

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE COMPUESTOS A BASE DE DESPERDICIOS DE ORIGEN ORGÁNICO

COMPRESSIVE STRENGTH OF COMPOUNDS WITH WASTES OF ORGANIC ORIGIN

Por / By **Inocente Bojórquez, Ma. Milagrosa Pérez, Fernando Flores Gonzalo Bojórquez**

Resumen

*El propósito de este trabajo fue demostrar los resultados de la resistencia a la compresión de un compuesto de origen orgánico a base de fibras leñosas procedentes de la caoba (*Swietenia macrophylla*), mezcladas exclusivamente con cemento Portland por un lado, y por el otro con cemento Portland y polvo de piedra caliza como agregado, ambas mezclas para usarse en elementos constructivos. El trabajo consistió en el análisis, sobre este tipo de parámetro, de dos grupos de diez muestras secas y diez muestras húmedas cada uno, diferenciados por estar fabricados con los dos tipos de mezclas especificados líneas arriba. Los resultados se muestran a través de dos gráficas de cada uno de los grupos en sus dos modalidades, húmedas y secas; estos resultados reflejaron que los compuestos húmedos a base de fibra y cemento solamente, fueron los que alcanzaron valores más altos. Por lo tanto, estos valores demuestran la posibilidad de la obtención de un material alternativo de origen orgánico, factible de usarse en la construcción de vivienda y, en cuya obtención de materia prima se participe de manera muy activa, en el manejo sustentable de la selva.*

Palabras clave: *Resistencia a la compresión, fibras leñosas, compuestos de origen orgánico, sistemas habitacionales, manejo sustentable de la selva.*

Abstract

*The aim of this work was to demonstrate the compressive strength of a compound of organic origin which contains ligneous fibres from mahogany (*Swietenia machrophylla*). These ligneous fibres were mixed, in the first sample, with Portland cement, and in the other sample with Portland cement and pulverized limestone. Both meant to be used as constructive elements. The work consisted, based on the former strength parameter, of the analysis of two ten-sample groups; one of them dried, the other one humid, both of them were made of the two above mentioned different kinds of mixtures. The results are shown in two graphs of each of the groups; humid or dried. It could then be seen that the humid compounds made out of fibres and cement only, were the ones that reached the highest values. These values then demonstrate the possibility of obtaining an alternative/alternating material of organic origin capable of being used in housing construction. The acquiring of the raw material/for which aids in the handling of the forest/ wouldn't mess with the forest.*

Keywords: *Compressive strenght, Ligneous fibers, composed of organic origin, housing systems, sustainable handling of the forest.*

1. INTRODUCCIÓN

El uso de fibras orgánicas con fines constructivos va de la mano con la historia de la edificación, sin embargo, la aparición de nuevos materiales, a raíz de la evolución industrial, desplazó en gran medida su utilización.

Los diversos trabajos de investigación en el área de aprovechamiento de fibras de origen orgánico para usos habitacionales parten de la premisa de lograr morteros de bajo costo con características físicas y mecánicas suficientes para resistir los esfuerzos y cuya durabilidad compita con los materiales tradicionales, para lo cual el uso de materia prima económica y procesos simplificados de fabricación de mezclas conjuntamente con la producción de elementos constructivos más acordes con las posibilidades de industrialización de la región surge como uno de los grandes retos. Trabajos anteriores han demostrado su



factibilidad, aunque los procesos de preparación de las mezclas hayan sido diferentes; éstos productos ya han demostrado su eficacia sobre todo en aquellas zonas en donde la madera ha sido el material tradicional de construcción Shao y Moras (2000); en el caso específico que nos compete, como zona ubicada en área selvática en donde los desperdicios de madera llegan a calcularse en 10,000m³ aproximadamente, y en donde la madera fue durante mucho tiempo, el material tradicional en la construcción de vivienda, se busca la posibilidad de utilizar un sustituto de ésta, de bajo costo, capaz de resistir los embates del intemperismo, que proporcione confort a sus ocupantes y que en cuya obtención de materia prima se participe en el manejo sustentable de la selva.

