

Guía de Diseño para la Vivienda de Bahareque Encementado

Sebastian Kaminski, Andrew Lawrence, David Trujillo



Acerca de los Informes Técnicos de INBAR

Los Informes Técnicos de INBAR ofrecen análisis detallado de aspectos específicos de la investigación de ratán y bambú. Se basan en resultados de investigación validada y / o lecciones aprendidas de INBAR o iniciativas asociadas reconocidas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado principalmente por el Gobierno de la República Popular China, con contribuciones de la Universidad de Arup y Coventry. También estamos agradecidos con el Fondo Común para los Productos Básicos, que ha permitido que esta investigación se divulgue al sector privado y socios gubernamentales en Nepal después del terremoto en el año 2015.

Palabras clave

Bambú, Bahareque y vivienda

Derechos de autor y uso justo

Esta publicación tiene licencia para uso bajo Creative Commons

Attribution-Noncommercial-Sharealike 4.0 Unported License. Para ver esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

}A menos que se indique lo contrario, usted es libre de copiar, duplicar o reproducir y distribuir, mostrar o transmitir cualquier parte de esta publicación o partes de ella sin permiso y para realizar traducciones, adaptaciones u otras obras derivadas bajo las siguientes condiciones:

Atribución: este trabajo debe ser atribuido, pero no de ninguna manera que sugiera el respaldo del editor o el (los) autor (es)

No comercial: Este trabajo no se puede usar con fines comerciales.

Compartir: Si este trabajo es alterado, transformado o construido, el trabajo resultante debe ser distribuido solo bajo la misma licencia o similar a esta.

Red Internacional de Bambú y Ratán (INBAR, por siglas en inglés)

PO Box 100102-86, Beijing, 100102, P. R. China

Tel: +86-10-6470 6161; Fax: +86-10-6470 2166; E-mail: info@inbar.int

ISBN: 978-92-990082-3-2

©2016 INBAR – International Network for Bamboo and Rattan

Autores

Autor principal

Sebastian Kaminski, ingeniero estructural y especialista en bambú, ingeniero superior en Arup, miembro de la fuerza de trabajo de INBAR - Construcción de Bambú.

Segundos autores

Andrew Lawrence, ingeniero estructural y especialista en madera, Director Asociado en Arup, miembro del equipo de trabajo de INBAR - Construcción de Bambú

David Trujillo, ingeniero estructural y especialista en bambú, profesor titular en la Universidad de Coventry, presidente de la fuerza de trabajo de INBAR - Construcción de Bambú

Colaboradores y revisores

David Barber, ingeniero de bomberos, asociado en Arup

Maya Shinozaki, especialista en sostenibilidad, ingeniero en Arup Daniel Roe, especialista en sustentabilidad, ingeniero en Arup Tara Clinton, ingeniero estructural, ingeniero en Arup

Liam Davis, arquitecto, asistente de arquitectura en Arup

Luis Felipe López, ingeniero estructural, Jefe de Ingeniería en la Fundación Base Bahay, Miembro de la fuerza de trabajo INBAR - Construcción de Bambú

Juan Francisco Correal, ingeniero estructural, Jefe del Departamento de la Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, miembro del equipo de trabajo de INBAR - Construcción de Bambú

Sobre el autor principal

Sebastian es un ingeniero estructural superior que trabaja en el equipo de investigación y tecnología avanzada en Arup, Londres. Él trabaja con una variedad de materiales, incluyendo concreto reforzado, acero, mampostería, madera y bambú. Sebastian tiene experiencia en el diseño de edificios y viviendas tanto en el mundo desarrollado como en desarrollo, en particular en el diseño sísmico de viviendas de bajo costo.

Sebastian es uno de los especialistas en bambú de Arup, habiendo trabajado en una serie de proyectos utilizando bambú y caña en todo el mundo. Ha presentado y llevado a cabo cursos sobre el uso estructural del bambú en países, incluidos Haití, Nepal y Ecuador. Actualmente también está involucrado en una serie de proyectos de investigación relacionados con el bambú, y es el autor principal de una nueva guía de diseño de bambú en general que se publicará en el Reino Unido en breve.

Resumen Ejecutivo

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 modernas. El bahareque encementado generalmente consiste en: cimentación de concreto (hormigón) reforzado soportando un sobrecimiento de mampostería reforzada o confinada sobre el cual se construye un esqueleto estructural de bambú y/o madera. Una matriz orgánica de caña, bambú de diámetros pequeños, tablillas de bambú o esterilla se fija por medio de clavos a la armadura; una malla de gallinero se clava a la matriz para que actúe como refuerzo. Los muros se terminan con un revoque (o enlucido) de mortero de cemento para formar muros sólidos. El techo (o cubierta) se construyenormalmente de tejas de fibro-cemento o de barro (arcilla).

El bahareque encementado ha sido utilizado exitosamente en varios países alrededor del mundo, incluyendo: Costa Rica, Colombia, Ecuador, El Salvador y Las 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.

Se ha demostrado que el bahareque encementado es ambientalmente superior a otros sistemas de vivienda, como por ejemplo la mampostería, pues tiene el 50% del carbono incorporado y la posibilidad de ser construido en buena medida de materiales de rápido crecimiento, como por ejemplo el bambú. Su sostenibilidad se puede maximizar a asegurarse que el bambú y la madera 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. Desde que sea posible, preservantes químicos no tóxicos se deben usar para la madera y el bambú.

La vivienda de bahareque encementado es un tipo de vivienda durable, alcanzando, a través del buen diseño, una vida de diseño de 50 años. El bambú y la madera son vulnerables a ataques por insectos y pudrición, y por ende deben ser protegidos. Para proteger el bambú contra insectos se debe preservar con boro y la madera debe ser preservada o proceder de una especie naturalmente durable. Para proteger el bambú y la madera contra la pudrición, debe mantener secos mediante detalles de diseño apropiados: elevar sobre un sobrecimiento, barreras a la humedad, voladizos grandes en el techo para proteger las paredes contra la lluvia y usar cortas goteras, muro impermeable, y ventilación en las cavidades de los muros. Las recomendaciones fundamentales son: tratar el bambú con boro, usar madera preservada o naturalmente durable. Las conexiones de acero deben ser pintadas o galvanizadas.

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. 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 recomendable.

La vivienda de bahareque encementado es un sistema estructural resistente y robusto, el cual puede ser diseñado para ser resistente a sismos y viento extremo, incluso en las regiones del mundo sujetas a mayor amenaza. El esqueleto, la matriz y el revoque de mortero de cemento han demostrado comportarse como un compuesto, cuando actúa como muro de corte. El sistema debe diseñarse para que la marcha de cargas gravitacionales y horizontales sea simple y continua, los elementos del esqueleto sean fijados apropiadamente por medio de conexiones de acero (particularmente en la base del muro) y que el mortero de cemento se fije bien a la matriz mediante la malla de gallinero, que a su vez se fije mediante clavos al esqueleto.

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

La finalidad de este informe técnica es su empleo por parte de arquitectos e ingenieros durante las fases de diseño conceptual y diseño constructivo. Está concebida como una guía de diseño y construcción para el bahareque encementado tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo por todo el mundo. El reporte es una guía de diseño para la sostenibilidad, la durabilidad, el fuego y las cargas estructurales (viento y sismos). Detalles constructivos típicos se proveen, junto con orientaciones para el control de calidad durante el diseño.

Mensajes clave

- Cuando las estructuras de bahareque encementado están diseñadas y construidas de manera adecuada, proporcionan una forma efectiva, resistente y duradera. Es un sistema de construcción fuerte y robusto que puede diseñarse para resistir terremotos y vientos fuertes en regiones propensas a desastres.
- La vivienda de bahareque encementado es más amigable con el medio ambiente que otras formas de vivienda, que contiene tan poco como la mitad del carbono incorporado, y utiliza materiales sostenibles de rápido crecimiento, incluido el bambú.
- La vivienda de bahareque encementado tiene un gran potencial donde crece el bambú y ya ha demostrado ser muy beneficiosa como una forma de viviendas resistentes y de bajo costo en muchas partes del mundo, como Costa Rica, Colombia, Nepal, Ecuador, El Salvador y Las Filipinas
- Existen formas prácticas, sostenibles y rentables para mejorar la resiliencia de las viviendas de bahareque de bambú, reducir la susceptibilidad a los insectos, la podredumbre y el fuego, y lograr una vida útil de 50 años. Para protegerse contra los insectos, el bambú debe tratarse con boro; para proteger contra la putrefacción, el bambú debe mantenerse seco a través de medidas simples como elevar el armazón, incluida una membrana a prueba de humedad y construir grandes voladizos para proteger las paredes de la lluvia torrencial; para evitar el fuego, el uso de revoques de mortero de cemento proporciona resistencia efectiva.
- La construcción de una vivienda de bahareque encementado implica sistemas de construcción simples y prácticos, lo que significa que los hogares pueden ser mantenidos y construidos fácilmente por los beneficiarios, utilizando las habilidades locales y ayudando a mejorar la propiedad de la comunidad. Las casas han demostrado ser muy populares en muchas iniciativas de vivienda anteriores.

Contenido

Autores	II
Sobre el autor principal	II
Resumen Ejecutivo	III
Mensajes clave	V
1.0 Vista general del informe	1
2.0 Introducción de la Vivienda de Bahareque Encementado	3
2.1 Antecedentes de la vivienda de bahareque tradicional.....	3
2.2 Vivienda de Bahareque Encementado	7
2.3 Estudios de caso	9
2.4 ¿Cuándo está adecuada la vivienda de bahareque encementado?	15
3.0 Diseño para la Sostenibilidad	17
3.1 Introducción	17
3.2 Carbono incorporado y el impacto ambiental de la vivienda de bahareque encementado	19
3.3 Resumen de recomendaciones para diseñar para la sostenibilidad.....	23
4.0 Diseño para la Durabilidad	24
4.1 Introducción	24
4.2 Causas de la descomposición	24
4.3 Protección contra la descomposición	28
4.4 Opciones de tratamiento.....	30
4.5 Condimento	32
4.6 Madera.....	33
4.7 Mortero de cemento render	34
4.8 Componentes de acero de la vivienda de bahareque encementado	34
4.9 Resumen de recomendaciones para diseñar para asegurar la durabilidad ...	35
5.0 Diseño contra el Incendio	37
5.1 Introducción	37
5.2 ¿Qué es resistencia al fuego?	37

5.3	Los requisitos reglamentarios	38
5.4	Propiedades de fuego de bambú y bahareque encementado	39
5.5	Discusión sobre los resultados de las pruebas de fuego	42
5.6	Resumen de recomendaciones para diseñar resistencia al fuego.....	44
6.0	Diseño para Cargas Estructurales	49
6.1	Consideraciones estructurales clave del bambú.....	49
6.2	Diseño para cargas gravitatorias	50
6.3	Diseño para terremotos y cargas de viento	51
6.4	Sistemas de estabilidad de carga lateral	54
6.5	Diseño de elementos y conexiones de bambú individuales.....	57
6.6	Diseño de sistemas de muro cortante de bahareque encementado.....	58
7.0	Detalles típicos de construcción de casas de bahareque encementado	64
7.1	Detalle de la plataforma	64
7.2	Detalle de plataforma a placa única.....	64
7.3	Clavos / abrazaderas a la suela / base	66
7.4	Detalles de la matriz	68
8.0	Asegurar la construcción de Buena Calidad.....	69
9.0	Otras Consideraciones Importantes para el Diseño	71
9.1	Normas de salud, seguridad y trabajo para la construcción	71
9.2	Maximizar el uso de los beneficiarios de viviendas para el trabajo de la construcción.....	71
9.3	Mantenimiento	72
9.4	Salud y bienestar de los ocupantes de la vivienda	72
10.0	Resumen	74
	Referencias	75
	Apéndice A: Ejemplos de dibujos de viviendas de bahareque encementado	82

1.0 Vista general del informe

Este informe técnico es una salida del Comité Técnico Asesor de INBAR sobre el Grupo de Trabajo de Normalización de Bambú y Ratán sobre Construcción de Bambú. Está pensado como un guía para diseñar y construir viviendas de bahareque encementado tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo de todo el mundo. El informe se divide en las siguientes secciones:

- **Sección 2.0: Introducción de la Vivienda de Bahareque Encementado** – analiza los sistemas de viviendas tradicionales y los de bahareque encementado. Presenta tres estudios de caso de viviendas de bahareque encementado en varios países y propone contextos apropiados para su adopción.
- **Sección 3.0: Diseño para la Sostenibilidad** – analiza el impacto del carbono y el impacto medioambiental de los materiales clave utilizados para la construcción de viviendas de *bahareque* encementado, y propone cómo el diseñador puede maximizar la sostenibilidad de la vivienda.
- **Sección 4.0: Diseño para la Durabilidad** – analiza la durabilidad de los materiales clave utilizados para la construcción de viviendas de bahareque encementado, y propone cómo el diseñador puede cumplir una vida de diseño estándar de 50 años con un enfoque en los elementos de bambú.
- **Sección 5.0: Diseño contra el Incendio** – analiza el comportamiento del bambú y el bahareque encementado en un escenario de incendio, proporciona recomendaciones sobre las clasificaciones resistentes al fuego a las que deberían diseñarse y propone cómo el diseñador puede lograr estas clasificaciones.
- **Sección 6.0: Diseño para Cargas Estructurales** – analiza las consideraciones estructurales clave del bambú y proporciona recomendaciones sobre cómo diseñar bahareque encementado para la gravedad, el viento y las cargas sísmicas
- **Sección 7.0: Detalles Típicos de Construcción de las Viviendas de Bahareque Encementado** – ofrece algunos detalles estructurales clave para construir casas de bahareque encementado de tal manera que sean resistentes a los desastres, duraderas y robustas.
- **Sección 8.0: Asegurar la construcción de Buena Calidad** – enumera los problemas clave para administrar durante la construcción para garantizar una buena calidad.

- **Sección 9.0: Otras Consideraciones Importantes para el Diseño** – analiza otras consideraciones importantes al diseñar viviendas de bahareque encementado, por ejemplo, la salud y la seguridad, el uso de los beneficiarios para el trabajo, el mantenimiento y la salud y el bienestar de los ocupantes.

El objeto de este informe técnico es ser utilizado como guía por arquitectos e ingenieros tanto en concepto como en diseño detallado. El informe siempre debe usarse junto con el buen juicio de ingeniería de la práctica y los códigos de práctica de ingeniería y arquitectura local para la vivienda, y no pretende reemplazarlos. En todos los casos, un ingeniero debidamente cualificado y con experiencia debe verificar el diseño final.

El diseño de viviendas siempre debe estar basado en sólidas evaluaciones económicas, sociales y ambientales de la comunidad objetiva. La construcción de viviendas de bahareque encementado no es una excepción. Algunos puntos de alto nivel a considerar al respecto también se incluyen en este informe. Sin embargo, dado que se piensa principalmente en un informe de diseño técnico, este no es el enfoque principal.

2.0 Introducción de la Vivienda de Bahareque Encementado

En esta sección se analizan los sistemas de viviendas tradicionales y los de bahareque encementado. Se presentan tres estudios de caso de viviendas de bahareque encementado en varios países y se proponen contextos apropiados para su adopción.

2.1 Antecedentes de la vivienda de bahareque tradicional

Bahareque es un sistema de construcción tradicional / vernácula que ha sido popular en muchos países en todo el mundo durante miles de años (Gutiérrez, 2004). Se conoce como wattle-and-daub en el Reino Unido, bahareque en El Salvador y Colombia, quincha en Perú, cuje en Cuba, pao pique en Brasil y tabiquería en otras partes de América Latina (Carazas-Aedo y Rivero-Olmos, 2013). En otros países del mundo también existen formas similares de viviendas tipo de vivienda de bahareque. A los efectos de este informe, todos estos derivados se denominarán bancos tradicionales. La Figura 1, la Figura 2, la Figura 3 y la Figura 4 muestran algunos ejemplos de vivienda bahareque tradicional.



Figura1: Una casa de bahareque rural tradicional bien construida en Armenia, Colombia (Kaminski, 2016)



Figura2: Vivienda de bahareque tradicional en Berlín, El Salvador. El render externo ha sido reemplazado por chapa de hierro corrugado (Kaminski, 2016)



Figura3: Vivienda de bahareque tradicional en Berlín, El Salvador. El render externo se ha desvanecido (Kaminski, 2016)



Figura4: Vivienda bahareque rural tradicional en El Salvador. No se ha aplicado render externo (Kaminski, 2016)

El bahareque tradicional consiste típicamente en una estructura de madera y / o bambú, revestida con una matriz de bambú partida o abierta (conocido como esterilla), caña, ramitas o tiras de madera, y finalmente se enyesa en estiércol o tierra, a veces con paja para mayor resistencia (López et al., 2004). Normalmente se eleva sobre una plataforma de piedra o ladrillo para reducir el riesgo de humedad. Tiene un buen alero y utiliza madera duradera o madera tratada y bambú (en América Latina se usa jabón de cerdo, un jabón tradicional hecho de grasa de cerdo y cenizas) (Carazas-Aedo & Rivero-Olmos, 2013). La Figura 5 ilustra algunas de las principales características estructurales de los sistemas bahareque tradicionales.

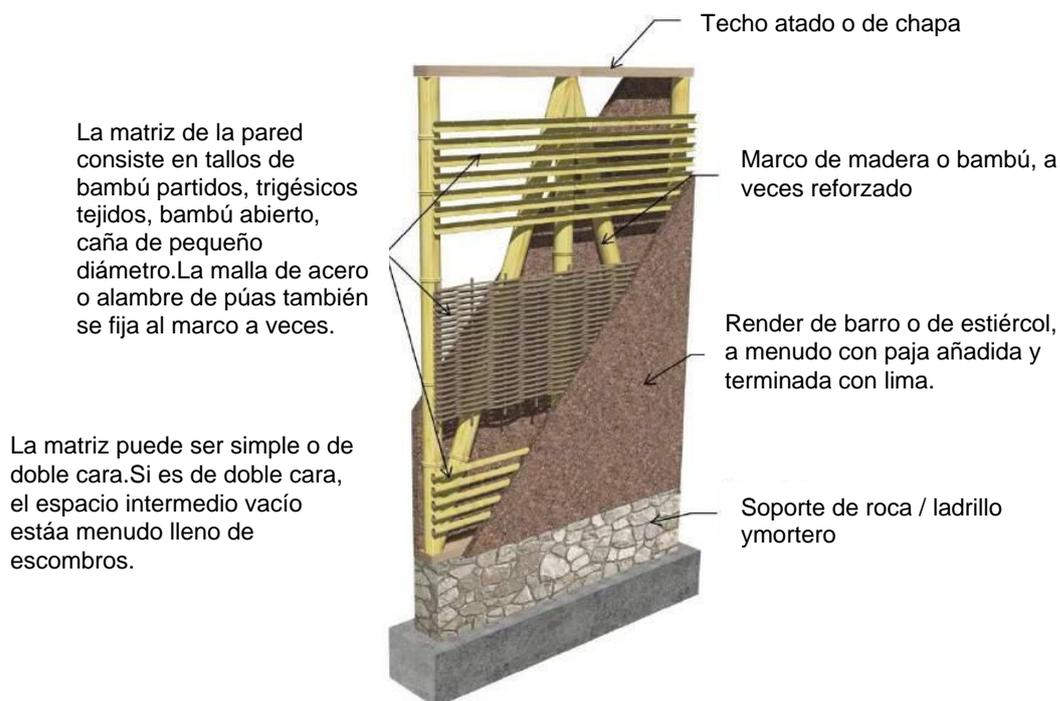


Figura 1: El bahareque tradicional en América Latina

Las acumulaciones de techo varían. En América Latina, históricamente, el techo se construyó con hojas de palma pero se cambió a tejas de arcilla más frías pero más pesadas después de la invasión española (López et al., 2004). Las láminas de hierro corrugado ahora se usan a veces para el techo en algunas áreas de América Latina. El material de la matriz de la pared varía de acuerdo con lo que fue más fácilmente disponible localmente, normalmente tiras de madera de frondosas, bambú o caña. La Figura 6, la Figura 7, la Figura 8, la Figura 9 y la Figura 10 presentan algunos de los tipos de matriz, y la Figura 11 ilustra un relleno de bahareque tradicional sólido típico. El bahareque tradicional puede construirse en diferentes grados de formalidad, desde viviendas rurales informales de una sola planta que necesitan mantenimiento frecuente hasta viviendas urbanas de dos pisos, que pueden considerarse relativamente lujosas.

Se ha demostrado que el bahareque tradicional propiamente construido y mantenido posee buena unidad estructural y flexibilidad, y por lo tanto tiene un grado sorprendentemente alto de resistencia a los terremotos (Gutiérrez, 2000; López et

al., 2004). Algunas formas de bahareque tradicional también pueden ser relativamente ligeras en comparación con los sistemas de construcción moderna, como el hormigón armado con relleno de mampostería. Los edificios más ligeros experimentan cargas de terremotos más bajas, por lo tanto, es menos probable que experimenten daños y colapso; si se produce un colapso, es menos probable que los edificios más ligeros causen daños.

Sin embargo, el bahareque tradicional requiere un estándar razonable de construcción, detallado y mantenimiento para no deteriorarse en caso de ataque de hongos o insectos. Además, los tratamientos tradicionales utilizados no son completamente efectivos y el daño debido a las termitas y los escarabajos del barrenador es aún común (ambos son un riesgo significativo en muchas partes del mundo - ver la Sección 4.0). Debido a esto, el mantenimiento frecuente es esencial, que incluye renderización y pintura periódica, reemplazo de elementos dañados y control de ingreso de agua; sin esto, el bahareque tradicional generalmente se vuelve muy vulnerable a los terremotos después de 5-10 años (López et al., 2004) . El terremoto de Muisne en Ecuador el 16 de abril de 2016, por ejemplo, ilustró esto claramente, ya que algunas casas tradicionales de bahareque fueron severamente dañadas o colapsaron principalmente debido a daños por putrefacción e insectos (Franco et al., En prensa).



Figura 6: Esterilla (Colombia) o caña picada (Ecuador): láminas de bambú formadas por la apertura / división física de un culmo de gran diámetro a lo largo y luego desenrollado (Kaminski, 2016)



Figura 7: Esterilla (Colombia) o caña picada (Ecuador): láminas de bambú formadas por la apertura / división física de un culmo de gran diámetro a lo largo y luego desenrollado (Kaminski, 2016)



Figura 8: Reglilla (Colombia) o latillas (Ecuador): listones de bambú formados cortando un tallo de gran diámetro a lo largo de su longitud en tiras (Kaminski, 2016)



Figura 9: Caña brava (Costa Rica) o vara de castilla (El Salvador): Caña de bambú de diámetro pequeño (Kaminski, 2016)

Otra desventaja importante del bahareque tradicional es que es propenso a albergar insectos, especialmente 'el chinche besucona' o chinche, como se lo conoce en América Latina. Este pequeño insecto mordedor puede transmitir la enfermedad de Chagas, una enfermedad potencialmente mortal que se estima afecta actualmente a 10 millones de personas en todo el mundo, principalmente en América Latina (OMS, 2010).

No se conoce que el bahareque tradicional cuente con el respaldo de los códigos sísmicos en todo el mundo y, por lo tanto, generalmente no atrae la atención de organizaciones benéficas potenciales para patrocinar proyectos de vivienda.



