

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE TRES CLASES DE PLACAS TIPO SÁNDWICH DE FERROCEMENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA RURAL

EVALUATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF THREE KINDS OF PANELS FERROCEMENT SANDWICH TYPE FOR RURAL HOUSING CONSTRUCTION

LINA MARCELA GUERRA-GARCÍA

M.Sc., Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, marcela_1220@yahoo.com.mx

FERNANDO DA COSTA-BAÊTA

PhD., Professor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, baeta@ufv.br

ILDA DE FÁTIMA FERREIRA-TINÓCO

Dr. Sc., Professora, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, iftinoco@ufv.br

JAIRO ALEXANDER OSORIO-SARAZ

Dr. Sc., Profesor, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, aosorio@unal.edu.co

ROBINSON OSORIO-HERNANDEZ

M.Sc., Profesor, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, robinson0413@gmail.com

Recibido para revisar Diciembre 21 de 2012, aceptado Julio 30 de 2013, versión final Agosto 21 de 2013

RESUMEN: Gracias a experiencias positivas en el medio urbano, las placas tipo sándwich de ferrocemento se presentan, como una alternativa a la demanda de construcciones rápidas y de bajo costo que impone la problemática de vivienda rural en América Latina. Diversas propuestas en este sentido pueden ser evaluadas previamente a través de simulaciones. Este estudio evaluó el comportamiento mecánico de tres placas tipo sándwich de ferrocemento, para definir el sistema constructivo de una propuesta de vivienda rural, a través de una simulación con elementos finitos, por medio del software SolidWorks®. Con base en un diseño previo para vivienda rural, fueron diseñadas tres alternativas de placas tipo sándwich de ferrocemento, evaluando su resistencia a la rotura y deformación, aplicando el cálculo de esfuerzos de Von Mises. Las tres alternativas mostraron resultados satisfactorios de resistencia y deformación, optando por la combinación de dos de las tres alternativas para la definición del sistema constructivo según criterios de practicidad y costos.

PALABRAS CLAVE: Prefabricado, simulación, elementos finitos.

ABSTRACT: Thanks to positive experiences in urban, sandwich panels ferrocement type are presented as an alternative to the demand for fast, low construction cost imposed by the rural housing problem in Latin America. Various proposals in this regard may be previously evaluated through simulation. This study was performed to evaluate the mechanical behavior of three panels of ferrocement sandwich type, to define the building system of rural housing proposal, from a simulation with the application of the finite element method. Based on a preliminary design for rural housing, three alternatives were designed sandwich type ferro-plates, then evaluating their tensile strength and displacement by applying the calculation of Von Mises stress in a simulation by the finite element method, by SolidWorks® software. The three alternatives were satisfactory offset resistance and, choosing the combination of the second and third alternatives for the definition of the construction system according to criteria of practicality and costs.

KEY-WORDS: Prefabricated, simulation, finite element.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática de la vivienda rural en los países de América Latina, presenta varias características que son comunes, donde la precariedad de las condiciones que

ofrecen y la carencia absoluta de vivienda en muchos casos, son predominantes. En los últimos años sin embargo, se han implementado programas para mejorar las condiciones habitacionales del medio rural, con el interés principalmente de conocer la efectividad de

estos como respuesta a las demandas de sus habitantes y la complejidad con un modelo sustentable para el territorio [1].

En Brasil por ejemplo, el gobierno federal inició el Programa Nacional de Vivienda Rural en 2003, que facilita el acceso a la reforma o construcción de viviendas de las familias agricultoras socioeconómicamente más vulnerables [2]. Mientras en Colombia, el decreto 00900 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2012), permitirá a los beneficiarios de programas estratégicos, así como a la población desplazada, el acceso a vivienda rural 100% gratuita [3].

Este tipo de políticas generan demanda de construcciones rápidas y de bajo costo. El ferrocemento es uno de los materiales con características que posibilitan este tipo de obras, ya que es de fácil construcción y reparación, no requiere mano de obra calificada ni mucho tiempo de ejecución, genera bajo costo, es resistente mecánicamente, así como resistente a la abrasión y al impacto, es impermeable y puede ser concebido con espesores mínimos entre 10 y 15 mm, disminuyendo el peso propio de las estructuras considerablemente [4].

Experiencias positivas en el uso de placas prefabricadas tipo sándwich de ferrocemento aplicadas en viviendas de países de América Latina, permiten pensar que esta puede ser una buena opción para la vivienda rural. Empresas constructoras en México [5] y Chile [6], comercializan casas de bajo costo, basadas en este tipo de paneles, con refuerzos especiales para responder eficientemente al alto nivel de sismicidad de estas zonas.

En Brasil, la aplicación de esta tecnología está representada en edificaciones de carácter público, construidas por el arquitecto João Filgueiras Lima (Lelé) [7], mientras son escasas las exploraciones en el campo habitacional, de las cuales [8], presentó un aporte, evaluando el comportamiento estructural y térmico de un prototipo de casa a escala real, basado en paneles prefabricados de ferrocemento tipo sándwich.