Para el proceso de fabricación de los compuestos se pensó en un método sencillo que no representara gran erogación económica, ni que los productos remanentes conllevaran problemas que impactaran negativamente al ambiente, semejante más bien, al empleado en la obtención de concretos. Se descartaron algunas de los sistemas ya probados con anterioridad como el Hatschek (Kurpiel, 1997), debido a la gran cantidad de agua requerida y a la solución para el tratamiento de residuos.

En este trabajo sólo se discuten los resultados de la resistencia a la compresión, producto de la interacción entre las variables cemento/fibra y agua/cemento, en compuestos fabricados con cemento Portland tipo I, adicionado con fibras provenientes de la caoba (*Swietenia macrophylla*), de igual forma y a manera de justificación de los beneficios adicionales del aprovechamiento de residuos de origen orgánico, se hace una revisión de sus comportamientos térmicos con el objeto de avanzar en el análisis de la eficiencia energética que permitirá visualizar sobre el ahorro de energía que conlleva el uso de este tipo de materiales, rematando, a manera de colofón, en un comparativo entre costos de muros construidos con materiales de uso común en esta región del sureste mexicano. No se tocan los procesos de producción.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Resistencia a la Compresión

Con el propósito de lograr un compuesto inorgánico-orgánico con fibras integradas al azar a una matriz aglutinante que alcanzara valores del orden de 20 Mpa en cuanto a la resistencia a la compresión, se definieron cuatro tipos de dosificaciones, como se especifican más adelante, fundamentadas en las experiencias desarrolladas (Bizzotto et al., 1997), con la cascarilla de arroz; Shao (Shao et al., 2000), con las fibras de madera blanda y dura; y por Paul y Pama (1992) con el ferrocemento. Para ello se utilizó un modelo multitabla en un hexágono (Acevedo, 1999), como aparece en la Figura 1, cuya particularidad consiste en que la primera variable, correspondiente al contenido en peso de las fibras con respecto al cemento, se varía en cinco niveles, mientras que la segunda, correspondiente a la relación agua/cemento en las mismas unidades, se varía en tres; gráficamente los puntos experimentales están en los vértices y en el centro del cuerpo geométrico; para analizar los efectos de interacción se consideró un modelo de segundo grado tal como:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

Se trabajaron dos grupos conformados por diez muestras húmedas y diez muestras secas cada uno de ellos; en el primero de ellos, Grupo 1: la mezcla consistió en cemento Portland y fibra de caoba exclusivamente, como se aprecia en la Tabla 1, mientras que en el segundo, Grupo 2: se adicionó el polvo de piedra caliza como agregado, cuya proporción en peso con el cemento permaneció constante en 1:2, como se especifica en la Tabla 2; el único aditivo utilizado en ambos grupos fue el silicato de sodio como agente mineralizador; las fibras secas se obtuvieron después de someter la fibras húmedas (fibras bajo techo expuestas a condiciones normales de temperatura) en un horno a una temperatura de 105° C durante 24 horas.



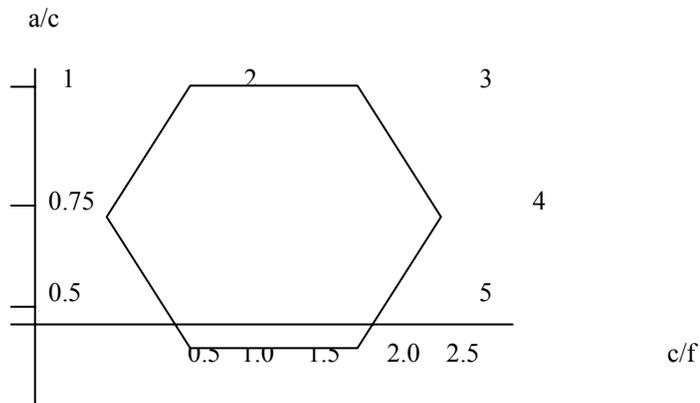


Figura 1. Modelo de hexágono. Cada uno de los vértices define el tipo de dosificación; el centroide define las dosificaciones 7, 8, 9 y 10 caracterizadas por la relación a/c: 0.75 y c/f: 1.5