Figura 10: Bastones de madera dura de madera unidos entre sí para formar una matriz rectangular que se extiende entre montantes verticales más grandes (Kaminski, 2016)



Figura 11: Primer plano del material de relleno utilizado en el bahareque tradicional sólido en El Salvador - tenga en cuenta las piezas de tejas de arcilla añadidas al suelo (Kaminski, 2016)

2.2 Vivienda de Bahareque Encementado

En los últimos 40 años ha habido una tendencia creciente de construir viviendas baratas ("bahareque encementado" en español) como una forma de bajo costo para el desarrollo y contextos posteriores a desastres en países en desarrollo (Kaminski, 2013). Esta vivienda adopta la forma vernácula de bahareque y la desarrolla para reducir o eliminar las deficiencias naturales del bahareque y, en general, mejorarlo con materiales modernos, conocimiento y técnicas de construcción. El bahareque diseñado correctamente tiene típicamente las siguientes características (Figura 12 y Figura 13):

- **Fundaciones:** zapatas de hormigón armado.
- **Soporte de elevación de la base de la pared:** hormigón armado o soporte de mampostería reforzada.
- **Estructura de pared primaria:** columnas de madera o bambú, vigas de pared, vigas, vigas de pisos y vigas, unidas por conexiones mecánicas modernas, como pernos, clavos o tornillos. En algunos sistemas, se usa arriostramiento, especialmente en edificios de dos pisos. La madera se utiliza normalmente para la suela y la placa de la cabeza. La membrana a prueba de humedad separa el marco del soporte vertical.
- **Sistema de pared:** una matriz que consiste en caña, bambú de diámetro pequeño, listones de bambú o esteras de bambú se clava a la estructura de a pared de madera o bambú y la malla de pollo de acero galvanizado clavado a la matriz actúa como refuerzo. El refuerzo se enyesa luego con mortero de cemento, a veces con cal añadida. En algunos sistemas, una malla de acero expandida como Expamet (2016) actúa como la matriz y el refuerzo, y esto se clava directamente al marco. El sistema más común son los tacos de bambú de gran diámetro con una suela de madera y una placa de cabeza, con esterilla de bambú abierta que forma la matriz. El sistema de muros es estructural y forma las particiones internas y la fachada externa. La matriz y el mortero de cemento se pueden fijar a solo uno o ambos lados de los postes; este último es más común.
- **Pisos superiores:** vigas de madera o bambú, con pisos hechos de madera contrachapada, esteras de bambú con concreto vertido en la parte superior, o tablas de madera.
- **Techo:** vigas y vigas de madera o bambú forman el marco, unidos por conexiones mecánicas modernas tales como pernos, clavos o tornillos, con un techo que cubre láminas de fibra de metal o cemento, o en algunos casos tejas de arcilla.
- **Número de plantas:** solo uno o dos: más de dos pisos no se recomienda por fuego y razones estructurales.

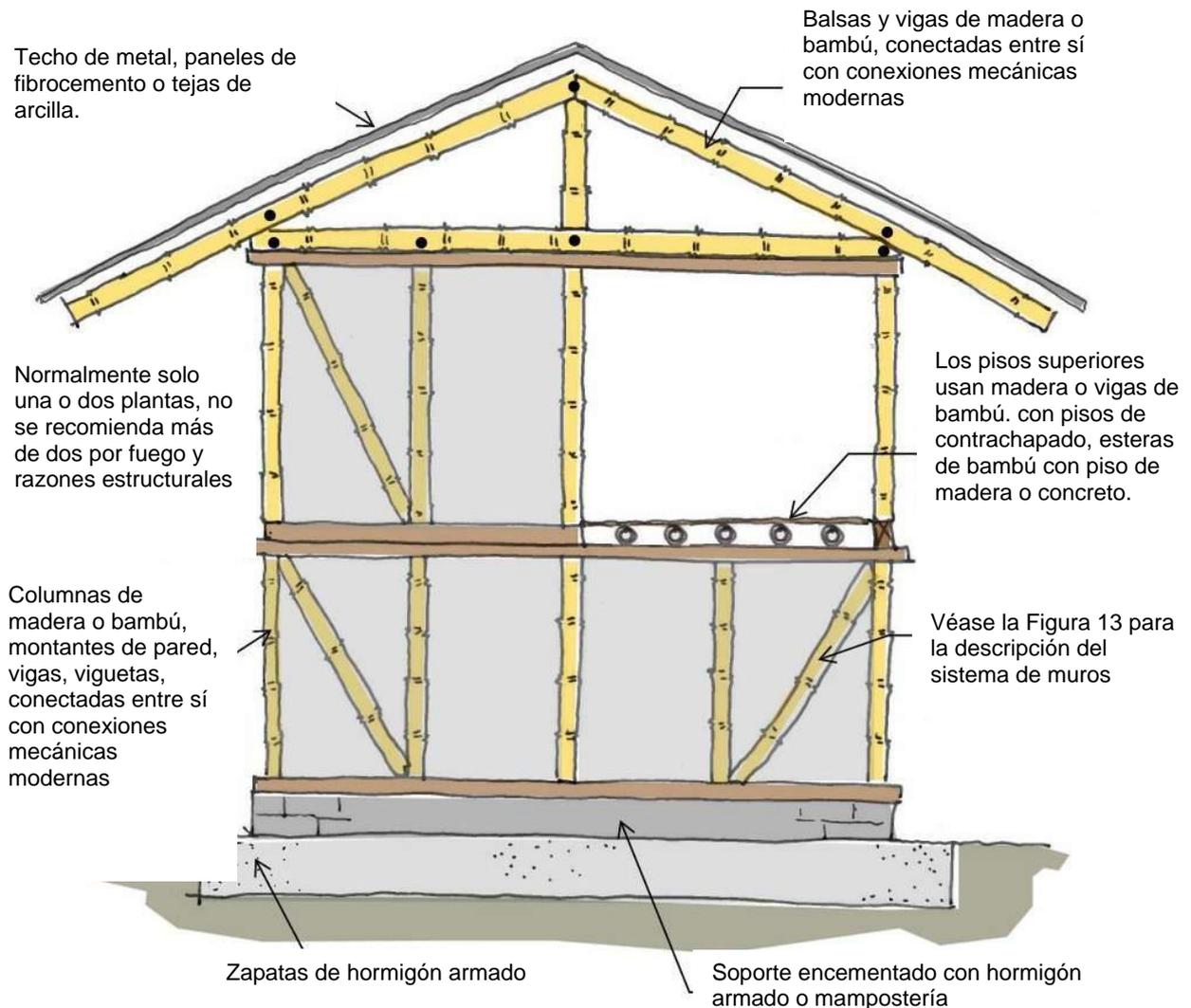


Figure 12: Characteristics of modern well-designed engineered bahareque housing: overview

En todos los casos, la madera utilizada es madera duradera o tratada, y el bambú es tratado.

Con los cambios descritos anteriormente, junto con una buena construcción y mantenimiento, este tipo de sistema estructural es una mejora significativa sobre el bahareque tradicional, en términos de:

1. **Durabilidad:** el sistema puede tener una vida útil de diseño superior a 50 años (véase Sección 4.0).
2. **Rendimiento estructural en terremotos y vientos:** el sistema puede superar los requisitos de diseño de terremotos en zonas sísmicas altas (véase Sección 6.3).
3. **Higiene:** el uso del revoque de mortero de cemento, y un piso a base de cemento proporciona un acabado duradero que es más fácil de limpiar proporcionando así un entorno interno más higiénico para los ocupantes.

4. **Estado:** el sistema se percibe como un hogar de aspecto moderno, importante para las comunidades de grupos socioeconómicos más bajos que aspiran a tener lo que perciben como una casa mejor y más duradera, y que refleja un mayor nivel de prosperidad en comparación con sus vecinos (Gutiérrez, 2000; López et al., 2004; Kaminski, 2013).

En comparación con otras formas modernas de viviendas de bajo costo actualmente construidas en todo el mundo tanto en contextos de desastre como de desarrollo, se ha demostrado que el bahareque encementado es de igual o menor costo (ver Sección 2.3), tiene mayor resistencia sísmica (ver Sección 2.3 y 6.3), credenciales de sostenibilidad superiores (consulte la Sección 3.0), y puede usar más materiales locales, lo que brinda un beneficio más directo a las comunidades locales (consulte la Sección 2.3).

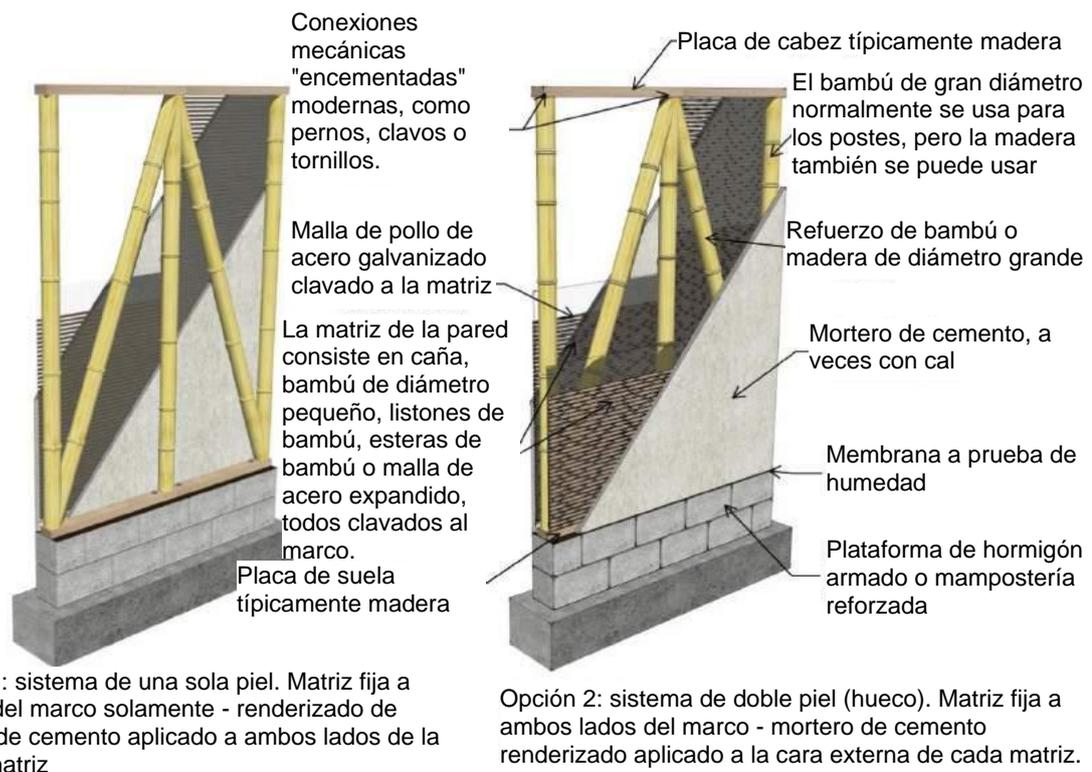


Figura 13: Características de la vivienda de bahareque moderna y bien diseñada: detalles del sistema de muros

2.3 Estudios de caso

Los siguientes son algunos ejemplos de viviendas de bahareque encementado construidas en varios países del mundo.

Proyecto Nacional de Bambú, Costa Rica

En 1988, el Proyecto Nacional de Bambú de Costa Rica (PNB) (Gutiérrez, 2000) desarrolló e implementó bahareque encementado como una forma de vivienda más económica y más sostenible. Debido a que no había una tradición significativa de construir con bambú, el proyecto involucró una transferencia de tecnología de cultivo

y diseño con caña y bambú de Colombia, y en total, hasta 1995, alrededor de 4000 de estas casas de un solo piso de bajo costo fueron construidas para comunidades pobres que habían vivido en viviendas deficientes o estrechas en todo el país. Los diseños variaban y usaban una madera dura naturalmente duradera o guadua tratada para el marco, con una matriz de esterilla o caña brava (una caña fuerte) para la matriz de la pared, cubierta con mortero de cemento, con un techo ligero de lámina de hierro corrugado. La guadua se trató con boro mediante el método de desplazamiento de la savia boucherie modificado (Sección 4.4), y la caña brava y la esterilla también se trataron con boro, pero por el método de difusión por inmersión. Se implementó una prefabricación de los paneles, lo que aceleró el proceso de construcción en el sitio.

Se llevaron a cabo pruebas de pared en plano en la Universidad de Costa Rica para determinar la capacidad de corte de las paredes para resistir el viento y los terremotos (Mendoza y Villalobos, 1990), y las pruebas demostraron que la capacidad era mayor que el diseño requisito. Se observó una mayor confirmación de la fortaleza de este tipo de paneles cuando varias casas recién construidas sobrevivieron a un terremoto Magnitud Mw 7.8 en Limón en 1991, con intensidades MMI locales hasta IX (González y Gutiérrez, 2003).



Figura 14: casas de PNB en Costa Rica en construcción en la década de 1980 (Chaves, 2016)

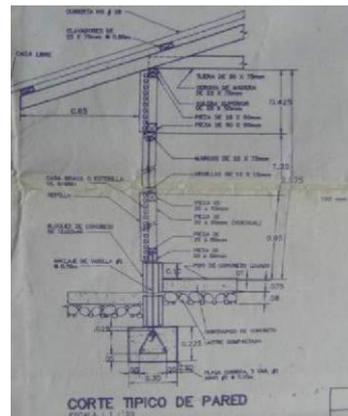


Figura 15: Sección típica a través de la casa PNB en Costa Rica (Chaves, 2016)



Figura 16: casa PNB en Milano, Costa Rica - foto tomada a más de 20 años desde la construcción (Kaminski, 2016)



Figura 17: Vista interior de la casa de PNB en Milano, Costa Rica - foto tomada a más de 20 años de la construcción (Kaminski, 2016)

Una revisión independiente de 26 de estas casas en 2012, es decir, 12-24 años después de la construcción, concluyó que eran suficientemente apreciadas por los beneficiarios como para haber cambiado muchas de sus ideas preconcebidas sobre la construcción con bambú. La mayoría de las casas parecían estar en excelentes condiciones y los métodos de tratamiento tenían éxito (Kaminski, 2013).

Vivienda del terremoto en la región cafetalera, Colombia

En 1999, un terremoto de Magnitud Mw 6.4 azotó la región cafetalera de Colombia, causando que 300,000 personas quedaran sin hogar (Tistl y Velásquez, 2002). Después de este evento, se notó que mientras los edificios de mampostería y concreto reforzado más modernos sufrían daños significativos y, a menudo, se derrumbaban, el estilo bahareque vernáculo y la moderna vivienda de bambú habían tenido un rendimiento significativamente mejor (Trujillo, 2007). Como tal, varias ONG y agencias internacionales de desarrollo implementaron proyectos de reconstrucción de viviendas que utilizaban principalmente bambú para la estructura del edificio siguiendo el estilo bahareque, pero con información de ingeniería y detalles modernos (Figura 18, Figura 19, Figura 22, Figura 23, Figura 20 y Figura 21). Este interés estimuló a la Asociación Colombiana de Ingeniería de Terremotos (AIS) a realizar investigaciones sobre bahareque encementado, que incluyó una serie de pruebas de cizallamiento en los paneles de pared; los resultados de las pruebas fueron en general similares a los obtenidos en Costa Rica. A continuación, se escribió el Manual de construcción para viviendas sismorresistentes utilizando Mortared Bahareque (Prieto et al., 2002), junto con un nuevo capítulo en el código de diseño y construcción colombiano - NSR -98 (AIS, 2002), a la que se diseñaron algunas de las nuevas casas de bambú (aunque algunos de los proyectos se implementaron antes de que se publicara esta nueva investigación). Las casas eran una mezcla de una y dos plantas, y variaban de separadas a aterrazadas. Los sistemas de paredes también variaron e incluyeron guadua y / o marcos de madera reforzados y sin arriostamiento, y usaron esterilla o malla de acero expandido para la matriz. La mayoría, si no todos, del bambú utilizado para los diferentes tipos de casas se trató de boro y se aplicaron más comúnmente mediante inmersión o inyección.



Figura 18: Viviendas Bahareque construidas después del terremoto en Barcelona, cerca de Armenia (Kaminski, 2016)



Figura 19: Viviendas Bahareque construidas después del terremoto en Montenegro, cerca de Armenia (Kaminski, 2016)



Figura 20: viviendas Bahareque construidas después del terremoto en Montenegro, cerca de Armenia (Kaminski, 2016)



Figura 21: Bahareque encementado en Ricaurte en el valle del Magdalena (Kaminski, 2016)

Una revisión independiente de 29 de estas casas en 2012 (alrededor de 10-12 años después de la construcción) concluyó que había opiniones encontradas sobre estas casas por los beneficiarios (Kaminski, 2013). Si bien las casas en general parecían estar en buenas condiciones, muchas más paredes y elementos estructurales estaban expuestos a la lluvia torrencial que las casas de PNB, que parecían ser la causa del ingreso de agua visible y la corrosión de la malla de pollo en algunas casas - sugiriendo que en algunos lugares podría haber más daños ocultos por podredumbre de la matriz de bambú dentro de las paredes. Algunos beneficiarios también se quejaron de los bichos que viven dentro de las cavidades de la pared y corriendo por los tejados. Donde la vivienda estaba en buenas condiciones sin ingreso de agua o alimañas, las opiniones fueron muy positivas.



Figura 22: viviendas Bahareque construidas después del terremoto en Barcelona, cerca de Armenia (Kaminski, 2016)



Figura 23: viviendas Bahareque construidas después del terremoto en Montenegro, cerca de Armenia (Kaminski, 2016)

Vivienda REDES, El Salvador

Desde 2012, Arup, en conjunto con la ONG salvadoreña llamada Fundación Salvadoreña para la Reconstrucción y el Desarrollo (REDES), han explorado la posibilidad de construir viviendas de bajo costo utilizando materiales más sostenibles y locales, con el fin de reducir su impacto ambiental y apoyar a la comunidad local (Kaminski et al., 2016a). Los objetivos eran producir una tecnología y diseño de vivienda viable que fuera:

- Bajo costo.
- Resistente a los desastres.
- Duradero y resistente a las termitas.
- Térmicamente cómodo.
- Fácil de construir por mano de obra semi-calificada.
- Fácil de mantener por mano de obra no calificada.
- Seguro de construir.
- Culturalmente aceptable.
- Flexible en diseño.
- Construido con materiales de origen comunitario.
- Mantenimiento mínimo requerido.
- Tenía los diseños y usos apropiados de la habitación.

El diseño debía estar disponible para su uso tanto en contextos de desarrollo a largo plazo como posteriores a desastres para reemplazar viviendas existentes deficientes o deterioradas en áreas rurales y periurbanas de todo El Salvador.

Después de revisar el mercado local y los estilos de vivienda tradicionales y modernos, la construcción bahareque tradicional local se identificó como una solución que podría mejorarse, al convertirla en una forma de vivienda más duradera y más sólida. El diseño que se desarrolló es un edificio de una sola planta y cuatro habitaciones de 6 mx 6 m, con dos habitaciones, una sala de estar y una cocina (Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 27). Los cimientos de la casa eran una delgada losa de hormigón armado sobre vigas de tierra de hormigón armado bajo las paredes. Dos tramos de bloques reforzados huecos elevan el marco, que está hecho de maderas de pino importadas estructuralmente medidas y tratadas a presión de 2 "x4", conectadas entre sí con clavos y flejes de acero. Las paredes estaban envueltas en una delgada malla de pollo galvanizada en ambos lados, y vara de castilla (también conocida como caña brava (*Gynerium sagittatum*) - un tipo local de caña de bambú de aproximadamente 25 mm de diámetro y hasta 6 m de largo (Chan, 2014)) fue clavado en el marco. La vara de castilla provenía de agricultores locales y fue tratada en el sitio contra insectos con boro. El revoque de mortero de cemento se enlució a ambos lados de las paredes para formar las paredes de corte de 60 mm de espesor. No se agregó arriostamiento.



Figura 24: Vivienda de caña y madera, El Salvador - antes de la aplicación del render. Tenga en cuenta los grandes voladizos en todos los lados y el marco elevado en una membrana a prueba de humedad (Kaminski, 2016)



Figura 25: Vivienda de caña y madera, El Salvador - completa (Kaminski, 2016)



Figura 26: Vivienda de caña y madera, El Salvador - completa (Kaminski, 2016)



Figura 27: Vivienda de caña y madera, El Salvador - completa. Tenga en cuenta la parte superior, la membrana a prueba de humedad y el saliente grande, todo lo que protege la pared de la humedad y la lluvia (Kaminski, 2016)

Las mitades inferiores de las paredes fueron pintadas con pintura impermeable para protegerlas de la lluvia torrencial. El techo consistía en láminas de paneles de cemento liviano atornilladas a las vigas y vigas de madera y tenía un gran saliente en todos los lados. En comparación con el trabajo en bloque reforzado, que actualmente se usa ampliamente como la vivienda de bajo costo elegida por el gobierno, las ONG y las propias comunidades, esta nueva forma de vivienda utiliza hasta un 40% menos de cemento y acero. Las materias primas para la vivienda también son más ligeras en general y, por lo tanto, son más fáciles y baratas de transportar a zonas más rurales.

Para probar las paredes estructuralmente, se llevó a cabo una serie de pruebas de cizallamiento cíclico en el Imperial College London utilizando diferentes características geométricas y materiales (Málaga-Chuquitaype et al., 2014). Las pruebas mostraron que esta forma de estructura excedía los requisitos de carga

para las altas cargas sísmicas de El Salvador (Kaminski et al., 2015). El último detalle adoptado utiliza dos capas de malla de pollo, una a cada lado de la caña con ataduras de alambre de acero (Davies, 2014), eliminando así cualquier riesgo de desprendimiento en grandes terremotos y mejorando la resistencia en el plano de la pared, mientras que reduciendo aún más la importancia de la calidad del mortero de cemento, que puede ser difícil de controlar.

Para el techo, se seleccionó un marco de madera de doble paso simple, que también sigue el estilo bahareque tradicional. En lugar de utilizar las baldosas de arcilla tradicionales pesadas para el recubrimiento del techo, se utilizó un material de láminas de fibrocemento de cemento corrugado.

Como una verificación final del comportamiento sísmico del diseño, se construyó un modelo a escala real de 3 mx 3 m de una habitación de la casa en una mesa de batidos en la Universidad Mariano Gálvez, Ciudad de Guatemala (Beteta et al., 2015). La muestra fue sometida a cargas de diseño sísmico hasta 1.5 veces mayores que los requisitos del código, y experimentó daños insignificantes. Estas observaciones son similares a otras pruebas inéditas de Colombia, que muestran viviendas bahareque de dos pisos con excelente desempeño en mesas de batido.

Al finalizar dos prototipos de la casa en 2012, se llevó a cabo una evaluación estructural y sociológica del diseño (Bunclark, 2013), que arrojó resultados muy positivos. Además, a todos los beneficiarios les gustó el diseño, y algunos ahora lo prefieren a la mampostería reforzada.

Una selección de dibujos de las casas se presentan en el Apéndice A

2.4 ¿Cuándo está adecuada la vivienda de bahareque encementado?

