

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

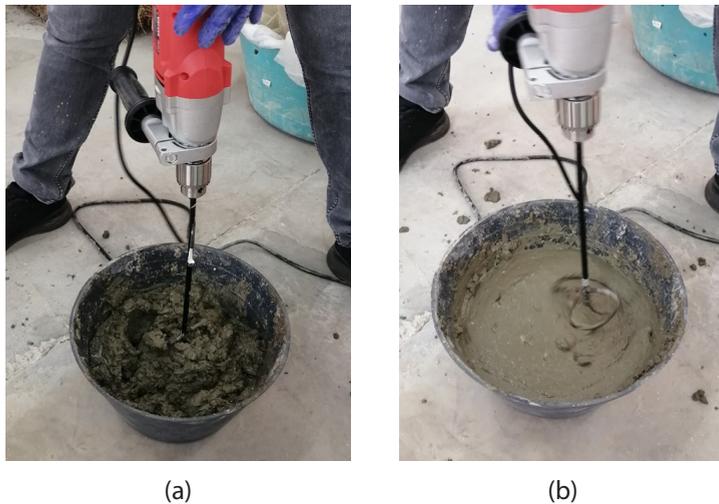
Las mezclas de microconcreto deben tener la fluidez necesaria para que sea moldeable y no pierda trabajabilidad cuando se añaden las fibras de refuerzo, las cuales, dependiendo de la capacidad de absorción de agua, pueden variar la estructura interna del compuesto; por lo tanto, se hace indispensable 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).

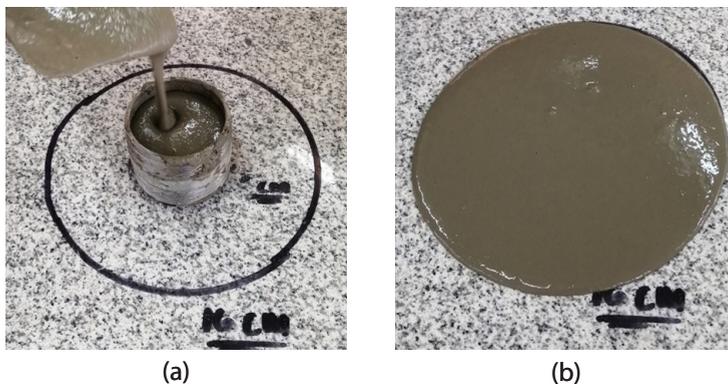
Figura 27. Proceso de mezclado de las muestras con mezclador vertical (a) antes de incluir aditivos plastificantes (b) después de incluir aditivos plastificantes



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

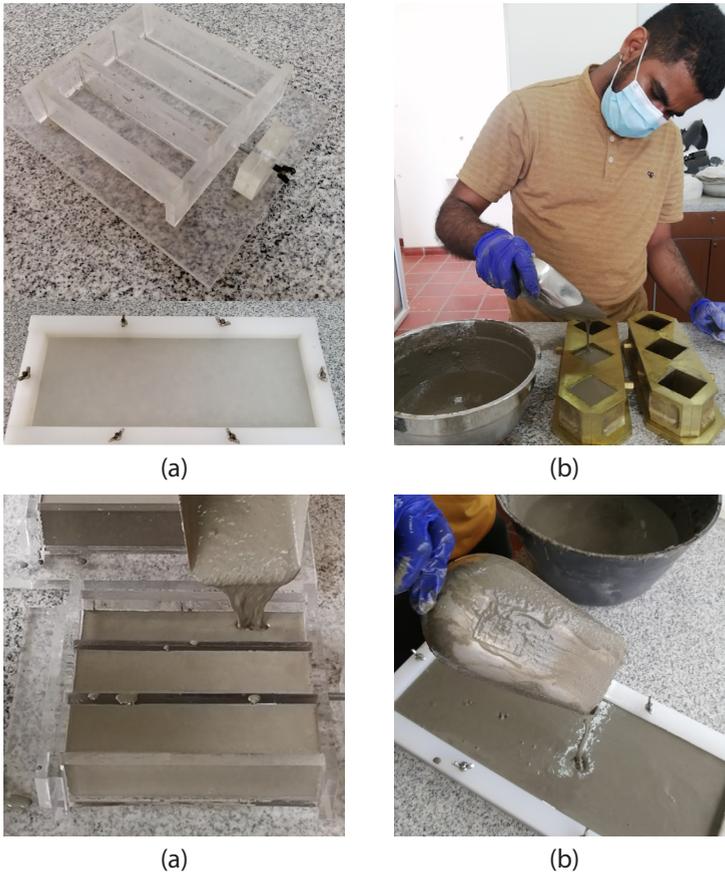


Fuente: elaboración propia.