En Colombia, la construcción de vivienda con placas de ferrocemento es común. Sin embargo, el uso de este material en forma de placas tipo sándwich no lo es. Es usual encontrar en Colombia edificaciones construidas con placas de ferrocemento con espesores alrededor de

los 20mm [9], las cuales transmiten calor al interior con facilidad, generando ambientes carentes de confort térmico. Soluciones de este tipo suelen ser rechazadas por los pobladores rurales, ya que para muchos de ellos, los sistemas constructivos de tan poco espesor tienen poca estabilidad estructural y baja calidad.

En América Latina, debido al bajo presupuesto dedicado al desarrollo de la ciencia y la tecnología (menos del 0.5% de PIB, frente al 2% y 3% del PIB en países desarrollados) [10], resulta difícil la experimentación a escala real sobre la viabilidad de las propuestas que pueden resultar entorno a sistemas constructivos de ferrocemento. Sin embargo, el surgimiento de la simulación computarizada se ha convertido en una herramienta de gran ayuda para estos análisis, permitiendo ahorro de materia prima y trabajo [11]. Las simulaciones a través del método de elementos finitos han sido masivamente empleadas para el análisis estático y dinámico de sistemas estructurales [12], de modo que se puedan hacer ajustes en los diseños y/o elegir los modelos que finalmente sean evaluados a escala real.

Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de tres placas tipo sándwich de ferrocemento, para definir el sistema constructivo de una propuesta de vivienda rural, a partir de una simulación con la aplicación del método de elementos finitos.

2. METODOLOGÍA

Partiendo del diseño previo de una propuesta de vivienda rural para países tropicales y subtropicales como Colombia y Brasil, la cual se observa la Figura 1, fueron elaboradas tres alternativas de placas prefabricadas tipo sándwich de ferrocemento, con variaciones en la forma de conexión, buscando el mejor sistema constructivo para este tipo de vivienda.

2.1. Características de las tres alternativas

Las tres alternativas tienen varias características comunes, como puede verse en la Figura 2: son placas tipo sándwich con 1,0m de ancho por 2,70m de largo y cada tapa de ferrocemento tiene un espesor de 15mm; en el núcleo tienen posibilidad de contener un material de aislamiento térmico y así mismo aprovecharse para

la instalación de redes eléctricas e hidrosanitarias; en los extremos y en el centro tienen refuerzos verticales; hay paneles con adaptaciones para puertas y ventanas embebidas.



Figura 1. Planta propuesta de vivienda rural para países tropicales y subtropicales [13]

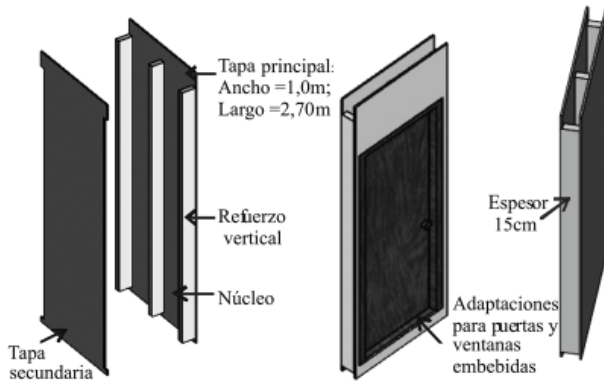


Figura 2. Características comunes de las alternativas.

La primera alternativa se trata de un sistema constructivo mediante placas con unión de tipo hembra en sus dos extremos, como se ve en las Figuras 3 y 4, generando un espacio vacío entre placas, que debe ser llenado con hormigón o mortero, y funciona como conector. La Figura 5 muestra los elementos que componen cada placa en su interior vistos frontalmente. En este sistema las conexiones en las esquinas y en paredes intermedias

deben ser hechas en obra, en forma de pilar, como se muestra en la Figura 6.

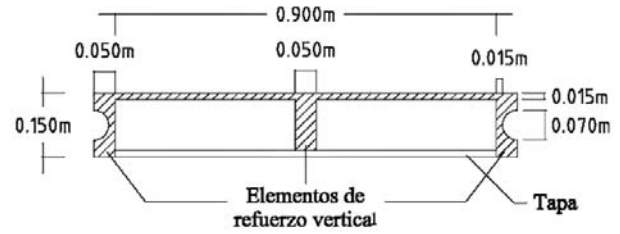


Figura 3. Corte transversal primera alternativa

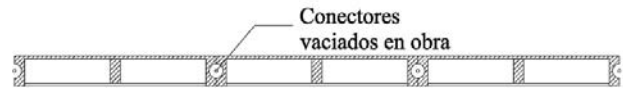


Figura 4. Conexión entre placas de paredes continuas primera alternativa.