Las siguientes preguntas se deben considerar al decidir si el bahareque encementado es adecuado para la vivienda en un contexto particular

1. **¿Hay una cantidad suficiente de bambú y / o madera de fuentes sostenibles?** Esto hace que el uso compartido de ingeniería sea más adecuado para países con suministros abundantes de estos materiales.
2. **¿Hay aceptación de la comunidad del uso de bambú / madera para la vivienda?** Muchas culturas consideran el bambú y la madera como el material de un hombre pobre. Sin embargo, los estudios han demostrado que esta percepción puede modificarse (Kaminski et al., 2016a).
3. **¿Los ocupantes son financieramente capaces y están dispuestos a mantener las casas?** La vivienda de bahareque encementado puede diseñarse para ser muy duradera, pero al igual que la carcasa de madera generalmente necesita un poco más de cuidado y mantenimiento a lo largo de su vida útil.

4. **¿El tipo de vivienda se construirá en una o dos plantas?** Bahareque encementado es más adecuado para viviendas de una o dos plantas.
5. **¿Existe riesgo de inundación?** Bahareque encementado es poco probable que sea apropiado para las áreas con riesgo de inundación.

3.0 Diseño para la Sostenibilidad

En esta sección se analiza el carbono incorporado y el impacto ambiental de los materiales clave utilizados para la construcción de viviendas Bahareque, y se propone cómo el diseñador puede maximizar la sostenibilidad de la casa.

Se ha demostrado que la construcción de viviendas de bahareque es ambientalmente superior a otras formas de vivienda, como la albañilería, con tan poco como la mitad del carbono incorporado y la capacidad de construirse en gran parte utilizando materiales sostenibles de crecimiento rápido como el bambú. Su sostenibilidad se puede maximizar asegurando que el bambú y la madera se extraigan de una fuente local y sostenible, minimizando el grosor del mortero de cemento y maximizando el uso de reemplazos de cemento como la cal. Deben utilizarse productos químicos de tratamiento no tóxicos siempre que sea posible para el bambú y la madera.

3.1 Introducción

Se ha demostrado que la construcción de viviendas de bahareque es superior a muchas otras formas de viviendas permanentes modernas en términos de sostenibilidad y su impacto ambiental, especialmente los sistemas de viviendas que utilizan materiales tales como mampostería y hormigón. Las dos razones principales para esto son *bahareque* encementado

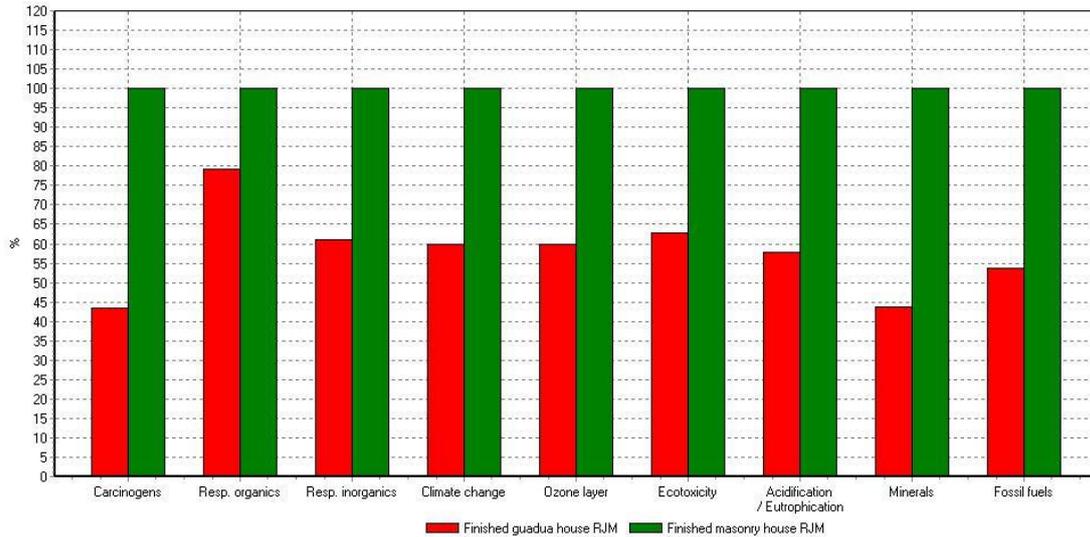
- Utiliza una gran cantidad de materiales naturales, a saber, bambú y madera, que:
 - No requiere un procesamiento significativo antes de su uso.
 - Son relativamente ligeros y, por lo tanto, son fáciles de transportar.
 - Efectivamente "encierra" el carbono durante la vida útil de la estructura, lo que ayuda a actuar como un sumidero de carbono. El bambú, en particular, es un buen sumidero de carbono: los estudios han demostrado que un bosque de bambú gestionado acumula alrededor de 300 toneladas de carbono por hectárea después de 60 años, en comparación con alrededor de 170 especies de árboles de rápido crecimiento como el abeto chino (Kuehl y Yiping, 2012).
- Es en general un sistema de construcción ligera y eficiente, donde las paredes se duplican como divisiones y estructura, reduciendo la cantidad de material necesario.

Como estudio de caso, Murphy et al. (2004) realizaron una evaluación del ciclo de vida (LCA) de una casa de bahareque encementado con el fin de evaluar en detalle su impacto ambiental. La casa ejemplo fue una construida a principios de la década de 2000 en Colombia, como parte del programa de reconstrucción de terremotos de 1999 (Sección 2.3).

En este estudio, el impacto ambiental de la casa se calculó y se comparó con el de una casa hipotética construida con el mismo estándar utilizando la construcción de mampostería convencional. Los resultados mostraron que la casa de bahareque encementado tenía alrededor de la mitad del impacto ambiental de la casa

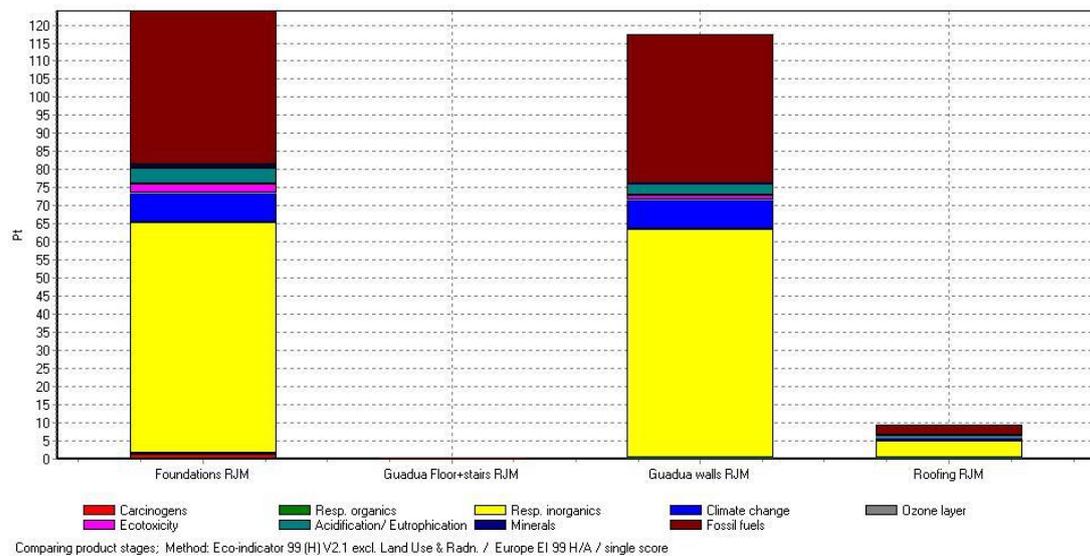
convencional (Figura 28). Los elementos del edificio que más contribuyeron a su impacto ambiental (95%) fueron los materiales utilizados para la cimentación (arena, áridos gruesos, cemento y armaduras de acero) y el revoque de las paredes (arena y cemento) (Figura 29).

Las siguientes secciones exploran los impactos corporales y de carbono incorporados de la construcción de bahareque en más profundidad.



Comparing 1 p assembly 'Finished guadua house RJM' with 1 p assembly 'Finished masonry house RJM'; Method: Eco-indicator 99 (H) V2.1 excl. Land Use & Radn. / Europe EI 99 H/A / characterization

Figura 28: Impacto ambiental relativo de una casa de bahareque y mampostería diseñada (Murphy et al., 2004)



Comparing product stages; Method: Eco-indicator 99 (H) V2.1 excl. Land Use & Radn. / Europe EI 99 H/A / single score

Figura 29: Impacto ambiental relativo de los elementos de una casa de bahareque encementado (Murphy et al., 2004)

3.2 Carbono incorporado y el impacto ambiental de la vivienda de bahareque encementado

El carbono incorporado de un material es la cantidad total de CO₂ emitido a lo largo de su ciclo de vida. El impacto ambiental de un material es cualquier efecto que un material pueda tener, ya sea positivo o negativo, en el entorno circundante a lo largo de su ciclo de vida.

Hay muchas maneras de definir el ciclo de vida de un material y muchas normas reconocidas internacionalmente disponibles (ISO, 1997; Eco-Indicators, 2000). Sin embargo, el estándar europeo de la industria de la construcción es EN 15978 (BSI, 2011). Las etapas clave se pueden dividir a grandes rasgos en lo siguiente:

- a) **Abastecimiento de materia prima:** el impacto debido a la obtención / excavación / cosecha de los materiales para la construcción.
- b) **Tratamiento:** el impacto debido al procesamiento de los materiales listos para la construcción.
- c) **Transporte:** el impacto del transporte de los materiales en cada etapa de la cadena de suministro.
- d) **Construcción:** el impacto de construir el edificio.
- e) **Uso:** el impacto de usar y mantener el edificio.
- f) **Fin de la vida:** el impacto de la eliminación del edificio al final de la vida.
- g) **Reciclar y reutilizar:** el impacto del reciclaje y la reutilización de los materiales en el edificio.

Es importante adoptar un enfoque holístico y considerar el ciclo de vida completo de todos los materiales utilizados para la construcción, a fin de evitar cualquier enfoque único de las evaluaciones ambientales y de sostenibilidad.

Cada una de las etapas anteriores se consideran a continuación para los componentes clave de la vivienda de bahareque encementado, es decir, el marco, las paredes, los pisos, los acabados, etc.: bambú / caña tratada, madera, mortero de cemento, soporte, conexiones de acero y componentes. Esta sección intencionalmente no discute los materiales utilizados para hacer los cimientos o los acabados del techo, ya que son básicamente idénticos en todas las formas de vivienda (todas las casas requieren cimientos, que normalmente son de concreto reforzado, y todas las casas requieren un techo duradero e impermeable) .

Elementos de bambú / caña tratados

El bambú tratado (y / o el bastón) normalmente constituye una parte importante de la vivienda de bahareque encementado. Su carbono incorporado y su impacto ambiental se analizan en la Tabla 31.

Abastecimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Poco impacto de carbono incorporado. • Debería cosecharse en plantaciones bien administradas (Kuehl y Yiping, 2012). Forest Stewardship Council (FSC, 2016) o plantaciones certificadas similares son muy raro, por lo que las evaluaciones de cuán bien manejada es una plantación pueden ser subjetivas. La sobreexplotación de bambú / caña puede provocar la muerte del grupo y la reducción de la cubierta de la planta, lo que a su vez puede conducir a la erosión del suelo. Tenga en cuenta que algunas especies de bambú (especialmente las especies que corren) pueden ser agresivas e invasivas (Shyama, 2016), y estas fuentes deben revisarse para asegurarse de que no están contribuyendo a dañar la flora local.
Tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado depende principalmente de si se requiere energía para secar el bambú o calentar el líquido de tratamiento; ninguno es necesario, sin embargo, ambos acelerar el proceso. Un horno solar puede reducir la energía requerida para el secado, al igual que el uso de recortes de bambú para un horno de cocción.
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado depende completamente de la distancia de la plantación: los estudios han demostrado que por debajo de 200 km el impacto es relativamente bajo.
Construcción	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado generalmente es muy bajo ya que se utilizan pocas herramientas o maquinaria.
Uso	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado depende del mantenimiento requerido, que se puede mantener al mínimo diseñando para la durabilidad, según la Sección 4.0. • El bambú tratado con boro es seguro de tocar.
Fin de la vida	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado varía dependiendo de si el bambú se quema como un biocombustible o se utiliza para disparar ladrillos, por lo tanto, recuperando energía, o si simplemente se deja pudrir, en cuyo caso el carbono se libera a la atmósfera. • El bambú tratado con boro normalmente puede enterrarse o compostarse de forma segura. Sin embargo, el bambú tratado con químicos a base de cobre es más difícil de eliminar de manera segura, no debe quemarse y, en general, debe ser enterrado. • Cualquier solución residual del tratamiento con boro puede diluirse con seguridad y usarse como fertilizante. Sin embargo, el uso excesivo o simplemente el vertido a los ríos puede tener impactos perjudiciales, como la eutrofización de los ríos.
Reciclar y reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> • El bambú no puede reciclarse de manera realista, pero puede reutilizarse, por ejemplo, para construir otra cosa, reduciendo así su carbono incorporado.

Tabla 1: Carbono incorporado y el impacto ambiental del bambú y la caña utilizados en la construcción de viviendas Bahareque

Elementos de madera

La madera se usa a menudo para algunas partes de la vivienda de bahareque encementado, especialmente para la suela y la placa de la cabeza de las paredes, las vigas del piso y las tablas del piso. Su carbono incorporado y su impacto ambiental se analizan en la Tabla 2.

Abastecimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Poco impacto de carbono incorporado • Debería cosecharse en plantaciones bien administradas. Hay muchos consejos de administración forestal (FSC, 2016) y un programa para el respaldo del bosque para aquellos que no lo son, pueden variar mucho en lo bien que se manejan. Existen muy pocas FSC o plantaciones de madera de frondosas certificadas similares en todo el mundo; estas varían aún más en lo bien que se las maneja. El FSC y PEFC brindan orientación sobre lo que es una plantación de madera dura bien manejada. • La sobreexplotación de la madera puede provocar la deforestación.
Tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado durante el procesamiento de la madera es más alto que el bambú. Cortar y cepillar madera usa un poco de energía. Sin embargo, la mayoría se usa durante el proceso de secado del horno, que es una parte esencial de la mayoría de los procesos de tratamiento químico para maderas blandas. Las maderas duras normalmente se usan verdes o secas de forma natural, por lo tanto, consuma menos energía para procesarlas.
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado depende completamente de la distancia de la plantación y el aserradero
Construcción	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado generalmente es muy bajo ya que se utilizan pocas herramientas o maquinaria.
Uso	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado generalmente es muy bajo ya que se utilizan pocas herramientas o maquinaria. • La seguridad de la madera tratada al tacto depende de qué sustancia química se usó para tratarla.
Fin de la vida	<ul style="list-style-type: none"> • El carbono incorporado varía, dependiendo de si la madera se quema como biocombustible o si se usa para encender ladrillos, por lo tanto, recuperando energía, o si simplemente se deja pudrir, en cuyo caso el carbono se libera a la atmósfera. • La madera tratada con productos químicos a base de cobre es más difícil de eliminar de forma segura, no debe quemarse y, en general, debe enterrarse.
Reciclar y reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> • La madera no puede reciclarse de manera realista, pero puede reutilizarse, por ejemplo, para construir otra cosa. Esto reduciría su carbono incorporado.

Tabla 2: Carbono incorporado y el impacto ambiental de la madera utilizada en la construcción de viviendas Bahareque

Materiales cementosos, incluido el mortero de cemento, rinde y levanta

El revoque de mortero de cemento y el soporte vertical (que normalmente es hormigón armado o mampostería) utilizan una cantidad significativa de cemento, arena y agregado grueso, que constituyen la mayor parte del impacto de la energía incorporada. Su carbono incorporado y su impacto ambiental se analizan en la Tabla 3.

Abastecimiento	<ul style="list-style-type: none">• El aprovisionamiento de los componentes del cemento tiene un impacto de carbono incorporado debido a la maquinaria utilizada para la minería.• El uso de reemplazos de cemento como cenizas de combustible pulverizado y escoria granulada de alto horno redujo significativamente el impacto de la energía incorporada, ya que estos son productos de desecho. Parte del cemento también se puede reemplazar con cal, que también tiene un bajo impacto de energía incorporada. Los agregados tienen diferentes niveles de impacto dependiendo de su fuente. Los áridos gruesos más comunes se extraen. Este proceso no consume mucha energía. Sin embargo, los agregados secundarios o reciclados se pueden usar para compensar un porcentaje de este impacto.
Tratamiento	<ul style="list-style-type: none">• tiene un impacto incorporado significativamente alto, debido al proceso de fabricación requerido. Este impacto es relativamente constante, independientemente de dónde se encuentre• La fabricación de bloques de hormigón no es un proceso intensivo en carbono, ya que normalmente no se requiere energía para calentar.
Transporte	<ul style="list-style-type: none">• El consagrado carbono depende de la distancia de la planta al sitio y puede variar ampliamente. Sin embargo, el abastecimiento y el tratamiento generalmente utilizan mucho más energía.
Construcción	<ul style="list-style-type: none">• Generalmente muy bajo, ya que se usan pocas herramientas o maquinaria.
Uso	<ul style="list-style-type: none">• El carbono incorporado depende del mantenimiento requerido, que se puede mantener al mínimo diseñando para la durabilidad, según la Sección 4.0.
Fin de la vida	<ul style="list-style-type: none">• Al final de la vida, el mortero de cemento se rinde y normalmente el vertedero se desecha junto con el relleno sanitario, por lo que no se recupera energía. Sin embargo, como estos son materiales inertes, no emiten gases al final de la vida.
Reciclar y reutilizar	<ul style="list-style-type: none">• El mortero de cemento se procesa o los materiales utilizados para la construcción no se pueden reciclar ni reutilizar de manera realista.• El concreto se puede triturar para usarlo como agregado o relleno secundario.

Tabla 3: Carbono incorporado y el impacto ambiental de los materiales cementantes utilizados en la construcción de viviendas de bahareque

Conexiones de acero y componentes

Los elementos de acero en general tienen un alto impacto energético incorporado y, por lo tanto, su uso debe minimizarse. Sin embargo, algunas conexiones de acero son normalmente esenciales ya que estas son las que proporcionan bahareque encementado con fuerza y ductilidad en terremotos y vientos fuertes (Sección 6.3).

3.3 Resumen de recomendaciones para diseñar para la sostenibilidad

Desde una perspectiva ambiental, la vivienda de bahareque encementado ha demostrado ser superior a otras formas de vivienda, como la albañilería. El siguiente es un resumen de las recomendaciones clave para minimizar el carbono incorporado de esta vivienda y reducir su impacto ambiental:

- Asegúrese de que la madera y el bambú se extraigan de una fuente sostenible.
- Utilice fuentes locales de material siempre que sea posible para reducir la energía utilizada en el transporte: el transporte a larga distancia por barco puede ser más eficiente que por carretera.
- Minimice tanto como sea posible el tamaño y la extensión de los cimientos, y maximice las alternativas más sostenibles tales como escombros / rocas cercanas y reemplazos de cemento.
- Minimice al máximo el grosor del mortero de cemento, reduzca la relación arena: cemento y maximice los reemplazos de cemento más sostenibles, como la cal.
- Asegúrese de que todos los químicos de tratamiento para el bambú y la madera se eliminen de manera adecuada: el boro es el químico más seguro para usar en este sentido.
- Considere el fin de la vida para el bambú tratado y la madera.

4.0 Diseño para la Durabilidad

En esta sección se analiza la durabilidad de los materiales clave utilizados para la construcción de viviendas de bahareque, y se propone cómo el diseñador puede cumplir con la vida de diseño estándar de 50 años, con un enfoque en los elementos de bambú.

La vivienda de bahareque encementado puede ser una forma duradera de vivienda, logrando 50 años de vida de diseño a través de un buen diseño. El bambú y la madera son vulnerables al ataque de insectos y podredumbres y, por lo tanto, necesitan protección. Para protegerse contra los insectos, el bambú debe tratarse con boro y la madera debe tratarse o ser naturalmente duradera. Para protegerse contra la podredumbre, el bambú y la madera deben mantenerse secos a través de buenos detalles de diseño, tales como: elevación del marco en un soporte vertical, una membrana a prueba de humedad, grandes voladizos para proteger las paredes de la lluvia, una pared impermeable, buenos detalles de goteo y cavidades ventiladas. Las conexiones de acero deben estar pintadas o galvanizadas.

4.1 Introducción

Cada uno de los principales componentes del bahareque encementado se analiza en términos de su durabilidad en las siguientes secciones:

- Bambú: en Secciones 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5.
- Madera: en Sección 4.6
- Render de cemento: en Sección 4.7.
- Componentes de acero: en Sección 4.8.

El objetivo de este informe es la durabilidad del bambú y la madera, especialmente la primera, ya que estos son generalmente los componentes más susceptibles de la construcción de viviendas bahareque, y son los que carecen de información publicada. Este informe asume que la carcasa se diseñará para una vida de diseño estándar de 50 años con mantenimiento normal (pintura, reparación de elementos estructurales menores, etc.)

4.2 Causas de la descomposición

El bambú no tiene efectivamente una durabilidad natural debido a la falta de toxinas naturales (Janssen, 2000) y, además, sus paredes típicamente delgadas significan que una pequeña cantidad de caries puede tener un porcentaje significativo de pérdida de capacidad. Hay dos causas de descomposición en el bambú (Kaminski et al., 2016c; BRE, 2003):

Ataque de insectos

Ciertos escarabajos son atraídos por el almidón en bambú y ponen sus huevos dentro de la sección, luego los huevos eclosionan y las larvas comen a lo largo de la sección y eventualmente hacia afuera para escapar, dejando pequeños agujeros redondos u ovalados (alrededor de 1mm-6mm de diámetro) (BRE, 2003). Los escarabajos de polvo (*Dinoderus minutus*), (que dejan orificios de salida de 1 mm-2

mm) son particularmente comunes (Figura 30 y Figura 31). La tasa de ataque es más rápida con bambú verde fresco (que es más susceptible), pero incluso el bambú seco puede ser atacado en climas cálidos y húmedos, donde el contenido de humedad de equilibrio del bambú (pero cubierto) a menudo será mayor que en templado climas (Liese et al., 2002). Los escarabajos se pueden encontrar en la mayoría de los climas cálidos del mundo.



Figura 30: Daño de escarabajo en bambú, Ecuador - los agujeros de salida son claramente visibles (Kaminski, 2016)



Figura 31: Daño de escarabajo en bambú, Colombia - los agujeros de salida son claramente visibles (Kaminski, 2016)



Figura 32: Termitas que atacan el bambú, Costa Rica. Las termitas son apenas visibles cuando los insectos translúcidos se arrastran por el interior del bambú (Kaminski, 2016)



Figura 33: daño severo por termitas a la madera y la caña en el bahareque tradicional, El Salvador (Kaminski, 2016)



Figura 34: Daño severo por termitas en bambú, Costa Rica. Tenga en cuenta que la capa exterior de sílice pintada del bambú todavía está intacta en algunas áreas y, por lo tanto, aparece en buenas condiciones (Kaminski, 2016)



Figura 35: daño severo por termitas en bambú, Costa Rica. Los pequeños excrementos de termitas de madera seca redondos son simplemente visibles (Kaminski, 2016)

Las termitas son pequeños insectos parecidos a hormigas, que viven en colonias y se alimentan de material vegetal. También se sienten atraídos por el almidón en el bambú, pero a diferencia de los escarabajos, tienen enzimas, que también les permiten descomponer la celulosa. Debido a que viven en grandes colonias, pueden causar daños rápidos (Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 y Figura 36). Hay dos tipos genéricos de termitas: subterránea y seca. Los primeros viven en el suelo (preferiblemente húmedo) mientras que los segundos hacen sus nidos en la madera misma. Las termitas subterráneas son translúcidas por lo que pueden construir túneles o encontrar caminos ocultos para evitar la luz solar (BRE, 1999) (Figura 37). Las termitas se encuentran en todos los continentes y prefieren climas más cálidos y húmedos.