Tabla 1. Dosificación de las mezclas del Grupo 1 (compuestos sin agregado)

Dosificaciones			
Muestra	Cemento	Relación cemento/fibra (x1)	Relación agua/cemento (x2)
1	1	0.5	0.75
2	1	1.0	1.0
3	1	2.0	1.0
4	1	2.5	0.75
5	1	2.0	0.5
6	1	1.0	0.5
7	1	1.5	0.75
8	1	1.5	0.75
9	1	1.5	0.75
10	1	1.5	0.75

Tabla 2. Dosificación de las mezclas del Grupo 2 (compuestos con agregado)

Dosificaciones				
Muestra	Cemento	Agregado	Relación cemento/fibra (x1)	Relación a/c (x2)
1	1	2	0.5	0.75
2	1	2	1.0	1.0
3	1	2	2.0	1.0
4	1	2	2.5	0.75
5	1	2	2.0	0.5
6	1	2	1.0	0.5
7	1	2	1.5	0.75
8	1	2	1.5	0.75
9	1	2	1.5	0.75
10	1	2	1.5	0.75



La caracterización del agregado se especifica en la Tabla 3 y fue analizado en laboratorio de acuerdo a la Norma ASTM C 136-01. El cemento utilizado es tipo I CPC 30 R, de acuerdo a la Norma NMX-C-414-ONNCCE-1999; la fibra utilizada es producto del corte del aserrio de la caoba (*Swietenia macrophylla*), su tamaño máximo es de 2 mm y su densidad es de 0.97 gr/cm³.

Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado

MALLA	% QUE PASA	
	OBTENIDO	ESPECIFICADO ASTM C 133
3/8	100	100
4	99	95-100
8	82	80-100
16	51	50-85
30	32	25-60
50	20	10-30
100	10	2-10
MODULO DE FINURA	3.1	2.3 a 3.1

Peso Unitario Suelto (ASTM C 29)¹ 1,478 kg/m³

Densidad: 2.44 kg/m³

% de absorción: 2.2.

Para la fabricación de los especímenes de prueba, se partió de las recomendaciones del ACI 211.1, "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete"; la fabricación de las probetas fue de acuerdo a las normas ASTM C 192, para pruebas de compresión y flexión; y el tiempo de mezclado se realizó en base a la norma ASTM C 94. Las pruebas a compresión se hicieron en base a la norma ASTM C 349 97, y la presión aplicada a cada uno de los especímenes fue de 20 ton. durante 4 horas; después de ello, se mantuvieron en el molde por 24 horas para después dejarlos en condiciones naturales hasta su tiempo de prueba.

Para obtener el valor ajustado de las pruebas de compresión a los 28 días, se utilizó el software SPSS 9.0 (Software Sistema para Estadística en su versión 9.0 para Windows), por medio del cual se obtuvieron las ecuaciones de segundo grado ajustadas por mínimos cuadrados a cada uno de los tipos de muestras como en seguida se detallan,

A) Grupo 1

MUESTRAS HÚMEDAS

$$Y = 88.01 - 26.70 X_1 - 107.84 X_2 - 2.61 X_1^2 + 19.79 X_2^2 + 46.62 X_1 X_2$$



Muestras Secas

$$Y = 19.93 - 12.01X_1 + 39.25X_2 - 6.96X_1^2 - 77.02X_2^2 + 49.6 X_1X_2$$

b) Grupo 2

Muestras Húmedas

$$Y = 34.48 - 12.26X_1 - 6.63X_2 + 0.99 X_1^2 - 1.00X_2^2 + 5.29X_1X_2$$

Muestras Secas

$$Y = 35.07 - 9.48X_1 - 28.87X_2 - 0.26X_1^2 + 21.66X_2^2 + 4.46X_1X_2$$

Los coeficientes de determinación (R^2) para cada una de las muestras son las siguientes:

Muestras húmedas del Grupo 1: 0.95142

Muestras secas del Grupo 1: 0.80613

Muestras húmedas del Grupo 2: 0.86614

Muestras secas del Grupo 2: 0.99287

Sustituyendo los valores de X_1 y X_2 , se obtienen los resultados mostrados gráficamente en la Figura 2 para las muestras húmedas y secas del Grupo 1, mientras que en la Figura 3 se reflejan los valores correspondientes a las pertenecientes al Grupo 2.

