

METODOLOGÍA DE DISEÑO SIMPLIFICADO PARA EDIFICACIONES DE BAJA ALTURA A BASE DE MUROS PREFABRICADOS DE BAHAREQUE ENCEMENTADO DE BAMBÚ

Verónica María Correa Giraldo ⁽¹⁾, Amador Terán Gilmore ⁽²⁾, Miguel Ángel Pedraza Álvarez ⁽³⁾

¹ Kaltia Consultoría y Proyectos. Tercera Cerrada de bahía 178, Ampliación Las Águilas, Álvaro Obregón, Ciudad de México, C. P. 01759, veronica@kaltia.com.mx

² Universidad Autónoma Metropolitana – UAM. Ciudad de México, atergil@gmail.com

³ Kaltia Consultoría y Proyectos. Tercera Cerrada de bahía 178, Ampliación Las Águilas, Álvaro Obregón, Ciudad de México, C. P. 01759, miguel@kaltia.com.mx

V. Métodos y tecnologías sismo resistentes innovadoras en la práctica profesional

RESUMEN

El presente trabajo propone una metodología de diseño sísmico simplificado para edificaciones construidas a base de muros de bahareque encementado y entrepisos ligeros de madera o bambú, a partir de los valores de diseño y el modelo de comportamiento obtenidos gracias al análisis de diferentes ensayos de laboratorio (incluyendo el ensayo de un edificio a escala real bajo un protocolo de carga lateral reversible representativa de un evento sísmico), cuyos resultados se presentan en un trabajo previo de los autores (Correa *et. al.*, 2021).

Se parte de las metodologías normativas que presentan el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – Título E. Casas de Uno y Dos Pisos (NSR-10, Título E, 2010), y la Norma Andina para Diseño y Construcción de Casas de Uno y Dos Pisos en Bahareque Encementado (INBAR, 2015); se complementa, aclara y mejora el tratamiento sísmico propuesto en dichos documentos, gracias al modelo de comportamiento sísmico y otros parámetros propuestos, tales como el factor de sobre resistencia, el factor de comportamiento sísmico y el amortiguamiento.

La innovación más destacada de la metodología se refiere a la forma simplificada de la obtención de la rigidez elástica de sistema estructura, que de manera racional relaciona la rigidez axial proporcionada por las diagonales de acero con la rigidez global del sistema.

Se presenta un ejemplo de diseño siguiendo los pasos de la metodología descrita, para fines didácticos y de claridad.

Trabajos futuros se enfocan en el desarrollo de herramientas de análisis y diseño de los componentes del sistema estructural, buscando facilitar el proceso de diseño y la adopción masiva de esta tecnología por profesionales curiosos e interesados por ampliar su conocimiento en torno al uso de materiales y técnicas constructivas de vivienda que sean más sustentables y resilientes.

1 INTRODUCCIÓN

El bahareque encementado es una forma constructiva vernácula mejorada, que utiliza el sistema estructural y tradicional del bahareque y lo mejora por medio de materiales, conocimiento y técnicas constructivas modernas¹.

El bahareque encementado ha sido utilizado exitosamente en varios países alrededor del mundo, incluyendo: Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador y Filipinas. Cuando se diseña y construye correctamente, ha demostrado que puede ser usado para vivienda asequible, segura, durable y resistente a las amenazas ambientales. El bahareque encementado tiene un potencial importante en muchos países del mundo en los que crezca el bambú y es particularmente apropiado para unidades de vivienda de uno y dos pisos.

Distintos estudios han demostrado que el bahareque encementado es ambientalmente superior a otros sistemas de vivienda, como por ejemplo la mampostería de cemento, pues tiene el 50% del carbono incorporado y la posibilidad de ser construido en buena medida con materiales naturales altamente renovables, como el bambú. Su sostenibilidad se puede maximizar al asegurarse de que el bambú y la madera usados se obtengan de fuentes sostenibles y locales, minimizando el espesor del mortero de cemento, y maximizando el uso de sustitutos de cemento como la cal. Cuando sea posible, preservantes químicos no tóxicos se deben usar para tratar la madera y el bambú.

La vivienda de bahareque encementado es un tipo de vivienda durable, alcanzando a través de buenas prácticas de diseño y construcción, una vida de diseño superior a 50 años. Para ello, es importante referirse a estándares de diseño y construcción, tales como la ISO 22156:2021 Bamboo culms - Structural Design, o la Norma Andina para Diseño y Construcción de Casas de Uno y Dos Pisos en Bahareque Encementado² por citar las normas más recientes.

El bahareque encementado provee una forma conveniente de proteger del fuego al bambú y a la madera, que son combustibles. Usar un revoque de 15mm de mortero de cemento provee una resistencia mínima al fuego de 15 minutos. Incrementarlo a 25mm puede proveer 30 minutos de resistencia al fuego. No todos los muros en una vivienda unifamiliar requieren poseer resistencia al fuego, sin embargo, una resistencia al fuego mínima es generalmente recomendable¹.

La vivienda de bahareque encementado es un sistema estructural resiliente cuando es diseñado para resistir sismos y huracanes de alta intensidad. El esqueleto, la matriz y el revoque de mortero de cemento han demostrado comportarse como un sistema al cortante sísmico. El sistema debe diseñarse para que la transferencia de las cargas gravitacionales y horizontales sea simple y continua. Buenas prácticas constructivas garantizan que el comportamiento del sistema sea el esperado por el diseño.

La vivienda de bahareque encementado es segura de construir y utiliza químicos no tóxicos. Se ha demostrado que puede ser construida por los propios beneficiarios con mecanismos basados en asistencia técnica básica. No requiere mucho mantenimiento y ha demostrado ser muy popular con beneficiarios en muchos estudios. Puede brindar una vivienda higiénica, segura, durable y térmicamente comfortable

¹ Kaminsky *et. al.* (2016)

² López (2015)

2 LA VIVIENDA DE BAHAREQUE DE BAMBÚ

A continuación, se citan de manera resumida los casos de construcción de vivienda con bambú con mayor relevancia en el mundo.

2.1 Vivienda vernácula de bahareque

En Latinoamérica existen variadas técnicas para la construcción y el uso del bahareque, una descripción resumida se encuentra descrita por Correa Giraldo *et. al.* (2014) y ampliamente discutida por Muñoz Robledo (2010). En Colombia se encuentra evidencia de viviendas construidas con bahareque de tierra, que a la fecha cuentan con más de 150 años y permanecen en condiciones de serviciabilidad, pese a que muchas de ellas están ubicadas en zonas de alta incidencia sísmica (ver figura 1).

En México, el uso del bahareque (o bajareque) se ha encontrado en los estados de Veracruz, Jalisco (CONAFOR, 2002), Oaxaca, Colima, San Luis Potosí, Jalisco y en regiones del Centro y Sureste del territorio del país (Torres, 2000). Con variantes que usan madera, tierra, carrizo y bambú.



Figura 1. Viviendas de Bahareque de tierra en Colombia³

2.2 Proyecto Bambusa en Colombia

La construcción con bambú en Colombia que aún se conserva, data de los siglos XVIII y XIX, cuando se fundaron más de mil pueblos en la zona del eje cafetero, lugar donde abunda de manera natural la especie *Guadua angustifolia*. Actualmente el 40% de la población de los estados de dicha zona, vive en vivienda construida con bambú (ver Figura 2. Proyecto “Bambusa” en Colombia).

³ Foto tomada por la autora principal (Salento, Quindío, Colombia).



Figura 2. Proyecto “Bambusa” para la reconstrucción de Armenia⁴

Después del sismo de Armenia en 1999, de 6.2 grados Richter y a una profundidad de 17 Km, más de 1,900 muertos y cientos de viviendas colapsadas (aproximadamente 200,000 personas perdieron su vivienda⁵), *los profesionales de la construcción detectaron el superior comportamiento de las viviendas construidas con el sistema tradicional del bahareque de guadua (bambú) comparado con los sistemas a base de mampostería no reforzada*. Fue así como, además del impulso a la construcción con guadua, mediante la generación del Manual de Construcción Sismorresistente de Viviendas de Bahareque Encementado⁶, basado en diferentes estudios arquitectónicos y estructurales de años recientes; se trabajó en varios proyectos de reconstrucción, entre los cuales se destaca el proyecto “Bambusa” que constó de la construcción de 80 viviendas de dos niveles, con apoyo de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos, por sus siglas en inglés USAID y la Cámara de Comercio de Armenia.

