



ECONOMÍA CIRCULAR

UN APORTE A TRAVÉS DEL USO DEL MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES



Universidad Francisco
de Paula Santander
Vigilada Mineducación

Jorge Sánchez Molina
José Daniel Palacios Pabón
Jessica Viviana Sánchez Zúñiga



Jorge Sánchez Molina

Doctor en Avances en Ingeniería de los Materiales y Energías, Magíster en Gerencia de Empresas, Especialista en Gerencia de Empresas, Especialista en Aseguramiento, Ingeniero Químico y Tecnólogo en Laboratorio de Ingeniería. Como miembro de la Universidad Francisco de Paula Santander se ha desempeñado en los cargos de: Rector, Vicerrector Administrativo, Vicerrector Asistente de Investigación y Extensión, Decano (E) de la Facultad de Ciencias Básicas, director de Ingeniería de Producción Industrial, director de departamento (E) de Procesos Industriales, director (E) Plan de estudios Especialización en Aseguramiento de Calidad y jefe (E) de biblioteca. Director General del Centro de Investigación en Materiales Cerámicos (CIMAC), director del Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica (GITEC) y docente titular.

Se destaca su trayectoria en el campo de la investigación científica como investigador principal de proyectos de cofinanciación por Colciencias, autor y coautor de más de 80 artículos científicos publicados en revistas indexadas y más de 15 libros resultados de investigación, ha presentado más de 65 ponencias en eventos científicos nacionales e internacionales, tutor de jóvenes investigadores e innovadores, director de más de 60 proyectos de grado en los que se incluyen trabajos de investigación a nivel de doctorado, maestría y pregrado e inventor de 8 productos tecnológicos con patentes de innovación y 4 productos radicados ante la Superintendencia de Industria y Comercio para solicitud de patente de invención. Su trayectoria le ha permitido obtener la categoría de Investigador Senior por Minciencias en la convocatoria 894 de 2021.

ECONOMÍA CIRCULAR

**UN APORTE A TRAVÉS DEL USO DE
MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO
CON FIBRAS VEGETALES**

JORGE SÁNCHEZ MOLINA
JOSÉ DANIEL PALACIOS PABÓN
JESSICA VIVIANA SÁNCHEZ ZÚÑIGA

Sánchez Molina, Jorge, autor

Economía circular : un aporte a través del uso del microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales / Jorge Sánchez Molina, José Daniel Palacios Pabón, Jessica Viviana Sánchez Zúñiga -- San José de Cúcuta : Universidad Francisco de Paula Santander ; Bogotá : Ecoe Ediciones, 2023.

127 páginas. -- (Ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines. Ingeniería civil y afines)

Incluye datos curriculares de los autores -- Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-503-643-7 (impreso) -- 978-958-503-644-4 (pdf)

1. Aprovechamiento de residuos (Construcción) - Investigaciones 2. Industria de la construcción - Residuos - Investigaciones 3. Residuos industriales - Reciclaje - Investigaciones 4. Residuos agrícolas - Reciclaje - Investigaciones 5. Materiales de construcción - Investigaciones I. Palacios Pabón, José Daniel, autor II. Sánchez Zúñiga, Jessica Viviana, autor

CDD: 628.74 ed. 23

CO-BoBN- a1113548



Área: Ingeniería, Arquitectura, Urbanismo y afines

Subárea: Ingeniería Civil y afines



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Vigilada Mineducación

© Jorge Sánchez Molina
© José Daniel Palacios Pabón
© Jessica Viviana Sánchez Zúñiga

© Universidad Francisco
de Paula Santander
Avenida Gran Colombia
No. 12E-96, Barrio Colsag
San José de Cúcuta - Colombia
Teléfono: 607 577 6655

► Ecoe Ediciones S.A.S.
info@ecoeediciones.com
www.ecoeediciones.com
Carrera 19 # 63 C 32 - Tel.: 919 80 02
Bogotá, Colombia

Primera edición: Bogotá, marzo del 2023

ISBN: 978-958-503-643-7
e-ISBN: 978-958-503-644-4

Directora editorial: Claudia Garay Castro
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.
Corrección de estilo: Maria del Pilar Osorio
Diagramación: Sindy Nicol Pulido Casallas
Carátula: -----
Impresión: Xpress Estudio Gráfico y digital
Carrera 69 H # 77 - 40

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados



DEDICATORIA

*A mi hija, la Arquitecta Jessica Viviana que es la luz de mis ojos, por apoyarme
constantemente en mi vida.*

Jorge Sánchez Molina

*A mis padres Idalidez Pabón y José Palacios por el amor que les tengo y por ser siempre mi
luz y mi guía a lo largo de mi vida.*

José Daniel Palacios Pabón

*A mi esposo, Johan Peñaranda, a mi padre Jorge Sánchez, a mi madre Janeth Zúñiga, Por el
infinito amor que les tengo.*

Jessica Viviana Sánchez Zúñiga

CONTENIDO

PRÓLOGO	VIII
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES, COMPUESTOS DE MICROCONCRETO	1
Fundamentos del microconcreto	3
Compuestos del microconcreto	3
Cemento Portland	3
Agregado fino	5
Agua de mezclado	6
Aditivos para mezclas de microconcreto fibro-reforzado.....	7
Fibras	10
Fibras de acero	11
Fibras de vidrio	12
Fibras sintéticas.....	15
Fibras de origen natural.....	16
CAPÍTULO 2. DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE MICROCONCRETO	29
Composición: diseño de mezcla de microconcreto.....	31
Selección de las características de la mezcla	31
Proporciónamiento de la mezcla de microconcreto.....	31
Dosificación y mezclado del microconcreto	37
Microconcreto premezclado	37
Colocado del microconcreto	39
Preparación de la colocación	39
Técnicas especiales de colocación	40

Curado del microconcreto.....	41
Cambios volumétricos en el microconcreto.....	42
Propiedades mecánicas del microconcreto	43
Resistencia a la compresión.....	43
Módulo de elasticidad.....	44
Deflexión y módulo de rotura	45
CAPÍTULO 3. MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO	47
Composición: mezcla de control	49
Trabajabilidad: fluidez de la mezcla.....	49
Propiedades físicas y mecánicas.....	53
CAPÍTULO 4. MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO	65
Utilidad en la industria de la construcción y la arquitectura	67
Microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio.....	67
Microconcreto fibro-reforzado con fibra de acero	73
Microconcreto fibro-reforzado con fibras sintéticas	75
Microconcreto fibro-reforzado con Fibra vegetales	76
CAPÍTULO 5. PLACAS DE ENTREPISO EN MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO...	79
Diseño de placas macizas en microconcreto reforzado y fibro-reforzado	81
Diseño de placas aligeradas con vigueta de concreto reforzado y loseta en microconcreto reforzado y fibro-reforzado.....	96
Comparación entre microconcreto reforzado y fibro-reforzado con fibras	102
CAPÍTULO 6. VIVIENDAS MODULARES DE MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO	107
Propuesta del diseño arquitectónico de vivienda modular	109
Requerimientos de tamaño de los muros de mampostería que se debe cumplir según NSR-10.....	110
Diseño arquitectónico de bloques de mampostería con microconcretos fibro-reforzados	111
Análisis estructural por medio de modelación en software Etabs®	112
Ecuaciones utilizadas para el cálculo estructural de muros.....	113
Propiedades mecánicas teóricas de las unidades de mampostería fabricadas con microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC)	115
Propiedades mecánicas teóricas de las unidades de mampostería fabricadas con microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio AR (GRC).....	116
Propiedades mecánicas teóricas de las unidades de mampostería fabricadas con microconcreto fibro-reforzadas con fibras de fique (FRC)	118
Modelación estructural de diseño arquitectónico de vivienda de un piso en placas tipo mampostería de microconcreto	120
REFERENCIAS	123



PRÓLOGO

El presente libro hace parte de los resultados de investigación de un proyecto cofinanciado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y la Universidad Francisco de Paula Santander. El proyecto tuvo como finalidad el desarrollo de un producto elaborado con microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio y de origen vegetal, como lo son el fique, el bambú, la palma de plátano y el bagazo de caña de azúcar.

El libro cuenta con seis capítulos: el primer capítulo hace una reseña de las generalidades, fundamentos y compuestos que conforman las mezclas de concreto, lo cual incluye los materiales básicos y aditivos, así como sus características y aportes de resistencia y durabilidad al compuesto. El segundo capítulo hace una descripción del diseño y control del microconcreto como un compuesto de mortero que será base para el desarrollo de un material fibro-reforzado, ensayos, proporcionamiento, forma de mezclado y colocación, sus características, propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Ya habiendo descrito los fundamentos del microconcreto simple, se llega al capítulo 3, donde se describen las consecuencias, ventajas y desventajas de adicionar fibras de refuerzo a las mezclas de concreto, procedimiento de amasado, proporcionamiento, ensayos y caracterización de las propiedades mecánicas del compuesto frente a un compuesto sin adición de fibras. Para este capítulo se desarrollaron mezclas de concreto con diferentes proporciones y diferentes materias primas, dentro de las cuales destacan el fique, el bambú, la palma de plátano y el bagazo de caña de azúcar.

El capítulo 4 describe los diferentes usos que tiene el concreto reforzado con fibras en la industria de la construcción y de la arquitectura, lo que da un punto de partida para los

dos capítulos posteriores, en los cuales se utilizan los resultados determinados durante la caracterización del microconcreto simple y fibro-reforzado comparando su funcionalidad en la construcción de viviendas. Por una parte, el capítulo 5 muestra el análisis y diseño de placas ubicadas horizontalmente para sistemas de entrepiso y de cubiertas fabricadas con microconcreto simple y fibro-reforzado, mientras que el capítulo 6 muestra el análisis y diseño de placas ubicadas verticalmente para muros de tipo mampostería en la edificación de viviendas modulares fabricadas con microconcreto simple y fibro-reforzado.



Capítulo 1

**Generalidades, compuestos de
microconcreto**

En el presente capítulo se describen los fundamentos del microconcreto y sus respectivos compuestos. La principal finalidad del capítulo es describir cuáles son los puntos básicos y/o generalidades que se deben tener en cuenta para el desarrollo y fabricación de microconcreto simple y fibro-reforzado.

Fundamentos del microconcreto

El microconcreto es un compuesto de materiales finos que, mezclados homogéneamente, forman una masa de mortero moldeable. Sus principales componentes son la pasta de cemento, el agua y los aditivos, junto con agregado fino, arena. Cuando se seca este compuesto se forma una masa endurecida similar a una roca que, dependiendo de la proporción de sus componentes, puede variar su resistencia y durabilidad. El microconcreto, utilizado como mortero de base para la elaboración de material fibro-reforzado, varía ligeramente de otros tipos de morteros utilizados para revoque de muros o para pegar bloques de mampostería y afinado de pisos. Dentro de las variaciones más significativas se encuentra su alta resistencia y la alta fluidez que debe poseer el material.

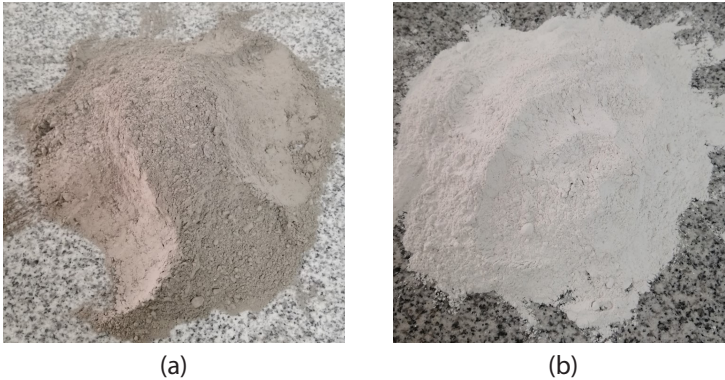
La calidad del microconcreto depende directamente de la calidad de los materiales utilizados para su fabricación. El cemento utilizado generalmente es un cemento hidráulico, es decir, aquel cemento que reacciona con el agua, comúnmente conocido como cemento Portland; sin embargo, se debe tener en cuenta que la adición de agua influye directamente con la resistencia del compuesto, es decir, a mayor cantidad de agua añadida menor será la resistencia del mortero, por lo tanto, para fluidizar las mezclas de microconcreto es necesaria la utilización de aditivos plastificantes o fluidizantes. Por otra parte, para la fabricación de microconcreto se sugiere la utilización de un agregado fino de alta calidad, es por ello que se hace uso de arena de cuarzo por sus excelentes propiedades mecánicas.

Compuestos del microconcreto

El microconcreto se compone de cemento hidráulico (cemento portland), agregado fino (arena), agua y aditivos, dicho compuesto se fibro-refuerza con fibras de diferentes orígenes descritas en ítems posteriores. A continuación, se describe cada uno de las materias primas utilizadas en el desarrollo y fabricación de microconcreto fibro-reforzado.

Cemento Portland

La pasta de cemento hidráulico es aquel material que tiene la propiedad de fraguar y endurecerse por reacción química con el agua, formando un compuesto con buenas propiedades aglutinantes. Siendo el “cemento Portland” el material cementante hidráulico más utilizado en la industria de la construcción. Su principal función es aglutinar los materiales pétreos finos y gruesos para formar el concreto endurecido (Instituto del Concreto, 1997). La Figura 1 muestra la forma física del cemento Portland, a la izquierda el cemento gris y a la derecha el cemento blanco. Además del color, el cemento no varía significativamente en sus propiedades, por lo que la elección del color solo tendrá fines arquitectónicos, ya que el cemento blanco es más utilizado cuando se desea añadir algún colorante a la mezcla de concreto, mientras que el gris da acabados rústicos y es más económico.

Figura 1. Cemento portland tipo UG de uso general (a) cemento gris (b) cemento blanco

Fuente: elaboración propia.

El material cementante utilizado para desarrollar las mezclas de microconcreto fibro-reforzado es el cemento gris de uso general, el cual se utiliza en la construcción en general y que, además, cumple con la Norma Técnica Colombiana (NTC 121, 1982). La Tabla 1 muestra las características y ficha técnica del cemento utilizado para rollar las mezclas de microconcreto fibro-reforzado.

Tabla 1. Características y ficha técnica del cemento utilizado

Parámetros físicos		Norma de ensayo	NTC 121 tipo UG
Finura	Blaine, mín. (cm ² /g)	NTC 33	A
	Retenido tamiz 45 μm (%)	NTC 294	A
Cambio de longitud por autoclave, expansión, máx (%)		NTC 107	0.80
Tiempo de fraguado, ensayo de Vicat	No menos de, minutos	NTC 118	45
	No más de, minutos	NTC 118	420
Contenido de aire en volumen de mortero, máx. (%)		NTC 224	12
Expansión de barras de morteros a 14 días, máx		NTC 4927	0.020
Resistencia mínima a la compresión (MPa)			
3 días		NTC 220	8.0
7 días		NTC 220	15.0
28 días		NTC 220	24.0

Fuente: ficha técnica de cemento gris para uso general Argos.

Agregado fino

El agregado fino se considera como el material inerte que compone el microconcreto, debido a que este material no interviene en la reacción química entre el cemento y el agua. Dentro de las propiedades del agregado fino se tiene que debe ser un material durable, fuerte, limpio, duro, resistente y libre de impurezas, como lo son el polvo, limo, pizarra, álcalis y materia orgánica. El agregado fino debe seleccionarse de tal forma que no presente más de un 5 % de partículas de arcilla o limo ni más de un 1.5 % de materia orgánica. Se considera como agregado fino a todas aquellas partículas que pasan el tamiz de 3/8", es decir, todas las partículas inferiores a 9.5 mm de diámetro (Harmsen, 2002). Sin embargo, para el microconcreto el agregado fino debe tener partículas inferiores a 1.2 mm, el cual se considera como un tipo de agregado grueso (ver Tabla 2).

Tabla 2. Características y ficha técnica de la arena de cuarzo

Parámetro	Especificación
Consistencia	Sólido
Composición	Mezcla de arenas de granulometría definido
Fina	0.07 – 0.3 mm
Mediana	0.3 – 0.6 mm
Gruesa	0.6 – 1.2 mm
Densidad absoluta	2.5 – 2.65 kg/L

Fuente: ficha técnica de la arena de cuarzo (SumiGlas).

El agregado fino con el que se desarrollan las mezclas de microconcreto fibro-reforzado es principalmente arena de cuarzo. La Tabla 2 muestra las características y ficha técnica de la arena de cuarzo, la cual tiene muchos usos dependiendo del tamaño de las partículas y su granulometría. Los tamaños de partículas más grandes son más adecuados para realizar suavizado destinado a nivelar soleras cementosas, también son adecuados para fabricar soleras epoxídicas. La arena de cuarzo de 0 a 5 mm es una arena de gran pureza, seleccionada con granulometría controlada, generalmente se clasifica en tres tamaños de partícula. La aplicación principal de este tipo de agregado es para la fabricación de morteros y afinados de piso, cuando se requiere resistencia mecánica alta. Su contenido en humedad es variable. La Figura 2 muestra la forma física de la arena de cuarzo, material utilizado como agregado fino en la fabricación de microconcreto.

Figura 2. Agregado fino, arena de cuarzo de tamaño de partícula mediano



Fuente: elaboración propia.

Agua de mezclado

El agua de mezclado, como material necesario para la reacción química con el cemento hidráulico, cumple dos funciones principales en la elaboración de microconcreto: hidratar al cemento hidráulico para su correcta reacción en la etapa de fraguado y endurecimiento; proporcionar al microconcreto fluidez, manejabilidad y trabajabilidad. En condiciones normales, se estima que la cantidad de agua necesaria para reaccionar con el cemento equivale al 25% del peso del cemento, ya que el resto de agua que no fragua con el cemento se evapora durante el mezclado y endurecimiento del concreto, de tal forma que el agua que no fragua es la responsable de la retracción del concreto y de la formación de porosidad interna que se llena parcialmente de aire que, de no ser controlado, puede presentarse una disminución en la resistencia del compuesto (Porrero *et al.*, 2009).

Por otra parte, el agua de mezclado necesaria para que no afecte las características de fraguado y de resistencia del concreto debe cumplir con los parámetros establecidos en las Normas Técnicas Colombiana, NTC 118 (2004) y NTC 220 (2004), medidos a través de ensayos de caracterización del agua. Algunos de los componentes presentes en el agua de mezclado que pueden afectar la funcionalidad del concreto es la presencia de cloruros, los cuales pueden causar problemas potenciales con algunos componentes del cemento o causar corrosión en los metales embebidos en el concreto como lo es el caso del concreto reforzado. Según la NTC 118 (2004) y NTC 220 (2004) el contenido de cloruros en el agua de mezclado no debe exceder 500 miligramos por litro de agua para concreto preesforzado o de 1000 miligramos por litro de agua para obras de concreto reforzado en condiciones extremas.

Figura 3. Agua potable para mezclado del mortero

Fuente: elaboración propia.

La imagen mostrada en la Figura 3 presenta el agua utilizada para la fabricación de microconcreto que fue foco de estudio en la investigación que dio como fin el presente libro. Para fines prácticos, se determinó que el agua potable es un líquido que cumple con los requisitos de las normas NTC 118 (2004) y NTC 220 (2004) y, por lo tanto, puede ser utilizada como agua de mezclado.

Aditivos para mezclas de microconcreto fibro-reforzado

Los aditivos son materiales que se adicionan a las mezclas de microconcreto con el fin de añadir una cualidad específica al mismo. Para el caso de las mezclas de microconcreto fibro-reforzado se añade Forton® VF-774 y Superplastificante SikaPlast® MO. El Forton es una resina que contribuye principalmente con la dispersión de las fibras dentro de las mezclas de microconcreto y mejora las propiedades mecánicas del mismo. Por otra parte, el Superplastificante es un agente fluidizante que contribuye con la trabajabilidad de las mezclas.

Forton® VF-774

El aditivo Forton® VF-774 es una resina que se utiliza como dispersor. El aditivo está compuesto de copolímero totalmente acrílico (51 % sólidos). Generalmente, esta resina se utiliza el proceso de producción de concreto fibro-reforzado con fibra de vidrio (GRC). VF-774 es estable y duradera ante el elevado pH del cemento hidráulico Portland en el que se basa el material compuesto de GRC. Las propiedades líquidas del material son sólidos por peso 51 %, viscosidad de 100-300 cps, pH de 8-10; densidad a 20 °C de 1055 kg/m³, Tg de 11°C, tamaño de las partículas de 0.13-0.25 mm y gravilla de 0-50 ppm (Sumiglas S.A.®, s.f.).

Figura 4. Resina blanquecina Forton® VF-774

Fuente: elaboración propia.

La imagen mostrada en la Figura 4 presenta la coloración y textura del Forton® VF-774, siendo esta una resina química blanquecina que, al ser adicionado a las mezclas de microconcreto, proporcionan mejoras notables en las propiedades del compuesto. A continuación, en la Tabla 3 se muestran las características a través de la ficha técnica del Forton® VF-774, según la empresa comercializadora Sumiglas S.A.® (s.f.).

Tabla 3. Características y ficha técnica del Forton® VF-774

Descripción		Rango Típico de Propiedades de Premezclado
Densidad (curado)		110 – 130 pcf
Resistencia a la Compresión (Lateral)		6000 – 9000 psi
Flexión	Límite Elástico (Fy)	700 – 1200 psi
	Resistencia a la Rotura (Fu)	1450 – 2000 psi
	Módulo de elasticidad	1.0×10^6 – 2.9×10^6 psi
Tracción Directa	Límite elástico (Ty)	600 – 900 psi
	Resistencia a la Rotura (Tu)	600 – 1000 psi
	Deformación a la rotura	0.1 – 0.2 %
Resistencia al corte	Interlaminar	N/A
	En el plano	600 – 1000 psi
Coeficiente de dilatación térmica		Aprox. 12×10^{-6} in/in/°F
Conductividad Térmica		3.25 – 7.0 Btu/in/h/ft ² /°F
Clasificación Resistencia al Fuego (ASTM E-84)		Clase A/clase 1

Fuente: Sumiglas S.A.®(s.f.).

Dentro de las ventajas de utilizar el Forton® VF-774 están: aumento de la resistencia del concreto endurecido, mejora la trabajabilidad del concreto fresco, utilidad como dispersor de las fibras para generar una mezcla homogénea de concreto, mejor compactación que influye en la impermeabilidad del concreto endurecido y que contribuye con el curado evitando la aparición de grietas tempranas en el concreto durante el fraguado en los primeros días de edad (Sumiglas S.A.®, s.f.).

Superplastificante SikaPlast® MO

SikaPlast® MO (2017) es un aditivo líquido de textura viscosa y color ennegrecido (ver Figura 5) compuesto por resinas sintéticas y polímeros de última tecnología. Su función principal es la de ser un reductor de agua, ya que para mejorar la manejabilidad y trabajabilidad del concreto sin bajar la resistencia del mismo, en lugar de adicionar agua, se debe adicionar un aditivo como lo es el superplastificante SikaPlast® MO (2017). Puede emplearse como plastificante y superplastificante dependiendo la proporción empleada en la etapa de mezclado del concreto. Al hacer uso del superplastificante en una mezcla de concreto de consistencia normal se consigue aumentar la fluidez del compuesto.

Del mismo modo, SikaPlast® MO (2017) cumple con la Norma Técnica Colombiana, NTC 1299 (2008) como un aditivo tipo A o como un aditivo tipo F dependiendo la cantidad empleada en la mezcla. La Figura 5 muestra el superplastificante utilizado para fluidizar las mezclas de microconcreto que fueron foco de estudio para la elaboración del presente libro.

Figura 5. Aditivo fluidizador y Superplastificante SikaPlast® MO



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4 muestra las características y ficha técnica del Superplastificante SikaPlast® MO (2017), donde se puede destacar que es un aditivo que se debe proporcionar en pequeñas medidas, apreciándose que el porcentaje de uso, con respecto al peso del cemento no debe superar el 2%, ya que si se supera dicha barrera se podría estar afectando la reacción química que se debe existir entre el cemento y el agua para garantizar la capacidad de resistencia para la que fue diseñado.

Tabla 4. Características y ficha técnica del Superplastificante SikaPlast® M0

Parámetro	Descripción
Empaques	Garrafa de 5 kg. Cuñete de 20 kg. Tambor de 230 kg. Granel.
Apariencia/Color	Líquido café, olor característico.
Vida en el recipiente	Un (1) año desde la fecha de producción.
Condiciones de almacenamiento	Almacenar en sitio fresco y bajo techo a temperaturas entre 4 y 32 °C y en su envase original bien cerrado.
Densidad	1.07 kg/L \pm 0.02 kg/L
pH	Mín. 4.0
Dosificación recomendada	Entre el 0.5 y 2.0 % del peso del cemento (de 250 g a 1000 g por bulto de cemento de 50 kg).

Fuente: SikaPlast® M0 (2017).

Fibras

Las fibras para reforzar mezclas de concreto son utilizadas desde la antigüedad, dado que es un material que aporta excelentes propiedades mecánicas al material, específicamente, en la resistencia a la flexión. Dentro de los materiales con los que se fabrican las fibras más utilizadas se encuentran: acero, vidrio, plástico, carbono y materiales naturales, celulosa de la madera, pieles y/o plumas de animales (véase la Figura 6). Las fibras se desarrollan, según su procedencia, en diferentes formas, tamaños y espesores, ya que pueden ser cilíndricas, llanas u onduladas. La longitud típica de las fibras varía entre 5 mm y 120 mm y su espesor varía entre 5 μ m y 750 μ m. Este material se añade a las mezclas de concreto durante su proceso de mezclado, lo que garantiza una correcta adherencia entre la fibra y la matriz del mortero (Kosmatha *et al.*, 2004). Los factores principales que controlan el desempeño del compuesto son las propiedades físicas y mecánicas de las fibras y de la matriz de mortero y la resistencia de adherencia entre las fibras y la matriz de mortero.

Figura 6. Diferentes tipos de fibras utilizadas para reforzar mezclas de microconcreto

Fuente: elaboración propia.

Fibras de acero

El estudio de las fibras de acero se ha extendido por las ventajas que proporciona al concreto, como lo son la absorción de la energía después del agrietamiento, mejorando así la tenacidad a la flexión de los elementos, sobre todo en placas y vigas aéreas; aumenta significativamente la resistencia a la tracción, cortante y torsión; e incrementa la durabilidad, resistencia al impacto y a la fatiga, además de mejorar el agrietamiento temprano por la retracción durante el fraguado (Carrillo *et al.*, 2013).

Las fibras de acero son filamentos cortos provenientes de pedazos discontinuos de acero cuya relación de esbeltez es alta. Dependiendo del diámetro del filamento, se puede categorizar como micro o macro fibra. Algunas de estas fibras tienen formas rústicas y extremos conformados que contribuyen a una mejor adherencia entre la fibra y la matriz de mortero, es decir, poseen variaciones en su forma para generar una mejor adherencia entre las fibras y la matriz de mortero y así maximizar los beneficios del fibro-refuerzo. Tal es el caso del estudio realizado por Campoy *et al.* (2021) donde se utilizaron para la investigación fibras onduladas y fibras con ganchos de acero en los extremos. Siendo las fibras con ganchos de acero las que mejor comportamiento presentaron, aumentando la resistencia a la flexión y al cizallamiento de las mezclas de concreto (Campoy *et al.*, 2021).

Figura 7. Fibras de acero tipo macro-fibras; especial para concreto lanzado



Fuente: AZAROS. Fibras metálicas (s.f.).

La norma internacional ASTM A820/A820M (2021) presenta una clasificación para este tipo de fibras según su proceso de fabricación (Kosmatha *et al.*, 2004). Dentro de las que se destacan:

- Tipo I – fibras de alambre estiradas en frío, este tipo de fibras son las más comerciales, por su facilidad de fabricación (ver Figura 7).
- Tipo II – fibras cortadas de hojas o chapas de acero.
- Tipo III – fibras extraídas de fundición, o fusión del acero.
- Tipo IV – fibras de corte de molino.
- Tipo IV – referentes a otros tipos de fibras.

Los volúmenes de fibras de acero utilizados en las mezclas de concreto, generalmente varían entre 0.25 % y 2 %, puesto que volúmenes mayores que 2 % reducen de forma significativa la trabajabilidad del mortero y requieren de un diseño especial de premezclado, además de un diseño especial de colocado en el sitio. Por otra parte, la presencia de fibras afecta ligeramente la resistencia a la compresión, por lo que se debe estudiar la cantidad de fibras que aporte beneficios sin disminuir las propiedades físicas del concreto. La adición del 1.5 % en volumen de fibras aumenta la resistencia a la tracción indirecta hasta un 40 % y la resistencia a la flexión aumenta 1.5 veces más que las mezclas que no incorporan fibras de acero en su desarrollo. También se tiene que las fibras de acero mejoran notoriamente la retracción por fraguado, aunque no afecta dicho proceso sí retrasa la fracturación durante la contracción y mejora la relajación de tensiones por el mecanismo de fluencia (Kosmatha *et al.*, 2004; Carrillo *et al.*, 2013; y Campoy *et al.*, 2021).

Fibras de vidrio

En las últimas décadas las fibras de vidrio se han convertido en el tipo de fibras de mayor uso a nivel de construcción debido a sus excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas. Este tipo de fibras aporta al concreto grandes propiedades de resistencia y flexibilidad (Comino, 1995). Además, por ser un tipo de fibra muy delgada, en comparación a sus homólogos, se puede clasificar como un tipo de microfibra que garantiza aportar resistencia a la flexión a mezclas de concreto (Lalinde, 2020); sin embargo, las fibras de vidrio tienden a generar una reacción alcalina con el cemento hidráulico, lo cual se traduce en que, aunque es un material que aporta muchas propiedades al concreto, este no garantiza una durabilidad adecuada del mismo (Girbés, 2004). Es por ello que en los años más recientes, el estudio de las fibras de vidrio se ha centrado en fibras resistentes al álcali del cemento para reforzar mezclas de microconcreto. Dentro de los diferentes tipos de fibras de vidrio que se utilizan en la construcción se encuentran:

- **Tipo E** o fibras con características dieléctricas: este tipo de filamentos se utilizan para el refuerzo de composites.
- **Tipo R**, ampliamente conocidas como las hebras de mayor resistencia mecánica: son utilizadas para la industria aeronáutica, sobre todo en la fabricación de piezas para aviones.
- **Tipo D** o fibras de vidrio utilizadas en radares.
- **Tipo AR**, que vendrían a ser las fibras con mayor resistencia a los álcalis.
- **Tipo C** o fibras que mejor resistente en aplicaciones de exterior e incluso al contacto con cualquier agente químico.

En una investigación realizada por Kumar *et al.* (2020) se estudió el efecto de la fibra de vidrio dentro de mezclas de concreto. Fabricaron probetas de concreto reforzado con fibras haciendo uso de cemento Portland puzolánico de grado 53, arena típica, grava de forma única (cubos o redondos, perfecto, duro, sólido, bien limpio) y fibra de vidrio tipo AR (Alcalí-Resistente) de 12mm; las cantidades de fibras dentro de las mezclas varían entre el 0 y el 1 % de la masa del concreto; se diseñó un grado de concreto M20 según IS 10262: 2000 para esta mezcla de concreto; se adoptó la relación agua-cemento 0,3; para realizar el análisis de las muestras se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y esfuerzo a la flexión; y se discute el efecto del plastificante sobre la resistencia

a la compresión y la trabajabilidad mediante la realización de una prueba en el hormigón de cemento para aumentar la resistencia y la trabajabilidad. El mejor esfuerzo a la compresión se obtuvo con la adición de 0,33 % y el mejor esfuerzo a la flexión se obtuvo con la adición del 1,0 % (Kumar *et al.*, 2020).

En el proyecto elaborado por Beltrán *et al.* (2013) se desarrolló concreto con fibras textiles de vidrio con el fin de analizar el comportamiento del concreto a flexión según el direccionamiento de las fibras a 0°, 90°, arbitraria, y 0°-90°, dicho ensayo fue realizado según la norma ASTM C974-03 para los especímenes y para el GRC la UNE EN 1170-4:1997, UNE EN 1170-5:1997 y NTC 2871 utilizando una viga simple con método carga en los tercios medios y maquina a flexión con 4 apoyos. Las placas elaboradas para el análisis fueron de 80 cm de longitud, 30 cm de ancho y 3,5 cm de espesor para una carga de diseño de 90 kg, la cual incremento a los 500 kg hasta su rotura. Dentro los materiales principales se usaron el cemento Portland de 25 MPa, arena silícea de 2,7 Kg/L y una variación en la cantidad de fibra de 1,5 % a 3,5 % con relación a/c= 0,37. El diseño de mezcla fue realizado según lo establecido por la American Concrete Institute y fue ajustado para Colombia (Beltrán *et al.*, 2013).

De los resultados se evidencian mejores características físicas con el uso de fibra arbitraria y direccionada a 0°-90°, por lo cual realizan nuevos ensayos con la unión de los dos, alcanzando una resistencia característica de 6,83 MPa y tensión a la rotura hasta de 11,48 MPa a los 28 días, estos resultados se usaron como base para el análisis, diseño y fabricación de la implementación dada en la construcción de un elemento prefabricado que trabaja a flexión (Beltrán *et al.*, 2013).

Por lo general, los microconcreto fibro-reforzados con fibras de vidrio tipo AR se componen principalmente de 4 elementos, además de las propias fibras de material cementante, arena silícea, agua y aditivos. En el proceso de microconcreto premezclado se utilizan porcentajes de fibra del 3 %, relaciones agua/cemento de 0,35 y árido/cemento de 1 (Comino, 1995), (Purnell *et al.*, 1999) y (Lalinde, 2020). En la Tabla 5 se describen los materiales utilizados por algunas referencias bibliográficas, identificadas en bases de datos especializadas para la fabricación de concreto reforzado con fibras de vidrio. Se puede evidenciar en la tabla que más del 80 % de los autores concuerdan en que este tipo de concretos deben fabricarse sin agregado grueso, por lo que para su correcta trabajabilidad y funcionalidad se debe tratar de un mortero o microconcreto, es decir, solo incluir en la mezcla agregado fino.