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 prismas y placas (b) elaboración de cubos (c) elaboración de prismas (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

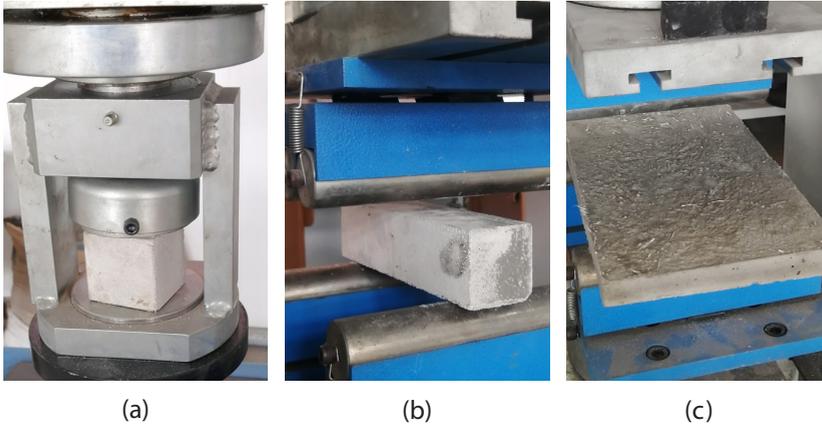


Fuente: elaboración propia.

- **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 maquina 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 x16 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.

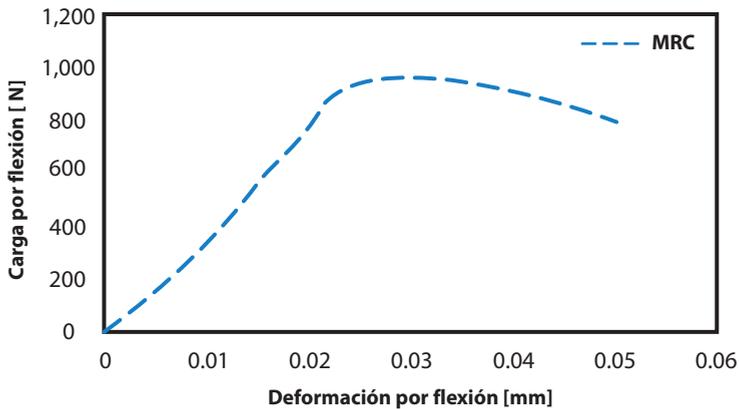
La investigación que dio como resultado la publicación del presente libro fue realizada en los laboratorios de estructuras y de resistencia de materiales de la Universidad Francisco de Paula Santander en la sede principal de San José de Cúcuta. Del mismo modo, la institución contribuyó cofinanciando 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.

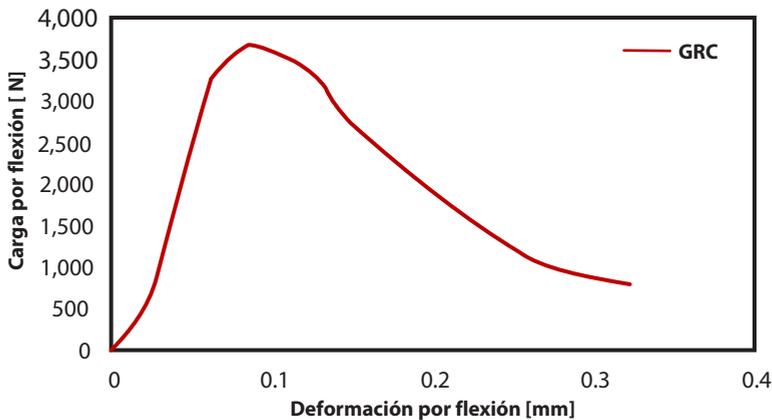
- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras de vidrio tipo AR (GRC)**

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.

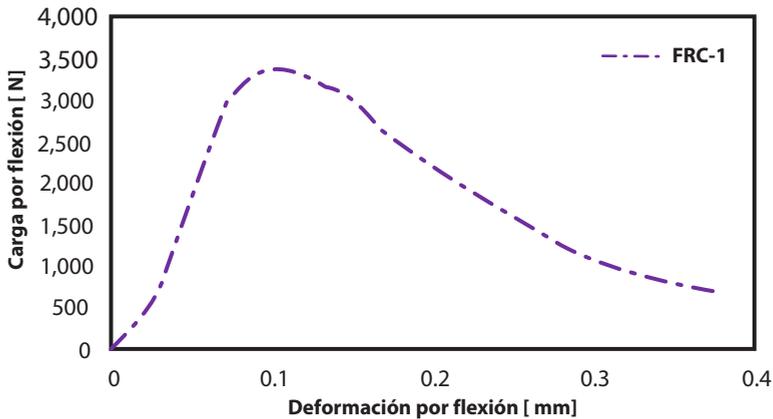
- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de fique (FRC-1)**

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.