2.3 Proyecto Nacional de Bambú en Costa Rica

El *Proyecto Nacional de Bambú (PNB)* que comenzó en 1986 y duró aproximadamente una década, tuvo un enfoque tecnológico de prevención a la deforestación en Costa Rica. Se buscaba sustituir el empleo de la madera por otro material de construcción alternativo, económico y adecuado para una zona sísmica. Este proyecto se realizó en tres fases. La fase preparatoria fue un proyecto piloto que recogió experiencias transmitidas desde Colombia y Ecuador. En las dos fases siguientes se desarrolló un programa intensivo de construcción de áreas rurales, incluyendo capacitación técnica, cultivos masivos de bambú, organización de la comunidad y de los trabajos, y asesoría ambiental en tecnología y producción de muebles y artesanía para la exportación. El proyecto perseguía la utilización sostenible del bambú como material de base para la

⁴ Fuentes, C. y Marcó, J., “Proyecto de viviendas de interés social de bahareque encementado para el municipio de Villamaría, Caldas”, Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.

⁵ Cardona O.D., “*Terremoto de Armenia, Colombia, enero 25 de 1999*”, Revista de Ingeniería Sísmica No. 60, 21-42, Colombia, 1999.

⁶https://reconstruir.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/manual_construccion_bahareque_encementado_ais.pdf

realización de un programa de vivienda de interés social y para la industrialización y comercialización de los productos complementarios. En julio 1995 se estableció la *Fundación del Bambú (FUNBAMBU)* para asesorar y hacerse cargo del programa en su conjunto, asegurando su viabilidad. Se lograron construir casi 3,000 casas y el cultivo de 350 hectáreas de bambú, construyendo infraestructura para una capacidad instalada para la construcción de 2.500 viviendas por año.

Cabe mencionar que, gracias a este proyecto, Costa Rica fue incluida en la lista de honor de HABITAT, en el año 1991, premio otorgado por la *Building and Social Housing Foundation*.



Figura 3. Vivienda del proyecto Nacional de Bambú⁷

2.4 Proyecto Base Bahay en Filipinas

Esta iniciativa de construcción de bambú fundada en 2013 tiene como objetivo contrarrestar la escasez de viviendas en Filipinas, donde aproximadamente 1.5 millones de familias carecen de viviendas asequibles. El bambú es una solución ideal: el material es mucho más ecológico que acero y hormigón, y las casas tienden a tener una resistencia mucho mayor a desastres naturales, como terremotos y tifones. Además, Base Bahay también crea empleos para la población local.

Las casas de bambú son simples y pueden ser de uno o dos niveles. Los tallos de bambú son visibles solo desde el interior de la casa, el exterior está terminado con un acabado encementado. El costo de la vivienda es de aproximadamente € 5,000, de los cuales los residentes deben hacer un anticipo de unos 300 €. El resto se paga en cuotas a plazos acordes con la capacidad de los dueños, y con el plan de apoyos que exista. Actualmente el socio principal de este proyecto es Habitat for Humanity.

Múltiples estudios se han desarrollado para comprobar la eficiencia estructural de las viviendas, pero la muestra más certera de su capacidad estructural es que las más de 1000 viviendas actualmente, todas ellas han resistido los frecuentes huracanes que anualmente asechan el archipiélago de Filipinas.

Cabe resaltar que el proyecto recientemente ha obtenido la acreditación para tecnologías innovadoras de vivienda y con ello, será un paso importante para su objetivo de construir 2,000 viviendas a partir del 2022.

⁷ Fotografía propia

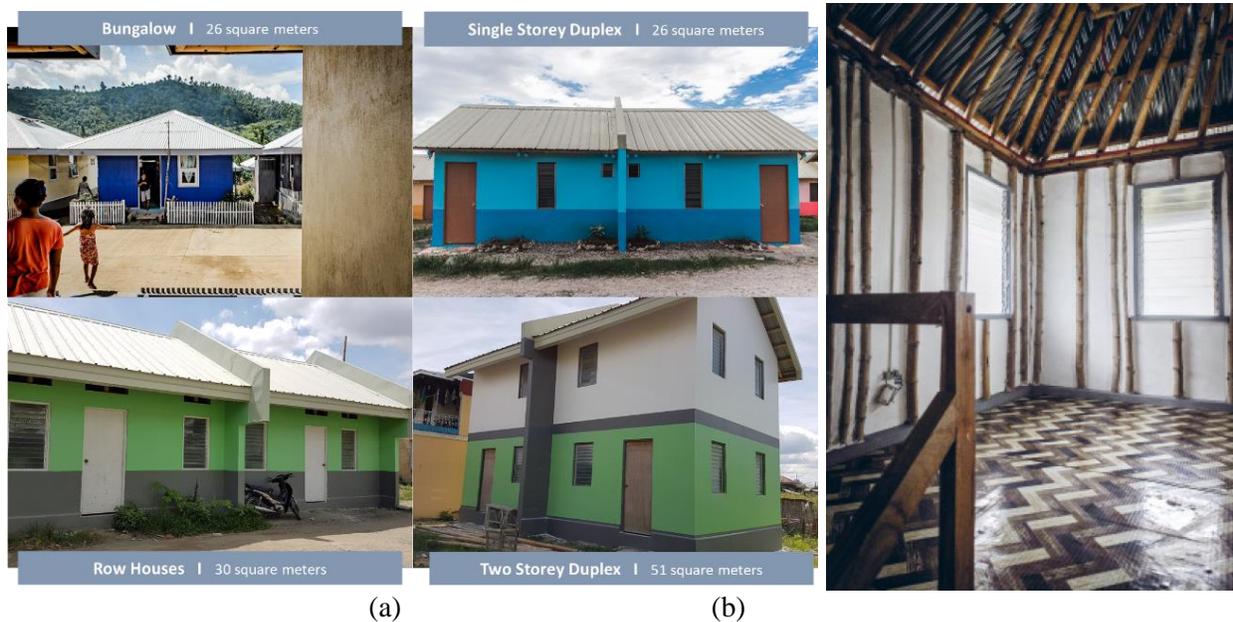


Figura 4. (a) Modelos de vivienda construidos por Base Bahay, (b) Acabados interiores de las viviendas

3 VIVIENDA CON BAMBÚ EN MÉXICO

Desde el año 2017, gracias a los programas experimentales del instituto para la Sustentabilidad del INFONAVIT, se introdujeron diferentes posibilidades (aceptadas por el Gobierno Nacional) para el uso del bambú en la construcción. En 2017 se construyó un prototipo de crecimiento en azotea, que además de aprovechar las ventajas térmicas del bambú, implica la reducción del 80% del peso de un crecimiento a base de block cemento-arena y losas de concreto reforzado (<https://www.bambuterra.com.mx/un-cuarto-ms>).



Figura 5. Prototipo de crecimiento en azotea para el programa “Un Cuarto Más” del INFONAVIT (2017).

Así mismo, en el año 2018 se inauguró el Laboratorio de Investigación de Vivienda del INFONAVIT en el Municipio de Apan en Hidalgo. Este laboratorio contiene 32 prototipos de vivienda que usan materiales convencionales y no convencionales. Dos de estos implementan el bambú como solución estructural (ver figura 6) y uno en elementos de cerramientos (puertas y ventanas). Aunque los prototipos se ajustan a la normativa técnica y presupuesto base del INFONAVIT, no se descarta el uso de otras soluciones arquitectónicas distintas que permitan la optimización del uso del material, y por lo tanto la posibilidad de reducir los costos y los tiempos de ejecución de las obras.



(a)

(b)

Figura 6. INFONAVIT (Apan, Hidalgo), 2018. (a) Bambú en entrepisos, cubierta, columnas, escaleras y cerramientos – Rozana Montiel. (b) Bambú en sistema de cubierta – Taller 4AM.

En la secuencia de imágenes presentada en la figura 8, se presenta el proceso constructivo de un proyecto piloto de reconstrucción de vivienda desarrollado en Xochimilco (Ciudad de México), para cuatro familias damnificadas por los sismos del 2017.



Semana 1



Semana 2



Semana 3



Semana 4



Figura 7. Proceso constructivo de 4 viviendas en Xochimilco (Ciudad de México, 2018)⁸.

Así mismo, la figura 8 muestra el tipo de acabados que se pueden lograr al interior de las viviendas.



Figura 8. Acabados interiores de 4 viviendas construidas en Xochimilco (Ciudad de México)⁹.

