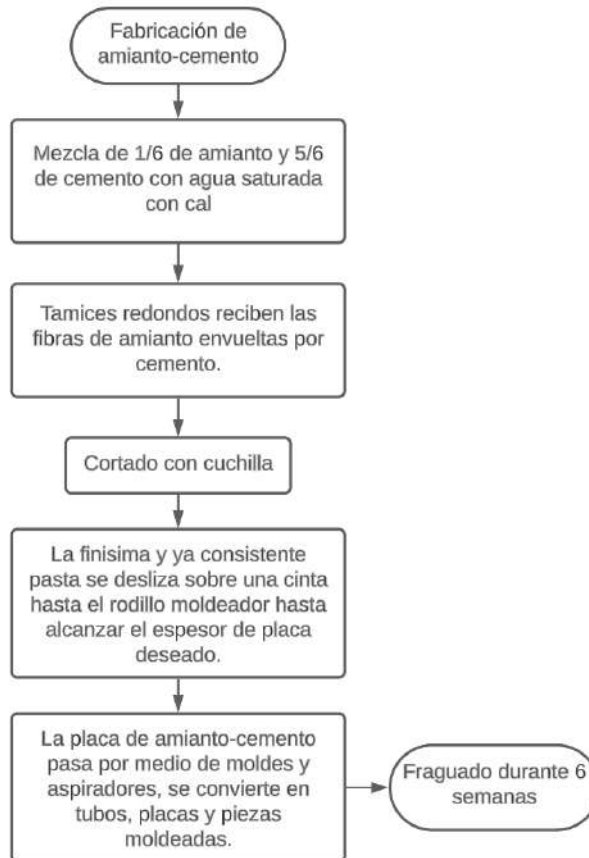


Figura 8 Método Hatschek para fabricación de fibrocementos de amianto-cemento.

Los orígenes del “fibrocemento” se remontan a 1900, cuando el ingeniero austriaco Ludwig Hatschek inventó este material, junto con el método para fabricarlos que lleva su apellido y sigue vigente en la actualidad por su versatilidad de producción (Figura 8); el panel era un material compuesto elaborado a partir de cemento Portland y fibras de amianto, que se utilizaba en la fabricación de paneles de construcción ligeros y rígidos. La invención de este material contaba con beneficios muy útiles como la impermeabilidad, fácil cortado y perforación, era un material relativamente económico, por lo que se utiliza en casi todos los tipos de construcción de la época (Cevallos Orbe, 2011).

Posteriormente se descubrió las afectaciones graves de utilizar amianto, observando el desarrollo de enfermedades pulmonares como la fibrosis o asbestosis pulmonar, cáncer broncopulmonar, entre otras, causando la muerte en

la mayoría de los casos; el material se eliminó gradualmente hasta que se prohibió en 2001 (Claramunt Blanes, 2011).

Investigaciones previas antes de la prohibición del invento de Ludwig buscaban el sustituto adecuado para los fibrocementos; sin embargo, el valor de las fibras naturales no era satisfactorio en comparación con la de amianto-cemento, por ello en la década de los 60's solo las fibras de vidrio, alcohol polivinílico (PVA), acero, plásticos, etc., fueron las más útiles para ser introducidas en las matrices cementicias, llegando a resultados muy similares con respecto al amianto-cemento. Pero, aun así, su elevado coste limitaba su uso a situaciones muy concretas (Fördös, 1988).

A pesar de ello, en esa misma década las limitantes no desalentaron a los investigadores, estos retomaron a las fibras naturales como opción para ser utilizadas en elementos delgados de concreto, como láminas de cubiertas o paneles de pared, actuando como elementos bidireccionales no portantes. Durante la década siguiente, publicaron sus primeros resultados positivos como una alternativa económicamente interesante para los países en desarrollo (Gram, 1988).

Ahora bien, si bien los análisis para la utilización de fibras naturales aplicadas al Método Hatschek habían demostrado ser viables, por el otro lado, indicaban ser una opción cara en recursos y número de elementos para su procesamiento. Por ejemplo, las fibras durante el proceso de fabricación presentaba problemas para la obtención de planchas de fibrocemento, como la baja capacidad de retención de sólidos, la resistencia al flujo de lodo y la falta de adhesión entre capas evitan la formación de placas, por lo que el uso de coagulantes era obligatorio así como con otras fibras no orgánicas de baja densidad para una correcta retención de las partículas, pero de igual forma utilizarlo sin previa investigación minuciosa sobre fibras naturales terminaba generando problemas de drenado debido a vacíos que reducían la resistencia del panel, afectando el proceso de elaboración de forma importante (Nawrath Barros, 2015; Blanco, *et al.*, 2002).

3.5 Tipos de refuerzos fibrosos en matrices cementicias

Las fibras son estructuras unidimensionales rígidas y flexibles, a menudo mucho más largas que su diámetro. Siendo así las fibras se puede dividir en dos grupos (Figura 9): fibras naturales (vegetales, animales, minerales) y fibras artificiales (celulosa y no celulosa) (Cobrerros Rodríguez, 2009).

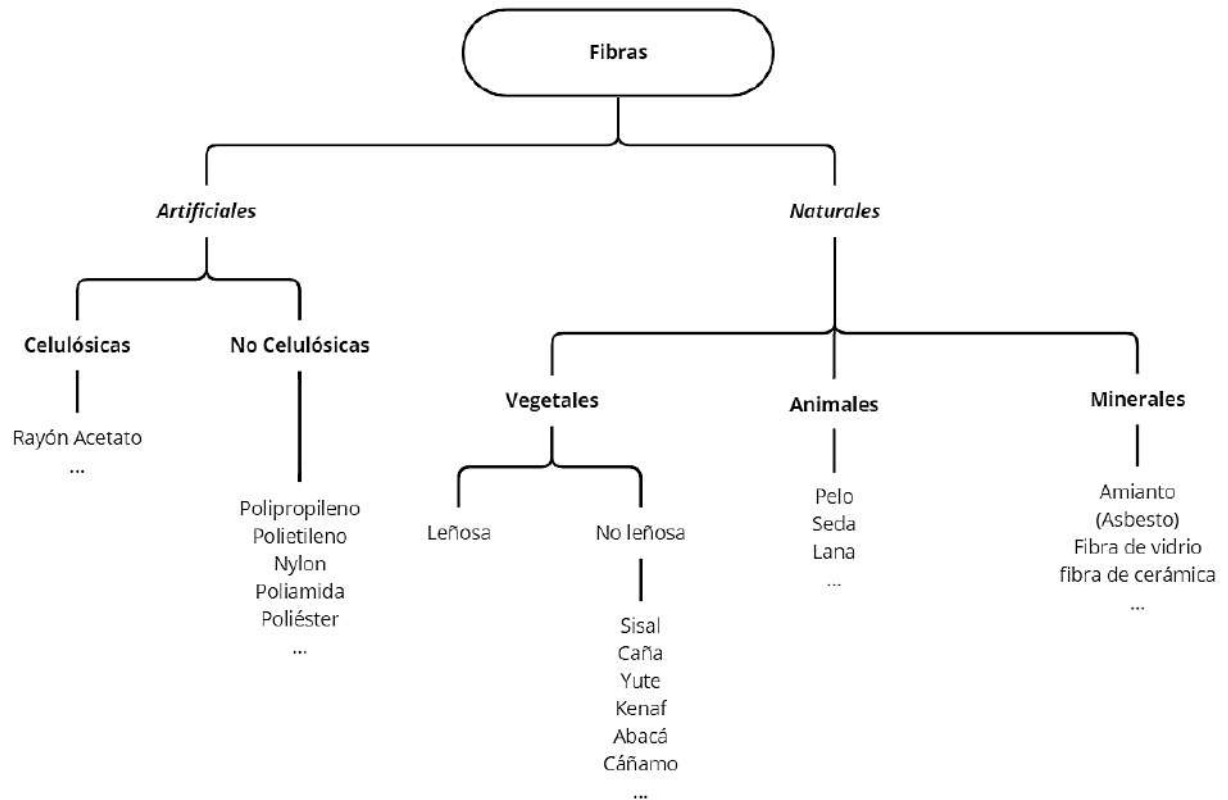


Figura 9 Fibras de refuerzo y sus clasificaciones (Cobrerros Rodríguez, 2009).

En las fibras naturales también encontramos "fibras animales" que incluyen pelo, lana, seda, etc., siendo menos adecuadas para uso industrial a menos que se limpien completamente de impurezas como las grasas y aceites, de no hacerse termina debilitando la unión entre la fibra y la matriz (Stulz & Mukerji, 1993).

3.6 Fibras vegetales como refuerzo

En la clasificación de fibras naturales se engloban algunas de las más representativas en este campo en la Figura 10 que tienen una variedad de usos amplia en la industria no solo de la ingeniería civil.

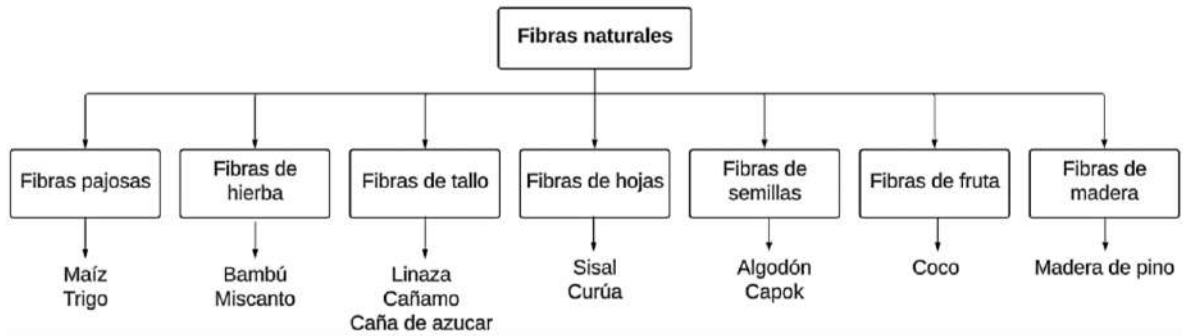


Figura 10 Clasificación de fibras naturales vegetales (Suddel & Rosemaund, 2009).

Al fomentar la gestión de residuos y materiales renovables para lograr altas tasas de reciclaje en diversos campos de aplicación maximizamos el capital natural que tenemos. Por ello no solo se debe de promover el uso de madera sostenible certificada, sino también hacer que la industria de la construcción preste atención a los productos o materiales que promuevan la edificación de obras más sustentables (Cuchí, 2009).

Mencionado lo anterior y continuando con los aspectos intrínsecos, las fibras vegetales son caracterizados por ser estructuras largas, flexibles y rígidas compuestas principalmente de lignina y celulosa. Siendo que la lignina funciona como un componente repelente al agua que proporciona dureza y resistencia a las paredes celulares de muchas plantas. Y por otra parte la celulosa, sirve dentro de las paredes celulares de las plantas como pieza clave de su estructura que provee resistencia a la tracción y flexibilidad, siendo esta última una de las biomoléculas más abundantes en la Tierra. Comprendiendo lo anterior una planta al iniciar su ciclo de vida posee paredes celulares compuestas totalmente de celulosa, y otras sustancias en menor cantidad como la lignina que se acumulan a medida que envejece (Cobrerros Rodríguez, 2009).

Con el concepto presente de los dos componentes principales de las fibras vegetales, estas dos representan una dificultad para asegurar la calidad del concreto, ya que al entrar en reacción con medios alcalinos como lo es el cemento, se presentan problemas de dispersión, agarre o degradación, que conducen a un

fibroceamiento deficiente, de ahí que en su mayoría se suele hacer un tratamiento previo para disminuir la cantidad de lignina de las mismas.

Ahora entonces para las fibras vegetales existen dos tipos, las de tipo leñosas y las que no presentan este acomodo, ambas se diferencian fundamentalmente en la proporción de lignina y celulosa que contienen, además de su origen. Una característica importante de muchas plantas de fibras no leñosas es que están adaptadas a lugares geográficos y climáticos, en donde se requiere flexibilidad y que sus tallos rígidos posean demasiada resistencia, al punto de ser elementos de falla frágil, y viceversa. Pero siendo las primeras de mayor interés debido a su crecimiento exageradamente rápido, desarrollando tallos y hojas largas muy resistentes en poco tiempo (Montserrat, 2009).

Ahora para dividir a las fibras vegetales de acuerdo a su procedencia se pueden manejar en tres grupos: fibras procedentes del tallo o tronco (Caña, lino, cáñamo, Yute...), fibras de hojas (Sisal, henequén, abacá...) y fibras procedentes de semillas (estopa de coco, Cáscara de arroz...) (Cobrerros Rodríguez, 2015).

Las características generales de los materiales de origen vegetal (basados en celulosa y lignina) son principalmente la reproducibilidad o renovabilidad, seguida de la baja resistencia a la compresión y al impacto, y la baja resistencia mecánica. Por si solas las fibras usualmente son muy débiles para soportar su propio peso, pero en cantidades considerables y si se llegan a acomodar de cierta forma (cuando son torcidas, entrelazadas, empaquetadas o comprimidas) pueden usarse en variedad de aplicaciones estructurales y no estructurales para la construcción (Stulz & Mukerji, 1993).

A pesar de existir una cantidad finita de fibras vegetales útiles para elaborar materiales y herramienta, nos dejan aun así con una variedad generosa de posibilidades. Y nuestros antepasados supieron cómo aprovechar y explotar su entorno natural con esto en mente, experimentando con algunas plantas de sus alrededores y con el paso de las generaciones, se nos transmitieron los conocimientos necesarios para manejarlas a nuestro beneficio (Montserrat, 2009).

Entonces podemos mencionar algunas ventajas y desventajas de recopilaciones acerca de las fibras naturales en base a lo anterior (Suddel & Rosemaund, 2009).

Ventajas:

- Es un recurso renovable y de bajo costo.
- Poco consumo de energía para su elaboración, obtención y producción.
- Abundancia en la disponibilidad de forma local con un bajo costo o gratis.
- Menos generación de residuos dañinos que productos sintéticos industrializados.
- Baja densidad, alta tenacidad, resistencia específica a flexión buena, sustituyendo en algunos casos a la fibra de vidrio con un costo de un 30% menos.
- Propiedades térmicas, acústicas y aislantes en diferentes aplicaciones.

Desventajas:

- Poca durabilidad
- Sensibilidad a los agentes biológicos
- Alto grado de absorción, causando variaciones de peso y volumen importantes que aceleran el deterioro.
- Baja resistencia al viento, al impacto y al fuego
- Falta de homogeneidad constatable en sus propiedades, en variación del clima o método de obtención
- Baja aceptabilidad por la idea generalizada de ser materiales inferiores para viviendas de escasos recursos.

3.7 Fibras vegetales aprovechables para la construcción

Aproximadamente existen 50 especies de plantas, que pueden utilizarse como fibras vegetales de refuerzo con usos dentro de la ingeniería en sus diversas ramas.

En esta parte tan solo se destacaron solo algunos de acuerdo a su importancia o disponibilidad en regiones geográficas y climáticas cercanas. Entre ellas destacan el yute, las fibras de coco, el sisal, el bambú, las fibras de madera, las hojas y palma de coco, la harina de coco y el algodón se utilizan como refuerzo de fibra (Prabakar & Sridhar, 2002).

Con todo lo anterior la industria de la construcción constituye el segundo sector que emplea más materiales naturales en productos como:

1. Paredes estructurales ligeras
2. Materiales de aislamiento
3. Revestimientos de suelos y paredes
4. Geotextiles
5. Techumbres

Algunos países Tanzania y Brasil han apostado por el uso de fibrocementos como tejas y bloques de construcción a base de sisal. Y así como la India utilizando productos basado en fibra de coco, que les aporta resistencia mecánica además como a las plagas (termitas e insectos), hacerlos impermeables, y con ciertas sustancias ignífugas y aptos para carpintería (con excelentes propiedades de sujeción para clavos y tornillos), lo que los convierte a múltiples fibras en materiales ideales para la construcción (Brett & ADAS).

Para hacer una mayor extensión de las propiedades de las fibras vegetales FV, se señalarán a las mismas que están dentro de las “Fibras del Futuro” según la Food and Agricultural Organization (FAO, Food and agriculture Organization of the United Nations, 2022), para finalmente mencionar la fibra de bagazo de caña (BC) que es el objeto de estudio mencionando el énfasis en sus propiedades de utilidad para la construcción.

3.7.1 Sisal (Agave Sisalana)



Figura 11 Planta de Agave Sisalana (FAO, Fibras del futuro, 2023).

El sisal es una fibra gruesa y duradera que se usa cada vez más en materiales compuestos para automóviles, muebles y construcción, así como en productos de plástico y papel (Figura 11). La fibra de sisal se obtiene del Agave Sisalana, procedente de México. La planta se desarrolla bien en una variedad de climas cálidos, incluidas las regiones áridas que no son aptas para otros cultivos. El sisal se puede cultivar en la mayoría de los suelos excepto en suelos muy húmedos, salinos o arcillosos y durante todo el año.

Las fibras están dispuestas longitudinalmente en las hojas y son más numerosas cerca de su superficie. Contienen aproximadamente un 90% de humedad y consisten en una pulpa jugosa muy firme con hojas rígidas. La extracción de fibra debe realizarse durante el corte para evitar el riesgo de daños durante la limpieza después del secado. La extracción de la fibra se realiza raspando la pulpa, generalmente mediante pelado mecánico.

El sisal como refuerzo. Este material puede igualar o superar las propiedades de la fibra de vidrio en aplicaciones automotrices, marinas, de muebles y de plomería. En la construcción, se puede utilizar como fibra de refuerzo en viviendas de bajo costo y puede ayudar a reemplazar el asbesto en elementos como techos y cimientos. También es un material aislante que se puede procesar en tableros de fibra porque se parece a la madera.

3.7.2 Yute (*Corchorus Olitorius*)



Figura 12 Fibras de Yute secas (FAO, Fibras del futuro, 2023).

Llamada “fibra dorada”, El yute es una de las fibras naturales más largas utilizadas para diversas aplicaciones textiles. El yute es extraído de la corteza de la planta del yute blanco en su mayoría. La fibra tiene un aspecto sedoso dorado, llamada proveniente de ahí su nombre (Figura 12).

Largo, suave y brillante, de 1 a 4 metros de largo y de 17 a 20 micras de diámetro. Las fibras se componen principalmente de celulosa (componente principal de las fibras vegetales) y lignina (componente principal de las fibras de madera). La fibra se puede obtener mediante procesos de tostado tanto biológicos como químicos. Dados los costos asociados con el uso de productos químicos para extraer fibras de los tallos, los procesos biológicos son los más utilizados. El tostado orgánico se puede hacer en agua y en cintas utilizando técnicas que permiten separar las fibras antes de que los tallos atados se empapen y se arranquen. Luego, después del tostado, se procede al enraizamiento, raspando el material no fibroso y arrancando las fibras del interior del tallo.

Esta fibra ha reemplazado durante mucho tiempo a las fibras de lino y cáñamo en los sacos arpilleros. Una característica fundamental del yute es que puede usarse solo o en combinación con una variedad de otras fibras y materiales para garantizar la compatibilidad. Muchas de estas aplicaciones han sido reemplazadas por materiales sintéticos. Pero cuando eso no es suficiente, se utiliza yute

biodegradable. Por ejemplo, contenedores para plantar árboles o geotextiles contra la erosión del suelo, que al cabo de un tiempo se romperán sin ser retirados.

Las ventajas del yute incluyen baja conductividad térmica y moderada retención de humedad, además de sus propiedades aislantes y antiestáticas. En cuanto al uso en hormigón, existe la posibilidad de uso en cemento, pero hay problemas en la distribución, además, se deben aplicar procesos para evitar la degradación de la fibra y el daño por resistencia a la fibra y la mala adaptación.

3.7.3 Abacá (Musa textiles)



Figura 13 Fibra de Abacá (Wikimedia Commons, 2023).

El abacá, también conocido como cáñamo de Manila, se extrae de las vainas de las hojas que rodean el tallo de la planta de abacá (Musa textilis), un pariente del banano originario de Filipinas y ampliamente distribuido en los trópicos húmedos. Cosechar abacá es problemático. Cada tallo debe cortarse en tiras y rasparse para quitar la pulpa, a continuación, la tela se lava y se seca. (Figura 13).

Consiste en células largas y delgadas que forman parte de la estructura de soporte de la hoja. El contenido de lignina es superior al 15%. El abacá es valorado por su excelente resistencia mecánica, resistencia al daño por sal y longitudes de fibra de hasta 3 metros.

Hoy en día se utiliza para hacer cuerdas, cordeles, aparejos, sedales y redes de pesca, y tela para costales. Hoy en día, el abacá, utilizado en prendas de vestir,

cortinas, biombos y tapicería, está creciendo y sus fibras se utilizan principalmente en la producción de papel.

Las propiedades de tracción del elemento también permiten su uso en aplicaciones de resistencia como reemplazo de la fibra de vidrio en elementos externos y elementos para plástico reforzado.

Debido a la resistencia mecánica extremadamente elevada de la fibra, así como su longitud, ofrece un gran potencial para diferentes aplicaciones industriales.

3.7.4 Bonote (Cocos Nucifera)



Figura 14 Fibra de Bonote (Adobe Stock, 2023).

La fibra de coco o bonete es conocida como la fibra más gruesa y fuerte de todas las fibras naturales disponibles comercialmente ya que la fibra es corta, pero gruesa, siendo extraído de la cáscara exterior del coco (Figura 14). La baja tasa de degradación es una ventaja clave de este material en la producción de geotextiles duraderos.

Las fibras de coco miden hasta 35 centímetros de largo y de 12 a 25 micrones de diámetro. Los cocos se cosechan después de 45 días. 1000 cocos producen 10 kilogramos de fibra de coco. De todas las fibras vegetales, la fibra de coco tiene una de las concentraciones más altas de lignina, por lo que, aunque es fuerte, es menos flexible que el algodón y no es apta para teñir. La resistencia a la tracción del coco es menor que la del abacá, pero debido a sus propiedades es altamente resistente

a la acción microbiana y al daño del agua salada, por lo tanto, no requiere tratamiento químico.

El bonote blanco, generalmente transformado en hilos, se utiliza en la fabricación de cuerdas y, gracias a su fuerte resistencia a la sal, también en redes de pesca. La fibra de coco marrón es más fuerte, y se usa más comúnmente que la fibra de coco blanca. Las aplicaciones incluyen telas para embalaje, cepillos, tapetes, alfombras, colchones, paneles aislantes y embalaje.

La chapa de coco tiene todas las propiedades de la chapa fenólica, pero con la resistencia añadida de las fibras. Resistente al desgaste superficial y al encogimiento/dilatación por cambios de temperatura.

3.7.5 Cáñamo (Cannabis Sativa L)



Figura 15 Cosecha de cáñamo (López Moreno, 2017).

El cáñamo es originario de Asia Central y es una especie típica de las franjas de los bosques. Todas las etapas de crecimiento y reproducción se alcanzan en un ciclo corto de 5 meses (Cobrerros, 2009). Hoy, el cáñamo está emergiendo nuevamente como un cultivo competitivo y sostenible para la industria de fabricación de fibra y celulosa. El cáñamo es producido por ciertas cepas de la especie *Cannabis sativa* L., pero a diferencia de la subespecie indica más conocida como marihuana, el cáñamo está prácticamente libre de sustancias psicoactivas. El cannabis a menudo se confunde con la marihuana porque las hojas de ambas

plantas son similares. Como resultado, muchos países han restringido o prohibido el cultivo de esta planta de origen fibroso (Figura 15). Casi la mitad del suministro mundial de cáñamo industrial se cultiva en China, y la mayor parte del resto se encuentra en Chile, Francia y Corea del Norte (FAO, 2009).

Usos en la Construcción: El uso del cáñamo en la construcción se mezcla con otros materiales como la cal y la tierra. Se utiliza en forma de partículas para hacer bloques y losas, o en forma de lana como aislante. Reemplaza el uso de fibra de vidrio por cáñamo, cuando se usa PVC permite producir plásticos con las mismas propiedades físicas, con 10% menos de peso y menos consumo de energía durante el transporte. El bajo desgaste también reduce los costos de la línea de montaje. La lista de usos del cáñamo es extensa y continúa creciendo debido al aumento de los costos de energía debido a la producción en masa de su principal competidor en el mercado, las fibras minerales (Ségalen, 2005).

3.7.6 Bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)



Figura 16 Procesamiento de la caña de azúcar al bagazo (Panoramaagrario.com, 2023).