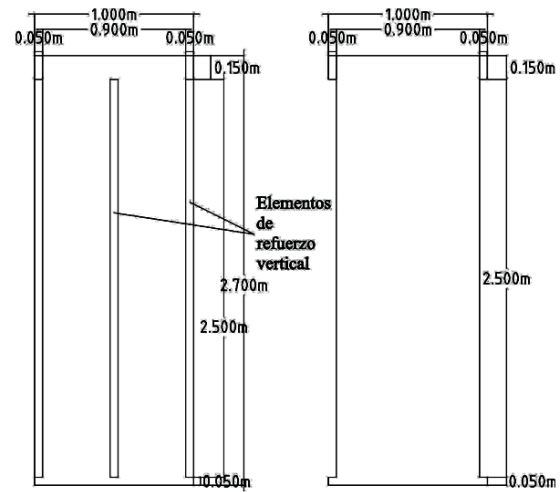


Figura 5. Vista frontal interior placa primera alternativa: (A) tapa principal; (B) tapa secundaria.

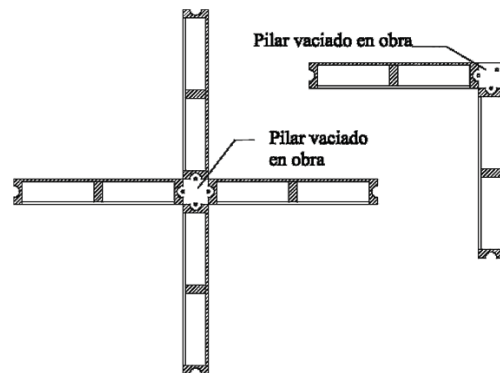


Figura 6. Conexión de placas en esquinas y paredes intermedias primera alternativa.

La segunda alternativa consiste en una placa simple, como se muestra en las Figuras 7 y 8, donde las uniones entre placas son prácticamente inexistentes. La conexión de este sistema es generada solo a partir de la viga de fundación (Figura 9) y la viga de amarre superior (Figura 10), las cuales son comunes para las tres alternativas. Los elementos que componen cada placa en su interior vistos frontalmente son similares a los de la Figura 5. Como se puede apreciar en la Figura 5. Como se puede apreciar en la Figura 11, el proceso constructivo también requiere pilares vaciados en obra para formar esquinas y paredes intermedias.

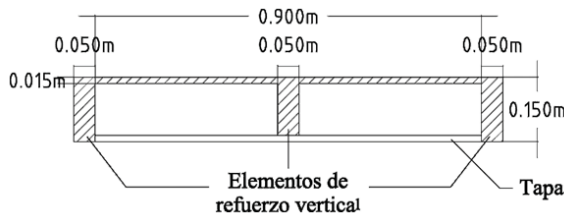


Figura 7. Corte transversal segunda alternativa.

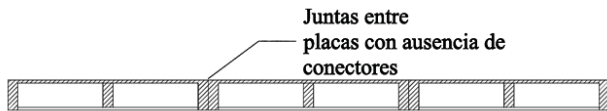


Figura 8. Conexión entre placas en paredes continuas segunda alternativa.

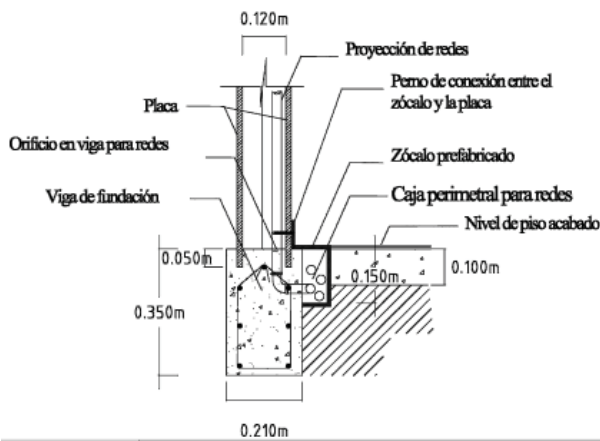


Figura 9. Detalle de viga de fundación.

En la tercera alternativa fue considerada una conexión por medio de “dientes” y pernos, la cual se trata de un sistema machihembrado en los extremos de las placas, en sentido vertical, como se observa en las Figuras 12 y 13. La función de los pernos es unir las tapas de la placa para facilitar el manejo durante el transporte y

la instalación. Los “dientes” van perforados para ser atravesados por una barra de acero durante el montaje, conectando el sistema tanto a la viga de fundación como a la viga de amarre. La Figura 14 muestra las conexiones para la formación de esquinas y de paredes continuas.