Figura 36: Corte transversal a través de bambú dañado por insectos (Trujillo, 2014)



Figura 37: Tubo de refugio de termitas subterráneas que emerge de la grieta (Kaminski, 2016)

Ataque fúngico (podredumbre)

La putrefacción es causada por un hongo. Para que el hongo sobreviva, el bambú debe estar relativamente húmedo con al menos un 20% de humedad, lo que significa que el bambú debe estar expuesto a la lluvia o la humedad del suelo (Ridout, 1999) (Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43).



Figura 38: Daño fúngico, división y decoloración del bambú tratado con boro expuesto al sol y la lluvia después de unos 10 años, Colombia (Kaminski, 2016)



Figura 39: Rotura al extremo expuesto del bambú en un techo, Costa Rica (Kaminski, 2016)



Figura 40: pérdida de 100% de la sección de la caña en la base de las paredes, Costa Rica. Tenga en cuenta el molde visible en la base de las paredes debido a la salpicadura del techo. El cemento y la pintura claramente no son suficiente protección bajo la lluvia torrencial (Kaminski, 2016)



Figura 41: Depuración del renderizado después del terremoto, revelando la esterilla de bambú podrida a continuación, Ecuador (Kaminski, 2016)



Figura 42: Casa de bahareque encementado a en Colombia sin voladizo del techo: el molde en la pared es claramente visible (Kaminski, 2016)



Figura 43: Daño por putrefacción (y posiblemente termitas) en viviendas de bahareque tradicionales, Ecuador (Kaminski, 2016)..

4.3 Protección contra la descomposición

Las formas más efectivas para proteger el bambú de la descomposición son contridas con bambú seco (Sección 4.5) y adoptadas el diseño y los detalles adecuados (Figura 48), de la siguiente manera:

1. El bambú debe mantenerse seco, lo que se puede lograr mediante:
 - Siempre colóquelo debajo de un techo impermeable con un buen saliente para protegerlo de la lluvia azotada por el viento / conducción.
 - Proporcione buenos detalles de goteo y evitando las trampas de agua, particularmente en las bases de las paredes y columnas, esto evitará la putrefacción y también disminuirá la tasa de ataques de escarabajos y termitas.
 - Protección de paredes de bahareque encementado externa con una capa impermeable. Hay algunas pruebas de que las paredes de bambú pueden experimentar daños por podredumbre si estas paredes están completamente expuestas a la lluvia (Kaminski, 2013) (Figura 40, Figura 41 y Figura 42), es decir, el mortero de cemento no es completamente impermeable. La resistencia al agua de las paredes de mortero de cemento puede mejorarse mediante varios métodos que incluyen: mortero de cemento de mejor calidad (incluyendo mayor contenido de cemento y menor proporción de agua a cemento), buena cura del revoque, uso de refuerzo de malla de pollo (que reduce agrietamiento), procesamiento más grueso, uso de un poco de cal (quetambién reduce el agrietamiento) y pintura periódica. Los edificios de bahareque encementado de una sola planta pueden experimentar menos daños por podredumbre que los de varias plantas porque menos de la pared está expuesta a la lluvia (Kaminski, 2013). Cuando se usan pisos múltiples, se deben considerar formas de reducir la exposición y / o mejorar la resistencia al agua de las paredes. La introducción de tierra en la mezcla de cemento puede reducir la resistencia al agua de la pared y, a su vez, reducir la durabilidad del bambú incrustado en el interior.
 - Permite que siempre "respire". Por ejemplo, cualquier cavidad en la pared debe tener orificios de ventilación para permitir que circule el aire, especialmente, cualquiera que forme paredes externas. Además, nunca arroje el bambú directamente en los cimientos de mampostería o concreto ya que no puede "respirar" y es muy probable que se pudra, incluso si el bambú está pintado con betún o una sustancia química similar.
 - Proporcione una fachada exterior de sacrificio de la matriz y mortero de cemento que protege el marco y el refuerzo en el interior - el refuerzo debería diseñarse para la carga máxima del terremoto (Sección 6.6), y la fachada puede necesitar ser reemplazada periódicamente.
2. El bambú debe estar separado del suelo con una buena barrera, preferiblemente una losa de concreto, lo que obliga a las termitas a salir al

exterior. Esto hará que sea más difícil para las termitas subterráneas atacar el bambú. Aún será necesario el mantenimiento para eliminar los tubos de protección contra termitas, que las termitas construyen para protegerse contra la luz.

En climas más fríos, como Europa, estas medidas a menudo serán adecuadas, pero en climas húmedos y cálidos, donde existe el riesgo de ataque de termitas en escarabajos y madera seca, el bambú estructural debe ser tratado con conservantes si se requiere una vida útil razonable, aunque esto aumentará ligeramente el costo inicial del bambú, reducirá el costo total de vida de la estructura. Para los miembros no estructurales, cuya descomposición no supondrá un riesgo para la seguridad, es posible dejarlos sin tratamiento y aceptar que los miembros deberán ser reemplazados regularmente. Sin embargo, perderán su atractivo aspecto a medida que comiencen a degradarse, y los escarabajos dejan cantidades significativas de polvo en los orificios de salida, lo que puede ser una molestia.

	Untreated	Tratado con boro	Tratamiento con conservantes fijos *
Interno	2–6 años	30+ años	30+ años
Externo por encima del suelo	0.5–4 años	2–15 años	30+ años
Externo contacto en el suelo	<0.5 años	< 1 años	15+ años

* Nota: Esta es una estimación inferida basada en una combinación de pruebas limitadas realizadas hasta ahora utilizando conservantes fijos en bambú, y en la evidencia de pruebas de estacas de madera (Lebow, 2004). Todavía no se sabe si la exposición severa a la lluvia aumenta la probabilidad de división, lo que debilitaría el culmo y sus conexiones, y permitiría una mayor entrada de agua.

Tabla 4: Tiempo sugerido aproximado antes de que sea necesario reemplazar el bambú (suponiendo un ambiente cálido y agresivo con riesgo de ataque de termitas y escarabajos)

El lapso de tiempo que durará el bambú antes de que sea necesario reemplazarlo dependerá del ambiente en que se use y del tipo de tratamiento; La Tabla 4 sugiere la vida de diseño aproximada del bambú en un ambiente cálido y agresivo e indica claramente por qué, preferiblemente, debe usarse solo en un ambiente interno seco, y también por qué debe tratarse. Tenga en cuenta que la variación en el tiempo depende de la prevalencia de termitas cercanas.

4.4 Opciones de tratamiento

Al seleccionar un tipo de tratamiento o un método químico y de aplicación para el bambú, las siguientes consideraciones son importantes (Liese et al., 2002):

- Cantidad de bambú a tratar.
- Disponibilidad de instalaciones de tratamiento.
- Disponibilidad de productos químicos.
- Uso previsto del bambú: por dentro o por fuera.
- Legislación nacional.
- Especie: algunas especies son más fáciles de tratar que otras.
- Tiempo de transporte desde la ubicación de la cosecha hasta la instalación de tratamiento: algunos métodos de tratamiento requieren bambú recién cortado.
- Presupuesto.
- Eficacia del tipo de tratamiento o método químico y de aplicación.
- Si el químico afecta la estructura del bambú o cualquier fijación de metal.
- Toxicidad de sustancias químicas para los humanos durante toda la vida (tratamiento, uso y eliminación).
- Toxicidad de los productos químicos al medio ambiente durante toda la vida (tratamiento, uso y eliminación).

Opciones de tratamiento tradicionales

Existen varias opciones de tratamiento tradicional y simple comúnmente utilizadas en los países en desarrollo (Liese y Kumar, 2003), incluyendo remojar durante varias semanas en agua (que elimina parte del almidón), fumar (que proporciona una capa protectora ligera y parcialmente trata el calor. superficie) y pintura (que proporciona cierta protección contra el agua). Desafortunadamente, todos estos tienen efectos limitados y, por lo tanto, no se recomiendan normalmente el bambú estructural permanente; pueden ser apropiados solo para prolongar marginalmente la vida del bambú no estructural o de refugios temporales. La pintura o el barnizado, por ejemplo, no se adhiere bien al bambú debido a su piel exterior de sílice lisa, tiende a descomponerse rápidamente bajo luz ultravioleta, y cuando el bambú cambia de tamaño bajo diferentes condiciones de humedad, la pintura también se agrietará y permitirá agua in. Existen otros métodos de tratamiento tradicional que usan químicos más naturales. Sin embargo, eso tampoco se recomienda, ya que su efectividad es limitada y algunos pueden ser dañinos para los humanos.

Opciones de tratamiento conservador

Los conservantes son esencialmente toxinas que se agregan al bambú para evitar el ataque de hongos e insectos. Aunque existen numerosos tipos de tratamiento

disponibles, muchos tienen una eficacia limitada o son inadecuados porque plantean riesgos importantes para la salud y la seguridad (como: conservantes antiguos a base de cobre, incluido cobre-cromo-arsénico (CCA) y amoníaco-cobre-arseniato (ACA)) y otros productos químicos como la creosota y el clorpirifos). Esto deja solo dos tipos básicos de conservantes que, en general, se consideran los más adecuados para el bambú:

- **Boro:** es barato de aplicar, eficaz, pero soluble, por lo que los elementos tratados con boro no se pueden usar externamente, es decir, donde están expuestos a la lluvia.
- **Conservadores modernos de madera a base de cobre:** caros de aplicar, efectivos y razonablemente bien fijados contra la lixiviación, para que puedan ser utilizados externamente.

Tratamiento con boro

En casi todos los casos, el boro es con mucho el químico más apropiado para tratar el bambú (Liese & Kumar, 2003), y tiene una buena trayectoria (Kaminski, 2013). El boro tiene propiedades insecticidas (venenosas para los insectos) y fungicidas. Generalmente tiene una baja toxicidad para los mamíferos, aunque en concentraciones más altas puede irritar la piel y los ojos, y si se ingiere, es moderadamente tóxico (Sistema Tres, 2013; Green Building Press, nd.). Aunque el bambú tratado con boro es seguro de tocar, existen puntos de vista contradictorios sobre si es peligroso quemarse (las hojas de datos indican como regla general que la madera / bambú tratado con boro no debe quemarse, pero algunas investigaciones sugieren que los riesgos pueden ser mucho más bajo que esto). Por lo tanto, el bambú tratado con boro solo debe quemarse con precaución. El tratamiento con boro también es relativamente de bajo costo.

El boro normalmente se usa en forma compuesta, típicamente como una sal. Estos compuestos están fácilmente disponibles en la mayoría de los países como fertilizantes relativamente baratos que solo necesitan ser disueltos en agua. La mezcla a veces también se calienta para ayudar en el proceso de tratamiento. En todos los métodos de tratamiento, la solución de boro se puede reutilizar varias veces (pero no indefinidamente), y cualquier solución residual puede diluirse con seguridad y usarse como fertilizante. El compuesto que contiene boro más comúnmente usado es tetraborato de octaborato de disodio ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (nombres comerciales Tim-bor o Solubor).

Aunque se han llevado a cabo investigaciones importantes para determinar si un compuesto que contiene boro puede fijarse en bambú / madera (Liese et al., 2002), hasta ahora no ha tenido éxito y, por lo tanto, todos los compuestos que contienen boro tendrán su boro lixiviado. fuera cuando se expone a la lluvia.

Las formas de aplicar boro al bambú incluyen: boucherie modificado, baño / remojo, difusión por inmersión, difusión de inmersión vertical (Environmental Bamboo Foundation, 2003) y recipiente a presión (Liese & Kumar, 2003; Kaminski et al, 2016c). Siempre que el boro sea capaz de difundirse por completo a través del grosor de la sección, la mayoría de estos métodos pueden ser efectivos y la

elección del método dependerá más del presupuesto, el tiempo y la proximidad a la fuente. Vale la pena señalar que el método Boucherie modificado es el único que evita la necesidad de romper los diafragmas. El mantenimiento de un diafragma sólido mejora la capacidad de rellenar de manera confiable el entrenudo con lechada / mortero / epoxi, que normalmente es esencial para buenas conexiones estructurales, y también puede desempeñar un papel importante en el control de la división y pandeo de la pared del culmo. Sin embargo, el método Boucherie modificado solo se puede usar dentro de las 24 horas posteriores a la cosecha, lo que lo hace poco práctico en ciertas regiones.

Donde se usan otros métodos, se debe preparar el efecto que tendrá un diafragma perforado en el rendimiento estructural de los elementos y las conexiones.

Tratamiento con conservantes modernos basados en cobre

Las formas modernas de conservantes a base de cobre son significativamente menos tóxicas para los humanos que los ejemplos anteriores porque usan más arsénico y cromo, y en su lugar contienen una mezcla de cobre, biocidas y, a veces, ácido bórico. Son muy eficaces contra hongos, termitas y escarabajos, y están químicamente relativamente bien fijados en el bambú (con la excepción de cualquier componente de ácido bórico), por lo tanto, se utilizan externamente y, a veces en contacto con el suelo.

Los conservantes a base de cobre son algo corrosivos para el acero, por lo tanto, puede ser necesario considerar fijaciones galvanizadas o incluso de acero inoxidable. El potencial de corrosión dependerá del porcentaje de retención del producto químico activo. Las formas de incorporación de conservantes modernos a base de cobre que podrían usarse para el bambú son los tipos de cobre B y C (CA-B y CA-C), ya que no contienen boro (que se filtrarán con el tiempo) y son menos corrosivos para el acero que otras formas. Estos conservantes a base de cobre son seguros en uso ya que el químico tóxico se fija en el bambú. Sin embargo, el bambú tratado no se debe quemar al final de la vida porque esto puede liberar sustancias químicas peligrosas.

En general, los tratamientos conservantes a base de cobre son significativamente más caros que los tratamientos a base de boro porque todos requieren un tratamiento de presión semi-industrial, y también porque el bambú debe secarse completamente al horno antes del tratamiento. Después del tratamiento, el bambú debe ser reparado. -secado por secado al horno o secado natural.

Es importante señalar que se han llevado a cabo trabajos y pruebas limitados sobre el uso de conservantes a base de cobre para el tratamiento del bambú, aunque las indicaciones hasta el momento sugieren que podría ser muy exitoso (Ya-mei, 2011). Determinar la retención porcentual requerida del producto químico activo para que sea efectivo, y exactamente qué proceso de tratamiento de presión sería adecuado para este.

4.5 Condimento

El condimento (secado) de bambú es importante para reducir cuidadosamente el contenido de humedad a un nivel similar al contenido de humedad del equipo en

servicio (este es el contenido de humedad del bambú en paridad con la humedad del aire, 18%). El aderezo también mejoró la resistencia del bambú al ataque de hongos e insectos, y es especialmente importante antes de su transporte. También limita la cantidad de contracción por secado en servicio, lo que de otro modo podría conducir a la fragmentación, debilitamiento y falla de los elementos especiales en las conexiones. Por lo tanto, el uso de bambú "verde" para la construcción de los elementos estructurales primarios debe ser costoso, a pesar de que el bambú verde sea refugio y los carpinteros tenderán a presionarlo porque es mucho más fácil de trabajar que el bambú seco. El bambú verde nunca se debe usar para formar la matriz de muros bahareque encementado, ya que no podrá respirar y secarse dentro de la cementación, y por lo tanto es probable que se pudra.



Figura 44: Secado al aire de bambú afuera, Colombia (Kaminski, 2016)



Figura 45: Secado en horno de bambú, Colombia (Kaminski, 2016)

El secado de tallos de gran diámetro por reposo para secar de forma natural (secado al aire) lleva mucho tiempo (Figura 44) (varios meses), por lo que los hornos solares o calentados a menudo se utilizan para acelerar el proceso (Figura 45). Ha hecho lo suficientemente lento para que el bambú se encoja, después de que se produzcan grietas y hendiduras. Por lo tanto, el secado en horno no puede ser demasiado rápido y puede necesitar ser precedido por un secado más lento y natural.

4.6 Madera

La madera varía mucho en su durabilidad natural, dependiendo de la especie (Figura 46 y Figura 47). Para las maderas blandas duraderas no naturales, se aplica la información y recomendaciones descritas en las Secciones 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, con los siguientes cambios clave:

- Las maderas blandas pueden ser un poco más duraderas que el bambú.
- Los centros de secado y tratamiento están establecidos en la mayoría de los países y, por lo tanto, la madera curada comercial a menudo está disponible a diferencia del bambú. La mayoría de estos tienden a usar conservantes modernos a base de cobre, que son muy efectivos, más viejos y más tóxicos. (pero también muy efectivos) químicos a base de arsénico y cromo - este

último debería mejorarse debido a los riesgos de salud durante el procesamiento, la construcción, el uso y el final de la vida útil del edificio. Las especies de pino son algunas de las pocas maderas que tienen una permeabilidad variada para ser susceptibles de tratamiento conservante.

- El tratamiento de maderas blandas generalmente requiere un horno preparado antes del tratamiento, y por lo tanto ya están secas cuando se compran en el estante (a excepción de la humedad residual del proceso de tratamiento).
- Al igual que las maderas blandas, la mayoría de las maderas duras tienen poca o ninguna durabilidad natural contra la podredumbre o los insectos. Solo un pequeño número de especies tiene resistencia a la putrefacción (Figura 46) y un número aún menor de escarabajos. Casi ninguna madera dura es resistente a las termitas.



Figura 46: Madera dura dura podrida en la base de una columna que se había vertido en el hormigón, después de la extracción



Figura 47: Daño por putrefacción de la madera en viviendas tradicionales de bahareque, Ecuador (Kaminski, 2016)

4.7 Mortero de cemento render

El mortero de cemento de buena calidad es muy estable y duradero en diferentes condiciones climáticas. El procesamiento puede desmoronarse cuando la entrada de agua en la pared hace que la matriz se hinche - esto se puede mejorar mejorando la resistencia al agua de la pared, como se describe en la Sección 4.3.

4.8 Componentes de acero de la vivienda de bahareque encementado

La vivienda bahareque encementado generalmente requiere componentes de acero para unir los elementos, como clavos, pernos, flejes de acero y malla de pollo. El acero puede corroerse cuando no está protegido, especialmente en climas húmedos tropicales y subtropicales, y por lo tanto se debe considerar proteger el acero, o alternativamente, proporcionar suficiente espesor de material, de modo que parte del acero sea sacrificable (suponiendo tasas de corrosión realistas para el acero en esa condición de exposición particular durante la vida de la estructura).

El acero puede protegerse mediante galvanizado en caliente, pintura o incrustación en concreto. Tanto para el galvanizado como para la pintura, asegúrese de especificar el tipo y grosor de las capas, ya que esto puede variar significativamente: para galvanizar, consulte ISO1461 (ISO, 2009a) o ASTM A153 (ASTM, 2016) y para

pintura utilice epoxi rico en zinc cebadores, haciendo referencia a ISO12944-5 (ISO, 2007) o ASTM A780 (ASTM, 2015). Todos los revestimientos, pinturas y galvanizaciones requieren mantenimiento durante la vida útil del diseño. Alternativamente, se puede usar acero inoxidable, con el costo inicial más alto compensado por la certeza a largo plazo en el rendimiento y los costos de mantenimiento reducidos: consulte ISO3506-1 (ISO, 2009b) para la especificación de componentes de acero inoxidable.

El Eurocódigo 5 (CEN, 2014) proporciona una buena guía sobre qué nivel de protección de los componentes de acero se debe proporcionar para diferentes temperaturas y humedad.

4.9 Resumen de recomendaciones para diseñar para asegurar la durabilidad

La Figura 48 proporciona un resumen de las recomendaciones clave para diseñar y detallar la casa de bahareque encementado para mayor durabilidad.

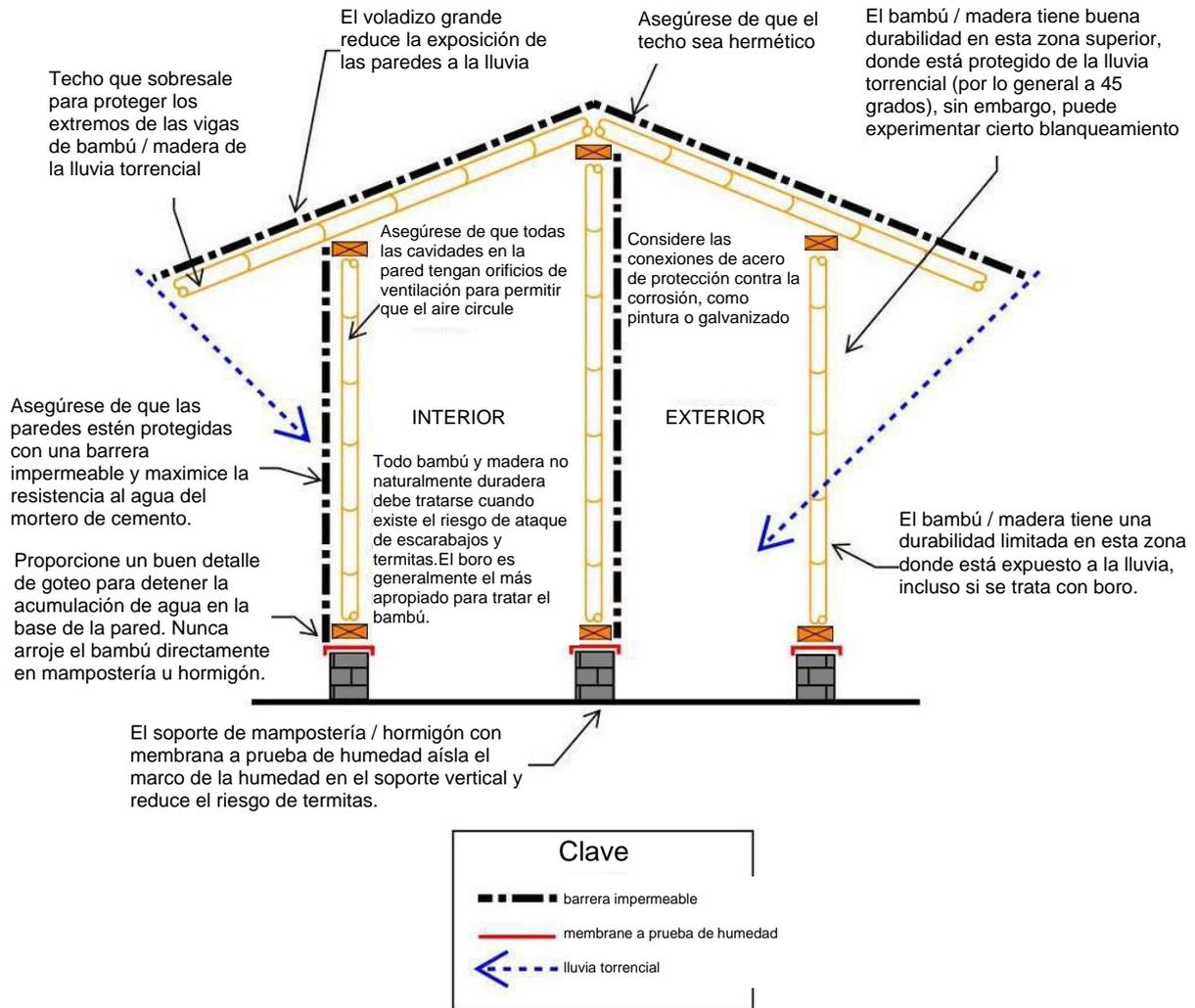


Figura 48: Recomendaciones para detallar estructuras de bahareque encementado para proteger contra la pudrición y los insectos (Kaminski, 2013; Kaminski et al., 2016c; Trujillo et al., 2013)

5.0 Diseño contra el Incendio

En esta sección se analiza el comportamiento del bambú y el bahareque encementado en un escenario de incendio, se proporcionan recomendaciones sobre las clasificaciones resistentes al fuego a las que se deberían diseñar y se propone cómo el diseñador puede lograr estas clasificaciones.