La caña de azúcar es una planta tropical muy similar al maíz. Su tallo consta de una parte sólida muy fibrosa y una parte líquida que contiene agua y sacarosa (Figura 16). Cuando la caña se muele para hacer azúcar, se extraen las fibras las cuales forman el bagazo. El subproducto o residuo, no supone un problema en su

recolección. Los países productores de azúcar lo han utilizado tradicionalmente como materia prima para la producción de energía en ingenios azucareros o calderas; hace unos 150 años se le dio uso en la producción de papel, pero no hace mucho se utilizó para la fabricación de paneles aglomerados de fibras, partículas, celulosa y también para derivados farmacéuticos o aditivos de alimentos (Rutiaga *et al.*, 2002; Jiménez, 1997). La cosecha de la caña de azúcar suele tardar unos dos meses, y durante el resto del año el material debe almacenarse con especial atención a la fermentación. Es un residuo de fibra del procesamiento de la caña de azúcar. Se compone de fibras y medula, la misma es de pared gruesa y relativamente larga (Rowell, *et al.*, 1997).

Esta fibra no es apta para reforzar productos cementicios ya que el azúcar residual retarda el endurecimiento el fraguado del cemento. Para corregirlo se debe forzosamente utilizar un aglutinante orgánico adecuado o químico, para que exista compatibilidad entre ambos elementos y se puedan elaborar tableros de partículas y de fibras (Stulz & Mukerji, 1993). Sin importar lo anterior el bagazo es un recurso muy abundante ya que está disponible en cualquier sitio donde se pueda sembrar caña de azúcar, por lo cual la fuente es casi constante durante el año, eso sí siempre debe de hacerse énfasis en el almacenamiento, teniéndose que dar un cuidado especial para prevenir una putrefacción producto de la fermentación de los microorganismos en descomposición de la azúcar restante en sus fibras. De hacerse con el cuidado adecuado estas pueden duran durante muchos años (Cobrerros Rodríguez, 2015).

Este desecho importante en los procesos de los ingenios al salir después de las máquinas de extracción representan aproximadamente el 30% del peso original de la caña antes de ser molida y está constituido por agua, sólidos particulados y cantidades más pequeñas de sólidos solubles; según el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) los valores de interés a resaltar son los siguientes: humedad: 46-52%; sólidos particulados: 40-46%; y sólidos solubles: 6-8 %.

Las partículas sólidas constan de dos clases muy diferentes: fibras y médula. Compuesto por células cilíndricas y tejido vascular con una pared resistente, las fibras se encuentran en la corteza e interior del tronco.

Según él (ICIDCA) la distribución granulométrica del bagazo de forma integral es muy variada, desde un fino polvo de aserrín, hasta partículas irregulares de gran tamaño, siendo reportado por hasta un 8% de partículas grandes retenidas e la malla ASTM No.1, y de 10 a 25% de partículas pequeñas pasando por la malla ASTM No. 16. Por lo cual el Bagazo no constituye un material homogéneo, respecto a su peso volumétrico o densidad aparente, se reportan valores muy bajos, entre 50 kg/cm^3 y hasta 96 kg/cm^3 en base seca y en ambiente natural, sin compactación.

Los problemas destacables que muestra este material similar a cualquier fibra de origen natural debido a su naturaleza, no es posible ser mezclado dentro de un medio alcalino como lo es el concreto, inmediatamente las fibras tienden a degradarse y desaparecer al cabo de un tiempo. Las investigaciones dirigidas a solucionar estos problemas seleccionan siempre un pretratamiento o con algún agente que disminuya la alcalinidad utilizando cenizas de origen natural, además la azúcar sobrante retrasa el fraguado del cemento (Osorio Saraz, *et al.*, 2007). Estos problemas son los principales puntos para el tratamiento de la fibra antes de ser agregado dentro de la mezcla de mortero y no afectar su durabilidad y resistencia.

3.8 Fibrocemento a base de fibras vegetales

Las fibras vegetales poseen rasgos como ligereza, flexibilidad, durabilidad, renovabilidad, biodegradabilidad y seguras de manipular. Al ser más baratas que las fibras sintéticas y ser muy común su cultivo en zonas pobres del planeta, el impulsar su uso para la construcción es sustancial. La edificación, al ser uno de los sectores de mayor impacto económico, es muy significativo el optar por el uso de materiales procedentes del campo, dándosele un segundo uso, cuyo efecto disminuiría contaminantes de difícil reciclaje al sustituirlos por fibras naturales, generando un menor impacto ambiental con una menor generación de residuos (contaminación

del aire, de las aguas y producción residuos sólidos) que los productos sintéticos industrializados, debido a su reutilización y al menor coste energético (Jardín Botánico Atlántico de Gijón, 2009).

En el pasado, como hace setenta años, casi todos los recursos para la producción de materias primas y muchos productos industriales, eran materiales derivados de origen natural. Textiles, cuerdas, lonas y también papel, se fabricaban con fibras naturales locales, como el lino y el cáñamo. Algunas de ellas se siguen utilizando hoy en día. Ya en 1908, se aplicaron los primeros materiales compuestos para la fabricación de grandes cantidades de láminas, tubos y tuberías con fines constructivos (papel o algodón para reforzar láminas, fabricadas con resinas de fenol o melamina-formaldehído). En 1896, por ejemplo, los asientos de los aviones y los depósitos de combustible se fabricaban con fibras naturales con un pequeño contenido de aglutinantes poliméricos.

Las fibras vegetales son estructuras compuestas de lignina y celulosa. Suelen ser fuertes, flexibles, largas y muy delgadas. La lignina es el componente que impermeabiliza las paredes de muchas células vegetales y les da rigidez y elasticidad. La celulosa, por otro lado, es un componente importante de las paredes celulares de las plantas y es una de las biomoléculas más abundantes en la tierra. Es un elemento esencial de la estructura de la fibra y promueve la resistencia a la tracción y la flexibilidad. Cuando las plantas están en una etapa joven sus paredes están compuestas exclusivamente por celulosa y mientras avanza el tiempo hasta llegar a su maduración se van acumulando sustancias diversas entre ellas la lignina (Cobrerros Rodríguez, 2009).

Las desventajas que posee son (Cobrerros 2009): poca durabilidad, vulnerabilidad a los agentes biológicos (insectos, roedores, aves, y desarrollo de hongos y descomposición). Tienen un alto grado de absorción, que produce importantes variaciones de peso y volumen, acelerando el deterioro, afectando a la durabilidad. Baja resistencia a la acción del viento, al impacto y a la acción del fuego. Sus propiedades no son uniformes y dependen en gran medida de factores como el

clima o los métodos de extracción. En principio, los costos de adquisición y producción son cercanos a cero, dependiendo de las políticas productivas y económicas que afectan la continuidad del suministro. Pero la baja aceptación de estos materiales debido al estigma que se tiene de ser elementos de baja calidad y que solo se utilizan en viviendas de bajos recursos, limita su aceptación.

Aun así, en los últimos años, todo aquello relacionado con el medio ambiente han estimulado una amplia investigación sobre materiales de menor impacto para el medio ambiente. Se ha prestado especial atención al uso de fibras obtenidas de fuentes vegetales renovables en materiales compuestos (Bledzki, 1999; Biagiotti, *et al.*, 2008; John & Thomas, 2008; Faruk, *et al.*, 2012). La combinación de las interesantes propiedades tanto mecánicas y físicas, además de sus beneficios ambientales ha sido el principal impulsor de su uso como alternativas a los refuerzos convencionales (Ardanuy, Claramunt, & Toledo Filho, 2015).

Aunque no lo parezca desde la antigüedad los materiales frágiles de construcción han sido reforzados con fibras vegetales desde hace mucho, el concepto de Fibras Vegetales (FV) en materiales de refuerzo a base de cemento se desarrolló y documentó científicamente por primera vez en la década de 1940, cuando estas fibras se evaluaron como posibles sustitutos de las fibras de asbesto (Tonali, *et al.*, 2011).

Los primeros precursores compuestos de matriz de cemento y fibras contenían altas cantidades de cemento (al menos siempre 2 partes de cemento: 1 parte de arena: 10% de fibras respecto al peso del cemento), denominándose por primera vez como “fibrocemento” a esta composición. Actualmente la relación es de 1 a 2 partes de cemento, dependiendo de la granulometría de esta y de la calidad del mismo (Fernández Rodríguez & Díaz Hernández, 2017).

La aplicación de los composites de cemento y FV se centran principalmente en la construcción no estructural de materiales de paredes delgadas, principalmente productos de chapa fina para tabiques, envolventes de edificios o techos, chapas

planas, tejas y componentes prefabricados en general (Roman, Martello, & Savastano, 2008).

En la utilización de fibras de origen vegetal destacan como las más usuales: lana de madera, las virutas de madera, la celulosa de maderas coníferas y otros materiales lignocelulósicos como la cáscara de arroz, el tallo del algodón, cáñamo, yute, sisal, fibra de coco etc. Sin embargo, el bagazo de caña cuenta con una menor investigación en comparación con las demás fibras (Fernández Rodríguez & Díaz Hernández, 2017).

3.9 Bagazo de caña y sus propiedades



Figura 17 Bagazo de caña procesado (TRUPAL, 2022).

El sector agrícola de México cuenta con una gran diversidad de plantas; los productos más vendidos y comercializados en México destaca la Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) el producto es liderado en México por Veracruz y Jalisco, ambos generaron una producción de 55 millones de toneladas (SIAP, 2018) estas plantas cespitosas son muy comercializadas por el jugo del tallo con el cual se produce la azúcar.

Esta caña es cosechada y pasada por rodillos hasta obtener su jugo, algunas fábricas la trituran para utilizarlo como combustible y a este residuo se le llama Bagazo de Caña (BC), que está compuesto por la corteza y medula de la planta teniendo un aspecto leñoso (Figura 17). Los primeros estudios sobre el BC

demuestran que posee propiedades mecánicas (Sera, 1990) (Tabla 1). Los estudios y el aprovechamiento para este tipo de residuo son diversos, pero mayormente enfocados a rubros fuera de la construcción, ya que se le ha utilizado como forraje, abonos, fertilizantes, insecticidas, biofungicidas biológicos, biodiesel, papel, tableros, moldeados, composites, entre otros (Solomon & Singh, 1995).

Tabla 1 Propiedades de la fibra del Bagazo de caña de Azúcar. (Sera, 1990).

Especificaciones del BC	Valor
Continuo/disperso	Disperso
Orientación	Aleatoria
Longitud (mm)	26
Diámetro promedio (mm)	0.24
Gravedad específica (g/cm ³)	1.25
Absorción de humedad %	78.5
Contenido de humedad %	12.1
Resistencia ultima MPa	196.4
Módulo de elasticidad GPa	16.9
Resistencia a la adherencia MPa	0.84

Continuando con las propiedades mecánicas módulo el BC tiene una elasticidad de 16.9 GPa siendo superior al de la madera tanto laminada (7000 MPa) como la utilizada como placa (14000 MPa), acercándose por debajo del mortero (Tabla 2). Por ello el bagazo posee una respuesta a la tensión y deformación mayor que la madera, y mejor resistencia que el mortero (PINEDA CANO, 2016).

Tabla 2 Propiedades mecánicas del mortero.

Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson	Peso volumétrico (N/m ³)	Resistencia a compresión 28 días, $f'c$ (GPa)
2.76x10 ⁴	0.2	22 7100.0	39.0

3.10 Bagazo de caña como fibra de refuerzo, tratamientos y fabricación

El BC dentro de la construcción ha tenido una serie de investigaciones en varias aplicaciones, en menor medida como refuerzo para derivados del cemento, pero, aun así, se ha utilizado como puzolana, refuerzo para concreto y mortero, todos ellos con diferente objetivo. De todo ello, se utilizará solo la información relevante para poder aplicarse en tableros, paneles, placas a base de cemento y mortero, con el enfoque de fibras de refuerzo.

Osorio Saraz, *et al.*, 2007, con el objetivo fabricar un concreto de relleno ligero, la investigación optó por la utilización de la fibra de BC como un agregado económico y de bajo impacto ambiental, siendo que este funcionará a su vez como un refuerzo que evitara fisuras o agrietamiento; obteniendo así resistencias mecánicas a edades tempranas entre 8.6 y 16.88 MPa, con reducciones en la densidad del material que variaron entre 141 y 336 kg/m^3 . Con respecto al tratamiento químico de las fibras, se optó por utilizar cloruro de calcio al 3% e hidróxido de calcio al 5% para evitar la degradación de las fibras en la matriz. La composición de la mezcla fue: cemento, agua, grava, arena y fibras, a esta misma argamasa se le adicionó cloruro de calcio al 3.0%, en relación con la masa de cemento como acelerante del fraguado esto debido a la lignina y celulosa restantes que causan un fraguado lento (Beraldo & Vieira, 2004), se dejó por 24 horas secando y posteriormente desmoldado, teniendo un curado en pila de 14 días.

(Lopez Barrios & Valencia Gualdron, 2006), experimentó con paneles de diferente espesor, compuestos por cemento y BC, con tamaños de entre 5 a 25 mm, cumpliendo relación en peso de bagazo/cemento 1/3.5, utilizando silicato de Sodio como agente mineralizante, cumpliendo una relación en peso al 10% del bagazo y agua en relación del 0.6% con respecto a la masa total de la muestra. De toda la serie de experimentos El espécimen de 3 cm mostro mejores resultados, obtuvo un MOR de 2.72 MPa y una densidad de 1150 kg/m^3 , con características adicionales como un coeficiente de reducción acústica de 0.477.

(Fernández Rodríguez & Díaz Hernández, 2017), Ensayo con fibra de BC, mineralizándolas con silicato de sodio, impartiendo propiedades mecánicas aceptables al material compuesto, especialmente la resistencia a la flexión, siendo en comparativa mayor su resistencia a la del testigo correspondiente, el cual no tenía adición de fibra. Entre sus otras propiedades, se redujo la densidad un 10.7% respecto al testigo de 2165 kg/cm^3 y obtuvo un MOR máximo de 7.5 MPa con 5.0% de fibra respecto al peso del cemento, utilizando una fibra de 3.15 mm de largo.

(Khorami & Ganjian, 2011), fabrico tableros de fibrocemento (TF) a base de BC, trigo y eucalipto, Las características del comportamiento a la flexión del TF que utiliza fibras de bagazo mejoran considerablemente en comparación con las fibras de trigo y eucalipto. Debido a las propiedades mecánicas y físicas de las fibras de bagazo. Como el mejor espécimen se manejó el de 4% de adición de BC respecto al peso del cemento, que obtuvo un resultado de 6.0 MPa, con pruebas posteriores se logró aumentar a 6.6 MPa, pero solo si se sustituye el peso del cemento con un 5% de humo de sílice. Las dimensiones promedio de la fibra manipuladas en experimento eran de 1.30 mm de largo y 0.34 mm de ancho.

Cabral, *et al.*, 2018 , llevo a cabo tres un experimento de comparativa con los grupos de: testigo, fibras tratadas y sin tratamiento; el pretratamiento incluía un triturado, tamizado automático, lavado en agua a 100°C , otro lavado a temperatura ambiente y secado en horno de tiro forzado a 60°C ; el resultado mostró una mejora en el MOR respecto a fibras no tratadas de un 84.47%, pero aun así sin lograr superar de forma significativa al testigo sin fibras más que en un 2.35%; los valores máximos del testigo, fibra sin tratar y tratada fueron de: 2.90, 1.61 y 2.97 MPa.

(Lozano Zamora & Rojas Fraile, 2019), manufacturó paneles de 30 x 30 cm, con distintos espesores y dosificaciones donde la materia prima principal fueron fibras de BC. Como aglutinante, se empleó cemento Portland tipo I (blanco y gris), y melaza de caña de azúcar. Su experimentación tuvo como objetivo obtener un índice de transmisión térmica menor a la de los materiales tradicionales de construcción, alcanzando un $0.641 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$.

4. METODOLOGÍA

Concluido el estado del arte sobre los alcances y límites en fibras de bagazo de caña, con enfoque a su desempeño como refuerzo para matrices cementicias, en específico con elementos tipo panel delgados para fabricar un prototipo de fibrocemento de uso no estructural, se llevó a cabo un procedimiento recopilando la información de utilidad que diera un resultado ideal para la implementación de la fibra como refuerzo y que esta a su vez no fuera una atenuante en la calidad del producto final; a continuación en cada apartado se describirá paso a paso los procesos que determinan la ejecución del panel.

4.1 Determinación de la zona extracción del bagazo de caña

El proyecto toma al residuo agroindustrial, conocido como bagazo de caña de una zona cuyos procesos y ubicación beneficien de entrada los procesos, para este proyecto la materia prima requiere características ideales para reducir tiempos de fabricación: precorte, porcentaje de humedad, prelavado, drenado, hasta el dimensionamiento de fibras, para ello se realizó un sondeo de las principales industrias circundantes del estado de Michoacán, finalmente se escogió al Ingenio Lázaro Cárdenas S.A. de C.V ubicado en el municipio de Taretan, Michoacán.

Este municipio se caracteriza en su mayoría por la siembra y cosecha de caña de azúcar, además de que su fábrica posee un proceso de procesado que suma a la reducción de tiempo.

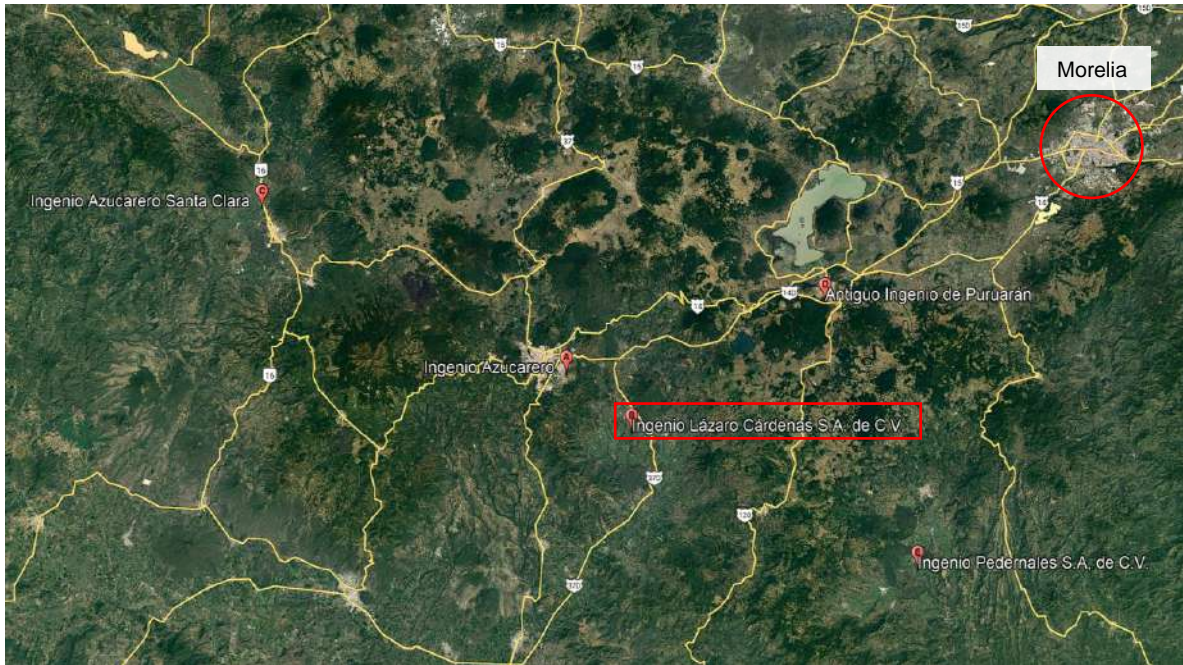


Figura 18 Ubicación de los principales ingenios azucareros cercanos a laboratorio (Google Earth, 2023).

4.2 Definición y caracterización de la fibra de caña (FC)

4.2.1 Obtención del material

La empresa encargada cuenta con una producción anual de este residuo de forma anual, con excedentes en bodegas que por falta de espacio terminan siendo desplazados a los campos de siembra para ser quemados, además esta fábrica cuenta con un proceso de extracción cuyo producto final es una fibra con dimensiones, humedad y cantidad de azúcares baja, que son atenuantes a favor del enfoque del proyecto, que es la reducción de procesos de principio a fin.



Figura 19 Tambor alineador.



Figura 20 Concha desfibradora.

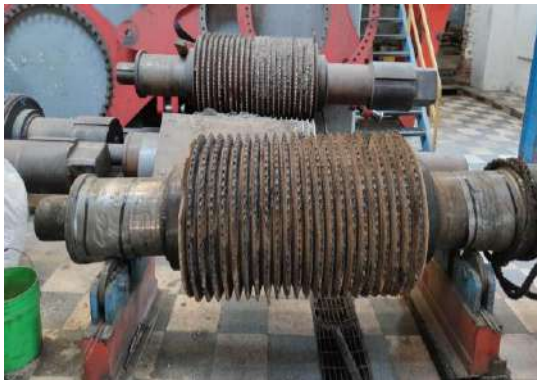


Figura 21 Rodillos dentados exprimidores.



Figura 22 Serie de rodillos finales.

La maquinaria que se encarga de exprimir la caña para obtener su jugo, consta de 3 procesos: El tambor alineador (Figura 19), el cual se encarga de recibir toda la carga de caña y formar una cama de caña más o menos homogénea para que pueda entrar sin problemas a la siguiente parte llamada concha (Figura 20), en ella se lleva a cabo el proceso de desfibrar y pelar la caña para que solamente quedé el tallo listo para pasar al último proceso que es pasar por una banda compuesta por una serie de 6 tambores dentados con rombos de cabeza plana (Figura 21) donde consecutivamente se exprime y corta la caña hasta llegar a los últimos tres que saturan la fibra con agua para extraer lo que quede de sacarosa (Figura 22). Finalmente, esta queda con una humedad que ronda entre el 47 y 55% para ser enviado una parte a las calderas para que el sistema siga y otra para ser guardada para la próxima zafra y poder arrancar nuevamente el sistema. Por lo

general sobra mucho de este bagazo y es guardado en bodegas enormes para su posterior uso o ser quemados.

Se tomaron muestra de la parte central de una de las pilas más recientes de BC que se encontraban en bodega

4.2.2 Caracterización de las fibras de caña

Determinación de características físicas del refuerzo fibroso

Dimensiones. La fibra al momento de salir de la línea de producción posee longitudes de 1.0 a 3.0 cm de espesor, generalmente aglomerados en bolos por la alta cantidad de finos, al disgregarse el grosor de las fibras varía entre 1 a 15 mm debido a la irregularidad del corte y prensado (Figura 23). Esto según mediciones realizadas por el laboratorio de la fábrica.



Figura 23 Bagazo de caña seco aglomerado

Densidad. La densidad de la fibra se realizará en el estado actual al cual está la fibra al momento de ser extraída de la bodega de almacenamiento. Siendo la densidad aparente (ρ_b) la siguiente expresión (ecuación 1).

$$\rho_b = \frac{\rho_s * m_a}{m_a - m_s} \quad (1)$$

Donde ρ_b la densidad aparente de la fibra (kg/m^3), ρ_s es la densidad del solvente, m_a la masa de la fibra en el aire y m_s es la masa de la fibra en el solvente.

Como solvente se utilizarán 100 g de agua destilada, posteriormente se introducirán 10 gr de bagazo de caña como la masa de fibra en aire, se deja durante 24 h para su saturación. Una vez pasado el lapso se saca la fibra y se escurre por 1 minuto para ser pesado y se realiza el cálculo.

Contenido de humedad. Para el cálculo de la capacidad de absorción de las partículas expresado en % se realiza con la siguiente ecuación (2).

$$\%h = \left(\frac{Mt - Mi}{Mi} \right) X100 \quad (2)$$

Donde: Mt es la masa final transcurrido 24 h, y Mi es la masa de la muestra inicial.

Se utilizan 20 g de bagazo de caña (Mi). Esta muestra se seca en horno a 100°C dejándose el tiempo necesario hasta su secado total, para comprobar que este seco se utiliza un vidrio cóncavo, colocándose encima y verificando que no se forme condensación o gotas de agua, una vez terminado se registra como Mt . Se hacen mediciones a 24, 36 y 48 h hasta que suceda.

Capacidad de absorción. Es la tasa de saturación de los vacíos en las partículas del material que provee un indicador de la cinética de la absorción del agua en el mismo. Se calcula con la ecuación (3).

$$\%abs = \left(\frac{Mt - Mo}{Mo} \right) X100 \quad (3)$$

Donde: $\%abs$ es la capacidad de absorción (%); Mt es la masa final (g) transcurrido un tiempo definido t (h) y Mo la masa inicial seca (g).

Esto se determina midiendo en periodos de tiempo el aumento de la masa de la fibra. Se utilizan 4 pruebas de 20 g de bagazo de caña (Mo) para posteriormente sumergirse en agua destilada, midiendo su masa en periodos de 15, 30, 60 minutos y en periodos de 2, 4, 6, 12 y 24 h.