Tabla 5. Materiales utilizados para fabricación de GRC según diversos autores

Materiales	Yildizel <i>et al.</i> (2020)	Cheng <i>et al.</i> (2019)	Beltrán <i>et al.</i> (2013)	Enfedaque <i>et al.</i> (2010)	Muñoz (2007)
Tipo de Cemento	Cemento Portland blanco (Grado 52.5R)	Cemento Portland grad0 PI 42.5	Portland de alta resistencia – 25 Mpa	Cemento común	Cemento Portland 30 MPa

Materiales	Yildizel <i>et al.</i> (2020)	Cheng <i>et al.</i> (2019)	Beltrán <i>et al.</i> (2013)	Enfedaque <i>et al.</i> (2010)	Muñoz (2007)
Tipo de Agregado Fino (Arena)	Arena de sílice densidad 2.68 g/cm ³	Arena de río partículas menores a 2.36 mm	Arena Silíceas	Arena	Arena común 1.59 kg/Lt
Tipo de agregado grueso (grava)	N/A	N/A	Grava 1.52 kg/Lt -- gravilla 1.60 kg/Lt	N/A	N/A
Tipo de Fibra de Vidrio	Fibra de vidrio tipo AR de 12mm	Fibra de vidrio tipo AR de 12mm	Anti-Crack Tipo AR	Anti-Crack Tipo AR	Fibra de Vidrio Ef.

Fuente: elaborado a partir de Yildizel *et al.* (2020), Cheng *et al.* (2019), Beltrán *et al.* (2013), Enfedaque *et al.* (2010) y Muñoz (2007).

Fibras de vidrio AR Cem-FIL® 60

Para la elaboración del presente libro, se utilizaron fibras de vidrio cortados Cem-FIL® para morteros de reparación y GRC por Premix, puesto que en Colombia no se fabrica este tipo de fibras y, por lo tanto, estas deben ser importadas. La empresa Sumiglas S.A.® (s.f.) realiza importaciones de fibras de vidrio AR Cem-FIL® 60. Este tipo de fibras tiene múltiples usos en el campo de la ingeniería de la construcción y de la arquitectura. En capítulos posteriores de este libro se describen los usos de este material y su estudio en la construcción de viviendas de tipo modular.

Figura 8. Fibras de vidrio alcalí-resistentes tipo AR Cem-FIL® 60



Fuente: elaboración propia.

Las fibras Cem-FIL® cumplen con los estándares de seguridad según la norma internacional ASTM C1666/C1666M (2015). La Tabla 6 muestra las características y ficha técnica de fibras de vidrio AR Cem-FIL® 60 y la Figura 8 muestra la forma física de las fibras de vidrio

alcalí-resistentes tipo AR Cem-FIL® 60. Fibras que fueron utilizadas para la fabricación de microconcreto que fue foco de estudio en la investigación que dio como fin el presente libro.

Tabla 6. Características y ficha técnica de fibras de vidrio AR Cem-FIL® 60

Parámetro	Rango
Longitud de la fibra	12.9 – 13.5 mm
Diámetro del filamento	13.5 µm
Peso específico	2.69 g/cm ³
Cantidad de filamentos aproximados por kg	200 000 000
Humedad	< 0.4 %
Contenido Zirconio (ZrO ₂)	Mínimo: 16.6 %
Temperatura de ablandamiento	850 °C
Resistencia a rotura por tracción	1610 MPa
Módulo de Young	78 000 GPa
Normatividad	UNE EN 1522

Fuente: ficha técnica de fibras de vidrio AR Cem-FIL® 60.

Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas son aquellos tipos de fibras manufacturados por el hombre. Siendo el resultado de múltiples investigaciones y del desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Dentro de los materiales para fabricación de fibras sintéticas se encuentran los acrílicos, *nylon*, poliéster, Polietileno, Polipropileno y el Polietilentereftalato (PET), siendo este último el que mayor estudio ha tenido en las últimas décadas. Tal es el caso de lo investigado por Quintero y Mahecha (2016), Peñaranda y Rincon (2016) y Tami y Landínez (2019), quienes reforzaron mezclas de concreto con macro-fibras P en adiciones hasta del 5 %. Según lo reportado por los investigadores, se puede concluir que este tipo de fibras mejora la capacidad de resistencia a la flexión y tensión; sin embargo, si no se controla la cantidad de fibras se puede desmejorar la resistencia a la compresión.

Las fibras sintéticas, al igual que las de vidrio, contribuyen con una mejoría notoria durante la edad temprana del concreto, evitando la fisuración por contracción plástica. Sin embargo, presentan algunas desventajas frente a otros tipos de fibras por su procedencia y por sus propiedades físicas y mecánicas. Dentro de las principales desventajas se encuentra la baja adherencia entre la fibra y la matriz de mortero, lo cual impide que el concreto pueda garantizar una resistencia si no se controla la cantidad de adición de este material. Otra desventaja que se presentan en los concretos es un bajo módulo de elasticidad, lo que se traduce en una baja rigidez del compuesto. Por último, otros materiales como el carbón y la aramida pueden tener altos costos de fabricación lo que no hace inviable su uso en la industria de la construcción (Kosmatha *et al.*, 2004).

Figura 9. Fibras sintéticas de polietilentereftalato (PET) reciclado

Fuente: elaboración propia.

De todas las fibras sintéticas las fibras de polipropileno son las más populares, su producción se desarrolla como monofilamentos cilíndricos continuos que se pueden cortar las longitudes específicas. Las fibras acrílicas se han mostrado en los últimos años como un material de reemplazo para las fibras de asbesto (Kosmatha *et al.*, 2004). Las fibras sintéticas, entre otros usos, se utilizan para reforzar revoque o pañetes, generalmente se emplean fibras de 13mm de longitud para ser utilizadas en pañetes de revestimiento de muros o para afinado de piso. Por otra parte, para tener una mejor idea en detalle de las propiedades física, mecánicas y químicas de las fibras sintéticas y sobre las propiedades del concreto se puede consultar el ACI 544.1.R., y la ASTM C 116 (Kosmatha *et al.*, 2004).

Fibras de origen natural

Las fibras denominadas de origen natural son aquellas que provienen directamente de algún ser vivo, como lo es el caso de plantas y animales. En la antigüedad este tipo de fibras era el más utilizado para dar agarre interno a las unidades de mampostería de barro no cocido. Este tipo de fibras genera un entrelazamiento interno, lo cual ocasiona que la unidad de mampostería obtuviera mayor resistencia para la construcción; sin embargo, con el paso del tiempo se desarrollaron nuevas formas de construcción, por lo que este tipo de fibras fueron quedando inutilizadas. Se debe aclarar que con la práctica de calcinar la arcilla para fabricar mampostería y con el desarrollo del cemento portland, las fibras de origen natural ya no garantizaban durabilidad ni aportaba propiedades esenciales a las mezclas, esto se debe a que este tipo de fibras no es resistente al calor y con el cemento se produce reacciones químicas entre la lignina de las fibras y el álcali del cemento, lo que genera descomposición de las fibras durante el proceso de fabricación de las unidades de mampostería.

En las últimas décadas se ha investigado el uso de las fibras de origen natural en la adición a mezclas de concreto y microconcreto, dichas investigaciones se basan principalmente en estudiar las propiedades que aportan a las mezclas de concreto y microconcreto, teniendo como base realizar un tratamiento químico que logre disminuir o eliminar la lignina de las mismas y así garantizar una mejor durabilidad del componente dentro de la mezcla. Por lo tanto, este capítulo describe las fibras más utilizados en investigaciones a nivel mundial

presentando los procesos de extracción y los tratamientos físicos y químicos que se le realizan a la materia prima para la obtención del producto.

Fibra de bagazo de caña de azúcar

En la investigación realizada por Osorio *et al.* (2007) se preparó concreto fibro-reforzado con fibras procedentes del bagazo de caña de azúcar. Debido al tamaño de las fibras y por la forma en la que se elabora la mezcla fibro-reforzada, las fibras se distribuyen de forma aleatoria, lo que contribuye con un refuerzo homogéneo del compuesto. Los autores estudiaron la resistencia a compresión y la densidad del material manufacturado. La investigación reportó que una adición de 0,5 y 2,5 % de fibras en relación al peso del agregado grueso, presentó una resistencia a la compresión entre 16 y 17 MPa, lo cual es inferior a 17,5 MPa, esto implica que el concreto no puede ser categorizado como estructural. Además, se tuvo una disminución de la densidad entre 140 y 340 kg/m³ comparado con la de un concreto pesado de 2350 kg/m³, lo que supone una disminución entre el 5 % y 15 % del peso del concreto (Osorio *et al.*, 2007).

Las **características de las fibras de bagazo de caña son** 26 mm de longitud, 0,24 mm de diámetro (ver Figura 10), 1,25 g/cm³ de gravedad específica, 78,5 % de absorción de humedad y 12,1 % de contenido normal de humedad. Las fibras tienen una resistencia última de 196,4 MPa, módulo de elasticidad de 16,9 GPa y resistencia a la adherencia de 0,84 Pa (Osorio *et al.*, 2007). La alta alcalinidad de la pasta de cemento Pórtland afecta las fibras provocando su degradación con el tiempo, como es el caso de la celulosa y las fibras de celulosa natural. La fibra natural sufre degradación como consecuencia del ataque químico que produce el agua alcalinizada que contiene elementos alcalinos que se encuentran en el cemento (Gram, 1988). La mineralización mejora la adherencia entre la fibra y la matriz, sin duda. Con el paso del tiempo, la fibra se vuelve más rígida y frágil, haciéndola más resistente. La incorporación de fibras reduce inicialmente la alta tenacidad del composite. Asimismo, la resistencia a la flexión y el módulo elástico también aumentan en comparación.

- **Proceso de obtención de fibras de bagazo de caña**

Figura 10. (a) Bagazo de caña de azúcar antes del proceso de obtención de fibras (b) fibras procesadas de bagazo de caña



Fuente: elaboración propia.

El bagazo seleccionado tenía un contenido de humedad de 35 % en base seca. Las fibras se lavaron para ser utilizadas como fibro-refuerzo para eliminar la presencia de carbohidrato libre y luego se lavó el bagazo para evitar problemas con hongos y plagas (Juarez *et al.*, 2004).

- **Tratamiento aplicado a las partículas**

La lignina presente en las fibras de origen vegetal es susceptible a reaccionar con el álcali del cemento, afectando la durabilidad del compuesto. Por lo tanto, es indispensable proteger las fibras de la alcalinidad de la pasta (cemento y agua). Osorio *et al.* (2007) en su investigación proponen el siguiente tratamiento químico: sumergir las fibras en una solución de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al 5 % durante 24 horas a una temperatura de 24° C en un ambiente controlado de laboratorio (Osorio *et al.*, 2007).

Fibra de bambú

Taborda-Rios *et al.* (2017) realizó un estudio con el Grupo de Investigación de Materiales de Ingeniería (GIMI) de la Universidad Tecnológica de Pereira con apoyo de Colciencias, en el que utilizó bambú angustifolia fibra que extrajo manualmente de la parte interna del tallo y resultó ser más resistente. El proceso de tratamiento para la obtención de las fibras fue el siguiente: se retiraron los nudos y cáscaras de los canutos y se sumergieron en agua durante 24 horas protegidos de la luz solar a temperatura ambiente. Posteriormente se realizó un proceso de maceración para facilitar la separación de las fibras en hilillos (Taborda-Rios, 2017).

Figura 11. (a) proceso de extracción de la fibra (b) parte interna del tallo

Fuente: elaboración propia.

Para modificar la estructura molecular celular, los investigadores utilizaron hidróxido de sodio (NaOH) en una solución acuosa con una concentración del 5% con el fin de reducir los grupos hidroxilo y aumentar la resistencia a la hidratación de la fibra. Además, se llevó a cabo un proceso termoiónico en el que las fibras de bambú se expusieron a una temperatura de 60°C en un horno durante dos horas, dando como resultado una buena compactación fibra/matriz (Taborda-Rios, 2017).

Fibra de guadua

En el proyecto desarrollado por Vanegas *et al.* (2019) se determinaron las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de guadua, en comparación con la cantidad de concreto mezclado, la proporción de fibra de guadua fue del uno por ciento (Vanegas *et al.*, 2019). La guadua es utilizada generalmente sin modificaciones en la construcción debido a su alta resistencia a la compresión, flexión y tracción (Martinez y Poveda, 2018). Debido a su alta resistencia al peso y rápido crecimiento, la guadua se ha utilizado en la construcción de edificios (Vanegas *et al.*, 2019), sus excelentes propiedades se deben a la gran cantidad de fibras y láminas en su estructura.

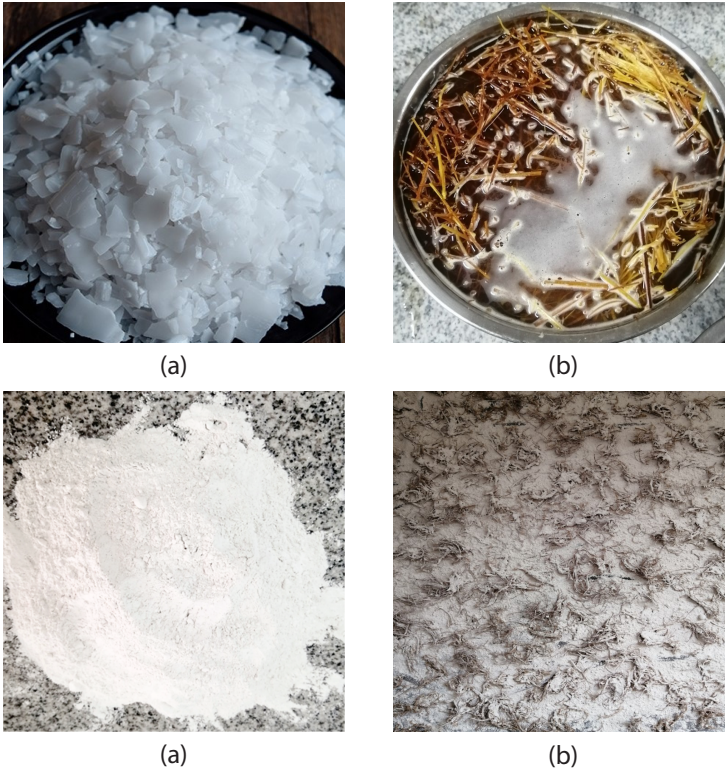
La extracción de fibras de guadua debe hacerse con extrema precaución para evitar cualquier daño a las fibras, ya que son susceptibles a otros componentes de la planta. Los procedimientos son los siguientes:

- **Proceso mecánico:** en este proceso las fibras son extraídas manualmente con elementos cortopunzantes o con máquinas que generen presión en la superficie de la planta, de tal forma que se liberen los jugos que posee y se desprenda el bagazo que, al secarse, facilita la extracción de las fibras; sin embargo, aunque es el más económico, en comparación con otros procesos de extracción, este proceso es poco recomendado debido a que puede generar fracturas en la fibra antes de ser utilizadas (Vanegas *et al.*, 2019).
- **Proceso biológico:** este proceso se lleva a cabo mediante la producción de enzimas por parte de diversos organismos, principalmente por bacterias, cuyo objetivo es

descomponer la lignina que se ha adherido a las fibras. Este proceso toma de 2 a 3 semanas e inclusive puede tomar menos tiempo si se tienen las condiciones climáticas adecuadas que, generalmente, se tienen en lugares cálidos y húmedos (Vanegas *et al.*, 2019).

- **Proceso químico:** el objetivo de este proceso es separar la celulosa, hemicelulosa y lignina de la materia prima vegetal. Generalmente se utilizan compuestos como $\text{Na}(\text{OH})$ y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para los tratamientos químicos. Estos métodos son efectivos para remover una gran porción de la lignina, sin embargo, degradan una gran cantidad de la celulosa, y como resultado, las fibras producidas no corresponden a la cantidad total de material fibroso en la planta. Por otra parte, es recomendable hacer tratamientos químicos sobre las fibras, ya que esto contribuye con la durabilidad de la fibra, especialmente cuando son utilizadas para reforzar mezclas de concreto (Vanegas *et al.*, 2019).

Figura 12. Proceso de inmunización de las fibras de guadua (a) hidróxido de sodio $[\text{Na}(\text{OH})]$ (b) fibras de guadua sumergidas en $\text{Na}(\text{OH})$ (c) hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ (d) fibras de guadua con $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Fuente: elaboración propia.

Vanegas *et al.* (2019) utilizaron un método de extracción manual asegurando que las fibras no fueran dañadas por ningún agente químico o biológico. Las fibras se cortaron a una longitud de 3 cm, asegurando una mejor trabajabilidad y adherencia al resto de la mezcla. Sika (2017) descubrió que las fibras con un diámetro de 5 cm o menos brindan una mejor

resistencia al trazado en elementos específicos. La fibra pasa por un proceso de hidratación de 12 horas antes de ser lavada y sometida a un proceso de secado de 48 horas, resultando en una importante pérdida de hidratación. La Figura 12 muestra el proceso de inmunización con cal hidratada de las fibras de guadua (Vanegas *et al.*, 2019).

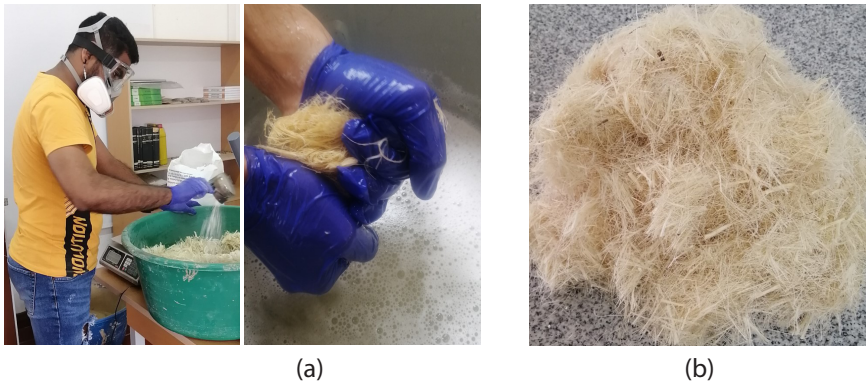
En la investigación concluyen el tratamiento de la fibra una vez realizada la inmunización y hacen la mezcla, se debe tener en cuenta que los agregados estén a una temperatura entre 20-30 °C en un espacio seco y sin humedad (Vanegas *et al.*, 2019).

Fibra de fique

Saavedra y Ortega (2020) estudiaron el comportamiento mecánico (compresión, flexión) del concreto reforzado con fibra natural de Fique, este material es obtenido de la hoja de fucracea andina, una planta nativa de la América tropical (en especial de Colombia y Venezuela), lo que la hace una fibra asequible en nuestra región.

Esta fibra natural de fique tiene excelentes **características mecánicas** y, según estudios realizados por Gañan, P. y Mondragón, una resistencia a la tracción de 237 MPa, un módulo de elasticidad de 8,01 GPa y una deformación de 6,02 % hasta la ruptura. En cuanto a la **dosificación**, recomiendan que los porcentajes ideales de adición de fibra de fique se presentan **por debajo del 0,3 % respecto al agregado fino** (Saavedra y Ortega, 2020).

Figura 13. Extracción de fibras de fique (a) tratamiento químico con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (b) fibras de fique



Fuente: elaboración propia.

La fibra de fique, generalmente, es de 60 mm de longitud, 0,25 mm de diámetro, 1,45 g/cm³ de densidad, 7,52 GPa de módulo de elasticidad y 0,19 la relación de Poisson. La Figura 13 muestra las características físicas de las fibras del fique junto con el tratamiento químico que se le debe realizar con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para evitar la reacción química entre el alcalí del cemento y la lignina presente en las fibras vegetales y así garantizar una mejor durabilidad del concreto fabricado.

En el análisis realizado por Galvis (2013) mencionan las **características químicas de la fibra de fique**, compuesta por celulosa y algunas impurezas como ligninas y pigmentos. Las

características químicas de la fibra de fique son: 2,60 % de cenizas, 1,58 % de fibras, 17,65 % de pentosas, 62,70 % de celulosas y 12 % de lignina (Galvis, 2013).

Fibra de cascarilla de café

La cascarilla de café es un derivado de la extracción del grano de café, el cual es utilizado principalmente como combustible y representa entre el 10 y 15 % del grano de café seco. Según Coral (2019), el proceso de obtención del café se basa en los siguientes pasos: recolección del café, despulpado, lavado, secado al sol y trillado artesanal. La cáscara o cascarilla que cubre la almendra de café, denominada como “cisco”, se retira mecánicamente del proceso de trilla. Una vez se realiza el despeluzado y ya se encuentra limpia la cascarilla, entra en la trilladora y se retira por fricción, dejando la pulpa, la cascarilla se retira y se considera como un desperdicio.

Figura 14. Cascarilla de café



Fuente: elaboración propia.

Aunque en la actualidad se ha estado investigando los usos secundarios que se le pueden dar a este subproducto, uno de los usos que se ha estudiado en los últimos años es la adición de la fibra a mezclas de concreto como fibra que disminuye la densidad del compuesto, siendo el material ideal para su uso como aditivo vivo en un hormigón, con la salvedad de que tiene un alto contenido de azúcares (21,3 %), lo que inhibe la reacción del cemento en la mezcla y, en consecuencia, retrasa el fraguado, que aparece después de 72 horas de mezclado, esta limitante se resuelve mineralizando la cascarilla (Coral, 2019; Garcia *et al.*, 1984).

Fibra de raquis de plátano

Elbehiry *et al.*, (2020) las fibras de Raquis de plátano son fibras lignocelulósicas del líber obtenidas del pseudotallo de la planta de plátano (*Musa sapientum*). Esta fibra es adecuada para ser utilizada como material de refuerzo, ya que puede aumentar significativamente la capacidad de resistir el agrietamiento y el desconchado en las vigas de concreto, ya que posee propiedades mecánicas relativamente apropiadas (Elbehiry *et al.*, 2020).

Para los ensayos realizados se utilizaron las fibras de Raquis de plátano con las siguientes **características**: fuerza de ruptura media de 465 g, elongación media de rotura 1,8 % y diámetro de la fibra 0,1243-0,1663 mm. La resistencia a la tracción de una sola fibra se calculó como 267,1 MPa (Elbehiry *et al.*, 2020).

- **Propiedades químicas de las fibras de raquis de plátano**

Tabla 7. Análisis elemental de las fibras de Raquis de plátano

Tipo de fibra	Celulosas	Hemicelulosas	Lignina	Pectina
Grand Naine	48.2	15.9	19.2	3.5
Poovan	57.6	12.7	16.7	2.8
Nendran	49.2	12.1	14.4	2.7
Monthan	48.6	15.8	21.6	4.1

Fuente: Elbehiry *et al.* (2020).

En este estudio determinaron la cantidad de composición química de las fibras seleccionadas, tales como Grand Naine, Poovan, Nendran y Monthan. Las fibras de Raquis de plátano se componen generalmente de materiales lignocelulosas que contienen celulosas, hemicelulosas, lignina y pectina. **La celulosa tiene el papel más importante en la selección de la calidad de las fibras** (Elbehiry *et al.*, 2020). La composición química de las fibras de Raquis de plátano se describe en la Tabla 7.

- **Procesamiento de la fibra**

Para **procesar las fibras de Raquis de plátano** se extraen de los troncos de los árboles de plátano y luego se introducen rodajas longitudinales preparadas con los tallos a una máquina extractora de fibras denominado “descortezado”, el cual consta de dos rodillos de alimentación y un batidor. El batidor recibe las rodajas a medida que pasan entre el raspador y los rodillos exprimidores, luego la pulpa se aliena y las fibras se extraen y se secan al aire (Elbehiry *et al.*, 2020).

Las fibras de Raquis de plátano han sido **tratadas con NaOH** antes de usarlas como barras, esto se atribuye a que el hormigón puede representarse como álcali en el que el valor de pH es superior a 7 y la fibra de plátano es material ácido inferior a 7 (Elbehiry *et al.*, 2020). La Figura 15 muestra las fibras de Raquis de plátano en forma de hebras.

Figura 15. Fibras de Raquis de plátano



Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, con los resultados demostrados sobre las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las fibras de Raquis de plátano se consideran un buen refuerzo para el concreto.

- **Propiedades físicas y mecánicas**

La prueba de tracción de una sola fibra se llevó a cabo utilizando un **Probador Instron Universal (Modelo 3345)** basado en Preethi y Balakrishna. La carga de rotura y la extensión de rotura se registraron en el punto de rotura. El diámetro de la fibra se calculó utilizando el (medidor ocular) (Elbehiry *et al.*, 2020). Los resultados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de los diferentes tipos de fibras estudiados

Tipo de fibra	Diámetro [mm]	Fuerza [N]	Resistencia a la tracción [MPa]	Cepa [%]
Grand Naine	0.225	0.98	24.6	1.02
Poovan	0.142	1.83	115.5	1.23
Nendran	0.119	3.21	288.7	1.67
Monthan	0.170	1.14	50.2	1.32

Fuente: Elbehiry *et al.* (2020)

Fibras de lechuguilla

Las fibras de lechuguilla tienen significativas propiedades físico-mecánicas, tal como su **elongación a la ruptura** y su **resistencia última a tensión** que les permiten ser consideradas como posible refuerzo en el concreto. La Figura 16 muestra la planta de la cual se obtienen las fibras de la lechuguilla. Juárez *et al.* (2003) utilizaron fibras de lechuguilla para el refuerzo del concreto y se determinó que las fibras a mayor diámetro soportan mayor carga a la flexión.

Figura 16. Planta de lechuguilla (agave lechuguilla)



Fuente: Juárez *et al.* (2003).

Aunque los resultados presentados por los concreto a corto plazo, es decir, durante los primeros 28 días de edad del compuesto se presentaron varias deficiencias en el uso de las fibras de lechuguilla. Dentro de las deficiencias encontradas se presentaron: **reacción entre la alcalinidad** del material cementante con las fibras de lechuguilla, **susceptibilidad al ataque de microorganismos** debidos a la presencia de **humedad** en el compuesto y **disminución de la adherencia y el sangrado** interno del compuesto por la presencia de material extraño en la mezcla y falta de tratamiento químico que lo estabilice (Juárez *et al.*, 2003); por lo tanto, para la elaboración de este libro se tuvo como **objetivo encontrar un tratamiento adecuado para la fibra** con el fin de evitar las deficiencias en los concretos por el uso incorrecto de la fibra de origen natural.

Es de vital importancia conocer los materiales que se están utilizando en el laboratorio, es por ello que se debe disponer de una caracterización previa de los materiales con el fin de conocer de antemano sus propiedades y sus deficiencias. Para la caracterización de las fibras vegetales se cuantificó el diámetro, la longitud promedio, el porcentaje de absorción de agua, la densidad absoluta y la porosidad. Juárez *et al.* (2003) en su proyecto describen detallando cada uno de los procesos realizados durante la etapa de caracterización de las fibras naturales. Todas las pruebas realizadas a las fibras fueron hechas en el laboratorio a una temperatura de 23 °C.

Ahora bien, con la finalidad de mejorar la capacidad del concreto y mitigar las deficiencias del uso de las fibras por falta de tratamiento químico, Juárez *et al.* (2003) estudiaron la implementación de parafina como tratamiento que contribuyera con la falencia que tenía el uso de la lechuguilla como fibras. Los autores determinaron que el tratamiento con parafina propicia un mejor comportamiento a flexión y un mayor módulo de ruptura, contribuyendo a que las fibras no sean afectadas por la alcalinidad de la matriz de mortero, es decir, que la durabilidad del compuesto dependerá directamente de la protección que tenga la fibra de la alcalinidad del cemento y de las características de impermeabilidad propias de la matriz de mortero (Juárez *et al.*, 2003).

Fibra de estopa de coco

La fibra de estopa de coco (*Cocus nucifera*) es un tipo de fibra obtenida como subproducto de la industria alimentaria en el Valle del Cauca. En una investigación realizada por Quintero y González (2006) se evaluaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas de morteros reforzados con volúmenes de 0,5 % y 1,5 % de fibra de estopa de coco y longitudes de fibra entre 2 y 5 cm. Los resultados se presentan en forma de compuestos que fueron ensayados a compresión axial, tracción indirecta y flexión y en los que la adición de fibras redujo la deformación máxima en todos los casos. Los hallazgos son consistentes con observaciones previas de experimentos e investigaciones bibliográficas que muestran que el refuerzo de fibra mejora la tenacidad de la matriz compuesta de varias maneras. Probetas cilíndricas de tamaño estándar 6"x12", (15,24 x 30,48 cm, relación diámetro: altura 1:2) y de 3"x 6", (7,62 x 15,24 cm, relación diámetro: altura 1:2) para el desarrollo del estudio; vigas de 3" (7,62 cm) de alto, 12" (30,48 cm) de largo y 3" (7,62 cm) (Quintero y González, 2006).

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron fibras de estopa de coco en estado natural, siendo esta el material que cubre la cortera del coco y que se retira para su uso. Dicha estopa se considera un desecho, ya que no contribuye ningún uso adicional en la producción y

aprovechamiento del coco. Los investigadores Quintero y González (2006) extrajeron mecánicamente las fibras y las acondicionaron a la metodología propuesta. Utilizaron un esmeril con cerdas de acero blando delgadas en forma de cepillo que ayudaron con la separación de la estopa en forma de filamentos, de tal modo que se transformaran en fibras para reforzar mezclas de mortero. La Figura 17 muestra la forma como se realizaba la extracción de las fibras de estopa de coco.

Figura 17. Esmeril utilizado para la extracción de la fibra

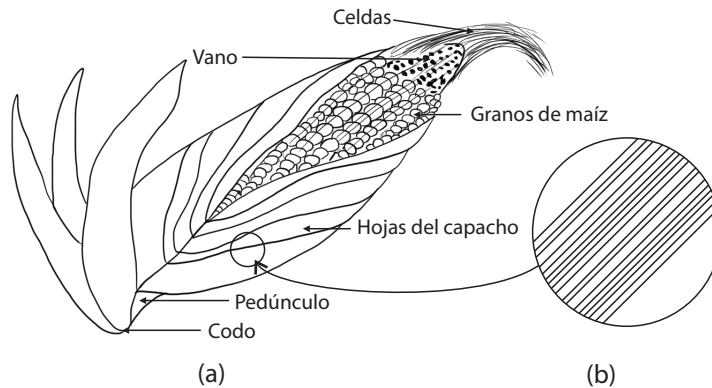


Fuente: Quintero y González (2006).

Dentro de los resultados presentados por Quintero y González (2006) se determinó que las deformaciones más bajas se obtuvieron en mezclas con una longitud de fibra de 5 cm que fue inferior a un volumen de añadido de 1,5 %, lo que indica que las fibras de mayor longitud absorben de mejor forma las deformaciones a flexión que se pueden presentar en el compuesto. La mayor resistencia a la compresión se encontró en los compuestos reforzados con un volumen de fibra de 1,5 % que fue superior para una longitud de 2 cm, es decir, que una fibra de menor longitud no afecta de forma significativa con la resistencia del compuesto. La única mezcla que mostró mayor resistencia a la tracción indirecta que el concreto fue la que contenía 5 cm de fibra en un volumen de 0,5 %. La adición de fibra tuvo un efecto positivo sobre la resistencia a la flexión; el hormigón con mayor valor de resistencia a la flexión fue con un volumen de 0,5 % y longitud de fibra de 5 cm (Quintero y González, 2006).

Fibras de capacho de maíz

Las fibras de capacho de maíz son un material que se obtiene de las hojas que envuelven el maíz (ver Figura 18), las cuales después del proceso de extracción del grano de maíz se desecha y no tiene un uso particular. Generalmente estas hojas son utilizadas en la industria alimenticia como envoltorio para la preparación de tamales. Sin embargo, no tiene un uso que le de un aprovechamiento total, ya que la mayor parte del material es desechado. Causil y Guzmán (2016) estudiaron el tratamiento de las hojas del capacho de maíz para la producción de concreto fibro-reforzado, por lo que, similar a la forma cómo se estudió la estopa de coco, se realizó la investigación del capacho de maíz.

Figura 18. (a) Esquema de las partes de una mazorca de maíz, (b) detalle de una hoja de capacho de maíz

Fuente: Causil y Guzmán (2016).

Se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de capacho de maíz mediante análisis proximal, análisis elemental y pruebas de tensión. Teniendo en cuenta referentes que describen las deficiencias que se pueden encontrar en los concretos reforzados con fibras naturales, se debe optar por la aplicación de tratamiento químicos que mejoren la resistencia a la reacción con la alcalinidad con el material cementante. Por lo que, se aplicaron dos tratamientos químicos: uno con el uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el otro con el uso de parafina. Se evaluó la resistencia a la compresión de probetas de concreto reforzado con las fibras de capacho de maíz con volumen de 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % y longitudes de fibra de 20 a 50 mm. La determinación de un tratamiento químico ideal (con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o parafina) se estudió con edades del concreto de 3, 7 y 28 días de curado. Además, se investigaron las propiedades químicas de las fibras, donde se encontró que estas están compuestas mayoritariamente por carbono y oxígeno, presentando un poder calorífico de alrededor de 16600 KJ/kg (Causil y Guzman, 2016).