La técnica de bahareque encementado proporciona una manera conveniente de proteger la madera y el bambú naturalmente susceptible del fuego. El uso de 15 mm de mortero de cemento Render puede proporcionar un nivel nominal de protección y aumentarlo a 25 mm puede proporcionar 30 minutos de resistencia al fuego. Aunque no todos los muros en edificios de ocupación unifamiliar normalmente necesitan una clasificación de resistencia al fuego, generalmente se recomienda un nivel nominal de protección.

5.1 Introducción

Los componentes del edificio construidos para resistir el fuego se diseñan mediante la comprensión de sus propiedades materiales, y el rendimiento se comprueba mediante pruebas de incendio. Tanto para bambú como para bahareque encementado, hay información muy limitada sobre cómo se comportan los materiales cuando se exponen al fuego. Utilizando la información disponible, el rendimiento de la seguridad contra incendios del bambú y el bahareque encementado se puede abordar evaluando el rendimiento de los elementos de bambú y / o madera como elementos estructurales, y el bahareque encementado como un conjunto de pared.

El bambú tiene solo una resistencia limitada al fuego y esas limitaciones deben ser entendidas, de modo que puedan usarse adecuadamente durante la construcción de la vivienda. Para muchos montajes de piso y pared, la combinación de diferentes elementos de construcción puede mejorar el rendimiento general del fuego de un elemento débil. Para bahareque encementado, el funcionamiento limitado del fuego de bambú se puede mejorar mediante la combinación y el ensamblaje de materiales, incluido el procesamiento de mortero de cemento.

Por otro lado, la madera ha sido bien investigada en su reacción al fuego. Donde se usa madera sólida de las mismas dimensiones en lugar de bambú en la construcción de bahareque encementado, su comportamiento en fuego puede considerarse similar o mejor.

5.2 ¿Qué es resistencia al fuego?

La resistencia al fuego se mide a través de pruebas de fuego, mediante las cuales un elemento de construcción, como un piso, una pared o una viga, se expone a un régimen de calentamiento estandarizado y se mide el tiempo hasta la falla. El elemento de construcción puede tener cargas aplicadas. El elemento de construcción se evalúa para resistir tres criterios diferentes:

1. Resistencia estructural para determinar cuánto tiempo el elemento puede soportar las cargas aplicadas;

2. Integridad para resistir el calor y los gases calientes que pasan a través de la pared o el piso;
3. Aislamiento para evitar que las temperaturas suban por el lado no incendiario.

Si un elemento como una pared puede resistir las cargas aplicadas, evitar que los gases calientes pasen y limitar la temperatura en el lado frío durante un período de exposición de 60 minutos al régimen de calefacción estándar, entonces el elemento se certificará para lograr un 60 calificación de fuego minuto. Esto se conoce como clasificación de resistencia al fuego (FRR).

Los materiales de construcción también pueden diseñarse para limitar la propagación de llamas en las primeras etapas de un incendio, conocido como "propagación superficial de la llama", que puede proporcionar tiempo adicional para que los ocupantes evacuen. Para medir qué tan rápido se propagan las llamas a lo largo de una pared o techo, se realizan pruebas para comprender la influencia de las propiedades del material y su resistencia al calor (Figura 49).

5.3 Los requisitos reglamentarios

Para edificios unifamiliares, los códigos de construcción y de incendios varían de un país a otro. Los requisitos reglamentarios locales determinarán el rendimiento de fuego requerido de la estructura, pisos y paredes.



Figura 49: Pruebas de fuego en bahareque encementado en Trada (Webb, 2015)

En la mayoría de los países desarrollados (p. Ej. Europa, EE. UU., Canadá, Australia), los códigos de construcción relevantes no requieren casas de una sola planta para lograr resistencia al fuego requerida para los pisos o muros, siempre que la casa esté separada de la vecina por una distancia de alrededor de 2m o más. Los requisitos se basan en la capacidad de los bomberos para acceder al costado de una casa y rociar agua para evitar la propagación del fuego entre las casas

vecinas. Este no es siempre el caso, y en algunos países se requieren clasificaciones de fuego mínimo para las casas, independientemente de su ubicación, dada la disponibilidad limitada de extinción de incendios. En el Reino Unido y en algunos otros países, la resistencia al fuego comienza a requerirse en dos pisos y más, incluso en casas aisladas.

Sin embargo, cuando un edificio de dos pisos tiene casas familiares separadas situadas y verticalmente una está encima de la otra, normalmente se requiere una FRR en la mayoría de los códigos de construcción, que puede ser de 30 minutos a 90 minutos, para evitar que se propague el fuego desde la unidad inferior a la unidad superior permitiendo que los ocupantes del piso superior evacuen.

Si una casa se construye adyacente a otra casa y comparten una pared de fiesta (terracea o casas adosadas), entonces la mayoría de los códigos normalmente requieren que la pared de la fiesta alcance un nivel mínimo de resistencia al fuego, que puede variar de 30 a 90 minutos FRR. El enfoque para evitar la propagación de incendios entre las casas se puede basar en proporcionar materiales resistentes al fuego a cada lado de la pared de la fiesta entre las casas. Esto es conveniente ya que los propietarios pueden protegerse de una casa vecina que puede no tener la construcción resistente al fuego requerida. El enfoque más conservador es aplicar los materiales resistentes al fuego a ambos lados de la pared del partido.

El bahareque encementado puede usarse en una amplia gama de países, y la necesidad de una construcción resistente al fuego variará de un país a otro. Para los fines de este informe, se utilizan los códigos de construcción más avanzados para incendios de todo el mundo. Se recomienda y se supone que se requiere lo siguiente en la mayoría de los países:

- Un mínimo de FRR de 30 minutos para las paredes adyacentes a los vecinos (a menos de 3 m de un vecino pero no en contacto directo).
- Un mínimo de 60 minutos FRR para muros de fiesta, donde las casas están en contacto directo).

Estos requisitos se consideran razonables, dada la carga de fuego esperada dentro de la casa para este tipo de sistema de alojamiento y la necesidad de proteger las casas vecinas de la propagación del incendio.

5.4 Propiedades de fuego de bambú y bahareque encementado

Para entender cómo el bambú y el bahareque redondo funcionan en condiciones de incendio, se han revisado investigaciones relevantes. Las pruebas de fuego en

bambú han sido llevadas a cabo por Mena et al. (2012), con el objetivo de comprender las tasas de ignición, propagación de la llama y carbonización de la especie de bambú *Guadua angustifolia* Kunth (guadua), originaria de Colombia. El bambú tiene una densidad registrada de 700 kg / m³, que se considera una densidad de bambú superior a la media.

Para la ignición, la investigación mostró que la ignición controlada era de 14kW / m², que es más alta que los 12kW / m² citados para la madera sólida y la mayor densidad del bambú. Como los autores señalan en la investigación, el rendimiento es mejor que la madera contrachapada de coníferas (hecha de pino *Radiata*). Para la propagación de la llama, el bambú registró un flujo de calor crítico promedio de 5kW / m². De nuevo, esto es mejor que el contrachapado (normalmente de unos 3,5 kW / m²) y similar a otros materiales de madera maciza.

Por lo tanto, para el desarrollo de fuego temprano, el bambú probado mostró una buena resistencia al calor y las llamas. Sin embargo, como el bambú tiene paredes delgadas, el bambú perderá resistencia en un incendio más rápidamente que un elemento de madera de tamaño similar y, por lo tanto, por sí solo no puede proporcionar una FRR mínima razonable de 30 minutos.

Mena et al. (2012) también midió la tasa de carbonización para el bambú y esto se registró como 0.2-0.24mm / min, que es un valor sorprendentemente bajo. Como comparación, la madera sólida típicamente está en el rango de 0.6 a 0.7 mm / min. Este valor debe tratarse con precaución, ya que implica que el bambú sólido tiene una resistencia superior al fuego por carbonización. Esto está en contraste con el comportamiento observado del bambú cuando se expone a un fuego sostenido, ya que se calienta a una velocidad relativamente rápida una vez que se enciende y la estructura de celda abierta no resiste el calentamiento continuo una vez que se enciende. La resistencia a la flexión también se verificó a diferentes temperaturas y se encontró que se reducía con la temperatura, pero que funcionaba mejor que el contrachapado de madera blanda.

Salzer et al. (2016) también llevó a cabo pruebas de fuego (2016) en un sistema de bahareques encementados. La especie de bambú probada fue *Gigantochloa* apus de Indonesia. Las pruebas de fuego se llevaron a cabo según las normas nacionales de Indonesia, con una prueba de fuego similar a ISO834 (ISO, 2014). El objetivo era lograr una FRR de 60 minutos. Los paneles de prueba consistían en un marco de bambú con una capa de mortero de cemento de 25 mm de grosor o 50 mm de espesor en una cara, sostenido por una malla de acero expandida o una malla de bambú con bambú de aproximadamente 100 mm de diámetro y 10 mm de grosor de pared. Los especímenes de prueba tenían poco más de 1m².

Los resultados mostraron que los paneles de prueba lograron una calificación de aislamiento (uno de los tres criterios que se requieren pasar para lograr una clasificación de resistencia al fuego), con temperaturas en el lado del horno que no alcanzan un aumento máximo de 100 ° C. Esto demostró que el sistema era eficaz para prevenir la transferencia de calor a través del panel, si la integridad del panel puede permanecer en su lugar. Las pruebas también mostraron que el uso de una

mallas de acero expandido para soportar el mortero de cemento rendía mejor que una matriz orgánica. Tampoco se registraron las tasas de carga debido a que el espesor del mortero de cemento impedía la carbonización.

La investigación también mostró que las conexiones entre los soportes horizontales y verticales afectan la capacidad de carga bajo fuego. Cuanto mayor es el grosor de la pared del bambú, mejores son las conexiones capaces de resistir el movimiento inducido por el fuego, lo que resulta en una resistencia al fuego mejorada. La investigación también mostró que las conexiones entre los soportes horizontales y verticales afectan la capacidad de carga bajo fuego. Cuanto mayor es el grosor de la pared del bambú, mejor que las conexiones capaces de resistir el movimiento inducido por el fuego, lo que resulta en una resistencia al fuego mejorada.

También se llevó a cabo una serie de pruebas de fuego de paneles bahareque modificados a través de la investigación en la Universidad de Coventry. Webb (2015), bajo los auspicios de BMTRADA, utilizando varias configuraciones de paneles diferentes. Las muestras de bambú tenían un diámetro de 80 mm a 110 mm y un grosor de pared de 5 mm a 14 mm. La densidad se registró como 677 kg / m³ para una muestra. Un panel usó alambre de pollo con tiras de bambú para la matriz y el segundo utilizó malla de acero expandido. Se realizaron pruebas de fuego

según BS476-22 (BSI, 1987) y los paneles fueron de 1,35 mx 1,35 m. El espesor de la capa de mortero de cemento era de aproximadamente 14 mm y se aplicó a un lado de la matriz de bambú, que se fijó a un lado del marco de bambú solamente.

El objetivo de las pruebas de fuego fue lograr 30 minutos de FRR, lo que no se logró, con los paneles fallando antes de este período de tiempo. Las fallas fueron una falla de aislamiento (aumento de la temperatura en el lado frío), aunque los paneles lograron integridad (evitando que las llamas y el humo se filtraran).

Las tasas de carga de esta prueba se midieron y variaron de 0,71 mm / min a 0,96 mm / min, resultados que son similares a los registrados para productos de madera con una densidad de 300 a 450 kg / m³. Las tasas de carga también se registraron en una prueba de calorímetro de cono según ISO5660-1 (ISO, 2015), que es un método a pequeña escala pero más preciso, registrando 1,56 mm / min. La tasa de char del calorímetro del cono es obviamente diferente a las tasas de carga registradas a través de la prueba de fuego. La precisión de las tasas de carbonización es difícil de determinar con precisión en las pruebas de incendio, pero la diferencia significativa entre la prueba de fuego y los resultados del calorímetro de cono supera el error de medición. La tasa de carbonización muy alta de la prueba de calorímetro de cono único es probable que sea una consecuencia de grandes divisiones en la muestra. Las pruebas de calorímetros de cono requieren que las muestras sean planas, y el aplanamiento de la pieza de tallo de bambú dio lugar a grietas o fracturas, a través de que el calor podía penetrar en la parte posterior de la muestra y, por lo tanto, acelerar la velocidad de carbonización aparente.

Los resultados y la discusión contenidos en Webb (2015) brindan información útil sobre cómo la construcción de bahareque encementado puede mejorarse para aumentar la resistencia al fuego, y demuestran que una FRR de 30 minutos es factible y factible.

5.5 Discusión sobre los resultados de las pruebas de fuego

Bambú

El bambú redondo tiene cierta resistencia al fuego y al calor debido al alto contenido de sílice de las fibras en el bambú. El contenido de sílice se reduce hacia la pared interna del bambú, por lo tanto, la resistencia al fuego se reduce una vez que la línea de calentamiento comienza a moverse más allá de la piel exterior. Las tasas de carga dependen de la densidad del bambú, el contenido de humedad y la dirección de la fibra. El contenido de humedad variará de una especie a otra, al igual que la densidad.

De las pruebas de fuego revisadas, hay una gama de tasas de carga registradas, de 0.2 mm / min a 1.56 mm / min, que es una variación significativa. Como todas las pruebas de fuego discutidas anteriormente tenían la misma dirección de fibra, las diferencias muestran que la densidad, el contenido de humedad y la metodología de prueba tienen un impacto significativo en el comportamiento.

La densidad del bambú se registra de 300 a 800 kg / m³ de diversas fuentes (Wood Database, 2016; Trujillo, 2007; Kaminski et al., 2016b). El estándar australiano AS 1720-4 (Standards Australia, 2006) tiene un método para determinar una tasa de carbonilla basada en la densidad y usar una densidad de 300, 500 y 700 kg / m³, con un contenido de humedad del 12% asumido, conduce a un char velocidad de 1.27mm / min, 0.71mm / min y 0.56mm / min. Dado que la densidad del bambú se registra más típicamente en 500 a 750 kg / m³, esto indica que las tasas de carbonización más en línea con 0.5 mm / min a 0.7 mm / min parecen ser razonables. Proporcionar resistencia estructural al fuego (capacidad de carga bajo fuego) al bambú redondo sin protección es un desafío, debido a la forma hueca y las paredes relativamente delgadas. Con tasas de carga de 0,5 mm / min a 0,7 mm /

min, para una columna de bambú de 100 mm, con paredes de 8 mm a 12 mm, esto lleva a una clasificación de resistencia al fuego de 16-24 minutos. Si el bambú estaba muy cargado, entonces la resistencia al fuego también se reduciría.

El rendimiento de los tallos de bambú podría mejorarse ligeramente con el uso de la extensión superficial de recubrimientos o tratamientos con llama. Estos tratamientos son caros, generalmente requieren un tratamiento de presión específico en las plantas de producción, y pueden no ofrecer un aumento significativo en la resistencia al fuego para el bambú, ya que están destinados a reducir solo la propagación de la llama. Además, se liberan sustancias químicas corrosivas cuando se aplican, y el tratamiento puede obstaculizar cualquier posible aplicación para el final de la vida útil del bambú. Por lo tanto, los recubrimientos ignífugos o los tratamientos generalmente no se recomiendan para los tallos de bambú. En consecuencia, el bambú expuesto siempre tendrá una resistencia al fuego limitada, a menos que esté encerrado dentro de un material resistente al fuego (como el mortero de cemento o el yeso).

Muros cortantes de bahareque encementado

La técnica de bahareque encementado mejora la resistencia al fuego del bambú redondo (y la madera) que actúa como una estructura de soporte de carga al

proporcionar aislamiento a los elementos de bambú que soportan carga, y además proporciona una estructura más resistente. El mortero de cemento render protege la estructura; de forma análoga a la protección pasiva que el yeso laminado proporciona a las columnas de acero.

Por lo tanto, para mejorar la resistencia al fuego de la estructura de bambú y madera, se debe mantener la integridad del revestimiento de mortero de cemento. La prueba de fuego discutida anteriormente muestra que la mezcla de mortero de cemento con un espesor de 25 mm o más en un lado de la matriz proporciona una clasificación de aislamiento e integridad que excede los 30 minutos. Las pruebas también mostraron que la malla de acero expandido para soportar el procesamiento del mortero de cemento es superior a una malla orgánica, pero no es esencial. La prueba realizada por Webb con un espesor de 14 mm de mortero de cemento renderizado en un lado de la matriz proporcionó un índice de aislamiento e integridad de aproximadamente 15-30 minutos.

Bahareque encementado solo proporcionará un FRR entre habitaciones y protegerá el bambú y el marco de madera si la demanda de fuego está en el mismo lado que el mortero. Por lo tanto, si se necesita proporcionar una FRR desde ambos lados de la pared, se deberá usar el sistema de pared de bahareque encementado hueca (con una matriz clavada a cada lado del marco, y mortero de cemento aplicado a ambas caras externas del matriz) (Figura 51).

En una pared bahareque de doble capa (hueca), una vez que el fuego arde a través de la primera piel, la estructura de madera / bambú quedará expuesta inmediatamente a la carga de fuego además de la matriz en el otro lado (ya que físicamente no es posible) aplicar un mortero de cemento a las caras internas de ambas pieles en un sistema de doble capa). Por lo tanto, no se puede considerar que la segunda máscara proporcione una mejoría significativa a la calificación total de la FRR.

En una pared de bahareque encemenado única, aunque el cemento protegerá la matriz, la estructura de madera / bambú estará completamente expuesta en un lado. Por lo tanto, este sistema solo puede tener una FRR confiable cuando la demanda de incendios está en el mismo lado que el mortero.

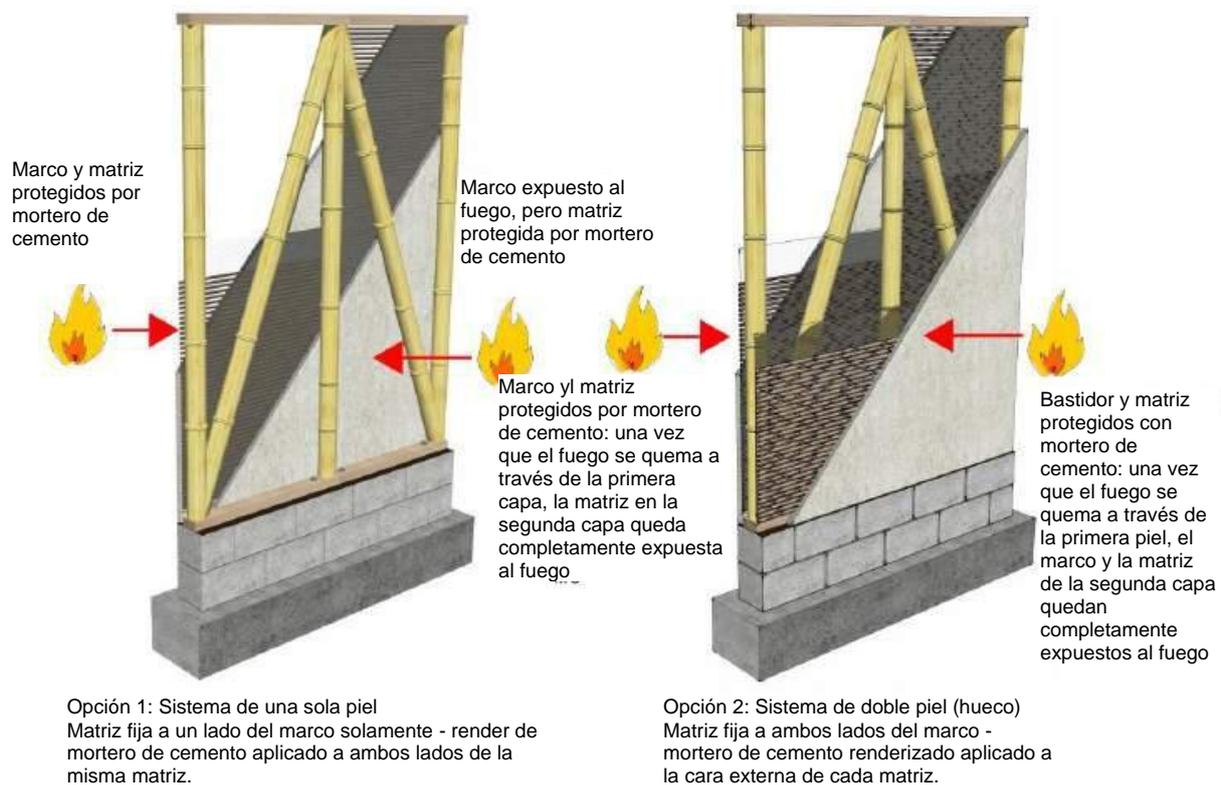


Figura 50: Comportamiento de muros de bahareque encementado por una o dos capas para disparar

Mortero de cemento que rinde propiedades de fuego

Para mejorar aún más la resistencia al fuego del sistema de bahareque encementado, el espesor del mortero de cemento puede incrementarse aún más. Existen varias guías y estándares disponibles que brindan recomendaciones sobre la resistencia al fuego basadas en el procesamiento respaldado: una muy buena fuente de información es NFPA 914 (NFPA, 2015), un estándar en la construcción de edificios históricos existentes. NFPA 914 tiene recomendaciones que incluyen:

- Una pared de postes de 2 "x 4" (50 mm x 100 mm) con yeso de ½ "(12 mm) de espesor en el listón de madera en ambos lados logra 30 minutos de FRR. Con una cavidad llena de aislamiento incombustible, esta estructura puede lograr 45 minutos de FRR.
- Un muro de vigas de 2 "x 4" (50 mm x 100 mm) con yeso de ¾ "(18 mm) de espesor sobre listones de metal en ambos lados logra 30 minutos de FRR.