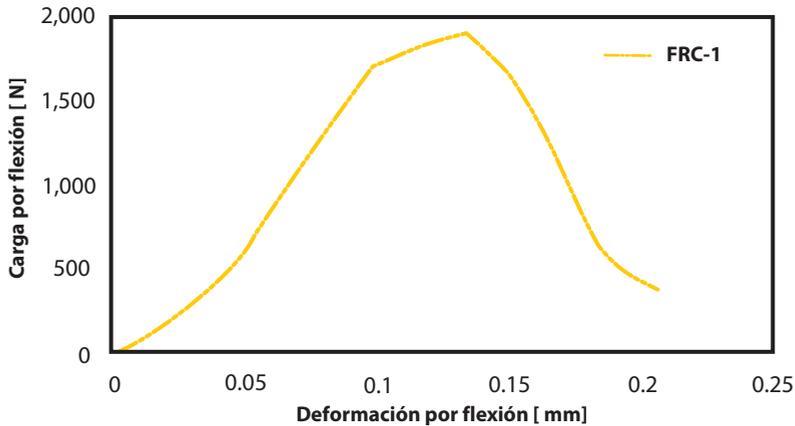
- **Microconcreto fibro-reforzado con fibras vegetales de vástago de plátano (FRC-2)**

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.

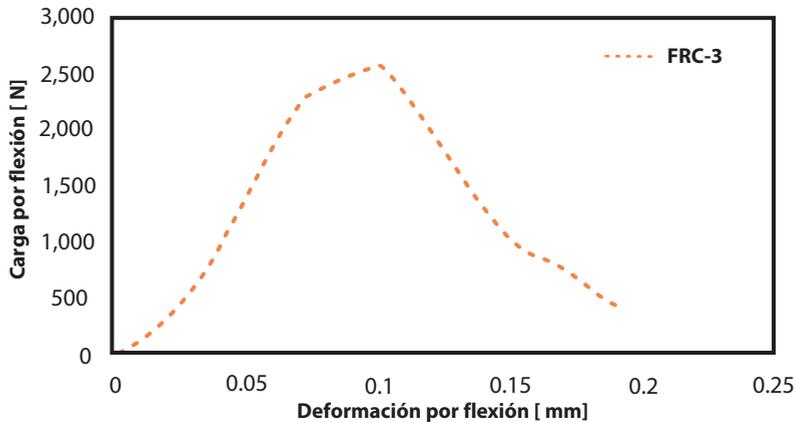
Al comparar el FRC-2 con fibras de plátano con el FRC-1 con fibras de fique, se evidencia que la resistencia a la flexión del FRC-2 está por debajo de un 60 % de la capacidad que tiene el FRC-1. Además, la rigidez del material y la deformación a la flexión no es comparable con los resultados que se presentaron 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.

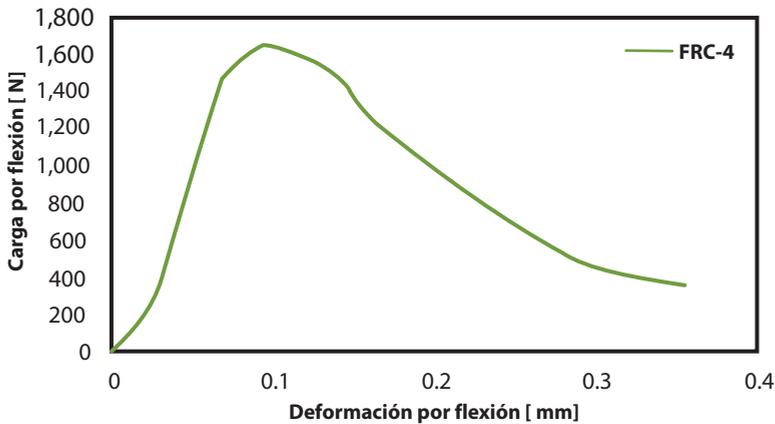
Aunque las fibras tienen buenas propiedades mecánicas, no se presentó una mejora en las mezclas de microconcreto, lo cual se puede deber a que las fibras luego del tratamiento químico pierden su forma y se desgasta la celulosa propia del material. La gráfica muestra un comportamiento similar al del FRC-2 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)

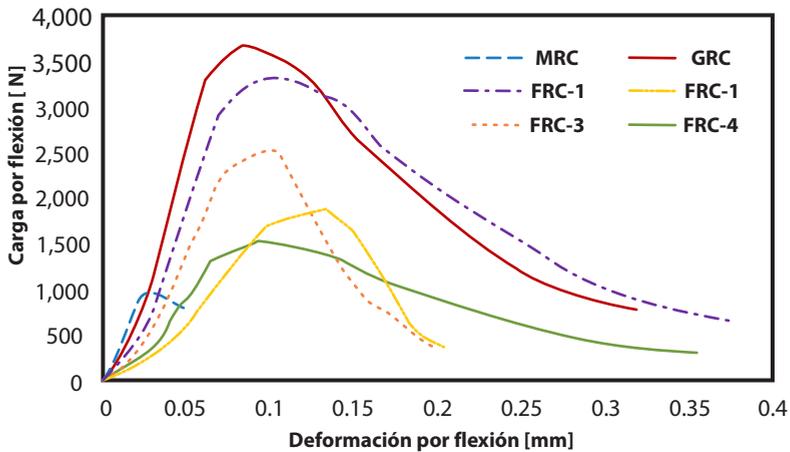


Fuente: elaboración propia.