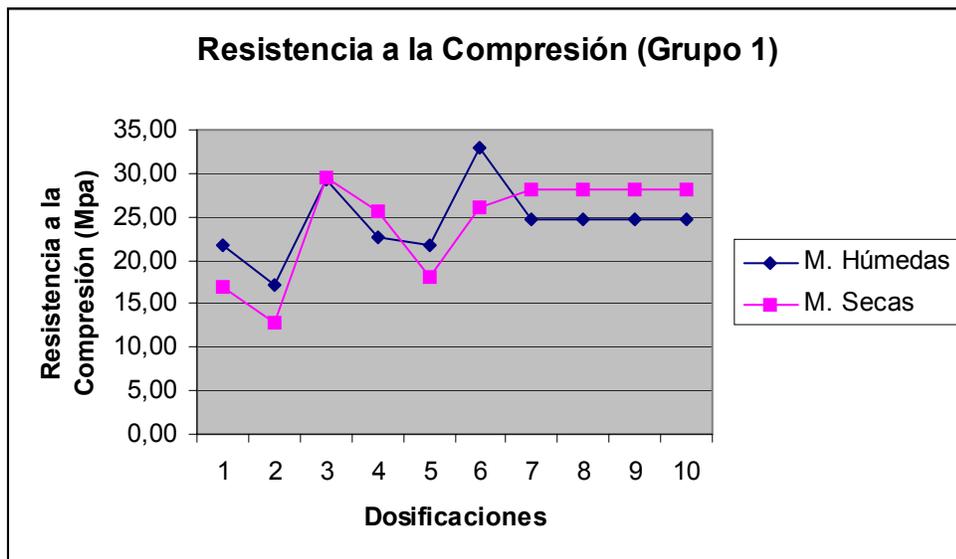


Figura 2. Resistencia a la compresión de las muestras del Grupo 1



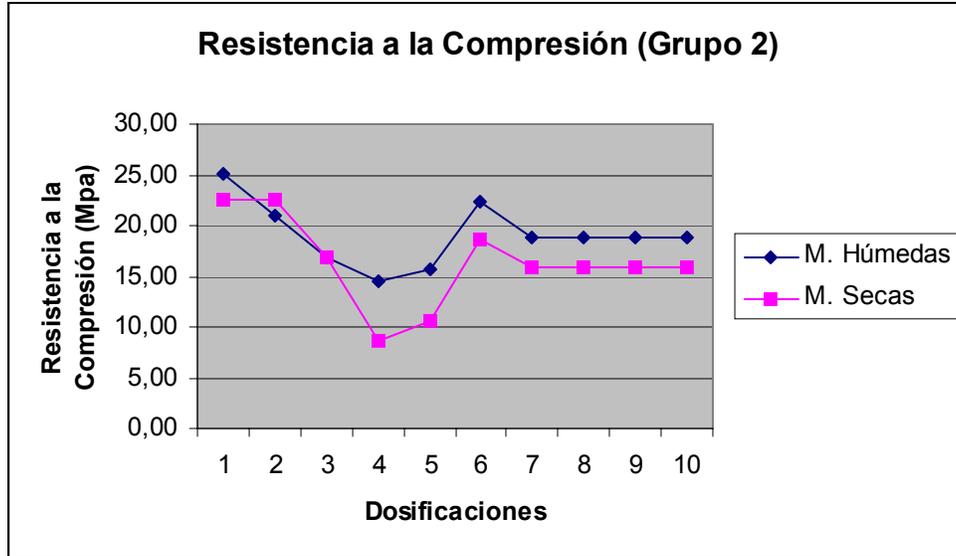


Figura 3. Resistencia a la Compresión de Muestras del Grupo 2

2.2 Conductividad Térmica

Siguiendo con lo expresado en la parte introductoria de este trabajo, otro de los objetivos es la obtención de un material de origen orgánico de baja conductividad térmica (k); el análisis se realizó a través de un conductímetro de pruebas de placa caliente (Llovera, 2002)os resultados se determinaron con la ecuación de Fourier modificada (ASTM C 518 91).