4 MUROS DE BAHAREQUE ENCEMENTADO

Para la definición de este sistema constructivo, hemos retomado varios conceptos de la Norma Andina para Diseño y Construcción de Casas de Uno y Dos Pisos en Bahareque Encementado¹⁰. Por lo que podemos definir que los muros de bahareque encementado son un sistema estructural conformado por dos partes principales:

⁸ Fotografías proporcionadas por Bambuterra®

⁹ idem

¹⁰ López, L.F. (2015)

- a. **Esqueleto:** también conocido como entramado. Está constituido por dos elementos horizontales (denominados soleras o barrotes), que se conectan con elementos verticales (pie derechos), mediante clavos o tornillos. Tanto las soleras (barrotes) como los pie derechos, pueden construirse empleando bambú o madera aserrada. En los casos donde se requiera rigidizar a la estructura se agregan diagonales de acero (platinas o soleras de placa metálica) o de bambú. El diámetro de los bambúes debe ser por lo menos de 8.5 cm. El espaciamiento horizontal entre los pie derechos debe estar entre 30 y 80 cm.
- b. **Recubrimiento:** está hecho de mortero y se aplica sobre malla de alambre (con diámetro menor o igual a 1.25 mm). La malla debe estar clavada sobre esterilla de bambú (o caña picada) o sobre un entablado de madera. Es necesario que la esterilla esté anclada a los pie derechos con clavos. En caso de no utilizar malla de alambre, esta y la esterilla pueden ser sustituidas con malla troquelada (malla venada).

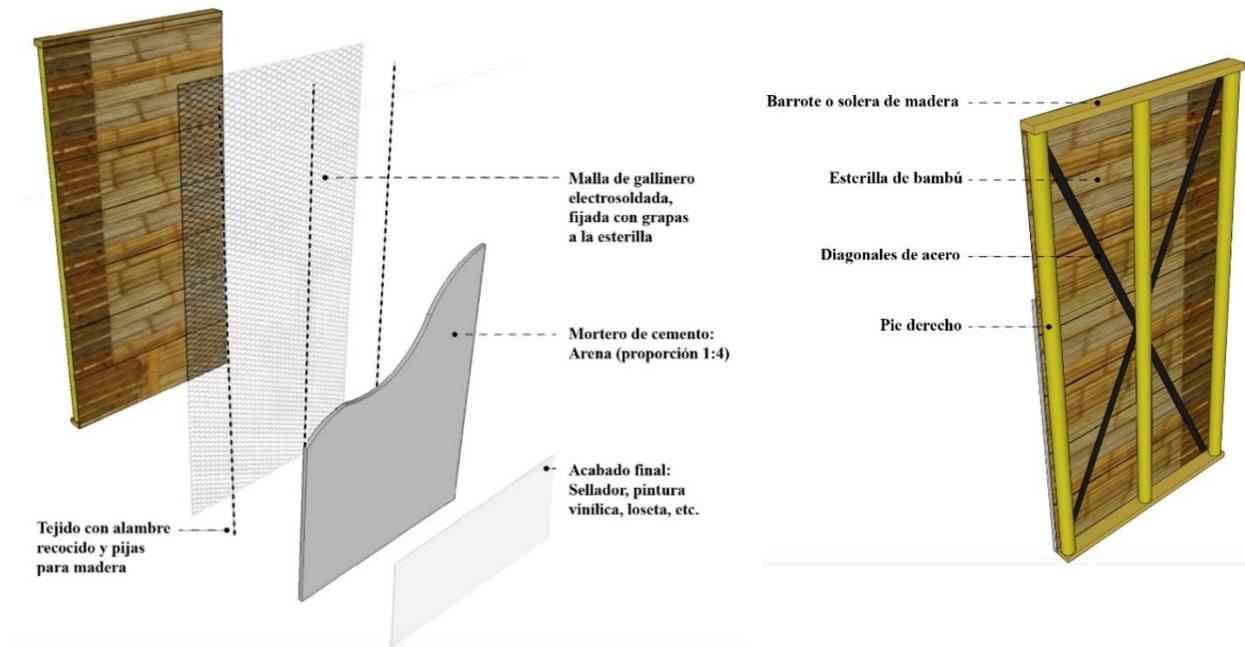


Figura 9. Componentes del muro de bahareque encementado¹¹

La función estructural de los muros de bahareque encementado consiste en transmitir las cargas gravitacionales (vivas y muertas) hacia la cimentación y resistir las cargas laterales (viento y sismo, principalmente). Otras consideraciones para tener en cuenta son,

- Los barrotes o soleras inferior y superior deberán tener por lo menos un ancho mínimo igual al diámetro de los bambúes empleados como pie derechos y un peralte de por lo menos 3.5 cm.

¹¹ Imágenes proporcionadas por la empresa Bambuterra S.A.P.I. de C.V.

- Es aconsejable que las soleras (inferior y superior) sean de madera aserrada porque sus uniones son más rígidas y, además, son menos susceptibles al aplastamiento (en comparación con el bambú).

Los muros de bahareque encementado, que se emplean en casas de uno o dos niveles, se clasifican en tres tipos:

- Muro estructural con diagonales:** son los muros compuestos por el esqueleto, recubrimiento y diagonales de acero. Son los encargados de resistir cargas gravitacionales y laterales. Estos muros son mejor aprovechados cuando son colocados en las esquinas y extremos (de cada grupo de muros estructurales).
- Muros estructurales sin diagonales:** Sus componentes son los mismos que el muro con diagonales con la excepción de no tener diagonales de acero. Su función es resistir únicamente cargas verticales y se debe evitar colocarlos en los extremos de la construcción.
- Muros no estructurales:** este tipo de muros solo deben emplearse para separar espacios dentro de la casa dado que sólo soportan su propio peso. Los muros no estructurales pueden ser discontinuos de un piso a otro y desconectarse de la cimentación.

5 MODELO SIMPLIFICADO DE COMPORTAMIENTO PARA EDIFICACIONES DE BAJA ALTURA

De acuerdo con los trabajos experimentales y los análisis reportados por Correa Giraldo *et. al.* (2021), a continuación se resumen los aspectos que caracterizan el comportamiento sísmico de sistemas estructurales a base de muros de bahareque encementado.

5.1 Resistencia de diseño (cortante resistente)

El valor de resistencia que se considera para muros de bahareque encementado con diagonales de acero de 1" de ancho y 1/8" de espesor, fijadas con varilla roscada estructural de 3/8" a los barrotes o soleras de madera (elementos horizontales del marco) y conectando con 3 tornillos de madera cada pie derecho; es de 21, 6 KN/m. Este valor se obtuvo calculando el cociente entre la fuerza máxima de los ciclos de declinación (ver figura 10) $V_{max\ CD} = 279.6$ kN, y la sumatoria de los muros con diagonales en la dirección de aplicación de la carga, que para el prototipo ensayado fue igual a 12,96 m.

5.2 Factor de Sobre resistencia

Considerando el cociente entre el valor máximo de fuerza cortante resistido por el sistema en los ciclos primarios, *i.e.* $V_{max\ CP} = 346.3$ kN; y el valor máximo de fuerza cortante resistido por el sistema en los ciclos de declinación, *i.e.* $V_{max\ CD} = 279.6$ kN, se obtuvo un factor de sobre resistencia para el sistema¹²:

$$R = \frac{V_{max\ CP}}{V_{max\ CD}} = \frac{346.3}{279.6} = 1.24 \quad (1)$$

¹² Correa *et. al.* (2021)

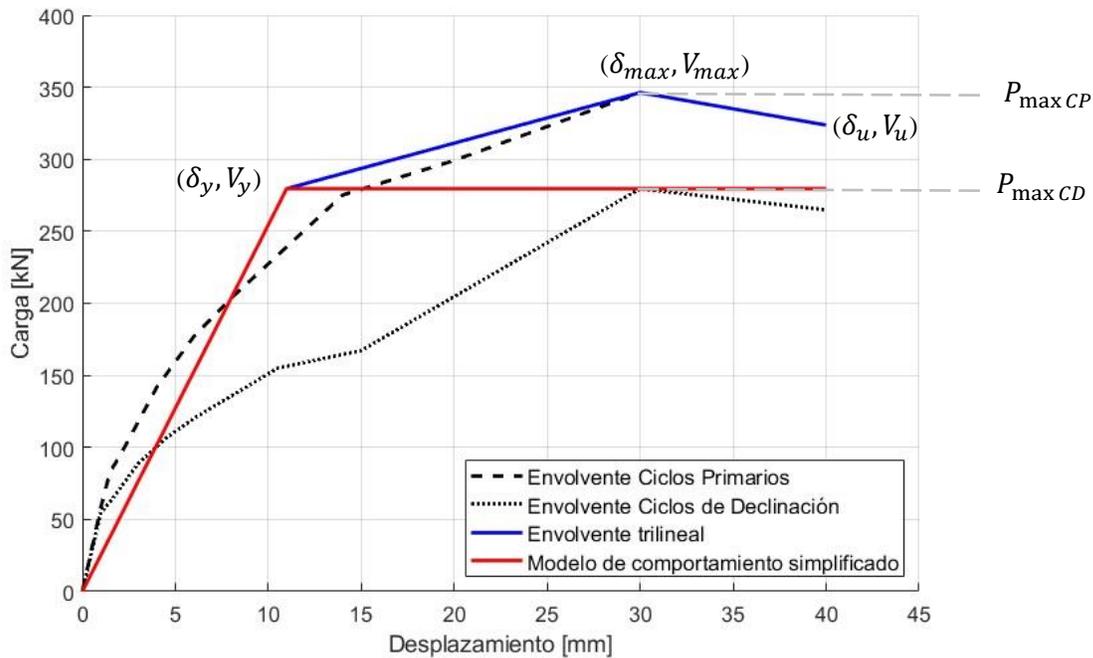


Figura 10. Gráfica de carga lateral (V) contra desplazamiento (δ)

5.3 Factor de comportamiento sísmico

De acuerdo con la figura 10, y considerando que, por diseño, no recomendaremos permitir una deformación del sistema más allá del punto de resistencia máxima (δ_{max}, V_{max}), la ductilidad del sistema (o capacidad de deformación) se calcula como el cociente entre el desplazamiento asociado a la fluencia del sistema o primer agrietamiento (δ_y) y el desplazamiento asociado a la resistencia máxima (δ_{max}).