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

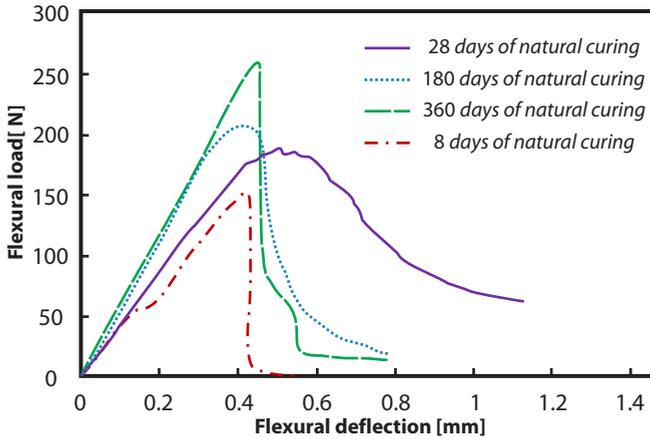
Tipo de Concreto	f'_c [MPa]	F_{cr} [MPa]	E_c [GPa]	ρ_c [g/cm ³]
MRC	32.4	3.53	15.49	2.16
GRC	28.5	13.79	17.59	2.04
FRC-1	26.2	12.58	13.80	2.11
FRC-2	24.8	7.09	5.68	2.13
FRC-3	23.7	9.55	10.42	2.08
FRC-4	21.5	5.71	6.55	2.01

Fuente: elaboración propia.

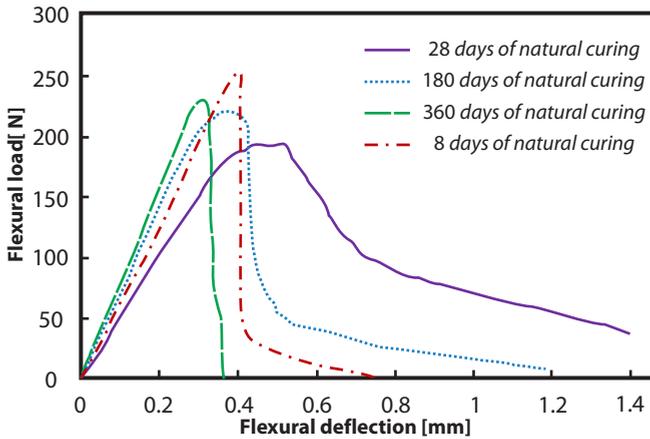
Los resultados mostrados anteriormente fueron comparados con los resultados mostrados por otros autores a nivel mundial. A continuación, se muestran algunos de las propiedades mecánicas presentes en fuentes de información secundaria.

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)

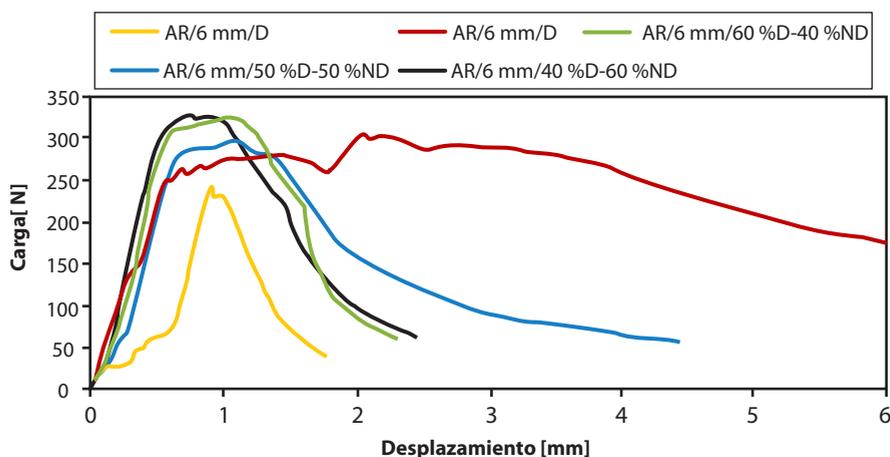
Fuente: Cheng *et al.* (2019).

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).