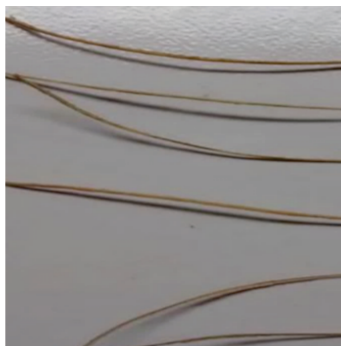
- **Obtención y tratamientos de las fibras de capacho de maíz (FCM)**

Causil y Guzmán (2016) realizaron dos tratamientos para obtener fibras de capacho a escala de laboratorio. En el primer tratamiento, las fibras se sumergieron en una solución que contenía 10 gramos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por cada litro de agua y después de 48 horas de tratamiento, las fibras se lavaron con agua con el fin de retirar el químico en su totalidad y se expusieron al sol para un correcto secado de las fibras. El segundo tratamiento se realizó con parafina, se sumergieron las fibras secas y después del tratamiento con hidróxido de calcio, en parafina a una temperatura de 100 ± 5 °C. En la Figura 19 se muestra la apariencia de las fibras antes y después del desfibrado de las fibras de capacho de maíz.

Figura 19. (a) Apariencia de una hoja de capacho durante el proceso de desfibrado (b) algunas fibras obtenidas en este proceso



(a)



(b)

Fuente: Causil y Guzmán (2016).



Capítulo 2

**Diseño y control de mezclas de
microconcreto**

En el presente capítulo se muestran los procesos de diseño y control durante el proceso de fabricación de microconcreto como una matriz de mortero fino para ser fibro-reforzada con fibras de vidrio y fibras de origen natural. Además, se describirá de forma general la elaboración, colocado, curado y propiedades mecánicas del microconcreto simple sin fibras de refuerzo.

Composición: diseño de mezcla de microconcreto

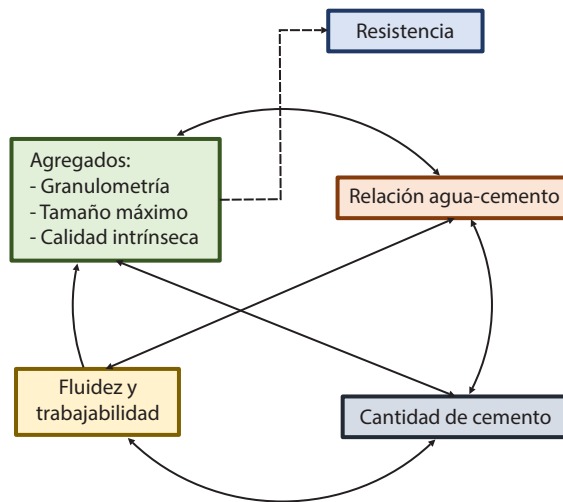
El microconcreto, como la mayoría de los materiales de ingeniería, debe presentar un proceso metodológico en el cual se determinen las características requeridas, a este proceso se le conoce como diseño de mezcla (Instituto del Concreto, 1997). Las características para el diseño de mezcla pueden incluir propiedades físicas del microconcreto fresco, propiedades mecánicas del microconcreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de componentes específicos (Sánchez, 2001). La composición de del microconcreto, proporcionado a través del diseño de mezclas, especifica las cantidades de cada uno de los componentes que lo conforman. El proporcionamiento de la mezcla es el proceso de determinación de las cantidades de materiales de la mezcla, ya sea mediante el uso de materiales locales como de materiales importados para que se logren las características especificadas (Kosmatha *et al.*, 2004). Según metodologías internacionales estandarizadas, un microconcreto adecuadamente proporcionado debe presentar cualidades cuantificables para el concreto fresco o el concreto ya endurecido. A continuación, se mencionan algunas de las características propias del microconcreto bien proporcionado:

- Fluidez y manejabilidad aceptable del microconcreto fresco
- Propiedades de durabilidad y resistencia del material endurecido
- Bajo costo de construcción comparable con su funcionalidad

Selección de las características de la mezcla

Como se mencionó anteriormente, el diseño de mezclas se realiza en función de las características propias esperadas en el microconcreto, desde su elaboración hasta su utilización, por lo que antes de determinar las cantidades y proporción de los materiales propios para la fabricación de la mezcla de microconcreto, se deben seleccionar las diferentes características que se esperan de este (Shetty, 2006). Las características del microconcreto se seleccionan de acuerdo con la finalidad y uso que se le vaya a dar, puesto que las características propias del compuesto endurecido -como lo son la exposición al ambiente, el tamaño y forma del elemento construidos, además del comportamiento físico, mecánico y químico del microconcreto- son las que darán los parámetros de resistencia y durabilidad que deberá tener el mismo (Li, 2011). Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, para un sistema de entrepiso es vital conocer el límite a flexión de los elementos y su rigidez en función de la elasticidad del material y forma. La Figura 20 muestra un esquema con las variables que se generalmente influyen en las características del microconcreto.

Figura 20. Esquema simplificado de las variables que se generalmente influyen en las características del microconcreto



Fuente: Adaptado de Porrero *et al.* (2009).

Una vez se haya determinado las características de la mezcla, tanto fresca como endurecida, se procede a proporcionar las cantidades de cada componente que forma el compuesto. Por lo general, las propiedades esperadas en el microconcreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta, siendo la relación agua-cemento la que da el punto de partida para la proporción de los materiales (Sánchez, 2001). En el caso del microconcreto para fabricación de GRC se espera que la cantidad de cemento sea igual a la cantidad de agregado fino en peso, según Comino (1995), Purnell *et al.* (1999) y Lalinde (2020). Las mezclas de microconcreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de componentes dificulta el control de calidad del compuesto en la obra; sin embargo, no se debe descuidar en ningún caso la tecnología del concreto como tal (Kosmatha *et al.*, 2004).

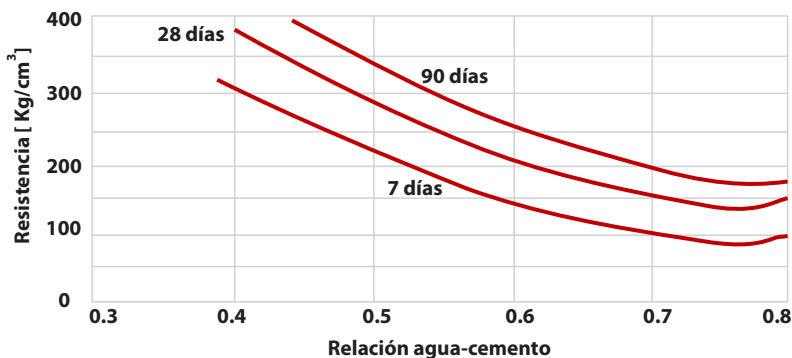
- **Relación agua-cemento según la relación de resistencia**

La relación agua-cemento es el parámetro más relevante al momento de iniciar con el diseño de la mezcla., esto se debe a que esta característica se relaciona directamente con la capacidad de resistencia a la compresión del microconcreto (Instituto del Concreto, 1997). Aunque se debe considerar que la relación agua-cemento es inversamente proporcional a la capacidad de resistencia a la compresión del compuesto, ya que a menor relación agua cemento, mayor será la resistencia a la compresión. Por otra parte, existen otros factores de igual o mayor importancia para el diseño de mezclas de concreto, dentro de las cuales se encuentra: durabilidad, permeabilidad, resistencia al desgaste, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, entre otros (Kosmatha *et al.*, 2004).

Los microconcretos que siguen las recomendaciones estandarizadas por metodologías internacionales como ASTM, es decir, que estén totalmente compactados, producidos con agregados no fracturados o desgastados, su diseño lo gobierna el agua de mezclado (Li,

2011). Se debe considerar que la resistencia de la pasta (cemento y agua) en el microconcreto dependerá directamente de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación (Sánchez, 2001). La Figura 21 muestra tres curvas que relacionan la resistencia a la compresión y la relación agua-cemento del concreto en diferentes edades de secado; se evidencia que a mayor relación agua-cemento, menor será la resistencia que alcance el compuesto.

Figura 21. Curvas de relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua-cemento



Fuente: adaptado de Porrero *et al.* (2009).

Ahora bien, aunque la relación agua-cemento es determinante en la resistencia del material, como ya se mencionó, se deben considerar otros factores que afectan también a la resistencia. De tal forma que no es posible estandarizar que cierta relación agua-cemento “óptima” resulte en una resistencia específica (Shetty, 2006). Esto se debe a que la diferencia en la resistencia –ya sea por compresión, tracción o flexión del microconcreto para una dada relación agua-cemento– puede diferir por variaciones en la calidad de los materiales. Un cambio del tamaño, diferente granulometría, rugosidad en la textura superficial, forma, resistencia y rigidez de los agregados puede generar un compuesto frágil, mal compactado y sin adherencia entre sus componentes. Además, las diferencias en los tipos y fuentes de del cemento, contenido de aire incluido, ya sea incorporado por diseño, o aire no extraído por ausencia de vibrado, la presencia de aditivos en grandes cantidades y una curado mal ejecutado, pueden afectar otros factores como la durabilidad e ineficiencia durante la vida útil del compuesto (Kosmatha *et al.*, 2004).

Por otra parte, aunque no se pueda estandarizar la relación agua-cemento para determinada resistencia, sí se puede dar un punto de partida que se aproxime a la resistencia a la cual se espera llegar. El libro *Diseño y control de mezclas de concreto* de Kosmatha *et al.* (2004) presenta diferentes relaciones agua-cemento para determinado tipo de resistencia y condición de exposición que tendrá el concreto endurecido. A continuación, se presenta la Tabla 9 que indica la relación agua-cemento máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición.

Tabla 9. Relación agua-cemento máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición

Condición de exposición	Relación agua-cemento máxima por masa de concreto	Resistencia a compresión de diseño mínima f'_c , kg/cm ² (MPa) [lb/pulg ²]
Protegido de exposición a congelación-deshielo, de sales y de sustancias agresivas.	Dependerá de la trabajabilidad del material, sin superar 0.65.	Según requisitos estructurales.
Baja permeabilidad.	0.50	280 (28) [4000]
Expuesto a congelación-deshielo.	0.45	320 (31) [4500]
Para protección de corrosión del refuerzo (armadura). Expuesto a cloruro de las sales descongelantes. Agua salobre, agua del mar.	0.40	350 (35) [5000]

Fuente: Kosmatha *et al.* (2004).

Por otra parte, los microconcretos son materiales que no incluyen agregado grueso dentro de sus mezclas, por lo que la relación agua-cemento debe ser inferior para mantener la resistencia esperada. En su mayoría, los diferentes manuales y estándares de fabricación de microconcreto sugieren que la relación agua-cemento no supere 0.35 o una relación 1:3, es decir, que por cada parte de agua se agreguen tres partes de cemento en peso.

- **Agregados y contenido de aire en la mezcla**

Los agregados son aquellos materiales de origen pétreo que se utilizan para dar consistencia y adherencia a las mezclas de concreto. Dependiendo de su tamaño puede categorizar al concreto como un microconcreto, es decir, el microconcreto es un tipo de concreto que cuenta solo con agregado fino (Neville y Brooks, 2010). En la práctica al microconcreto se le conoce como mortero, el cual es una matriz que se conforma por una pasta de cemento, agua y aditivos y agregados finos (Sánchez, 2001). Los agregados presentan dos características que tienen una influencia significativa dentro de las mezclas, ya que dichas características afectan directamente la trabajabilidad del microconcreto fresco. Por un lado, está la granulometría, que es la forma, distribución y tamaño de las partículas; y, por otro lado, está la naturaleza de la partícula, su textura, porosidad, dureza, resistencia y procedencia (Instituto del Concreto, 1997).

La granulometría de las partículas es una de las características más importantes, ya que de esta depende el costo del compuesto y la correcta funcionalidad de la matriz, puesto que al tener partículas del mismo tamaño y forma, no se ocuparían correctamente los espacios haciendo que no se distribuyan los componentes de la mezcla de forma correcta generando

una ineficiencia en la funcionalidad del mortero (Porrero *et al.*, 2009). Por otra parte, una granulometría distribuida en varios tamaños y forma de las partículas presentará una mejor distribución de los componentes, generando una matriz de mortero eficiente y menos costosa que la matriz de mortero sin granulometría específica (Li, 2011). Además, se debe mencionar que el contenido de aire en las mezclas depende directamente de la granulometría de los agregados, de tal forma que se debe evitar dejar contenido de aire por falta de una correcta granulometría. En el caso de los concretos especiales que requieren inclusión de aire por exposición a condiciones de congelación-deshielo, se deben utilizar aditivos que controlen la correcta distribución de los vacíos y no debe utilizarse la granulometría del agregado para conseguir tal fin (Grijalva, 2020).

Como se ha mencionado anteriormente, para el microconcreto solo se ocupa agregado fino, en el caso más común es la arena y con excelentes propiedades mecánicas se tiene la arena de cuarzo. Aunque se puede utilizar otros agregados como arcilla calcinada, roca triturada, viruta de plástico molido, concreto reciclado, entre otros. Según diferentes manuales y estándares de fabricación de microconcreto, se sugiere el uso de arena con tamaño de partícula entre 300 μm y 600 μm . En la práctica se clasifica este material con lo que pasa el tamiz 30 y se retiene en el tamiz 50 (Instituto del Concreto, 1997).

- **Aditivos para mezclas de microconcreto**

Los aditivos que se añadan al concreto durante la etapa de mezclado dependerán directamente del propósito para el que se esté añadiendo. Teniendo en cuenta que en el mercado actual existen aditivos plastificantes, fluidizantes, retardantes, acelerantes, resinas, epóxicos, aglutinantes, autocompactantes, entre otros. Se debe considerar según las necesidades el tipo de aditivo a utilizar. En el caso del microconcreto, se requiere de buena trabajabilidad, lo cual no se logra con la relación agua-cemento, que es baja y, por lo tanto, sin aditivos se tendrá un mortero endurecido con poca trabajabilidad, de tal forma que se debe añadir un aditivo fluidizante y/o plastificante. Otros aditivos como las resinas dispersoras serán requeridas cuando se desea adicionar fibras de refuerzo a la mezcla de microconcreto (Neville y Brooks, 2010).

Figura 22. Tipos de aditivos para variar o modificar las características del concreto



Fuente: Tecnología del conocimiento (2016).

Proporcionamiento de la mezcla de microconcreto

El proporcionamiento de la mezcla de microconcreto es la etapa en la que se definen las cantidades de cada uno de los materiales que serán incluidos dentro del compuesto (Kosmatha *et al.*, 2004). El proporcionamiento se puede hacer de varias formas siguiendo los parámetros establecidos desde investigaciones empíricas hasta estudios de laboratorio más complejos que presenten un procedimiento estandarizado por alguna norma o por algún manual metodológico (Instituto del Concreto, 1997). Dentro de los métodos más comunes están el método de proporcionamiento a través de la masa y método del volumen absoluto. Para los dos métodos se debe definir una cantidad total de concreto a diseñar, dicha cantidad será definida por el total de compuesto a utilizar o por una medida arbitraria que sea práctica para el entendimiento del fabricante (Li, 2011).

El método de proporcionamiento de mezcla de concreto, a través de masa o del peso, es relativamente sencillo en comparación con otros métodos, además, son rápidos para estimar las proporciones de la mezcla. Este método parte de una masa supuesta o conocida de concreto por unidad de volumen, generalmente se supone que se va a realizar un metro cúbico de concreto, y luego se proporciona a la cantidad de compuesto que se requiera (Harmsen, 2002). Por otra parte, se tiene el método del volumen absoluto, el cual es un método más preciso, ya que requiere de las densidades aparentes o gravedad específica de todos los componentes, de tal forma que se pueda calcular el volumen absoluto que cada uno ocupará en una unidad de volumen de concreto (Sánchez, 2001). Aunque se debe considerar que en la práctica los materiales se encuentran en forma suelta y será difícil tener en la práctica un volumen preciso que sea comparable con los cálculos realizados; por tal motivo, lo que se hace en la práctica es realizar el diseño de la mezcla por el método del volumen absoluto (que es más preciso) y hacer la conversión de las cantidades a peso utilizando la densidad de los materiales. De esta forma, se evitará tener discrepancias entre lo diseñado, la mezcla del compuesto y la colocada en el sitio.

Otra forma de proporcionar las cantidades de materiales para la elaboración de concreto y/o microconcreto, es a partir de datos de campo, es decir, para este método se parte de una mezcla base utilizada en algún otro proyecto (Kosmatha *et al.*, 2004). La proporción de los materiales debe satisfacer las necesidades básicas de resistencia y durabilidad, por lo que se debe seguir, además de la misma proporción, los mismos procedimientos de mezclado y colocación, de tal manera que se debe controlar la mezcla elaborada teniendo en cuenta que al ensayar el concreto replicado se obtenga una variación máxima de 7 MPa en la resistencia a la compresión (Instituto del Concreto, 1997) (Shetty, 2006).

Por último, se permite también el uso del proporcionamiento a través de mezclas de prueba, este método se utiliza cuando no se dispone de ensayos de campo previos, por lo que, a tanteo o con metodología empírica, se proporcionan las cantidades de material del compuesto, luego se realizan, por lo menos, tres mezclas con tres relaciones agua-cemento distintas y tres contenidos de cemento diferentes, con el fin de producir un rango de resistencias (Kosmatha *et al.*, 2004). Las mezclas de prueba deben tener una trabajabilidad que no supere el 0,5 % del máximo permitido y se deben producir y curar tres probetas para cada relación agua-cemento siguiendo los procedimientos del curado que están estipulados en la Norma Técnica Colombiana NTC 1377 (1994) y el estándar internacional ASTM C192/C192M (2019).

Dosificación y mezclado del microconcreto

La dosificación es el proceso de medida, por masa o por volumen, de los componentes del microconcreto y su introducción en la mezcladora (Kosmatha *et al.*, 2004). Dependiendo de la cantidad de material compuesto que se requiera y del tamaño y capacidad de la mezcladora, podrán hacerse más de una amasada del compuesto, por lo que, para garantizar una homogeneidad en todo el microconcreto, cada vez que se haga una amasada deberá medirse con la mayor precisión posible los componentes del microconcreto y seguir un procedimiento de amasado estándar. Aunque se mencionó que los materiales se pueden medir por masa o por volumen, se debe tener cuidado con las medidas que pueden llegar a ser no precisas. En el caso de los materiales sueltos, como el cemento y la arena, dependiendo de su compactación cambian el volumen, estos materiales deben medirse por su masa y así evitar errores en las cantidades. Por otra parte, los materiales líquidos, al tener una densidad constante, pueden medirse por masa o por volumen, lo cual no afectará la medida (Instituto del Concreto, 1997).

En ocasiones se tiene que las cantidades en volumen de los elementos que se van a realizar de concreto son mayores a la cantidad que se puede mezclar, lo que ocurre en la práctica cuando se mezcla el concreto en la obra, por lo que se debe garantizar que todas las mezclas sean lo más similares que se pueda para tener homogeneidad en los procesos (Neville y Brooks, 2010). Es por ello que para estandarizar los márgenes de errores, los manuales y procedimientos metodológicos internacionales recomiendan que entre amasadas individuales se mantenga una precisión de medida de la siguiente forma: para el cemento $\pm 1\%$, para agregados $\pm 2\%$, para el agua $\pm 1\%$ y para los aditivos $\pm 3\%$ (Sánchez, 2001). Por lo tanto, los equipos de medición utilizados deben tener la capacidad de medir las cantidades con las tolerancias del margen de error mencionadas para la menor cantidad de mezcla que se desea amasar, así como para mezclas mayores (Grijalva, 2020).

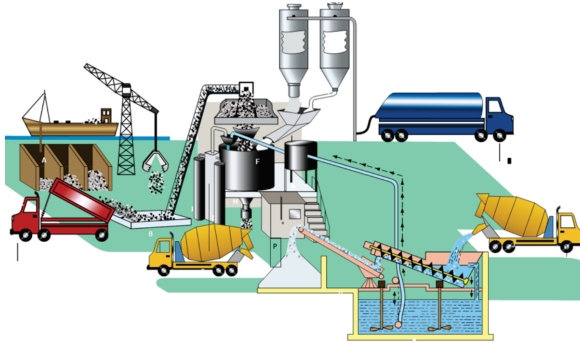
Es imperativo no solo contar con las propiedades propias de los materiales, sino que, a su vez, se debe caracterizar la zona o sitio en el cual se colocará el concreto teniendo cuenta parámetros como la temperatura, tipo de suelo, tipo de ambiente y clima (Li, 2011). Por ejemplo, un clima cálido y seco puede generar que se evapore el agua muy rápidamente, implicando que el concreto pierda trabajabilidad, siendo un error común solucionar esta falencia con la adición de agua, lo que se traduce en pérdida de resistencia; de tal forma que en climas extremos se debe considerar el uso de aditivos (Sánchez, 2001). Los aditivos químicos que tiene presentación en forma líquida se deben adicionar a la mezcla de concreto o microconcreto en soluciones acuosas, es decir, dichos aditivos se deben incorporar al agua de mezclado para verterlo durante el amasado. Por lo tanto, para no variar las cantidades calculados en el proporcionamiento de la mezcla se debe abstraer de la cantidad de agua de mezclado la cantidad de aditivo suministrado (Kosmatha *et al.*, 2004).

Microconcreto premezclado

El microconcreto premezclado es aquel material que se mezcla fuera de la obra o del sitio destino, dicho concreto se entrega en la construcción fresco y no endurecido (Li, 2011). Los componentes del microconcreto se mezclan previamente en una mezcladora estacionaria vertical y luego es entregada a un camión agitador transportador que garantizará la llegada

del concreto fresco al sitio donde será vertido (Harmsen, 2002). La Figura 23 presenta el prototipo de una planta central de microconcreto premezclado.

Figura 23. Etapas de la producción del microconcreto en una planta mezcladora



Fuente: Kosmatha *et al.* (2004).

Es relevante mencionar que el microconcreto, al ser un mortero fino y con una fluidez elevada, no se mezcla como se hace convencionalmente en una mezcla de concreto, sino que debe ser amasado en una mezcladora vertical con aspas de la misma forma que se mezclan las pastas, los estucos y las pinturas (ver Figura 24).

Figura 24. Prototipo de mezclador vertical con aspas



Fuente: Internáquinas (s.f.).

Ahora bien, el microconcreto debe seguir un procedimiento de mezcla requerido para una alta trabajabilidad o fluidez, puesto que a este material se le añaden otros aditivos como las fibras de refuerzo. Por lo tanto, según recomendaciones de manuales y procedimientos estandarizados internacionales, se debe seguir el siguiente proceso de mezclado.

El procedimiento a realizar es: primero se obtiene un mortero rígido, mezclando 3/4 partes de la cantidad total del agua con la arena y el cemento y luego de 45 segundos de mezclado se añade el resto del agua a la mezcla (normalmente el agua se añade durante periodos de 30 segundos). Si se adiciona aditivos a la mezcla, estos se deben diluir con la primera porción de agua mezclada.

- **Paso 1:** pese o dosifique todos los materiales (cemento, arena, agua y aditivos).
- **Paso 2:** agregue 3/4 partes de todos los líquidos. Incluyendo el agua y los aditivos.
- **Paso 3:** encienda la mezcladora en baja velocidad (300 – 500 rpm)
- **Paso 4:** agregue la arena.
- **Paso 5:** agregue el cemento y aumente la velocidad de la mezcladora (1000 – 1800 rpm)
- **Paso 6:** mezcle durante 45 segundos o un minuto.
- **Paso 7:** agregue el restante de líquidos. Cuidando que el proceso de haga en un lapso de tiempo de 30 segundos.
- **Paso 8:** realizar el ensayo de trabajabilidad de la mezcla realizada.
- **Paso 9:** (opcional) si en el paso 8 la mezcla tiene la trabajabilidad requerida se procede a hacer el vaciado y colocación del microconcreto. De lo contrario se deberá ajustar la cantidad de plastificante utilizado y se deberá repetir el paso 8.

Colocado del microconcreto

En la etapa de colocación del microconcreto se deberá tener en cuenta diversos factores que pueden afectar el comportamiento del material. Un mal vaciado del microconcreto puede conllevar a daños tempranos en el material que no podrán corregirse después (Kosmatha *et al.*, 2004). Por lo tanto, a continuación se describe la preparación que se deberá y tener en cuenta para la colocación del microconcreto, así como las técnicas de colocación en casos especiales según recomendaciones de manuales y procedimientos metodológicos internacionales.

Preparación de la colocación

La preparación del sitio de colocación final del concreto para su endurecimiento y funcionalidad dependerá directamente del destino del material. Si se trata de concreto dispuesto sobre terreno -como lo es el caso de los contrapisos, andenes, pavimentos, cimentaciones, entre otros- se deberá garantizar un estrato firme de suelo compactado y nivelado con material seleccionado que no presente cambios de volumen por variación de la humedad (Li, 2011). Además, se deberá humedecer la subrasante con el fin de evitar que el terreno absorba agua del concreto y por ende este pierda eficiencia, especialmente en climas cálidos y áridos (Instituto del Concreto, 1997).

Si el destino del concreto es sobre un concreto ya endurecido, se debe garantizar una correcta adherencia entre los dos concretos, el nuevo y el viejo, esto se puede lograr de dos formas: la primera, a través del uso de epóxicos que ayuden a mejorar la junta de construcción; la segunda, es picando la capa superficial del concreto ya endurecido, con el fin de tener una superficie rugosa que contribuya con la adherencia en la junta de construcción (Sánchez, 2001).

Cuando se trata de un concreto armado se deberán fijar formaletas, encofrados o cimbras, ya sean de madera, acero, plástico, piedra, entre otros. Dichas formaletas se deben colocar, limpiar, fijar, apuntalar y/o arriostrar adecuada y precisamente con el fin de dar la forma

esperada en el elemento que se está fabricando. Una vez endurecido el concreto se puede revocar o revestir de acuerdo al acabado que se espera dar al elemento fabricado (Neville y Brooks, 2010); sin embargo, antes de fundir el colocado del concreto, se debe verificar el tipo de formaleta que se va a utilizar, de tal forma que la formaleta no afecte las propiedades del concreto, por ejemplo, las cimbras de madera se deben humedecer antes de la colocación del concreto para que no absorban el agua y no se hinchen, además, se deben aceitar con algún material desmoldante con el fin de que las fibras de la madera no se adhieran al concreto y pueda modificar el aspecto exterior del concreto ya endurecido (Harmsen, 2002).

Por último, si se trata de un concreto lanzado o proyectado, se debe garantizar la fluidez correcta del material para que pueda ser transportado y lanzado a su destino. Para el caso del microconcreto fibro-reforzado, dependiendo si es premezclado o proyectado, se seguirán las mismas recomendaciones descritas en los párrafos anteriores (Shetty, 2006).

Técnicas especiales de colocación

Una vez se ha colocado el concreto o microconcreto en su destino, se deberá seguir un procedimiento de consolidación, de tal forma que se retire del concreto el aire atrapado que pueda generar perjuicios en la calidad del material. La técnica de consolidación del concreto más común es el vibrado, el cual puede ser externo o interno (Instituto del Concreto, 1997).

La vibración es una agitación que se introduce en la estructura del compuesto fresco recién colocado, generando que la fricción interna entre las partículas de agregado se destruya temporariamente y el concreto se comporta como un material fluido. El microconcreto se vierte en los moldes o formaletas bajo la acción de la gravedad, ya sea por medio de una manguera de bombeo o puesto de forma manual, lo que genera vacíos grandes de aire atrapado entre los agregados (Kosmatha *et al.*, 2004). El método de la vibración ayuda a que las burbujas de aire atrapado suban hacia la superficie más fácilmente. La fricción interna se reestablece cuando la vibración se interrumpe.

Los vibradores son aparatos que generan frecuencias altas de agitación, lo cual se mide en una cantidad de vibraciones por unidad de medida de tiempo (Harmsen, 2002). Generalmente se expresa en vpm o vps, vibración por minuto o vibración por segundo, respectivamente (Porrero *et al.*, 2009).

- **Compactación de microconcreto con el método de vibrado**

Diversos estudios han sido desarrollados con el fin de estudiar la variación en la estructura interna de las mezclas de concreto y mortero cuando se utiliza vibradores durante la etapa de colocación. Tal es el caso de lo estudiado por Teranishi *et al.* (1995), donde se realizó la prueba de levantamiento de esferas de mortero fresco bajo vibración, para lo cual se colocó el recipiente con la muestra de microconcreto fresco en una mesa vibradora, encontrándose que, en el rango de velocidad de deformación cortante baja, la consistencia del fluido Bingham bajo vibración era una curva a través del origen, pero la viscosidad aparente aumentaba en comparación con el mismo concreto en estado no vibrado.

Por otra parte, Tattersall y Baker (1988) midieron las propiedades reológicas del hormigón fresco vibrado con el reómetro impulsor, cuyo recipiente estaba montado sobre una mesa

vibratoria. Los resultados muestran que cuando se aplica vibración al concreto fresco, las propiedades de flujo ya no están representadas por el modelo lineal simple de Bingham, sino que se aproximan a las de un pseudoplástico de ley de potencia con valor de fluencia cero y que la efectividad de la vibración debe ser evaluada en términos de su velocidad máxima. Confirmaron, además, que utilizando un aparato de tubería vertical colocado sobre una mesa vibratoria a velocidades de deformación por cortante baja del orden de las que prevalecen en muchas circunstancias prácticas, el hormigón fresco bajo vibración se comporta como un líquido newtoniano, lo que explica por qué fluiría bajo sí mismo (Tattersall y Baker, 1989).

Durante el proceso de colocación se utilizan diferentes metodologías de vibración que contribuyen con la acomodación de los componentes del microconcreto para la eliminación de los vacíos de aire que puedan afectar con la resistencia del compuesto. La vibración interna es un tipo de vibración que se hace por inmersión de una maquina vibradora y, según el elemento que se vaya a vibrar, se varía el tipo de vibrador (Porrero *et al.*, 2009). Generalmente, se utiliza un vibrador de eje flexible, el cual consiste en una cabeza vibratoria que se encuentra conectada al motor por medio del eje. El principio por el cual funciona este tipo de vibrador es sencillo: se compone principalmente de una cabeza que contiene un contrapeso que, al rotar a velocidad constante, produce variación en el centro de masa de la vibración, generando rotaciones que producen pulsos vibratorios dentro del compuesto fresco (Kosmatha *et al.*, 2004).

Otra forma común de vibrado utilizada durante la etapa de fundición de concreto y microconcreto, es a través de vibra externo. Este tipo de vibrado se realiza mediante la aplicación de pulsaciones o agitaciones en la formaleta directamente. A diferencia del vibrado por inmersión, el equipo utilizado para este proceso puede ser manual o mecánico dependiendo del tamaño del elemento que se espera vibrar (Porrero *et al.*, 2009). A escala de laboratorio el vibrado se realiza con mesas vibratorias, las cuales se componen de una placa que oscila por la acción de un motor.

Curado del microconcreto

Uno de los procesos de mayor relevancia durante la etapa de colocación y endurecimiento de los microconcretos, es el curado, el cual se puede definir como el proceso donde se le da un mantenimiento inicial en la vida útil del concreto, de tal forma que se mantengan las condiciones ideales de temperatura y contenido de humedad que contribuyan al compuesto la capacidad de alcanzar la resistencia para la que fue diseñado (Kosmatha *et al.*, 2004). En múltiples estudios que se han desarrollado a lo largo de la historia reciente, se ha demostrado que el curado tiene una influencia directa sobre las propiedades del concreto endurecido, puesto que un curado bien ejecutado permite que el compuesto tenga las características y condiciones de diseño, lo que garantiza durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia a abrasión y estabilidad dimensional (Neville y Brooks, 2010).

Una vez se ha realizado la mezcla de los componentes del concreto, entre ellos la mezcla del cemento hidráulico con el agua, inicia una reacción química y térmica entre los dos componentes. El agua inicia su evaporación y, por lo tanto, el concreto se seca (Shetty, 2006). El cemento, al ser hidráulico, requiere de agua para desarrollar al 100 % su efectividad,

proceso que dura 28 días, aproximadamente, a menos que se utilicen aditivos acelerantes o se siga un proceso de maduración del concreto. De tal forma que, para evitar que el secado del concreto por la evaporación del agua afecte el desarrollo del cemento, se debe realizar un proceso denominado “curado” (Li, 2011).

El curado se refiere a los procedimientos para mantener un ambiente adecuado en el concreto fresco para que se produzcan las reacciones de hidratación. El curado es un procedimiento simple y con frecuencia se ignora; sin embargo, es más importante en la producción de un hormigón resistente, duradero e impermeable. En el curado del concreto lo crítico es mantener una condición suficientemente húmeda para el concreto, para que la hidratación no se detenga (Neville y Brooks, 2010). El curado húmedo se proporciona rociando con agua, estancando o cubriendo la superficie del concreto con arena húmeda, láminas de plástico, arpillera o esteras. Los compuestos de curado, que se pueden rociar sobre la superficie de concreto para formar una lámina continua delgada, también se usan comúnmente, especialmente para superficies verticales como paredes y columnas, ya que se debe minimizar la pérdida de agua a las áreas circundantes. Si se vierte hormigón sobre una subrasante del suelo, la subrasante debe humedecerse para evitar la absorción de agua. En áreas expuestas (como una pendiente) a menudo se construyen cortavientos y parasoles para reducir la evaporación del agua. Para el concreto de cemento Portland, generalmente se recomienda un período mínimo de 7 días de curado en húmedo (Li, 2011).

Si el microconcreto fresco no se cura correctamente la evaporación del agua superficial es rápida y la interna casi no cambia. La contracción plástica puede ocurrir si la tasa de pérdida de agua, debido a la evaporación, excede la tasa de sangrado (Instituto del Concreto, 1997). La contracción es la reducción de volumen debido a la pérdida de agua, esta contracción temprana ocurre cuando el concreto aún se encuentra en estado plástico (no completamente endurecido), especialmente en el interior del concreto, por lo que se denomina contracción plástica. La pequeña cantidad de reducción de volumen, debido a la contracción plástica, está acompañada por el movimiento hacia abajo del material de la capa superficial (Sánchez, 2001); si este movimiento se restringe mediante refuerzos de acero o agregados grandes y se formarán grietas siempre que se exceda la baja resistencia del concreto. Las grietas por contracción plástica a menudo corren perpendiculares a la superficie del hormigón, por encima de las armaduras de acero. La presencia de grietas por retracción plástica puede afectar la durabilidad de la estructura, ya que permiten que los agentes corrosivos alcancen fácilmente el acero. Si se tiene cuidado de cubrir la superficie de concreto y reducir otras pérdidas de agua (como la absorción por el encofrado o la subrasante) se puede evitar el agrietamiento por contracción plástica. Si se nota en una etapa temprana puede eliminarse mediante revibración (Li, 2011).