Capacidad de desorción. Una vez saturada la fibra de caña se procede a observar el secado de su masa y se calcula con la ecuación (4).

$$De = \left(\frac{(Mt - Ms)}{Ms} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde: *De* es la capacidad de desorción (%); *Mt* es la masa final después del tiempo transcurrido de secado y *Ms* es la masa saturada.

En esta prueba se utilizan 5 porciones de 20 g de bagazo de caña previamente saturada durante 24 h en agua (*Ms*). Se envían todas las muestras a un horno de tiro forzado a 100°C siendo que estas serán sacadas y medidas en periodos cortos de 15, 30 y 60 minutos, para posteriormente ser medidos a 1, 2, 4, 6 12 y 24 h.

4.3 Tratamiento químico de la fibra de caña

4.3.1 Tratamientos químicos para la protección de la fibra

Anteriormente las fibras de origen natural al ser incorporadas en matrices alcalinas como los cementos, se veían afectadas considerables en su composición al sufrir un proceso de degradación producto de la alcalinidad, además de transferirle efectos negativos al concreto o mortero, tales como mal fraguado, generación de poros a largo plazo, reducción de resistencia a causa de la lignina o celulosa, actualmente se tienen algunas opciones para no afectar en la calidad del producto final al momento de incluirse fibras orgánicas en composites o fibrocementos.

Existen una cantidad de variantes para los tratamiento de las fibras como hidróxido de calcio para el prelavado siendo uno de los más comunes, pero que su uso afecta a la resistencia final de las fibras al eliminar el excedente de sus elementos característicos que le proveen resistencia (celulosa y lignina), siendo así algunos otros incluyen nuevamente este compuesto posteriormente en la mezcla (Osorio Saraz, et al., 2007; Nawrath Barros, 2015), por ello se optó por utilizar como

agente protector al Silicato de sodio (Na_2SiO_3), ya que al solo recubrir la fibra y sellar las sustancias químicas de la fibra y al no disminuir sus propiedades se deja intacta su resistencia mecánica convirtiendo a la fibra en un agregado cristalino que le permite una buena adhesión, dispersión y adherencia a mezclas cementiceas, evitando fenómenos como el amontonamiento de fibras, o flotación de fibras hacia la parte superior, además de protegerlo al medio alcalino y al fuego (López Barrios & Valencia Gualdron, 2006).

4.3.2 Silicato de Sodio

Es una solución líquida disuelta en agua manufacturadas a partir de proporciones variadas de **óxido de sodio (Na_2O)** y **óxido de silicio (SiO_2)**. Dependiendo de su composición se maneja un amplio de propiedades físicas y químicas. El silicato de sodio se obtuvo de una bodega especializada en limpieza con las siguientes características en base a los estudios de laboratorio que se proporcionaron por parte del fabricante (Tabla 3).

Tabla 3 Análisis de laboratorio del silicato de sodio a utilizar.

Propiedades del Silicato de sodio	
Relación en peso SiO_2/Na_2O	3.27
% Na_2O en peso	8.82
% SiO_2 en peso	28.84
% sodios totales	37.66
Densidad a 68°F (20°C) *Be	41.00
Densidad a 68°F (20°C) <i>g/cm3</i>	1.38
pH	11.3
Características	Líquido neutro

El silicato de sodio posee en base a la información del fabricante una concentración de 46%, con este valor se procede a utilizar la ecuación (7) derivado de la ecuación (5) con el objetivo de obtener una concentración de 22% a fin de

obtener una composición más fluida para que logre penetrar lo mejor posible a las fibras de FC previamente tamizadas, la dilución se puede lograr con agua destilada según el fabricante.

$$\% v/v = \left(\frac{V_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}} \right) X 100 \quad (5)$$

$$\text{de donde: } \% v/v = \left(\frac{V_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}} + X} \right) X 100 \quad (6)$$

$$X = \left(\frac{V_{\text{soluto}}}{\% v/v / 100} \right) - V_{\text{solución}} \quad (7)$$

Donde: $\% v/v$ es la concentración de la solución (%); V_{soluto} es el volumen de la sustancia disuelta en la solución (ml) y $V_{\text{solución}}$ es la sustancia en volumen la cual está contenido todo el soluto disuelto (ml).

Posteriormente disuelto el silicato con la concentración del 22%, éste podrá ser utilizado momentos antes de añadir el bagazo de caña tamizado a la mezcla de mortero para evitar la degradación y correcta adición dentro de la matriz de la pasta cementicia (Figura 24).



Figura 24 Silicato de sodio preparado con una concentración del 22% .

Antes del tratamiento químico se procede a saturar la fibra en agua durante 24 h, el motivo es que la fibra al momento de someterse al tratamiento tiende a

absorber una alta cantidad de Silicato lo cual causa que al agregarse a la mezcla de mortero el silicato baje la trabajabilidad de la pasta debido a que el compuesto químico absorbe una cantidad de agua significativa, esto en base a observaciones hechas en laboratorio, por ello al someterse a este paso previo, se controlan dos efectos negativos al proveerle el agua necesaria a la fibra para el silicato y que este mismo se quede en el exterior formando un recubrimiento cristalino, reduciendo la cantidad de silicato de sodio necesario para proteger a las fibras.



Figura 25 Fibras de bagazo de caña tratadas con silicato de sodio.

La concentración de 22% p/p (peso del soluto / peso de la disolución), se escoge debido a observaciones de experimentos previos que marcan su uso de entre un 15-17% p/p, pero debido a que estas mismas utilizaron fibras que no contienen azúcares y de que se sometieron a lavados continuos con agua a altas temperaturas se decide escoger aumentar el porcentaje (Juarez Alvarado , 2002), a fin de mejorar la integración, dispersión y evitar problemas de fraguado en el fibrocemento.

4.4 Caracterización de los elementos del mortero

4.4.1 Arena del Río Huajúmbaro

El agregado se obtuvo del banco de material “El Cuervo”, proveniente de una desviación del Río Huajúmbaro ubicado en un meandro a la intemperie, ubicado aproximadamente a 7 km de Huajúmbaro, rumbo a la comunidad de Ziróndaro,

Michoacán (Figura 26). El motivo de la selección de este material procede de investigaciones previas que la clasifican como una arena con una cantidad de 78% de sílice en base a análisis de fluorescencia de rayos X, lo cual le confiere propiedades deseadas para un mortero de buena resistencia (Arreola Sánchez, 2013).

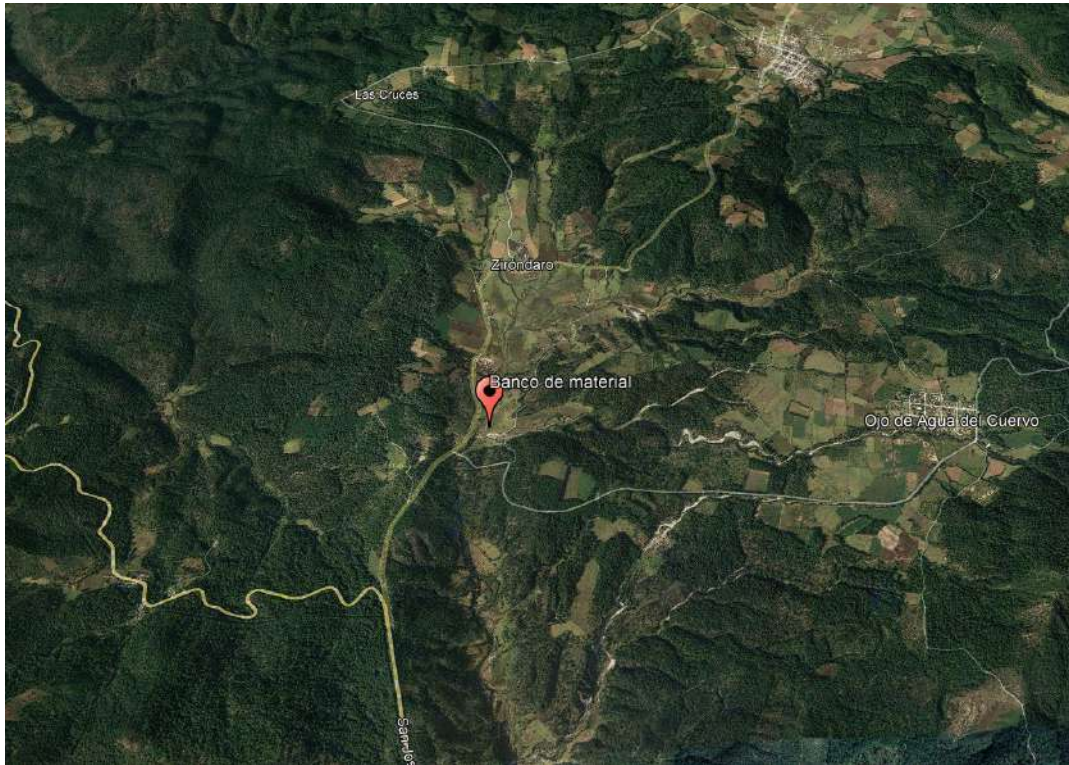


Figura 26 Ubicación del banco de material "El Cuervo".

El material fue recolectado de tres partes diferentes del mismo arroyo, se recolecto en húmedo (Figura 27) y se transportó a Morelia para continuar con pruebas de caracterización en el Laboratorio "Ing. Luis Silva Ruelas" de la U.M.S.N.H., Se procedió a secar la arena a la intemperie y en un horno de tiro forzado (Figura 28) y después se procedió a obtener sus propiedades: granulometría, densidad, absorción, pesos volumétricos con fin de comparar con normativas que aseguren la calidad del agregado y sea adecuado para su utilización en la elaboración de morteros.



Figura 27 Muestreo y extracción en banco de material “El cuervo”.



Figura 28 Secado de arena de río en laboratorio.

4.4.1.1 Procedimientos de extracción y prueba

Al momento de la extracción en el banco de material se siguió la normativa (NMX-C-030-ONNCCE-2004), posteriormente se utilizó la (NMX-C-170-ONNCCE-2019), para realizar la reducción de la muestra de agregado representativas, posteriormente se aplicaron las pruebas pertinentes al agregado que se presentan en la Tabla 4 describiendo las normas, así como los métodos y la cantidad utilizada para llevarse a cabo. Cabe resaltar que se consideró al agregado fino al pétreo que pase por la malla No. 4 que tiene una abertura de 4.75 milímetros.

Tabla 4 Normativas, métodos y cantidades para ensayos.

Ensayo	Método por el cual se redujo la muestra	Cantidad de materia a la cual se redujo la muestra
--------	---	--

Densidad (NMX-C-165-ONNCCE-2020)	Método "A" Mecánico	1000 gramos
Masa volumétrica seca y suelta (NMX-C-073-ONNCCE-2014)	Método "B" Manual	La necesaria para poder realizar el ensayo
Masa volumétrica seca y varillada (NMX-C-073-ONNCCE-2014)	Método "B" Manual	
Módulo de finura (NMX-C-077-ONNCCE-2019)	Método "A" Mecánico	600 gramos
Humedad de absorción (NMX-C-165-ONNCCE-2020)	Método "A" Mecánico	1000 gramos
Análisis granulométrico (NMX-C-077-ONNCCE-2019)	Método "A" Mecánico	600 gramos

4.4.1.2 Prueba de cuarteo

Consiste en la reducción de la muestra de agregados al tamaño a un tamaño requerido, éste el ensaye obtiene una muestra representativa del agregado que sirve para realizar pruebas o ensayos en los cuales los requerimientos de la cantidad de material sean una muestra más pequeña.

Para realizar la reducción del cuarteo, existen dos métodos, se realizaron ambos debido a que cada uno tiene utilidad dependiendo de los ensayos posteriores que se realicen una vez separada la muestra, el procedimiento se describe a continuación.

A. Cuarteo por medios mecánicos

Equipo:

- Cuarteador con al menos 12 conductos para agregado fino.
- Cucharon.

- Pala.
- 3 charolas.

Procedimiento:

1. Colocar el material en dos charolas anchas.
2. Se coloca el cuarteador en el piso, en una zona amplia y libre de obstáculos (Figura 29).
3. Se colocan dos charolas que entren perfectamente por debajo del cuarteador a ambos lados de la caída del vertedor para poder recoger la muestra.
4. Verter el agregado de la charola con un cucharón sobre la parte superior del cuarteador, buscando siempre distribuirla a través de la longitud (Figura 30).
5. Una vez terminado el procedimiento se retira una de las charolas con material, para devolverse al saco o montón de la muestra original.
6. Con la charola restante con material, se repite el mismo procedimiento mencionado en el paso 4 (Figura 31), no sin antes colocar de nuevo dos charolas vacías debajo de los canales de vertido del cuarteador, esto se lleva a cabo las veces necesarias hasta obtener la muestra del tamaño necesario solicitado para el ensayo a realizarse.



Figura 29 Cuarteador colocado en piso para prueba.



Figura 30 Vaciado de arena en cuarteador.



Figura 31 Material vertido a ambos lados del cuarteador y nuevo vaciado del material restante.

B. Cuarteo por medios manuales

Equipo:

- 1 pala punta cuadrada
- 1 escoba

Procedimiento:

1. Se barre el suelo para evitar la contaminación de la muestra y posteriormente se vierte el material extraído en el suelo.

2. Con la pala, se acumula el material hasta darle una forma cónica al montículo, la forma de realizarlo es palear el material uno sobre otro por cuatro sentidos, este procedimiento se repite tres veces.
3. Terminado el paso anterior, se aplanado la parte superior del cono formado utilizando la parte inferior de la pala (Figura 32).
4. Concluido lo anterior, se divide el montículo trazando a centro dos líneas perpendiculares con la pala, buscando que las 4 partes que se forman sean lo más similares posibles entre ellas (Figura 33).
5. Finalmente se eliminan dos de las 4 porciones que estén en diagonal u opuestas, siendo así que el material sobrante es el que se utiliza para realizar las pruebas posteriores (Figura 34). Si alguno de los ensayos requiere muestras más pequeñas se repite nuevamente el mismo procedimiento desechando las porciones opuestas hasta obtener la cantidad de material requerido.



Figura 32 Aplanado de la parte superior del montículo con pala.



Figura 33 Trazado de líneas divisorias en montículo para posterior descarte.



Figura 34 División en 4 partes del montículo, para descartar las diagonales.

4.4.1.3 *Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino.*

Densidad relativa del agregado fino

Esta característica nos permite obtener el volumen real del agregado fino que conforman el espécimen, este valor es un indicador del volumen efectivo del agregado sin tomar en cuenta los vacíos que se forman entre partículas y no toma en cuenta la porosidad de las mismas. El procedimiento para obtener la densidad se describe a continuación.

Equipo necesario:

- 1 muestra representativa del agregado fino de aproximadamente 1000 gramos.
- 2 charolas metálicas.
- 1 espátula.
- 1 parrilla.
- 1 molde tronco cónico.
- 1 pisón.
- 1 frasco de Chapman.
- 1 báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. Mediante el método de cuarteo por medios mecánicos se toma una muestra representativa del agregado de aproximadamente 1000 gramos.
2. Se satura la arena en una charola durante 24 horas.
3. Terminando las 24 horas de saturación, se procede a secar superficialmente la arena, para ello se coloca la arena en la charola sobre la parrilla para eliminar el exceso de agua (Figura 35).
4. Para conocer la condición de que la arena se encuentra saturada y superficialmente seca se coloca el molde tronco cónico dentro de la charola con su boca ancha hacia abajo, después se llena en cuatro capas, repartiendo un total de 25 golpes con el pisón, siendo 10 golpes a la primera capa, 10 golpes en la segunda capa, 3 golpes en la tercera capa y 2 golpes en la cuarta y última capa (Figura 36). Para comprobar que esto suceda se

retira el molde tronco cónico la arena, si esta pierde su forma disgregándose (Figura 37) significa que ya se encuentra en la condición saturada y superficialmente seca y si por el contrario mantiene su forma significa que aún existe un excedente de agua, de ser así se coloca en la parrilla nuevamente.

5. Cuando la arena alcanza la condición saturada superficialmente se pesan 300 gramos del agregado y se registra como masa saturada y superficialmente seca (M_h).
6. A continuación, se llena el frasco de agua (Figura 38) y se registra la masa del mismo como M_i , en gramos.
7. Se retira un poco de agua y se introduce la arena en condición saturada y superficialmente seca, la muestra de 300 gramos, una vez que toda la arena se introduce en el frasco (Figura 39), este se llena de nueva cuenta y esta masa se registró como M_{ii} . (Figura 40).



Figura 35 Secado de arena hasta alcanzar secado superficial.



Figura 36 Apisonado de arena en molde tronco cónico.



Figura 37 Prueba visual de disgregación.



Figura 38 Registro de M_i .



Figura 39 Llenado de recipiente con arena superficialmente seca.



Figura 40 Registro del peso del recipiente más agua y arena, M_{ii} .

Para el cálculo se utiliza la ecuación (8):

$$D = \frac{M_h}{M_i + M_h - M_{ii}} \quad (8)$$

Dónde: D es densidad (gr/cm^3); M_h es masa de la arena en condición saturada y superficialmente seca (g); M_i es masa del frasco lleno de agua y M_{ii} es masa del frasco + agua + arena (g).

Humedad de absorción

Equipo necesario:

- 1000 gramos de muestra representativa del agregado.
- 3 charolas metálicas.
- 2 espátulas.
- 1 parrilla.
- 1 molde tronco cónico.
- 1 pisón.
- 1 báscula con aproximación al décimo de gramo.
- 1 vidrio o cristal de reloj

Procedimiento:

1. Se realiza el procedimiento del ensayo de densidad relativa de agregado fino previamente realizado hasta tener una muestra representativa de arena de 300 gramos en la condición saturada y superficialmente seca (Figura 41).
2. En una charola se coloca la muestra y se pone secar totalmente, para comprobar esto se utiliza un cristal cóncavo, colocándolo sobre la muestra verificando que no se empañe, si el vidrio se empaña significa que debe continuarse secando la muestra hasta que deje de empañarse (Figura 42).
3. Cuando la arena está totalmente seca, se pesa y registra esa nueva masa con el nombre de Ms (Figura 43).



Figura 41 Arena en condición saturada y superficialmente seca. en Figura 42 Prueba de humedad en arena con placa de vidrio. de Figura 43 Registro de masa final M_s .

Para el cálculo de la humedad de absorción se usa la formula (9):

$$A = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad (9)$$

Donde: A es humedad de absorción (%); M_h es masa de la arena en condición saturada y superficialmente seca (g); y M_s masa de la arena sin humedad (g).

Especificaciones (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)

Para la densidad se debe de contar con una aproximación de 0.01 y la absorción de 0.1% y cuando el tiempo de inmersión en agua sea distinto de 24 h \pm 4 h debe de indicarse

4.4.1.4 Determinación de la masa volumétrica de los agregados

La masa volumétrica de los agregados nos indica la cantidad de masa que hay en una unidad de volumen. Considerando que dos clasificaciones: Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) que se caracteriza por el acomodo de partículas libres sin un acomodo o varillado y Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV), la cual tiene un cierto grado de compactación en este caso se logra por medio de una

varilla lisa con punta de bala que facilita el acomodo de las partículas. Este ensayo, en específico el MVSV tiene una correlación directa con el índice de calidad del agregado puesto que a mayor sea el resultado mejor granulometría presentará e agregado.

Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS)

Equipo:

- 1.5 veces una muestra de arena que sea la capacidad del recipiente a utilizar.
- 1 recipiente con masa y volumen conocido.
- 1 varilla lisa de 5/8 punta de bala.
- 1 báscula digital o bascula mecánica.
- 1 pala de punta cuadrada.
- 1 cucharón.

Procedimiento:

1. La muestra de arena se reduce para el ensayo mediante el procedimiento explicado en 4.4.1.2 por el método de cuarteo manual (Figura 44).
2. Cuando se tengan las 4 partes de un tamaño similar, se coloca el recipiente en la intersección de las divisiones del montículo.
3. Se seleccionan dos partes opuestas, tomando las muestras con ayuda del cucharón llenando con arena el recipiente, dejando caer el agregado con una altura de ± 5 centímetros de la boca del recipiente (Figura 45).
4. Se llena el recipiente un poco más por encima de la boca del recipiente buscando una distribución uniforme del agregado.
5. Con la varilla lisa se enrasa el recipiente (Figura 46), terminado lo anterior se procede a limpiar las caras laterales y cantos del recipiente para evitar una alteración del resultado por partículas adheridas en su exterior, finalmente se el recipiente con arena y se registra éste restándole la masa conocida del recipiente y se anota como masa (M).



Figura 44 Cuarteo de arena por método manual.



Figura 45 Llenado del recipiente con masa y volumen conocido.



Figura 46 Enrase con varilla punta de bala del recipiente.

Masa Volumétrica seca y Varillada (MVSV)

Equipo:

- 1.5 veces una muestra de arena que sea la capacidad del recipiente a utilizar.
- 1 recipiente con masa y volumen conocido.
- 1 varilla de 5/8 lisa punta de bala.
- 1 balanza o báscula.
- 1 pala punta cuadrada.
- 1 cucharón.

Procedimiento:

1. La muestra de arena se reduce para el ensayo mediante el procedimiento explicado en 4.4.1.2 por el método de cuarteo manual.
2. Cuando se tengan las 4 partes de un tamaño similar, se coloca el recipiente en la intersección de las divisiones del montículo.
3. Se seleccionan dos partes opuestas, tomando las muestras con ayuda del cucharón llenando con arena el recipiente, dejando caer el agregado a una

altura de aproximadamente 5 centímetros de la boca del recipiente (Figura 47).

4. El recipiente es llenado en 3 capas, por cada una de ellas se le dan 25 golpes con la varilla punta de bala, teniendo cuidado que la varilla no traspase la capa anterior y distribuyéndolos en toda la superficie del recipiente (Figura 48).
5. Se llena el recipiente por encima del recipiente buscando una distribución uniforme del agregado, después con la varilla se enrasa el recipiente (Figura 49) y una vez que se retira el mismo se limpian sus caras externas para no se alterar el resultado por las partículas adheridas al exterior, después se procede a pesar el recipiente y se registra este restándole la masa conocida del recipiente y se anota como masa (M).



Figura 47 Se vacía el material de esquinas opuestas dejando caer a 5 cm la arena.



Figura 48 Varillado entre capas con un total de 25 por cada una.



Figura 49 Se enrasa con la varilla punta de bala el material.

Cálculos

Los cálculos para MVSS y MVSV se indican en las siguientes ecuaciones (10) y (11).

$$MVSS = \frac{M}{V} \quad (10)$$

$$MVSV = \frac{M}{V} \quad (11)$$

Dónde: *MVSS* es la Masa volumétrica seca y suelta (g/cm^3); *MVSV* es la Masa volumétrica seca y varillada (g/cm^3); *M* la masa del recipiente con el agregado menos la masa conocida del recipiente (g) y *V* el volumen conocido del recipiente (cm^3).

Especificaciones

Los resultados de ambas pruebas deben tener una aproximación a la unidad y deben ser reportados en kg/m^3 . El sitio de prueba debe estar totalmente cubierto del aire y sol para evitar alteraciones de la prueba, utilizando un entorno estable y favorable (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

4.4.1.5 Análisis granulométrico de agregado fino

Esta prueba ayuda a definir las distribuciones de los diámetros de partícula y el módulo de finura. Utilizando el método de análisis granulométrico, el cual consiste en tamizar por una serie de mallas una muestra representativa del agregado, en este caso la arena.

Equipo:

- 1 juego de mallas del No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200, una charola de fondo y una tapa.
- 1 balanza o báscula.
- Charolas y espátulas.
- 1 cepillo de cerdas de alambre.
- 1 hoja de papel.
- 1 máquina agitadora para cribado.

Procedimiento:

1. La muestra de arena se reduce para el ensayo mediante el procedimiento explicado en 4.4.1.2 por el método de cuarteo mecánico.
2. Se toma una muestra representativa de aproximadamente 600 gramos (Figura 50).
3. Las mallas se preparan en orden decreciente, asegurándonos de que encajen adecuadamente unas con otras y se colocan en la máquina agitadora de tamices (Figura 51).
4. Se programa la máquina agitadora para un tiempo de aproximadamente 10 minutos.
5. Una vez que concluya el tiempo, se retiran los tamices y en la mesa se marcan las hojas con el número de malla para colocar en ellas el retenido que queda en dicha malla.
6. Con precaución se debe ir retirando tamiz por tamiz y posteriormente limpiar de forma minuciosa posible con ayuda de los cepillos de cerdas y alambres para evitar la pérdida de partículas.
7. Se procede a pesar el material retenido (Figura 52) que fue colocado en las hojas correspondientes en cada malla (Figura 53) y se registra el valor individual del agregado fino retenido.
8. La muestra representativa debe reincorporarse y almacenarse en caso de que sea requerida posteriormente.