$$K_{prom} = Q(L_1 + L_2)/2A (\Delta T_1 + \Delta T_2) \quad (2)$$

Donde:

- Q = Calor suministrado (W/m°C)
- L₁, L₂ = Espesores de cada espécimen (m)
- A = Área del espécimen (m²)
- ΔT₁, ΔT₂ = Diferencial de temperaturas entre especímenes (°C)

Para este análisis se tomaron dos muestras iguales de la dosificación 6 del Grupo 1, las cuales se colocaron entre las placas caliente y fría del conductímetro de pruebas y después de un monitoreo en intervalos de 10 a 15 minutos durante cuatro corridas, como se especifica en la Tabla 4, se llegó a los resultados tanto en lo experimental como en lo matemático como se especifica en la Tabla 5.

Tabla 4. Parámetros considerados para la obtención de los valores de “k”

Corrida	Tiempo (minutos)	Voltaje (Volts)	Corriente (Amperes)
1	680	4.6	0.5
2	600	13.1	1.0
3	630	14.2	1.5
4	405	18.7	2.0

Tabla 5. Análisis experimental y matemático de las muestras de la dosificación 6 del Grupo 1



Corrida	Temperatura de Prueba (°C)	k_{prom} (W/m°C)		R (M ² °C/W)
		Análisis Experimental	Análisis Matemático	
1	27.28	0.242991	0.254824	8.512157
2	33.51	0.285684	0.273239	7.240610
3	43.88	0.308085	0.303904	6.713673
4	57.70	0.339877	0.344752	6.085673

La ecuación obtenida por regresión lineal fué:

$$k_{prom} = 0.0029557 T_{prueba} + 0.174193 \quad (3)$$

EL VALOR DE LA RESISTENCIA TÉRMICA (R) SE OBTUVO DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C 177 97

$$R = L/k A$$

Donde:

L = Espesor promedio del espécimen (m)

k = Conductividad térmica (W/m°C)

A = Area del espécimen (m²)

Posterior a esto, se comparó el comportamiento térmico de estos compuestos con otros materiales utilizados en la construcción de muros para vivienda, como fueron el bloque de concreto, el ladrillo de barro y el adobe (Bojórquez et al., 2002); para ello se utilizó un simulador Doeplus 2.0 (Software Simulador Doeplus versión 2.0 doe-2. 1e), aplicado a una vivienda de interés social de 42.94 m² de superficie total en la cual se consideraron las cargas térmicas totales, el cambio de aire por hora (1.6), una absorptancia de 0.70, una rugosidad de 3 y una reflectancia del suelo de 0.20 (valores promedio recomendados por el simulador). Los resultados obtenidos de la carga térmica por tipo de material y elemento constructivo se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Carga térmica por tipo de material y elemento constructivo

Tipo de Flujo y Elemento	Tipo de material			
	Bloque de concreto	Ladrillo de barro	Adobe	Bloque de Fibras leñosas
Conducción en muros	3.123	2.786	1.886	1.033
Conducción por cubierta (techumbre)	0.992	1.009	0.978	0.985
Conducción por piso	0.508	0.516	0.523	0.536
Carga por iluminación al espacio	0.204	0.206	0.207	0.208
Carga por ocupantes al espacio	0.089	0.091	0.091	0.093
Infiltración	0.617	0.617	0.925	0.925
Total	5.444	5.134	4.519	3.687

La diferencia de cargas térmicas por conducción en muros entre el bloque a base de fibras leñosas y el resto de materiales es de 67% con respecto al bloque de concreto, 63 % con respecto al ladrillo de barro y 45% con respecto al adobe.