Cambios volumétricos en el microconcreto

El microconcreto, así como el concreto, es un material compuesto que cambia ligeramente su volumen desde su amasado hasta su endurecimiento. Cambios que deben ser tenidos en cuenta para su correcta aplicación en las obras de construcción, puesto que en las construcciones el microconcreto se vierte dentro de elementos que se están confinando entre ellos y no se permite la expansión o contracción libre del material, lo que implica que

el compuesto no se mueva libremente, generando tensiones y contracciones que pueden afectar significativamente en la estructura interna del concreto (Kosmatha *et al.*, 2004).

Principalmente, el microconcreto presenta cambios de volumen durante dos etapas: la primero es un cambio de volumen durante la edad temprana, es decir, durante la fase de amasado y endurecimiento, etapa en la que el material presenta una contracción por fraguado; la segundo se presenta cuando hay cambios de humedad y temperatura, en la cual se puede presentar una contracción o expansión térmica (Li, 2011). Los cambios de volumen en el microconcreto ya endurecido pueden generar problemas de comportamiento mecánico como lo es la aparición de fisuras y grietas que disminuyen la capacidad de resistencia y durabilidad del compuesto (Neville y Brooks, 2010).

Es relevante mencionar que los cambios volumétricos se deben a factores químicos y exotérmicos, por lo que controlarlos resulta difícil, sobre todo cuando se trata de un concreto restringido en cuando a su especie; es por ello que una de las soluciones más favorables que se ha estudiado en las últimas décadas, además del uso de aditivos, es el uso de fibras internas que controlen la aparición de fisuras tempranas, prolongando la vida útil del microconcreto, así como mejorar las propiedades físicas y mecánicas del material (Porrero *et al.*, 2009).

Propiedades mecánicas del microconcreto

Las propiedades mecánicas del concreto son principalmente la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la deflexión y el módulo de rotura. Con estas propiedades se puede conocer la capacidad a compresión, tracción, flexión, cortante y torsión que tendrá el material para ser utilizado en la construcción.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros mundialmente utilizado para describir las características de los microconcretos, así como de los concretos. Esto se debe a que, aunque no es el único parámetro relevante del compuesto, sí es la propiedad con la que se correlacionan las demás características del material, es decir, propiedades como el módulo de elasticidad y el módulo de rotura y flexibilidad se relacionan directamente con la resistencia a la compresión a través de ecuaciones que correlacionan las características (Instituto del Concreto, 1997).

La resistencia a la compresión de un material se determina por medio de una máquina de compresión hidráulica en la cual se estudia la carga máxima que soporta el elemento antes de fallar. Para el caso de los concretos se mide a través de cilindros con relación altura, diámetro 2:1. Según estándares internacionales para el concreto se utilizan cilindros de 4" (10.16 cm) de diámetro y 8" (20.32 cm) de altura o 6" (15.24 cm) de diámetro y 12" (30.48 cm) de altura. Se debe tener en cuenta que para determinar cuál de los dos cilindros es el mejor se debe conocer el tamaño del agregado grueso. Por otra parte, para el caso de los microconcreto o morteros, es decir, aquellos compuestos que no contienen agregado grueso, se debe hacer uso de cubos de 2" (5.08 cm) de lado (Kosmatha *et al.*, 2004).

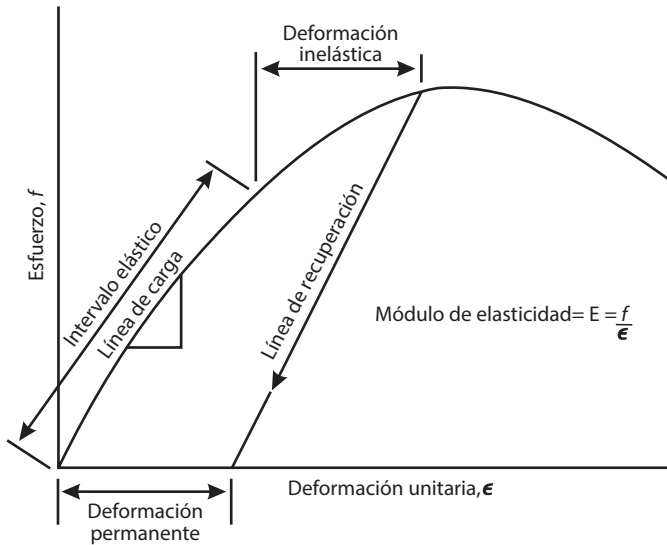
La carga máxima debe estar dividida entre el área de contacto de la probeta. A la relación entre la carga y el área se le conoce como esfuerzo, por lo que es correcto afirmar que la resistencia a la compresión se representa por el esfuerzo máximo que soporta el material (Porrero *et al.*, 2009). A continuación, se muestra la ecuación que describe la resistencia a la compresión de un microconcreto o concreto:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

Donde, f'_c es la resistencia a la compresión, P es la carga máxima y A es el área de transversal a la dirección de la carga.

Módulo de elasticidad

Figura 25. Curva genérica de esfuerzo-deformación unitaria del concreto



Fuente: Kosmatha *et al.* (2004).

El módulo de elasticidad es una propiedad del material con el cual se define el rango elástico del microconcreto, es decir, indirectamente el módulo de elasticidad representa la rigidez que le aporta el material a una estructura. El cálculo del módulo de elasticidad se obtiene relacionando el esfuerzo a la compresión con la deformación unitaria en el rango elástico del material, es decir, cuando el material no presenta deformaciones permanentes por la acción de un esfuerzo (Sánchez, 2001).

La Figura 25 muestra una curva genérica con la que se calcula el módulo de elasticidad, teniendo en cuenta que este módulo es la pendiente de una línea tangente a la curva en la zona elástica. La ecuación para calcular el módulo de elasticidad se expresa de la siguiente forma:

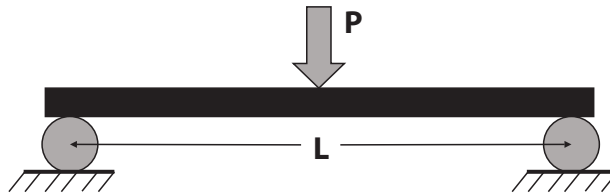
$$E_c = \frac{f}{\epsilon} = \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon}$$

Donde E_c es el módulo de elasticidad, $f = \Delta P$ es el diferencial de carga y $\epsilon = \Delta \epsilon$ es el diferencial de deformación unitaria medida en la pendiente de una línea tangente a la curva en la zona elástica.

Deflexión y módulo de rotura

La deflexión de vigas y de losas de concreto es uno de los movimientos más comunes en las estructuras que depende de las cargas de servicio. La deflexión es una curvatura que se presenta en los elementos que están sometidos a fuerzas y cargas ortogonales a la dirección del elemento, como se aprecia en la Figura 26. Estas deformaciones son la consecuencia de la flexión que se desarrolla bajo cargas muertas (peso propio) y vivas, lo cual puede conllevar al agrietamiento en la zona de tensión de los miembros de concreto (Kosmatha *et al.*, 2004). Se debe tener un control en los primeros años de vida de la estructura con el fin de evitar la fisuración y/o agrietamiento temprano de las particiones frágiles que soportan los miembros estructurales susceptibles a las deflexiones (Harmsen, 2002).

Figura 26. Esquema de ensayo a flexión

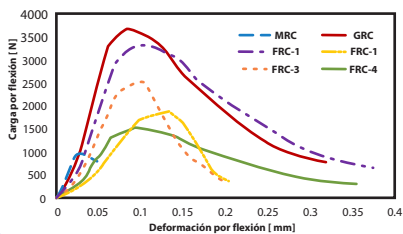


Fuente: elaboración propia.

Para calcular el módulo de rotura se deben construir probetas en forma de vigas a escala teniendo una relación 1:4, donde la longitud de la viga sea 4 veces el tamaño del lado de la sección cuadrada. Siguiendo las recomendaciones de normativas internacionales se pueden utilizar vigas de 4 cm de lado y de 16 cm de longitud y se determina en un equipo de compresión la carga máxima de rotura que soporta la viga. La fuerza se aplica perpendicular a la longitud de la viga en el centro y los apoyos se ubican en los extremos, tal y como se muestra en la Figura 26. La expresión con la que se calcula es el módulo de rotura se muestra a continuación:

$$F_{cr} = \frac{3PL}{2B^3}$$

Donde F_{cr} es el módulo de rotura, P es la carga máxima de rotura a la flexión, L es la longitud entre apoyos y B es la dimensión del lado de la sección de la viga.



Capítulo 3

Microconcreto fibro-reforzado

En el presente capítulo se describen las principales características que se deben tener en cuenta para la fabricación y control de microconcreto fibro-reforzado.

Composición: mezcla de control

Las mezclas de microconcreto fibro-reforzado se componen principalmente de cemento, agregado fino, fibras, agua y aditivos. Las propiedades y características propias de cada uno de los compuestos dependerán de las condiciones propias del sitio y del origen de extracción de cada componente. Para la producción de microconcreto fibro-reforzado se tiene en cuenta las recomendaciones realizadas por Cem-FIL® (s.f.). Las cantidades de los materiales se miden con respecto a la cantidad de cemento que se le adiciona a la mezcla. La Tabla 10 muestra la relación de los materiales con respecto a la cantidad de cemento, es decir, la relación arena/cemento es 0.84, agua/cemento es 0.33, el plastificante representa el 2 % de la cantidad de cemento y el aditivo Forton VF-774® (Sumiglas S.A.®, s.f.) representa el 8 % de la cantidad de cemento.

Tabla 10. Dosificación de materiales para microconcreto

Materiales	Cantidades para un bulto de cemento [g]	Densidad de los materiales [g/cm³]	Cantidad por metro cúbica de concreto [Lt]
Cemento	42,500	3.1	307.3
Arena de cuarzo	35,700	2.5 – 2.8	296.3
Agua	14,025	1	314.3
Superplastificante SikaPlast® MO	850	1.3	14.7
Forton® VF-774	3,188	1.06	67.4

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de fibras para el microconcreto fibro-reforzado depende directamente de la cantidad en peso de toda la mezcla según la cantidad de volumen que ocupe. Ya que todas las fibras no tienen la misma densidad, se debe conocer la densidad de cada uno de los tipos de fibras utilizados para realizar una relación de volumen con las fibras de vidrio, siendo 3 % la cantidad de fibras máxima que se puede incluir de fibras de vidrio en la mezcla de GRC (según Cem-FIL® (s.f.)).

Trabajabilidad: fluidez de la mezcla

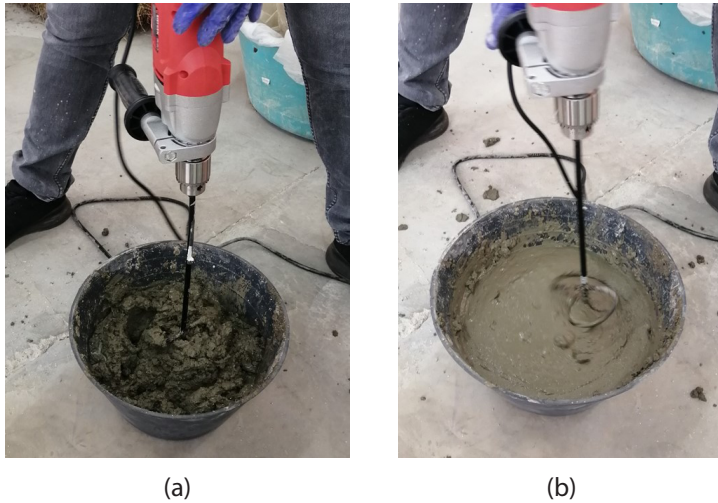
Las mezclas de microconcreto deben tener la fluidez necesaria para que sea moldeable y no pierda trabajabilidad cuando se añaden las fibras de refuerzo, las cuales, dependiendo de la capacidad de absorción de agua, pueden variar la estructura interna del compuesto; por lo tanto, se hace indispensable realizar el ensayo de trabajabilidad del microconcreto, el cual se realiza con el objetivo de determinar el contenido de aditivo plastificante necesario para obtener un microconcreto fresco y con la consistencia adecuada para trabajar con la

fibra. A continuación, se describe el procedimiento del ensayo según la norma UNE EN 1170-1 (1998) (Lalinde, 2020):

- **Paso 1:** utilizar un molde cilíndrico de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura. Centrarlo sobre una superficie plana no rugosa, como acero, vidrio, acrílico o similares.
- **Paso 2:** verter en caída libre, a una altura baja, la mezcla de microconcreto sin fibras de refuerzo. Golpear suavemente la base del cilindro para eliminar la mayor cantidad de burbujas. Enrasar la superficie del molde para eliminar el exceso de microconcreto.
- **Paso 3:** se levanta el molde cilíndrico suavemente sin introducir agitación adicional. Permitiendo que fluya el microconcreto sobre la placa de acero, vidrio o similar.
- **Paso 4:** se debe esperar un aproximado de 30 segundos o hasta que la mezcla deje de fluir para tomar la lectura del anillo que se formó. La interpretación del resultado será decisiva para conocer la fluidez del material. Se espera que para el molde cilíndrico de 5 cm la apertura del anillo sea de 16 cm; por lo tanto, si la mezcla fluye más se debe disminuir la cantidad de aditivo plastificante. Si, por otro lado, la mezcla no alcanza el tamaño del anillo esperado se debe aumentar la cantidad de aditivo plastificante en la mezcla.

Las mezclas de microconcreto se desarrollan con las cantidades indicadas en la mezcla de control presentada en la Tabla 10 del presente libro. Las mezclas se deben realizar con una mezcladora vertical, con el fin de garantizar un correcto mezclado de los componentes y así lograr una mezcla fluida y homogénea. El proceso de mezclado fue el siguiente: se mezclaron los sólidos (arena y cemento) hasta obtener una mezcla homogénea, aparte se mezclaron los líquidos (agua, superplastificante SikaPlast® MO y Forton® VF-774) hasta obtener una mezcla homogénea, una vez mezclado los líquidos y sólidos aparte se procedió a mezclar a alta velocidad los líquidos con los sólidos durante 45 segundos, teniendo en cuenta que los líquidos se iban adicionando de forma gradual en la mezcla, hasta obtener una mezcla fluida (Figura 27).

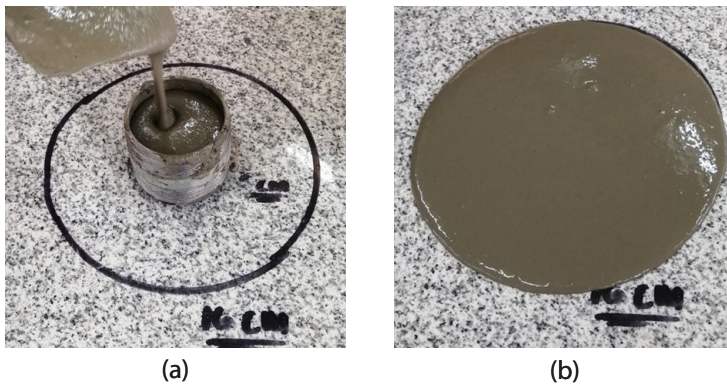
Figura 27. Proceso de mezclado de las muestras con mezclador vertical (a) antes de incluir aditivos plastificantes (b) después de incluir aditivos plastificantes



Fuente: elaboración propia.

Una vez se obtuviera una masa fluida se realiza el ensayo de trabajabilidad a fin de que la mezcla que se vertió dentro de un cilindro de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura lograra asentarse hasta conseguir un diámetro de 16 cm (Figura 28).

Figura 28. Ensayo de trabajabilidad de las mezclas de microconcreto (a) molde de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro (b) mortero fluido con apertura de 16 cm



Fuente: elaboración propia.

Si la mezcla se asentaba más de 16 cm se debía repetir el ensayo, ya que la mezcla está demasiado fluida. Si el asentamiento es menor a 16 cm se debe mezclar nuevamente con más superplastificante SikaPlast® MO hasta obtener el asentamiento óptimo.

Cuando el asentamiento del microconcreto sea el esperado se procede a adicionar gradualmente las fibras con una velocidad de mezclado baja durante 30 segundos y luego, en moldes previamente acondicionados, se vertió la mezcla. Los moldes utilizados son: primas de 4 x 4 x 16 cm y placas de 2 x 15 x 40 cm (Figura 29).

Figura 29. Probetas para ensayo para microconcretos fibro-reforzados (a) moldes de primas y placas (b) elaboración de cubos (c) elaboración de primas (d) elaboración de placas



Fuente: elaboración propia.

Las mezclas de microconcretos fibro-reforzados realizadas se dejaron fraguar durante 24 horas y luego se llevaron a curado por 28 días. Después se procedió a realizar los diferentes ensayos para conocer las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas desarrolladas, dentro de los ensayos realizados se encuentra: densidad aparente del concreto, resistencia a la compresión en cubos de microconcreto, módulo de rotura a la flexión y módulo de elasticidad. La densidad se determinó pensando las probetas y midiendo su volumen; la resistencia a la compresión se determinó en una prensa hidráulica; y el módulo de rotura a la flexión y el módulo de elasticidad se calculó con la curva de carga vs. flecha.

Propiedades físicas y mecánicas

A continuación, se presenta el análisis de las propiedades físicas y mecánicas (densidad, resistencia a la compresión, módulo de rotura o resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad) realizado a las probetas de concreto fibro-reforzado fabricado con fibras de vidrio y fibras vegetales. Las muestras fueron prismas de 4 x 4 x 16 cm, que se ensayaron a flexión y compresión y placas de 2 x 15 x 40 cm que se ensayaron únicamente a flexión.

Figura 30. Probetas realizadas (a) prismas de 4 x 4 x 16 cm (b) placas de 2 x 15 x 40 cm

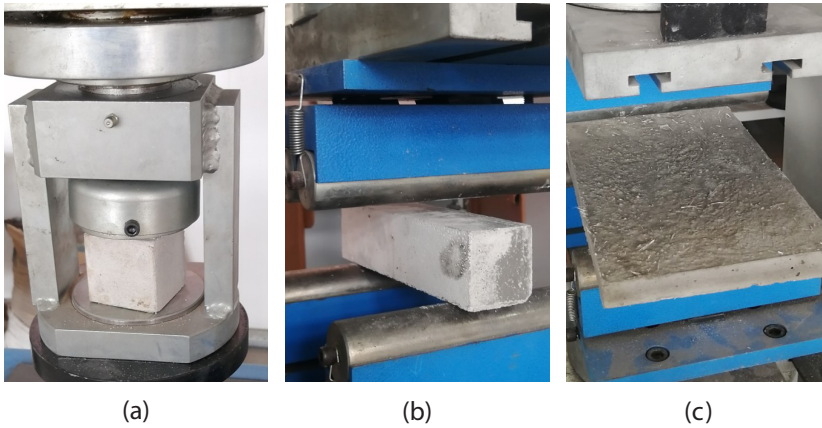


Fuente: elaboración propia.

- **Procedimiento de realización de ensayos de compresión y flexión**

Se estudió la resistencia a la compresión no confinada (R_c) de concretos. Se realizaron cubos de 2" (5,08 cm) de lado (ver Figura 31a), los cuales se ensayaron en una prensa de compresión hidráulica. Se midió la carga máxima que soportaba y se determinó la presión dividiendo la carga entre el área de contacto. Se determinó el módulo de rotura a la flexión (F_{cr}) y el módulo de elasticidad (E_c). Se realizaron prismas de 4 x 4 x 16 cm (ver Figura 31b) y placas de 2 x 15 x 40 cm (ver Figura 31c), las cuales se ensayaron a flexión en una máquina universal de ensayos con el fin de dibujar un diagrama de en dos direcciones de fuerza vs. deformación. Por último, se midió la densidad de las muestras dividiendo el peso entre el volumen de las probetas ensayadas.

Figura 31. (a) Ensayo de compresión en cubos de 2" de lado. (b) Ensayo de flexión en primas de 4 x 4 x 16 cm. (c) Ensayo de flexión en placas de 2 x 15 x 40 cm



Fuente: elaboración propia.

El ensayo de flexión y compresión se realizan con el fin de determinar las propiedades mecánicas que tienen las mezclas de concreto desarrolladas. Dichos ensayos son necesarios para identificar la resistencia a la compresión, el módulo de rotura a la flexión y el módulo de elasticidad de las muestras realizadas.

- **Realización de gráficas y curvas de carga vs. deformación para cada ensayo realizado de concreto**

Se realizaron las gráficas de carga vs. deformación para cada uno de los ensayos realizados. Se realizaron las réplicas necesarias para cada uno de las mezclas de microconcreto definidas a fin de mostrar la dispersión de los datos obtenidos. La cantidad de réplicas fueron las necesarias para determinar que los resultados son veraces y que no están ocurriendo alteraciones por agentes externos que pudieron no haberse tenido en cuenta, es por ello que se identifica que los resultados que se destacan a continuación no presentan errores significativos que pudiesen anular los ensayos realizados.

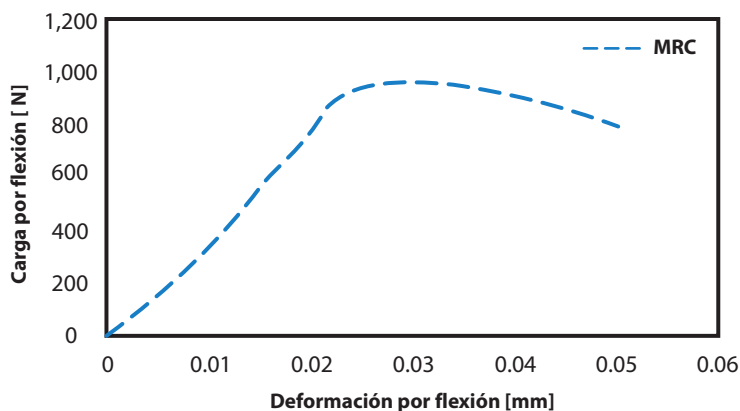
La investigación que dio como resultado la publicación del presente libro fue realizada en los laboratorios de estructuras y de resistencia de materiales de la Universidad Francisco de Paula Santander en la sede principal de San José de Cúcuta. Del mismo modo, la institución contribuyó cofinanciando el proyecto, junto con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia. A continuación, se muestran los resultados de la investigación realizada.

- **Microconcreto convencional simple sin fibras de refuerzo (MRC)**

El microconcreto convencional simple es un material frágil y poco dúctil que no admite deflexiones permanentes y, por lo tanto, el rango plástico no es significativo. Se construyó una curva de carga vs. deformación, como se muestra en la Figura 32. Se evidencia que la carga máxima de deflexión se presente con una deformación de 25 μm , aproximadamente, mientras que la falla total del compuesto se presenta con una deformación de 50 μm . Dentro

de los resultados que más se destacan se tiene: carga máxima de rotura a la flexión de 941 N, ya que las muestras tienen una sección de 40 x 40 mm (área de 1600 mm²), entonces el módulo de rotura del concreto sin fibras es de $F_{cr} = 3.53$ MPa. La resistencia a la compresión de la muestra MRC es $f'_c = 32.4$ MPa y módulo de elasticidad de $E_c = 15.49$ GPa.

Figura 32. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de la muestra de MRC (concreto convencional simple sin fibras de refuerzo)



Fuente: elaboración propia.

El microconcreto, conocido en composición como mortero en la práctica, se utiliza como material para pegar mampostería, afinado de paredes (revoque o pañete) y afinado de piso (mortero de nivelación). Generalmente, el mortero es un material de cemento pobre, es decir, la relación entre la cantidad de agregado y cemento es de 3:1 o 4:1 (la cantidad de agregado representa 3 o 4 veces la cantidad del cemento). Ahora bien, teniendo en cuenta que el microconcreto elaborado para fines de comparación de la investigación realizada tiene una relación agregado-cemento de 1:1, no es comparable con el mortero utilizado en las obras, es decir, el microconcreto elaborado sin fibras solo es de carácter investigativo y no tiene aplicación real en la construcción por su alto costo de fabricación.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, se puede concluir que el mortero y el microconcreto, aunque en composición se fabrican con materiales similares, por proporción se deduce que son compuestos diferentes; mientras que uno (mortero) tiene aplicación en la construcción, el otro (microconcreto sin fibras) solo tiene uso de laboratorio.

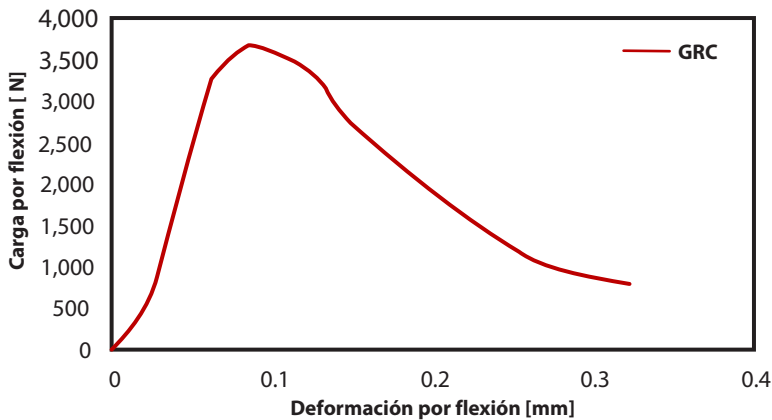
- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio tipo AR (GRC)**

El GRC es mundialmente conocido como un compuesto de microconcreto reforzado con fibras de vidrio. Este compuesto se caracteriza por sus excelentes propiedades mecánicas; sin embargo, tiende a ser un compuesto de alto costo, ya que el principal insumo que son las fibras de vidrio debe ser importado, puesto que Colombia no es un país fabricante de este material. El estudio que conllevó a la publicación de este libro tomó en cuenta dicha falencia (el sobre costo del compuesto), por lo que los resultados calculados para el GRC solo se utilizan para fines comparativos, ya que el verdadero objetivo del estudio fue fabricar un

compuesto fibro-reforzado con fibras naturales, subproductos y desechos agroindustriales que dieran un aporte a la economía circular.

La Figura 33 muestra un gráfico con la curva de tendencia de carga vs. flecha para muestra denominada GRC (microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio). Dentro de los resultados que más se destacan se tiene: carga máxima de rotura a la flexión de 3677 N, ya que las muestras tienen una sección de 40 x 40 mm (área de 1600 mm²), entonces el módulo de rotura del concreto sin fibras es de $F_{cr} = 13.79$. La resistencia a la compresión de la muestra GRC se determinó como $f'_c = 28.5$ MPa y módulo de elasticidad de $E_c = 17.59$ GPa.

Figura 33. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de la muestra de GRC (concreto fibro-reforzado con fibras de vidrio)



Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, al realizar una comparación entre el MRC y el GRC se aprecian diferencias importantes, principalmente en la ductilidad del material. El GRC absorbe de mejor forma las deformaciones plásticas del compuesto, esto se deduce con la relación que hay entre la zona elástica y la zona plástica del microconcreto. Se evidencia que la carga máxima de deflexión se presente con una deformación de 90 μm , aproximadamente, mientras que la falla total del compuesto se presenta con una deformación de 320 μm , es decir, a diferencia del MRC el GRC absorbe más energía de deformación.

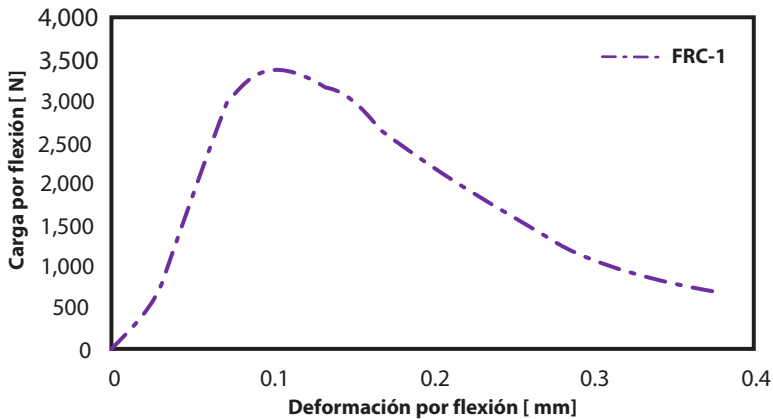
- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de fique (FRC-1)**

La fibra de fique, como se mencionaron en el capítulo 1 del presente libro, es un componente con excelentes características y propiedades siempre que se realice un tratamiento químico durante la etapa de extracción de la fibra. La investigación desarrollada no tuvo en cuenta la durabilidad del compuesto, por lo que esta característica debe ser estudiada más a profundidad en otros estudios. Las propiedades mecánicas del FRC-1 se determinaron mediante el análisis de la curva de carga vs. flecha mostrada en la Figura 34.

La Figura 34 muestra un gráfico con la curva de tendencia de carga vs. flecha para muestra denominada FRC-1 (microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de fique). Dentro de los resultados que más se destaca, se tiene la carga máxima de rotura a la flexión de 3355

N, ya que las muestras tienen una sección de 40 x 40 mm (área de 1600 mm²), entonces el módulo de rotura del concreto sin fibras es de $F_{cr} = 12.58$ MPa. La resistencia a la compresión de la muestra FRC-1 se determinó como $f'_c = 26.2$ MPa y módulo de elasticidad de $E_c = 13.80$ GPa.

Figura 34. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de la muestra de FRC-1 (concreto fibro-reforzado con fibras de fique)



Fuente: elaboración propia

Al igual como se realizó la comparación entre MRC y GRC, el FRC-1 muestra unas diferencias y similitudes con los otros compuestos mencionados, ya que el FRC-1 es más resistente a la flexión que el MRC, pero tiene menor capacidad que el GRC, es decir, las fibras de fique aportan un comportamiento intermedio a las mezclas de microconcreto; sin embargo, se evidencia en la curva que el FRC-1 tiene una tendencia similar a la curva del GRC, es decir, la ductilidad del material es similar con la particularidad de que la deformación máxima de rotura se presenta en 380 μ m, por lo que el microconcreto que se refuerza con fibras de fique puede ser utilizado en la industria de la construcción como un material con características ideales para trabajar en tracción y a flexión.

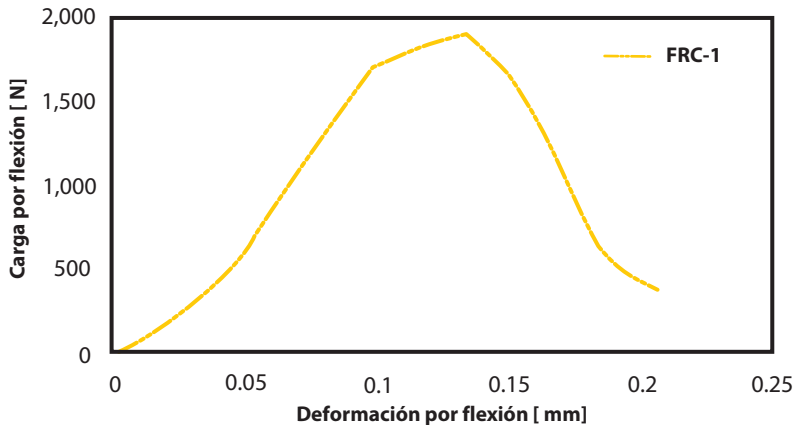
- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de vástago de plátano (FRC-2)**

Las fibras de plátano pueden ser obtenidas de distintas partes de la planta. Algunas fibras se extraen de la hoja, otras del racimo y algunas de la concha del fruto. La investigación que dio origen a este libro utiliza las fibras extraídas del vástago, el cual es un desecho agroindustrial, puesto que al cosecharse el plátano, la planta debe ser cortada y el vástago a diferencia de la hoja no tiene un uso comercial. Como se mencionó en el capítulo 1 de este libro, las fibras de plátano tienen algunas características que lo hacen un material precursor de refuerzo interno para el microconcreto; sin embargo, los resultados no muestran una mejoría notoria en las mezclas de microconcreto.

La Figura 35 muestra un gráfico con la curva de tendencia de carga vs. flecha para muestra denominada FRC-2 (microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de vástago de plátano). Dentro de los resultados que más se destaca se tiene la carga máxima de rotura a la flexión de 1891 N, ya que las muestras tienen una sección de 40 x 40 mm (área de

1600 mm²), entonces el módulo de rotura del concreto sin fibras es de $F_{cr} = 7.09$ MPa. La resistencia a la compresión de la muestra FRC-2 se determinó como $f'_c = 24.8$ MPa y módulo de elasticidad de $E_c = 5.68$ GPa.

Figura 35. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de la muestra de FRC-2 (concreto fibro-reforzado con fibras de vástago de plátano)



Fuente: elaboración propia.