Figura 50 Muestra representativa para análisis granulométrico.



Figura 51 Tamices ordenados y colocados en el agitador para prueba.



Figura 52 Pesado de material de cada una de las mallas retenidas.



Figura 53 Distribución de partículas según lo retenido en los tamices.

Cálculos

Se utilizan la siguiente expresión para obtener la granulometría indicada en la ecuación (12:

$$\%Retenido = \frac{M_{Rn}}{M_T} \quad (12)$$

Dónde: %*Retenido* es la cantidad de material que se queda en un tamiz; M_{Rn} es la masa retenida en la malla “n” (*g*) y M_T es la masa total de la muestra (*g*).

Se calculan los porcentajes basándose en la masa total de la muestra incluyendo el material que paso la criba No. 0.075 (200).

Especificaciones

Las cribas a utilizar deben de cumplir con lo establecido en la (NOM-B-231, 1990).

La muestra para la prueba de agregado fino se debe de secar a horno y debe tener una masa aproximada a las cantidades que se muestran a continuación (NMX-C-077, 1997):

- Agregados que tienen por lo menos el 95% que pase la criba No. 8 a 100 gramos
- Agregados que tienes por lo menos 85% que pase la criba No, 4 y retiene más del 5% en la criba No. 8 a 500 gramos.

4.4.2 Cemento Hidráulico

La investigación utilizó cemento Portland CPC 30 RS como único ligante cementicio para la elaboración de los paneles de fibrocemento. este confiere un fraguado rápido y resistencia a edades tempranas que facilitan pruebas en periodos de 7 días de forma representativa.

4.4.2.1 *Cemento Portland*

Para el cemento utilizado se utilizarán los siguientes ensayos de control.

Tabla 5 Normativas para características del cemento hidráulico.

Ensayo de laboratorio	Normativa para el ensayo
-----------------------	--------------------------

Determinación de la consistencia normal empleando el aparato Vicat.	NMX-C-057- ONNCCE-2015.
Determinación del tiempo de fraguado para pastas de cementantes hidráulicos.	NMX-C-059- ONNCCE-2017.
Determinación de densidad de pasta cementicia.	NMX-C-152- ONNCCE-2015.

4.4.2.1.1 Determinación de consistencia normal

Equipo:

- 600 g de cemento.
- 600 g de agua
- 1 balanza digital.
- 1 recipiente liso para elaborar la mezcla.
- 1 aparato de Vicat.
- 1 cristal liso.
- 1 probeta.
- Pesas para realizar la prueba.
- 1 cronómetro.
- 1 espátula.
- 1 par de guantes de hule.

Procedimiento:

1. Se vierten 600 gramos de cemento en el recipiente para mezcla formando un pequeño cráter con el cemento.
2. Se fija una cantidad de 600 g de agua en porcentaje respecto al peso del cemento.
3. Se vierte en el cráter del montículo el agua formado anteriormente (Figura 54), posteriormente se inicia el conteo del cronómetro.

4. En 30 segundos, se mueve el material de las orillas hacia al centro buscando que todo el cemento se humedezca de forma homogénea.
5. Se reposa la mezcla durante 30 segundos para facilitar la penetración del agua en toda la mezcla.
6. Se amasa la pasta con los guantes humedecidos durante 1 minuto y 30 segundos (Figura 55). En los siguientes 30 segundos, se mezcla la masa golpeándola con la mano hasta lograr que sea homogénea. En los subsiguientes 30 segundos se hace una esfera con la mezcla y se arroja de una mano a la otra a una distancia de aproximadamente 15 centímetros (Figura 56), realizándose un total de 6 veces. Acabado el tiempo se deja reposar 30 segundos sobre una mano.
7. Se coloca la pasta dentro de la boca ancha del anillo del aparato de Vicat mientras la boca de menor diámetro se apoya sobre el cristal liso.
8. Se retira el exceso que sobresale de la boca ancha del anillo.
9. Se coloca la boca ancha sobre el cristal y se enrasa (Figura 57).
10. Se ajusta el aparato de Vicat y se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta, pasados 30 segundos se toma la lectura de penetración de la aguja. (Figura 58).



Figura 54 Cráter formado con cemento siendo hidratado.



Figura 55 Amasado de la pasta cementicia.



Figura 56 Movimiento de pasta entre manos.



Figura 57 Pasta colocada en molde, enrasado.



Figura 58 Colocación de pasta, en el aparato Vicat.



Figura 59 Penetración de aguja Vicat después de 30 segundos.

Especificaciones

La prueba se realizó con un mismo operador y el mismo equipo de laboratorio, resultando una desviación estándar de 0.24; la desviación estándar

entre laboratorios ha sido encontrada de 0.35%. Por ello ambos resultados son ejecutados de manera adecuada siendo que los resultados no deben de diferir en más del 0.7% (NMX-C-057-ONNCCE-2015).

4.4.2.1.2 Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos

Equipo:

- 600 g de cemento.
- 600 g de agua.
- 1 bascula digital.
- 1 recipiente para elaborar la mezcla.
- 1 aparato de Vicat
- 1 cristal liso.
- 1 probeta.
- Pesas para realizar la prueba.
- 1 cronómetro.
- 1 espátula.
- 1 par de guantes de hule.

Procedimiento:

1. Se pesan 600 gramos de cemento y se vierten en el recipiente formando un pequeño cráter con el cemento.
2. Se fija una cantidad de agua en porcentaje respecto al peso del cemento (600 gramos).
3. Se mide el agua en la probeta y se vierte en el cráter formado anteriormente, iniciando el conteo de un cronómetro al momento del contacto del agua con el cemento.
4. En 30 segundos, se lleva el material de las orillas al centro del cráter buscando que todo el cemento se humedezca.
5. En los siguientes 30 segundos se dejó reposar la mezcla sobre el recipiente para que la humedad pueda homogeneizar toda la mezcla (Figura 60).

6. Con los guantes se hace el amasado de la pasta durante 1 minuto y 30 segundos. En los primeros 30 segundos, se mezcla la masa golpeándola con la mano hasta lograr una consistencia homogénea. En los siguientes 30 segundos se moldea hasta formar una esfera con la mezcla y se debe lanzar de una mano a la otra a una distancia de aproximadamente 15 centímetros, esto se realiza un total de 6 veces. En los últimos 30 segundos, se deja reposar la mezcla sobre una mano.
7. Se introduce la pasta en la boca ancha del anillo del aparato de Vicat mientras la boca menos ancha se apoya sobre el cristal liso.
8. Se retira el exceso que sobresale de la boca ancha del anillo.
9. Se coloca la boca ancha sobre el cristal y se enrasa.
10. Se coloca la muestra en el cuarto húmedo durante 30 minutos (Figura 61), transcurrido el tiempo se toma la medida de la penetración de la aguja con el aparato de Vicat.
11. Después de esa medición se toman lecturas cada 15 minutos hasta que se obtiene una penetración igual o menor a 25 mm.
12. Se hacen las penetraciones en la pasta hasta que la aguja hasta que ya no marque un número al efectuar la penetración (Figura 62).



Figura 60 Preparación de la mezcla en molde.



Figura 61 Colocación de la pasta en cuarto húmedo.



Figura 62 Medición de fraguado final.

Especificaciones

Las penetraciones deberán efectuarse a una distancia que no sea menor a 6 mm entre ellas, además ninguna se hace a una distancia menor de 9 mm de la parte interior del cono troncocónico. Cada lectura de penetración deberá ser anotada (NMX-C-059-ONNCCE-2017).

4.4.2.1.3 Determinación de densidad

La densidad del cemento portland es una característica física que es útil en la elaboración de proporcionamiento.

Equipo:

- 1 frasco de LeChatelier.
- 1 bascula digital.
- 2 ml de petróleo.
- Recipiente con agua.
- 1 embudo de cristal.
- 1 muestra de 60 gramos de cemento.

Procedimiento:

1. Se vierte petróleo en el frasco de LeChatelier, hasta un nivel entre las marcas de 0 y 1 mililitro.
2. Se sumerge el frasco y se gira para que el aire salga de él (Figura 63).
3. Se deja sumergido en el agua para que la temperatura del petróleo se normalice.
4. Pasado un tiempo, se toma la lectura del petróleo y se registra como Li.
5. Se pesan aproximadamente 60 gramos de cemento hidráulico.
6. Con ayuda del embudo, se debe introducir lentamente el cemento cuidando que no se obstruya el frasco (Figura 64).
7. Se tapa el frasco y se gira horizontalmente para sacar el aire que queda atrapado entre el cemento.

8. Se deja estabilizar la temperatura del frasco sumergiéndolo en agua y se toma la lectura, la lectura se toma en la parte inferior del menisco que se forma en la circunferencia del frasco. La lectura se registra como L_f (Figura 65).



Figura 63 Frasco sumergido y siendo girado para liberar aire



Figura 64 Introducción del cemento por medio de embudo.



Figura 65 Toma del valor que se encuentra por debajo del menisco.

Cálculo

$$\rho = \frac{\text{Masa del cemento en gramos}}{L_f - L_i} \quad (13)$$

Dónde: ρ es la densidad (g/cm^3); L_i como lectura inicial del reactivo (ml); L_f Lectura final agregado el cemento (ml).

Especificaciones

Al realizar las pruebas con el mismo operador se encuentra que la desviación estándar de ambas pruebas es de $0.013 g/cm^3$ significan que son correctas, ambas

pruebas se realizaron en las mismas condiciones y en el mismo laboratorio, la norma para este tipo de prueba marca que al realizar la prueba sobre una misma muestra el resultado no deba tener una desviación estándar mayor al 0.03 g/cm^3 (NMX-C-152-ONNCCE, 2015).

4.4.3 Agua

La normativa marca que la calidad del agua para elaborar morteros debe de someterse a análisis de laboratorio, para ello se hizo uso de del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Los resultados se muestran en el capítulo 5.1.4 de resultados en la Tabla 15.

4.5 Diseño de la mezcla de mortero

El proporcionamiento del diseño de la mezcla se basa en resultados previos que se realizaron con la arena mencionada en el apartado 4.4.1, cabe resaltar que las pruebas fueron elaboradas en colaboración con otra investigación cuyo objetivo fue la caracterización físico-mecánica para mortero estructural con diferentes agregados pétreos que se han analizado anteriormente con resultados favorables, de las cual figura la arena seleccionada (Mondragón Martínez, 2021).

4.5.1 Dosificación del mortero por volumen

Estos ensayos se realizaron bajo los límites y recomendaciones de proporcionamiento que maneja la (N-CMT-2-01-004/02, 2002), la cual contiene los requisitos de calidad para morteros de albañilería, para juntas, nivelación, firmes, entre otros, siendo que se utiliza de entre toda las clasificaciones las pruebas obtenidas de la serie de mortero Tipo I, utilizando únicamente cemento portland y arena (Tabla 6), utilizando el que posea mejor resistencia a la compresión que resulte de ensayar cubos con dimensiones de 5 cm a 28 días en base a la (NMX-C-486-ONNCCE, 2014).

Tabla 6 Tipos de morteros y sus proporciones por volumen en estado seco y suelto (N-CMT-2-01-004/02, 2002).

Tipo	Partes de cemento Pórtland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena
I	1	0	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a ½	0	
II	1	0	¼ a ½	
	1	½ a 1	0	
III	1	0	½ a 1 ¼	

4.5.2 Ensayo de fluidez

Consiste en determinar la fluidez del mortero, la cual es una medida de la consistencia del mortero fresco. La lectura se toma como porcentaje del diámetro del mortero dispersado respecto al original probado en una mesa de fluidez (NMX-C-486-ONNCCE, 2014).

De esta forma el ensayo debe de limitarse en utilizar la cantidad de agua mínima que permita que la mezcla sea lo suficientemente fluida para ser trabajada sin que presente segregación o sangrado del mismo, desde la mezcla de todos los elementos que lo componen hasta cuando se coloque sobre superficie en la cual se aplicará.

Los límites aceptados para la fluidez se delimita en tres: de 105 a 130% para morteros para pegar piezas y 125 a 130% para mortero de relleno.

Equipo:

- 1 mesa de fluidez.

- 1 cuchara de albañil.
- 1 molde para fluidez.
- 1 franela.
- 1 pisón.
- 1 regla para fluidez

Procedimiento:

1. Se realiza una mezcla de mortero (Figura 66), siguiendo la norma (NMX-C-085-ONNCCE, 2015), se prepara la mesa de fluidez, limpiando la parte superior del platillo, secándola y por último se pone el molde en el centro de la mesa.
2. Se llena el molde en dos capas, de aproximadamente 25 mm cada una, al término de la primera se deben dar 25 golpes con el pisón, al final del llenado se vuelven a dar 25 golpes nuevamente (Figura 67).
3. Se enrasa el molde con una espátula (Figura 68).
4. El llenado del cono en capas debe de transcurrir en un minuto, luego del minuto, posteriormente se retira el molde y se deja caer el plato de la mesa de fluidez un total de 25 veces en un tiempo de 15 segundos (Figura 69) a velocidad constante.
5. Terminado los golpes, se mide el diámetro formado por la mezcla de mortero en 4 direcciones, cada una debe ser a 45°(Figura 70).
6. Se repite el proceso nuevamente haciendo los cambios pertinentes en la mezcla de mortero hasta que el mortero obtenga el valor mínimo de fluidez necesario.



Figura 66 Mezclado mecánico del mortero.



Figura 67 Apisonado de la primera capa.



Figura 68 Enrasado del mortero.



Figura 69 Mortero listo para la prueba de los 25 golpes.



Figura 70 Medición del diámetro extendido de la mezcla de mortero.

Cálculo

Para obtener la medición se suman las cuatro mediciones de los diámetros del mortero extendido al momento de concluir el ensayo.

Especificaciones

La mesa de fluidez debe de cumplir los requisitos establecidos en la norma (NMX-C-144-ONNCCE, 2015).

4.5.3 Ensayo a compresión simple

4.5.3.1 *Elaboración de especímenes*

Se elaboraron especímenes cúbicos de 5 centímetros de arista de las mezclas realizadas una vez que alcanzaron la fluidez especificada en las normas, un mínimo de 105% y un máximo de 130%.

Equipo:

- 2 moldes cúbicos de 5 centímetros de arista.
- 1 pisón de hule sintético con caras planas
- 1 cuchara de albañil.
- 1 par de guantes de hule.

Procedimiento:

1. Se preparan los moldes, se engrasan en todas sus caras y aristas.
2. Una vez que la mezcla cumplió con la fluidez, descrita en el anterior ensayo, se inicia el vaciado de la mezcla en los moldes.
3. Se cuegan 6 especímenes cúbicos, primero se llenan a la mitad, aproximadamente 25 milímetros, posteriormente se apisonan 32 veces en 4 vueltas. Cada vuelta se inicia a 90° de la vuelta anterior (Figura 71)
4. Se procede a llenar la segunda capa siguiendo el procedimiento descrito en el paso anterior y, al terminar de dar los 32 golpes con el pisón, se enrasa con la cuchara de albañil (Figura 72).
5. El llenado, apisonado y enrasado de los cubos se realiza con guantes de hule en todo momento para evitar restarle o agregarle humedad a la mezcla de mortero.



Figura 71 Apisonado de los especímenes



Figura 72 Especímenes fraguando.

Especificaciones

Para la elaboración de los especímenes cúbicos se debe utilizar un metal cuya dureza no sea menor a B-55 de la escala de Rockwell. Estos mismos deben de poseer dimensiones cúbicas de 50 mm por lados y no tener más de 3 conjuntos por cada molde. La preparación de los especímenes se debe terminar en un tiempo de 2 minutos y 30 segundos una vez hecha la mezcla de mortero (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

4.5.3.2 Ensayo de compresión

Característica físico-mecánica principal del concreto en este caso del mortero, esta propiedad se entiende como la capacidad de soportar una carga (kg) por unidad de área (cm^2) y se expresa en unidades de esfuerzo, tales kg/cm^2 , MPa o psi .

Equipo:

- Se ajusta con aditamentos para que el cubo quede cerca de la platina de la prensa con ayuda de columna de acero, se centra el cubo.

- Se aplica una carga constante con la prensa hidráulica hasta llegar a su carga máxima o de falla (Ilustración 74).
- Se registra la carga máxima que arroje la computadora.



Figura 73 Colocación del espécimen cubico en prensa hidráulica.



Figura 74 Aplicación de carga al espécimen cubico.



Figura 75 Falla del espécimen cubico.

Cálculo

$$f_j = \frac{C_{m\acute{a}x}}{A} \quad (14)$$

Dónde: f_j es la resistencia a la compresión simple (kg/cm^2); $C_{m\acute{a}x}$ la carga máxima aplicada al momento de la falla del espécimen (kg) y A como el área de la sección transversal del espécimen (cm^2).

Especificaciones

Al calcular la resistencia a compresión, generalmente puede considerarse el área de la sección transversal del espécimen de $25\ cm^2$, sin embargo, en los casos en que el área del espécimen varíe en más de $0.3\ cm^2$ con relación al área de $25\ cm^2$ se debe usar el área real. La resistencia a la compresión de todos los especímenes hechos de la misma muestra y ensayados a la misma edad se obtiene promediando los resultados (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

4.6 Diseño del panel de fibrocemento

4.6.1 Dimensionamiento del panel

Previamente se define el dimensionamiento de los especímenes en base a la normativa para placas de fibrocementos (NMX-C-234-ONNCCE, 2015) que marca a los especímenes de prueba de 25.0 x 25.0 cm, siendo la única variable a establecer el espesor, para ello se realizaron tres grupos de prueba con 1.0, 2.0 y 3.0 cm (Figura 76 y Figura 77) utilizando solamente la mezcla de mortero cuyas proporciones obtuvieron el mejor resultado del apartado 4.5. Se escoge el más óptimo basado en los resultados del módulo de ruptura y que resulte ser mayor a lo establecido en la norma de fibrocementos (Figura 78).



Figura 76 Especímenes de prueba para definir testigo de 3, 2 y 1 cm.

La adición de fibras reduce la resistencia mecánica de acuerdo a la cantidad adicionada, de ahí que se opte por tener un testigo de arranque con el espesor

necesario que este por encima del valor mínimo requerido para comparar cuanto mejora la resistencia o la empeora dependiendo de la concentración de fibras.



Figura 77. Paneles descimbrados de 3.0, 2.0 y 1.0 cm.



Figura 78 Prueba de Módulo de ruptura en cada grupo de prueba.

Finalmente, los paneles fabricados manejarán dimensiones de 25.0 x 25.0 x 1.0 cm.

4.6.2 Dosificación del panel

La dosificación se divide en cuatro grupos de prueba, los cuales se conforman por un testigo sin adición de fibra y otros tres grupos con 3.0, 6.0 y 12.0% de FC adicionada respecto al peso seco del cemento de bagazo de caña previamente tratada. Se muestra la Tabla 7 así como sus etiquetas para distinguir entre cada grupo de prueba y con las dosificaciones para poder elaborar un panel de fibrocemento con las dimensiones mencionadas en 4.6.1

Tabla 7 Dosificación del grupo de prueba para producir un panel de fibrocemento.

Componentes	Testigo	PFC3%	PFC6%	PFC12%
Cemento portland (g)	357	348	338	316
Arena (g)	892	870	845	790
Agua (ml)	321	330.6	321	300

Fibra de caña (g)	0	10.44	20.28	37.92
-------------------	---	-------	-------	-------

Recapitulando se hace una síntesis de los elementos que componen al fibrocemento, describiendo su origen y procesado.

Se utilizó bagazo de caña seco con una humedad relativa del 11.7% proveniente del ingenio azucarero Lázaro Cárdenas en Taretan, Michoacán; éste fue procesado en la misma para usarse como combustible de calderas; una serie de rodillos y maquinaria la exprime desmedula y tritura cinco veces hasta dejar una fibra con poca azúcar y con longitudes de 1.0 a 3.0 cm y espesores de 1 a 15 mm, además de contener una alta cantidad de finos. Para no afectar el fraguado y la disminución de resistencia del mortero, la fibra se tamizo con una malla ASTM N° 4 para eliminar bolos y fragmentos dispersos al azar en el bagazo, la fibra utilizada para la experimentación fue la retenida por la malla ASTM N° 8 con el fin de eliminar la alta cantidad de finos (Figura 79). La fibra fue lavada con agua a temperatura ambiente, siendo sumergido durante 24 h para seguidamente enjuagarse, ser exprimidas manualmente y dejarse secando (Figura 80), finalmente para utilizarse en la mezcla, se deja saturando en agua nuevamente un día previo a realizarse la mezcla por el mismo periodo de tiempo (Figura 81), el día del colado del espécimen se escurre 3 minutos y se sumerge en silicato de sodio para después drenarse y agregarse al mortero.



Para que el Fibra de caña no se degrade en el medio alcalino al momento de integrarse a la matriz del cemento se impregna previamente con silicato de sodio 20° Be con una concentración de 22% p/p, se empleó un rango mayor a otras investigaciones cuyos valores rondaban entre 15-17% p/p, debido a que no se utilizó un enjuague previo de fibras con agua o sustancias químicas.

El aglomerante es un mortero tipo I basado en la (NMX-C-486-ONNCCE-2014) con una dosificación cemento/arena de 1:2.5 en masa respecto a pruebas anteriores que muestra una mejor resistencia con la arena utilizada en este proyecto (Mondragón Martínez, 2021); para que la fluidez permitiera manejar la mezcla sin salirse de la normativa se utilizó una relación agua/cemento en volumen de 0.95 la cual permitió un valor de 130% en la mesa de fluidez, ésta misma se utilizó en todos los grupos de prueba para mantener una consistencia ideal para trabajar la mezcla con FC mineralizada.

4.6.3 Proceso de fabricación

4.6.3.1 Mezclado

El mezclado de los componentes que conforman el compuesto se realizó con una pala mezcladora utilizando como recipiente una cubeta de 19 L como se muestra en la Figura 3, siguiendo la siguiente secuencia:

1. Cemento + Arena – se mezcla 30 segundos manualmente con cuchara hasta que sea homogénea la composición (Figura 82).
2. Adición de Agua – 30 segundos a velocidad media con la mezcladora con movimientos circulares.
3. Adición de fibra de FC tratada – 30 segundos a velocidad media con el mismo movimiento, pero con un movimiento ascendente y descendente (Figura 83).
4. 20 segundos de velocidad rápida con el mismo movimiento.
5. Se verifica la consistencia, asegurándose que no existan cúmulos de fibra, si los hay repetir se repite el paso 4.



Figura 82 Homogenización a mano.



Figura 83 Utilización de mezcladora eléctrica para adición de FC.

4.6.3.2 Colado

Las probetas se vertieron en moldes metálicos desarmables previamente engrasados (Figura 84), los cuales después de llenarse con la mezcla se compactan mediante vibración por impacto de forma manual, dejándolo caer a una altura aproximada de 10 cm, 15 veces por lado (60 golpes en total), después se enrasó el excedente de mortero con el canto de una regla que se trasladó en el sentido longitudinal y transversal, el movimiento es de forma lenta por el molde en sentido longitudinal, pero con un movimiento transversal rápido a forma de vibración para evitar arrancar pedazos de mezcla y fibra (Figura 85), a continuación se apisono con un prisma de acrílico de forma paralela por los cuatro lados del molde (Figura 86) y se procede de nuevo a vibrar los moldes, finalmente se pasa nuevamente la regla con el mismo procedimiento para eliminar excedentes posteriormente se deja fraguar al panel (Figura 87).



Figura 84 Engrasado de moldes.



Figura 85 Eliminación de excedentes con regla.



Figura 86 Apisonado con prisma acrílico.



Figura 87 Panel terminado fraguando.

4.6.3.3 Curado

Se desmoldan los especímenes pasadas 24 h y se humedecen superficialmente con un aspersor para posteriormente dejarse dentro de un recipiente sellado a fin de mantener condiciones de humedad y temperatura favorables para su curado. Los ensayos se realizaron a los 7 y a los 28 días de curado momento en el cual se procede a sacar los especímenes, estos se deben dejar secar un día antes de la prueba en condiciones ambiente (Figura 88).



Figura 88. Colocación de paneles en recipiente hermético para curado a 7 y 28 días.

4.7 Pruebas físico-mecánicas del panel de FC

4.7.1 Módulo de ruptura

El Módulo de Ruptura (MOR) se define como la carga máxima por unidad de área de la sección transversal a la falla, bajo condiciones de carga de flexión, de ahí que la prueba tenga utilidad en este tipo de elementos reforzados con fibra, para registrar cuanto resisten los fibrocementos a flexión.