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y} = \frac{30 \text{ mm}}{11 \text{ mm}} = 2.72 \quad (2)$$

Con lo anterior, se recomienda usar un valor de facto de comportamiento sísmico Q de 2.5.

5.4 Amortiguamiento del sistema

El valor recomendado del amortiguamiento del sistema es de 5%. Para mayor detalle, se deberá consultar el trabajo de Correa Giraldo *et. al.* (2021).

5.5 Rigidez del sistema

En la fase elástica de comportamiento la rigidez está principalmente suministrada por las diagonales de acero de los muros. Lo anterior permite aproximar de manera simplificada la rigidez lateral del sistema como la suma de la rigidez axial de cada una de las diagonales de acero, es decir,

$$k_{diag} = F_C \frac{A_s E_s}{L_s} \cos^2(\theta) \quad (3)$$

Donde,

- A_s , es el área de la sección transversal de los elementos de acero (diagonales de solera o platinas metálicas)
- E_s , es el módulo de elasticidad del acero
- L_s , la longitud de la diagonal de acero
- θ , inclinación de la diagonal de acero
- F_C , Factor de corrección por degradación por flexibilización de las conexiones de las diagonales. Se considera un valor igual a 0.7.

6 METODOLOGIA PROPUESTA PARA DISEÑO SISMICO CON MUROS DE BAHAREQUE ENCEMENTADO DE BAMBÚ CON DIAGONALES DE ACERO

A continuación, se presenta una propuesta de diseño para estructuras cuyo sistema resistente a sismo está conformado por muros de bahareque encementado de bambú con diagonales de acero. Es importante aclarar que la presente metodología está basada en las especificaciones de la *Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado* (INBAR, 2015), con algunas variantes asociadas a la filosofía de diseño mexicana y a los hallazgos del trabajo de Correa Giraldo *et. al* (2021).

1) Definición del proyecto estructural

Al igual que en las estructuras construidas con materiales industrializados, el comportamiento del sistema ante cargas sísmicas, o eólicas, depende en gran parte de que el proyecto estructural cumpla con ciertos criterios generales como: tener un sistema compuesto por elementos estructurales que sean capaces de distribuir las fuerzas tanto verticales como horizontales, así como el cumplimiento de las condiciones de regularidad listadas en la sección 5 de la NTC-DS (2020) o en el MDOC de la CFE 2015 en su sección 3.3.2.

En esta etapa se deben determinar las dimensiones geométricas (planta y elevación), y las cargas que actúan sobre la estructura, partiendo de un diseño arquitectónico.

Se fracciona la estructura de tal manera que se generen módulos prefabricados para los muros, con la mínima cantidad posible de variantes. En general, se recomienda modular siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- a. Se identifican los módulos asociados a las puertas y ventanas (no estructurales). Estos módulos no aportarán resistencia ni rigidez al sistema. Se recomienda que se module a partir de aislar los elementos puerta y ventana.
- b. Se identifican los módulos que aportarán rigidez lateral al sistema. Serán los que tengan diagonales de acero. Es recomendable (tal como sucede con otros sistemas constructivos) que se dispongan de manera simétrica en planta, y de preferencia que se ubiquen en las esquinas de la edificación.

- c. Será importante definir la orientación del sistema de entrespiso o techo, para determinar los muros que van a recibir cargas verticales, pero que también estarán respondiendo a las fuerzas sísmicas.

2) Determinación de la longitud mínima de muros

La longitud total de muros resistentes a desplazamientos laterales en cada dirección y en cada nivel debe cumplir con,

$$L_i \geq C_B A_p \quad (4)$$

Donde,

L_i , es la longitud total de muros con diagonales (en m), sin aberturas, en la dirección i .

C_B , es un coeficiente que es una función que depende de la aceleración en roca (a_0)¹³ del espectro de diseño del sitio de construcción (Tabla 1).

A_p , es el área de la cubierta (en m²). Se incluye el área de los voladizos, para casas de un nivel, o para los muros del segundo piso en viviendas de dos pisos. (Puede reducirse a la mitad el valor de A_p cuando se utilicen materiales ligeros para la cubierta tales como fibrocemento o laminas metálicas, sin mortero).

En viviendas de dos niveles, es el área del entrespiso más área de la cubierta (en m²), para los muros de la planta baja (Puede sustituirse el valor de A_p a $2/3 * A_p$ si se emplean materiales ligeros en la cubierta).

Tabla 1. Valores de coeficiente C_B

Amenaza Sísmica	Aceleración espectral en roca (a_0)	C_B (1/m)
Muy alta	≥ 0.50	0.38
Alta	0.45	0.34
	0.40	0.30
	0.35	0.26
	0.30	0.22
	0.25	0.18
Intermedia	0.20	0.15
	0.15	0.15
Baja	0.10	0.12
	0.05	0.12

3) Revisión de simetría de muros estructurales con diagonales

Con el fin de evitar problemas torsionales debido a una distribución irregular de los elementos resistentes a desplazamiento lateral (muros con diagonales), se debe garantizar que los muros con diagonales estén distribuidos de manera aproximadamente simétrica. Se considera que la distribución de muros es simétrica si se cumple con la siguiente condición,

$$\frac{\sum(L_{mi} b_i)}{\sum L_{mi}} - \frac{B}{2} \leq 0.15B \quad (5)$$

¹³ El valor de la aceleración en roca a_0 , es la aceleración de los espectros transparentes del PRODISIS (Software complementario del MDOC CFE Sismo 2015) o del SASID (Software complementario del RCDF 2017), cuando $T = 0$.)

Donde,

L_{mi} , es la longitud de cada muro en la dirección i

b , es la distancia perpendicular a la dirección i , medida desde cada muro hasta un extremo de la planta (ver Figura 11)

B , es la longitud en planta, perpendicular a la dirección i , del área de la cubierta o entrepiso

4) Determinación del peso de la estructura

Se calcula el peso de entrepiso (se deberá definir y diseñar previamente el sistema de entrepiso), considerando el peso propio de los elementos estructurales y acabados (carga muerta), así como la carga viva que es variable de acuerdo con el uso de la estructura, la cual se puede considerar tomando en cuenta los valores de carga dispuestos en la *Norma Técnica Complementaria sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones* (2017). De acuerdo con los resultados obtenidos en previos trabajos, y ara fines prácticos, si no se hace un análisis detallado de las cargas, se recomienda considerar los valores incluidos en la Tabla 2, como valores totales mínimos de carga por metro cuadrado, debidos al peso propio del sistema. El peso propio de los muros de bahareque encementado deberá calcularse considerando un peso de 200 kg/m. Este peso considera una sola cara con esterilla y un ligero repellido en la cara opuesta, tal como se observa en las fotos de las figuras 4 y 8.

