



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.

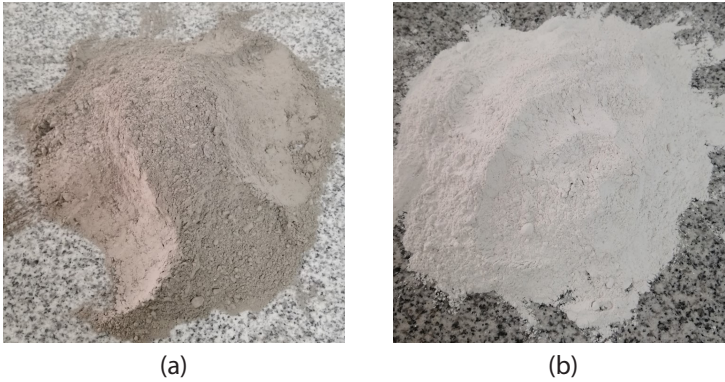
La calidad del microconcreto depende directamente de la calidad de los materiales utilizados para su fabricación. El cemento utilizado generalmente es un cemento hidráulico, es decir, aquel cemento que reacciona con el agua, comúnmente conocido como cemento Portland; sin embargo, se debe tener en cuenta 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.

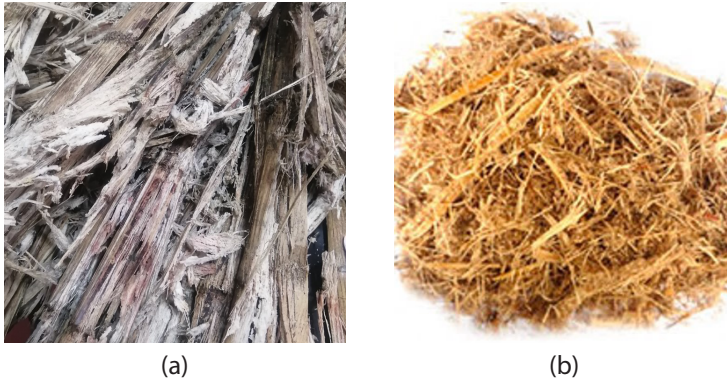
Fibra de bagazo de caña de azúcar

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.

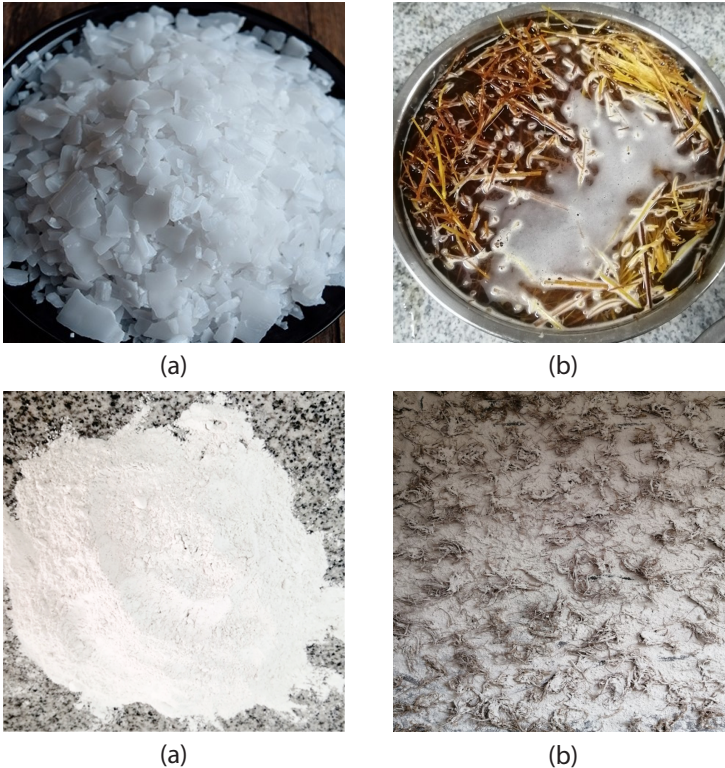
La extracción de fibras de guadua debe hacerse con extrema precaución para evitar cualquier daño a las fibras, ya que son susceptibles a otros componentes de la planta. Los procedimientos son los siguientes:

- **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).

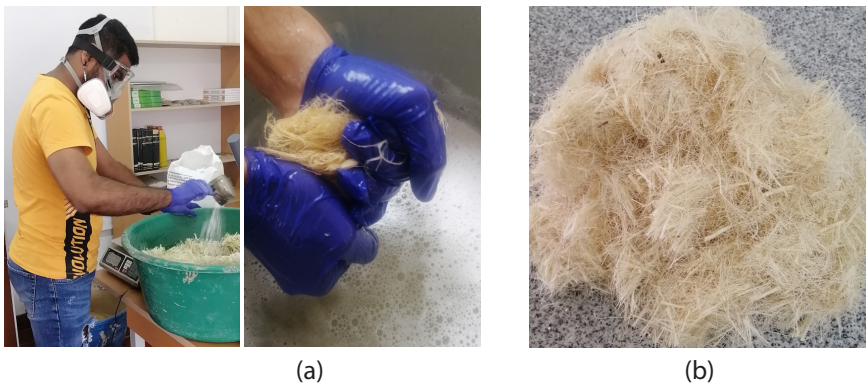
En la investigación concluyen el tratamiento de la fibra una vez realizada la inmunización y hacen la mezcla, se debe tener en cuenta que los agregados estén a una temperatura entre 20-30 °C en un espacio seco y sin humedad (Vanegas *et al.*, 2019).

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

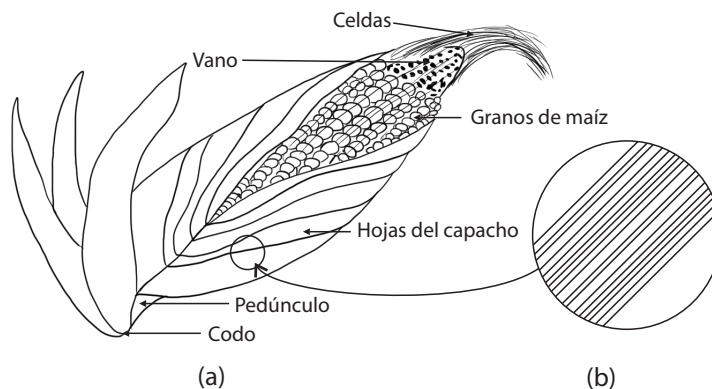


Fuente: Quintero y González (2006).

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 tratamientos 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).

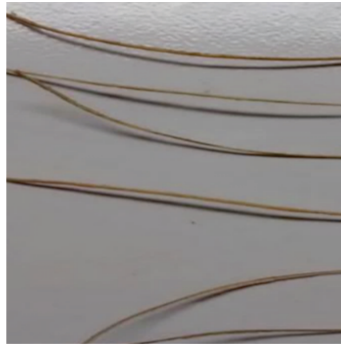
- **Obtención y tratamientos de las fibras de capacho de maíz (FCM)**

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).