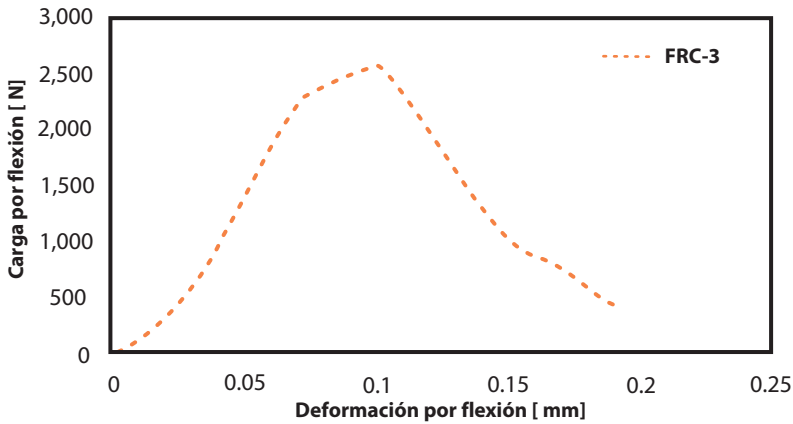
Al comparar el FRC-2 con fibras de plátano con el FRC-1 con fibras de fique, se evidencia que la resistencia a la flexión del FRC-2 está por debajo de un 60 % de la capacidad que tiene el FRC-1. Además, la rigidez del material y la deformación a la flexión no es comparable con los resultados que se presentaron con el microconcreto reforzado con fibras de vidrio, lo cual se traduce a un material menos resistente y menos dúctil que otros materiales con composición similar, como lo es el FRC-1 con fibras de fique.

- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de bagazo de caña de azúcar (FRC-3)**

El bagazo de la caña de azúcar es un material sobrante de la producción de azúcar, panela y sus derivados, este subproducto es desechado y no tiene un uso particular. Teniendo en cuenta las características mencionadas en el capítulo 1 de este libro, es un material que tiene propiedades para ser precursor de fibro-refuerzo de las mezclas de microconcreto siempre y cuando se realice un correcto tratamiento químico para eliminar la lignina que pueda afectar la estructura interna del compuesto con reacción alcalina con el cemento.

La Figura 36 muestra un gráfico con la curva de tendencia de carga vs. flecha para muestra denominada FRC-3 (concreto fibro-reforzado con fibras vegetales de bagazo de caña de azúcar). Dentro de los resultados que más se destacan se tiene la carga máxima de rotura a la flexión de 2546 N, ya que las muestras tienen una sección de 40 x 40 mm (área de 1600 mm²), entonces el módulo de rotura del concreto sin fibras es de $F_{cr} = 9.55$ MPa. La resistencia a la compresión de la muestra FRC-3 se determinó como $f'_c = 23.7$ MPa y módulo de elasticidad de $E_c = 10.42$ GPa.

Figura 36. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de la muestra de FRC-3 (concreto fibro-reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar)



Fuente: elaboración propia.

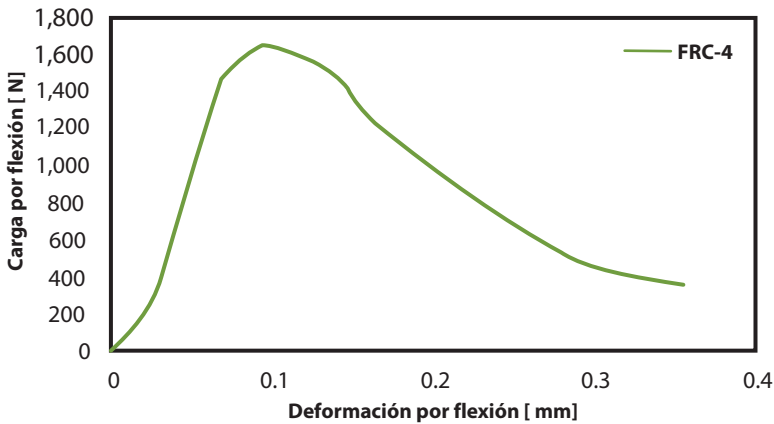
Aunque las fibras tienen buenas propiedades mecánicas, no se presentó una mejora en las mezclas de microconcreto, lo cual se puede deber a que las fibras luego del tratamiento químico pierden su forma y se desgasta la celulosa propia del material. La gráfica muestra un comportamiento similar al del FRC-2 con fibras de plátano, aunque con mayor rigidez y mejor resistencia a la flexión. El FRC-3 con fibras de caña de azúcar es dos veces más rígida que la mezcla de FRC-2 y tiene una resistencia a la flexión un 35 % mayor que la del FRC-2; sin embargo, los resultados no son comparables con la capacidad de resistencia del GRC, pero sí presenta una leve mejoría en comparación con el microconcreto sin reforzar.

- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de guadua (FRC-4)**

Las fibras vegetales de guadua, planta derivada de la familia del bambú, es uno de los productos con mejores propiedades mecánicas, que puede ser comparable con las características del acero. Sin embargo, en el desarrollo de la investigación que conllevó a la publicación de este libro, no se evidencia un correcto funcionamiento del compuesto.

La Figura 37 muestra un gráfico con la curva de tendencia de carga vs. flecha para muestra denominada FRC-4 (concreto fibro-reforzado con fibras vegetales de guadua). Dentro de los resultados que más se destaca, se tiene: carga máxima de rotura a la flexión de 1523 N, ya que las muestras tienen una sección de 40 x 40 mm (área de 1600 mm²), entonces el módulo de rotura del concreto sin fibras es de $F_{cr} = 5.7$ MPa. La resistencia a la compresión de la muestra FRC-4 se determinó como $f'_c = 21.5$ MPa y módulo de elasticidad de $E_c = 6.55$ GPa.

Figura 37. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de la muestra de FRC-4 (concreto fibro-reforzado con fibras de guadua)

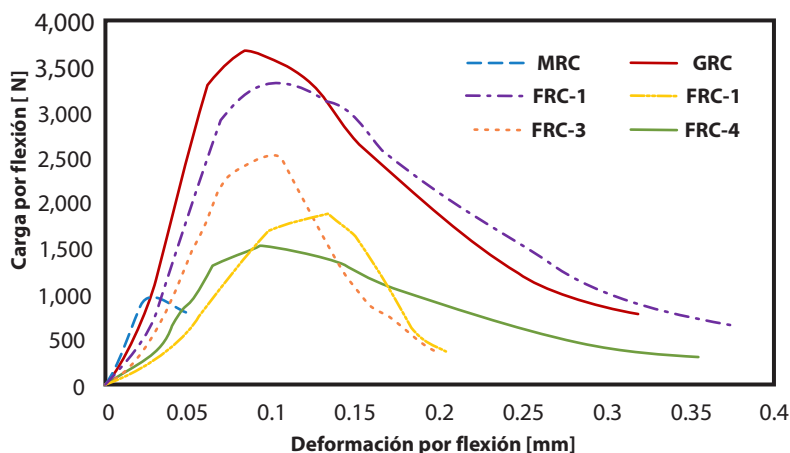


Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar que la extracción de las fibras de guadua se realizó de forma mecánica, lo que produjo una fibra rústica que afectó directamente la resistencia del microconcreto. Se disminuyó la resistencia a la compresión en un 34 % aunque se aumentó la resistencia a la flexión en un 61 %, comparado con el microconcreto sin fibro-reforzar; sin embargo, en comparación con las demás muestras de microconcreto fibro-reforzado con otras fibras vegetales, se tiene que el FRC-4 con fibras de guadua presenta las propiedades más desfavorables, presentado las demás fibras mejores resultados.

La Figura 38 muestra la curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de todos los tipos de microconcreto ensayados. Se evidencia que el microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio es el que mejor resultado presenta, ya que resiste la mayor carga de rotura a la flexión. Además, se evidencia que la pendiente de la curva en la zona elástica es la inclinada y, por lo tanto, es el tipo de microconcreto más rígido después del microconcreto convencional. Por otra parte, la ductilidad de todos los microconcretos fibro-reforzados mejora notoriamente en comparación con el mismo material sin fibras de refuerzo, por lo que se puede concluir que, al igual que las fibras de vidrio, las fibras vegetales aportan propiedades importantes en el comportamiento del microconcreto; sin embargo, como se mencionó anteriormente, se debe estudiar la durabilidad del material, puesto que las fibras al tratarse de materiales biodegradables, pueden ocasionarse una pérdida de resistencia a través del paso del tiempo.

Figura 38. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de todos los tipos de concreto ensayados



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 11 muestra los resultados de las propiedades mecánicas de las probetas de concretos fabricados, obtenidos a través de ensayos a nivel de laboratorio. Donde se puede evidenciar que el MRC presente los picos máximos y mínimos en la resistencia, es decir, es el mejor material para trabajar a compresión, pero no tiene resistencia significativa para trabajar a tracción o a flexión. Por otra parte, todos los materiales cuentan con una densidad similar, lo que indica que las fibras al adicionarse en proporciones bajas, no afectan el peso del microconcreto.

Tabla 11. Resultados de las propiedades mecánicas de los concreto ensayados

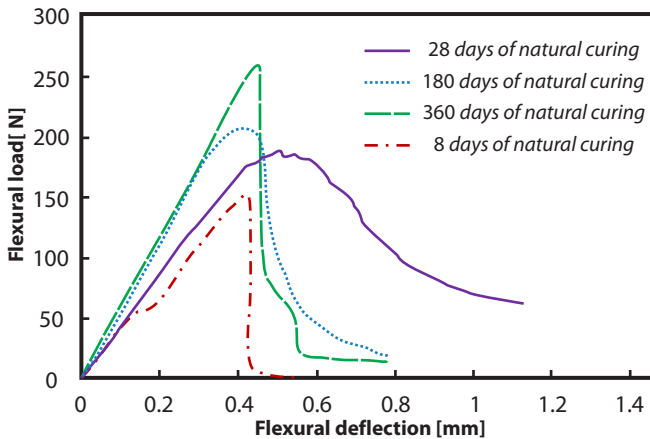
Tipo de Concreto	f'_c [MPa]	F_{cr} [MPa]	E_c [GPa]	ρ_c [g/cm ³]
MRC	32.4	3.53	15.49	2.16
GRC	28.5	13.79	17.59	2.04
FRC-1	26.2	12.58	13.80	2.11
FRC-2	24.8	7.09	5.68	2.13
FRC-3	23.7	9.55	10.42	2.08
FRC-4	21.5	5.71	6.55	2.01

Fuente: elaboración propia.

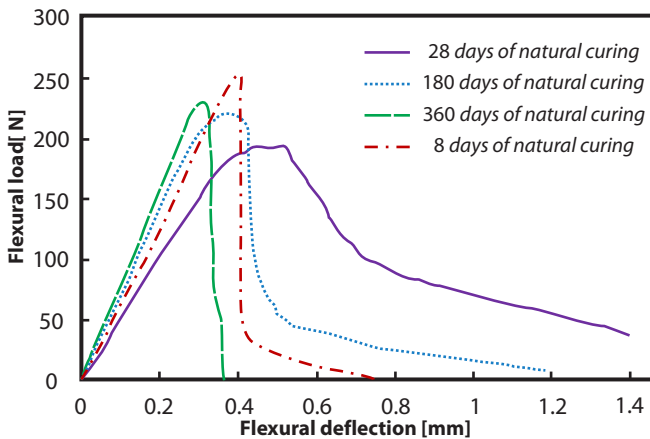
Los resultados mostrados anteriormente fueron comparados con los resultados mostrados por otros autores a nivel mundial. A continuación, se muestran algunos de las propiedades mecánicas presentes en fuentes de información secundaria.

Cheng *et al.* (2019) dedujeron que el módulo de rotura o resistencia a la flexión, dependiendo de la edad del GRC, genera cambio de resistencia de la matriz, aumentando con la extensión del tiempo de curado dentro de los 360 días y es más alto que el del mortero de referencia correspondiente sin fibra de vidrio.

Figura 39. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de concreto reforzados con fibras de vidrio mediante varios métodos de curado



(a)



(b)

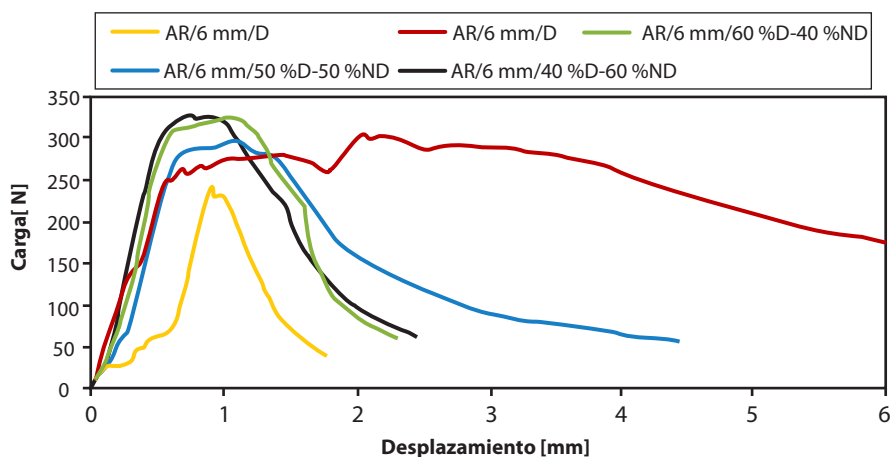
Fuente: Cheng *et al.* (2019).

La Figura 39 muestra las curvas de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de concreto reforzado con fibras de vidrio mediante varios métodos de curado. La investigación desarrollada por Cheng *et al.* (2019), las gráficas muestran las curvas de carga-deflexión de flexión de GRC con diferentes aditivos después del curado natural durante 28, 180, 360 días y envejecimiento acelerado durante 8 días. Las curvas de carga-deflexión de flexión de cada GRC tienen una parte superior de arco después de curar naturalmente durante 28 días. El análisis se realizó con probetas de 250 x 50 x 10 mm, por

lo que los resultados del módulo de rotura F_{cr} para el concreto con curado convencional a los 28 días se ubica entre 13 y 15 MPa, lo cual es similar a los resultados presentados por los ensayos realizados.

Por otra parte, están los resultados presentados por Lalinde (2020), quién desarrolló concreto fibro-reforzado con fibras de vidrio tipo AR. Las fibras utilizadas en dicha investigación tuvieron longitudes de 6 mm y las resistencias a la flexión se presentan entre los 9 y 11 MPa, las probetas utilizadas fuerin de $1 \times 5 \times 22.5$ cm, similares a las utilizadas por Cheng *et al.* (2019) y la curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de concreto reforzados con fibras de vidrio según Lalinde (2020) se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Curva de carga [N] vs. deformación [mm] por esfuerzos de flexión de concreto reforzados con fibras de vidrio de 6 mm



Fuente: Lalinde (2020).

Todas las propiedades mecánicas mostradas anteriormente están dentro de los rangos presentados por Comino (1995) que, a su vez, referencia Lalinde (2020) en su tesis doctoral. Dichos rangos se evidencian en la Tabla 12 mostrada a continuación; sin embargo, una de las diferencias más notorias se tiene en la resistencia a la compresión, ya que el rango determinado para los concretos fibro reforzados está entre 20 y 30 MPa, lo cual dista del rango 40-60 MPa. El motivo principal se debe a que el cemento utilizado en para la investigación propia no es un cemento estructural, sino que este es un cemento tipo UG de uso general.

Tabla 12. Propiedades mecánicas GRC (10 mm de espesor, 28 días de fabricación)

Característica	Unidad	Mortero común	Premezcla GRC
Contenido de fibra	% peso	0	3
Módulo de rotura a flexión (F_{cr})	MPa	5-12	10-14
Límite elástico a flexión	MPa	3-6	5-8
Resistencia a la compresión (f'_c)	MPa	20-50	40-60
Módulo de elasticidad (E_c)	GPa	9-15	10-20
Densidad del material (ρ_c)	g/cm^3	1.7-2.1	1.8-2.0

Fuente: Comino (1995) referencia por Lalinde (2020).



Capítulo 4

**Aplicación del microconcreto
fibro-reforzado en la construcción**

Utilidad en la industria de la construcción y la arquitectura

Como se ha descrito en los capítulos anteriores, el uso del concreto fibro-reforzado se ha extendido a nivel mundial, por la gran cantidad de ventajas y beneficios que aportan a las estructuras. Este capítulo tiene como finalidad presentar diversos usos que tienen el microconcreto fibro-reforzado con diferentes tipos de fibras. Dentro de las fibras se encuentran las fibras de vidrio, fibras de acero, fibras sintéticas y fibras de origen vegetal. Cada una de las fibras cuenta con una característica especial que la hace ideal para un uso específico, de tal manera que se describe de forma generalizada los usos más frecuentes a los que se exponen los compuestos fibro-reforzados en la industria de la construcción y de la arquitectura.

Microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio

El microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio es un material con un amplio abanico de aplicaciones en los campos de la arquitectura y de la construcción. La eficiencia del GRC en el control de agrietamiento y fisuramiento interno temprano lo convierte en un material ideal para productos de construcción (Kumar *et al.*, 2020); por ser un tipo de concreto armado no requiere ningún acero adicional, haciéndolo más adecuado para productos prefabricados. Los paneles de GRC se desarrollaron como respuesta a la necesidad de encontrar un material con el mismo nivel de resistencia que el hormigón armado, pero con mayor capacidad de manejo y mejor comportamiento de tracción (Beltrán *et al.*, 2013).

El GRC tiene unas características y propiedades que lo convierten en un material ideal para la fabricación de paneles y otros productos, tanto en acabado y resultados como en método de trabajo y tratamiento (Lalinde, 2020). Entre las características y propiedades del GRC se encuentran la durabilidad de la fibra de vidrio que no se corroe fácilmente, la flexibilidad del material que se debe a su resistencia a la tracción y la resistencia del material que puede soportar una amplia gama de impactos y situaciones meteorológicas. Impermeabilidad e incombustibilidad (Girbés, 2004).

Por lo tanto, según lo mencionado en párrafos anteriores, el microconcreto reforzado con fibras de vidrio tiene diversos usos, principalmente placas y paneles. A continuación, se mencionan algunos usos del GRC en la industria de la construcción y de la arquitectura.

- **Construcción de viviendas**

El microconcreto fibro-reforzado tiene buenas propiedades a la flexión y la flexo-compresión. Se utiliza con frecuencia en el diseño y renovación de fachadas y portones, así como para encofrados y sistemas modulares de vivienda (Figura 41), también se incluyen cajetines, casetas de electricidad y contadores. Además, estos paneles se utilizan para construir varias piscinas, vallas, celosas y pasarelas.

Figura 41. Vivienda modular con placas prefabricadas



Fuente: Su casa, construcciones prefabricada. (s.f.).

Las viviendas modulares son un tipo de edificación prefabricada similar a la construcción con mampostería, es decir, este tipo de estructura se compone de paneles pequeños que se encajan para formar una estructura compuesta. La dimensión de los paneles depende directamente de la modulación de la vivienda, generalmente un panel no supera un metro cuadrado y el espesor es de alrededor de 10 cm. Aunque si se cuenta con la maquinaria adecuada se puede fabricar paneles de mayor dimensión; sin embargo, se espera que este tipo de viviendas sean sencillas de construir y no requieran de mano de obra especializada para la construcción.

- **Tanques de las piscifactorías**

Los tanques de las piscifactorías son estructuras utilizadas en la acuicultura que permiten la remoción de materia orgánica y las excreciones de los peces. De tal forma que los tanques ayudan a evitar el establecimiento de zonas desoxigenadas, así como ocurre en el hacinamiento de los peces (Acuicultura, s.f.).

Como se muestra en la Figura 42, los tanques de las piscifactorías generalmente están fabricados de concreto, aunque en algunos casos se pueden fabricar de otros materiales. La estructuración del tanque se realiza con paneles prefabricados que permitan un montaje sencillo de la estructura, las paredes al ser tan delgadas dificultan el uso de acero de refuerzo, por lo que el uso de paneles de concreto fibro-reforzado resultan una alternativa ideal.

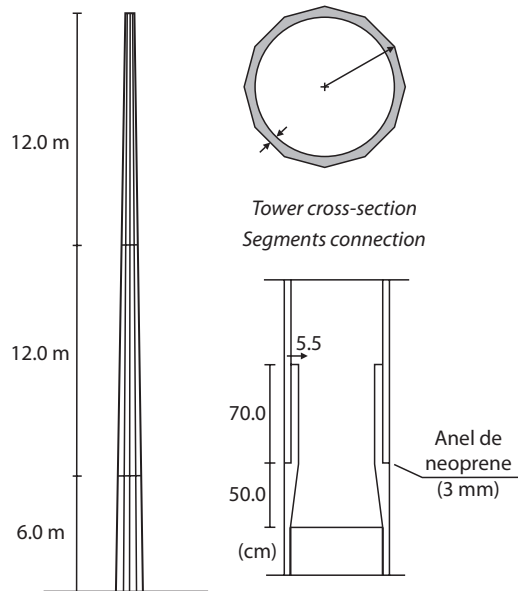
Figura 42. Tanques construidos con placas prefabricadas

Fuente: Silva O. (s.f.).

Además de las paredes, los paneles de concreto fibro-reforzado también se utilizan para la tapa y fondo del tanque. En el caso de las tapas, al ser el GRC un material que tiene buena resistencia a la flexión, no requieren, además de vigas o viguetas de apoyo, un refuerzo adicional para soportar cargas vivas como lo son las cargas transitorias durante el mantenimiento del tanque, es decir, el microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio es un compuesto que se puede utilizar de forma eficiente en la fabricación de paneles para ser utilizados en la construcción de las paredes, tapas y fondo de tanques de las piscifactorías de la acuicultura.

- **Torres de telecomunicaciones**

Ferreira y Branco (2007) estudiaron la aplicación estructural de GRC en torres de telecomunicaciones. El uso de GRC puede utilizarse como material estructural con peso reducido y buenas propiedades de durabilidad. La torre prototipo tenía 30 m de altura y estaba compuesta por tres segmentos diferentes, producidos por separado. El segmento base tiene una altura de 6 m mientras que los segmentos intermedio y superior tienen una altura de 12 m (Figura 43). La sección transversal de paredes delgadas es externamente un polígono de 12 lados e internamente circular.

Figura 43. Geometría de la torre de telecomunicación en GRC

Fuente: Ferreira y Branco (2007).

La resistencia del GRC pretensado no es suficiente para soportar los efectos del viento y es necesario colocar elementos de refuerzo complementarios. En el prototipo se evitó el uso de barras de acero ordinarias por razones de durabilidad y para evitar interferencias electromagnéticas. En su lugar, inicialmente se utilizaron tendones de carbono como refuerzo longitudinal a lo largo de la altura de la torre con barras de acero inoxidable suplementarias en las zonas más tensionadas. En las últimas pruebas experimentales de colapso se utilizó únicamente acero inoxidable porque demostró conferir una mayor ductilidad a la torre (Ferreira y Branco, 2007).

- **Construcción de drenajes y obras de arte en las vías**

Las obras de arte en las vías se refieren a todas aquellas obras de infraestructura vial que hacen parte del sistema de drenaje de las vías y carreteras, como lo son las cunetas, canaletas, box-culvert, alcantarillas, entre otros. Estas obras son construidas generalmente en concreto reforzado y en concreto prefabricado para facilitar su instalación; sin embargo, en los años más recientes, con la aplicación de los materiales más eficientes, se ha implementado el uso de concreto fibro-reforzado para construcción de los drenajes, esto se debe a que al ser el GRC un material que absorbe mayor energía de deformación, lo hace un material más flexible que puede garantizar un correcto funcionamiento para el paso vehicular, ya que un concreto rígido puede sufrir mayor desgaste por el paso cíclico de vehículos en una vía.

La Figura 44 muestra placas prefabricadas perforadas como sistema de tapa de drenaje en vías y carreteras, aunque se debe aclarar que el uso de este tipo de drenaje se extiende a otras áreas y no solo para uso vial. Otro uso particular se da en el sector de la ganadería y la agricultura, donde se requieren de drenajes útiles, durables y eficientes que soporte el

paso del tiempo y cumplan con el fin para el que fueron destinados. Siendo, entonces, las placas prefabricadas de microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio, el elemento ideal para el uso mencionado.

Figura 44. Sistemas de drenajes con placas prefabricadas



Fuente: Drenajes. (s.f.).

- **Otros usos en la industria de la construcción**

Banthia *et al.* (2012) describen el uso del GRC en el sector de la construcción, como lo es el uso en zanjas de tuberías (Figura 45). El GRC se utilizó como material de construcción de las paredes y fondos de la zanja, al igual que para los soportes de las tuberías. Los soportes se denominan almohadillas. Las almohadillas de caja soportan armarios eléctricos, estas almohadillas huecas tienen una dimensión de 1,2 m de lado con láminas de 13 mm y se diseñaron para soportar una carga de 1,7 toneladas. Los lados verticales de las almohadillas más grandes se endurecieron con nervaduras hechas con tiras de poliestireno rociadas con GRC. Se utilizó GRC porque su resistencia y esbeltez hicieron que las almohadillas fueran fáciles de manejar.

Figura 45. Aplicación de zanjas de tuberías de concreto reforzado con fibra de vidrio. Cortesía de Nippon Electric Glass America Inc



Fuente: Banthia *et al.* (2012).

La Figura 46 muestra paneles de valla de concreto prefabricado. Se moldean y se instalan verticalmente para formar una pared continua. Los paneles de la cerca se han construido utilizando únicamente fibras para reforzar el concreto.

Figura 46. Paneles de valla de concreto prefabricado. Cortesía de Bekaert Corp. EE. UU



Fuente: Banthia *et al.* (2012).

- **Diseño, decoración y arquitectura**

El GRC se puede utilizar como paneles de pared, marcos de ventanas, antepechos, cubiertas de columnas, plafones, cornisas, ménsulas, dintel, barandas, pilastras, cofias, cúpulas, etc. La flexibilidad básica de uso hace que este sea un uso ideal para muchos trabajos de paisajismo. Los usos en el paisaje, así como en el paisaje duro, incluyen mobiliario de sitio, jardineras, bolardos, urnas, mesas, fuentes, estructuras marinas, piscinas y formaciones rocosas (Vahidi y Malekabadi, 2011).

Las posibilidades decorativas del panel GRC son tantas que se utiliza para crear muebles, esculturas o encimeras (Figura 47). Sus acabados permiten imitar a una gran diversidad de materiales. Además de mobiliario, el GRC también se ha extendido a la fabricación de fachadas decorativas, jarrones y demás utensilios de concreto que se puedan utilizar en la vida cotidiana.

Figura 47. Muebles con placas prefabricadas



Fuente: Goian (s.f).

Microconcreto fibro-reforzado con fibra de acero

Las fibras de acero son filamentos de distintas longitudes según la aplicación, que permite la sustitución total del tradicional concreto armado de mallazos y hierro corrugado. Las fibras de vidrio son ampliamente utilizadas en aplicaciones de capas delgadas, particularmente en la estabilización de taludes inclinados y revestimientos de túnele. En aplicaciones donde no se requiere la presencia de un refuerzo continuo para la integridad estructural, como pavimentación, pilotes y revestimientos de concreto lanzado, por ejemplo, los aumentos en la resistencia a la flexión asociados con las fibras pueden reducir los claros y/o proporcionar un desempeño estructural.

Figura 48. Concreto lanzado



Fuente: Probacons S.A. (2017).

Sika (2017) ofrece concretos de ultra-alta resistencia, cuya resistencia se encuentra entre 1200 kg/cm² a 1800 kg/cm² reforzados con fibra de longitud entre 4 mm y 15 mm con un diámetro cercano a 0.2 mm de acero de alto carbono. La Figura 48 muestra el concreto reforzado con fibras de acero y su aplicación en el sector de la construcción como concreto lanzado para estabilización de taludes. La Figura 49 muestra el aspecto del concreto fresco reforzado con fibras de acero, el cual se utiliza para diferentes usos, entre ellos para concreto lanzado.

Figura 49. Concreto fresco reforzado con fibras de acero



Fuente: P. Rivera (2020).

A continuación, se describen algunos ejemplos característicos de uso estructural y no estructural del concreto reforzado con fibra de acero.

- **Pisos industriales**

Útil para altas cargas de impacto y para reducción o eliminación de juntas debido a que con dichas fibras pueden hacer losas con dimensiones más grandes, donde las juntas de contracción son aserradas.

Figura 50. Pisos industriales reforzados con fibras

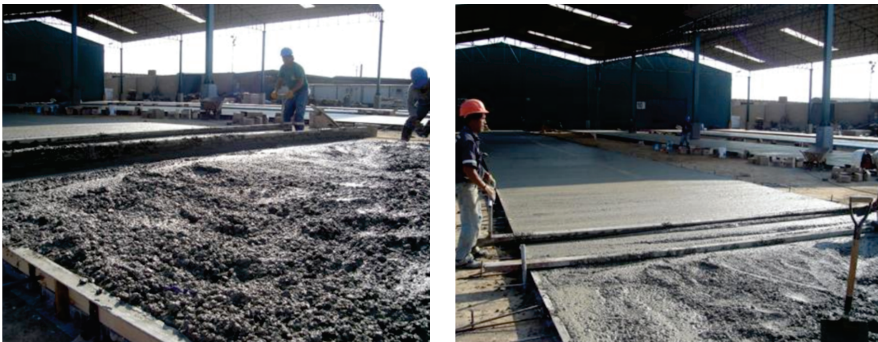


Fuente: Microsoft PowerPoint - Pisos Industriales - POLICEMENTO (s.f.).

- **Pavimentos**

El uso de microconcreto fibro-reforzado se utiliza particularmente cuando se requieren espesores menores a los normales, por ejemplo, en aeropuerto y las capas de revestimiento de las pistas, pavimentos de autopistas. Los cantidad de fibra de acero varía entre 0,2 % al 2,5 % del volumen del concreto, esto se debe a que cantidades mayores de fibra afectan de manera considerable la trabajabilidad de la mezcla. Montalvo-Guevara M E (2015).

Figura 51. Losa de Almacén: Ransa Lima Perú



Fuente: Montalvo (2015).

- **Estructuras prefabricadas**

Para controlar agrietamientos en elementos preesforzados donde sea necesario el aumento de la resistencia al impacto o a la tenacidad, así como en muros o paneles autoportantes que no soportan cargas, dovelas de túneles, tubos, etc.

La Figura 52 muestra el revestimiento de un túnel segmentado con concreto reforzado con fibras de acero. Los revestimientos de túneles segmentados son estructuras únicas para diseñar debido a las diferentes cargas que deben resistir, los segmentos están expuestos a la flexión a las pocas horas de la fundición cuando se retiran de los moldes de producción y se apilan en cámaras de curado.

Figura 52. Revestimiento de túnel en dovelas mediante concreto armado con fibras de acero. Cortesía de Bekaert Corp. EE. UU



Fuente: Banthia *et al.* (2012).

Microconcreto fibro-reforzado con fibras sintéticas

Los tipos de fibras usadas en concreto son acrílicas, aramida, carbón, *nylon*, poliéster, polietileno y polipropileno. Generalmente utilizadas en tablonces de cemento, la producción de tejas, concreto pretensado, entre otros. Una aplicación importante de las fibras sintéticas es la producción de prefabricados, tanto en la prefabricación pesada (pilotes, postes, dovelas para túneles, vigas) como en la prefabricación liviana (ladrillos, láminas, etc.) (ARGOS) (SIKA).

La Figura 53, el MallaPet 3D, es un producto fabricado con fibras sintéticas para reforzar el hormigón de la empresa Metainplast en Norte de Santander, Colombia. Según el fabricante, Metainplast S.A.S.©, 2019, “MallaPet 3D son fibras sintéticas de refuerzo de hormigón cuya composición de alta tenacidad y resistencia permite obtener las mejores prestaciones del hormigón”. Las fibras sintéticas de MallaPet 3D se adhieren a la masa de hormigón formando una matriz de refuerzo tridimensional que se distribuye por toda la mezcla, reduciendo las fisuras y mejorando las propiedades del hormigón”.

Figura 53. Fibra sintética PET. Empresa Metainplast

Fuente: METAINPLAST METAINPLAST (2019).

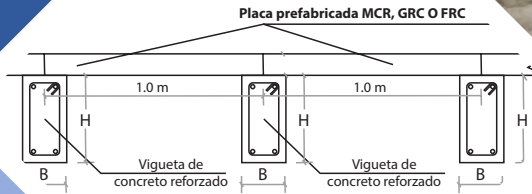
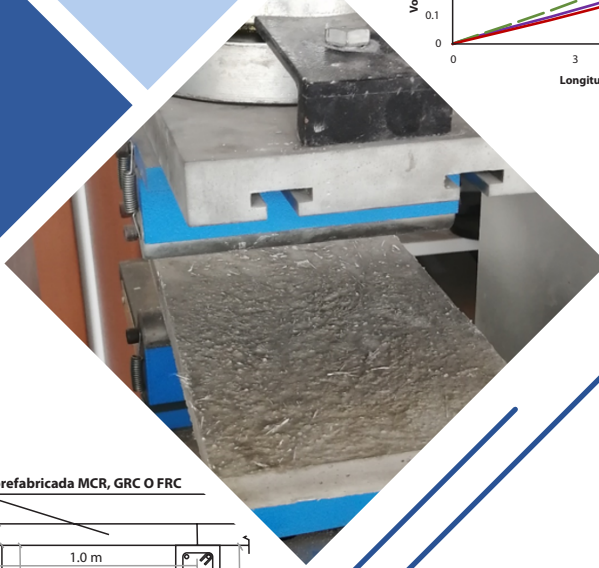
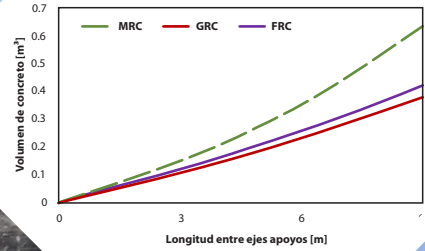
Microconcreto fibro-reforzado con Fibra vegetales

En los últimos años se ha incrementado el interés por el uso de fibras de celulosa como alternativas a los refuerzos convencionales en composites. El desarrollo de materiales saludables y amigables con el medio ambiente, comercialmente viables, basados en recursos naturales va en aumento. En este sentido, las fibras celulósicas como refuerzo de los compuestos de mortero de cemento, constituyen una opción muy interesante para la industria de la construcción. Este artículo presenta una revisión de la investigación realizada durante los últimos años en el área de los composites, cementosos reforzados con fibras de celulosa. Se presentan las fibras utilizadas, métodos de procesamiento, comportamiento mecánico y durabilidad. Los principales logros encontrados han sido el desarrollo de compuestos de cemento duraderos con una adhesión de matriz de fibra optimizada. Además, los composites textiles desarrollados recientemente permitirán obtener materiales de altas prestaciones reforzados con fibras vegetales.