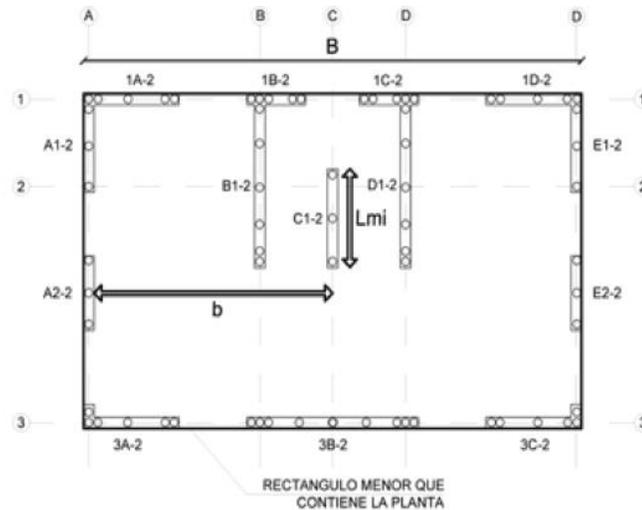


Figura 11. Descripción de las variables para la revisión de simetría de muros (López, 2015)

Tabla 2. Valores mínimos de cargas muertas

Sistema de piso o cubierta	Peso propio aprox. kg/m^2 (kN/m^2)
Entrepiso con viguetas de madera o bambú con firme de 5 cm	2.20
Entrepiso con viguetas de madera o bambú con diafragma de madera	1.50
Cubierta con teja de barro	1.20
Cubierta ligera	1.00

5) Cálculo de la rigidez del sistema

La rigidez del sistema se calculará en función de la rigidez lateral proporcionada por las diagonales¹⁴ de acero de los muros de bahareque encementado, la cual se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$K = 0.7 \sum k_{diag} = 0.7 \sum \frac{A_{si} E_{si}}{L_{si}} \cos^2(\theta_i) \quad (6)$$

Donde,

K, es la rigidez lateral del sistema estructural

K_{diag}, es la rigidez de una diagonal de acero

A_{si}, es el área transversal de la i-ésima diagonal

E_{si}, es el módulo de elasticidad del acero de la i-ésima diagonal

L_{si}, es la longitud de la i-ésima diagonal

θ_i, es la inclinación de la i-ésima diagonal dentro del muro de bahareque encementado

6) Periodo fundamental del sistema

El periodo fundamental de vibración del sistema se calculará a partir de la rigidez de las diagonales de acero que forma en parte de muros resistentes a las fuerzas laterales (muros con diagonales), para cada dirección de análisis.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{Kg}} \quad (7)$$

Donde,

T, es el periodo fundamental del sistema

W, es el peso de la estructura

K, es la rigidez lateral del sistema en estudio (ecuación 6)

g, es la aceleración de la gravedad

7) Determinación de las fuerzas cortantes de diseño

La determinación de las fuerzas sísmicas de acuerdo con el método de diseño estático descrito en la *NTC-DS* (2020), donde la fuerza de entrepiso debida al sismo se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_i = 1.1 \frac{a}{Q'R} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \quad (8)$$

Donde,

V_i, es el cortante de diseño en la dirección de análisis.

W_i, es el peso de entrepiso, considerando carga muerta y carga viva accidental.

h_i, es la elevación del entrepiso, medida desde el desplante de la estructura.

¹⁴ Se considera la instalación de dos diagonales dispuestas simétricamente desde los extremos del módulo prefabricado.

a , es la aceleración espectral obtenida del espectro de diseño en función del periodo fundamental de la estructura T .

Q' , es el factor de reducción por ductilidad (en el MDOC CFE Sismo 2015 consultar el apartado 3.2.4 *Factor reductor por ductilidad* y en la NTC – DS (2020) consultar el numeral 3.4 *Factores de reducción de las ordenadas espectrales*). Para su cálculo, se deberá considerar $Q=2.5$.

R , es el factor de reducción por sobre resistencia igual a 1.2

8) Revisión de la resistencia del sistema a cargas horizontales

El sistema estructural a base de muros de bahareque encementado estará conformado tanto por muros con diagonales, así como por muros sin diagonales (el aporte a la resistencia de los tramos de muros con ventanas se desprecia para este cálculo). La cantidad de muros para cada nivel se podrá evaluar mediante la ecuación 9, en donde se considerará el valor de cortante resistente (V_r) de acuerdo con las diferentes configuraciones de muros enlistadas en la Tabla 3.

$$V_{Ri} = F_R \sum L_i V_r \quad (9)$$

Donde,

$$F_R = 0.5$$

L_i , es la longitud total de los muros que se estén considerando (con y sin diagonales de acero)

V_r , es el cortante resistente de acuerdo con la tabla 3

V_{Ri} es el cortante resistente del sistema, en la dirección de análisis

Finalmente, en la dirección de análisis se deberá cumplir con,

$$V_{Ri} \geq V_i \quad (10)$$

Tabla 3. Resistencia a cortante admisible de muros de bahareque encementado

Configuración del muro	Diagonales	Cortante resistente V_r kN/m
Entramado con barrotes de madera y pies derechos en bambú a cada 800 mm	Sin diagonales	14.0*
	2 diagonales de acero de 1 1/2" y 1/8" de espesor fijada con pernos de 3/8" a cada elemento que atraviesa	25.7*
Entramado con barrotes de madera y pies derechos en bambú a cada 600 mm	2 diagonales de acero de 1" y 1/8" de espesor fijada con pernos de 3/8" en los extremos y con pijas a cada pie derecho que atraviesa	21.6**

*Cortante resistente obtenido a partir del valor de cortante admisible especificado en la Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado (INBAR, 2015).

**Cortante resistente obtenido a partir de los resultados presentados en Correa Giraldo *et. al.* (2021).

9) Revisión de distorsiones

Los desplazamientos elásticos en cada dirección se calculan así:

$$\delta_i = \frac{V_i}{K_i} \quad (11)$$

En el caso de los desplazamientos inelásticos, estos se deberán calcular, de acuerdo con el reglamento sísmico que se esté aplicando.

Finalmente, las distorsiones se calcularán como,

$$\gamma_{ij} = \frac{(\delta_i) - (\delta_{i-1})}{H_j} \quad (12)$$

Donde,

γ_i es la distorsión evaluada en la dirección de análisis

H_i es la distorsión evaluada en la dirección de análisis

De acuerdo con los resultados obtenidos por Correa Giraldo *et al.* (2021), mediante pruebas experimentales, al someter una estructura ante carga cíclica lateral y monitorear su respuesta, fue posible determinar los valores de distorsión para tres estados límites de desempeño. Estos valores de distorsión se derivan de las ordenadas de los tres puntos de la curva trilineal de la figura 10 (δ_y , δ_{max} y δ_u).

Tabla 4. Estados límite de desempeño

Estado Límite	Distorsión lateral
Limitación de daños	0.004
Seguridad de vida	0.011
Prevención del colapso	0.015

10) Revisión del momento de volteo

Para realizar la revisión al volteo de cada uno de los muros que conforman la estructura, debido a la acción de cargas de sismo y viento, se deberá revisar que el pie derecho de bambú tenga la capacidad de resistir el esfuerzo de compresión (o tensión) en el extremo del muro¹⁵. La resistencia a compresión se calculará de acuerdo con lo recomendado en las NTC-Madera del RCDF 2017.

¹⁵ En caso de que se utilice una especie diferente de bambú que no esté incluida en la norma de referencia, será necesario considerar la resistencia a la compresión específica de esa especie, ya sea la recomendada por alguna norma o reglamento foráneo o la obtenida a través de ensayos experimentales de acuerdo con la norma ISO 22156-2021.

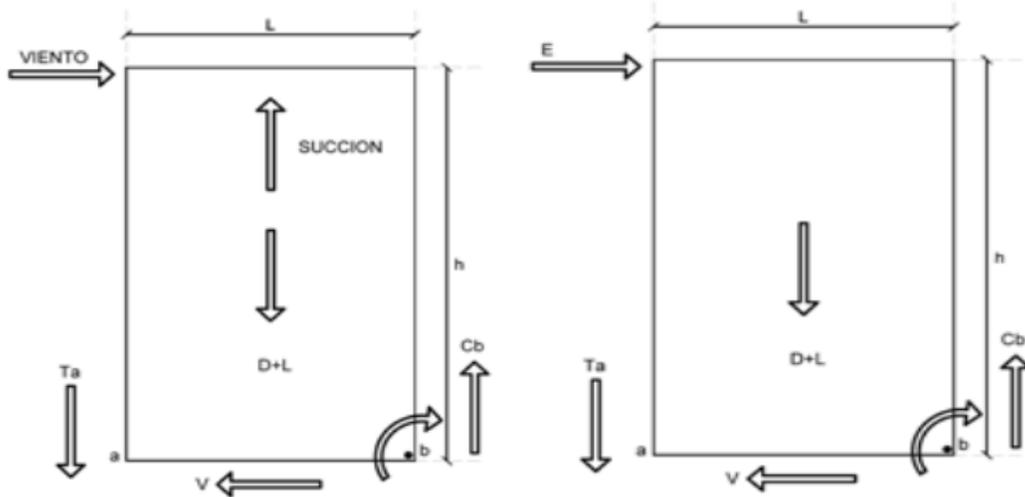


Figura 12. Revisión del volteo (derecha: combinación de cargas con viento, izquierda: combinación de cargas con sismo) (INBAR, 2015)

La resistencia a la tensión estará dada por el anclaje a la cimentación (Figura 13). En donde se deberá asegurar que la varilla corrugada embebida sea capaz de resistir la fuerza de tensión sin sobrepasar su esfuerzo de fluencia.