2.3 Costos de Muros

El tercer factor a considerar es el referente al costo de la implementación de muros utilizando elementos construidos a base del material en estudio; se consideró para este caso un panel de 1.22 x 2.44 m de sección, semejante en medidas a uno a base de tablarroca y a otro fabricado con una estructura tridimensional de acero de alta resistencia con alma de poliestireno (Qualy Panel), que sirvieron como base comparativa, conjuntamente con un muro construido con block de concreto de 15 x 20 x 40 cm de sección.

Para el caso del panel a base de fibras leñosas se consideró el volumen y el precio de los materiales necesarios para la fabricación de un panel de las medidas arriba especificadas, utilizando la mezcla de la muestra húmeda del vértice 6 del Grupo 1, como se aprecia en la Tabla 7; con respecto a los otros dos y al muro de block de concreto, se consideró el precio de mercado.

La unidad utilizada fue el M2 y la moneda fue el dólar americano.

Tabla 7. Costos de muestras del grupo 1

MTRA. No.	COSTO POR MTRA.	VOLUMEN MUESTRA (m ³)			COSTO/m ³	COSTO PANEL
		DIÁMETRO	ALTURA	VOL.(m ³)		
IVH-1	\$ 0,18	0,10180	0,13560	0,001104	\$ 163.06	\$ 4,0
IVH-2	\$ 0,14	0,10200	0,13460	0,001100	\$ 125.47	\$ 3,1
IVH-3	\$ 0,06	0,10170	0,09940	0,000807	\$ 74.34	\$ 1,8
IVH-4	\$ 0,04	0,10180	0,07210	0,000587	\$ 66.46	\$ 1,6
IVH-5	\$ 0,06	0,10160	0,07680	0,000623	\$ 96.39	\$ 2,4
IVH-6	\$ 0,11	0,10170	0,09500	0,000772	\$ 142.48	\$ 3,5
IVH-7,8,9,10	\$ 0,07	0,10180	0,09938	0,000809	\$ 86.52	\$ 2,1

La tabla 8 proporciona una base comparativa de costos entre los cuatro diferentes materiales referidos anteriormente.

Tabla 8. Comparativa de costos entre diferentes tipos de muros

TIPO DE MURO	COSTO/M2 (USD)
Fibras leñosas (Incluye Mano de obra para fabricación de panel)	4.70
Tablarroca	25.00
Qualy Panel	22.00
Block de concreto	7.33

3. RESULTADOS

La búsqueda de materiales alternos que coadyuven en el abaratamiento de la construcción de vivienda es una constante en los países en vías de desarrollo; el manejo sustentable de los recursos naturales debe ser parte de la lucha para lograr una integración entre vivienda y naturaleza, por lo que de los resultados mostrados en las líneas precedentes, se puede opinar lo siguiente:

1. La obtención final de las proporciones y procedimientos de las mezclas utilizadas en este trabajo, se debió a ensayos previos fundamentados tanto en las experiencias con fibras de distinta procedencia desarrolladas por investigadores en el área de materiales alternos como en las recomendaciones para la fabricación de concretos; este punto de partida llevó a la determinación de la conveniencia de trabajar sobre dos posibles grupos de compuestos: los que no contemplara ningún agregado granular y los que sí deberían de considerarlo; para los primeros se manejó la idea de lograr materiales de baja



densidad, mientras que para los segundos prevaleció el criterio del costo debido a la reducción del cemento en el volumen total del compuesto. Ambos grupos presentaron al principio problemas de trabajabilidad debido a la presencia de grumos; el sistema de mezclado fue la solución. Ambos grupos presentaron la inconveniencia de utilizar sólo fibras secas debido al costo y tiempo adicionales en la fabricación de las mezclas, por lo que se decidió utilizar también fibras sin secar dando los resultados mostrados a través de las Figuras 2 y 3. Con una relación a/c entre el 25 y el 50 por ciento con respecto a la relación c/f se logran los resultados deseados para el caso del Grupo 1. Para el caso del Grupo 2, esta relación anda alrededor del 50 %.