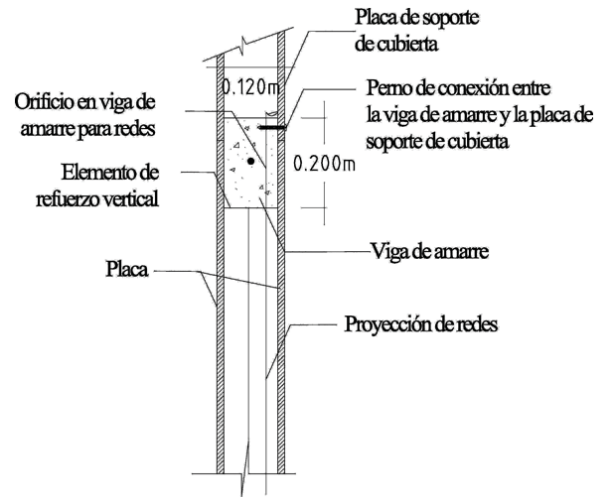


Figura 10. Detalle de viga de amarre.

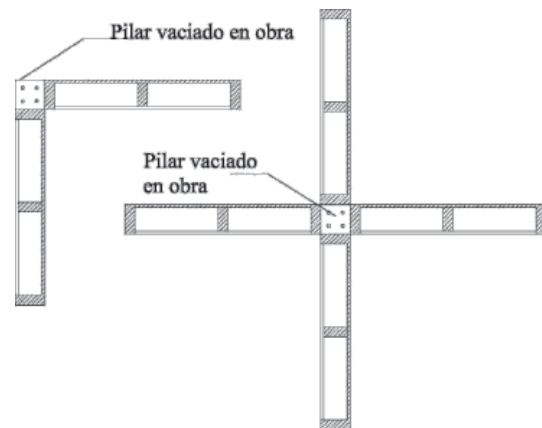


Figura 11. Conexión de placas en esquinas y paredes intermedias segunda alternativa.

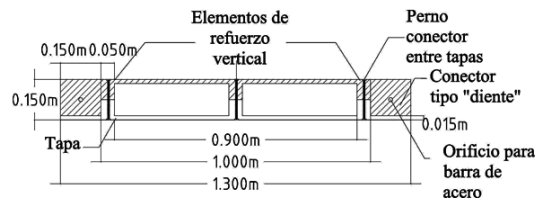


Figura 12. Corte transversal tercera alternativa.

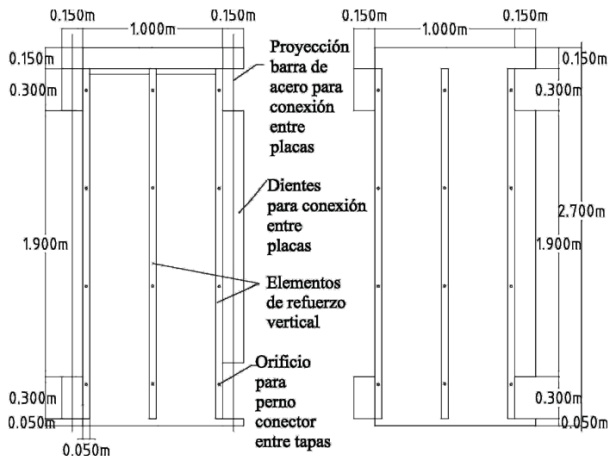


Figura 13. Vista frontal interior placa tercera alternativa: (A) tapa principal; (B) tapa secundaria.

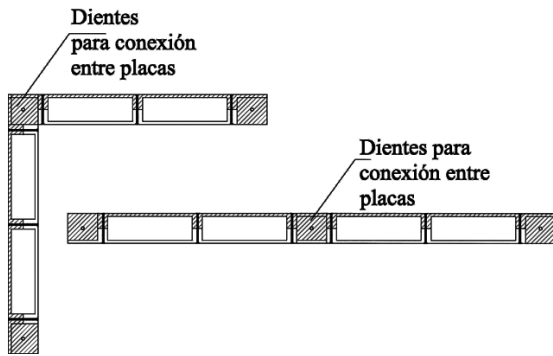


Figura 14. Conexión de placas en esquinas y paredes continuas tercera alternativa.

2.2. Propiedades mecánicas de las tres alternativas de placa

Con la ayuda del software SolidWorks®, se realizó una simulación utilizando el método de elementos finitos aplicado a cada opción de panel de forma individual, para conocer su resistencia y deformación. El software basó la simulación en el cálculo de los esfuerzos de Von Mises, que se resume en la ecuación 1 [14].

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad [1]$$

Donde, σ_1 , σ_2 , e σ_3 , representan las tensiones principales.