Coral (2019) realizó **placas de 0,27*0,27*0,0035** para analizar su comportamiento y las propiedades físicas y mecánicas del concreto mezclado con cascarilla de café, de esta investigación se concluyó que es óptimo para el concreto arquitectónico. En **Villavicencio** se desarrolló una tesis para realizar **paneles** a base de **aserrín** y **polímeros** con resultados de laboratorio del comportamiento del concreto muy bueno, pero no terminaron el producto final, es decir, el panel (Agudelo *et al.*, 2016). De la monografía realizada en **Colombia** para un **diseño estructural** participativo con **cascarilla de arroz**, se obtuvieron resultados bastante buenos y no afectaron en gran parte la resistencia del material, por lo cual se procedió a realizar mampostería con cascarilla de arroz (Castaño y Trigos, 2017).

En comparación con una mampostera de arcilla, los resultados en compresión a mampostera con cascarilla de arroz son muy buenos, con promedios de 867 y 898 Kg/cm², esto podría significar un ahorro de costos. Cabe destacar que se aumenta la dosis de cemento, pero se

sustituye la sustitución de cemento aglomerado en un 10% por cascarilla de arroz (Castaño y Trigos, 2017). Por otro lado, en 2010, estudiantes uruguayos crearon un hormigón ecológico a partir de cascarilla de arroz, concluyendo que el material es resistente, además de un buen aislante térmico y de humedad. Este es un hormigón vivo que se utiliza para la construcción de techos vivos o paneles prefabricados, más que para hacer cimientos o vigas. Los estudiantes pudieron patentar su invento en Uruguay y el Mercosur.



Capítulo 5

Placas de entrepiso en microconcreto fibro-reforzado

En este capítulo se estudia el uso de la aplicación de microconcreto fibro-reforzado en elemento horizontal de entrepiso como lo son las placas. Las placas de entrepiso, simplemente apoyadas, fueron diseñadas para un uso residencial en diferentes configuraciones y con diferentes composiciones de microconcreto fibro-reforzado, con la finalidad de identificar el compuesto con mejor comportamiento mecánico.

Para el diseño estructural de placas se utilizó microconcreto sin fibras, con fibras de vidrio y con las fibras vegetales que presentó mejores resultados, es decir, el que contiene fibras de fique, así como se describió en el capítulo 3 del presente libro. La Tabla 13 muestra las propiedades mecánicas de microconcretos utilizados.

Tabla 13. Propiedades mecánicas de concretos utilizados para el diseño de placas

Tipo de Concreto	MRC	GRC	FRC
f'_c [MPa]	32.4	28.5	26.2
F_{cr} [MPa]	3.53	13.79	12.58
E_c [GPa]	15.49	17.59	13.8
ρ_c [g/cm ³]	2.16	2.04	2.11

Fuente: elaboración propia.

Diseño de placas macizas en microconcreto reforzado y fibro-reforzado

Se diseñaron placas macizas simplemente apoyadas variando la longitud entre apoyos: 1 m, 3 m, 5 m, 7 m y 9 m. Para cada longitud se determinó el mayor momento y el mayor cortante, con los cuales se diseñó la flexión y cortante de las placas. Las ecuaciones utilizadas dependen del tipo de concreto que se esté utilizando en el diseño, es decir, las ecuaciones cambian un poco si se trata de concreto fibro-reforzado o si se trata de concreto convencional reforzado con acero.

- **Ecuaciones para diseño a flexión y cortante de placas en concreto convencional**

Ecuación de momento nominal requiere de una cuantía de acero:

$$M_U = \phi M_n = \phi F_y \rho \left(1 - 0.59 \rho \frac{F_y}{f'_c} \right) b d^2$$

La cuantía de acero se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{F_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2M_U}{0.85 \phi f'_c b d^2}} \right)$$

Siendo M_u el momento máximo presente en la placa. La ecuación de cortante en placas macizas se calcula con la siguiente ecuación:

$$\phi V_c = \phi 0.17 \sqrt{f'_c} b d$$

Para fines de comparación, se espera que la sección diseñada no falle por momento de agrietamiento, de tal forma que el momento de agrietamiento debe ser mayor que el momento máximo de la placa, es decir, se debe determinar el momento de agrietamiento con la siguiente ecuación:

$$M_{cr} = \frac{F_{cr} I}{C_t}$$

es la inercia de la sección transformada y C_t es la distancia entre el eje neutro y la fibra extrema de la zona de tracción. Dichos parámetros se calculan así:

$$C_t = h - C_c$$

$$I = \frac{bh^3}{12} + (bh)(y_1)^2 + (n-1)A_s(y_2)^2$$

$$C_c = \frac{bh(h/2) + (n-1)A_s d}{bh + (n-1)A_s} \quad n = \frac{E_s}{E_c} \quad y_1 = |h/2 - C_c| \quad y_2 = |d - C_c|$$

- **Ecuaciones para diseño a flexión y cortante de placas en concreto reforzado con fibras de vidrio y fibras vegetales**

Se chequeará que el momento de agrietamiento sea mayor que el momento máximo en la placa, la ecuación de momento de agrietamiento es:

$$M_{cr} = \frac{F_{cr} b h^2}{6}$$

La ecuación de cortante en placas macizas se calcula con la siguiente ecuación:

$$\phi V_c = \phi 0.17 \sqrt{f'_c} b d$$

- **Chequeo de deflexión máxima para control de deformaciones en placas que están sujetas a elementos susceptibles a dañarse por deflexiones grandes**

Con el fin de garantizar un correcto funcionamiento de las diferentes placas diseñadas, la deflexión máxima calculada no podrá ser superior a $L/500$. La deflexión en placas simplemente apoyadas se calcula con la siguiente expresión:

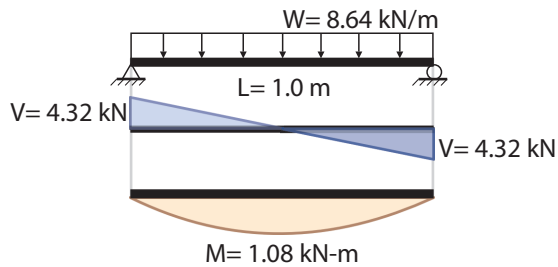
$$\Delta = \frac{5WL^4}{384EI} \leq \frac{L}{500}$$

La carga W para todos los casos será $W = 1.2W_D + 1.6W_L$. W_D es la carga muerta que incluye el peso propio de la placa y una carga sobrepuesta que se definió como 3.6 kN/m^2 es la carga viva que corresponde al uso que tendrá la placa, si se asume un uso residencial donde la carga viva corresponde al peso de tráfico de personas $W_L = 1.8 \text{ N/m}^2$.

La Tabla 14 muestra los esfuerzos presentes en la placa maciza MRC por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 1 m. Los esfuerzos calculados fueron determinados por medio de procedimiento de equilibrio estática, por lo que se tuvo en cuenta la longitud entre apoyos de los elementos y la carga última de diseño.

Tabla 14. Esfuerzos en placa maciza MRC de 1 m de longitud

Concreto	MRC
h [m] =	0.050
d [m] =	0.025
b [m] =	1.0
L [m] =	1.0
Pp [kN/m] =	1.2
W_p [kN/m] =	3.6
W_l [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	8.64
V [kN] =	4.32
M [kN-m] =	1.08



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 15 muestra el diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 1 m de longitud. Los cálculos muestran que la placa funciona con 5 cm de espesor, el refuerzo requerido es una malla electrosoldada XX-159 ($\varnothing 5.5 \text{ mm C/150 mm}$), lo que genera un área de acero de $1.59 \text{ cm}^2/\text{m}$. El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.7, lo cual significa que, el máximo esfuerzo generado por las cargas alcanza un 70 % del esfuerzo resistente por la sección.

Tabla 15. Diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 1 m de longitud

f'c [MPa] =	32.4
Fcr [MPa] =	3.53
Ec [GPa] =	15.49
Fy [MPa] =	420
Mu [kN-m] =	1.08

n =	12.91
Cc [m] =	0.0250
Ct [m] =	0.0250
y' [m] =	0.000
y² [m] =	0.000

$\rho =$	0.00474		$I [mm^4] =$	0.000010	
$A_s =$	1.19		$M_{cr} [kN-m] =$	1.47	Cumple
$A_s (real) =$	1.59	Malla XX-159	$V_u [kN] =$	4.32	
$\rho (real) =$	0.00636		$\phi V_c [kN] =$	18.14	Cumple
$\phi =$	0.7		$\Delta [mm] =$	0.70	
$\phi M_n [kN-m] =$	1.43	Cumple	$\Delta_{m\acute{a}x.} [mm] =$	2	Cumple

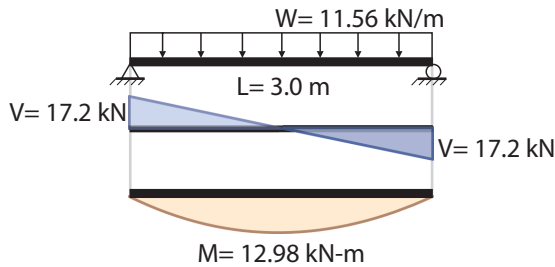
Fuente: elaboración propia.

En general, el diseño muestra la comparación entre las solicitaciones de carga y la resistencia del elemento. Se evidencia que el momento nominal y el momento de agrietamiento son mayores que el momento flector máximo en la placa. Del mismo modo, el cortante soportado por concreto y la rigidez del elemento es mayor que el cortante máximo de diseño y la rigidez máxima permitida, respectivamente.

La Tabla 16 muestra los esfuerzos presentes en la placa maciza MRC por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 3 m.

Tabla 16. Esfuerzos en placa maciza MRC de 3 m de longitud

Concreto	MRC
$h [m] =$	0.148
$d [m] =$	0.118
$b [m] =$	1.0
$L [m] =$	3.0
$P_p [kN/m] =$	3.552
$W_o [kN/m] =$	3.6
$W_l [kN/m] =$	1.8
$W [kN/m] =$	11.46
$V [kN] =$	17.19
$M [kN-m] =$	12.90



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 17 muestra el diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 3 m de longitud. Los cálculos muestran que la placa funciona con 14.8 cm de espesor, el refuerzo requerido es una malla electrosoldada XX-295 ($\varnothing 7.5$ mm C/150 mm) lo que genera un área de acero de 2.95 cm²/m. El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.9.

Tabla 17. Diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 3 m de longitud

f'c [MPa] =	32.4		n =	12.91	
Fcr [MPa] =	3.53		Cc [m] =	0.0750	
Ec [GPa] =	15.49		Ct [m] =	0.0730	
Fy [MPa] =	420		y¹ [m] =	0.001	
Mu [kN-m] =	12.9		y² [m] =	0.043	
ρ =	0.00250		I [mm⁴] =	0.000277	
As =	2.95		Mcr [kN-m] =	13.39	Cumple
As (real) =	2.95	Malla XX-295	Vu [kN] =	17.19	
ρ (real) =	0.00250		φVc [kN] =	85.64	Cumple
φ =	0.90		Δ [mm] =	2.82	
φMn [kN-m] =	12.91	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	3	Cumple

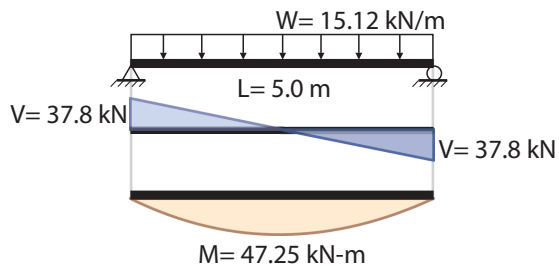
Fuente: elaboración propia.

El diseño presentado en la Tabla 17 muestra la comparación entre las solicitaciones de carga y la resistencia del elemento. Se evidencia que el momento nominal y el momento de agrietamiento son mayores que el momento flector máximo en la placa. Del mismo modo, el cortante soportado por concreto y la rigidez del elemento es mayor que el cortante máximo de diseño y la rigidez máxima permitida, respectivamente.

La Tabla 18 muestra los esfuerzos presentes en la placa maciza MRC por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 5 m.

Tabla 18. Esfuerzos en placa maciza MRC de 5 m de longitud

Concreto	MRC
h [m] =	0.275
d [m] =	0.245
b [m] =	1.0
L [m] =	5.0
Pp [kN/m] =	6.6
W_D [kN/m] =	3.6
W_L [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	15.12
V [kN] =	37.80
M [kN-m] =	47.25



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 19 muestra el diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 5 m de longitud. Los cálculos muestran que la placa funciona con 27.5 cm de espesor, el refuerzo requerido es una barra de acero #3 C/12 cm y transversal de #3 C/16 cm, lo que genera un área de acero de 5.92 cm²/m. El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.8.

Tabla 19. Diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 5 m de longitud

f'c [MPa] =	32.4		n =	12.91	
Fcr [MPa] =	3.53		Cc [m] =	0.1402	
Ec [GPa] =	15.49		Ct [m] =	0.1348	
Fy [MPa] =	420		y¹ [m] =	0.003	
Mu [kN-m] =	47.25		y² [m] =	0.105	
ρ =	0.00212		I [mm⁴] =	0.001813	
As =	5.19		Mcr [kN-m] =	47.46	Cumple
As (real) =	5.92	#3C/.12 m	Vu [kN] =	37.80	
ρ (real) =	0.00242		ϕVc [kN] =	177.81	Cumple
ϕ =	0.80		Δ [mm] =	4.38	
ϕMn [kN-m] =	53.81	Cumple	$\Delta_{\text{máx.}}$ [mm] =	5	Cumple

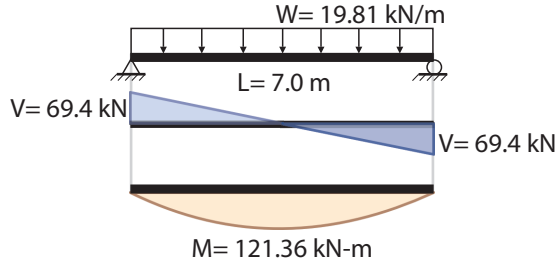
Fuente: elaboración propia.

Se evidencia que el momento nominal y el momento de agrietamiento son mayores que el momento flector máximo en la placa. Del mismo modo, el cortante soportado por concreto y la rigidez del elemento es mayor que el cortante máximo de diseño y la rigidez máxima permitida, respectivamente.

La Tabla 20 muestra los esfuerzos presentes en la placa maciza MRC por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 7 m.

Tabla 20. Esfuerzos en placa maciza MRC de 7 m de longitud

Concreto	MRC
h [m] =	0.438
d [m] =	0.408
b [m] =	1.0
L [m] =	7.0
Pp [kN/m] =	10.512
W_p [kN/m] =	3.6
W_L [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	19.81
V [kN] =	69.35
M [kN-m] =	121.36



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 21 muestra el diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 7 m de longitud. Los cálculos muestran que la placa funciona con 43.8 cm de espesor, el refuerzo requerido es una barra de acero #4 C/14 cm y transversal de #4 C/17 cm, lo que genera un área de acero de $5.92 \text{ cm}^2/\text{m}$. El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.78.

Tabla 21. Diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 7 m de longitud

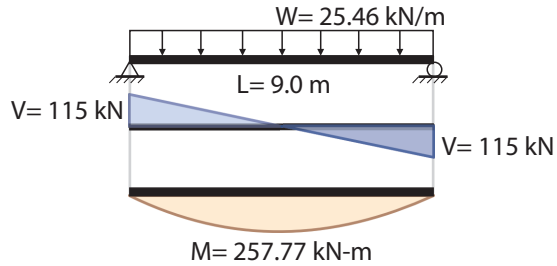
f'c [MPa] =	32.4		n =	12.91	
Fcr [MPa] =	3.53		Cc [m] =	0.2236	
Ec [GPa] =	15.49		Ct [m] =	0.2144	
Fy [MPa] =	420		y¹ [m] =	0.005	
Mu [kN-m] =	121.36		y² [m] =	0.184	
ρ =	0.00196		I [mm⁴] =	0.007385	
As =	7.99		Mcr [kN-m] =	121.60	Cumple
As (real) =	9.21	#4C/.14 m	Vu [kN] =	69.35	
ρ (real) =	0.00226		φVc [kN] =	296.10	Cumple
φ =	0.78		Δ [mm] =	5.42	
φMn [kN-m] =	139.65	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	7	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 22 muestra los esfuerzos presentes en la placa maciza MRC por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 7 m.

Tabla 22. Esfuerzos en placa maciza MRC de 9 m de longitud

Concreto	MRC
h [m] =	0.634
d [m] =	0.604
b [m] =	1.0
L [m] =	9.0
Pp [kN/m] =	15.216
W_p [kN/m] =	3.6
W_l [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	25.46
V [kN] =	114.57
M [kN-m] =	257.77



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 23 muestra el diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 7 m de longitud. Los cálculos muestran que la placa funciona con 43.8 cm de espesor, el refuerzo requerido es una barra de acero #4 C/14 cm y transversal de #4 C/17 cm, lo que genera un área de acero de 5.92 cm²/m. El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.72.

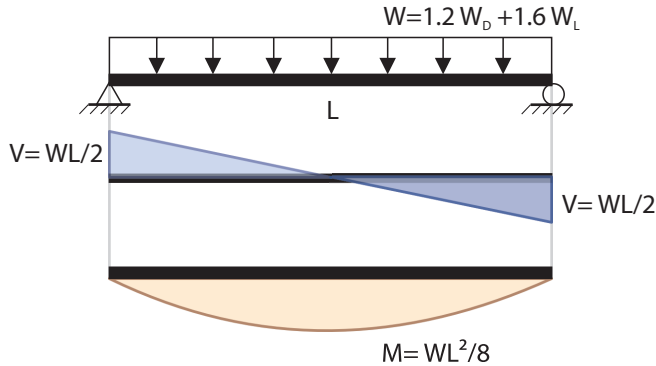
Tabla 23. Diseño a flexión y cortante de placa maciza MRC de 9 m de longitud

f'c [MPa] =	32.4		n =	12.91	
Fcr [MPa] =	3.53		Cc [m] =	0.3245	
Ec [GPa] =	15.49		Ct [m] =	0.3095	
Fy [MPa] =	420		y' [m] =	0.008	
Mu [kN-m] =	257.77		y² [m] =	0.279	
ρ =	0.00190		I [mm⁴] =	0.022606	
As =	11.46		Mcr [kN-m] =	257.86	Cumple
As (real) =	14.33	#4C/.14 m	Vu [kN] =	114.57	
ρ (real) =	0.00237		ϕVc [kN] =	438.35	Cumple
ϕ =	0.72		Δ [mm] =	6.21	
ϕMn [kN-m] =	321.31	Cumple	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	9	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Figura 54 muestra los diagramas de esfuerzos en placas macizas de GRC y FRC. Los esfuerzos calculados fueron determinados por medio de procedimiento de equilibrio estática, por lo que se tuvo en cuenta la longitud entre apoyos de los elementos y la carga última de diseño.

Figura 54. Diagrama de cortante y momento en placa maciza de GRC y FRC



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 24 muestra el diseño de placa maciza de 1 m de longitud en GRC y FRC. En primera instancia, es evidente mencionar que la placa maciza con GRC tiene menor espesor que la placa maciza de FRC, esto se debe a que la rigidez del GRC es mayor que la rigidez del FRC. La placa de GRC tiene 35 mm de espesor, lo cual lo hace una placa muy eficiente en términos estructurales, ya que tiene una dimensión pequeña, en comparación con los otros materiales y, además, tiene una resistencia a la flexión alta, lo cual se puede evidenciar debido a que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 36 % del esfuerzo resistente por la sección, puesto que el diseño fue gobernado por la deflexión máxima de la estructura.

Tabla 24. Diseño a flexión y cortante de placa maciza GRC y FRC de 1 m de longitud

Concreto	GRC		Concreto	FRC	
Pp [kN/m] =	0.714		Pp [kN/m] =	0.844	
W_D [kN/m] =	3.6		W_D [kN/m] =	3.6	
W_L [kN/m] =	1.8		W_L [kN/m] =	1.8	
W [kN/m] =	8.06		W [kN/m] =	8.21	
Mu [kN-m] =	1.01		Mu [kN-m] =	1.03	
b [m] =	1.0		b [m] =	1.0	
h [m] =	0.035		h [m] =	0.04	
Ct [m] =	0.0175		Ct [m] =	0.02	
I [mm⁴] =	0.000004		I [mm⁴] =	0.000005	
Mcr [kN-m] =	2.82	Cumple	Mcr [kN-m] =	3.35	Cumple
φ =	0.36		φ =	0.31	
Vu [kN] =	4.03		Vu [kN] =	4.11	

ϕV_c [kN] =	23.82	Cumple	ϕV_c [kN] =	26.10	Cumple
Δ [mm] =	1.67		Δ [mm] =	1.45	
$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	2	Cumple	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	2	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La placa de FRC tiene 40 mm de espesor, con un factor ϕ de 0.31, lo cual indica que, los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 31 % del esfuerzo resistente por la sección. En comparación con la placa maciza de concreto reforzado con acero en las mismas condiciones, se puede definir que las placas macizas en concreto fibro-reforzado tienen mayor eficiencia; sin embargo, es de vital importancia estudiar la durabilidad del concreto para su vida útil.

Tabla 25. Diseño a flexión y cortante de placa maciza GRC y FRC de 3 m de longitud

Concreto	GRC		Concreto	FRC	
P_p [kN/m] =	2.1624		P_p [kN/m] =	2.4476	
W_d [kN/m] =	3.6		W_d [kN/m] =	3.6	
W_L [kN/m] =	1.8		W_L [kN/m] =	1.8	
W [kN/m] =	9.79		W [kN/m] =	10.14	
M_u [kN-m] =	11.02		M_u [kN-m] =	11.40	
b [m] =	1		b [m] =	1	
h [m] =	0.106		h [m] =	0.12	
C_t [m] =	0.053		C_t [m] =	0.058	
I [mm ⁴] =	0.000099		I [mm ⁴] =	0.000130	
M_{cr} [kN-m] =	25.82	Cumple	M_{cr} [kN-m] =	28.21	Cumple
ϕ =	0.43		ϕ =	0.40	
V_u [kN] =	14.69		V_u [kN] =	15.21	
ϕV_c [kN] =	72.15	Cumple	ϕV_c [kN] =	75.70	Cumple
Δ [mm] =	5.92		Δ [mm] =	5.96	
$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	6	Cumple	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	6	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 25 muestra el diseño de placa maciza de 3 m de longitud en GRC y FRC. En primera instancia, es evidente mencionar que la placa maciza con GRC tiene menor espesor que la placa maciza de FRC, esto se debe a que la rigidez del GRC es mayor que la rigidez del FRC. La placa de GRC tiene 10.6 cm de espesor, lo cual lo hace una placa muy eficiente en términos estructurales, ya que tiene una dimensión pequeña en comparación con los otros

materiales y, además, tiene una resistencia a la flexión alta, lo cual se puede evidenciar debido a que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 43 % del esfuerzo resistente por la sección, puesto que el diseño fue gobernado por la deflexión máxima de la estructura. Por otra parte, la placa de FRC tiene 12 cm de espesor con un factor ϕ de 0.4, lo cual indica que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 40 % del esfuerzo resistente por la sección. En comparación con la placa maciza de concreto reforzado con acero en las mismas condiciones, se puede definir que las placas macizas en concreto fibro-reforzado tienen mayor eficiencia; sin embargo, es de vital importancia estudiar la durabilidad del concreto para su vida útil.

Tabla 26. Diseño a flexión y cortante de placa maciza GRC y FRC de 5 m de longitud

Concreto	GRC		Concreto	FRC	
Pp [kN/m] =	3.8148		Pp [kN/m] =	4.3677	
W_D [kN/m] =	3.6		W_D [kN/m] =	3.6	
W_L [kN/m] =	1.8		W_L [kN/m] =	1.8	
W [kN/m] =	11.78		W [kN/m] =	12.44	
Mu [kN-m] =	36.81		Mu [kN-m] =	38.88	
b [m] =	1		b [m] =	1	
h [m] =	0.187		h [m] =	0.21	
Ct [m] =	0.0935		Ct [m] =	0.1035	
I [mm⁴] =	0.000545		I [mm⁴] =	0.000739	
Mcr [kN-m] =	80.37	Cumple	Mcr [kN-m] =	89.84	Cumple
φ =	0.46		φ =	0.43	
Vu [kN] =	29.44		Vu [kN] =	31.10	
φVc [kN] =	127.28	Cumple	φVc [kN] =	135.09	Cumple
Δ [mm] =	10.00		Δ [mm] =	9.93	
Δ_{máx.} [mm] =	10	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	10	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 26 muestra el diseño de placa maciza de 5 m de longitud en GRC y FRC. En primera instancia, es evidente mencionar que la placa maciza con GRC tiene menor espesor que la placa maciza de FRC, esto se debe a que la rigidez del GRC es mayor que la rigidez del FRC. La placa de GRC tiene 18.7 cm de espesor, lo cual lo hace una placa muy eficiente en términos estructurales, ya que tiene una dimensión pequeña en comparación con los otros materiales y, además, tiene una resistencia a la flexión alta, lo cual se puede evidenciar debido a que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 46 % del esfuerzo resistente por la sección, puesto que el diseño fue gobernado por la deflexión máxima de la estructura. Por otra parte, la placa de FRC tiene 21 cm de espesor, con un factor ϕ de 0.43, lo cual

indica que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 43 % del esfuerzo resistente por la sección. En comparación con la placa maciza de concreto reforzado con acero en las mismas condiciones, se puede definir que las placas macizas en concreto fibro-reforzado tienen mayor eficiencia, sin embargo, es de vital importancia estudiar la durabilidad del concreto para su vida útil.

Tabla 27. Diseño a flexión y cortante de placa maciza GRC y FRC de 7 m de longitud

Concreto	GRC		Concreto	FRC	
Pp [kN/m] =	5.6712		Pp [kN/m] =	6.4988	
W_D [kN/m] =	3.6		W_D [kN/m] =	3.6	
W_L [kN/m] =	1.8		W_L [kN/m] =	1.8	
W [kN/m] =	14.01		W [kN/m] =	15.00	
Mu [kN-m] =	85.78		Mu [kN-m] =	91.87	
b [m] =	1		b [m] =	1	
h [m] =	0.278		h [m] =	0.31	
Ct [m] =	0.139		Ct [m] =	0.154	
I [mm⁴] =	0.001790		I [mm⁴] =	0.002435	
Mcr [kN-m] =	177.62	Cumple	Mcr [kN-m] =	198.90	Cumple
φ =	0.48		φ =	0.46	
Vu [kN] =	49.02		Vu [kN] =	52.49	
φVc [kN] =	189.22	Cumple	φVc [kN] =	201.01	Cumple
Δ [mm] =	13.90		Δ [mm] =	13.96	
Δ_{máx.} [mm] =	14	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	14	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 27 muestra el diseño de placa maciza de 7 m de longitud en GRC y FRC. En primera instancia, es evidente mencionar que la placa maciza con GRC tiene menor espesor que la placa maciza de FRC, esto se debe a que la rigidez del GRC es mayor que la rigidez del FRC. La placa de GRC tiene 27.8 cm de espesor, lo cual lo hace una placa muy eficiente en términos estructurales, ya que tiene una dimensión pequeña en comparación con los otros materiales y, además, tiene una resistencia a la flexión alta, lo cual se puede evidenciar debido a que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 48 % del esfuerzo resistente por la sección, puesto que el diseño fue gobernado por la deflexión máxima de la estructura. Por otra parte, la placa de FRC tiene 31 cm de espesor, con un factor *phi* de 0.46, lo cual indica que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 46 % del esfuerzo resistente por la sección. En comparación con la placa maciza de concreto reforzado con acero en las mismas condiciones, se puede definir que las placas macizas en concreto fibro-reforzado

tienen mayor eficiencia, sin embargo, es de vital importancia estudiar la durabilidad del concreto para su vida útil.

Tabla 28. Diseño a flexión y cortante de placa maciza GRC y FRC de 9 m de longitud

Concreto	GRC		Concreto	FRC	
Pp [kN/m] =	7.6704		Pp [kN/m] =	8.8409	
W_D [kN/m] =	3.6		W_D [kN/m] =	3.6	
W_L [kN/m] =	1.8		W_L [kN/m] =	1.8	
W [kN/m] =	16.40		W [kN/m] =	17.81	
Mu [kN-m] =	166.10		Mu [kN-m] =	180.32	
b [m] =	1		b [m] =	1	
h [m] =	0.376		h [m] =	0.42	
Ct [m] =	0.188		Ct [m] =	0.2095	
I [mm⁴] =	0.004430		I [mm⁴] =	0.006130	
Mcr [kN-m] =	324.93	Cumple	Mcr [kN-m] =	368.09	Cumple
φ =	0.51		φ =	0.49	
Vu [kN] =	73.82		Vu [kN] =	80.14	
φVc [kN] =	255.93	Cumple	φVc [kN] =	273.45	Cumple
Δ [mm] =	17.99		Δ [mm] =	17.98	
Δ_{máx.} [mm] =	18	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	18	Cumple

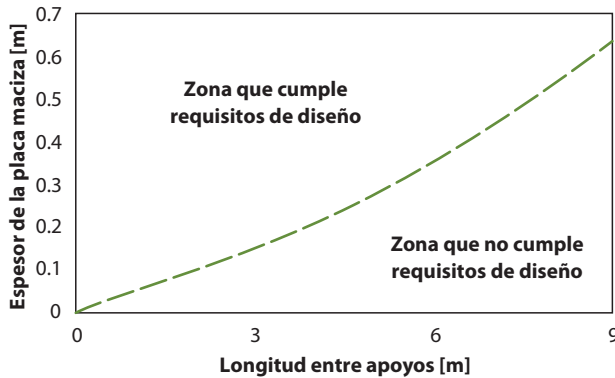
Fuente: elaboración propia.

La Tabla 28 muestra el diseño de placa maciza de 9 m de longitud en GRC y FRC. En primera instancia, es evidente mencionar que la placa maciza con GRC tiene menor espesor que la placa maciza de FRC, esto se debe a que la rigidez del GRC es mayor que la rigidez del FRC. La placa de GRC tiene 37.6 cm de espesor, lo cual lo hace una placa muy eficiente en términos estructurales, ya que tiene una dimensión pequeña, en comparación con los otros materiales y, además, tiene una resistencia a la flexión alta, lo cual se puede evidenciar debido a que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 51 % del esfuerzo resistente por la sección, puesto que el diseño fue gobernado por la deflexión máxima de la estructura. Por otra parte, la placa de FRC tiene 42 cm de espesor, con un factor ϕ de 0.49, lo cual indica que los esfuerzos solicitados por las cargas representan un 49 % del esfuerzo resistente por la sección. En comparación con la placa maciza de concreto reforzado con acero en las mismas condiciones, se puede definir que las placas macizas en concreto fibro-reforzado tienen mayor eficiencia, sin embargo, es de vital importancia estudiar la durabilidad del concreto para su vida útil.

Se realizaron curvas de tendencia de diseño con el fin de relacionar la longitud entre apoyos para sistemas de placas simplemente apoyadas con el espesor de la placa. La Figura 55

muestra una curva con tendencia lineal que divide en dos partes las zonas de diseño, es decir, bajo la curva los espesores de placa no cumplen con alguna de las condiciones de diseño: chequeo de momento, cortante o máxima deflexión; mientras que los espesores calculados sobre la curva de diseño sí cumplirían con todas las condiciones de diseño para elementos sometidos a esfuerzos de flexión y cortante. Se debe destacar que para tener un tamaño óptimo de la sección, es decir, una sección que cumpla con requisitos de diseño, pero sin generar sobrecostos por sobredimensionamiento de la estructura, se recomienda utilizar los espesores que sean calculados al cruzarse con la curva de diseño.

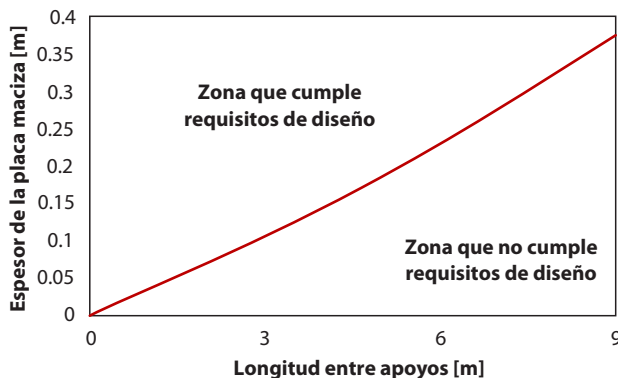
Figura 55. Curva para determinar altura de placa maciza en MRC según su longitud



Fuente: elaboración propia.

Al igual que lo mostrado en la Figura 55, la Figura 56 muestra una curva de diseño con dos zonas, una que cumple con requisitos de diseño y la otra que no lo hace. La principal diferencia entre las dos figuras mencionadas es que la primera (Figura 55) muestra el diseño para placas simplemente apoyadas fabricadas con concreto convencional reforzado con acero, mientras que la segunda (Figura 56) muestra el diseño para placas simplemente apoyadas fabricadas con concreto fibro-reforzado con fibras de vidrio tipo AR.