2. Es conveniente reducir tanto el tiempo de aplicación de la presión como la presión misma, debido a que puede representar un serio problema en el costo de la producción de los elementos.
3. Para la selección del modelo de regresión, se usó el paquete computacional SPSS 9.0, los valores de R^2 para cada una de las muestras demuestran la adecuación del mismo; con los valores ajustados de Y, se trazaron las gráficas de las Figuras 2 y 3.
4. La baja conductividad térmica (k) y la respuesta obtenida a través de un paquete de simulación, nos permiten asegurar que los elementos construidos con estos materiales guardan buen comportamiento en su estado dinámico, lo cual conlleva al ahorro de energía puesto que el máximo enfriamiento requerido es menor en un 10.94% con respecto al bloque de concreto.
5. Finalmente se sostiene la tesis de que un estudio de materiales que no contemple un análisis de costo, es un trabajo encaminado a quedarse en el escritorio, ya que sin éste no es posible definir adecuadamente el sistema constructivo. Los datos arrojados en la Tabla 7, nos obligan a considerar que el elemento a usar debe ser un sistema a base de panel, aunque es recomendable la implementación de un sistema híbrido debido a la poca respuesta estructural de estos componentes.

4. REFERENCIAS

- ACEVEDO, J. (1999), *Tres Décadas de Trabajo en el Desarrollo Sostenible de la Construcción*. Tesis Presentada con Opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudios de la Construcción y de Arquitectura Tropical. Cuba
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (1991), ASTM C 518 *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (1997) ASTM C 177 “*Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission*”
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (1997), ASTM C349 “*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortar*”
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (2001), ASTM C 136 “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*”
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (1997) ASTM C 29 “*Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*”
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE 2001, ACI 211 *Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete*
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (2002), ASTM C 192 “*Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*”
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING Y MATERIALS (2003), ASTM C 94 “*Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*”
- BOJÓRQUEZ, G., LUNA, A., y GALLEGOS, R. (2002), *Simulación de Comportamiento Térmico de Materiales Constructivos a base de Fibras Leñosas*. En Memorias de la 26 Semana Nacional de Energía Solar, México
- BIZZOTTO, M., NATALINI, M., GÓMEZ, B., y MÁXIMO, G. (1997), *Minihormigones con Cascarilla de Arroz Natural y Tratada como Agregado Granular*. Trabajo presentado en el Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur. Argentina.



- LLOVERA, A. (2002), *Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas de Conductividad Térmica para Materiales empleados en Sistemas Constructivos*. Tesis presentada con Opción al Grado de Ingeniero en Sistemas de Energía. Universidad de Quintana Roo, México.
- NORMA NMX-C-414-ONNCCE-1999. Industria de la Construcción. Norma Mexicana (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación) y las recomendaciones para sus usos y aplicaciones.
- PAUL, B.K., y PAMA, R.P. (1992), *Ferrocemento*. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C., México.
- KURPIEL, F. (1997), *Diffusion of cellulose fibre-cement siding and roofing into North America*. The Forest Product Society. Vol. 5, pp 41-44. Edit. AA. Moslemi, USA.
- SHAO, Y., MORAS, S., ULKEM, N., y KUBES, G. (2000), *Wood Fibre-cement Composites by Extrusion*. Can. J. Civil Eng. Vol. 27, pp 543-552.



Inocente Bojórquez
Profesor Investigador
Universidad Quintana Roo
México

Research Associate
Universidad Quintana Roo
Mexico
bojor@correo.uroo.mx

Ma. Milagrosa Pérez
Profesor Investigador
Universidad Autónoma de Yucatán
México

Research Associate
Universidad Autónoma de Yucatán
Mexico

Fernando Flores
Profesor Investigador
Universidad Quintana Roo
México

Research Associate
Universidad Quintana Roo
Mexico

Gonzalo Bojórquez
Profesor Investigador
Universidad Autónoma de Baja California

Research Associate
Universidad Autónoma de Baja California