Las condiciones de contorno fueron las siguientes:

- Las cargas verticales soportadas por las placas, donde se eligió la que soporta la mayor área de cubierta dentro del diseño de la casa. De acuerdo con la norma [15], tales cargas estuvieron constituidas por el peso de la cubierta en teja de barro, el peso de la viga de amarre en la parte superior de las paredes, el peso propio de la placa, además se asumió un peso de 70 kg/m² sobre la cubierta como carga viva.
- La carga horizontal correspondiente al viento máximo para la región sur de Brasil, de 60km/h, o 16,66 m/s, según las intensidades medidas en el litoral de esta zona [16], ya que constituye una de las zonas con mayor potencial eólico del país [17]. La presión de esta carga equivale aproximadamente a 260N/m², ó 27kg/m², según las ecuaciones 2 y 3, para el cálculo de presión de viento sobre una estructura [14].

$$P = C \cdot q \cdot K \quad [2]$$

Donde,

P = presión del viento sobre la estructura (N/m²);

C = Coeficiente eólico;

q = Presión dinámica del viento (N/m²);

K = Factor eólico de esbeltez (como h/b < 5,

K = 1, siendo h = altura y b = ancho).

Para encontrar la presión dinámica se utilizó la ecuación 3 [14].

$$q = 0,625 \cdot V_s \cdot S_4 \quad [3]$$

Donde,

V_s = velocidad del viento (m/s);

S_4 = Coeficiente de variación en la densidad del aire con la altura sobre el nivel del mar (altitud de 500, $S_4 = 0.94$);

Considerando $C = 1,6$ para paredes en barlovento:

$q = 163,06 \text{ N/m}^2$; $P = 260 \text{ N/m}^2$.

- Fue aplicado el factor de seguridad para cargas vivas y muertas según la norma [15].
- Para cada alternativa de placa, se utilizó el mismo tipo de malla, pero fueron usados diferente número de elementos y nodos, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 1. Además fue considerado el ferrocemento como material homogéneo, para facilitar la formación de la malla dentro del proceso de simulación.

Tabla 1 - Información de la malla para la simulación de las tres alternativas de placa.

	Placa 1° alternativa	Placa 2° alternativa	Placa 3° alternativa
Tipo de Malla	Sólida	Sólida	Sólida
Número de elementos	8259	8258	8240
Número de nodos	16412	16445	16053

- El módulo de elasticidad para el ferrocemento con malla tejida bajo tensión fue de alrededor de 5440 MPa [18].
- El módulo de elasticidad para el ferrocemento con malla tejida bajo compresión fue alrededor de 7600 Mpa [18].
- Fue considerada una densidad de ferrocemento de 2500 kg/m^3 [19].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades mecánicas de las tres alternativas de placa

Los resultados de la evaluación de resistencia a la rotura y la deformación de las tres alternativas de placas tipo sándwich de ferrocemento fueron satisfactorios.

En el diseño de estructuras de ferrocemento, el modelo de diseño por resistencia a la rotura ó resistencia última para compresión, considera $0,85f_c^*$, como la resistencia nominal de las secciones de ferrocemento sometidas a compresión axial [20]. Es decir, que si $f_c^* = 210 \text{ kg/cm}^2$ [15], lo que equivale a $20.580.000 \text{ N/m}^2$, por lo

tanto, la resistencia a la rotura ó resistencia última del ferrocemento sometido a compresión axial para este caso fue de $17.493.000 \text{ N/m}^2$.

Por otra parte, la deformación máxima de una estructura de concreto (se aplica para ferrocemento), no puede ser más de 1,0% de su altura [15], como se puede ver en la Tabla 2. En el caso de este estudio, con una altura de 2700mm para cada alternativa de placa de ferrocemento tipo sándwich, la deformación máxima admisible equivale a 27 mm.

Tabla 2. Desplazamientos máximos como porcentaje de.

Estructuras de:	Deriva máxima
Concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	1,0% ($\Delta_{\text{max}}^i \leq 0.010h_{pi}$)
De mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	0,5% ($\Delta_{\text{max}}^i \leq 0.005h_{pi}$)

En la Figura 15 se pueden observar las regiones de mayor tensión en cada alternativa de placa de acuerdo con el criterio de Von Mises, y sus valores en N/m^2 . En este caso, las partes inferiores de las placas presentan mayor tensión, concentrando los esfuerzos verticales y horizontales combinados. Se puede observar que los valores de esfuerzo máximos de cada alternativa, son mucho menores que el valor de referencia para resistencia a la rotura o resistencia última del ferrocemento, con 7,38% de este en la primera alternativa, 8,7% en la

segunda alternativa y 6, 92% en la tercera.

La Figura 16 muestra las regiones de deformación máxima esperada de cada placa debido a las cargas combinadas producidas por el viento y la estructura. Los valores de deformación son representados en milímetros. En este caso la región más crítica está en la parte superior de las placas, ya que la parte inferior va fijada a la viga de fundación. Como se puede ver, estos valores están por debajo de lo establecido en el valor admisible, con sólo el 6,7% del valor límite en la primera alternativa, el 8,8% en la segunda alternativa y el 6,5% en la tercera alternativa.