Posteriormente una vez curados los especímenes se hacen pruebas para obtener el módulo de ruptura (MOR) a cinco placas en una máquina universal marca Forney, con una aceleración constante de 0.30 t/min apoyados sobre dos varillas lisas con un diámetro de 20 mm y una separación entre ellas de 200 mm para cada uno de los cuatro grupos de prueba en sentido transversal y longitudinal (Figura 6), promediando los valores y realizando la prueba en un tiempo de 30 segundos aproximadamente, anotando la carga máxima cuando se registra la ruptura, todo en base a lo marcado por la norma y utilizando la ecuación (15).

$$MOR = \frac{eFl_s}{2be^2} \quad (15)$$

Dónde: MOR es el Módulo de ruptura (σ) F es la carga de ruptura (N); l_s es la distancia entre las líneas centrales de los soportes (mm); b es el ancho del espécimen de ensayo (mm) y e es el espesor donde pasa la falla (mm).

Equipo:

- Medidor de espesor, con capacidad de lectura de por lo menos 0,1 mm, con mordazas planas paralelas, de entre 10 mm y 15 mm de diámetro.
- Una máquina para ensayos de flexión con una velocidad constante de deformación cuando se aplique la carga (cuando este equipo no esté disponible, una velocidad constante de carga es aceptada), con un error de precisión y un error de reproducibilidad igual al 3 %.
- Dos soportes paralelos, la distancia entre soportes a , es función del espesor del espécimen de ensayo. Las caras superiores de los soportes pueden ser redondeadas y tener un radio r , entre 3 mm (mínimo) y 25 mm (máximo).
- Una barra de carga con el mismo radio que los soportes debe situarse sobre el espécimen de tal manera que sea paralela a los soportes y a la misma distancia de cada uno. La barra de carga debe estar unida al mecanismo de carga por una conexión flexible. Las longitudes de los soportes y de la barra de carga deben ser mayores que el ancho del espécimen.

Procedimiento

1. Ajustar los soportes para tener la separación apropiada para el espécimen de 200 mm (Figura 89).
2. Colocar la pieza con la cara inferior sobre los soportes y la barra de carga sobre la cara superior equidistante y paralela a los soportes (Figura 91).

3. Cargar el espécimen de tal manera que la carga máxima ocurra entre 10 s y 30 s. Es preferible una tasa constante de deflexión, pero cuando esta opción no está disponible, se puede aceptar una velocidad constante de carga. Anotar la carga de ruptura (Figura 92).
4. Medir el espesor de la placa a lo largo de la línea de ruptura (Figura 85 y Figura 94). Al ser una placa con textura se debe medir en cuatro puntos.
5. Para especímenes de ensayo cuadrados, re-ensamblar las piezas quebradas y someter los especímenes de ensayo a un segundo ensayo de flexión con la línea de aplicación de la carga en ángulo recto con respecto a la posición usada para el primer ensayo. Anotar la carga de máxima y medir el espesor de la línea de falla de nuevo en 4 puntos (Figura 93).

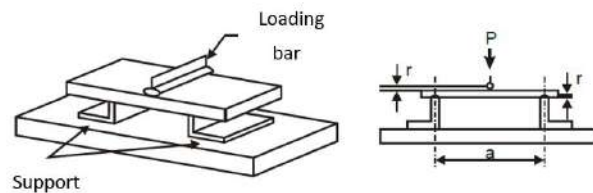


Figura 89 Aditamento para prueba a flexión (NMX-C-234-ONNCCE, 2015).

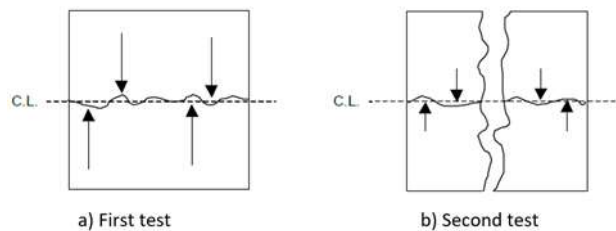


Figura 90 Mediciones de espesores en especímenes (NMX-C-234-ONNCCE, 2015).



Figura 91 Acomodo de apoyos y aditamentos prueba de MOR.



Figura 92 Prueba de Módulo de ruptura en placas.

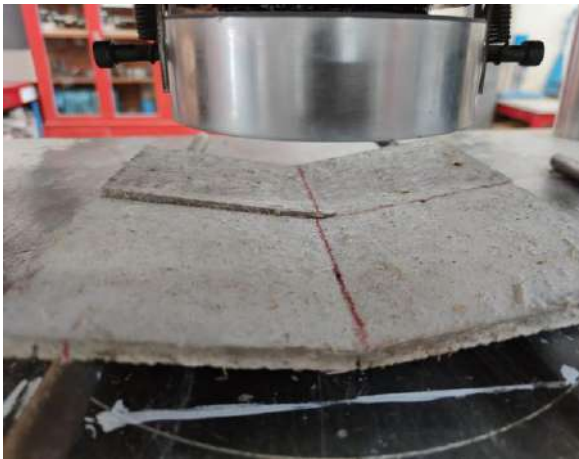


Figura 93 Placa fallada en ambos sentidos perpendiculares.



Figura 94 Medición del espesor por la línea de falla.

4.7.2 Módulo de elasticidad estático

Conocido también como el módulo de elasticidad estático secante, es definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial, estando sometida al esfuerzo de compresión dentro del comportamiento elástico. Siendo la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, acotada dentro de la zona elástica (NMX-C-128-ONNCCE, 2013).

Equipo:

- Máquina de prueba Universal Forney.
- Deformímetro (dos anillos y un micrómetro).
- Medidor de deformación transversal.

Especímenes

Los especímenes son cilindros de 10.0 cm de diámetro y 20.0 cm de alto, fabricados y curados conforme al procedimientos marcados por la (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).

Procedimiento

1. Se prepara un molde para vaciar una base de azufre en ambas caras planas para los cuatro especímenes de prueba para evitar irregularidades en el área de contacto (Figura 95, Figura 96 y Figura 97).
2. Realizar una prueba de compresión simple en uno de los cuatro especímenes hasta la falla del mismo para registrarlo y posteriormente utilizarlo para el cálculo de S_2 (Figura 98 y Figura 99).
3. Colocar el espécimen en una superficie plana y estable, montar el dispositivo de medición exactamente al centro de los Anillos fijándolos firmemente con los anillos de punta, para evitar que existan deslizamientos (Figura 100).
4. Se inspeccionan los micrómetros del deformímetro que estén perfectamente verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen, verificando que el vástago del micrómetro tenga la carrera suficiente para la deformación que deba registrarse.
5. Ajustar los micrómetros y retirar cuidadosamente las barras que separan los anillos, observando que los indicadores de los micrómetros no registran movimientos importantes (si se mueven hay que repetir los pasos 2 y 3).
6. Colocar el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándolo antes de aplicar la carga (Figura 101).
7. Colocar la carátula de los micrómetros en 0.0 (Cero).

8. Aplicar la primera precarga de 10% al 15% del promedio de la resistencia de ruptura obtenida en los ensayos a compresión, verificando el correcto funcionamiento del micrómetro.
9. Aplicar la carga y registrar deformaciones a cada 0.01 mm hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo obtenido en los ensayos de compresión.
10. Llegado al 60% de la carga máxima del ensaye a compresión, se reduce la velocidad de aplicación de la carga para permitir que se aflojan los tornillos que fijan los anillos y de ser posible, para evitar deterioro se retiran los micrómetros, posteriormente se prosigue con la aplicación de la carga hasta llegar a la falla.



Figura 95 Base para vaciado de azufre.



Figura 96 Preparación para una de las áreas de contacto del cilindro.



Figura 97 Especímenes cilíndricos con base de azufre en áreas de contacto.



Figura 98 Colocación del espécimen cilíndrico para ensayo a compresión.



Figura 99 Falla del espécimen cilíndrico a compresión.



Figura 100 Fijado del espécimen con aditamento para medir deformaciones.



Figura 101 Aplicación de carga en el espécimen cilíndrico ya instrumentado.

Calculo

- 1) Calcular los esfuerzos y deformaciones unitarias por cada carga, así como el esfuerzo máximo con los datos recopilados del ensayo
- 2) Graficar el esfuerzo-deformación unitaria.
- 3) Determinar el esfuerzo S_1 en Kg/cm^2 correspondiente a la deformación unitaria (e_1) de 0.000050.

- 4) Calcular el esfuerzo S_2 correspondiente al 40% del esfuerzo máximo.
- 5) Calcular el módulo de elasticidad empleando la fórmula siguiente:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.000050} \quad (16)$$

Dónde: E es el módulo de elasticidad (kg/cm^2); S_1 es el esfuerzo (kg/cm^2) de la deformación unitaria e_1 de 0.000050; S_2 como el 40% del esfuerzo máximo (kg/cm^2) y e_2 la deformación unitaria del esfuerzo S_2 .

Para obtener el coeficiente numérico de elasticidad, usando la expresión siguiente:

$$K = \frac{E}{\sqrt{f'c}} \quad (17)$$

Dónde: K es el coeficiente numérico del módulo de elasticidad; E es el módulo de elasticidad obtenido del ensayo (kg/cm^2) y $f'c$ la resistencia del espécimen a compresión (kg/cm^2).

4.7.3 Permeabilidad

Es la capacidad que posee un material que permite que un fluido lo traspase sin alterar su estructura interna. Entonces un material permeable se refiere al que permite el paso de un fluido en un lapso de tiempo y es impermeable si no se presenta una cantidad apreciable o termina siendo nula. Siendo que los factores que influyen en ello son la porosidad del material, la densidad del fluido que intenta permear y la presión la cual se encuentre el fluido.

Para esta prueba se recortaron paneles con ayuda de una sierra de concreto a dimensiones de 25.0 cm x 20.0 cm de acuerdo a la normativa (Figura 102) (NMX-C-234-ONNCCE, 2015). Las pruebas de permeabilidad consisten en colocar un marco acrílico de 20.5 x 25.5 x 5.0 cm encima de cada panel por cada grupo de prueba tomando solo un panel representativo (Figura 103), para evitar filtraciones a las orillas es sellada la placa y el marco de acrílico con plastilina por la parte superior

en donde hay contacto con el agua (Figura 104), para vaciarse agua hasta obtener una altura de 20 mm por encima de la cara superior del panel (Figura 105). Se deja durante 24 h en condiciones ambiente sin mover el espécimen para finalmente reportar, al término de este tiempo, si visualmente se presentaron gotas en la cara inferior (Figura 106). En esta prueba los paneles pueden mostrar trazas de humedad en la parte inferior de la placa, pero en ningún caso debe observarse formación de gotas de agua.



Figura 102 Corte de placas con sierra de concreto.



Figura 103 Marco acrílico de 20.5 x 25.5 x 5.0 cm

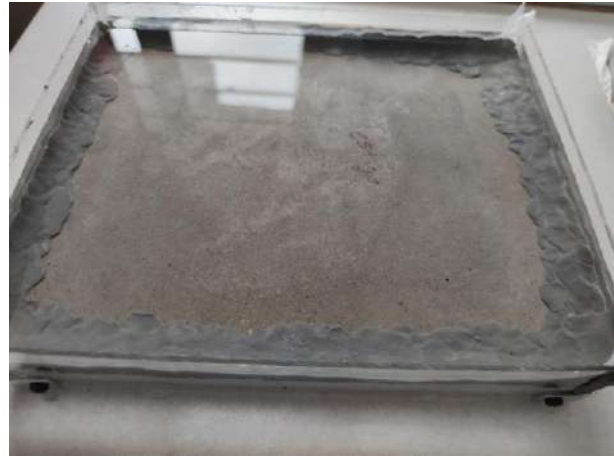


Figura 104 Sellado de placa en los bordes. Figura 105 Colocación de agua a 20mm por encima de la placa.



Figura 106 Inspección visual de formación de gotas en la parte inferior.

4.7.4 Aislamiento acústico (R)

Se utiliza la NOM-081-ECOL-1994, para realizar la prueba elaborando una caja con los paneles de cada grupo de prueba (Figura 107), sellándose por los bordes con silicón, dejando una abertura en una de las caras para introducir la punta del sonómetro el cual registrará los dB al interior, previamente se coloca el sonómetro a 1.0 m de distancia de la fuente de sonido con 55 dB con ruido blanco en modo A y en Slow (Figura 108). El ruido blanco representa un espectro amplio de frecuencias siendo un muestreo útil para probarse en pruebas de aislamiento. Finalmente se coloca la punta del sonómetro con la fuente de sonido previamente ajustada y se sella con plastilina el orificio, se toman 10 mediciones a cada 5 segundos y se promedia.

El aislamiento acústico (R) resulta de la diferencia entre dos mediciones en recintos diferentes. Siendo así el resultado la capacidad del material para absorber el sonido.



Figura 107 Cajas de prueba para aislamiento acústico.



Figura 108 Calibración de la fuente de ruido a 55 dB.



Figura 109 Prueba de aislamiento acústico.

Se utilizó un sonómetro que cumple con las especificaciones (NMX-AA-59-1978) con el cual se llevará a cabo la medición en una recreación de dos espacios o recintos 1 y 2 divididos por cada uno de los grupos de prueba.

4.7.5 Propiedades físicas

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de los materiales

A continuación se presentan los datos de relevancia para cada uno de los materiales que conforman al panel de fibrocemento.

5.1.1 Fibra de bagazo de caña

El proceso de la obtención de la fibra final para utilizarse en el panel se ve facilitado en parte por el origen del bagazo del ingenio azucarero previamente mencionado en el Capítulo 4.1, aun así posee una cantidad alta de corteza, finos y medula de dimensiones mayores mal cortadas, por lo cual se procede a los siguientes pasos que llevan al resultado final del bagazo a fibra solo compuesto de medula de la caña de azúcar, basado en el estado del arte.

Tamizado. Se procede a tamizar por medio de mallas No. 4 y 8 normadas por la ASTM, para la eliminación de partículas gruesas y finas, lo cual evita problemas como: mal fraguado, pérdida de resistencia acentuada, mala distribución de agregado y acumulación de fibras (efecto de boleó).

Proceso:

1. Se ensamblan la malla No 4 y 8 ASTM
2. Se toman 20 g de FC y se colocan encima de la malla No. 4, se procede a colocar una tapa para evitar que salga la fibra o partículas finas (Figura 110).
3. Se coloca en la parte de abajo un saco o recipiente que reciba todas las partículas finas.
4. Se comienza a agitar en sentido vertical y horizontal por 2 minutos.
5. Lo que quede en medio de las mallas No. 4 y 8 es la fibra que se utilizará para el proyecto (Figura 112), el resto se desecha (Figura 111).



Figura 110 Inicio de tamizado.



Figura 111 Cúmulos de bagazo de caña.



Figura 112 Fibra de caña utilizable.

Lavado. La fibra fue lavada con agua a temperatura ambiente, primero siendo sumergido durante 24 h a fin de que soltara una parte de los azucares y para seguidamente enjuagarse, para después dejarse escurriendo y ponerse al sol para su secado.



Figura 113 Fibras sumergidas en agua por 24 h.



Figura 114 Escurrimiento de fibras.

5.1.1.1 Mineralización de la fibra

Cuando se utiliza la fibra, se procede a saturar nuevamente la misma con agua durante 24 h (Figura 115), a fin de que el agua ocupe los vacíos de la fibra y al momento de sumergirse con silicato de sodio esta solo quede en la superficie de la misma, a su vez esto ayuda a que el silicato absorba agua necesaria de la fibra y no de la mezcla; se continua con el vaciado del agua (Figura 116) y se pasa a vaciar silicato de sodio (Figura 117) revolviendo durante 2 minutos con la ayuda de una varilla quedando amarillenta las fibras Figura 118, finalmente se cuele la fibra durante 1 minuto, estando lista para agregarse a la mezcla de mortero (Figura 119).



Figura 115 Saturación de la fibra por 24 h.



Figura 116 Vaciado de agua pasadas 24 h.



Figura 117 Tratamiento con silicato de sodio.



Figura 118 Comparativa entre fibra tratada y no tratada.



Figura 119 Fibra de caña mineralizada.

5.1.2 Arena del río Huajúmbaro

En la Tabla 8 se indican los resultados de los ensayos de caracterización realizados a la arena del Río de Huajúmbaro.

Tabla 8 Resultados de la caracterización de la arena del Río de Huajúmbaro.

Ensayo	Resultado
Densidad (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)	2.22 <i>gr/cm</i> ³
Masa volumétrica y suelta (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.18 <i>gr/cm</i> ³
Masa volumétrica seca y varillada (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.27 <i>gr/cm</i> ³
Módulo de finura (NMX-C-077, 1997)	2.44
Absorción (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)	7.2%
Análisis granulométrico (NMX-C-077, 1997)	Se indica en la gráfica

5.1.2.1 Muestreo

Se realizó conforme a lo establecido en la (NMX-C-030-ONNCCE-2004), tomando muestras a la arena de estudio del río Huajúmbaro (Figura 120), se deja secando una vez llegado al laboratorio (Figura 121) y se toman muestras representativas de aproximadamente 50 kilogramos, por último, se almacenan en costales dentro del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” (Figura 122).



Figura 120 Recolección de arena del Rio Huajúmbaro.



Figura 121 Secado de arena.



Figura 122 Almacenamiento en sacos de la arena.

5.1.2.2 Reducción de la muestra de agregado al tamaño requerido

Las muestras anteriores se redujeron conforme a lo marcado en la (NMX-C-170-ONNCCE-2019), en la Tabla 9 se indica los métodos de reducción utilizados, así como su la cantidad necesaria y para que ensayo se requirió la misma.

Tabla 9 Reducción de muestras para cada tipo de prueba de caracterización de agregado fino.

Ensayo	Método de reducción de la muestra	Cantidad de material de muestra final
Densidad (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)	Método mecánico	1000 gramos
Masa volumétrica y suelta (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	Método Manual	La necesaria para poder realizar el ensayo
Masa volumétrica seca y varillada (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	Método Manual	
Módulo de finura (NMX-C-077, 1997)	Método Mecánico	600 gramos
Absorción (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)	Método Mecánico	1000 gramos
Análisis granulométrico (NMX-C-077, 1997)	Método Mecánico	600 gramos

5.1.2.3 Análisis granulométrico de agregados

A continuación, se muestra la Tabla 10 con los resultados del análisis granulométrico realizado a la arena.

Tabla 10 Análisis granulométrico de arena del Rio Huajúbaro.

Peso de la muestra	662.2 gr	Arena de rio Huajúbaro
---------------------------	-----------------	-------------------------------

Apertura malla (mm)	Malla	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret acumulado	Calculado
4.76	4	0.00	0.00	0.00	100.00
2.36	8	23.60	3.56	3.56	96.44
1.18	16	91.40	13.80	17.37	82.63
0.6	30	198.20	29.93	47.30	52.70
0.3	50	202.20	30.53	77.83	22.17
0.15	100	132.00	19.93	97.77	2.23
0.075	200	10.40	1.57	99.34	0.66
0	Charola	4.40	0.66	100.00	0.00
-	Σ	662.20	100.00	MF=2.44	

El módulo de finura arroja un valor de 2.44 y se encuentra dentro de los límites marcados por la (NMX-C-111-ONNCCE, 2008), entre los valores 2.30 y 3.10, por lo cual esta caracterización de agregado resulta aceptable. Teniendo un uso apto para mortero del tipo estructural.

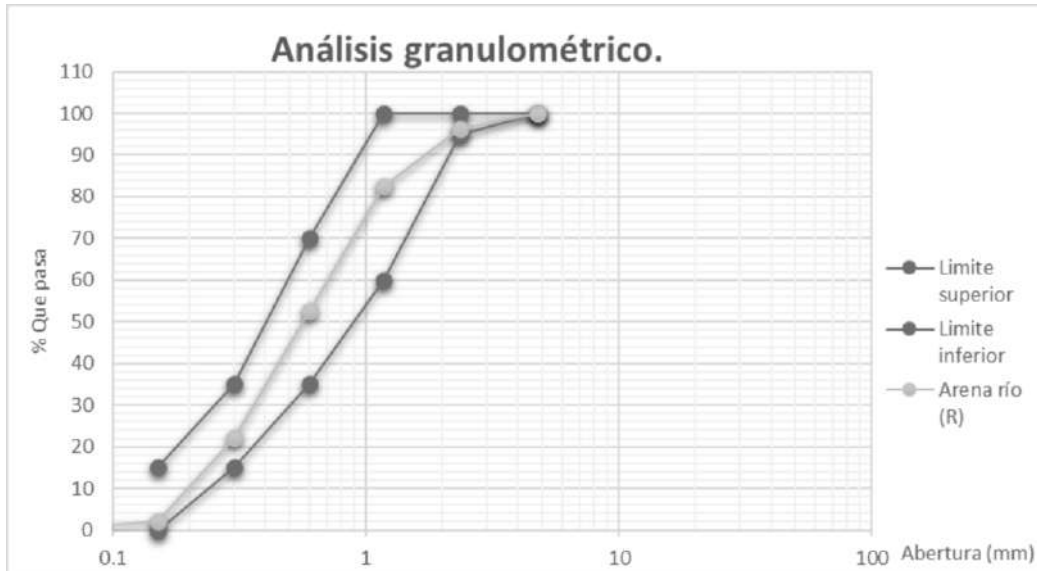


Figura 123 Resultado del análisis granulométrico de la arena de río Huajúbaro.

5.1.3 Cemento Portland

5.1.3.1 Determinación de consistencia normal

El ensayo consiste en determinar la cantidad de agua necesaria para que una aguja penetre $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ una pasta de cemento en un periodo de 30 segundos al momento de inicio de la prueba. El valor obtenido de agua sirve para utilizarse en pruebas de tiempo de fraguado.

En base a la Tabla 11 se muestra el porcentaje obtenido, resultando de 32% que corresponde a 192 gramos de agua o 192 mililitros.

Tabla 11 resultado del ensayo de consistencia normal (NMX-C-057-ONNCCE-2015).

Consistencia normal	
Peso del cemento	600 gramos
Cantidad de agua en % respecto al peso del cemento	32%

5.1.3.2 Determinación de tiempo de fraguado (Método de Vicat)

Se muestran los resultados en la tabla Tabla 12.

Tabla 12 Resultados del ensayo de tiempos de fraguado (NMX-C-059-ONNCCE-2017).

	Minutos	Penetración registrada (mm)
Tiempo de fraguado inicial	127.5	22
Tiempo de fraguado final	250	0

Indicador que permite conocer si el cemento en contacto con el agua reacciona químicamente a velocidades de reacción normales. Los límites se establecen de acuerdo a (NMX-C-021-ONNCCE, 2015)(Tabla 13). Realizado los ensayos con base a la (NMX-C-414-ONNCCE, 2017), el cemento utilizado se encuentra dentro de los valores establecidos.

Tabla 13 Especificaciones a cumplir en tiempos de fraguado inicial y final (NMX-C-059-ONNCCE-2017).

Determinación	Unidad	Condición	Especificación
Tiempo de fraguado inicial	Min.	Mínimo	45
Tiempo de fraguado final	Min.	Máximo	600

5.1.3.3 Determinación de densidad

Esta propiedad tiene su utilidad principalmente en la elaboración de proporcionamientos de mezclas debido a que permite conocer la relación de masa del cemento por unidad de volumen. Se muestra el resultado en la Tabla 14.

Tabla 14 Resultado de la prueba de densidad en el cemento portland CPC30 RS.

Densidad (gr/cm^3)	2.97
--	------

5.1.4 Agua

Los resultados de los análisis realizados al agua del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la UMSNH, realizados por el Laboratorio de Calidad del Agua perteneciente al departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo lo especificado en la NMX-C-122-ONNCCE-2004 se indican en la Tabla 15.

Tabla 15 Resultados de laboratorio realizados al agua utilizada en la elaboración de mortero.