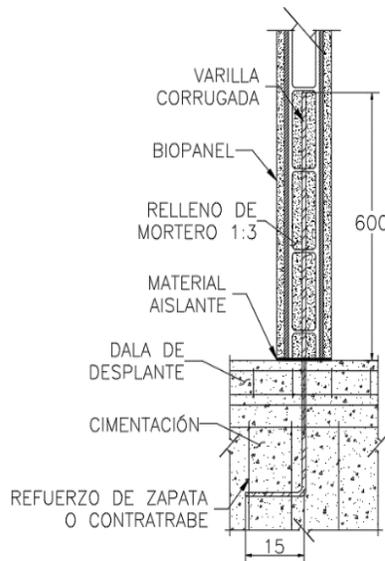


Figura 13. Detalle de anclaje de pie derecho de Biopanel® a cimentación¹⁶

¹⁶ Imagen proporcionada por la empresa Bambuterra S.A.P.I. de C.V.

7 EJEMPLO DE DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA UNA CONSTRUCCIÓN DE UN NIVEL

Se trata de una casa habitación de un nivel, localizada en municipio de San Cristóbal de Las Casas (Chiapas), que debe diseñarse para un posible crecimiento sobre la azotea, de tal manera que en una segunda etapa alcance a tener dos niveles¹⁷.

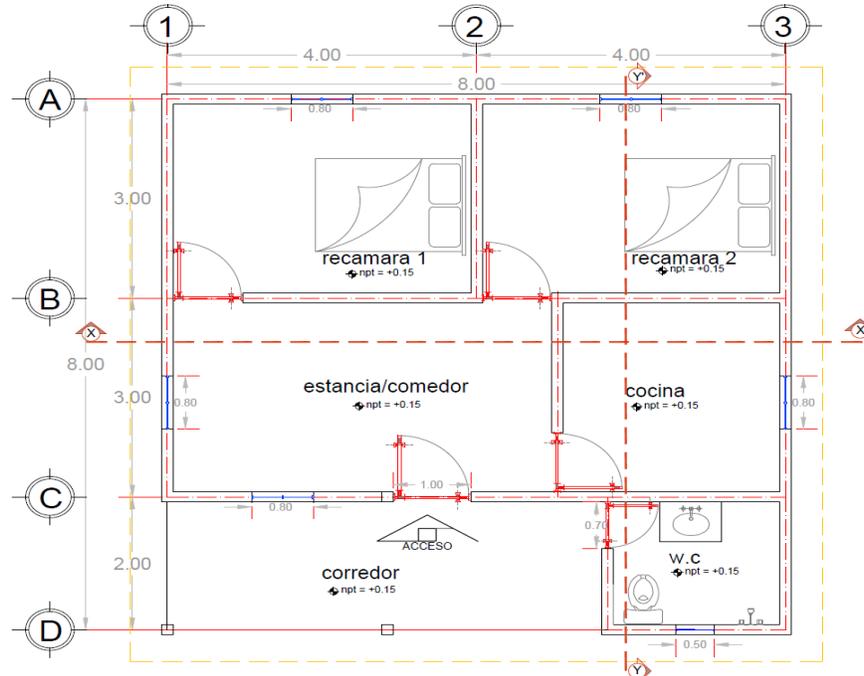


Figura 14. Planta arquitectónica

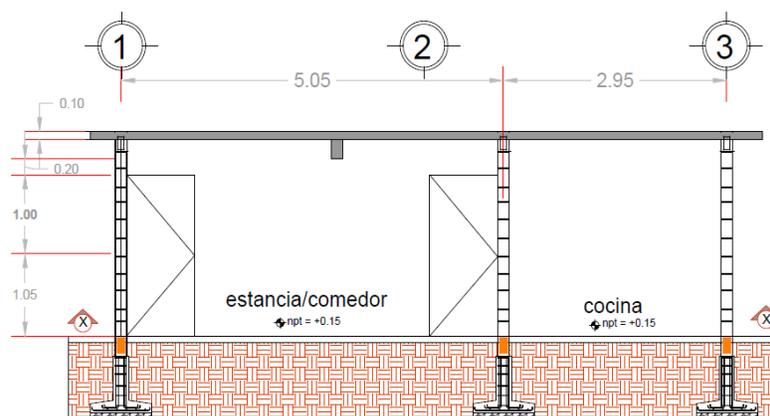


Figura 15. Corte longitudinal de la edificación

¹⁷ Toda la información del proyecto fue proporcionada por la empresa Bambuterra S.A.P.I. de C.V.

1) Definición del proyecto estructural

De acuerdo con la figura 16, en la que se muestra la modulación de los muros, se tiene que la dimensión total en planta en X es 5.9 m y Y es de 8.1 m; para fines de diseño y construcción, se considera una altura de entrepiso efectiva de 2.5 m.

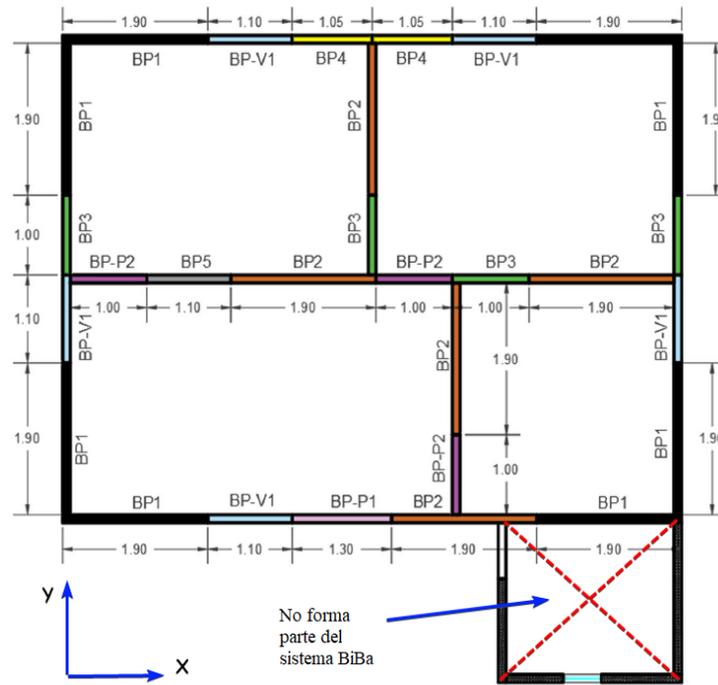


Figura 16. Vista en planta mostrando la modulación¹⁸

2) Determinación de la longitud mínima de muros

El valor de la aceleración en roca para el sitio de estudio es igual a 155.02 cm/s^2 , lo cual daría un valor de aceleración espectral (a_0) igual a 0.158 (valor obtenido al dividir la aceleración en roca entre el valor de la aceleración de la gravedad), catalogando la amenaza del sitio como intermedia (véase tabla 1). El valor del coeficiente C_B asociado con el valor de a_0 es de 0.15. El coeficiente de la aceleración en roca se obtiene del espectro transparente (línea azul) que otorga el software PRODISIS.

De acuerdo con la ecuación 4, se tiene calcula la longitud mínima de muros con diagonales para ambas direcciones como,

¹⁸ Imagen proporcionada por la empresa Bambuterra S.A.P.I. de C.V.

El sistema BiBa® es una solución prefabricada que incluye muros con bahareque encementado.

$$L_i = C_B A_p = \left(\frac{0.15}{m} \right) \frac{(5.9m)(8.1m)}{A_p} = 7.17 m$$

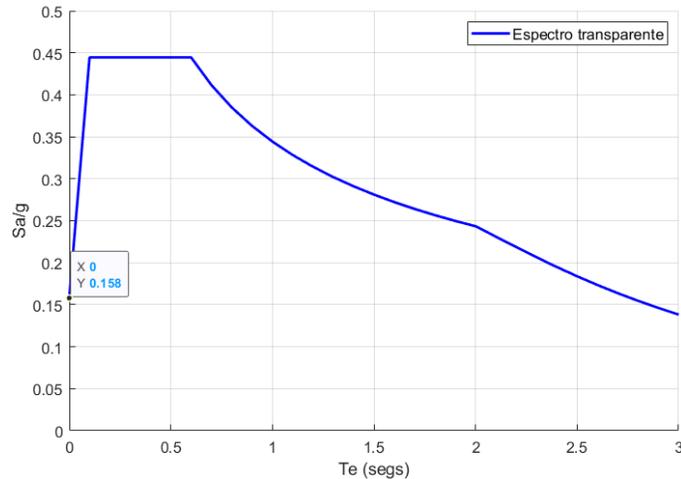


Figura 17. Espectro transparente

Los muros que deben considerarse para satisfacer la longitud mínima son aquellos que cuenten con diagonales (BP1 en la figura 16). Con la anterior consideración se calcula la longitud total de muros así,

$$L_{sx} = L_{sy} = 4 (1.9m) = 7.6 m$$

3) Revisión de la simetría de muros estructurales

Una vez cumplida la longitud mínima de muros debe comprobarse que no existan problemas torsionales debido a plantas irregulares (ecuación 5):

Revisión de irregularidad en dirección Y:

$$\frac{(1.9m)(0m) + (1.9m)(0m) + (1.9m)(5.9m) + (1.9m)(5.9m)}{1.9m + 1.9m + 1.9m + 1.9m} - \frac{5.9m}{2} \leq 0.15(5.9m)$$

$$0 m \leq 0.89 m$$

Revisión de irregularidad en dirección X:

$$\frac{(1.9m)(0m) + (1.9m)(0m) + (1.9m)(8.1m) + (1.9m)(8.1m)}{1.9m + 1.9m + 1.9m + 1.9m} - \frac{8.1m}{2} \leq 0.15(8.1m)$$

$$0 m \leq 1.22 m$$

Dado que los muros con diagonales se han ubicado de manera simétrica en las esquinas, el sistema estructural es esencialmente simétrico.