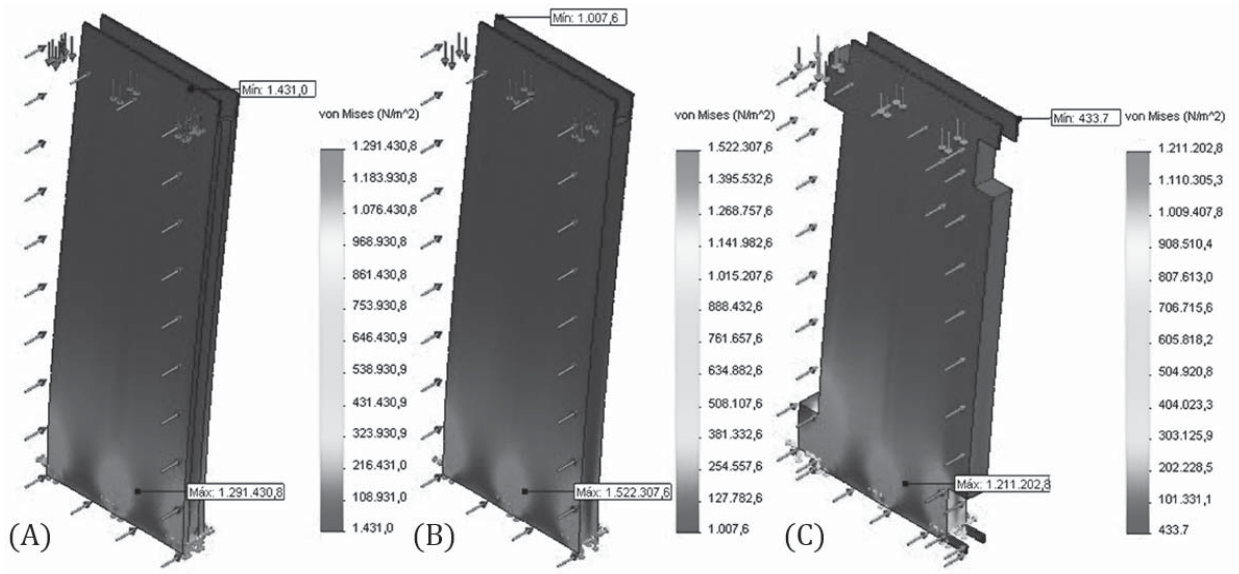


Figura 15. Resistencia última de las tres alternativas de placa, (A) primera alternativa, (B) segunda alternativa, (C) tercera alternativa.

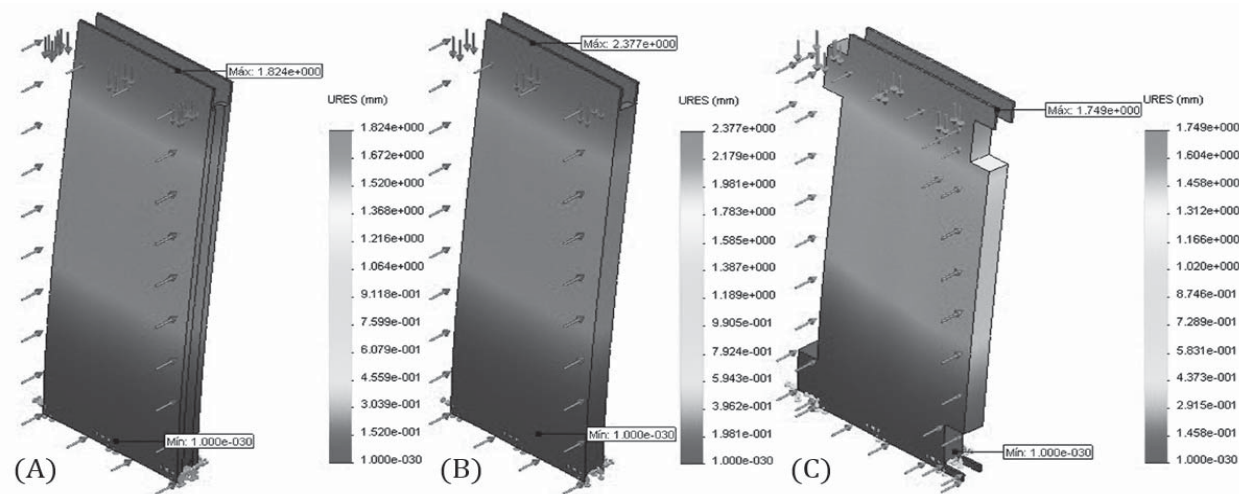


Figura 16. Desplazamiento máximo de las tres alternativas de placa: (A) primera alternativa, (B) segunda alternativa, (C) tercera alternativa.