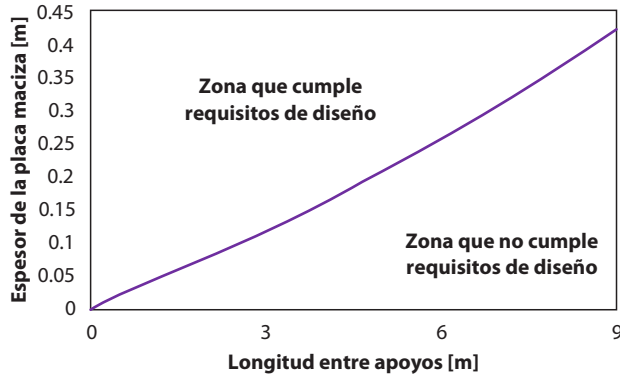
Figura 56. Curva para determinar altura de placa maciza en GRC según su longitud



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la Figura 57 muestra la curva de diseño para para placas simplemente apoyadas fabricadas con concreto fibro-reforzado con fibras vegetales, que para el caso se trató de fibras de fique.

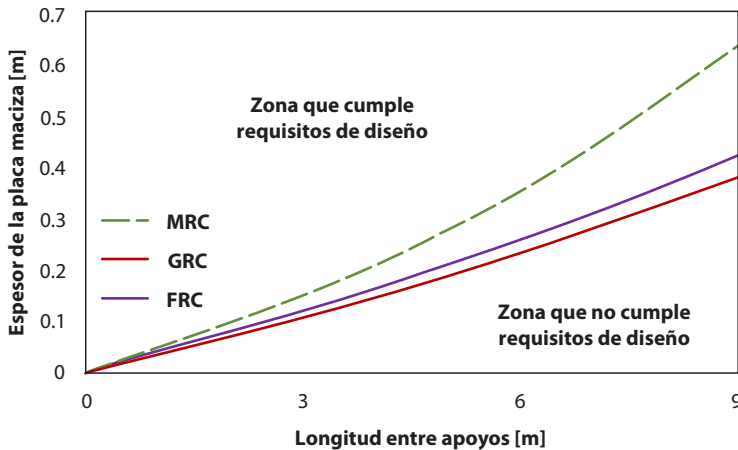
Figura 57. Curva para determinar altura de placa maciza en FRC según su longitud



Fuente: elaboración propia.

Se realiza una comparación entre las tres curvas de tendencia de diseño de placas simplemente apoyadas con diferentes tipos de concreto (Figura 58). Los resultados muestran que el concreto convencional es el más desfavorable, puesto que se requiere de espesores de placa mayores para cumplir con los requisitos de diseño, siendo las placas de concreto fibro-reforzado con fibras de vidrio las que requieren de espesores menores.

Figura 58. Comparación de curvas de diseño MRC, GRC y FRC



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, es de apreciarse que los volúmenes de concreto son relativamente grandes, sobre todo en placas con longitudes entre ejes mayores a 5 metros. Por tal motivo, se realiza el diseño de las mismas placas con sistema de losa aligerada o nervada en una dirección.

Diseño de placas aligeradas con vigueta de concreto reforzado y loseta en microconcreto reforzado y fibro-reforzado

Se diseñan placas aligeradas considerando la siguiente configuración: viguetas de concreto reforzado convencional ($f'_c = 28$ MPa) y losetas de concreto MRC, GRC y FRC. Se determinan las curvas de diseño variando su longitud entre ejes de apoyos de 0 hasta 9 m.

- **Ecuaciones para diseño a flexión y cortante de viguetas en concreto reforzado**

La ecuación de momento nominal (requiere de una cuantía de acero), es:

$$M_U = \phi M_n = \phi F_y \rho \left(1 - 0.59 \rho \frac{F_y}{f'_c} \right) b d^2$$

La cuantía de acero se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{F_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2M_U}{0.85 \phi f'_c b d^2}} \right)$$

Siendo M_U el momento máximo presente en la vigueta.

La ecuación de cortante en placas macizas se calcula con la siguiente ecuación:

$$\phi V_c = \phi 0.17 \sqrt{f'_c} b d + \frac{\phi A_v F_y d}{S}$$

- **Chequeo de deflexión máxima para control de deformaciones en placas que están sujetas a elementos susceptibles a dañarse por deflexiones grandes**

Con el fin de garantizar un correcto funcionamiento de las diferentes placas diseñadas, la deflexión máxima calculada no podrá ser superior a $L/500$. La deflexión en placas simplemente apoyadas se calcula con la siguiente expresión:

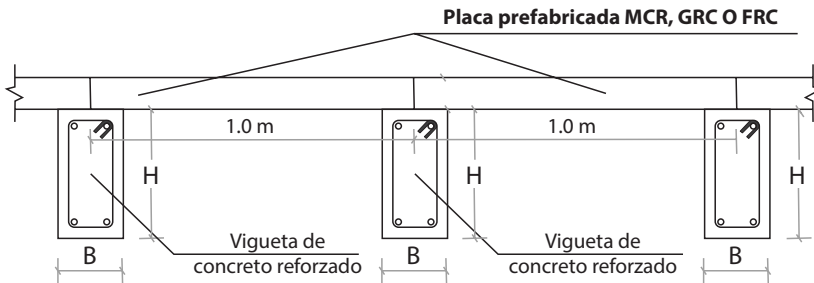
$$\Delta = \frac{5WL^4}{384EI} \leq \frac{L}{500}$$

La carga W para todos los casos será $W = 1.2 W_D + 1.6 W_L$. W_D es la carga muerta que incluye el peso propio de la placa y una carga sobrepuesta que se definió como 3.6 kN/m^2 . W_L es la carga viva que corresponde al uso que tendrá la placa, si se asume un uso residencial donde la carga viva corresponde al peso de tráfico de personas $W_L = 1.8 \text{ kN/m}^2$.

Para fines prácticos de comparación, se realizará el diseño de la loseta con 1 m de longitud, es decir, la separación entre las viguetas será de un metro (1 m). Se pretende que la propuesta

sea con placas prefabricadas, por lo que no se requerirá de aligeramientos para el montaje del sistema de placa, es decir, la propuesta mostrará como proceso de construcción la elaboración de las viguetas en el sitio y las placas será prefabricadas y serán puestas sobre las viguetas una vez hayan alcanzado al menos el 75 % de la resistencia máxima. La Figura 59 muestra la configuración de la sección tipo de placa aligerada con viguetas de concreto reforzado y loseta superior de concreto MRC, GRC o FRC.

Figura 59. Sección tipo de placa aligerada

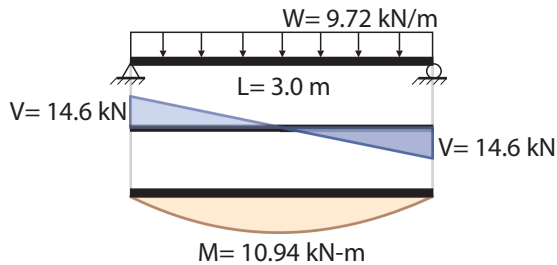


Fuente: elaboración propia.

La Tabla 29 muestra los esfuerzos presentes sobre la vigueta por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 3 m.

Tabla 29. Esfuerzos sobre la vigueta de 3 m de longitud

Concreto	VTA
h [m] =	0.25
d [m] =	0.22
b [m] =	0.15
L [m] =	3.0
P_{placa} [kN/m] =	1.2
P_p [kN/m] =	0.9
W_o [kN/m] =	3.6
W_L [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	9.72
V [kN] =	14.58
M [kN-m] =	10.94



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 30 muestra el diseño a flexión y cortante de la vigueta de 3 m de longitud. Los cálculos muestran que la sección de la vigueta es de 15 x 25 cm, el refuerzo requerido equivale a dos barras de acero #3 y transversal de E#3 C/30 cm, lo que genera un área de acero de 1.42 cm². El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.87.

Tabla 30. Diseño a flexión y cortante de vigueta de 3 m de longitud

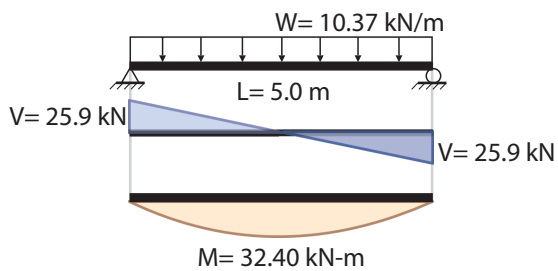
f'c [MPa] =	28		n =	8.04	
Fcr [MPa] =	3.28		Cc [m] =	0.1275	
Ec [GPa] =	24.87		Ct [m] =	0.002	
Fy [MPa] =	420		y¹ [m] =	0.093	
Mu [kN-m] =	10.94		y² [m] =	0.000204	
ρ =	0.00414		I [mm⁴] =	14.58	
As =	1.36		Mcr [kN-m] =	7.10E-05	E#3 C/30 cm
As (real) =	1.42	2#3	Vu [kN] =	0.3	
ρ (real) =	0.00430		φVc [kN] =	55.07	Cumple
φ =	0.87		Δ [mm] =	2.02	
φMn [kN-m] =	11.36	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	6	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 31 muestra los esfuerzos presentes sobre la vigueta por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 5 m.

Tabla 31. Esfuerzos sobre la vigueta de 5 m de longitud

Concreto	VTA
h [m] =	0.4
d [m] =	0.37
b [m] =	0.15
L [m] =	3.0
P_{placa} [kN/m] =	1.2
Pp [kN/m] =	1.44
W_p [kN/m] =	3.6
W_l [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	10.37
V [kN] =	25.92
M [kN-m] =	32.40



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 32 muestra el diseño a flexión y cortante de la vigueta de 5 m de longitud. Los cálculos muestran que la sección de la vigueta es de 15 x 40 cm, el refuerzo requerido equivale a dos barras de acero #4 y transversal de E#3 C/30 cm, lo que genera un área de acero de 2.58 cm². El factor φ determinado para este tipo de secciones es de 0.84.

Tabla 32. Diseño a flexión y cortante de vigueta de 5 m de longitud

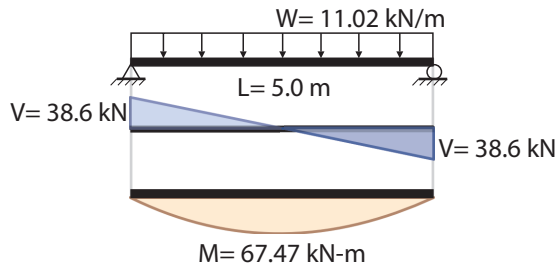
f'c [MPa] =	28		n =	8.04	
Fcr [MPa] =	3.28		Cc [m] =	0.2050	
Ec [GPa] =	24.87		Ct [m] =	0.005	
Fy [MPa] =	420		y¹ [m] =	0.165	
Mu [kN-m] =	32.40		y² [m] =	0.000851	
ρ =	0.00434		I [mm⁴] =	25.92	
As =	2.41		Mcr [kN-m] =	7.10E-05	E#3 C/30 cm
As (real) =	2.58	2#4	Vu [kN] =	0.3	
ρ (real) =	0.00465		φVc [kN] =	92.61	Cumple
φ =	0.84		Δ [mm] =	3.99	
φMn [kN-m] =	34.60	Cumple	Δ_{máx.} [mm] =	10	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 33 muestra los esfuerzos presentes sobre la vigueta por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 7 m, los esfuerzos calculados fueron determinados por medio de procedimiento de equilibrio estática, por lo que se tuvo en cuenta la longitud entre apoyos de los elementos y la carga última de diseño.

Tabla 33. Esfuerzos sobre la vigueta de 7 m de longitud

Concreto	VTA
h [m] =	0.55
d [m] =	0.52
b [m] =	0.15
L [m] =	7.0
P_{placa} [kN/m] =	1.2
Pp [kN/m] =	1.98
W_D [kN/m] =	3.6
W_L [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	11.02
V [kN] =	38.56
M [kN-m] =	67.47



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 34 muestra el diseño a flexión y cortante de la vigueta de 7 m de longitud. Los cálculos muestran que la sección de la vigueta es de 15 x 55 cm, el refuerzo requerido

equivale a dos barras de acero #5 y transversal de E#3 C/30 cm, lo que genera un área de acero de 3.98 cm². El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.81.

Tabla 34. Diseño a flexión y cortante de vigueta de 7 m de longitud

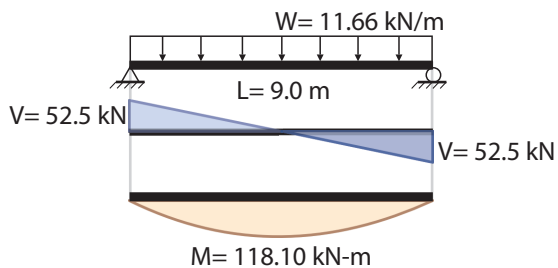
f'c [MPa] =	28		n =	8.04	
Fcr [MPa] =	3.28		Cc [m] =	0.2830	
Ec [GPa] =	24.87		Ct [m] =	0.008	
Fy [MPa] =	420		y' [m] =	0.237	
Mu [kN-m] =	67.47		y² [m] =	0.002242	
ρ =	0.00459		I [mm⁴] =	38.56	
As =	3.58	2#5	Mcr [kN-m] =	7.10E-05	E#3 C/30 cm
As (real) =	3.98		Vu [kN] =	0.3	
ρ (real) =	0.00510		ϕVc [kN] =	130.16	Cumple
ϕ =	0.81		Δ [mm] =	6.18	
ϕMn [kN-m] =	74.70	Cumple	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	14	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 35 muestra los esfuerzos presentes sobre la vigueta por efecto de las cargas vivas y muertas aplicadas. La longitud entre ejes de apoyos de la placa es de 9 m, los esfuerzos calculados fueron determinados por medio de procedimiento de equilibrio estática, por lo que se tuvo en cuenta la longitud entre apoyos de los elementos y la carga última de diseño.

Tabla 35. Esfuerzos sobre la vigueta de 9 m de longitud

Concreto	VTA
h [m] =	0.7
d [m] =	0.67
b [m] =	0.15
L [m] =	9.0
P_{placa} [kN/m] =	1.2
Pp [kN/m] =	2.52
W_D [kN/m] =	3.6
W_L [kN/m] =	1.8
W [kN/m] =	11.66
V [kN] =	52.49
M [kN-m] =	118.10



Fuente: elaboración propia.

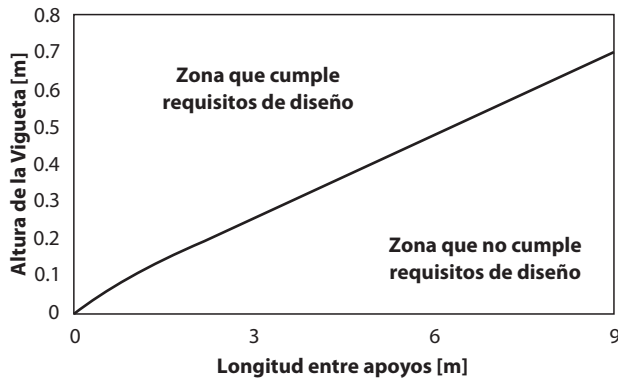
La Tabla 36 muestra el diseño a flexión y cortante de la vigueta de 9 m de longitud. Los cálculos muestran que la sección de la vigueta es de 15 x 70 cm, el refuerzo requerido equivale a dos barras de acero #6 y transversal de E#3 C/30 cm, lo que genera un área de acero de 5.74 cm². El factor ϕ determinado para este tipo de secciones es de 0.77.

Tabla 36. Diseño a flexión y cortante de vigueta de 9 m de longitud

f'c [MPa] =	28		n =	8.04	
Fcr [MPa] =	3.28		Cc [m] =	0.2830	
Ec [GPa] =	24.87		Ct [m] =	0.008	
Fy [MPa] =	420		y' [m] =	0.237	
Mu [kN-m] =	118.10		y² [m] =	0.002242	
ρ =	0.00485		I [mm4] =	38.56	
As =	4.87		Mcr [kN-m] =	7.10E-05	E#3 C/30 cm
As (real) =	5.74	Malla XX-159	Vu [kN] =	0.3	
ρ (real) =	0.00571		ϕVc [kN] =	130.16	Cumple
ϕ =	0.77		Δ [mm] =	6.18	
ϕMn [kN-m] =	138.02	Cumple	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ [mm] =	14	Cumple

Fuente: elaboración propia.

Se realizó la curva de tendencia de diseño con el fin de relacionar la longitud entre apoyos para sistemas de placas simplemente apoyadas con la altura de la vigueta requerida para soportar las losetas de concreto prefabricado MRC, GRC o FRC. La Figura 60 muestra una curva con tendencia lineal que divide en dos partes las zonas de diseño, es decir, bajo la curva los espesores de placa no cumplen con alguna de las condiciones de diseño: chequeo de momento, cortante o máxima deflexión; mientras que los espesores calculados sobre la curva de diseño si cumplirían con todas las condiciones de diseño para elementos sometidos a esfuerzos de flexión y cortante.

Figura 60. Curva de tendencia para dimensionamiento de vigueta

Fuente: elaboración propia.

Se debe destacar que para tener un tamaño óptimo de la sección, se recomienda utilizar los espesores que sean calculados al cruzarse con la curva de diseño. Además, con el fin de estandarizar la sección, se definió como base 15 cm; sin embargo, se puede hacer el estudio de diseño con un área equivalente de la sección.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que en este caso se está definiendo una sección tipo de vigueta en concreto reforzado; sin embargo, cabe la posibilidad de modificar el material de la vigueta, es decir, puede hacerse un estudio simplificado en el cual se utilicen viguetas metálicas o de madera que resistan las solicitudes de esfuerzos debido a las cargas para cada caso en particular. Ahora bien, el estudio de la placa aligerada realizado en este apartado se realizó con las condiciones similares a las utilizadas para el diseño de las placas macizas, lo cual se hizo con el fin de poder realizar comparaciones, por lo que se puede tener en cuenta que las condiciones de las viguetas se pueden modificar y así mismo la placa prefabricada de MRC, GRC o FRC no cambiarían.

Comparación entre microconcreto reforzado y fibro-reforzado con fibras

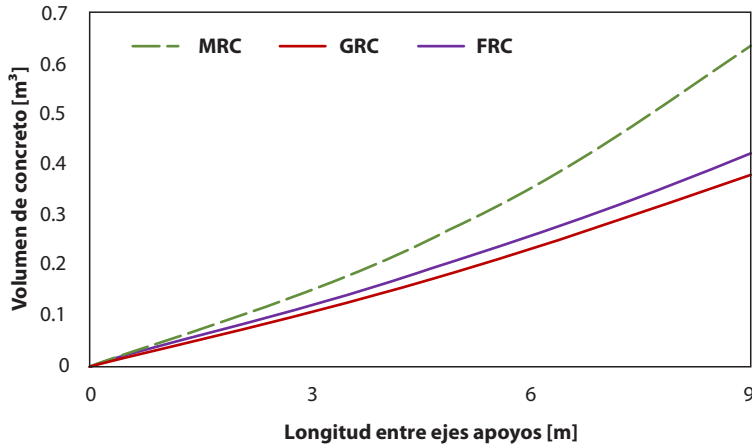
Se realizó el cálculo de las cantidades de materiales requeridas para la fabricación de placas macizas de MRC, GRC y FRC según sus necesidades de diseño. Además, se calculó las cantidades de materiales para el sistema de placas aligeradas con nervaduras de concreto reforzado y losetas de MRC, GRC y FRC según sus necesidades de diseño. La Tabla 37 muestra el volumen de concreto para cada una de las placas macizas diseñadas con longitud variable entre 0 y 9 m de MRC, GRC y FRC.

Tabla 37. Volumen de concreto para placas macizas

Placas macizas		h [m]	Vol [m ³ /m ²]
1 m	MRC	0.05	0.05
	GRC	0.035	0.035
	FRC	0.04	0.04
3 m	MRC	0.148	0.148
	GRC	0.106	0.106
	FRC	0.116	0.116
5 m	MRC	0.275	0.275
	GRC	0.187	0.187
	FRC	0.207	0.207
7 m	MRC	0.438	0.438
	GRC	0.278	0.278
	FRC	0.308	0.308
9 m	MRC	0.634	0.634
	GRC	0.376	0.376
	FRC	0.419	0.419

Fuente: elaboración propia.

La Figura 61 muestra tres curvas de tendencia de la cantidad de concreto que se requiere en volumen para la fabricación de placas macizas según el tipo de refuerzo: acero, fibras de vidrio o fibras vegetales. Se evidencia que las placas de concreto MRC requieren de mayor tamaño y, por lo tanto, un mayor volumen de concreto, mientras que las placas macizas de concreto GRC requieren menores cantidades de concreto.

Figura 61. Cantidad de concreto en volumen según tipo de refuerzo

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 38 muestra la cantidad de refuerzo (acero, fibras de vidrio y fibras vegetales) que se requiere para la construcción de placas macizas según su longitud.

Tabla 38. Cantidad de acero y fibras de refuerzo para placas macizas

Placas macizas		As (X)	As (Y)	As [kg/m ²]		Fibra Vidrio [kg/m ²]	Fibra Vegetal [kg/m ²]
1 m	MRC	XX-159		2.52			
	GRC					2.14	
	FRC						0.63
3 m	MRC	XX-295		4.67			
	GRC					6.49	
	FRC						1.84
5 m	MRC	#3C/.12 m	#3C/.16 m	5.23	4.06	18.57	
	GRC					11.44	
	FRC						3.28

Placas macizas		As (X)	As (Y)	As [kg/m ²]		As [kg/m ²]	Fibra Vidrio [kg/m ²]	Fibra Vegetal [kg/m ²]
7 m	MRC	#4C/.14 m	#4C/.17 m	8.09	6.84	29.87		
	GRC						17.01	
	FRC							4.87
9 m	MRC	#4C/.09 m	#4C/.11 m	12.04	10.03	44.14		
	GRC						23.01	
	FRC							6.63

Fuente: elaboración propia.

Se evidencia que la cantidad de acero en peso es la mayor para todos los tipos de placas, mientras que la cantidad de fibras vegetales en peso es la que requiere menor cantidad; sin embargo, debido a que el peso del acero, en comparación con el peso de las fibras, es mucho mayor, el volumen de refuerzo de acero requerido es menor que el volumen de refuerzo de fibras vegetales, del cual se requiere una cantidad similar al de las fibras de vidrio.

La Tabla 39 y la Tabla 40 muestran la cantidad de material de concreto en volumen y la cantidad de refuerzo en peso, respectivamente, requerido para la elaboración de losetas prefabricadas que serán utilizadas en los sistemas de placas aligeradas con nervaduras de concreto reforzado y losetas de MRC, GRC y FRC.

Tabla 39. Volumen de concreto para losetas de placa aligerada

Placa aligerada		h [m]	Vol [m ³ /m ²]
1 m	MRC	0.05	0.05
	GRC	0.035	0.035
	FRC	0.04	0.04

Fuente: elaboración propia.

Tabla 40. Cantidad de acero y fibras de refuerzo para losetas de placa aligerada

Placa aligerada		As (X)	As (Y)	As [kg/m ²]		Fibra vidrio	Fibra vegetal
1 m	MRC	XX-159		2.52	2.52		
	GRC					2.14	
	FRC						0.63

Fuente: elaboración propia.

Por su parte, la Tabla 41 muestra el volumen de concreto para construir las diferentes viguetas de concreto reforzado al variar su longitud.

Tabla 41. Volumen de concreto para viguetas de placa aligerada

Placa aligerada	b [m]	h [m]	Vol [m ³]
VTA 3 m	0.15	0.25	0.0375
VTA 5 m	0.15	0.40	0.06
VTA 7 m	0.15	0.55	0.0825
VTA 9 m	0.15	0.70	0.105

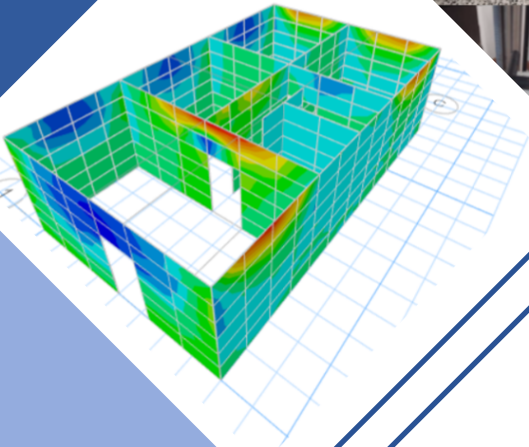
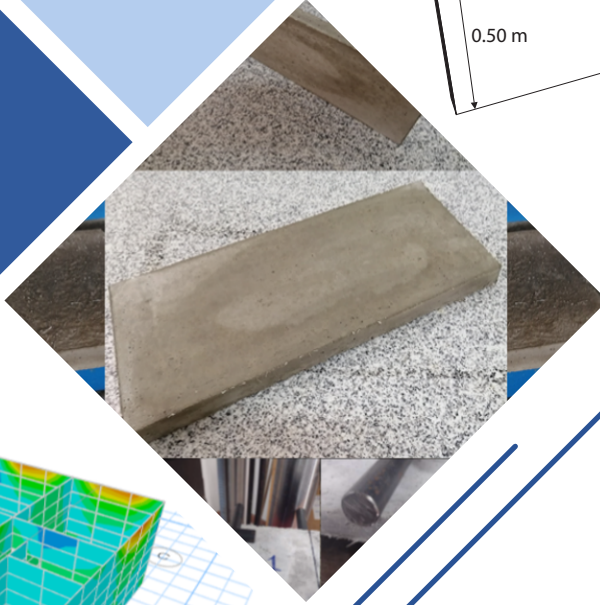
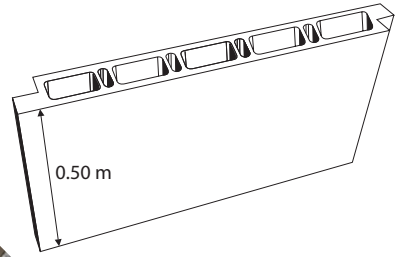
Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la Tabla 42 muestra la cantidad de acero de refuerzo requerido para cada vigueta diseñada según su longitud.

Tabla 42. Cantidad de acero y fibras de refuerzo para viguetas de placa aligerada

Placa aligerada	As (Pricp)	As (Secund)	As [kg/m ²]		As [kg/m ²]
VTA 3 m	2#3	E#3 C/30 cm	2.24	1.82	4.06
VTA 5 m	2#4	E#3 C/30 cm	3.98	2.55	6.52
VTA 7 m	2#5	E#3 C/30 cm	6.21	3.28	9.48
VTA 9 m	2#6	E#3 C/30 cm	8.94	4.00	12.94

Fuente: elaboración propia.



Capítulo 6

**Viviendas modulares de
microconcreto fibro-reforzado**

Ya que se ha determinado que el microconcreto presenta alta resistencia, mejoría en el módulo de rotura a la flexión y un módulo de elasticidad estándar, se procede a identificar el mejor uso que se le puede dar al producto. Las mezclas de microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC), microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio (GRC) y microconcreto fibro-reforzado con fibras naturales (FRC) cuentan con las siguientes propiedades mecánicas.

Tabla 43. Propiedades de las mezclas de MRC, GRC y FRC

Tipo de Concreto	MRC	GRC	FRC
f'c [MPa]	32.4	28.5	26.2
Fcr [MPa]	3.53	13.79	12.58
Ec [GPa]	15.49	17.59	13.8
ρ_c [g/cm³]	2.16	2.04	2.11

Fuente: elaboración propia.

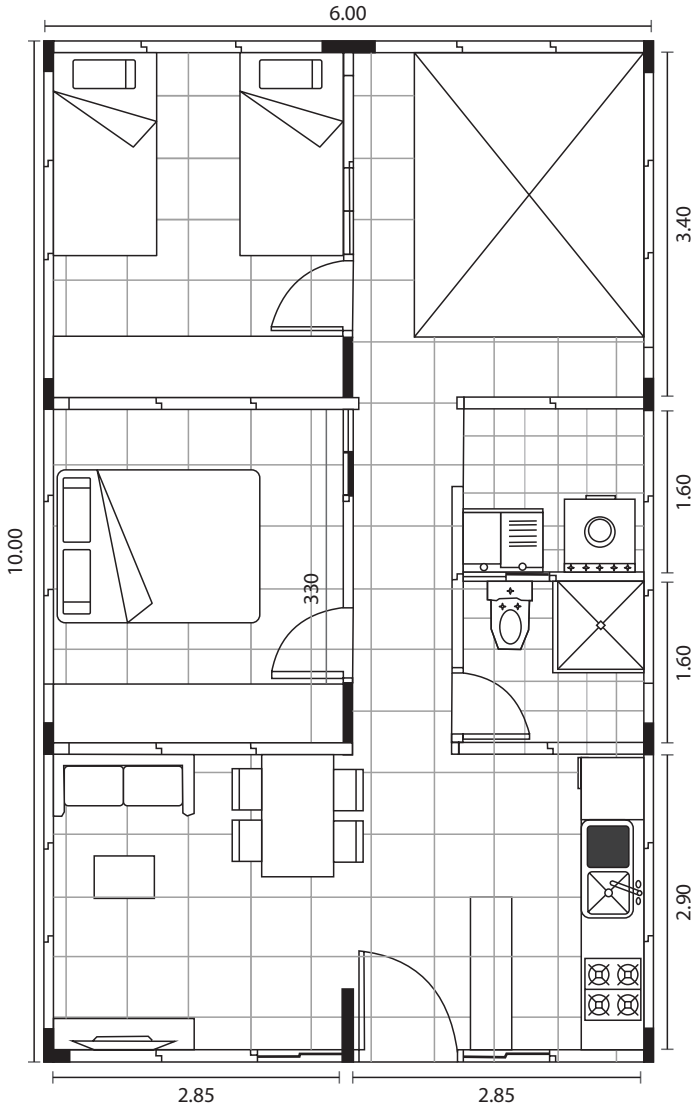
La mezcla de FRC con fibras de fique presenta propiedades muy similares a las propiedades que presenta el GRC (ver Tabla 43). Dentro de los usos que se le puede dar a dichas mezclas la que desataca es para uso como placas en la construcción de viviendas modulares.

A continuación, se describirá el mejor uso de los microconcretos desarrollados. Partiendo de un diseño arquitectónico de vivienda tipo de 60 m²; con dos habitaciones, sala-comedor, cocina, baño y patio. Se realizará la modulación de los muros con el fin de determinar el tamaño de placa óptimo para minimizar el tiempo de construcción de las viviendas. Además, con el fin de enmarcar el producto desarrollado con las normativas colombianas, se estudiará la aplicación del producto como un tipo de mampostería fibro-reforzado confinada para viviendas de menos de dos pisos, por lo que se aplicarán las exigencias del Título E de NSR-10.

Propuesta del diseño arquitectónico de vivienda modular

La Figura 62 muestra el diseño arquitectónico de una vivienda modular. El diseño fue pensado para ser ocupado por una familia de 4 personas (dos adultos y dos niños) y que esté dentro de las medidas estándares para vivienda de interés social (vivienda tipo VIS).

Figura 62. Propuesta de vivienda modular con placas de GRC y FRC-1 (1 %)



Fuente: elaboración propia.

Requerimientos de tamaño de los muros de mampostería que se debe cumplir según NSR-10

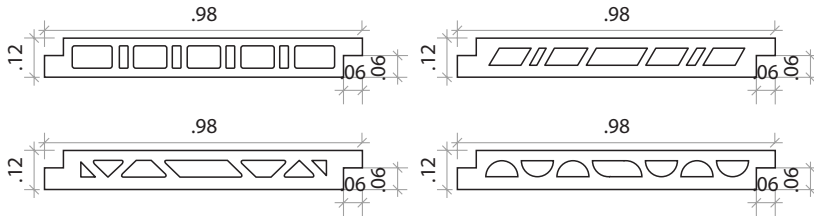
El reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, es una norma que surge para reglamentar requisitos mínimos de construcción en el territorio nacional; por lo tanto, a continuación, se darán a conocer los requisitos mínimos que se deben considerar para el diseño y construcción de vivienda modulares con placas de tipo mampostería de microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio y fibras de fique.

Según el Capítulo E.3 de NSR-10, las unidades de mampostería para construir viviendas de mampostería confinada pueden ser de perforación vertical, horizontal o macizas, deben cumplir las especificaciones establecidas en las normas NTC y, en el caso de unidades de concreto y de perforación vertical, se debe cumplir con NTC 4026 (ASTM C90). Las dimensiones de la mampostería según la norma mencionada dependen directamente del espesor del muro, lo cual se especifica en la Tabla E.3.5-1 de NSR-10, en donde se indica que para viviendas de un piso en zonas de amenaza sísmica alta el espesor mínimo de los muros sea de 11 cm, por lo que se decide utilizar unidades de mampostería de 12 cm de espesor. Según la Tabla 2 de NTC 4026, para espesores de muro de 12 cm el espesor de pared de la unidad es 22 mm y el espesor del tabique es 20 mm. La resistencia a la compresión mínima puede ser de 13 MPa a los 28 días de curado y el número mínimo de unidades de mampostería ensayadas es 3 unidades.

Diseño arquitectónico de bloques de mampostería con microconcretos fibro-reforzados

El diseño de las unidades de mampostería, que para el caso serán placas de 98 cm de longitud, 12 cm de espesor y 50 cm de altura, dimensiones necesarias para cumplir con los requerimientos de norma y con la modulación de la vivienda. En la Figura 63 se proponen 4 tipos de unidades de mampostería fabricadas con microconcreto fibro-reforzado, cada una con un diseño interior diferente que permite un flujo de aire que contribuye con el aislamiento de calor y sonido.

