

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.

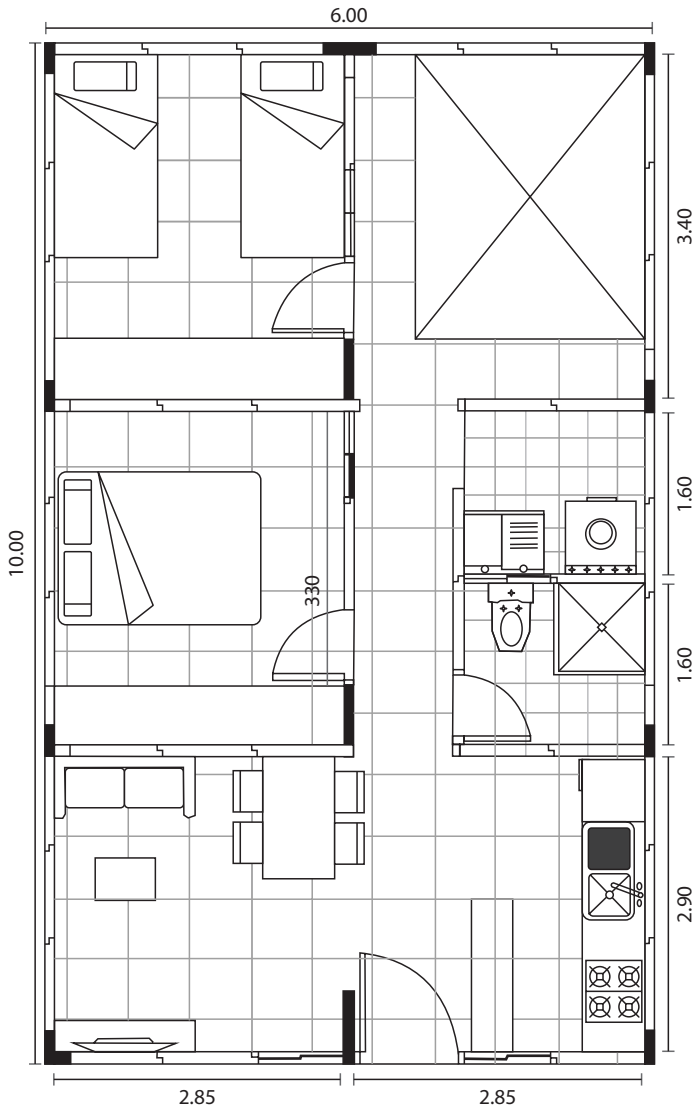
La mezcla de FRC con fibras de fique presenta propiedades muy similares a las propiedades que presenta el GRC (ver Tabla 43). Dentro de los usos que se le puede dar a dichas mezclas la que desataca es para uso como placas en la construcción de viviendas modulares.

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

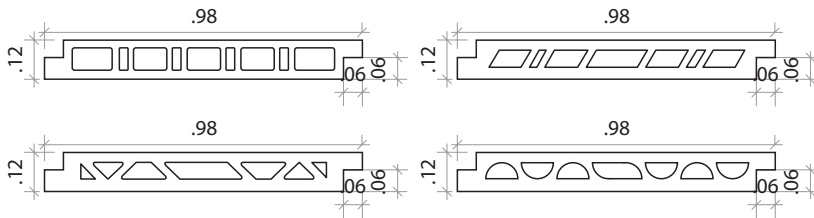
El reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, es una norma que surge para reglamentar requisitos mínimos de construcción en el territorio nacional; por lo tanto, a continuación, se darán a conocer los requisitos mínimos que se deben considerar para el diseño y construcción de vivienda 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.