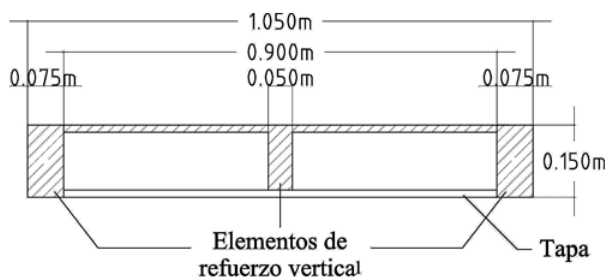
3.2. Definición del sistema de constructivo para la vivienda rural

De acuerdo con los resultados de la simulación, todas las alternativas de placas tipo sándwich de ferrocemento son mecánicamente viables. Esto sugiere que, para definir el sistema constructivo es necesario considerar otros criterios, como los relacionados con la practicidad en la construcción de la vivienda, así como los costos relacionados.

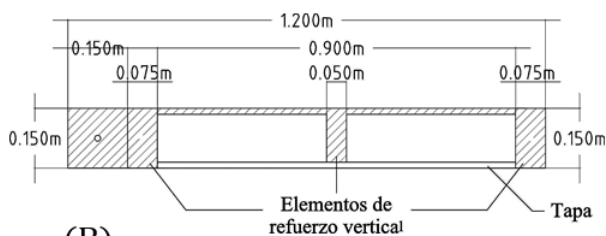
Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada alternativa, se optó por emplear la segunda y la tercera alternativa para la definición del sistema constructivo, mientras la primera alternativa pierde practicidad debido a la cantidad de obras a ejecutar durante el montaje, aumentando tiempos y costos, la segunda y la tercera se complementan, ya que la segunda facilita la prefabricación y montaje, ideal para formar paredes continuas, y la tercera alternativa, debido a sus conectores tipo “dientes”, es especial para la formación

de las esquinas, evitando la construcción de pilares en obra y reforzando estructuralmente los puntos críticos en la vivienda. Sin embargo, la combinación de ambos tipos de panel requiere modificaciones menores:

- En las dimensiones de los elementos de refuerzo vertical (Figura 17), donde la unión de los mismos funciona como puntos receptores y transmisores de cargas a las fundaciones (Figura 18).
- En la tercera alternativa se eliminaron los “dientes” de uno de sus lados, para facilitar la conexión con las placas de la segunda alternativa (Figura 17B).



(A)



(B)

Figura 17. Corte transversal de la placa modificada: (A) segunda alternativa; (B) tercera alternativa.

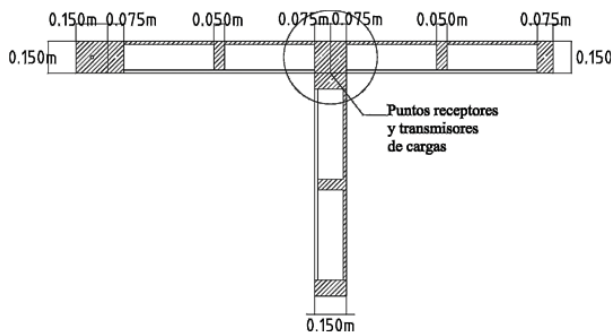


Figura 18. Conexiones de placas con paredes intermedias del sistema constructivo definitivo.

En la Figura 19 se puede observar la ubicación de estos dos tipos de placa en el diseño de la casa

rural, nombrados con las letras A y B, tal y como muestra la Figura 17, la C se utilizó para designar un tipo de placa especial para el baño.

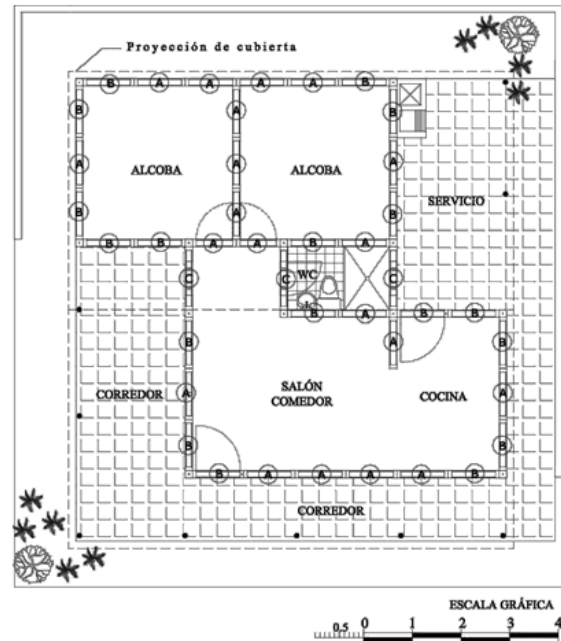


Figura 19. Ubicación de placas en diseño de casa rural.