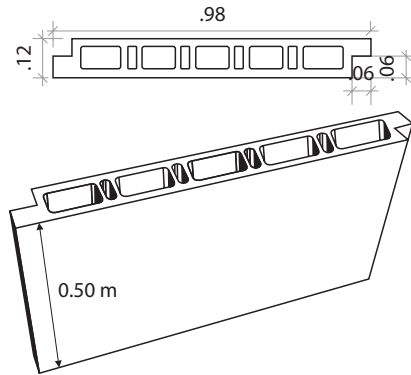
Figura 63. Propuesta de placas tipo mampostería de GRC y FRC-1 (1 %)



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, al tratarse de una vivienda modular se deben garantizar otras utilidades como el paso de tuberías, ya sea de agua o de luz, por lo que la unidad de mampostería debe satisfacer de la mejor forma dichas necesidades. Por lo tanto, se decide la utilización de la unidad de mampostería más básica, la cual se muestra en la Figura 64. La unidad de mampostería es de 98 cm de largo, 12 cm de ancho y 50 cm de altura, las paredes de la placa son de 25 mm y los tabiques de 20 mm. Cuenta con 5 perforaciones grandes de 70 mm x 125 mm, las cuales se pueden habilitar para el paso de las tuberías necesarias o que pueden ser utilizadas para pasar dovelas de acero en cada donde se requiera construir en mampostería reforzado con acero. Por otra parte, se ubican 4 perforaciones de menor tamaño 25 mm x 70 mm, las cuales se ubican de forma estratégica para generar mayor rigidez en las unidades de mampostería. El área efectiva de la sección es 0.0654 m².

Figura 64. Prototipo de placa tipo mampostería final de GRC y FRC-1 (1 %)



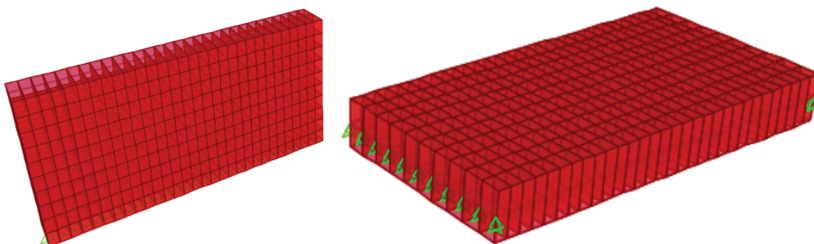
Fuente: elaboración propia.

El prototipo de placa de tipo mampostería se modela teóricamente en un *software* especializado con el fin de conocer su comportamiento mecánico, luego se realiza un estudio de comportamiento estructural con el fin de comparar el producto si se fabricara con microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio o con fibras de fique y si diferencia con el producto fabricado con microconcreto sin fibras de refuerzo.

Análisis estructural por medio de modelación en software Etabs®

La Figura 65 muestra un modelo matemático que se realizó en un software de elementos finitos con el fin de identificar la distribución de esfuerzos dentro del elemento cuando este se somete a cargas de compresión, flexo-compresión (Figura 65 izquierda), flexión pura y cortante (Figura 65 derecha). Las cargas de compresión y flexo-compresión ayudarán a determinar el comportamiento de las placas cuando estas se utilizan como bloques de tipo mampostería, mientras que las cargas de flexión pura y cortante dejarán observar el comportamiento de las placas cuando estas se utilizan para la construcción de losas de entrepiso, contrapiso, entre otros usos.

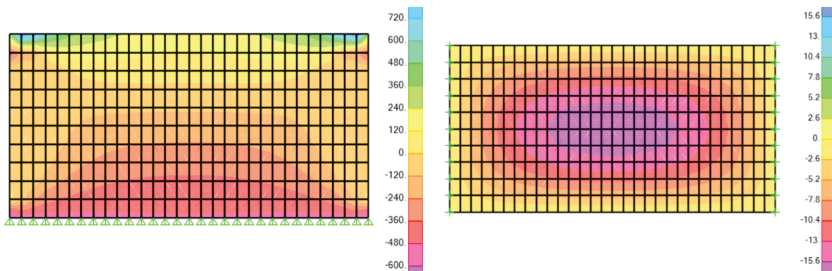
Figura 65. Modelo matemático de placas de MRC, GRC y FRC



Fuente: elaboración propia.

La Figura 66 muestra el modelo matemático realizado en un *software* de elementos finitos con el fin de identificar las zonas de concentración de carga de las placas de tipo mampostería. Se debe tener en cuenta que las placas serán utilizadas verticalmente, por lo que las fuerzas axiales son las cargas predominantes en los esfuerzos determinados. Por lo tanto, se realiza un análisis teórico de la carga axial máxima que puede soportar la unidad de mampostería. Además, se realiza el cálculo del momento de agrietamiento, el cortante máximo soportado por la placa y la rigidez de la unidad de mampostería. Los cálculos se realizan para cada uno de los microconcretos desarrollados.

Figura 66. Esfuerzos en placas de MRC, GRC y FRC



Fuente: elaboración propia.

Ecuaciones utilizadas para el cálculo estructural de muros

En el presente apartado se mencionarán las ecuaciones utilizadas para el cálculo estructural de muros fabricados con placas de microconcreto simple y fibro-reforzado.

Carga axial máxima calculada teóricamente (Pu)

La carga axial (Pu) máxima teórica de una unidad de mampostería se calcula con la ecuación $P_u = \phi P_n$, siendo ϕ el factor de seguridad y P_n la carga máxima sin el factor de seguridad. La carga P_n se calcula como $P_n = 0.80 * P_o * R_e$: donde P_o es la resistencia de la unidad de mampostería que a su vez depende de la resistencia de la mampostería multiplicada al área de la sección de la placa $P_o = 0.85 f'_m A_e$ ($f'_m = 0.7 f'_c$ y R_e es un factor de esbeltez que se calcula con la ecuación $R_e = 1 - (H/40e)^3$, por lo que la ecuación de carga axial teórica se puede calcular con la siguiente expresión:

$$P_u = \phi \left\{ 0.80 * \left[0.85 * (0.7 f'_c) * A_e \right] * \left[1 - \left(\frac{H}{40e} \right)^3 \right] \right\}$$

El factor de seguridad ϕ es 0.60, siempre y cuando se cumpla que $P_u \geq 0.10 f'_m A_e$.

Momento de agrietamiento calculado teóricamente (Mcr)

El momento de agrietamiento es el esfuerzo a flexión máximo que puede soportar la unidad de mampostería antes de la falla por agrietamiento del elemento. El cálculo se realiza con la siguiente expresión:

$$M_{cr} = \frac{e \cdot l_w^2}{6} \cdot F_{cr}$$

Donde e es el espesor de la unidad de mampostería, l_w es la longitud de la placa y F_{cr} es el módulo de rotura a la flexión.

Cortante máximo soportado por la mampostería (Vu)

Generalmente el diseño a cortante de las estructuras en sistema de muros estructurales predomina sobre el diseño a flexión y compresión, por lo que, la resistencia de las placas al cortante es un cálculo de suma importancia. El cortante se calcula según la siguiente expresión:

$$V_u = \varnothing \left[\frac{1000}{6} \cdot \sqrt{f'_m} \cdot A_e \right]$$

Donde \varnothing es 0.60, siempre y cuando se cumpla que $P_u \geq 0.10 f'_m A_e$. $f'_m = 0.7 f'_c$ y A_e es el área de la sección de la placa.

Rigidez de las unidades de mampostería (K)

La rigidez se calcula con el fin de conocer la deformación máxima que tendrá la estructura ante cargas extremas como lo son las cargas de sismo. La expresión para calcular la rigidez de la mampostería se presenta a continuación:

$$K = \frac{1}{\frac{H^3}{12E_c I} + \frac{1.2H}{GA_e}}$$

Donde E_c es el módulo de elasticidad de la mampostería, I es la inercia del área bruta de la placa de mampostería, G es el módulo cortante que se puede calcular como $G = 0.4E_c$. H es la altura de la placa de mampostería y A_e es el área de la sección de la placa.

Propiedades mecánicas teóricas de las unidades de mampostería fabricadas con microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC)

El microconcreto desarrollado sin fibras de refuerzo posee un módulo de rotura a la flexión de 3.53 MPa, una resistencia a la compresión de 32.40 MPa y un módulo de elasticidad de 15.49 GPa.

Carga axial máxima calculada teóricamente (Pu)

La carga axial máxima teórica del microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC) se calcula a continuación:

$$P_u = \emptyset \left\{ 0.80 * \left[0.85 * (0.7 f'_c) * A_c \right] * \left[1 - \left(\frac{H}{40e} \right)^3 \right] \right\}$$

$$P_u = 0.6 \left\{ 0.80 * \left[0.85 * (0.7 * 32400 \text{ kN/m}^2) * 0.0654 \text{ m}^2 \right] * \left[1 - \left(\frac{0.5 \text{ m}}{40 * 0.12 \text{ m}} \right)^3 \right] \right\}$$

$$P_u = 604.5 \text{ kN}$$

La carga axial máxima teórica del microconcreto sin fibro-refuerzo es 604.5 kN. Dicho valor es mayor que $0.10 f'_m A_c = 0.10 (0.7 * 32400 \text{ kN/m}^2) (0.0654 \text{ m}^2) = 148.3 \text{ kN}$, por lo tanto se mantiene que \emptyset es igual a 0.60.

Momento de agrietamiento calculado teóricamente (Mcr)

El momento de agrietamiento teórico del microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC) se calcula a continuación:

$$M_{cr} = \frac{e * I_w^2}{6} * F_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{0.12 \text{ m} * (0.98)^2}{6} * (3.53 \text{ MPa}) * 1000$$

$$M_{cr} = 67.8 \text{ kN.m}$$

El momento de agrietamiento del microconcreto sin fibro-refuerzo es 67.8 kN.m.

Cortante máximo soportado por la mampostería (Vu)

El cortante máximo teórico del microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC) se calcula a continuación:

$$V_u = \varnothing \left[\frac{1000}{6} * \sqrt{f'_m} * A_c \right]$$

$$V_u = 0.6 * \left[\frac{1000}{6} * \sqrt{0.7 * 32.4 \text{ MPa}} * (0.0654 \text{ m}^2) \right]$$

$$V_u = 31.15 \text{ kN}$$

El cortante máximo teórico del microconcreto sin fibro-refuerzo es 31.15 kN.

Rigidez de las unidades de mampostería (K)

La rigidez de las placas de mampostería de microconcreto sin fibro-refuerzo (MRC) se calcula a continuación:

$$K = \frac{1}{\frac{H^3}{12E_c I} + \frac{1.2H}{GA_c}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{(0.5 \text{ m})^3}{12(15.49 \text{ GPa}) \left(\frac{1}{12} * 12 * 98^3 \right) * 10^6} + \frac{1.2(0.5 \text{ m})}{0.4((15.49 \text{ GPa}))(0.0654 \text{ m}^2) * 10^6}}$$

$$K = 644.3 \times 10^3 \text{ kN / m}$$

La rigidez de las placas de mampostería de microconcreto sin fibro-refuerzo es 644.3 x 10³ kN/m.

Propiedades mecánicas teóricas de las unidades de mampostería fabricadas con microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio AR (GRC)

El microconcreto desarrollado con fibras de vidrio AR de refuerzo posee un módulo de rotura a la flexión de 13.79 MPa, una resistencia a la compresión de 28.5 MPa y un módulo de elasticidad de 17.59 GPa.

Carga axial máxima calculada teóricamente (Pu)

La carga axial máxima teórica del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio AR (GRC) se calcula a continuación:

$$P_u = \varnothing \left\{ 0.80 * \left[0.85 * (0.7 f'_c) * A_c \right] * \left[1 - \left(\frac{H}{40e} \right)^3 \right] \right\}$$

$$P_u = 0.6 \left\{ 0.80 * \left[0.85 * \left(0.7 * 28500 \text{ kN} / \text{m}^2 \right) * 0.0654 \text{ m}^2 \right] * \left[1 - \left(\frac{0.5 \text{ m}}{40 * 0.12 \text{ m}} \right)^3 \right] \right\}$$

$$P_u = 531.7 \text{ kN}$$

La carga axial máxima teórica del microconcreto sin fibro-refuerzo es 531.7 Kn, dicho valor es mayor que $0.10 f'_m A_e = 0.10 (0.7 * 28500 \text{ kN/m}^2) (0.0654 \text{ m}^2) = 130.5 \text{ kN}$, por lo tanto, se mantiene que ϕ es igual a 0.60.

Momento de agrietamiento calculado teóricamente (Mcr)

El momento de agrietamiento teórico del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio AR (GRC) se calcula a continuación:

$$M_{cr} = \frac{e * I_w^2}{6} * F_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{0.12 \text{ m} * (0.98)^2}{6} * (13.79 \text{ MPa}) * 1000$$

$$M_{cr} = 264.88 \text{ kN.m}$$

El momento de agrietamiento del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio es 264.88 kN.m.

Cortante máximo soportado por la mampostería (Vu)

El cortante máximo teórico del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio AR (GRC) se calcula a continuación:

$$V_u = \phi \left[\frac{1000}{6} * \sqrt{f'_m} * A_e \right]$$

$$V_u = 0.6 * \left[\frac{1000}{6} * \sqrt{0.7 * 28.5 \text{ MPa}} * (0.0654 \text{ m}^2) \right]$$

$$V_u = 29.2 \text{ kN}$$

El cortante máximo teórico del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio es 29.2 kN.

Rigidez de las unidades de mampostería (K)

La rigidez de las placas de microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio AR (GRC) se calcula a continuación:

$$K = \frac{1}{\frac{H^3}{12E_c I} + \frac{1.2H}{GA_e}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{(0.5 \text{ m})^3}{12(17.59 \text{ GPa})\left(\frac{1}{12} * 12 * .98^3\right) * 10^6} + \frac{1.2(0.5 \text{ m})}{0.4((17.59 \text{ GPa}))\left(0.0654 \text{ m}^2\right) * 10^6}}$$

$$K = 762.5 \times 10^3 \text{ kN / m}$$

La rigidez de las placas de mampostería de microconcreto fibro-reforzadas con fibras de vidrio es $762.5 \times 10^3 \text{ kN/m}$.

Propiedades mecánicas teóricas de las unidades de mampostería fabricadas con microconcreto fibro-reforzadas con fibras de fique (FRC)

El microconcreto desarrollado con fibras de fique de refuerzo posee un módulo de rotura a la flexión de 12.58 MPa, una resistencia a la compresión de 26.2 MPa y un módulo de elasticidad de 13.8 GPa.

Carga axial máxima calculada teóricamente (Pu)

La carga axial máxima teórica del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de fique (FRC) se calcula a continuación:

$$P_u = \emptyset \left\{ 0.80 * \left[0.85 * (0.7f'_c) * A_c \right] * \left[1 - \left(\frac{H}{40e} \right)^3 \right] \right\}$$

$$P_u = 0.6 \left\{ 0.80 * \left[0.85 * (0.7 * 26200 \text{ kN / m}^2) * 0.0654 \text{ m}^2 \right] * \left[1 - \left(\frac{0.5 \text{ m}}{40 * 0.12 \text{ m}} \right)^3 \right] \right\}$$

$$P_u = 488.8 \text{ kN}$$

La carga axial máxima teórica del microconcreto sin fibro-refuerzo es 488.8 kN, dicho valor es mayor que $0.10 f'_m A_c = 0.10(0.7 * 26200 \text{ kN/m}^2)(0.0654 \text{ m}^2) = 119.9 \text{ kN}$, por lo tanto, se mantiene que \emptyset es igual a 0.60.

Momento de agrietamiento calculado teóricamente (Mcr)

El momento de agrietamiento teórico del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de fique (FRC) se calcula a continuación:

$$M_{cr} = \frac{e * l_w^2}{6} * F_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{0.12m * (0.98)^2}{6} * (12.58MPa) * 1000$$

$$M_{cr} = 241.6kN.m$$

El momento de agrietamiento del microconcreto fibro-reforzadas con fibras es 241.6 kN.m.

Cortante máximo soportado por la mampostería (V_u)

El cortante máximo teórico del microconcreto fibro-reforzadas con fibras de fique (FRC) se calcula a continuación:

$$V_u = \phi \left[\frac{1000}{6} * \sqrt{f'_m} * A_c \right]$$

$$V_u = 0.6 * \left[\frac{1000}{6} * \sqrt{0.7 * 26.2MPa} * (0.0654m^2) \right]$$

$$V_u = 28kN$$

El cortante máximo teórico del microconcreto fibro-reforzadas con fibras es 28 kN.

Rigidez de las unidades de mampostería (K)

La rigidez de las placas de mampostería de microconcreto fibro-reforzadas con fibras de fique (FRC-1(1%)) se calcula a continuación:

$$K = \frac{1}{\frac{H^3}{12E_c I} + \frac{1.2H}{GA_c}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{(0.5m)^3}{12(13.8GPa) \left(\frac{1}{12} * 12 * 98^3 \right) * 10^6} + \frac{1.2(0.5m)}{0.4((13.8GPa))(0.0654m^2) * 10^6}}$$

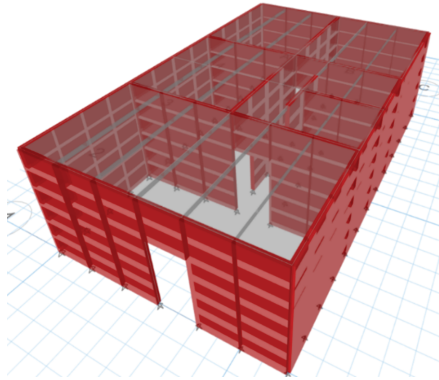
$$K = 573.98 * 10^3 kN / m$$

La rigidez de las placas de mampostería de microconcreto fibro-reforzadas con fibras es 573.98 x 10³kN/m.

Modelación estructural de diseño arquitectónico de vivienda de un piso en placas tipo mampostería de microconcreto

Se realiza modelación de la vivienda diseñada arquitectónicamente en el *software* Etabs®. En la Figura 67 se muestra el modelo realizado para placas de mampostería de MRC, GRC y FRC, dicha modelación se realiza con el fin de conocer las fuerzas axiales, cortantes y de momentos que se producen en los muros de la vivienda diseñada para el proyecto.

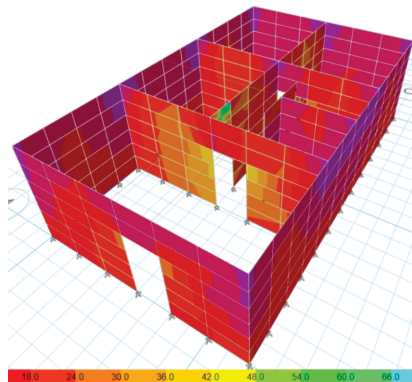
Figura 67. Modelo de vivienda modular en placas de MRC, GRC y FRC



Fuente: elaboración propia.

La Figura 68 muestra la distribución de esfuerzos sobre los muros de las viviendas. Dichos esfuerzos son los que deben soportar las placas de mampostería. Si los esfuerzos son superiores a los que soportan las placas de mampostería se debe realizar un diseño con columnas de confinamiento de concreto reforzado.

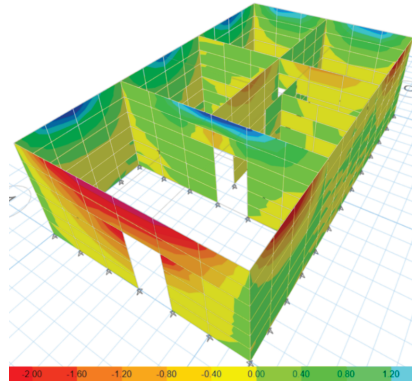
Figura 68. Fuerza máxima soportada por muros en modelo de vivienda modular en placas de MRC, GRC y FRC



Fuente: elaboración propia.

La Figura 69 muestra los momentos que se transmiten por los muros de la vivienda diseñada arquitectónicamente con el fin de ser analizados para el diseño a flexo-compresión de los diferentes muros. Dichos esfuerzos de flexo-compresión deben ser soportados por las placas de mampostería, en caso de que no soporten los esfuerzos se deben diseñar columnas de confinamiento en concreto reforzado.

Figura 69. Momento máximo soportado por muros en modelo de vivienda modular en placas de MRC, GRC y FRC-1



Fuente: elaboración propia.

Haciendo un análisis de los esfuerzos y momentos en cada uno de los muros de la vivienda, se concluye que los muros construidos con placas de mampostería con MRC, GRC y FRC tienen la capacidad de soportar las cargas axiales; sin embargo, solo los muros de GRC y FRC tienen capacidad de soportar los esfuerzos de flexo-compresión y cortante, por lo que, a los muros de MRC se les debe diseñar columnas de confinamiento con concreto reforzado, es decir, la adición de fibras en las mezclas de concreto contribuye positivamente con el desarrollo de placas de tipo mampostería para la construcción de viviendas modulares.

REFERENCIAS

- Acuacultua. (2018). *Tanque circular de concreto*. Instituto Nacional de Pesca. Recuperado de: <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-tanque-circular-de-concreto#:~:text=Descripci%C3%B3n%3A%20Estructuras%20circulares%20de%20concreto,el%20hacinamiento%20de%20los%20peces>.
- Agudelo-Díaz, J. D., Riveros Rodríguez, J. E., y Contreras-Rodríguez, Y. (2016). *Elaboración de paneles a base de aserrín y polímeros en la ciudad de Villavicencio-Meta*. [Trabajo de grado - pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia].
- ASTM A820/A820M (2021). *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C1666/C1666M (2015). *Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement*. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C192/C192M (2019). *Standard Practice For Making And Curing Concrete Test Specimens In The Laboratory*. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Banthia, N., Bindiganavile, V., Jones, J., y Novak, J. (2012). Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products. *PCI Journal*, pp. 33-46.
- Beltrán-Díaz, A., García-Mateus, E. G., y Pastrán-Beltrán, C. (2013). Evaluación del comportamiento mecánico de un concreto reforzado con fibras textiles de vidrio

- sometido a cargas de flexión para su uso en la elaboración de elementos urbanísticos prefabricados. *Revista Tekhnê*, 10 (1), 5-18.
- Campoy-Bencomo N A, Gaxiola-Camacho J R, Chávez-Alegria O, Millán-Almaraz J R, Rojas-González E y De la Rosa-Hernandez D. (2021). Análisis esfuerzo-deformación de concreto reforzado con fibras metálicas y polímeros Stress-strain analysis of concrete reinforced with metal and polymer fibers. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 21(1) pp. 1-11.
- Carrillo J, Aperador W y González G. (2013). Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Ingeniería Investigación y Tecnología XIV*(3) pp. 435-450.
- Castaño-Gómez, I. M., y Trigos-Navarro, D. C. (2017). *Diseño estructural participativo con desechos orgánicos, una alternativa panameña para Colombia*. [Trabajo de grado - pregrado, Universidad Católica de Colombia].
- Causil Villalba, R. D., y Guzman Mestra, V. A. (2016). *Caracterización de las fibras de capacho de maíz (Zea Mays) como material de refuerzo alternativo para el concreto mediante ensayos mecánicos*. [Trabajo de grado - pregrado, Universidad de Córdoba].
- Cheng, C., He, J., Zhang, J., y Yang, Y. (2019). Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag. *Construction and Building Materials*, 217, 128-136.
- Cinco muebles que se pueden hacer en concreto* (s.f.). Goian. <https://goian.es/blog/5-muebles-o-elementos-decorativos-que-se-pueden-hacer-con-concreto/>
- Comino Almenara, P.I. (1995) *La Realizaciones en GRC en la construcción*. Congreso de materiales compuestos MATCOMP95, pp. 533-538.
- Concreto Lanzado de mezcla húmeda*. (2017). Probacons. <https://www.probacons.com/concreto-lanzado-de-mezcla-humeda/>
- Coral Patiño, J. A. (2019). *Comportamiento del concreto con cascarilla de café y posibilidades ante textura y color*. [Trabajo de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Drenajes. (s.f.). *Grelhase canaletas de concreto*. Pinterest. <https://co.pinterest.com/yugly/drenajes/>
- Elbehiry, A., Elnawawy, O., Kassem, M., Zaher, A., Uddin, N., y Mostafa, M. (2020). Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars. *Revista Case Studies in Construction Materials*, e00361.
- Enfedaque, A., Gálvez, J. C., y Suárez, F. (2015). Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 75, 472-487.
- Ferreira, J.G. y Branco, F.A. (2007). Structural application of GRC in telecommunication towers. *Construction and Building Materials*, 21, pp. 19-28.

- Galvis, S. P. (2013). Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. *Ingenierías*, 16(61), 27-37.
- García, C. D., Olaya, J. M., y Salazar, J. (1984). Dosificación de hormigones ligeros con cascarilla de café. *Ingeniería e investigación*, 01(01), 51-56.
- Girbés, I. (2004). *Evaluación del uso de subproductos industriales de carácter puzolánico en conglomerantes de cemento Portland. Influencia de su utilización sobre la durabilidad de los materiales*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].
- Gram, H. E. (1988). Durability of Natural fibres in concreto., Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete. *Concrete Technology and design*, 288.
- Grijalva, C. (2020). *Concreto armado 1*. USAC Tricentenario. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Harmsen, T. E. (2002). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Pontifica Universidad Católica del Perú.
- Instituto del Concreto. (1997). *Tecnología y propiedades*. Asociación colombiana de productores de concreto, ASOCRETO.
- Juarez, Alvarado, C. A., y Rodríguez, P. (2004). Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. *Ingenierías*, VII(22).
- Juárez-Alvarado, C. A., Rodríguez, P., Rivera-Villarreal, R., y Rechy de Von Roth, M. A. (2003). Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. *Ciencia UANL*, 7(4), 465-476.
- Kosmatha, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., y Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois, Portland Cement Association, PCA.
- Kumar, D., Rex, L. K., Gokulnath, V., y Saravanan, B. (2020). High performance glass fiber reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 784-788.
- Lalinde Castrillón, L.F. (2020). Estudio de compuestos de GRC y adiciones activas: Propiedades mecánicas, envejecimiento acelerado y durabilidad. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete Technology*. John Wiley y Sons, Inc., Hoboken.
- Malla Pet 3D*. (2019). Metainplast. <https://www.metainplast.com/>
- Martínez Morales, J. S., y Poveda Jaramillo, J. A. (2018). *Evaluación de la utilización de las fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar el proceso de fisuración*. Universidad La Gran Colombia.
- Mezcladores de cemento*. (s.f). Inter máquinas. <https://intermaquinas.online/cat-prod/construccion/mezclador-de-cemento/>

- Montalvo, M. E. (2015). *Pavimentos rígidos reforzados con fibras de acero versus pavimentos tradicionales*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Muñoz-Alvarez, C. J. (2007). *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de vidrio* [Tesis de grado, Universidad Austral de Chile].
- Neville, A.M. y Brooks, J.J. (2010). *Concrete Technology. Second Edition*. Pearson Education Limited.
- Norma Técnica Colombiana, NTC 118. (2004). *Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de vicat*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana, NTC 121. (1982). *Ingeniería civil y arquitectura. Cemento Portland, especificaciones físicas y mecánicas*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana, NTC 1377. (1994). *Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana, NTC 220. (2004). *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).}
- Rivera P. (2020). *Concreto reforzado con fibra estructural*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/concreto-reforzado-con-fibra-estructural-pedro-rivera/?originalSubdomain=es>
- Osorio J., Varón F. y Herrera J. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *Dyna*, 74(153), 69-79.
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., Velazco, G. (2009). *Manual del concreto estructural. Tercera edición*. Siderúrgica del Turbio S.A.
- Purnell, P., Short, N.R., Page, C.L., Majumdar, A.J., y Walton, P.L. (1999). Accelerated ageing characteristics of glass-fibre reinforced cement made with new cementitious matrices. *Composites: Part A*, 30, pp. 1073–1080.
- Quintero García, S. L., y González Salcedo, L. O. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Ingeniería y Desarrollo* (20), 134-150.
- Saavedra-Joaqui, J. A., y Ortega-Montes, C. C. (2020). *Comportamiento mecánico a la flexión y compresión del concreto reforzado con fibra de fique en vigas y cilindros*. [Trabajo de grado - pregrado, Universidad Católica de Colombia].
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores.
- Shetty, M.S. (2006). *Concrete technology theory and practice*. Chand (S.) y Co Ltd.

- Sika. (2017). *Concreto reforzado con fibras*. Sika. <https://col.sika.com/es/construccion/concreto/produccion-de-concreto-mortero-y-cemento/fibras-para-concreto-y-mortero.html>
- Structuralia. (2022). Características, ventajas y aplicaciones de panel GRC. (Ingeniería Civil y Transporte). <https://blog.structuralia.com/panel-grc>
- Su casa prefabricada*. (s.f). <https://www.sucasaprefabricada.com/>
- Tecnología al servicio de los materiales compuestos*. (2023). Sumiglas S.A. <https://sumiglas.com/>
- Taborda J., Cañas J., y Trisancho J., y Trisancho-Reyes, J. L. (2017). Comparative study of the mechanical properties of the polyester resin reinforced with bamboo fiber as the substitute material fiberglass. *DYNA*, 84(202), 35-41.
- Tattersall, G., Baker, P., (1988). The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete, *Mag. Concr. Res.* 40, 143, pp. 79–89.
- Tattersall, G., Baker, P., (1989). An investigation on the effect of vibration on the workability of fresh concrete using a vertical pipe apparatus, *Mag. Concr. Res.* 41, 146, pp. 3–9.
- Teranishi, K. (1995). Study on dynamic model of Bingham's fluid subjected to vibration, *Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of Architectural Institute of Japan*, 467, pp. 1–8.
- UNE-EN 1170-1 (1998). *Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la consistencia de la matriz, método denominado "por exposición"*. Normalización Española UNE.
- Vahidi, E.K. y Malekabadi, M.M. (2011). *GRC and Sustainable Building Design*. Kermanshah: Razi University.
- Vanegas, O. L., Martínez, J. S., y Poveda, J. A. (2019). *De la utilización de las fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar el proceso de fisuración. Investigación formativa en ingeniería*. Editorial IAI, 96-105.
- Yildizel, S. A., Tayeh, B. A., y Calis, G. (2020). Experimental and modelling study of mixture design optimisation of glass fibre-reinforced concrete with combined utilisation of Taguchi and Extreme Vertices Design Techniques. *Journal of materials research and technology*, 9(2), 2093-2106.



José Daniel Palacios Pabón

Especialista en Estructuras e Ingeniero Civil. Profesionalmente se ha desempeñado en el sector de la construcción como modelador y diseñador de estructuras sismoresistentes. Se destaca su trayectoria en producción científica al ser joven investigador adscrito al grupo de investigación en tecnología cerámica –GITEC, por medio de la convocatoria 891 de 2020 del ministerio de ciencia, tecnología e innovación de Colombia. Participa activamente como investigador en el grupo de investigación en ingeniería estructural – POLÍMATAS. Cuenta con más de 6 artículos científicos publicados en revistas indexadas. Se ha presentado como ponente en más de 7 eventos científicos nacionales e internacionales. Es docente de cátedra y ha sido coautor en el desarrollo de 4 proyectos cofinanciados por la Universidad Francisco de Paula Santander.



Jessica Viviana Sánchez Zúñiga

Magíster en Ingeniería de los Materiales y construcción sostenible. Arquitecta. Profesionalmente, se ha desempeñado como directora del Semillero de Investigación en Materiales de la Construcción y Economía Circular – SIMCEC, investigadora activa del Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica – GITEC y Docente catedrático de la Universidad Francisco de Paula Santander. Como Investigador Junior Categorizado por Minciencias en la Convocatoria Colciencias 894 de 2021, se destaca por ser joven investigadora en proyectos de cofinanciación con el ministerio de ciencia, tecnología e innovación, autor y coautor de más de 15 artículos científicos publicados en revistas indexadas, capítulos de libro resultados de investigación y libros resultados de investigación, ha presentado más de 6 ponencias en eventos científicos nacionales e internacionales e inventor de 3 productos tecnológicos publicados con gaceta y 3 productos radicados ante la Superintendencia de industria y Comercio para solicitud de patente de invención.

ECONOMÍA CIRCULAR

UN APORTE A TRAVÉS DEL USO DEL MICROCONCRETO FIBRO-REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES

La economía circular, como respuesta a la sostenibilidad ambiental, describe la necesidad de aprovechar los recursos disponibles de la forma más eficiente y sostenible. La reutilización de subproductos y desechos agroindustriales es uno de los principales objetivos que llevó a la elaboración de la investigación que dio como resultado la publicación del presente libro. El microconcreto es un material que ha sido utilizado desde la antigüedad en la construcción de edificaciones que han sobrevivido el paso de los años. En la actualidad, reforzar concreto con hebras o hilos tienen un nombre específico, el cual es conocido como microconcreto fibro-reforzado. Las fibras pueden ser de muchas procedencias; ya sean artificiales como lo es el caso de las fibras de plástico (polipropileno y el polietileno tereftalato-PET), las fibras de vidrio y las fibras metálicas, de hierro o acero; o también pueden ser fibras de procedencia natural (de origen animal o vegetal), como es el caso de las fibras de bagazo de caña de azúcar, paja, lechuguilla, estopa de coco, plumas de aves, entre otras.

El uso de las fibras para reforzar microconcreto se da con el fin de mejorar ciertas características del concreto, tal como la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción, pero sin dañar propiedades como la densidad, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Además, en muchos casos el uso de fibras se da con el fin de utilizar aquellos desechos y subproductos agroindustriales a los cuales no se les da un correcto manejo y terminan contaminando el medio ambiente.

Este libro está dirigido a la comunidad científica y comunidad en general, como resultado de investigación y aporte al conocimiento y a la economía circular en torno a la reutilización y aprovechamiento de subproductos y desechos agroindustriales.

Incluye

- ▶ Fundamentos del microconcreto fibro-reforzado.
- ▶ Componentes: Cemento, arena, aditivos, fibras de vidrio, fibras vegetales.
- ▶ Aplicaciones del microconcreto fibro-reforzado en la industria de la construcción y de la arquitectura.



Universidad Francisco
de Paula Santander
Vigilada Mineducación



Grupo de Investigación en
Tecnología Cerámica



CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS

ISBN 978-958-503-643-7



9 789585 036437
e-ISBN 978-958-503-644-4