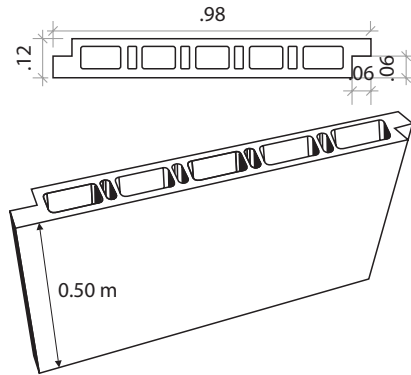
Figura 63. Propuesta de placas tipo mampostería de GRC y FRC-1 (1 %)



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 %)



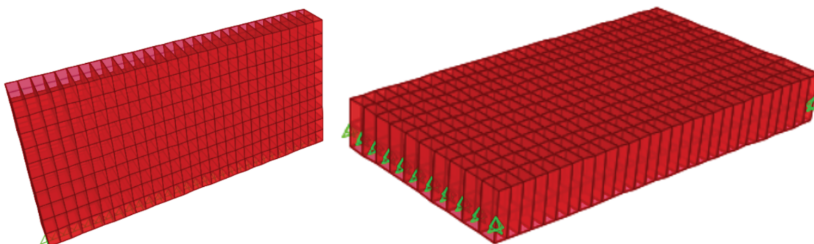
Fuente: elaboración propia.

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.

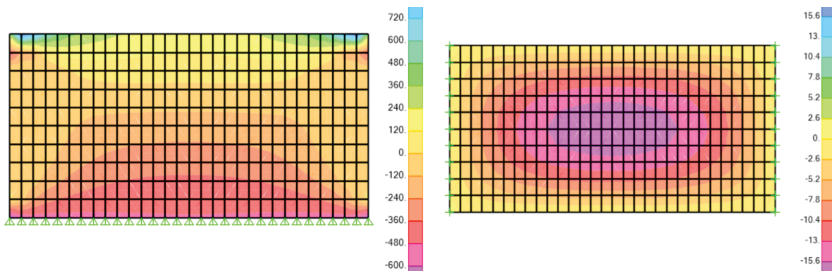
Figura 65. Modelo matemático de placas de MRC, GRC y FRC



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 (P_u) 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:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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:

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

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

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

La rigidez de las placas de mampostería de microconcreto sin fibro-refuerzo es $644.3 \times 10^3 \text{ kN/m}$.

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:

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

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

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

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:

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

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

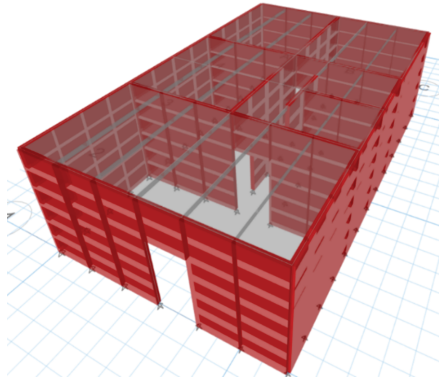
$$K = 573.98 * 10^3 kN / m$$

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.

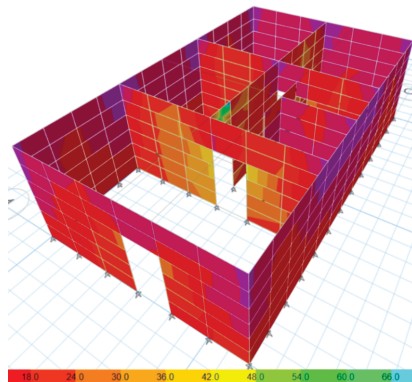
Figura 67. Modelo de vivienda modular en placas de MRC, GRC y FRC



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.

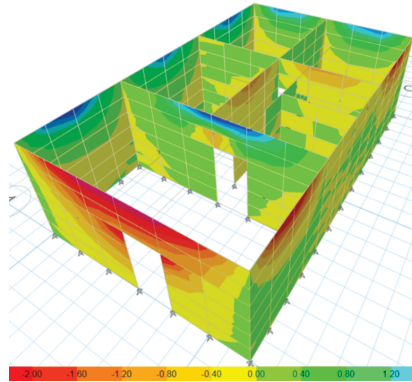
Figura 68. Fuerza máxima soportada por muros en modelo de vivienda modular en placas de MRC, GRC y FRC



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.