5.6 Resumen de recomendaciones para diseñar resistencia al fuego

Sobre la base de los hallazgos anteriores, se puede lograr diferentes clasificaciones de FRR para muros de bahareque encementado usando lo siguiente (Figura 51):

Nominal FRR (probablemente alrededor de 10-15min FRR)

- Coloque todos los elementos de madera y bambú de la planta baja con mortero de cemento sobre una malla de acero expandida, tira de bambú / esterilla o matriz de caña en todos los lados (proporcionando un sistema

bahareque de doble capa hueca) y aplique un mínimo de 15 mm de mortero de cemento renderizado los muros. Donde se usa una matriz orgánica, la malla de alambre de pollo es esencial.

30 min FRR

También:

- a) Hacer la propia pared FRR que implica:
 - Al usar bambú para las columnas, lo ideal es que tengan un grosor de pared de al menos 12 mm y estén sólidamente fijados a la suela y a las placas de la cabeza.
 - En la pared expuesta a la demanda de fuego, utilice un mortero de cemento con un espesor mínimo de 25 mm en una matriz de malla de acero expandido o cinta / esterilla de bambú. La malla de acero expandida es superior a los listones en un incendio, y la caña no se ha probado: con sus paredes muy delgadas, puede comportarse de manera inferior a los listones de bambú. Donde se usa una matriz orgánica, la malla de alambre de pollo es esencial.
- b) Utilice placas de yeso a base de yeso, con un espesor mínimo de 12 mm, fijado a la cara de la pared de bahareque encementado expuesta al fuego.

60 min FRR

- Utilice placas de yeso a base de yeso, con un espesor mínimo de 24 mm, fijado a la cara exterior de la pared de bahareque encementado expuesta al fuego.

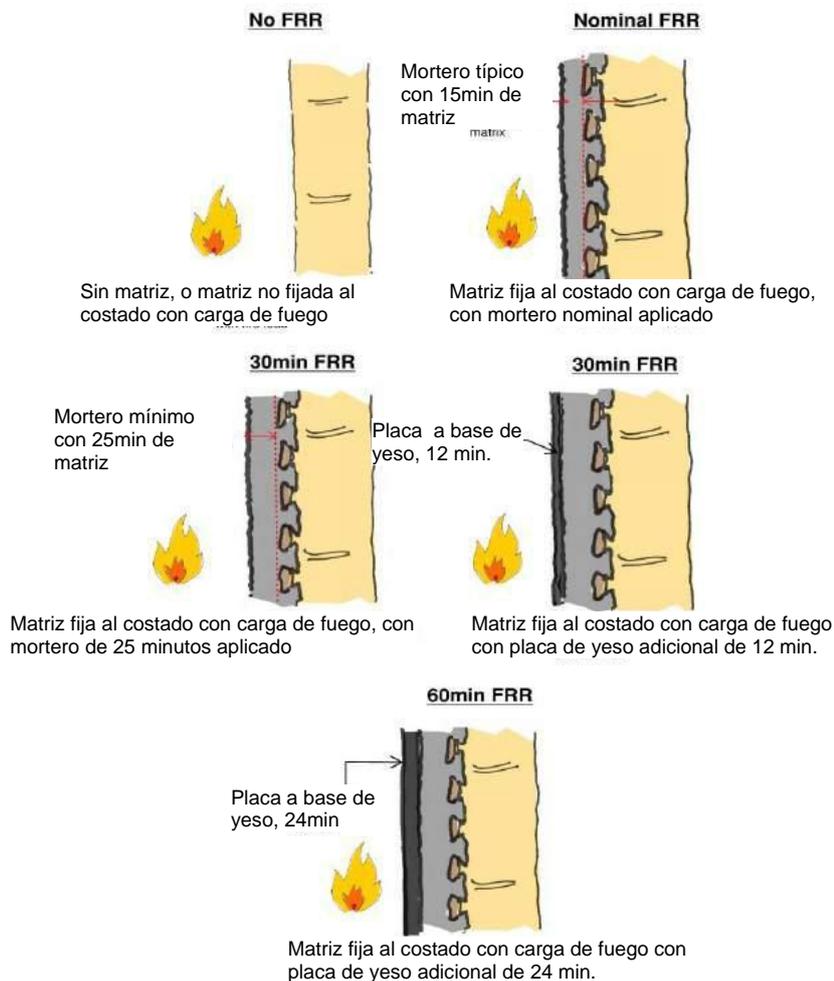


Figura 51: Diferentes formas de lograr diferentes FRR para viviendas de bahareque encementado

Las siguientes reglas son recomendadas para la construcción de viviendas de bahareque encementado con edificios de ocupación unifamiliar (Figura 52):

Paredes internas en viviendas de una sola planta

- El bambú y la madera pueden estar expuestos internamente.
- No hay requisitos de incendio para ninguna de las paredes, columnas, pisos o techo dentro de la casa.

Paredes internas en viviendas de dos plantas

- Como mínimo, proporcione una FRR nominal a todos los lados de todos los elementos de bambú y madera en la planta baja.
- Idealmente, proporcione una FRR de 30 minutos a todos los lados de todos los elementos de bambú y madera en la planta baja.
- No hay requisitos de incendio para ninguno de los pisos o techo dentro de la casa.

Muros externos en la vivienda a 3 metros o más de un vecino

- Para viviendas de una sola planta, no hay requisitos de incendio.

- Para viviendas de dos pisos, siga en cuanto a paredes internas para viviendas de dos pisos.

Muros externos en viviendas a menos de 3 m de distancia de un vecino

- .Proporcione un mínimo de 30 minutos de FRR en la cara interna o externa de ambas paredes exteriores (enfrentadas).

Paredes de fiesta compartidas (paredes compartidas entre la vivienda)

- .Proporcione un mínimo de 60 minutos FRR a ambos lados de la pared de la fiesta.

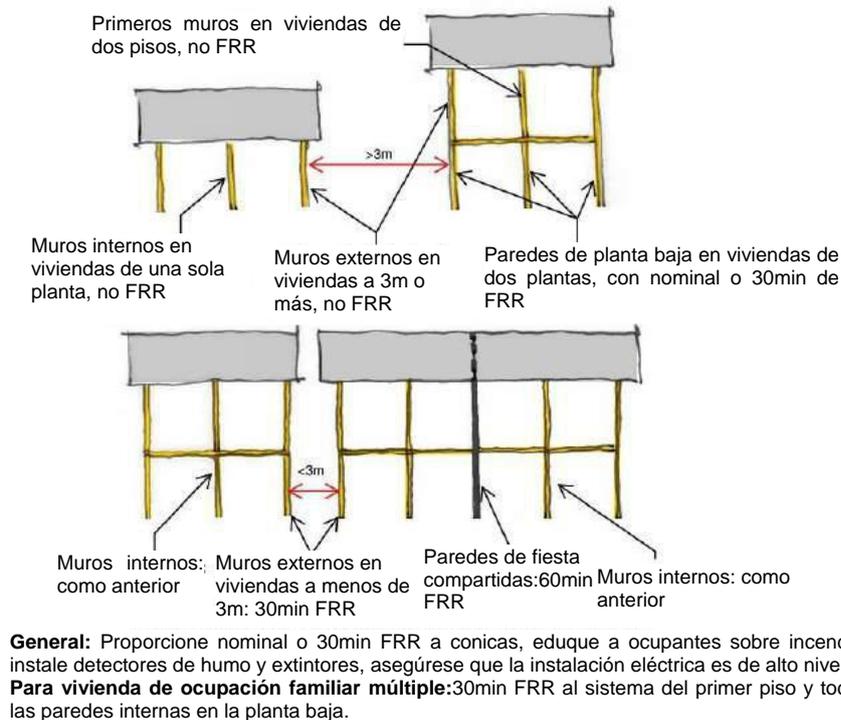


Figura 52: Reglas de FRR recomendadas para el diseño de la vivienda de bahareque encementado

Áreas sujetas a llamas desnudas, por ejemplo, cocinas

- Como mínimo, proporcione un nominal TRF a todos los lados de todos los elementos de madera de bambu y corra el riesgo de ser expuestos a las llamas.
- Idealmente, proporcione una FRR de 30 min a todos los lados de todos los elementos de bambú y madera en riesgo de exposición a las llamas.
- Considere una FRR nominal o de 30 minutos para cualquier sistema del primer piso sobre las llamas.

Otras consideraciones generales

Otras consideraciones para reducir el riesgo de incendios en viviendas de bahareque encementado incluyen:

- Educación de ocupantes sobre riesgos de incendios.
- Instalación de detectores de humo y extintores.

- No almacena materiales inflamables dentro de las casas.
- Asegúrese que las eléctricas estén instaladas a un buen nivel: las eléctricas por debajo del estándar son una razón común para los incendios.

Para edificios de ocupación familiar múltiple, siga las recomendaciones anteriores, pero proporcione un mínimo de FRR de 30 mm para el sistema del primer piso y todas las paredes internas en la planta baja.

6.0 Diseño para Cargas Estructurales

Esta sección analiza las consideraciones estructurales clave del bambú y brinda recomendaciones sobre cómo diseñar bahareque encementado para cargas de gravedad, viento y terremoto.

La vivienda de bahareque encementado es un sistema de construcción fuerte y robusto, que puede diseñarse para resistir terremotos y vientos fuertes incluso en regiones muy peligrosas del mundo. Se ha demostrado que el armazón, la matriz y el mortero de cemento se comportan como un compuesto estructural, que actúa como una pared de corte. El sistema debe diseñarse de manera que la trayectoria de la gravedad y la carga horizontal sea simple y continua, los elementos estén firmemente unidos entre sí con conexiones de acero, especialmente en la base de la pared, y el mortero de cemento esté bien unido a la matriz mediante la malla de pollo, que a su vez está clavada al marco.

6.1 Consideraciones estructurales clave del bambú

Las características estructurales de todos los materiales utilizados en la construcción de viviendas de bahareque encementado deben tenerse en cuenta al diseñar cargas estructurales. Aunque las características estructurales de los materiales como la madera y el hormigón se conocen y publican bien, la información sobre el bambú es más limitada. Debido a esto, y dado que el bambú normalmente constituye una gran proporción de los materiales en viviendas de bahareque encementado, la siguiente es una lista de características clave del bambú que deben considerarse al diseñar cargas estructurales (Trujillo, 2007; Kaminski et al. 2016b):

- Los tallos de bambú son débiles cuando se cargan en compresión y tensión perpendicular a las fibras: la resistencia de la pared es significativamente menor en el aplastamiento perpendicular a las fibras que en paralelo a las fibras; las fibras están débilmente unidas en tensión perpendicular al grano (lo que afecta a la cizalla) , y la sección es susceptible a la trituración local ya que es hueca.
- El bambú y sus conexiones son más fuertes y más simples de ensamblar en compresión paralela a la fibra.
- Las conexiones son en casi todos los casos el punto más débil de la estructura.
- Aunque el bambú en sí mismo es fuerte en tensión, en la práctica es muy difícil lograr cerca de la capacidad de tensión total de un culmo ya que la conexión siempre gobernará.
- El bambú no es particularmente rígido en la flexión en comparación con una sección de madera de dimensión similar.
- El bambú no es perfectamente recto, por lo que debe tenerse en cuenta el pandeo de secciones delgadas en compresión.
- Es muy difícil hacer que múltiples elementos de bambú funcionen de manera confiable como secciones compuestas.

- Si no se trata y se expone al medio ambiente, el bambú es susceptible a la putrefacción y al ataque de insectos (ver Sección 4.0).

6.2 Diseño para cargas gravitatorias

Las casas de bahareque encementado, como todas las formas de estructuras, están mejor diseñadas para tener una ruta de carga vertical simple y confiable para llevar las cargas gravitatorias de la estructura hasta los cimientos. Esto hace que el diseño y la construcción sean más simples y más confiables, y reducirá el riesgo de falla en un terremoto o vientos fuertes. Para trabajar con las características delineadas en la Sección 6.1 y la buena práctica de la ingeniería estructural, se recomienda que una ruta de carga de gravedad clara y simple pueda ser diseñada de la siguiente manera (vea la Figura 53).

- Proporcione una ruta de carga vertical simple y continua.
- Los acabados en el techo y en los pisos generalmente deben mantenerse lo más liviano posible para reducir la demanda de carga de gravedad.
- La estructura del techo y el piso debe usar tallos de gran diámetro como vigas estructurales secundarias (es decir, vigas que se extienden sobre paredes o vigas primarias, como vigas y vigas), a fin de reducir la deflexión y evitar cargas elevadas en las vigas.
- Se deben evitar las cargas puntuales en las vigas para evitar el aplastamiento local de la caña.
- Cuando dos o más tallos de bambú se agrupan, no asumas la acción compuesta, ya que es muy difícil de lograr en la práctica.
- Deben evitarse las vigas de bambú primarias (es decir, las vigas que llevan otros rayos) ya que es probable que se produzcan aplastamientos locales o cortaduras de los extremos de la viga.
- Las cargas se deben transferir a través de conexiones en el rodamiento siempre que sea posible, ya que esta es una ruta de carga más fuerte, más rígida y más confiable.

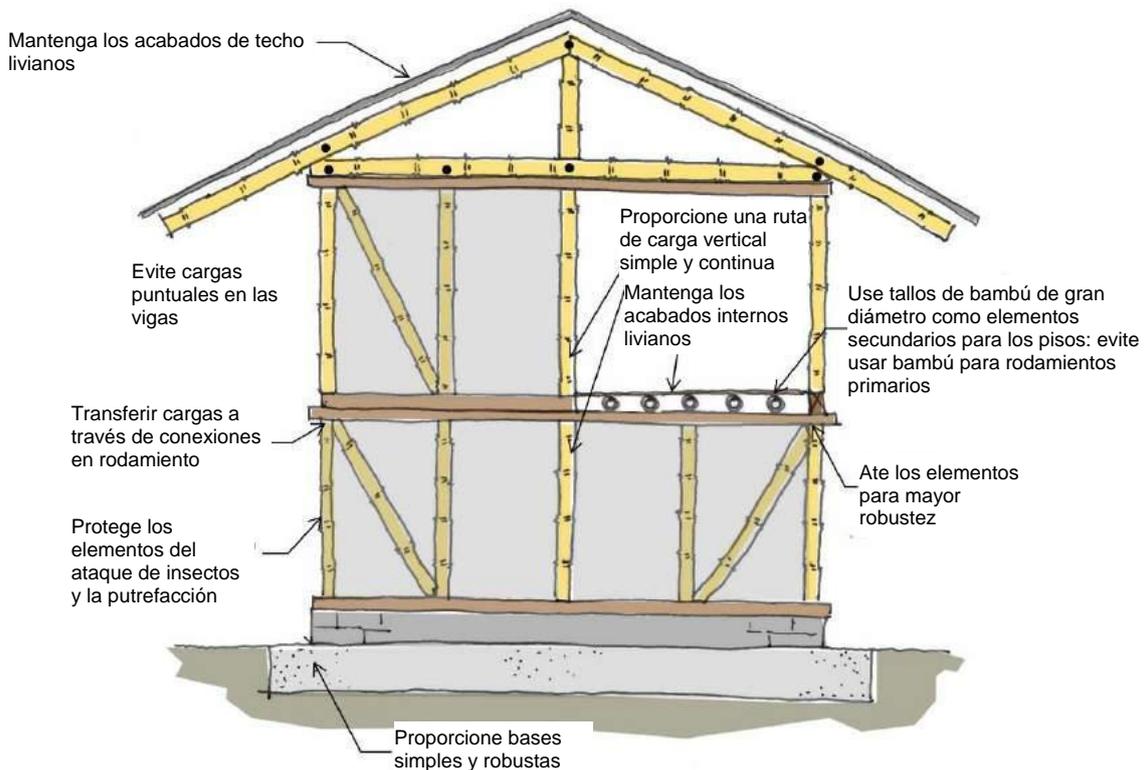


Figura 53: Puntos clave para una ruta de carga de gravedad clara y simple para la vivienda de bahareque encementado

- Las secciones deben estar unidas entre sí por su robustez, para reducir el riesgo de una falla de colapso significativa, si ocurre un fallo de cualquier elemento o conexión.
- Los elementos de bambú deben protegerse de los insectos y la podredumbre según la Sección 4.0.
- Debe proporcionar cimientos simples y robustos adecuados para las condiciones locales del suelo.

La ruta de carga vertical para una casa de bahareque encementado es normalmente muy fácil de calcular a mano ya que la mayoría de los elementos son simplemente compatibles. No se recomienda el uso de programas informáticos para el análisis estructural, ya que estos pueden recoger rutas de carga alternativas que no son correctas o relevantes. Algunas configuraciones complejas de techos pueden justificar el uso de programas de computadora, pero estos deben usarse con gran precaución; en particular, siempre se debe suponer que las conexiones están inmobilizadas a menos que se demuestre lo contrario. Para calcular la capacidad de las secciones y conexiones de bambú, consulte la Sección 6.5. Para calcular la capacidad de las secciones y conexiones de madera, utiliza códigos internacionales de diseño estructural como el Eurocódigo 5 (CEN, 2014) y la Especificación Nacional de Diseño de EE. UU. Para madera (American Wood Council, 2015).

6.3 Diseño para terremotos y cargas de viento

Las cargas sísmicas son proporcionales al peso propio de la estructura, mientras que las cargas de viento son independientes de esto.

- Las cargas sísmicas son proporcionales al peso propio de la estructura, mientras que las cargas de viento son independientes de esto.
- Las cargas sísmicas son cíclicas y pueden causar fallas de fatiga en las conexiones.
- Existe una mayor incertidumbre sobre la magnitud de las cargas sísmicas, por lo tanto, pueden producirse daños, siempre que el daño se produzca de forma controlada. Ningún daño debe ocurrir bajo cargas de viento.

Es un concepto erróneo común que el bambú como material es de alguna manera "milagrosamente" bueno en los terremotos y los fuertes vientos. De hecho, como elemento individual posee varios modos de falla frágiles que podrían afectar su desempeño sísmico y eólico. Los edificios tradicionales de bambú y bahareque históricamente han funcionado bien en los terremotos por dos razones principales:

1. Su naturaleza liviana (alta relación resistencia / peso), que mantiene la luz del edificio en general.
2. Su ductilidad (esencialmente la capacidad de absorber energía) en las conexiones y uniones, especialmente cuando se usan clavos. Esto se ha visto después de los terremotos en edificios vernáculos como bahareque (Kaminski, 2013; Franco et al., En prensa), que normalmente utilizan conexiones clavadas. Parte de la energía también se absorbe al agrietarse las rebabas de barro en las viviendas bahareque tradicionales.

La naturaleza flexible de algunas construcciones de bambú tradicionales también puede ser favorable en terremotos, pero esta no es una característica que pueda explotarse fácilmente en construcciones modernas, que tienden a ser más pesadas, tienen menores tolerancias de movimiento y requieren una mayor certeza de resistencia a los terremotos que los edificios tradicionales.

Las estructuras de bambú modernas generalmente requieren, y normalmente se construyen con conexiones atornilladas de mayor resistencia con mortero, que son

relativamente frágiles. Sin embargo, cuando se aplican los principios de diseño sísmico de buenas prácticas junto con conexiones más dúctiles como clavos, se puede lograr una mayor resistencia a los terremotos y la ductilidad general del edificio (Kaminski et al., 2015).

Trabajando con las características anteriores, las descritas en la Sección 6.1, y las buenas prácticas de diseño de vientos y terremotos, se recomienda que un terremoto sensible y una trayectoria de carga de viento se diseñen de la siguiente manera:

- En una zona de terremoto, es mejor mantener la estructura lo más liviana posible. En contraste con esto, en una zona de vientos fuertes, el peso es beneficioso, ya que puede evitar el vuelco del edificio. Bahareque encementado tiene la ventaja de tener una masa razonable, más que un edificio de madera ligera, pero menos que una estructura de mampostería. En lugares muy ventosos, las cargas de viento pueden gobernar el diseño.
- Verifique el vuelco del marco y la construcción: el peso propio de la estructura puede ser insuficiente para contrarrestar la carga horizontal. Cuando la carga de vuelco es alta, es posible que se requieran correas de amarre desde el techo hasta los cimientos, y es posible que los cimientos tengan que hacerse más pesados para evitar que se vuelque todo el edificio.

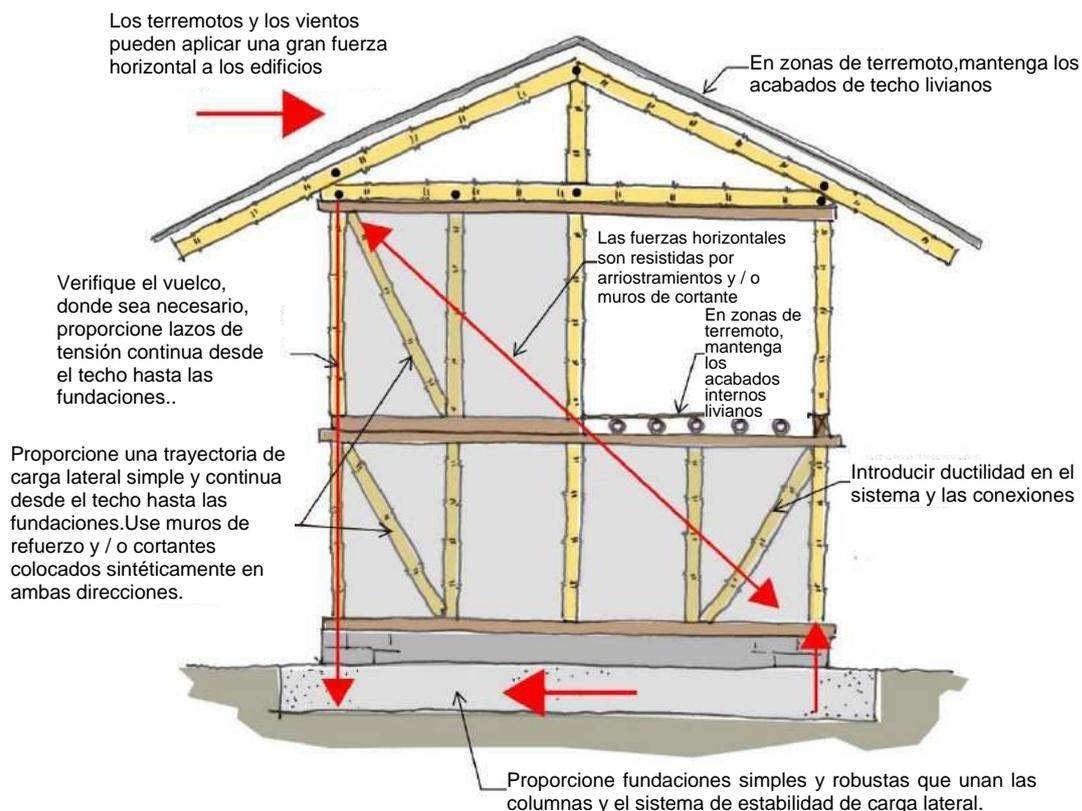


Figura 54: Puntos clave para una ruta sensible de terremoto y carga de viento para la vivienda de bahareque encementado

- Mantenga una trayectoria de carga lateral simple y continua desde el techo hasta los cimientos: evite las discontinuidades.
- Introduzca la ductilidad en el sistema y las conexiones (consulte las Secciones 6.5 y 6.6).
- Asegúrese de que haya un sistema de estabilidad de carga lateral dedicado, es decir, arriostramiento o muros cortantes (consulte la Sección 6.4). Los marcos de momento de bambú son muy difíciles de lograr de manera confiable.
- Asegúrese de que los sistemas laterales de estabilidad de carga: sean capaces de resistir la carga en ambas direcciones ortogonales, sean ampliamente simétricos en ambos lados del edificio y espaciados uniformemente. Mantenga el mismo sistema lateral de estabilidad de carga en ambas elevaciones.
- Proporcione fundaciones simples y robustas que unan las columnas y el sistema de estabilidad de carga lateral.