4) Determinación del peso de la estructura

Las cargas de diseño se determinan de la siguiente manera,

Tabla 5. Cargas muertas para azotea

Descripción	Valores
Sistema de piso de bambú	40 kg/m ²
Losa de concreto de 5cm	120 kg/m ²
Sobrecarga RCDF	20 kg/m ²
Triplay 12 mm	10 kg/m ²
Instalaciones	10 kg/m ²
Impermeabilizante	10 kg/m ²
Total =	210 kg/m²

Tabla 6. Cargas muertas para cubierta ligera de bambú

Descripción	Valores
Sistema de cubierta de bambú	40 kg/m ²
Esterilla	25 kg/m ²
Instalaciones + impermeabilizante	10 kg/m ²
Cubierta ligera	10 kg/m ²
Total =	85 kg/m²

Tabla 7. Cargas variables

Uso	CVmax (kg/m ²)	CVred (kg/m ²)	CVmed (kg/m ²)
Habitacional (se considera futuro crecimiento)	190	100	80
Cubierta (azotea con pendiente mayor a 5%)	40	20	5

En la consideración de la carga de diseño, se tuvo en cuenta la carga debida al crecimiento de un nivel sobre la azotea. Al sumar las cargas muertas y vivas (CVred) se obtiene una carga total de 415 kg/m² (4.23 kN/m²), no obstante, debe de hacerse la consideración de la carga de los muros (estructurales y no estructurales). Para dicho cálculo se recomienda usar un peso de 200 kg/m. La longitud total de muros que no presentan aberturas (se excluyen los BP-V1 y BP-P1, de la figura 16) es de 28.8 m, así el peso total de los muros, considerando que la altura de estos es de 2.5 m es:

$$\frac{\left(200 \frac{kg}{m}\right) (28.8 m)}{\underbrace{(5.9m)(8.1m)}_{A_p}} = 120.5 \frac{kg}{m^2}$$

Se toma un valor redondeado de 120 kg/m², con lo que resulta un peso total de 535 kg/m² (5.45 kN/m²)

El área en planta de la cubierta es de 47.8 m^2 , por lo que el peso total del sistema en la condición de sismo es:

$$W = 260.51 \text{ kN}$$

5) Cálculo de la rigidez del sistema

Como todos los muros BP1 tienen las mismas medidas y número de diagonales, es posible calcular la rigidez de la estructura estudiando un muro BP1 y considerando para la rigidez lateral la suma de todos los muros sismorresistentes.

La rigidez de un muro con diagonales se tiene de la siguiente forma:

$$A_s = 2b_d e_d = (2)(2.54 \text{ cm}) \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{8} \right) = 0.00016 \text{ m}^2$$

Donde,

b_d , es el ancho de la diagonal

e_d , es el espesor de la diagonal

$$E_s = 206,000,000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$L_s = L_x = L_y = \sqrt{(2.5 \text{ m})^2 + (1.9 \text{ m})^2} = 3.14 \text{ m}$$

$$\theta = \theta_x = \theta_y = \left(\frac{2.5 \text{ m}}{1.9 \text{ m}} \right) = 52.77^\circ$$

$$k = k_x = k_y = \frac{E_s A_s}{L_s} \cos^2(\theta) = 3873 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Se sabe que en cada dirección existen 4 muros BP1, por lo que la rigidez lateral se estima de acuerdo con la ecuación 6, así:

$$K_X = K_Y = 0.7 (4k) = 10844 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 10.84 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

6) Periodo fundamental del sistema

El periodo fundamental de en cada dirección se calcula como lo indica la ecuación 7,

$$T = T_X = T_Y = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_X}} = 2\pi \sqrt{\frac{260.51 \text{ kN}}{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(10844 \frac{\text{kN}}{\text{m}}\right)}} = 0.31 \text{ s}$$

7) Determinación de las fuerzas cortantes de diseño

Con la ecuación 8 y considerando la figura 18, la fuerza cortante de diseño es,

$$V_x = V_y = 1.1 \frac{a_x}{Q'R} W = 1.1 \left[\frac{0.44}{(1.63)(1.2)} \right] (260.51 \text{ kN}) = 1.1 \underbrace{(0.23)}_{\frac{a_x}{Q'R}} (260.51 \text{ kN}) = 64.89 \text{ kN}$$

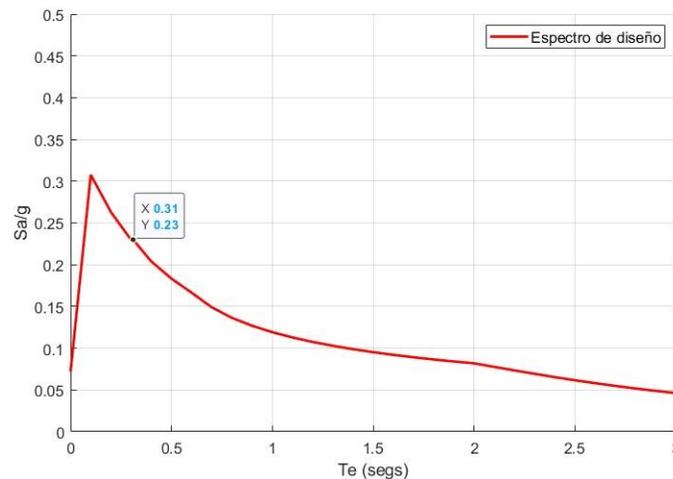


Figura 18. Espectro de diseño y valor de pseudoaceleración para calcular el cortante de diseño

Nótese que, dada la especial simetría de los muros en este caso de estudio, la fuerza cortante de diseño es igual en ambas direcciones de análisis.

8) Revisión de la resistencia del sistema a cargas horizontales

La capacidad ante carga cortante se calcula mediante la ecuación 9,

$$V_R = F_R \sum L_i V_r$$

Siendo $F_R = 0.5$

Para determinar la longitud L_i se determina por separado la longitud de muros con diagonales (L_{MCD}) y la longitud de muros sin diagonales (L_{MSD}). Los muros con diagonales son los BP1 y los muros sin diagonales son BP2 a BP5 (véase tabla 8).

El cortante resistente de los muros con diagonales (V_{rMCD}) es de 21.6 kN/m y de los muros sin diagonales (V_{rMSD}) es de 14.0 (tabla 3).

$$\begin{aligned} L_{MSDX} &= 9.9m \\ L_{MSDY} &= 6.8m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{RX} &= 0.5(L_{MCDX}V_{rMCD} + L_{MSDX}V_{rMSD}) = 151.38 \text{ kN} \\ V_{RY} &= 0.5(L_{MCDY}V_{rMCD} + L_{MSDY}V_{rMSD}) = 129.68 \text{ kN} \end{aligned}$$

Verificando la demanda / capacidad, se puede observar que se tiene un factor de seguridad de 2.33 y 2 en las direcciones X y Y, respectivamente,

$$\frac{V_{RX}}{V_X} = \frac{151.4 \text{ kN}}{64.89 \text{ kN}} = 2.33; \frac{V_{RY}}{V_Y} = \frac{129.7 \text{ kN}}{64.89 \text{ kN}} = 2.00$$

Tabla 8. Descripción y cuantificación de los muros¹⁹

Biopanel	Tipo	Longitud [m]	Cantidad	Longitud total [m]
BP-1	Ciego con diagonales de acero de 1" x 1/8"	1.90	8	15.20
BP-2	Ciego sin diagonales	1.90	4	7.60
BP-3	Ciego sin diagonales	1.00	4	4.00
BP-4	Ciego sin diagonales	1.05	2	2.10
BP-5	Ciego sin diagonales	1.10	1	1.10
BP-V1	Panel ventana (Ventana: 1.0 x 0.8)	1.10	5	5.50
BP-P1	Panel puerta	1.30	1	1.30
BP-P2	Panel puerta	1.00	3	3.00
M-1	Muro de mampostería	6.30	-	6.30
Total			28	46.10