4. CONCLUSIONES

Las tres alternativas de placas tipo sándwich de ferrocemento estudiadas presentan buenos resultados de resistencia a la rotura y deformación máxima en comparación con los valores admisibles. Sin embargo, de acuerdo con el criterio de practicidad se optó por definir un sistema constructivo para la vivienda rural, que abarca la segunda y la tercera alternativas como complementarias entre sí. Lo que se convierte en una opción válida para sistemas constructivos rurales.

Con el objetivo de minimizar el tiempo de montaje de las placas, así como de evitar daños durante el transporte, se sugiere abandonar la idea de la instalación de los paneles en dos partes, y se propone tratarlos como unidades monolíticas, construyendo primero la parte principal, durante la prefabricación, y a continuación, la construcción de la tapa. De este modo es recomendable hacer el montaje con el uso de maquinaria.

Considerando que las placas tienen un espesor de 150 mm y que los resultados de resistencia y deformación

fueron completamente satisfactorios, es factible sugerir una disminución en el espesor total de las mismas, para reducir su peso y así disminuir el costo y facilitar su proceso constructivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidade Federal de Viçosa, especialmente al Departamento de Ingeniería Agrícola DEA-UFV, al núcleo de investigación en construcciones rurales AMBIAGRO y a la Universidad Nacional de Colombia, y su Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos (DIAA).

REFERENCIAS

- [1] Torres, E., Vega, L. M. y Higuera, C., La dimensión socio espacial de la vivienda rural en la ciudad de México. El caso de la Delegación Milpa Alta. *Revista invi.*, 73, pp. 201-223, 2011.
- [2] Rover, O.J. y Munarini, P. R., A política de habitação rural e o desenvolvimento da agricultura familiar. *Revista Katálysis.*, 13, pp. 260-269, 2010.
- [3] MADR Ministerio de Agricultura Y Desarrollo Rural. “Vivienda Rural Gratis es una Realidad”. República de Colombia. Disponible: http://wsp.presidencia.gov.co/Prensa/2012/Mayo/Paginas/20120503_03.aspx [Citado 8 de noviembre de 2012].
- [4] Saleme, H., Comoglio, S. y Méndez, J. M., Ferrocemento. Un Material Apropriado a Nuestro Medio. CET, Investigación y Desarrollo., 22, pp. 19-24, 2002.
- [5] WALLTECH INTERNACIONAL. “Sistema Walltech – Manual Técnico”. México, 2003.
- [6] CEMENTOS BIO BIO. “Ferrocemento, Viviendas Industrializadas definitivas en hormigón – Manual Técnico”. Santiago de Chile, 2010.
- [7] Trigo, C. C., Pré-fabricados em argamassa armada: material, técnica e desenho de componentes desenvolvidos por Lelé [M. Sc. Tesis]. Universidade de São Paulo-USP, 2009.
- [8] Machado, E. F., Casas Populares Pré-moldadas em Argamassa Armada. Procura de uma Solução Econômica e Confortável [Dr. Sc. Tesis]. Universidade de São Paulo, 1991.
- [9] Bedoya, D. R. y Álvarez, D. B., Comportamiento de viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín.*, 8, pp. 37 - 46, 2009.
- [10] Salas, F. E., Educación e Investigación y Desarrollo en América Latina: Los últimos Treinta Años. *Revista Educación.*, 31, pp. 29-43, 2007.
- [11] Iznaga, A. M. y Braunbeck, O. A., Modelo para Simular el Comportamiento Físico-Mecánico de la Caña de Azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.*, 10, pp. 5-9, 2001.
- [12] Vélez, W., Gómez, D. y Thomson, P., Ajuste de modelos de elementos finitos. *DYNA.*, 158, pp. 177-189, 2009.
- [13] Guerra, L. M., Residência Pré-fabricada de Argamassa Armada como Unidade Básica de Agrovila. [M. Sc. Tesis]. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- [14] Cervera, M. y Blanco, E., Mecánica de Estructuras. Libro 1. Resistencia de Materiales. Barcelona, 2003.
- [15] NSR-10. Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá D.C., 2010.
- [16] Monteiro, M. A., Cardoso, C. De S., Calearo, D. S., Dias, C. De A. O. y Lopez, F. Z., Comportamento do Vento no Litoral Sul do Brasil. *Memorias IV Simposio Internacional de Climatologia.* João Pessoa, Brasil, 2011.
- [17] Feitosa, E. A. N. et al. Panorama do Potencial eólico no Brasil. Brasília: ANEEL, 2003.
- [18] Arif, M., Panka, J. and Surendra, K. K., Mechanical behaviour of ferrocement composites: an experimental Investigation. *Cement & Concrete Composites.*, 21, pp. 301 - 312, 1999.
- [19] Barrientos, C. A., Diseño en Ferrocemento de un Edificio Destinado a Vivienda Social. [M. Sc. Tesis]. Universidad Austral de Chile, 2004.
- [20] Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural (UNATSABAR). Especificaciones técnicas para el diseño de estructuras de ferrocemento. Lima, 2003.