Parámetro/Unidades	Resultado	Límite máximo Permisible NMX-C-122-ONNCCE-2014		Método de prueba
Sólidos en suspensión (SST <i>mg/l</i>)	1.0	2000	Cumple	(NMX-AA-034-SCFI, 2001)
Sólidos Totales (ST <i>mg/l</i>)	436	N/A	N/A	(NMX-AA-034-SCFI, 2001)
Total, de impurezas en solución sólidos disueltos totales (SDT <i>mg/l</i>)	435	3500	Cumple	(NMX-AA-034-SCFI, 2001)
Cloruros Cl- (<i>mg/l</i>)	14.9	400	Cumple	(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

Sulfatos como SO_4 (mg/l)	10	3000	Cumple	(NMX-AA-074, 1981)
Dureza magnésica (mg/l $CaCO_3$)	38.25	100	Cumple	(NMX-AA-072-SCFI, 2001)
Dureza Cálctica (mg/l $CaCO_3$)	27	N/A	N/A	(NMX-AA-072-SCFI, 2001)
Dureza Total (mg/l $CaCO_3$)	65.25	N/A	N/A	(NMX-AA-072-SCFI, 2001)
Carbonatos CO_3 (mg/l)	1.34	600	Cumple	(NMX-AA-036-SCFI, 2001)

5.2 Diseño del mortero

5.2.1 Proporcionamiento por partes en volumen

El diseño de mezclas se desarrolló utilizando los proporcionamientos recomendados de las (NMX-C-486-ONNCCE, 2014) y (N-CMT-2-01-004/02, 2002), donde se utilizaron diferentes proporciones de partes de arena, como se explicó en el apartado 4.5.1. Este apartado se desarrolló y trabajo en conjunto con la investigación de tesis “Caracterización físico mecánica de mortero de uso estructural con agregado pétreo del Estado de Michoacán” (Mondragón Martínez, 2021), en el cual dentro de los agregados pétreos se incluyó la arena de este proyecto (arena del Rio Huajúbaro). En base a una serie de dosificaciones expuestas en la Tabla 6 se determina la mejor composición en partes para la arena seleccionada del proyecto. La tabla

Tabla 16 Diseño experimental de mezcla de mortero en partes por volumen (N-CMT-2-01-004/02, 2002).

Tipo de mortero	Partes de Cemento Portland	Partes de Cemento de Albañilería	Partes de Cal Hidratada	Partes de Arena
I	1	-	-	2.25
	1	-	-	2.5
	1	-	-	2.75
	1	-	-	3
	1	-	-	3.25
	1	-	-	3.5
	1	-	-	3.75
	1	-	-	4

5.2.2 Ensayo de fluidez

Para determinar la cantidad de agua a utilizar en las mezclas de mortero se llevó a cabo el ensayo de fluidez para que el mortero cumpla con los límites establecidos en la NMX-C-486-ONNCCE-2014, que especifica un límite de 105% a 130%. En este ensayo se iteró agregando mayor porcentaje de agua hasta que la mezcla consiguiera una fluidez mínima, no más allá porque se sabe que mientras a mayor cantidad de agua menor resistencia tendrá la mezcla.

En la Tabla 17, se indican los resultados de la cantidad de agua utilizada para conseguir el mínimo de fluidez establecido en norma, los intervalos de incremento para el agua fueron de 25 ml para cada una de las mezclas elaboradas con la arena del río Huajúmbaro hasta obtener el resultado, las proporciones se indican de la siguiente forma; "Cemento+2.25R", que significa 1 parte de cemento y 2.25 partes de arena, todas estas pruebas solo se limitan a realizar pruebas para cemento CPC 30 RS y arena.

Posteriormente con la composición por partes del se menciona en base a pruebas de compresión simple cuál de las combinaciones por partes resulta ser la que mayor resistencia presenta.

Tabla 17 Proporcionamientos utilizados en la determinación de la mezcla con la mínima cantidad de agua que cumplen con la fluidez.

Mezcla	Cantidad de agua (ml)	Fluidez (%)
Cemento+2.25R	350	109
Cemento+2.50R	400	119
Cemento+2.75R	400	106
Cemento+3R	475	127
Cemento+3.25R	500	106
Cemento+3.5R	525	110
Cemento+3.75R	525	106
Cemento+4R	750	113

5.2.3 Elaboración de especímenes para ensayo de compresión

Se elaboraron 6 especímenes por cada agregado fino estudiado, siendo un total de 48 especímenes, estos fueron elaborados y curados según lo establecido en la (NMX-C-061-ONNCCE, 2015). Los especímenes fueron probados mediante ensayos destructivos cuyos resultados se presentan en los siguientes apartados.

5.2.3.1 Resistencia a la compresión simple

Se utilizan como referencia y parámetro de control los valores mínimos de resistencia a la compresión de la normativa (NMX-C-234-ONNCCE, 2015), este valor está establecido en 125 kg/cm² (línea azul) para el tipo de mortero estructural tipo I. A continuación, se exponen los resultados de las pruebas a compresión simple agrupados por proporcionamiento en la Figura 124.

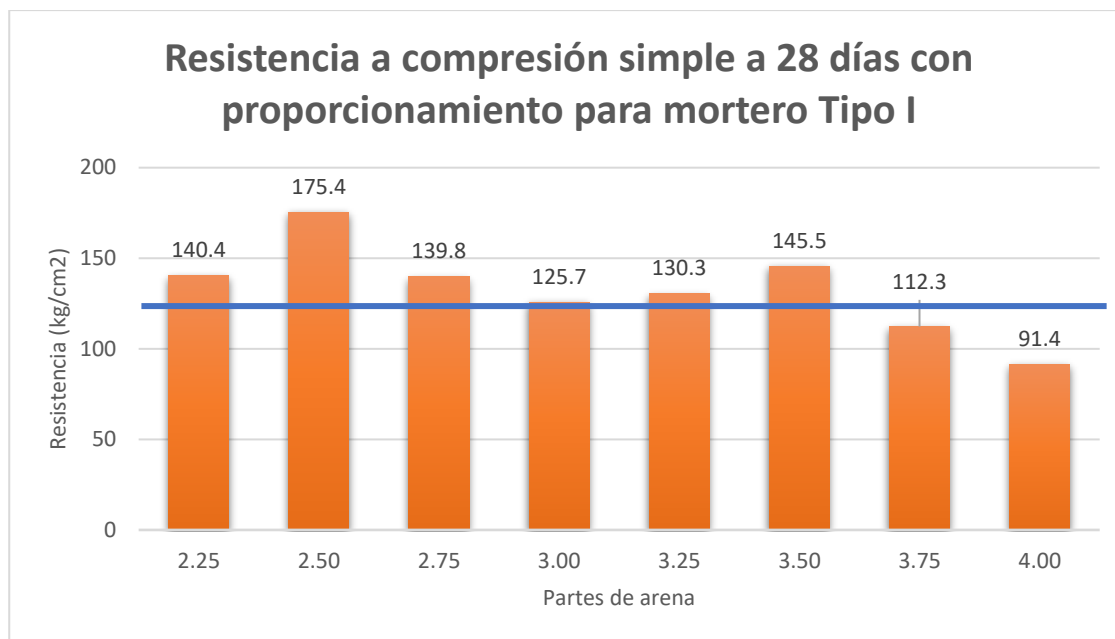


Figura 124 Gráfica de resistencia a compresión simple a 28 días para morteros con 1 parte de cemento y 2.25 a 4 partes de arena del río de Huajúbaro.

En base a los resultados se observa que el mejor de los proporcionamientos es 1 parte de cemento y 2.5 partes de arena y, con un resultado de 175.4 kg/cm². Esta mezcla entonces pasa directamente a ser el mortero de diseño donde se partirá a definir el espesor del elemento tipo placa, por medio de pruebas a módulo de ruptura (MOR) que se verán más adelante.

5.3 Elaboración de elemento tipo placa solo con mortero

5.3.1 Determinación de dimensiones

Para determinar este punto se hace uso de la (NMX-C-234-ONNCCE, 2015) el cual marca los lineamientos para placas de fibrocemento, en este caso se opta por el diseño de placa pequeña en la cual el apartado “Forma y dimensiones de especímenes de ensayo” de la norma marca las medidas de 250 x 250 mm como el establecido estándar, cualquier otra medida que supere estas dimensiones deberá de adaptarse a ciertos criterios, al utilizar este criterio se facilita la elaboración de especímenes.

5.3.2 Elaboración de moldes

Para los moldes se toma de referencia el armado que utilizó (Cobrerros Rodríguez, 2009) compuesto de bisagras que permiten apertura lateral con placas de acero calibre 14 y abrazaderas (Figura 125). Para el comienzo del diseño se tomó uno de los tres moldes, el de 1.0 cm de espesor el cual presenta mayor dificultad al desmontarse de forma lateral.

Al elaborarse el prototipo quedó comprobado que es inviable, ya que al momento de descimbrar el modelo propuesto por Cobrerros tuvo una serie de problemas para sacar la pieza, entonces el acomodo de bisagras laterales con cambios como un sistema asegurado por tuercas y divisiones intermedias movibles por placas colocadas de forma vertical (Figura 126 y Figura 127) no resulto como se esperó, aparecieron problemas al desmoldar (Figura 128), observándose un asentamiento al fondo del agregado fino y alta adherencia del mortero a las placas internas incluso con engrasarte (Figura 129), dificultando demasiado obtener la pieza causarle fractura o debilitamiento.



Figura 125 Modelo de moldes metálicos de la investigación de paneles prefabricados de paja de cereal y tierra estabilizada (Cobrerros Rodríguez, 2015).



Figura 126 Elaboración de prototipo de molde con apertura lateral y apertura superior para vaciado.



Figura 127 Vista de parte superior (acomodo de láminas verticales removibles).



Figura 128 Desmolde de cinco especímenes de prueba.



Figura 129 Alta adherencia de los panes de mortero a las placas de acero.

Al no poderse realizar el desmoldado de las placas se optó por un diseño donde la parte superior fuera el área de colado siendo de 25.0 x 25.0 cm, para poder contener la mezcla se emplearon soleras como los bordes y como base una lámina de acero calibre 14. El primer prototipo consistió en soldar una escuadra de solera y la otra parte sería atornillable con dos de ellos por cada lado, que atraviesan a la solera hasta la placa; aún así se presentó el mismo problema al intentar desmoldarlo siendo el problema el lado de las soleras soldadas, en el cual el mortero al contacto con la cara mantenía una adherencia alta. Finalmente, el diseño termino en un molde compuesto por tres piezas dos escuadras de solera atornillables y una placa en la cual se montan (Figura 130), resolviendo el problema del desmoldado del espécimen sin causarle daño al mismo.



Figura 130 Molde final para vaciado de mortero de 1 cm de grosor.

Definido su acomodo para el armado se procedió a elaborar 3 moldes manteniendo como constante dimensiones de largo y ancho de 25.0 x 25.0 cm, variando únicamente el espesor con soleras de 3.0, 2.0 y 1.0 cm a fin de someter las placas de mortero a pruebas posteriores para determinar cuál espécimen responde mejor al Módulo de Ruptura en base a su espesor.



Figura 131 Moldes metálicos de 3.0, 2.0 y 1.0 cm para prueba para determinar el espesor de testigo.

5.3.3 Proceso de fabricación

5.3.3.1 Colado, compactación y curado.

Para esta parte se utiliza los resultados del apartado 5.2.3.1 así como las dosificaciones en el cual se maneja la dosificación de los elementos de la mezcla, por lo cual se prepara y se vacía en los moldes el mortero con espesores de (3.0, 2.0 y 1.0 cm). El proceso utilizado para el colado de una pieza de 25.0 x 25.0 x 1.0 cm consiste en:

- + Vaciar en un recipiente de 357 g de cemento CPC 30RS y 892 g de arena de río (relación cemento arena 1:2.5) y mezclarse de forma manual con una cuchara a fin de no levantar partículas finas.
- + Vaciar 321 ml de agua a la mezcla (relación agua cemento A/C=0.90) y se procede a mezclar todo de forma homogénea.
- + Se vacía la mezcla en el molde.
- + Para la compactación se deja caer por cada lado del molde a una altura de 10 cm, repitiendo el proceso 15 veces por cada lado (60 golpes en total)
- + Se enrasa el excedente de mortero con el canto de una regla trasladándose en el sentido longitudinal y al mismo tiempo con un movimiento transversal sobre su eje a fin de simular el efecto de vibración.
- + Se apisona con un prisma acrílico de forma paralela por los cuatro lados del molde.
- + Se repite el proceso desde el vibrado tres veces y se deja curar.
- + El curado se lleva a cabo en un recipiente sellado para mantener las condiciones de humedad adecuadas.

5.3.4 Pruebas a módulo de ruptura

Se realizaron 5 especímenes de cada espesor que posteriormente se sometieron a pruebas a Modulo de ruptura (MOR), los cuales se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18 Módulos de ruptura a 7 días para definición de espécimen prototipo.

Paneles (aprox.)	Carga 1 (N)	Espesor 1 (mm)	Carga 2 (N)	Espesor 2 (mm)	MOR 1 (MPa)	MOR 2 (MPa)	MOR (MPa)
1 cm	519.75	9.30	549.17	9.50	7.21	7.30	5.79
	441.30	9.00	437.37	9.10	6.54	6.34	
	411.88	9.86	378.53	9.95	5.08	4.59	
	323.62	9.10	431.49	9.30	4.69	5.99	
	272.62	8.47	332.44	8.48	4.57	5.55	
2 cm	1206.21	18.29	1313.10	18.50	4.33	4.60	4.55
	1520.02	19.30	1213.08	19.60	4.90	3.79	
	1843.64	19.13	1343.50	19.15	6.05	4.40	
	1206.21	18.00	1117.95	18.28	4.47	4.01	
	1098.34	17.95	1294.47	17.91	4.09	4.85	
3 cm	2598.75	30.96	2657.59	31.07	3.25	3.30	3.57
	3285.21	31.90	2335.93	31.68	3.87	2.79	
	2941.98	31.12	2932.17	31.13	3.65	3.63	
	3971.67	31.40	3334.24	31.65	4.83	3.99	
	3118.50	32.00	2358.49	32.48	3.65	2.68	

Los resultados se promedian y se obtiene el Módulo de Ruptura promedio, el cual es el valor representativo de cada espesor. De los tres especímenes el que arroja el mejor resultado en resistencia flexión es el de 1.0 cm, con un MOR de 5.79 MPa, a la par de también estar por encima de los 4 MPa mínimos marcados por la normativa.

5.4 Panel de fibrocemento compuesto por fibras de caña

En base a los resultados previos, es seleccionado el panel con dimensiones de 25.0 x 25.0 x 1.0 cm de espesor, ahora se plantean las diferentes dosificaciones de fibras, así como la cantidad de materiales que componen la mezcla y la etiqueta

de o abreviatura de cada grupo de prueba, resultando un total de 4 grupos (Tabla 19).

Tabla 19 Dosificación de los grupos de prueba para elaborar una pieza.

Componentes	PT	PFC3%	PFC6%	PFC12%
Cemento portland (g)	357	348	338	316
Arena (g)	892	870	845	790
Agua (ml)	321	330	321	300
Fibra (g)	0	10.44	20.28	37.92

Dónde: PT es Panel Testigo; PFC3% panel con adición del 3% de Fibra de Caña (FC) respecto al peso seco del cemento; PFC6% panel con adición del 6% de fibra de caña respecto al peso seco del cemento; PFC12% panel con adición del 12% de fibra de caña respecto al peso seco del cemento.

5.4.1 Procedimiento

El procedimiento anteriormente descrito en el apartado 4.6.3 tuvo un resultado satisfactorio, por el motivo de haber optado en cada parte del proceso por procedimientos simples pero resolutivos para cada problemática que se plantea para estos elementos compuestos; cumpliendo los objetivos de la investigación, que es utilizar la menor cantidad de recursos, herramientas y equipos especializados.

Algunas pruebas con ciertos elementos del proceso no resultaron tener un resultado adecuado, dejándose dentro de las observaciones de las partes del proceso como son: No sumergir previamente las fibras en agua para eliminar las azúcares restantes en un ciclo de lavado, utilizar un fluidificante en la mezcla en conjunto con silicato de sodio (genera un coágulo que se aparta de la mezcla y solidifica de inmediato el resto del mortero).

El procedimiento puede replicarse con pocas complicaciones, siendo precisamente una ventaja derivada de los objetivos de la investigación.

5.4.2 Ensayos físico-mecánicos

5.4.2.1 Módulo de Ruptura (MOR)

Los resultados son mostrados resumidos a continuación en la Tabla 20, siendo un promedio de los cinco paneles de cada grupo de prueba tanto a 7 y 28 días bajo lo marcado en la normativa (NMX-C-234-ONNCCE, 2015). Todas las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones siendo retirados un día antes del recipiente de curado en donde se mantenían condiciones de humedad optima.

Tabla 20 Módulos de ruptura promedio de los diferentes especímenes a 7 y 28 días.

Resultados de MOR para los grupos de prueba		
Mezcla	MOR promedio 7 días (MPa)	MOR promedio a 28 días (MPa)
PT	4.56	4.53
PFC3%	7.46	5.02
PFC6%	6.37	6.70
PFC12%	4.90	6.51

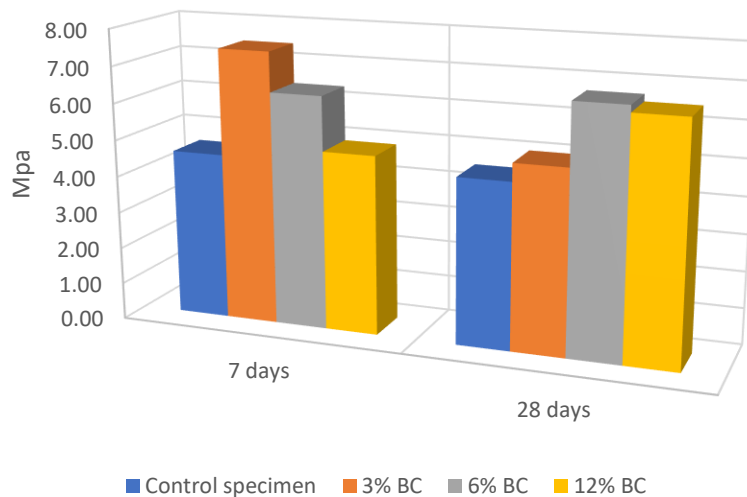


Figura 132 Módulo de ruptura promedio para cada grupo de prueba a 7 y 28 días.

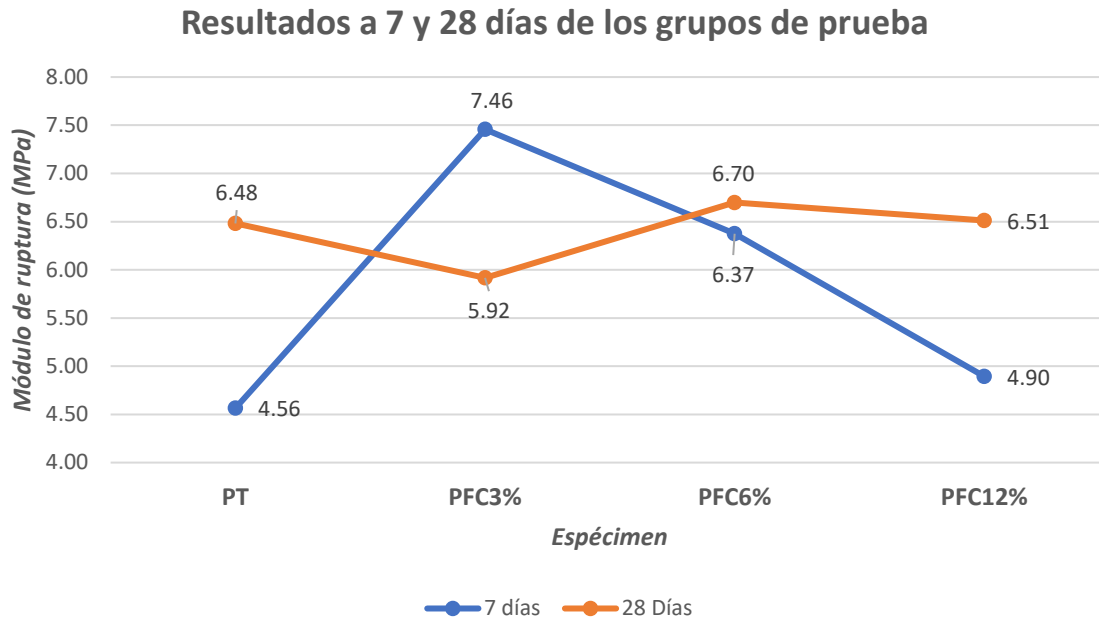


Figura 133 Comportamiento a módulo de ruptura de especímenes a 7 y 28 días.

En cada grupo se observa un incremento del módulo de ruptura en los primeros 7 días siendo que el grupo con adición del 3% de FC destaca por encima de la media con 7.46 MPa, posteriormente a los 28 días se observa un crecimiento en la resistencia de los otros dos grupos de prueba siendo el que termina con una mejor resistencia el grupo que tiene adición de un 6% FC, teniendo como hecho remarcable que el grupo de 3% de FC tiene una decaída abrupta, además físicamente dichos especímenes presentaron pandeo y desmoronamiento pasados los 28 días (Figura 132 y Figura 133).

El comportamiento es esperado menos por el grupo de 3% de FC, siendo así que el proceso de fabricación arroja resultados positivos en las pruebas a corto plazo de Módulo de ruptura.

Por último, haciendo una comparativa en porcentaje respecto a los especímenes se muestra la Tabla 21 y Tabla 22 en donde se observa en la primera columna la mejora o disminución en porcentaje de la resistencia a módulo de ruptura de cada grupo respecto al panel testigo (PT) y en la segunda respecto al anterior

grupo de prueba. Siendo el mejor grupo de prueba a 7 días el PFC3% con 63.36%, pero teniendo una caída abrupta a 28 días con -8,71% respecto a PT. Siendo el mejor el grupo en líneas generales el PFC6% teniendo una mejora inicial a edades tempranas de 39.64% y quedando a 28 días por encima de PT con solo un 3.36%.

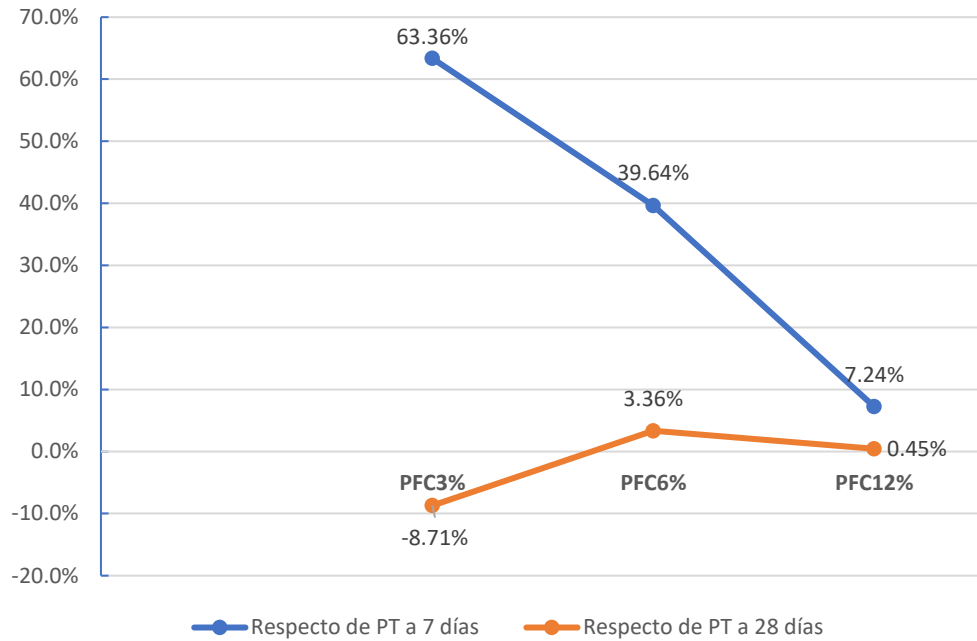
Tabla 21 Comparativa en porcentaje de módulo de ruptura a 7 días respecto a diferentes especímenes de prueba.

Especímen	Módulo de Ruptura	Respecto a PT	Respecto al anterior
PT	4.56	0	0
PFC3%	7.46	63.36%	63.36%
PFC6%	6.37	39.64%	-14.52%
PFC12%	4.90	7.24%	-23.21%

Tabla 22 Comparativa en porcentaje de módulo de ruptura a 28 días respecto a diferentes especímenes de prueba.

Especímen	Módulo de Ruptura	Respecto a PT	Respecto al anterior
PT	6.48	-	-
PFC3%	5.92	-8.71%	-8.71%
PFC6%	6.70	3.36%	13.21%
PFC12%	6.51	0.45%	-2.81%

Tabla 23 Diferencia en porcentaje de módulo de ruptura respecto a PT a 7 y a 28 días.



5.4.2.2 Módulo elástico

Se muestran en las tablas Tabla 24, Tabla 25, Tabla 26, Tabla 27 los datos procesados una vez realizado el ensayo de Módulo elástico estático del apartado 4.7.2.

Tabla 24 Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PT.