9) Revisión de distorsiones

Calculando el desplazamiento elástico en cada dirección se tiene (ver ecuación 11),

$$\delta_x = \frac{V_X}{K_X} = \frac{64.89 \text{ kN}}{10.84 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}} = 5.98 \text{ mm}$$

$$\delta_y = \frac{V_Y}{K_Y} = \frac{64.89 \text{ kN}}{10.84 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}} = 5.98 \text{ mm}$$

Por lo que el desplazamiento máximo inelástico en cada dirección es igual a,

$$\delta_X = QR\rho\delta_x = (2.5)(1.2)(0.8)(5.98 \text{ mm}) = 14.4 \text{ mm}$$

$$\delta_Y = QR\rho\delta_y = (2.5)(1.2)(0.8)(5.98 \text{ mm}) = 14.4 \text{ mm}$$

Cálculo de distorsiones (ecuación 12),

¹⁹ Dado que los datos fueron proporcionados por la empresa Bambutterra S.A.P.I. de C.V., se hace referencia a Biopanel como la marca que responde a la tecnología de muros de bahareque encementado en una modalidad basada en prefabricados.

$$\gamma_x = \frac{\delta_x}{H} = \frac{14.4 \text{ mm}}{2500 \text{ mm}} = 0.006$$

$$\gamma_y = \frac{\delta_y}{H} = \frac{14.4 \text{ mm}}{2500 \text{ mm}} = 0.006$$

Los valores de distorsión obtenidos para cada dirección comparados con la tabla 4 nos permiten asegurar que la estructura estaría respondiendo, ante el sismo de diseño ligeramente después del estado límite de *limitación de daños*, con lo que los costos de reparación después del sismo de diseño serían mínimos. Lo anterior confirma una alta resiliencia del sistema estructural, aunada a su alto valor sustentable, en la medida de su ahorro en recursos naturales y la reducción del orden del 80% en la emisión de GEI²⁰ en su construcción (Queiros *et. al.*, 2017).

8 COMENTARIOS COMPARATIVOS SOBRE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado (INBAR, 2015) es el documento en español más completo en términos de diseño sísmico (y eólico) y construcción de estructuras de bahareque encementado. Sin embargo, la filosofía de diseño sísmico que dicho documento presenta, no es del todo compatible, o se encuentra incompleta cuando se busca aplicarlo en México. No presenta valores que permitan relacionar el comportamiento de una estructura bajo el rigor de estándares como los que existen en la República Mexicana. Por ejemplo, la manera en la que se propone el cálculo del periodo fundamental, sólo se relaciona en función a la altura de la edificación, sin considerar la rigidez lateral que se pueda o no proporcionar al sistema, lo cual resulta impreciso y en algunos casos podría generar soluciones poco seguras.

En el caso del coeficiente R (coeficiente de disipación de energía) se propone un valor de 2, lo cual es conservador, con referencia al valor de Q propuesto en este trabajo. No hay claridad sobre el factor de sobre resistencia.

Finalmente, la tabla de resistencia para pie derechos presenta una incongruencia en las unidades que puede generar confusiones para el usuario.

Cabe resaltar, que el documento provee herramientas de alto valor en el sentido constructivo, que permiten llegar a resultados de calidad a la obra de la ejecución de una obra. Así mismo, con la Norma Andina, se presentan herramientas para diseño por viento.

La NSR-10, Título E (2010), especifican provisiones constructivas que se deben tener al momento de construir un sistema estructural a base de bahareque encementado y algunas ecuaciones de diseño, que si bien, se retoman en la Norma Andina, ofrecen un acercamiento a nivel de prediseño estructural, sin considerar ninguno de los aspectos de comportamiento dinámico indicados en el presente documento.

La metodología propuesta en este trabajo toma las dos normativas mencionadas atrás como referencia, permitiendo al usuario apearse a filosofías de diseño sísmico más contemporáneas. Así mismo, permite al usuario experimentado entender el proceso de diseño de manera racional, de tal manera que pueda llegar a considerarse diseños sísmicos para edificaciones de más de dos niveles.

²⁰ Gases Efecto Invernadero



9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La metodología propuesta en el presente trabajo permitirá ser adoptada por Nuevos Reglamentos para el diseño sísmico de edificaciones de uno y dos niveles con muros de bahareque encementado de bambú.

Esta metodología ha sido implementada en el diseño de más de 10 proyectos que ha construido la empresa Bambuterra S.A.P.I de C.V. en México, desde el año 2015. Dichos proyectos han sido sometidos a diferentes eventos sísmicos con resultados muy favorables.

A la fecha, los autores, con el patrocinio de la empresa Bambuterra S.A.P.I de C.V. en colaboración con varias Universidades Mexicanas (Universidad Autónoma de Querétaro y el Instituto Politécnico Nacional), están en proceso de desarrollado un software que permite de manera simplificada realizar los cálculos que se presentan en la metodología presentada, de tal manera que los usuarios logren resolver de formas aún más ágiles problemas de ingeniería relacionados con edificaciones de uno y dos niveles con muros prefabricados de bahareque encementado y viguetas presforzadas de bambú (Sistema BiBa®)

La automatización de procesos de diseño de ingeniería y arquitectura, permitirán agilizar la accesibilidad del sistema constructivo para muchos usuarios de manera simultánea y a un muy bajo costo, lo cual podrá permitir acelerar la curva de aprendizaje para los técnicos en el diseño (arquitectos e ingenieros).

Actualmente, en México, se construyen alrededor de 150mil viviendas nuevas cada año, por lo que la estrategia de adopción masiva del bambú, considerando la capacidad instalada de producción de bambú actualmente, estaría lista para atender hasta el 20% de ese mercado. Para ello se requerirá que muchos profesionales, no sólo del diseño, sino de la construcción logren dominar habilidades relacionadas con el bambú, de tal manera que se logre garantizar el éxito en las viviendas construidas. La colaboración de entidades técnicas, académicas, el sector educativo y de investigación, así como el sector gobierno, representan eslabones fundamentales en la búsqueda de dicho propósito.

Futuras posibilidades de estudio se enfocan en el tratamiento inelástico del sistema, considerando la variación de la rigidez considerando el pandeo de las diagonales en su rango no lineal. Así mismo, una gran oportunidad de mejora se detecta en las conexiones de las diagonales con los barrotes (soleras) de madera. Finalmente, la posibilidad de incluir sistemas de disipación de energía sísmica en los elementos más vulnerables será materia de estudio en trabajos posteriores.

10 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al M.Sc. Luis Felipe López Muñoz por sus valiosas ideas y la información compartida.

11 REFERENCIAS

Bambuterra S.A.P.I. de C.V. (2021), “Sistema BiBa - Anexo para la Construcción Asistida con Prefabricados de Bambú”.



CFE. (2015). “Manual de Diseño de Obras Civiles Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo”. Comisión Federal de Electricidad, México.

Correa Giraldo, V., Queiros, M., Ordoñez, V. R., López Muñoz, L. F., Flores, E., y Zapata López, J. (2014). “El bahareque, un sistema constructivo sismoresistente y sustentable para soluciones de vivienda social en México”. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco.

Correa Giraldo, V., Terán Gilmore, A., Pancardo, L. D., López Muñoz, L. F., y Lopez Batis, O. (2021). “Ensayos experimentales de una edificación a la escala real construida con componentes prefabricados de bambú con recubrimiento encementado (sistema BiBa)”. *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Aguascalientes, Aguascalientes

INBAR. (2015). “Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado”. Red Internacional para el Desarrollo del Bambú y el Ratán Oficina para América Latina y el Caribe, Quito, Ecuador.

Kaminski, S., Lawrence, A., y Trujillo, D. (2016). “Guía de Diseño para la Vivienda de Bahareque Encementado”. Informe Técnico de INBAR (International Network for Bamboo and Ratan) No. 38.

Muñoz Robledo, J. (2010). Tipificación de los sistemas constructivos patrimoniales de “bahareque” en el Paisaje Cultural Cafetero de Colombia. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.

NSR-10, Título E (2010). Casas de Uno y Dos Pisos, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, Asociación de Colombiana de Ingeniería Sísmica.

NTC-DEE (2017), “Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones”. 2017. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

NTC-DS (2020), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con Comentarios”. (2020). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

PRODISIS (2015). “Programa de Diseño Sísmico”. Comisión Federal de Electricidad, México.

Queiros, M., Correa Giraldo, V. M., y Luque Rodriguez, C. L. (2017). “BIBA: Housing solution based on bamboo prefabricated construction systemes”. *SEWC 2017 6th Structural Engineers World Congress*.

“Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Titulo E - Casas de uno y dos pisos”. (2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Colombia.

SASID (2017). “Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño”. Gobierno de la Ciudad de México, México.