Las trayectorias de carga horizontal para una casa de bahareque encementado son normalmente muy fáciles de calcular a mano. No se recomienda el uso de programas informáticos para el análisis estructural, ya que estos pueden recoger rutas de carga alternativas que no son correctas o relevantes.

6.4 Sistemas de estabilidad de carga lateral

Como en cualquier estructura, la carcasa de bambú requiere un sistema de estabilidad de carga lateral dedicado para resistir cargas de viento horizontal y terremoto. No se recomienda utilizar marcos de momento en estructuras de bambú debido a lo siguiente:

- No se han desarrollado conexiones adecuadas con suficiente resistencia, rigidez y ductilidad.
- Los elementos individuales de bambú no tendrían la resistencia o rigidez requeridas para formar un sistema portalizado. Se podría utilizar haces de bambú, pero como la acción compuesta entre los miembros, es difícil de lograr una conexión satisfactoriamente rígida.
- Es poco probable que estos sistemas tengan mucha ductilidad y, por lo tanto, podrían fallar de manera frágil y repentina.

Los sistemas laterales de estabilidad de carga restantes que son más adecuados para la casa de bahareque encementado son marcos arriostrados y muros de cortante (con o sin soporte adicional). La selección del sistema afectará los detalles.

Marco reforzado

Se trata esencialmente de un marco triangular simple, que transfiere las cargas a los cimientos mediante cargas axiales (tensión y compresión) en los elementos. Los marcos arriostrados solo pueden ser de tensión, solo compresión o compresión y tensión. Los tallos de bambú funcionan bien en compresión. Sin embargo, dado que es difícil transmitir grandes fuerzas de tensión en los elementos de bambú en sus conexiones, y su falla puede ser bastante frágil. Se recomienda tener un refuerzo suficiente para que la carga de tracción nunca sea grande, para confiar únicamente

en los elementos de arriostramiento. Eso puede funcionar en compresión, o simplemente agregar barras de acero para tomar la tensión (estas podrían ser paralelas a las cañas de bambú o incluso dentro de ellas).

Es poco probable que los marcos reforzados con bambú puro tengan una capacidad tan grande como los muros de corte debido a la probabilidad de que se produzcan fallas de tensión o aplastamiento local en las conexiones. Sin embargo, pueden ser suficientes para la vivienda cuando el arriostramiento es abundante y las cargas son bajas. Las fuerzas en este sistema son simples de calcular, y en la mayoría de los casos, la fuerza del sistema estará limitada por las conexiones o el pandeo de las cañas de bambú en compresión (ver Sección 6.5).

La Figura 55 propone las cuatro opciones diferentes de sistemas de marcos arriostrados para viviendas de Bahareque encementado.

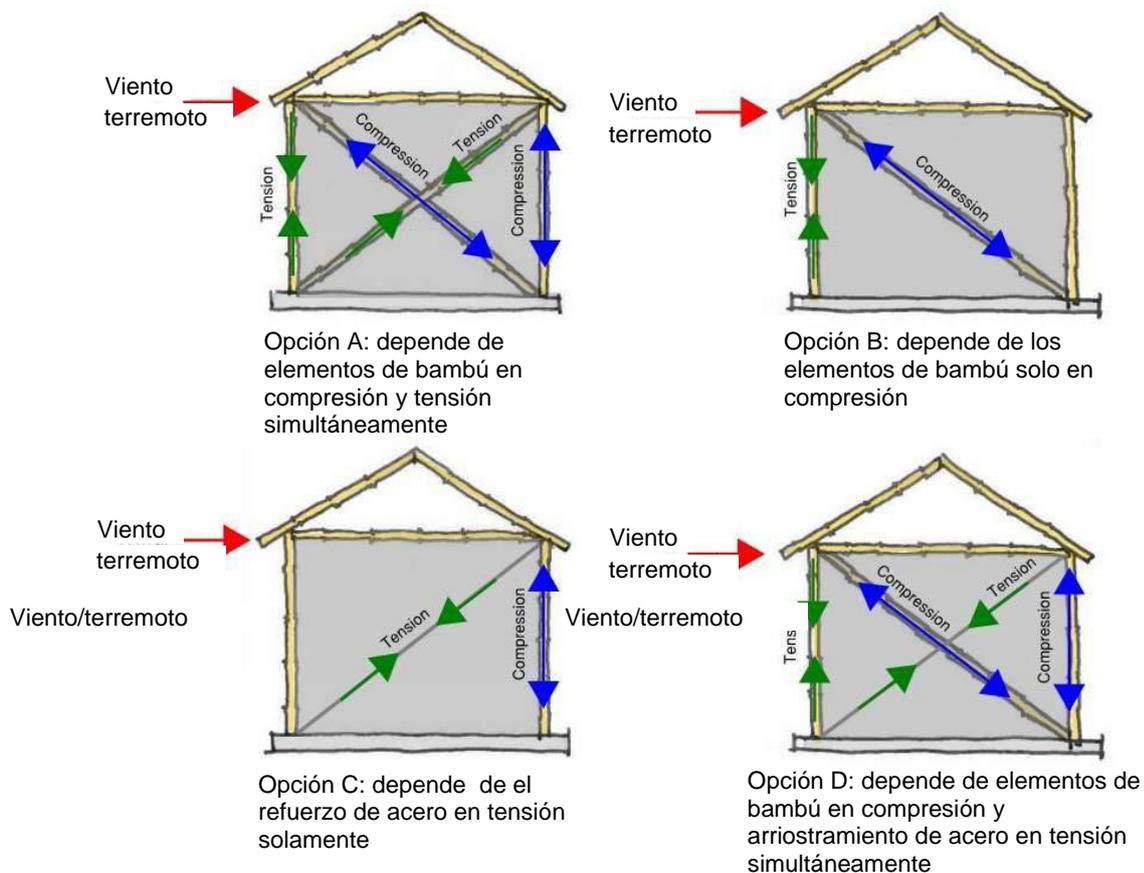


Figura 55: Diferentes sistemas de arriostramiento para viviendas de bahareque encementado

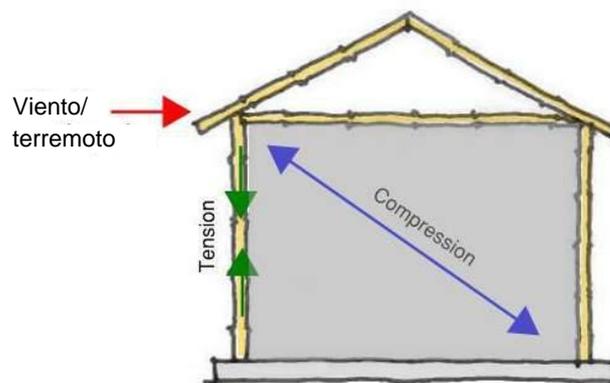
Pared de corte (con o sin arriostramiento adicional)

Este es un sistema de pared hecho de un material continuo y sólido, que transfiere la carga a los cimientos mediante una fuerza de corte distribuida a lo largo de la pared. Los sistemas de pared bahareque con mamparo, matriz y mortero de cemento pueden actuar como muros de cortante estructurales efectivos cuando se

diseñan adecuadamente; la matriz, el armazón y el mortero funcionan todos de manera compacta, con el mortero resistiendo la fuerza cortante, la matriz deteniendo el mortero y proporcionando la conexión entre el mortero y el marco, y el marco resistiendo la fuerza vertical de contraflujo inducida en el sistema y también resistiendo localmente las cargas cortantes (Figura 56 y Figura 57). Algunos sistemas de muros de cortante tienen arriostramiento: se convierten en muros híbridos de cortante y sistemas de armazón armado, donde la carga se comparte de acuerdo con la rigidez relativa de cada sistema.

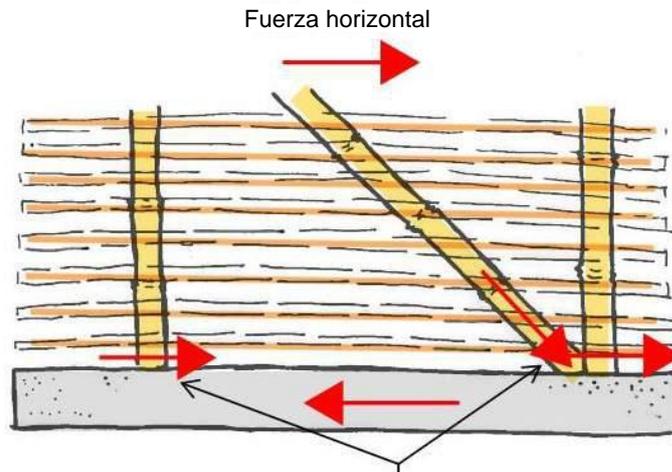
Los muros de corte de bahareque encementado tienen buenas capacidades cuando están diseñados y detallados adecuadamente. También tienden a tener cierta ductilidad (Mendoza y Villalobos, 1990; Prieto et al., 2002; Kaminski et al., 2015). Sin embargo, las capacidades son difíciles de determinar a partir de los primeros principios y, por lo tanto, las pruebas se han llevado a cabo normalmente para determinar su comportamiento en caso de vientos y terremotos (para más información, ver la Sección 6.6).

Una de las principales ventajas de los muros cortantes de bahareque encementado sobre los marcos arriostrados tradicionales es que la propia pared estructural cortante se convierte en la fachada / pared divisoria, lo que significa que ya no se requiere otro revestimiento o material de relleno. Esto reduce su costo y resultados en un sistema de vivienda más asequible.



Muros de corte de bahareque encementado: \depende del mortero de cemento compuesto rinde y la matriz resiste la carga horizontal a través de un puntal de compresión diagonal en la pared

Figura 56: trayectoria de carga horizontal para muros de corte de bahareque encementado



Normalmente, la cizalla o la conexión física entre el mortero de cemento y la placa base es insuficiente para que cualquier cizalla se transmita de forma fiable a través de ella. Por lo tanto, toda la cizalla tiende a transferirse a través del arriostramiento y / o los montantes verticales en cizalla

Figura 57: trayectoria de carga horizontal en la base de la pared de corte bahareque

6.5 Diseño de elementos y conexiones de bambú individuales

Existen pocos códigos de diseño de bambú publicados, datos de prueba limitados sobre especies de bambú y datos de prueba muy limitados sobre las conexiones. Se ha encontrado que el siguiente material es el más útil:

- **ISO 22156** (ISO, 2004a): código publicado por ISO sobre la determinación de las propiedades de los materiales a partir de los datos de prueba. Es útil para procesar datos de prueba. Proporciona conceptos de prueba de conexión y contiene criterios cuestionables para derivación y tensiones permisibles. Contiene poco sobre la guía de diseño estructural práctico.
- **ISO 22157-1 y 22157-2** (ISO, 2004b y 2004c): Código publicado por ISO sobre la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del bambú. La guía más útil para pruebas de elementos.
- **NSR 10-G12** (AIS, 2010): estándar colombiano para el diseño con guadabamú. Junto con el NEC-SE-Guadua, este es posiblemente el código de diseño nacional más completo publicado hasta la fecha, e incluye métodos y orientación de diseño de elementos y conexiones.
- **Manual de la construcción de bahareque encementado:** *Manual para la construcción resistente a terremotos de casas de una y dos plantas con bahareque encementado* (Prieto et al., 2002): proporciona orientación de diseño, capacidades de pared de corte y detalles de ejemplo. Útil para conceptos y detalles.
- **Serie de notas técnicas sobre el uso estructural del bambú** (Kaminski et al., 2016b; 2016c; en prensa a; en prensa b; en el borrador a): guía independiente para determinar las propiedades de los materiales de los datos de prueba, verificar los principales mecanismos de falla y proponer valores de diseño conservadores para cualquier bambú. Aunque se basa en

la información de ISO 22156 (ISO, 2004a) y NSR 10-G (AIS, 2010), utiliza el enfoque de Eurocódigo. Un punto de partida recomendado para el diseño de elementos y conexiones.

- **NEC-SE-Guadua** (MIDUVI, en prensa): Nuevo estándar ecuatoriano para diseñar con guadua bambú Junto con el NSR 10-G12, este es sin duda el código de diseño nacional más completo publicado hasta la fecha, e incluye métodos y orientación de diseño de elementos y conexiones.
- **Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado**: Código recientemente publicado para el diseño con guadua de bambú. No contiene los métodos detallados de diseño de elementos que se encuentran en la NSR, pero contiene reglas útiles de diseño de buenas prácticas y detalles de conexión.

Como se mencionó anteriormente, al igual que la madera, los elementos de bambú poseen varios modos de falla frágiles. Como tal, cuando se diseña para cargas sísmicas, un factor de comportamiento apropiado para una estructura que utiliza elementos de bambú para el sistema lateral resistente a la carga (es decir, un marco arriostrado) debería ser bajo en la mayoría de los casos, por ejemplo $q = 1.5$ a Eurocódigo 8 (CEN, 2013) o $R = 1.5$ a ASCE7-10 (ASCE, 2010) (es decir, la estructura debe permanecer ampliamente elástica en el evento de diseño). Donde la falla se limita a conexiones que usan clavos de acero donde el modo de falla es una bisagra plástica que se forma en la uña (es decir, modos b, d, e, g, h, k, m, Eurocódigo 5 (CEN, 2014)) y sísmica rigurosa Se aplican principios de diseño / sobretensión de capacidad (Paulay & Priestly, 1992), es posible que se pueda lograr una ductilidad más global. Sin embargo, existen pocos datos de prueba hasta la fecha. Por lo tanto, en general, los clavos y tornillos deben preferirse a los pernos en áreas altamente sísmicas, ya que tendrán más ductilidad inherente, incluso si esto no se tiene en cuenta específicamente aplicando factores de comportamiento más elevados. Las uñas y los tornillos deben taladrarse previamente para la mayoría de las conexiones, ya que el bambú es muy susceptible a la rotura; la excepción es la fijación de la matriz al marco, donde se recomienda clavar (Sección 6.6).

6.6 Diseño de sistemas de muro cortante de bahareque encementado

El diseño de los sistemas de muro cortante de bahareque ha sido codificado de la siguiente manera:

- **Manual de la construcción de bahareque encementado**: Manual para la construcción resistente a terremotos de casas de una y dos plantas con bahareque encementado (Prieto et al., 2002). Proporciona orientación de diseño, capacidades de muro de corte y detalles de ejemplo. Útil para conceptos y detalles.
- **NSR-10-E.7: Bahareque encementado** (AIS, 2002): proporciona guías de diseño y capacidades de pared de Bahareque encementado. Este código se amplía en Correal (2016).
- **NEC-SE-Guadua** (MIDUVI, en prensa): Proporciona orientación de diseño y capacidades de pared de bahareque encementado.

- **Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado** (INBAR, 2015): Proporciona orientación de diseño y capacidades de pared de *bahareque* encementado.

Además, se han realizado pruebas a gran escala en estos sistemas en varios países con diferentes materiales y configuraciones. Los resultados de estas pruebas también se han publicado:

- Proyecto Nacional de Bambú, Costa Rica (González y Gutiérrez, 2003; Mendoza y Villalobos, 1990): se realizó una prueba cíclica en el plano a escala completa de 7 paneles.
- Proyecto FOREC (Fondo para la reconstrucción de la región productora de café), Colombia (Prieto et al., 2002): 14 pruebas monotónicas de pared de corte a escala real realizadas en paredes de diferentes configuraciones y detalles. Algunas incluyeron diagonales y otras no. También se realizaron dos pruebas bi-axiales, biaxiales a gran escala de una habitación individual.
- Proyecto de viviendas de bajo costo en El Salvador:
 - Prueba cíclica en el plano a escala real de 5 paneles de caña, madera y mortero (Málaga-Chuquitaype et al., 2014).
 - Prueba de tabla de vibración fuera del plano a escala completa de 5 paneles similares (Davies, 2014).
 - Prueba de tabla de vibración biaxial a escala completa de una habitación individual del diseño (Beteta et al., 2015). El espécimen se consideró "seguro para la vida" incluso en las aceleraciones máximas de 1.0g.

Los resultados de estas pruebas mostraron que los sistemas de muro cortante bahareque pueden ser sistemas de estabilidad de carga lateral robustos, que exceden los requisitos de diseño sísmico incluso en los países sísmicos de mayor riesgo en todo el mundo ($> 0,4$ g de aceleración máxima del terreno durante un período de retorno de 475 años - Kaminski et al., 2015). Cuando están bien detallados, también tienden a tener cierta ductilidad.

Recomendaciones para el diseño

Basándose en las pruebas realizadas en los sistemas de muro cortante de bahareque encementado, se proporcionan las siguientes recomendaciones generales para el diseño (Figura 58):

- Utilice los cuatro códigos de diseño estructural publicados como punto de partida (Prieto et al., 2002; AIS, 2002; INBAR, 2015; MIDUVI, en prensa).
- Los postes verticales pueden ser de madera o bambú y no deben exceder 1m de centros. Se debe considerar los centros más cercanos si la matriz no puede extenderse fuera del plano por sí misma entre postes (por ejemplo, la esterilla de bambú abierto y la malla de acero expandido es la más delgada sección para que los postes estén más cerca, aunque los bastones de 25 mm de diámetro pueden abarcar 1 metro (Chan, 2014)). Los espárragos deben dimensionarse para la carga fuera del plano y conectarse de manera

robusta a la placa de la suela y al travesaño de la plataforma con clavos, una placa de clavos o pernos.

- Los postes al final de las paredes y adyacentes a las aberturas, como ventanas y puertas, pueden experimentar una elevación neta debido al vuelco. Deben fijarse de forma robusta, directa o indirectamente (a través de la placa de la suela) a la base, con una conexión de acero (Figura 67 y Figura 69).
- Una placa única proporciona un detalle de base conveniente y robusto para los pernos, aunque no es esencial. La placa de la suela debe fijarse a los cimientos con pernos o placas de acero, diseñadas para resistir las cargas en el plano y fuera del plano, y las cargas verticales de vuelco, si corresponde (Figura 61 y Figura 63). Las placas de suela se hacen mejor con madera, ya que es probable que las cañas de bambú se aplasten bajo cargas puntuales locales. Cuando los paneles de pared son prefabricados, las placas de suela se vuelven esenciales.
- Una placa de cabeza continua es esencial para atar la cabeza de las columnas y proporciona una ruta de carga fuera del plano para el panel de pared. Las placas de cabecera son mejores que las conexiones rápidas y las más puntuales, y es probable que los tallos de bambú se aplasten bajo las cargas puntuales locales.
- La conexión entre la base de los espárragos y la placa de base / cimentación debe diseñarse para las fuerzas de cizallamiento en el plano. Dado que estos son altos, la opción más simple es una pieza de madera encajada entre los montantes y clavada a la placa de la suela (Figura 66 y Figura 70).
- El bastón, las tiras de bambú, la esterilla de bambú abierta y la malla de acero expandido pueden funcionar con éxito como la matriz dentro del mortero de cemento. Se encontró que un espacio de alrededor de 10-20 mm dentro de la matriz era el mejor para que el mortero se adhiriera y se trabara con la matriz y el mortero en la parte posterior (Figura 59). La matriz debe ser clavada en todos los postes.
- Si no usa malla de acero expandido, como mínimo, el refuerzo de malla de pollo debe colocarse en al menos un lado de la matriz y debe estar clavado o atado a él (Figura 59). Debe estar tenso y clavado a todos los postes, placas de suela y vigas del techo. La malla de pollo ayuda en gran medida con el proceso de revelado, evita que el mortero se astille en la cara a la que está unida, y es eficaz para retener suficientes porciones de mortero en la pared para que el mortero contribuya aún a la resistencia y rigidez del panel después del daño.
- Refuerzo de bambú o acero no siempre es esencial. Cuando la estructura es de una sola planta, las paredes de corte de bahareque encementado pueden funcionar de manera efectiva sin arriostamiento. Para casas de varias plantas, los arriostamientos brindan un nivel adicional de robustez en caso de falla de las paredes de cortante.
- Las capas intermedias de las superficies de mortero deben estar bien preparadas, por ejemplo, mediante rayado o humectación, de lo contrario el deshuesado puede ocurrir temprano.

- La relación de cemento a arena en el mortero no debe exceder de 1: 5; las proporciones más altas conducen a un mortero más débil. Los trabajadores de la construcción también deben evitar agregar demasiada agua a la mezcla de mortero. La cal también se puede introducir en la mezcla para mejorar la trabajabilidad sin comprometer la resistencia; en este caso, se puede usar una relación de mezcla de 1: 1: 6 (cemento: cal, arena).