Def. Unitaria	PT-I (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PT-III (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PT-IV (kg/cm ²)
0.000000	0.00	0.000000	0.00	0.000000	0.00
0.0000625	10.35	0.0000625	2.00	0.0000625	17.23
0.0001250	16.09	0.0001250	16.73	0.0001250	26.37
0.0001875	23.26	0.0001875	26.26	0.0001875	34.96
0.0002500	29.51	0.0002500	34.34	0.0002397	42.76
0.0003125	35.61	0.0003125	40.52	0.0002500	44.29
0.0003750	41.50	0.0003498	44.08	0.0003125	51.53
0.0004001	43.87	0.0003750	46.49	0.0003750	58.82
0.0004375	47.39	0.0004375	52.10	0.0000000	0.00

Tabla 25 Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PFC3%.

Def. Unitaria	PFC3%-I (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PFC6%-II (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PFC12%-III (kg/cm ²)
0.0000000	0.00	0.0000000	0.00	0.0000000	0.00
0.0000625	6.66	0.0000625	7.12	0.0000625	7.57
0.0001250	12.70	0.0001250	12.05	0.0001250	13.09
0.0001875	18.95	0.0001875	16.73	0.0001875	18.11
0.0002500	22.41	0.0002500	20.62	0.0002500	23.27
0.0003125	29.74	0.0003125	24.40	0.0003125	27.82
0.0003689	34.50	0.0003750	28.48	0.0003750	32.37
0.0003750	35.01	0.0004375	31.32	0.0003971	34.16
0.0004375	40.23	0.0004756	33.26	0.0004375	37.44
0.0005000	44.67	0.0005000	34.51	0.0005000	41.99

Tabla 26 Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PFC6%.

Def. Unitaria	PFC6%-II (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PFC6%-III (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PFC12%-IV (kg/cm ²)
0.0000000	0.00	0.0000000	0.00	0.0000000	0.00
0.0000625	9.03	0.0000625	6.45	0.0000625	7.81
0.0001250	13.56	0.0001250	10.49	0.0001250	7.86
0.0001875	18.32	0.0001875	14.71	0.0001875	13.39
0.0002500	21.84	0.0002500	18.90	0.0002500	18.60
0.0003125	24.16	0.0003125	21.99	0.0003125	23.76
0.0003720	27.10	0.0003750	25.35	0.0003720	27.58
0.0003750	27.25	0.0004225	27.91	0.0003750	28.69
0.0004375	30.33	0.0004375	28.73	0.0004375	32.78
0.0005000	32.66	0.0005000	31.77	0.0005000	37.07
0.0005625	38.43	0.0005625	33.46	0.0005625	40.19
0.0006250	38.47	0.0006250	36.33	0.0006250	42.78

Tabla 27 Esfuerzo-Deformación de cada cilindro PFC12%.

Def. Unitaria	PFC12%-II (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PFC12%-III (kg/cm ²)	Def. Unitaria	PFC12%-IV (kg/cm ²)
0.0000000	0.00	0.0000000	0.00	0.0000000	0.00
0.0000625	5.82	0.0000625	3.73	0.0000625	3.96
0.0001250	8.58	0.0001250	6.64	0.0001250	6.65
0.0001875	11.33	0.0001875	9.35	0.0001875	9.26

0.0002500	13.61	0.0002500	11.72	0.0002500	11.30
0.0002927	14.91	0.0003125	13.44	0.0003125	12.54
0.0003125	15.51	0.0003705	14.86	0.0003750	14.32
0.0003750	16.74	0.0003750	14.97	0.0004015	14.84
0.0004375	18.06	0.0004375	16.46	0.0004375	15.56
0.0005000	18.89	0.0005000	17.65	0.0005000	16.24
0.0005625	19.79	0.0005625	18.76	0.0005625	17.11
0.0006250	20.51	0.0006250	19.80	0.0006250	18.59

Como se observa se muestra una mayor deformación a menor esfuerzo a medida que se adiciona una mayor cantidad de fibra, esto se ve mejor representado en las Figura 134Figura 135Figura 136Figura 137.

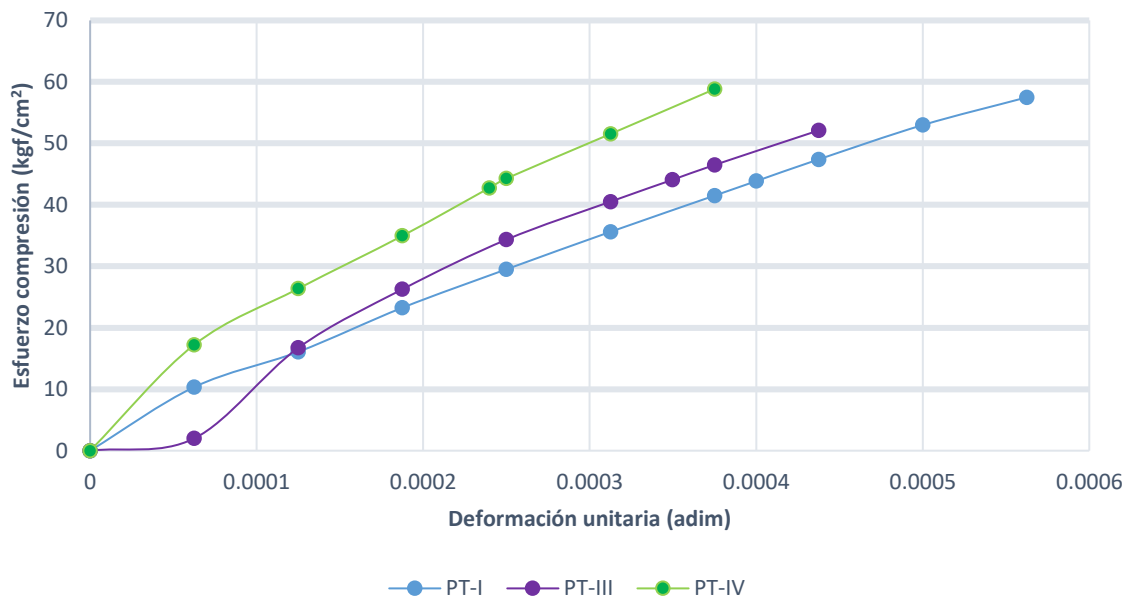


Figura 134 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PT.

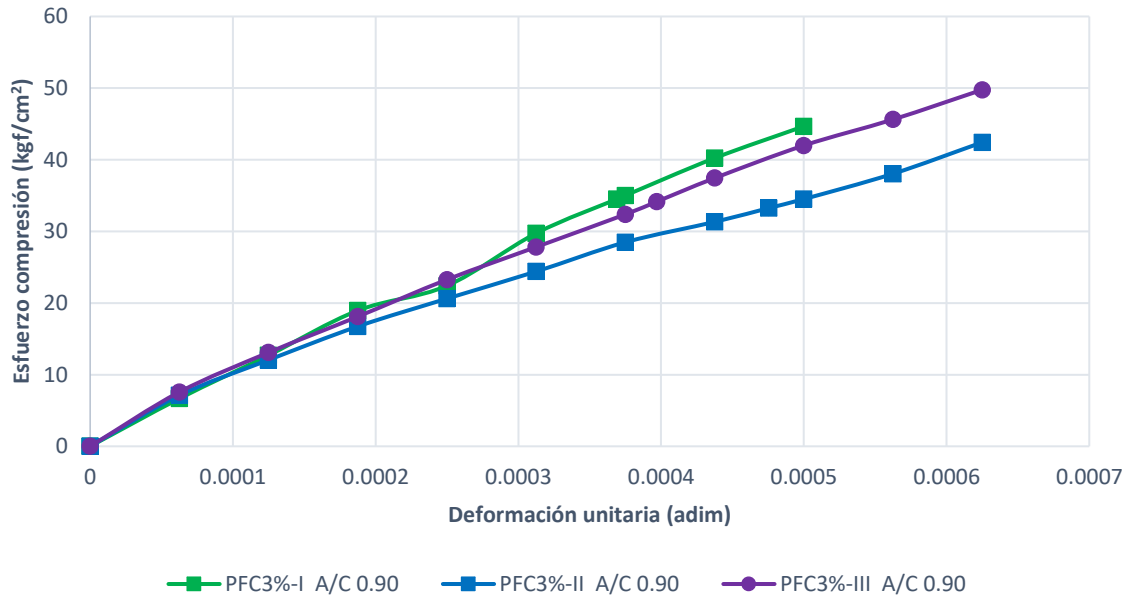


Figura 135 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PFC3%.

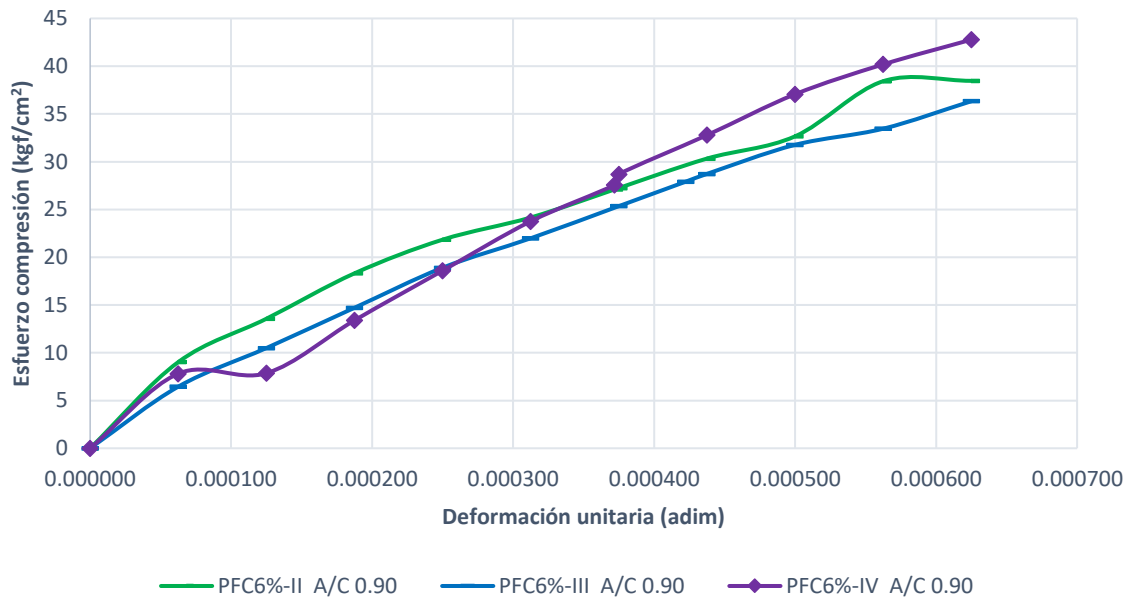


Figura 136 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PFC6%.

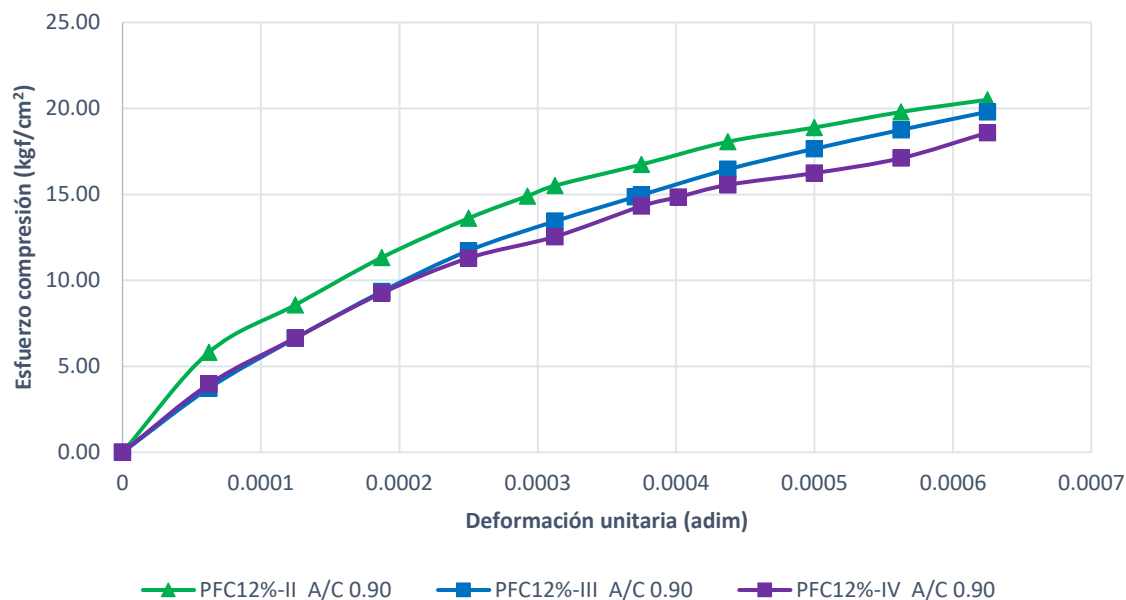


Figura 137 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria PFC12%.

Posteriormente se promedian valores con el fin de uniformizar de forma lineal los valores de los diferentes grupos de prueba resultando la Tabla 28 y a la

Tabla 28 Esfuerzo-deformación de los diferentes grupos de prueba promediados en base a los resultados previos.

Def. Unitaria	PT Promedio (kg/cm ²)	PFC3% Promedio (kg/cm ²)	PFC6% Promedio (kg/cm ²)	PFC12% Promedio (kg/cm ²)
0.0000000	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0000625	6.54	4.21	3.39	1.86
0.0000500	5.23	3.37	2.71	1.48
0.0001250	13.08	8.42	6.77	3.71
0.0001875	19.61	12.63	10.16	5.57
0.0002500	26.15	16.84	13.55	7.42
0.0003125	32.69	21.05	16.94	9.28
0.0003750	39.23	25.26	20.32	11.13
0.0004375	45.77	29.48	23.71	12.99
0.0005000	52.30	33.69	27.10	14.84
0.0005625	58.84	37.90	30.48	16.70
0.0006250	65.38	42.11	33.87	18.55
0.0006875	71.92	46.32	37.26	20.41

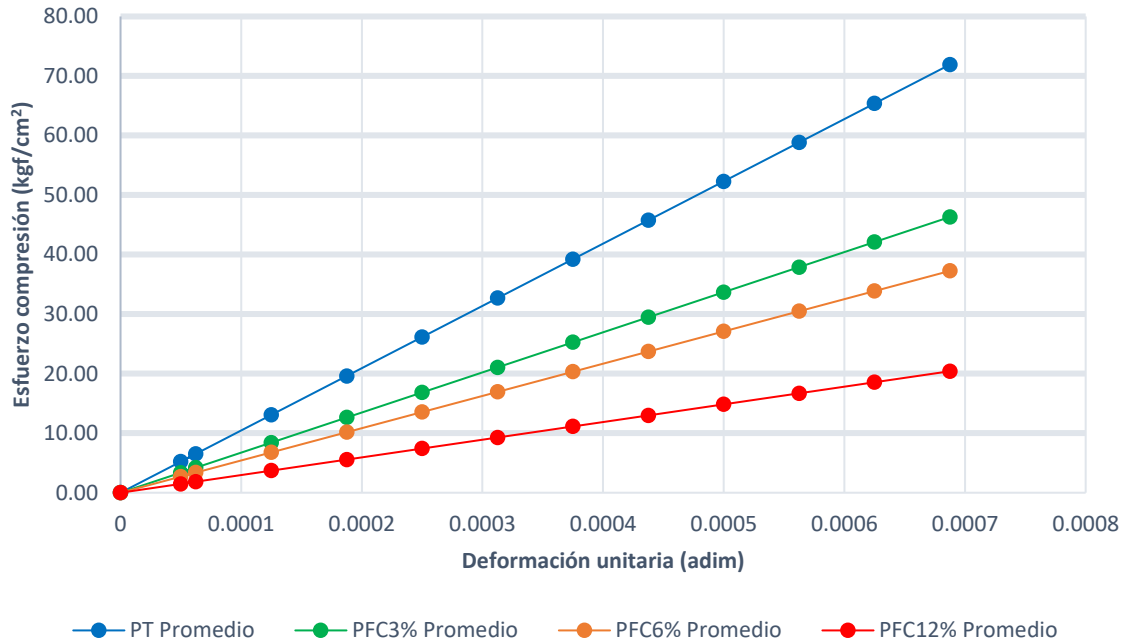


Figura 138 Gráfica esfuerzo-deformación promediadas de cada grupo de prueba.

Por último, se hace una comparativa respecto a PT de los grupos de pruebas PFC promediados para conocer la diferencia porcentual de que tanto menos de esfuerzo es necesario respecto al panel testigo para generar la misma deformación en cualquier punto Tabla 29.

Tabla 29 Diferencia promedio porcentual de esfuerzo respecto de PT para generar la misma deformación en un punto cualquiera para los demás grupos de prueba.

Def. Unitaria	PFC3% (Promedio)	PFC6% (Promedio)	PFC12% (Promedio)
0.0000625	-35.59%	-48.19%	-71.62%
a			
0.0006875			

En términos simples significa por ejemplo que para generar una deformación de 0.0000625 hace falta un esfuerzo de menos del 35.59% de lo que requiere el panel testigo para un panel del grupo de prueba con adición del 3% de fibra de caña.

5.4.2.3 Permeabilidad

La prueba de permeabilidad arroja que ninguno de los especímenes con adición de FC pasa la prueba de las 24 h ya que muestran formación de gotas de agua antes del término de la prueba (Figura 139). Siendo que mientras mayor concentración de FC, menor el tiempo en el cual aparecen gotas teniendo tiempos de aparición de 20 h a tan solo 7 h (Tabla 30). Para no quedarse limitado solo con lo que estipula la normativa se realizó otra prueba de tiempo en donde se dejó por 24 h los grupos de prueba en la cual se colocó un recipiente por debajo que captó el agua que permea para conocer la cantidad de agua en ml que pasa a través de cada uno de ellos resultando en la Tabla 31.



Figura 139 Reporte fotográfico de la inspección visual de los cuatro grupos de análisis en la prueba de permeabilidad.

Tabla 30 Tabla comparativa de los grupos de prueba a la permeabilidad durante 24 h.

Especímen	Formación de gotas
PT	Ninguna
PFC3%	20 h
PFC6%	12 h

PFC12%	7 h
--------	-----

Tabla 31 Cantidad de agua que permea de 1000 ml (tirante de 2.0 cm) a través de los especímenes en un lapso de 24 horas.

Espécimen	Agua (ml)
PT	-
PFC3%	220
PFC6%	420
PFC12%	750

5.4.2.4 Aislamiento acústico

Se hicieron las correspondientes mediciones a cada 5 segundos siendo muy consistentes en su mayoría cada una de ellas.

Los resultados del aislamiento acústico muestran una reducción del 20.7 hasta 21.5 dB teniendo una fuente fija de 55 dB de ruido blanco. Los resultados son congruentes y uniformes entre ellos, se observa que en el espécimen con mayor cantidad de fibra solo se logra reducir 0.8 dB respecto al testigo (Tabla 33), es entendible debido al espesor del elemento, de igual manera no permanece indiferente absorción del sonido frente a la adición de fibra.

Tabla 32 Mediciones a cada 5 segundos para cada grupo de prueba en el ensayo de aislamiento acústico.

Espécimen	Mediciones (dB)									
	5 s	10 s	15 s	20 s	25 s	30 s	35 s	40 s	45 s	50 s
PT	34.4	34.3	34.3	34.2	34.2	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3
PFC3%	34	33.8	33.8	33.9	33.9	33.8	33.9	33.8	33.8	33.9
PFC6%	33.8	33.8	33.8	33.7	33.7	33.7	33.8	33.7	33.7	33.7
PFC12%	33.5	33.6	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5

Tabla 33 Resumen de resultados del Aislamiento acústico (R).

Espécimen	Promedio (dB)	Aislamiento acústico en dB (R)
PT	34.3	20.7
PFC3%	33.9	21.1
PFC6%	33.7	21.3
PFC12%	33.5	21.5

5.4.2.5 Propiedades físicas

Los resultados se muestran a continuación, para el contenido de humedad, absorción de agua, densidad aparente y densidad ambiente.

En los valores de densidad se observa una disminución del valor a medida que se agrega mayor porcentaje de fibra como es de esperarse teniendo así una densidad aparente del testigo de 1786.19 kg/m^3 llegando a 1407.55 kg/m^3 (Figura 141), siendo una reducción del 21.20%. La capacidad de absorción por su parte y el contenido de humedad presentan el mismo comportamiento de aumento a mayor cantidad de fibra (Figura 141) (Tabla 34).

Tabla 34 Densidad y capacidad de absorción de los grupos de prueba.

Espécimen	Contenido de Humedad (%)	Absorción agua (%)	Densidad aparente seca (kg/m ³)	Densidad ambiente (kg/m ³)
PT	1.47	14.78%	1786.19	1812.51
PFC3%	1.58	17.62%	1646.71	1672.77
PFC6%	2.00	20.96%	1505.40	1556.78
PFC12%	1.65	26.83%	1407.55	1430.80

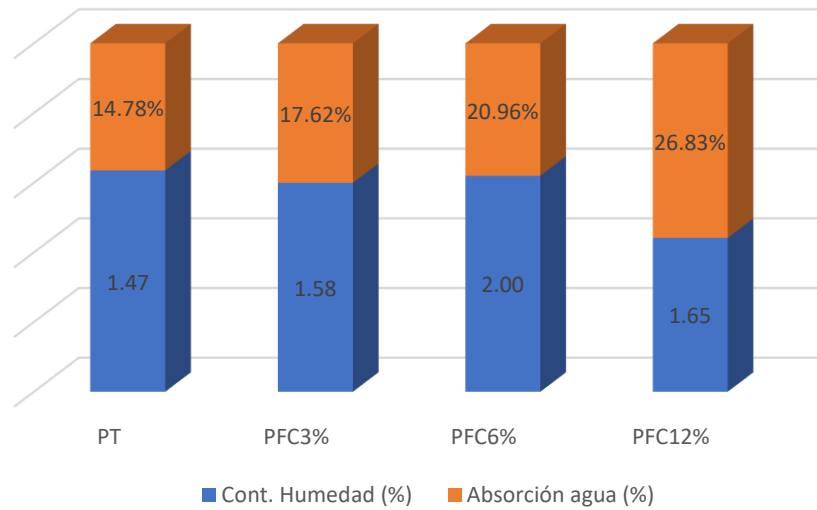


Figura 140 Contenido de humedad y absorción de agua de los especímenes.

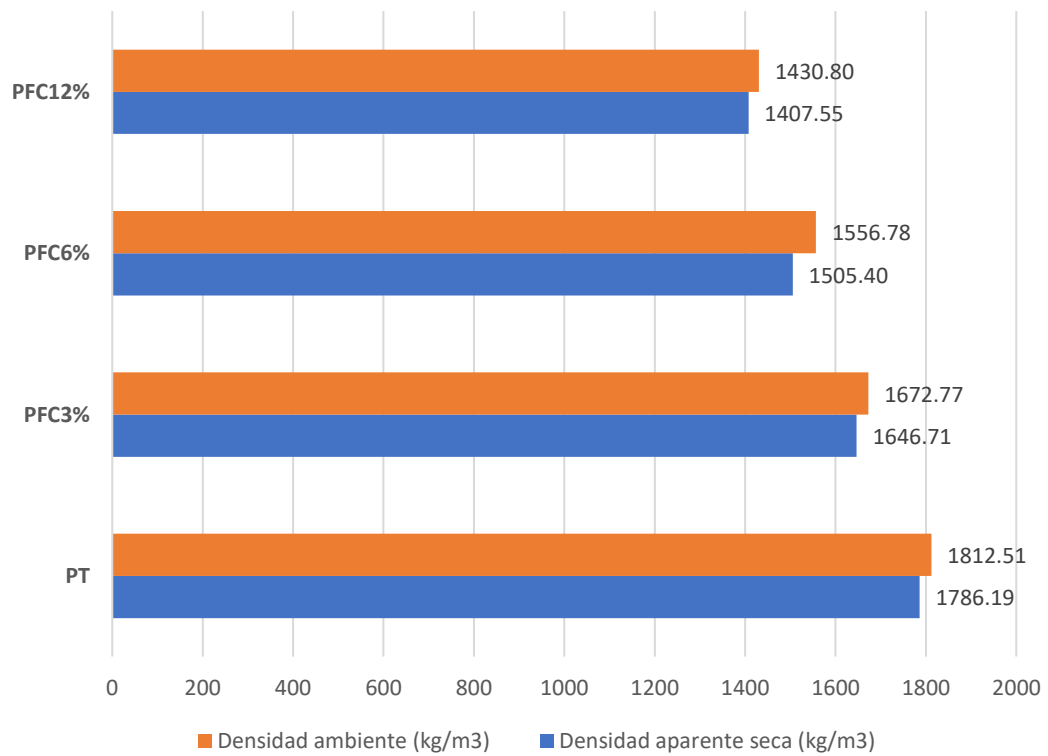


Figura 141 Densidad aparente seca y ambiente de cada espécimen.

Tabla 35 Comparación porcentual respecto a PT respecto a los especímenes en propiedades de contenido de humedad, absorción agua y densidad.

Espécimen	Cont. Humedad (%)	Absorción agua (%)	Densidad aparente seca (kg/m3)	Densidad ambiente (kg/m3)
PFC3%	7.53%	19.22%	-7.81%	-7.71%
PFC6%	35.47%	41.79%	-15.72%	-14.11%
PFC12%	12.24%	81.54%	-21.20%	-21.06%

En la Tabla 35 se hace la diferencia porcentual respecto al panel PT para tener un valor comparativo de cuanto aumentan o disminuyen las propiedades enmarcadas en la tabla.

5.4.3 Posibles aplicaciones del material

En base a los resultados tanto mecánicos como físicos, la normativa de paneles de fibrocemento (NMX-C-234-ONNCCE, 2015) marca los posibles usos del compuesto.

Se clasifican en dos categorías las placas de fibrocemento:

- Categoría A

Definidas como placas para aplicaciones que pueden estar sujetas al calor, humedad y ocasionalmente al congelamiento, por ejemplo, donde están o protegidas de, o no sometidas, a condiciones climáticas severas.

- Categoría B

Definidas como placas para aplicaciones internas, tales como paredes interiores, pisos, sustrato para cerámica o paredes, que pueden estar sometidas al calor, la humedad, pero no al congelamiento.

Solo por mencionar algunas aplicaciones en la Tabla 36 se enmarcan sus posibles usos basados en materiales para edificación.

Tabla 36 Aplicaciones y categorías de placas planas NT.

Aplicación	Categoría
Fachadas	A
Tablilla traslapada o de revestimiento	A
Entrepiso	A
Alero o plafón (revestimiento inferior o lateral de aleros); Soffit	A
Sustrato para enlucido o revestimiento	A
Soporte rígido para techos o paredes	A
Tablero o encofrado	A
Sustrato para paredes internas o baldosas para pisos	B
Cielo Raso	B
Sustrato interior para paredes a pintar o empapelar	B
Entrepisos o base de pisos (internos)	B

Estas clasificaciones se manejan en base a las condiciones ambientales a las cuales se someten los paneles de fibrocemento posterior a ello en base a la resistencia mecánica (MOR) se muestran las siguientes clases (Tabla 37).

Tabla 37 Valores mínimos a Módulo de Ruptura en base a la categoría del panel.

Tipo	Categoría A (estado saturado)	Categoría B (estado ambiente)
Clase 1	4 MPa	4 MPa
Clase 2	7 MPa	7 MPa
Clase 3	13 MPa	10 MPa

Al observar la tabla se puede encasillar los valores obtenidos de las pruebas a Módulo de Ruptura, en donde al tomar el mejor grupo de prueba que es el PFC6% con un valor de 6.70 MPa se observa que se encuentra en la Clase 1, muy cercano a la Clase 2. Como tal la clase es una etiqueta que tiene como utilidad denotar la resistencia mínima que posee un fibrocemento.

Mencionado lo anterior el panel se diseñó con el motivo principal de poder hacer una propuesta de fabricación cuyo resultado culminará en que este cumple con los valores mínimos de Módulo de Ruptura como prueba indicadora de que es viable fabricar un tablero a base de Fibras de Caña reduciendo procesos y tratamientos que usualmente se utilizan en fibras vegetales.

Por lo consiguiente los posibles usos del material son un subproducto de la investigación siendo así que por el enfoque y propuesta planteadas en un inicio se establece que sería un panel divisorio o una loseta de recubrimiento cuyo uso sea exclusivo para interiores. En ese caso la Clasificación correspondiente sería un Panel de Fibrocemento divisorio o de revestimiento Categoría B - Clase 1.

Otros usos sugeridos en base a la Tabla 36 serían: sustrato para paredes internas o baldosas para pisos, cielo raso, sustrato interior para paredes a pintar o empapelar y entrepisos o base de pisos (internos), solo por mencionar algunos.

A posteriori con algunos cambios en la composición o adición de otros elementos podría modificarse los parámetros y poder entrar en categoría para uso de exteriores e inclusive poder aumentar su resistencia.

5.5 Discusión de resultados

Después de ensayar los especímenes con las diferentes dosificaciones de Fibra de caña (FC) y testigos, se observa que el grupo de prueba con 6% de adición de fibras (PFC6%) muestra mayor módulo de ruptura a 28 días, respecto a los valores a 7 días en edades tempranas se muestra como mejor espécimen el que contiene 3% de FC (PFC3%), pero su resistencia muestra una disminución del 32.70 % llegados los 28 días, además de observarse pandeo y desmoronamiento, siendo éste el único grupo de prueba que muestra un comportamiento anormal y a la baja, los restantes especímenes con adición de FC muestran una mejora a flexión respecto al testigo, ninguna la empeora o decae por debajo del valor del mismo una vez que se llega a los 28 días para prueba, lo que indica que las fibras cumplen con su función como refuerzo sin mermar mecánicamente al panel.

En si todos los resultados no muestran anomalías a excepción del grupo con adición del 3% de FC (PFC3%); se presenta además una oportunidad de análisis que implementaría la mejora de utilizar de fibra trenzada o no tejida al interior del panel con la misma materia prima ya que los resultados arrojados lo clasifican como un candidato aceptable para ser un fibrocemento entrando a la Clase 1 y acercándose mucho a la Clase 2 (Tabla 38), con eso y algunas mejoras dentro del proceso ya establecido, pueden marcar una diferencia notable y pasar a la siguiente clase y cambiar hasta su uso para exterior.

Tabla 38 Clasificación de paneles tipo B de acuerdo a su MOR.

Categoría B panel en estado ambiente (MPa)	
Clase 1	4
Clase 2	7
Clase 3	13

En apartado de estabilización química, el tratamiento de las fibras de caña fue un éxito en cuanto a la dispersión, recubrimiento y manejabilidad mostrando una buena interacción con las fibras y la pasta de mortero.

Existen más ensayos de acuerdo con la NMX-C-234 para elementos placa de este tipo, pero no son de alta relevancia como las dos pruebas realizadas, se consideran de jerarquía menor para análisis. Como ya se mencionó existen diferentes aplicaciones (Tabla 39) para interiores debido a que falla la prueba de permeabilidad todos los grupos con adición de FC, por lo cual no es necesario realizar las demás pruebas de durabilidad a menos que se busque como objetivo su resistencia al intemperismo.

Tabla 39 Posibles usos para las placas de fibrocemento no comprimidas del tipo B.

Aplicaciones y categorías de placas planas NT para categoría B
Aplicación

-
1. Sustrato para paredes internas o baldosas para pisos.
 2. Cielos rasos.
 3. Sustrato interior para paredes a pintar o empapelar.
 4. Entrepisos o base de pisos (internos).
-

6. CONCLUSIONES

El panel de fibrocemento compuesto por fibra de caña y mortero estructural, denota valores de Módulo de Ruptura aceptables para su uso, esto en base a lo marcado en la (NMX-C-234-ONNCCE, 2015), con resultados mecánicos en todos los grupos no menores de 4 MPa, entrando así en la clasificación de panel Clase 1; inclusive el mejor grupo de ensayo el cual contiene 6.0% de fibra de caña se acercó por poco a ser catalogado como Clase 2 (7 MPa) con un valor promedio de 6.7 MPa, lo que da pauta a su posible aplicación en campo, pero si incluimos la prueba de permeabilidad en la cual fallan todos los grupos con fibra ya que todos permean antes de las 24 h, queda limitada su aplicación. Sin embargo, la metodología empleada en la elaboración de estos elementos hace válida la hipótesis, teniendo como sustento los resultados mecánicos a módulo de ruptura, los cuales cumplen con los mínimos permisibles referenciados por normativa estando por encima un 47.92% el grupo con 3.0% de fibra de caña y un 67.47% para el mejor grupo con un 6.0% de fibra.

Cabe resaltar que al no pasar ninguno de los especímenes con fibra de caña el ensayo de permeabilidad, siendo ésta la segunda más importante después del ensayo a flexión vertical, su aplicación queda limitada, por tanto, utilizando la norma que incluye un apartado para clasificar los elementos a ensayar en base a resultados se coloca dentro de la categoría B, que se define como elementos cuyo uso está limitado solo para interiores ya que no son capaces de resistir la meteorización. Aun así, se abre una oportunidad de investigación, exponiendo una nueva problemática sobre cómo anular la permeabilidad y así garantizar su durabilidad frente a los agentes externos de la atmosfera.

En si la delimitación del análisis de estudio como se mencionó, tuvo su enfoque de forma exclusiva en comprobar si era posible poder elaborar una propuesta metodológica para un panel de fibra de caña, cuyo indicador para la hipótesis fuera el valor mecánico resultante una vez que se adaptará y normaran las características necesarias del elemento placa, por tanto y como ya se mencionó la hipótesis resulta

verdadera, siendo posible elaborar un panel que cumpla con las características base que conforman a este tipo de fibrocementos de tipo placa utilizando una cantidad menor de procesos, materiales y compuestos químicos para su fabricación.

El módulo de elasticidad estático demuestra valores esperados siendo que a mayor cantidad de fibra menor esfuerzo será necesario para generar la misma deformación en un punto, de igual forma se manejan valores entre los tres grupos con un decremento de esfuerzo respecto al panel testigo más o menos constantes de un -12.60% por cada 3.0% de fibra adicionada a la mezcla. En un escenario comparando el promedio del panel testigo contra el panel con adición del 12% de fibra, se registra una disminución de esfuerzo para conseguir la misma deformación de un -71.62% respecto al testigo. Así también de un 35.59% para el grupo con 3.0% de fibra adicionada y un 48.19% para el de 9.0%. Por ello se entiende que este material tiene una alta capacidad de deformación.

La prueba de aislamiento acústico muestra en medida que la adición de fibra de caña por sí sola marca una diferencia de 0.8 dB de reducción acústica en el escenario con la mayor cantidad posible de fibra (12% de fibra adicionada), pero aun así en su mayoría el mortero por sí solo hace un buen trabajo en la dispersión del sonido obteniendo una reducción del 20.7 dB contra los 21.5 dB con el 12% de adición de fibra, claramente el espesor juega un papel importante en este análisis, de aumentarse el mismo también el aislamiento, no hay que descartar también que este panel tiene un espesor de 1.0 cm.

En cuanto a propiedades como densidad y absorción se tiene que: el panel testigo muestra un valor de absorción de agua del 14.78% contra el 26.83% del escenario máximo de fibra adicionada con una diferencia del 12.05%, lógicamente al tratarse de fibras estos son un material el cual está compuesto por vacíos aumentando la capacidad para retener agua dentro de la estructura; ahora para la densidad aparente el testigo arroja un valor de 1786.19 Kg/cm^3 contra los 1407.55 Kg/cm^3 del espécimen con 12% de fibra, teniendo una disminución del peso en un

21.20%, todos los resultados son esperados, siendo este el posible motivo por el cual la prueba de permeabilidad no sea pasada con éxito.

Por último se vuelve a hacer énfasis que los valores mecánicos reflejados utilizando el método desarrollado, que omite a varios de los procesos usuales que se llevan a cabo para fibras leñosas de este tipo, no perjudicó el desempeño final a flexión de los paneles (Módulo de Ruptura), confirmando el objetivo general de la investigación, que es la viabilidad de elaborar un panel de fibrocemento a base de fibra de caña producto del bagazo de caña agroindustrial utilizando como ligante un mortero estructural, con la menor cantidad de recursos y procesos para su elaboración. Ahora se abre una ventana de oportunidad para modificar el proceso establecido, de tal forma que permita reducir al mínimo la permeabilidad, para completar un espectro más amplio de uso conforme a las normativas que garanticen la permanencia del elemento sin afectaciones por meteorización.

7. REFERENCIAS

- Adobe Stock. (12 de Marzo de 2023). Obtenido de Adobe Stock: <https://stock.adobe.com/ar/images/coconut-coir-on-a-wood-table-fiber-from-the-outer-husk-of-the-coconut/294217785>
- Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115-128.
- Arreola Sánchez, M. (2013). *Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto*. Morelia: Universida Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Obtenido de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/3084
- Bender, R. (1976). *Una visión de la construcción industrializada*. Barcelona, España: Gustavo Gill.
- Beraldo, A. L., & Vieira, F. F. (2004). *Compósito ligero con partículas de Guadua*. Pereira: Seminario Internacional de Guadua. Obtenido de <http://apuama.org/composito-ligero-con-particulas-de-guadua/>
- Biagiotti, J., Puglia, D., & Kenny, J. M. (2008). A review on natural fibre- based composites- part I. *ScienceDirect*, 37-41.
- Blanco, A., Fuente, E., Negro, C., & Tijero, J. (2002). Flocculation monitoring: focused beam reflectance measurement as a measurement Tool. *The Canadian Society for Chemical Engineering*, 80(4), 1-7. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.5450800403>
- Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *ScienceDirect*, 24, 221-274.

- Brett, C., & ADAS, R. (s.f.). Industrial Fibres: Recent and Current Developments. *Proceedings of the Symposium on Natural Fibres*, 71-82. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i0709e/i0709e10.pdf>
- Cabral, M. R., Nakanishi, E. Y., Dos Santos, V., Palacios, J. H., Godbout, S., Savastano Junior, H., & Fiorelli, J. (2018). Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites. *Archives of civil and mechanical engineering*, 1092-1102. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S164496651830030X>
- Cevallos Orbe, M. A. (2011). *Elaboración de paneles ligeros a base de bagazo de caña de azúcar aglomerado con cemento portland*. LOJA, Ecuador: Universidad Nacional de Loja.
- Claramunt Blanes, J. (2011). *Utilització de fibres vegetals per a l'elaboració de morters de ciment d'altas prestacions (SHCC)*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cobrerós Rodríguez, C. (2009). *Uso de Fibras Vegetales procedentes de Explotaciones Agrícolas en la Edificación Sostenible Tesina de grado de Maestría*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cobrerós Rodríguez, C. (2015). *Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Cuchí, A. (2009). *Apuntes de clase Asignatura Impacto Ambiental en la arquitectura*. (M. A. 2008-2009, Ed.) Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cuevas Pérez, J. S. (2012). *Sistematización en el diseño de una vivienda modular con estructura metálica y paneles de concreto*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/582>

Díaz, D. A. (2003). *Estudio sobre sistemas constructivos prefabricados aplicables a la construcción de Guatemala*. Guatemala.

EMMEDUE. (Noviembre de 2022). *mdue.it*. Obtenido de <https://www.mdue.it/es/pannello-prefabbricato.php>

FAO. (2022). *Food and agriculture Organization of the United Nations*. Obtenido de Future Fibers: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/coir/en/>

FAO. (12 de Marzo de 2023). *Fibras del futuro*. Obtenido de <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/es/>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibres. *37*, 1552-1596.

Fernández Rodríguez, J., & Díaz Hernández, N. (Enero-Abril de 2017). Evaluación de un material compuesto reforzado con fibras de bagazo en matriz de cemento. *ICIDCA. Sobre derivados de la caña de azúcar*, 51(1), 53-59.

Fernández-Ordóñez, D., & López Vidal, A. (2015). La construcción con prefabricados de concreto: una historia por escribir. *Noticreto*(133), 1-2.

Fernando Martínez, J. (06 de Junio de 2013). *Formas Tpermias S.A. de C.V.* Obtenido de <http://bienesraicestrebol.blogspot.com/2013/06/un-proyecto-fuera-de-serie-en-honduras.html?m=1>

Fördös, Z. (1988). Natural or modified cellulose fibres as reinforced in cement composites. *Natural fibre reinforced cement and concrete*, V, 173-207.

García Matos, C. J. (2016). *Estudio del yeso tradicional y sus aplicaciones en la arquitectura del pallars sobirá*. Barcelona: Universidad de Barcelona. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/46111557.pdf>

Girón Figueroa, M. d. (2014). *Uso y aplicación del método constructivo electropanel*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Arquitectura. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02_3738.pdf

Google Earth. (2023).

Gram, H. E. (1988). Natural fibre concrete roofing. *Natural fibre reinforced cement and concrete*, V, 256-285.

Grupo FRERES. (2020). *habitissimo*. Obtenido de https://fotos.habitissimo.com.mx/foto/colocacion-de-faldon-de-durock_230771

Guerra Hernández , E. (2004). *Prefabricados de concreto en la industria de la construcción*. CDMX: Instituto Tecnológico de la Construcción. Obtenido de https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Licenciatura/Guerra_Hernandez_Elizabeth_44724.pdf

Hebel. (Noviembre de 2022). *Panel Hebel para losa de mampostería*. Obtenido de <https://www.hebel.mx/pdf/guias-de-instalacion/Panel%20Hebel%20Losa%20Sobre%20Mamposteria.pdf>

ICIDCA. (s.f.). *Características y dimensiones del bagazo de caña de ingenios azucareros*. La Habana: Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar.

Jardín Botánico Atlántico de Gijón. (Julio de 2009). *La fibra sensible*. Obtenido de <https://studylib.es/doc/6347207/la-fibra-sensible---jard%C3%ADn-bot%C3%A1nico>

Jiménez , A. S. (Octubre-Noviembre de 1997). El bagazo como fibra alternativa. *MARI-PAPEL*, 5(5), 17-23.

John, M., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydr Polym. ScienceDirect*, 71, 343-364.

Juarez Alvarado , C. A. (2002). *Concreto Base Cemento Portland Reforzado con Fibras Naturales (Agave Lechuguilla), como Materiales para Construcción en*

México. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/5833>

Khorami, M., & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: wheat and eucalyptus. *Construction and building materials*, 3661-3667. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811000985>

LBS. (Noviembre de 2022). <http://lightbuilding.com.mx>. Obtenido de <http://lightbuilding.com.mx/productos/panel-divisorio>

Llerena Encalada, A. (2014). *Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales: Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín*. Barcelona: ESTAB. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/41816044.pdf>

Lopez Barrios , N. J., & Valencia Gualdron, C. M. (2006). *Elaboración de paneles prefabricados para muros divisorios a partir de bagazo de caña de azúcar y cemento*. BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SANTANDER. Obtenido de <https://silo.tips/download/elaboracion-de-paneles-prefabricados-para-muros-divisorios-a-partir-de-bagazo-de>

López Barrios, N. J., & Valencia Gualdron, C. M. (2006). *Elaboración de paneles prefabricados para muros divisorios a partir de bagazo de caña de azúcar y cemento*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Obtenido de <https://silo.tips/download/elaboracion-de-paneles-prefabricados-para-muros-divisorios-a-partir-de-bagazo-de>

López Flores, L. E. (2019). *Diseño de sistemas de muros modulares con facultad de reutilización y desmontaje para una vivienda replicable de estructura de acero*. Santiago de Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.

- López Moreno, J. H. (7 de Junio de 2017). Obtenido de Informeagricola.com:
<https://informeagricola.com/reacciona-el-colegio-de-agronomos-sobre-el-canamo-industrial/>
- Lozano Zamora, L. V., & Rojas Fraile, E. A. (2019). *Elaboración de paneles termoaislantes para cubierta a partir de fibras de bagazo de la caña de azúcar*. Bogotá: Universidad La Gran Colombia.
- Menegotto, M. (2015). La prefabricación en la construcción en Europa-una reflexión historica. *Planta de hormigón internacional*, 20-27.
- Mondragón Martínez, S. (2021). *Caracterización físico mecánica de mortero de uso estructural con agregado pétreo del Estado de Michoacán*. Morelia: Universidad Michoacanan de San Nicolás de Hidalgo.
- Monserrat, J. M. (2009). *Fibras vegetales, las plantas nos ayudaron a vivir*. Barcelona: Ajuntament de Barcelona.
- Nawrath Barros, S. I. (2015). *Estudio de la sepiola y PVA en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de fibrocemento reforzado con fibra de Ulex Europaeus*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- N-CMT-2-01-004/02. (2002). *Características de los materiales - Materiales para estructuras- Materiales para mamposterias- Morteros*. CMT.
- NMX-AA-034-SCFI. (2001). *Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Secretaría de economía.
- NMX-AA-036-SCFI. (2001). *Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Secretaría de Economía.

- NMX-AA-072-SCFI. (2001). *Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Secretaría de Economía.
- NMX-AA-074. (1981). *Análisis de agua – medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba*. Secretaría de economía.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento para Albañilería (mortero) - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-030-ONNCCE-2004. (s.f.). *Industria de la construcción-agregados-muestreo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-057-ONNCCE-2015. (s.f.). *Industria de la construcción - cementantes hidráulicos - determinación de la consistencia normal*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-059-ONNCCE-2017. (s.f.). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (método vicat)*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción – Agregados – Masa Volumétrica – Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

- NMX-C-077. (1997). *Industria de la Construcción – Agregados para Concreto – Análisis Granulométrico – Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-085-ONNCCE. (2015). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos – determinación estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2008). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-128-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción – Concreto Sometido a Compresión – Determinación del Modulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-144-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Requisitos para el Aparato usado en la Determinación de la Fluidéz de Morteros*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-152-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos – Determinación de la Densidad*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

- NMX-C-165-ONNCCE. (2020). *Industria de la construcción-agregados para concreto- determinación de la reactividad potencial*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-170-ONNCCE-2019. (s.f.). *Industria de la Construcción-Agregados- Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para los ensayos*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-234-ONNCCE. (2015). *Industria de la construcción - Fibrocemento - Placas planas sin comprimir NT - Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-486-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Mampostería - Mortero para uso estructural - Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NOM-B-231. (1990). *Cribas para la clasificación de materiales granulares*. Las Normas Oficiales Mexicanas.
- Novas Cabrera, J. A. (2010). *Sistemas constructivos prefabricados aplicables a la construcción de edificaciones en países en desarrollo*. Madrid.
- Osorio Saraz, J., Varón Aristizabal, F., & Herrera Mejía, J. (2007). *Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n153/a08v74n153.pdf>

- Panoramaagrario.com. (18 de Julio de 2023). *Panoramaagrario.com*. Obtenido de <https://panoramaagrario.com/2014/01/alimentos-para-vacas-lecheras/bagazo-cana-azucar/>
- Prabakar, J., & Sridhar, R. S. (2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, 16, 123-131.
- Reid, D. A. (1980). *Principios de construcción*. España: Gustavo Gili.
- Roman, L. C., Martello, L. S., & Savastano, H. (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cementitious roofing tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*, 22(4), 668-674.
- Rowell, R. M., Young, R. A., & Rowell, J. K. (1997). *Paper and Composites from Agro-Based Resources*. CRC Press, Inc.
- Rutiaga, Q. J., Vargas, R. J., & Sanjuán, D. R. (2002). Propiedades de resistencia de una pulpa kraft de pino mezclada con médula de bagazo de caña de azúcar. *Madera y Boques*, 8(2), 17-26.
- Ségalen, H. A. (2005). *Le Chanvre En France: Cannabis Sativa L. Vulgaris*. Rodez: Le Rouergue.
- Sera, E. E. (1990). *Natural Fibers as Reinforcement* (Vol. 20). Journal of Ferrocement.
- Socarrás Cordoví, Y., & Vidaud Quintana, I. N. (2017). Precast against requesting a necessary alternative in the current precast concrete. (C. d. Cuba, Ed.) *Ciencia en su PC*(1), 104-115. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1813/181351125008/html/>
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1993). *Materiales de construcción apropiados*. London, Reino Unido: SKAT & IT Publications.

- Suddel, B. C., & Rosemaund, A. (2009). Industrial Fibres: Recent and Current Developments. *Proceedings of the Symposium on Natural Fibres*, 71-73. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i0709e/i0709e10.pdf>
- Tonali, G. H., Santos, S. F., Savastano, H., Delvasto, H., Mejía de Gutiérrez, R., & Lopez de Murphy, M. D. (2011). Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing with fique fibre. *Cem Concr Compos*, 32, 225-232.
- TRUPAL. (Diciembre de 2022). *trupal.com.p*. Obtenido de <https://www.trupal.com.pe/blog/bagazo-de-cana-de-azucar-materia-prima-para-la-produccion-de-empaques-2/>
- Wikimedia Commons. (12 de Marzo de 2023). Obtenido de WikimediaCommons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Abaca_fiber_drying_in_Abaca_farm,_Costa_Rica.jpg
- Zacatenco Aguilar, J. (1996). *Construcción de una casa-habitación mediante paneles prefabricados (con estructura de acero y núcleo de poliuretano)*. CDMC: Instituto Tecnológico de la Construcción. Obtenido de https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Licenciatura/Zacatenco_Aguilar_Jesus_44646.pdf