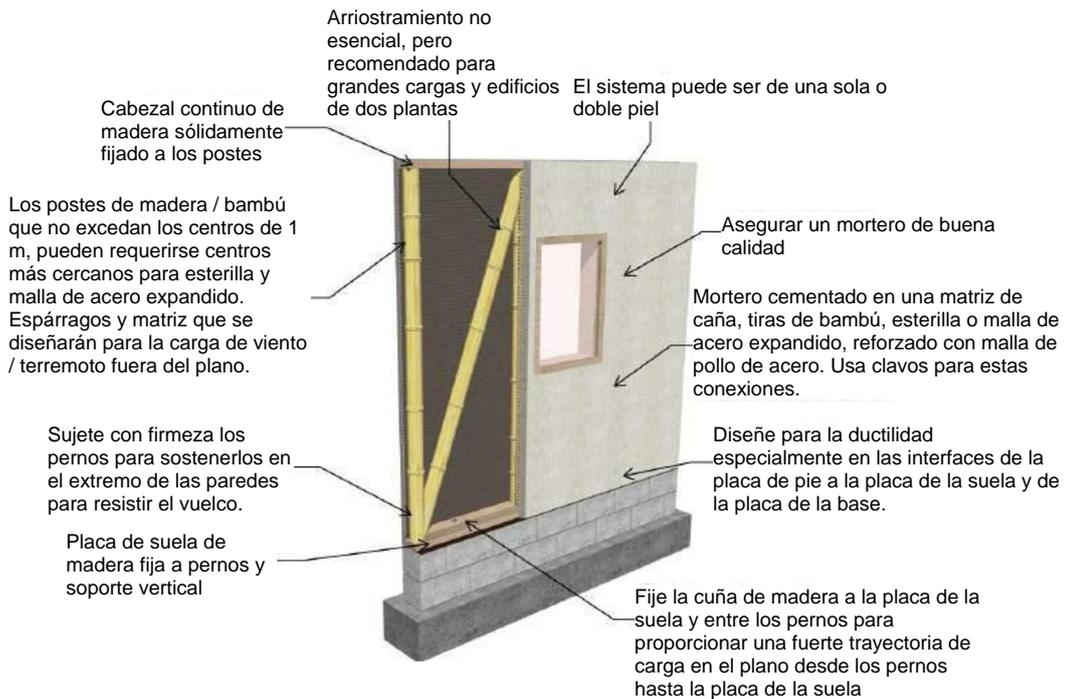


Figura 58: Recomendaciones para el diseño de muros cortantes de bahareque encementado

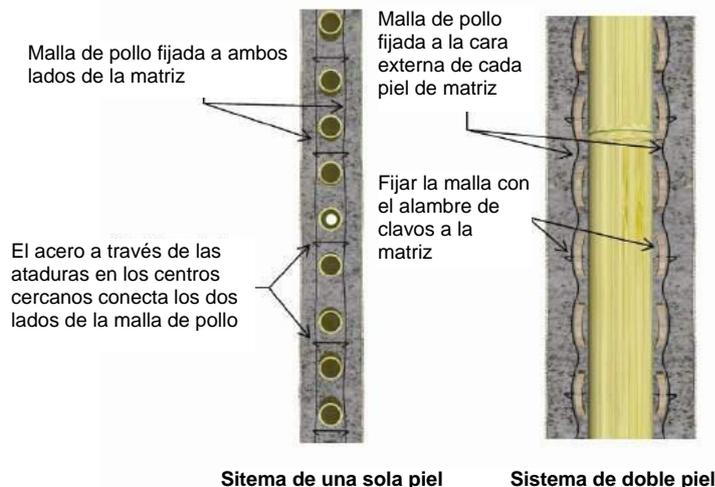


Figura 59: Detalles para asegurar la restitución del mortero de cemento a la matriz en sistemas de una o dos capas

- En términos de diseño para la ductilidad, como se menciona en la Sección 6.5, los elementos de bambú poseen varios modos de falla frágiles, por lo

que una pared de corte de bahareque encementado no tendrá automáticamente ductilidad. Las áreas clave de falla se encuentran en las interfaces de la placa del pie a la suela y de la suela a la plataforma, donde se recomiendan clavos y placas de acero clavadas, y se deben evitar los pernos, a menos que estén diseñados con los principios de la *sobretensión* con confianza. Clavar la matriz en el marco también proporciona cierta ductilidad, al igual que la malla de pollo clavada. Sin embargo, incluso si se implementan estas recomendaciones, debido al *comportamiento* ampliamente variable de los muros cortantes bahareque encementado, se recomienda que un factor de comportamiento apropiado sea $q = 1.5$ para el Eurocódigo 8 (CEN, 2013) o $R = 1.5$ para ASCE7-10 (ASCE, 2010) (es decir, la estructura debe permanecer ampliamente elástica en el evento de diseño). Cuando se han llevado a cabo pruebas a gran escala y se han aplicado principios rigurosos de diseño de la capacidad / sobretensión, es posible que se pueda lograr una mayor ductilidad global. Aunque existen pocos datos de prueba hasta la fecha.

Si no se incluye arriostramiento y la pared de corte consiste únicamente en la matriz y el revoque de cemento, se hacen las siguientes recomendaciones adicionales:

- Para sistemas con una matriz clavada a un lado del marco solamente (Figura 59):
 - El procesamiento de cemento debe colocarse a ambos lados de la matriz. La unión entre los dos debe ser áspera y prehumedecida.
 - El refuerzo de malla de pollo debe colocarse a ambos lados de la matriz, junto con las ataduras de alambre de acero para permitir que ambos lados del render se enganchen y eviten la formación de astillas.
- Para sistemas con una matriz clavada a ambos lados del marco y un espacio intermedio entre ellos (Figura 59):
 - El procesamiento de cemento debe colocarse en la cara externa de ambas matrices.
.El refuerzo de malla de pollo debe colocarse en la cara externa de ambas matrices, firmemente fijada a la matriz misma con clavos espaciados estrechamente o ataduras de alambre de acero, para permitir que el render trabaje de forma compacta con la matriz y evite la formación de astillas. El refuerzo de malla de pollo debe colocarse a ambos lados de la matriz, junto con las ataduras de alambre de acero para permitir que ambos lados del render se enganchen y eviten la formación de Astillas.

Cuando se incluyen arriostramientos como parte de la pared de corte, se debe considerar el diseño del marco como un marco arriostrado junto con las cargas de conexión respectivas para las cargas sísmicas completas; esto luego cubre el escenario del marco arriostrado tomando toda la carga y no falla de manera repentina y frágil.

Cuando se incluyen arriostramientos como parte de la pared de corte para muros exteriores expuestos a lluvia torrencial, también vale la pena diseñar los

arriostramientos para la carga máxima del terremoto y permitir que la matriz y el mortero sean efectivamente una fachada de sacrificio que proteja el marco y preparando dentro de la putrefacción

Cuando se siguen estas recomendaciones junto con la ingeniería de buenas prácticas y el sistema de muros seleccionado coincide con el utilizado en las pruebas existentes, los datos de prueba publicados se pueden utilizar como una base de diseño sin más pruebas. Donde el sistema se desvía, se recomienda realizar pruebas a gran escala.

Recomendaciones para probar

Actualmente no hay una guía o código para realizar pruebas a escala real de muros de bahareque encementado. Actualmente se están llevando a cabo investigaciones sobre qué procedimiento de prueba sería más apropiado para utilizar, y esto se publicará en breve en una publicación complementaria de INBAR (Kaminski et al., En el borrador b).

7.0 Detalles típicos de construcción de casas de bahareque encementado

Esta sección proporciona algunos detalles estructurales clave para la construcción de casas de bahareque encementado de modo que sean resistentes a los desastres, duraderas y robustas. En el Apéndice A se presenta una selección de dibujos generales y detallados de bahareque encementado para El Salvador.

7.1 Detalle de la plataforma

Es esencial elevar la base de la estructura por encima de la base para protegerla de la humedad (por fuertes lluvias, inundaciones, salpicaduras del techo, etc.). Al elevar la base también es más difícil para las termitas construir tubos de refugio y acceder a la estructura. El soporte debe ser capaz de resistir las cargas en el plano, fuera del plano y verticales de la pared, lo que generalmente significa que debe reforzarse de alguna manera. Las opciones para elevar la base incluyen: mampostería de ladrillo o piedra, bloques de refuerzo hueco o concreto reforzado (Figura 27 y Figura 60). Aproximadamente 200 mm se considera una altura de soporte mínima desnuda, mientras que 400 mm es mejor. También se recomienda agregar una membrana a prueba de humedad (como una lámina de plástico simple) entre el marco y el soporte vertical, para evitar que el marco absorba la humedad del soporte vertical.



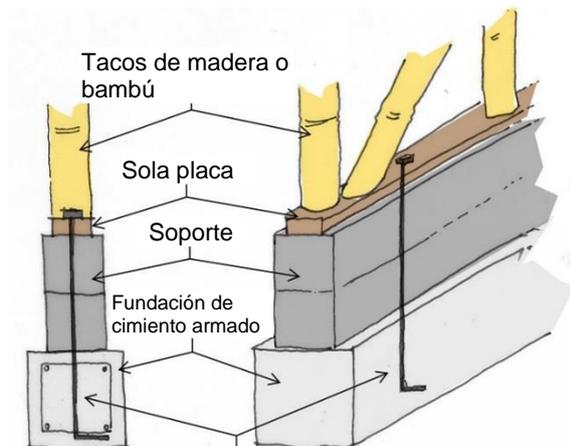
Figura 60: Ejemplo de soporte vertical simple de viviendas de bahareque encementado en El Salvador, que consta de dos cursos de bloques reforzados, con un total de 400 mm de altura desde la base

7.2 Detalle de plataforma a placa única

En la mayoría de los sistemas, una suela de madera se utiliza para proporcionar un elemento de fijación conveniente en la base de las paredes y sentado en el soporte vertical. Dependiendo del sistema, las cargas de los elementos de la pared (espárragos y arriostramiento) se transfieren a través de la placa base al soporte vertical o directamente al soporte vertical. Cuando la placa de piso se usa estructuralmente, debe ser fijada sólidamente a la plataforma vertical y deberá resistir cualquier carga sísmica y de viento, que podría ser en el plano, fuera del plano y vertical. Las opciones incluyen:

- Pernos simples.
- Tirantes hechos a medida y listos para usar
- Tirantes de acero fabricados fundidos.

Mientras que los pernos son los más simples y más ampliamente disponibles para fijar las placas de suela (Figura 61 y Figura 62), taladrar los agujeros para la placa de base con precisión para las ubicaciones de los pernos de colada puede ser difícil y a menudo resulta en agujeros de gran tamaño que puede conducir a una conexión menos rígida. Además, su capacidad de carga de carga horizontal puede ser algo limitada, como su ductilidad. Las correas de acero a medida, tales como las correas en Y, disponibles en varios fabricantes internacionales, son una buena alternativa ya que son baratas, dúctiles en un terremoto y simplifican la instalación, ya que la placa puede clavarse fácilmente en la placa después de la placa ha sido colada, por lo tanto, proporcionan una mayor tolerancia a las tolerancias (Figura 63, Figura 64 y Figura 65). Desafortunadamente, no están disponibles en muchos países. Sin embargo, se debe considerar el envío a granel de ellos debido a sus beneficios.

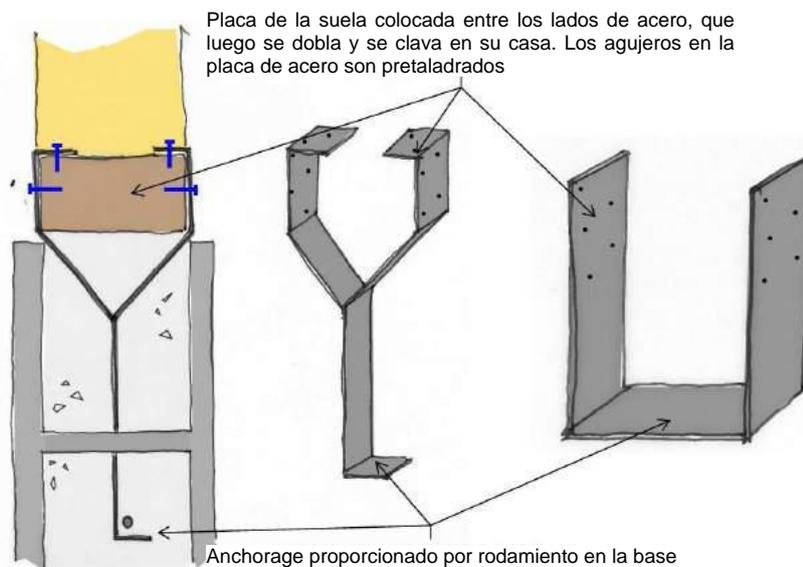


Varilla de acero simple o barra de refuerzo, moldeada en el soporte vertical y la base y fijada en la parte superior con tuerca y arandela, o simplemente doblada hacia abajo

Figura 61: Detalle de la placa de la suela fijada al soporte vertical con pernos



62: Foto de la placa de la suela fijada al soporte vertical con pernos



Correa en Y disponible en el mercado Alternativa de correa de acero hecha localmente

Figura 63: Detalle de la suela fijada al soporte vertical con flejes de acero prefabricados o fabricados localmente



Figura 64: Foto de la suela fija al soporte con correas de acero empotradas, antes de colocar las correas en bloques reforzados



Figura 65: Foto de la suela fijada al soporte con correas de acero empotradas, después de clavar

7.3 Clavos / abrazaderas a la suela / base

Se requiere una conexión robusta entre los espárragos / arriostramientos y la placa / cimentación de la suela, para transferir la cizalla en el plano, cizalladura fuera del plano y fuerzas axiales (compresión y tensión) en un terremoto o vientos fuertes. Las opciones incluyen:

- Tornillos o clavos oblicuos o puntiagudos.
- Placas angulares de acero.
- Varilla de acero echada en el bambú.
- Placa de acero atornillada al bambú.
- Correa de acero atornillada al bambú.



Figura 66: Foto del ángulo de acero utilizado para reparar el perno de madera a la suela

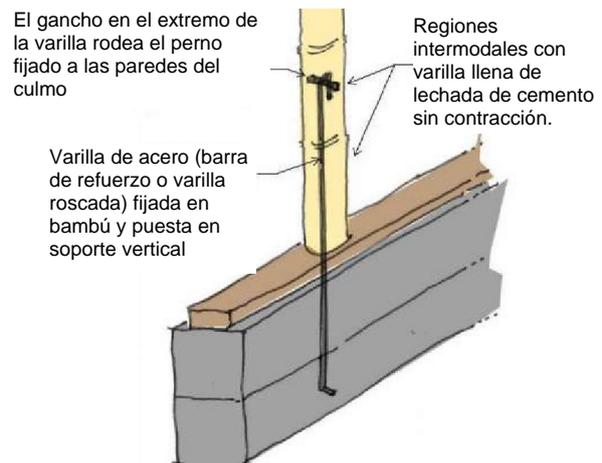


Figura 67: Detalle de la varilla de acero fundida en bambú utilizada para fijar el perno / columna de bambú a la base. Tiene una capacidad de cizallamiento biaxial razonable y cierta capacidad de tracción. Sin embargo, puede no ser adecuado cuando las cargas de tracción son muy altas

Aunque los tornillos o clavos oblicuos o de clavos son simples y baratos, y pueden proporcionar una capacidad adecuada de corte fuera del plano, no tendrán una capacidad de cizalla o de tensión axial en el plano por sí solos. Las placas angulares de acero mejoran las conexiones oblicuas simples, pero solo funcionan bien para los postes de madera (Figura 66) ya que el bambú tiene una superficie curva.

El detalle más común es una varilla de acero roscada o barra de refuerzo colocada dentro de la caña de bambú, que luego se rellena con mortero de cemento (Figura 67). A menudo se agrega un perno de acero para proporcionar una ruta de carga directa, en lugar de depender únicamente de la capacidad de corte del diafragma nodal y la unión entre el mortero y la cara interna del bambú. El detalle tiene una capacidad de cizallamiento biaxial razonable y cierta capacidad de tracción.

Para las columnas / postes de bambú que experimentan altas cargas de corte, se puede usar una placa de acero simple (Figura 68). Esto puede ser lanzado primero a la base, luego atornillado al bambú.

Para las columnas / postes de bambú que experimentan altas cargas de tracción axial, como las del extremo de las paredes de corte que resisten el vuelco, se puede usar una correa delgada de acero simple (Figura 69). Esto puede ser lanzado primero a la base, luego atornillado al bambú.

Para las columnas de bambú que forman parte de muros cortantes de bahareque, se recomienda agregar "cuñas" largas de bambú o madera entre las columnas para proporcionar una trayectoria de carga directa en el plano para las cargas de viento y terremoto.

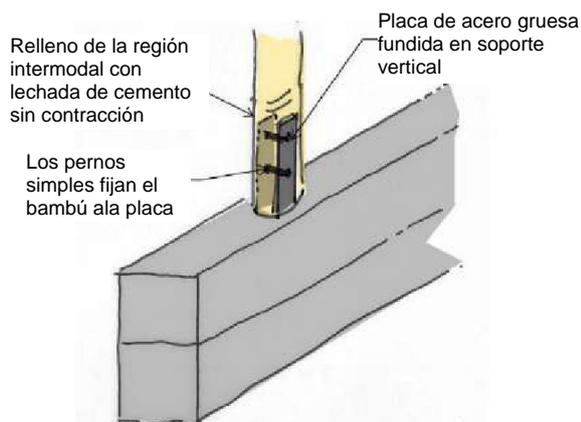


Figura 68: Placa de acero echada en el soporte vertical atornillado al bambú

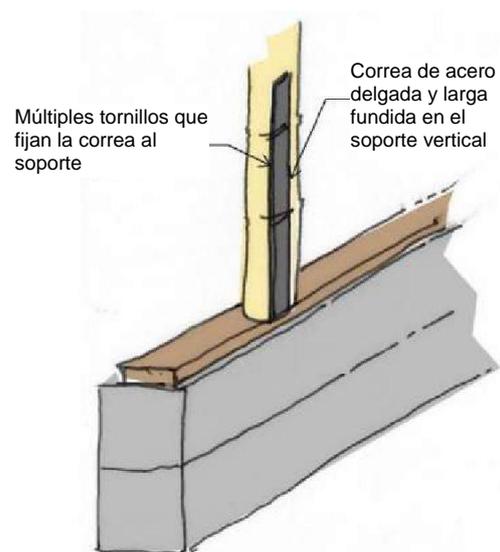


Figura 69: Correa de acero moldeada en el soporte vertical y atornillada al bambú

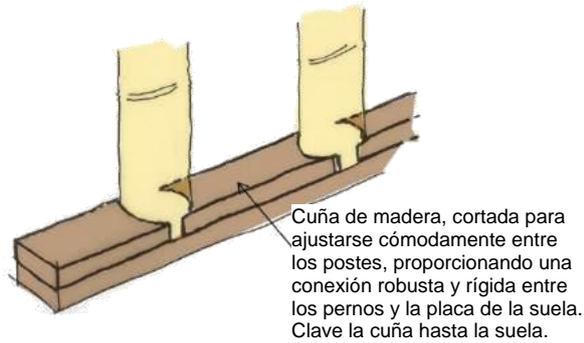


Figura 70: Detalle de "cuñas" largas de madera colocadas entre los postes de madera, para proporcionar una trayectoria de carga en el plano para las cargas de corte dentro de la pared de corte Bahareque.

Figura 71: Foto de "cuñas" largas de madera

7.4 Detalles de la matriz

Es importante fijar bien el mortero de cemento a la matriz, especialmente en sistemas que dependen estructuralmente de las paredes de corte compuestas y carecen de arriostramiento. Esto se logra mediante la fijación de la malla de pollo a la matriz; la malla se puede fijar con clavos o con alambre. Cuando se aplique mortero a ambos lados de la misma matriz, se recomienda colocar malla de pollo en ambos lados de la matriz y agregar ataduras de alambre de acero para unir cada lado (Figura 59 y Figura 72), mitigando así el riesgo de desmenuzarse y permitir que la pared funcione bien compacta.



Figura 72: Instalación de ataduras de alambre de acero para conectar malla de pollo en ambos lados de la matriz

8.0 Asegurar la construcción de Buena Calidad

Al igual que todos los edificios, garantizar la construcción de alta calidad de bahareque encementado es esencial para la resistencia y durabilidad de la vivienda. La siguiente es una breve lista de algunos problemas clave para administrar durante la construcción:

- Asegúrese de que toda la madera esté nivelada para excluir los nudos grandes y el daño por insectos y podredumbre
- Asegúrese de que todos los bambúes sean seleccionados y evaluados visualmente por un individuo acreditado y experimentado (tenga en cuenta que la clasificación visual actual del bambú es muy limitada en detalle, principalmente proviene de la experiencia y aún no se ha correlacionado con los datos de resistencia). Los criterios para calificar deben incluir:
 - Especie exacta y origen
 - Rango de edad aceptable (tenga en cuenta que esto es difícil de controlar y requiere el uso de proveedores respetables y confiables).
 - Longitud del culmo, diámetro externo mínimo y espesor de pared mínimo.
 - Afilar.
 - Rectitud (se recomienda un límite de 1% fuera de la rectitud).
 - Ausencia de división (no es aceptable la división y esto debe verificarse después de que el material se haya secado).
 - Ausencia de daño por insectos y hongos.
 - Tratamiento, fumigación y condimento.
 - Contenido de humedad (recomendado para ser entregado seco).
- Asegúrese de que se use un carpintero de bambú experimentado.
- Cuando los elementos se hayan dividido durante la construcción, reemplace o refuerce con abrazaderas de tubería de acero circulantes (Figura 73).
- Asegúrese de que todas las conexiones de bambú con relleno de mortero de cemento utilicen una mezcla de mortero seco de alta resistencia, que se empaqueta firmemente en el entrenudo.



Figura 73: Lazos de tubería de acero utilizados para fortalecer el bambú después de haber escupido, Colombia (Kaminski, 2016)



Figura 74: Mantenimiento de una buena unión entre capas subsiguientes de mortero de cemento mediante la rugosidad de la capa anterior mientras se fija (Kaminski, 2016)

- Asegurar una buena calidad de mortero de cemento renderizado por:
 - Controlar la relación agua: cemento (los yeseros a menudo agregarán exceso de agua ya que esto hace que el mortero de cemento sea mucho más fácil de aplicar). Un mortero más seco es más fuerte y más duradero.
 - Mantener una buena unión entre capas de mortero subsiguientes. Esto se debe hacer mediante la rugosidad de la capa anterior mientras aún está configurada (Figura 74), y humedeciendo la capa anterior con agua justo antes de aplicar la nueva capa.
 - Evite aplicar el mortero en capas muy gruesas, ya que existe el riesgo de que el mortero caiga por su propio peso. Las capas individuales de 5-10 mm de espesor tienden a ser óptimas.
 - Para la primera capa, evite aplicar el mortero a ambos lados de la matriz de una vez, ya que el mortero tiende a caer por un lado cuando se aplica desde el otro.
 - Curando el mortero rociando con agua durante al menos 5 días después de la aplicación.

9.0 Otras Consideraciones Importantes para el Diseño

En esta sección se analizan otras consideraciones importantes al diseñar viviendas de bahareque encementado, como la salud y la seguridad, el uso de los beneficiarios para el trabajo, el mantenimiento y la salud y el bienestar de los ocupantes.

La construcción de viviendas de bahareque encementado es segura para construir y no utiliza productos químicos tóxicos, puede ser construida por los propios beneficiarios, no requiere mantenimiento significativo, y se ha demostrado que es muy popular entre los beneficiarios en muchos estudios de casos. Puede proporcionar un hogar higiénico, seguro, duradero y térmicamente confortable.

9.1 Normas de salud, seguridad y trabajo para la construcción

Bahareque encementado normalmente no requiere ningún método de construcción peligroso o productos químicos tóxicos. Al diseñar, tenga en cuenta la salud y la seguridad de todos los trabajadores en todas las etapas del ciclo de vida del edificio. Las consideraciones deben incluir:

- Seguridad durante la cosecha del bambú.
- Puede ser necesaria la seguridad en la planta de procesamiento de bambú, especialmente la manipulación y eliminación de cualquier sustancia química de tratamiento, como el equipo de protección personal relevante para el boro, como los guantes. Los residuos de boro líquido deben desecharse de forma segura y no en ningún curso de agua, donde puede terminar en agua potable.
- Seguridad durante la construcción, incluido trabajar desde la altura, cortar y manipular el bambú tratado (especialmente si se trata con productos químicos distintos del boro), las excavaciones y los bordes afilados expuestos (clavos, pernos, etc.). La prefabricación puede minimizar este riesgo al reducir el tiempo de construcción y minimizar el trabajo desde la altura.
- Seguridad al final de la vida, incluida la eliminación de cualquier material peligroso, especialmente bambú tratado con productos químicos distintos del boro.

9.2 Maximizar el uso de los beneficiarios de viviendas para el trabajo de la construcción

Bahareque encementado puede ser construido por mano de obra no calificada con la supervisión adecuada. Siempre que sea posible, se recomienda que la contribución laboral de los beneficiarios de vivienda se maximice, ya que esto aumenta su satisfacción a través de una sensación mejorada de participación y apego a la casa terminada, y a su vez puede mejorar el mantenimiento de las casas y reducir el riesgo de ocupantes que abandonan la propiedad debido al deterioro (IFRC, 2010, Lyons & Schilderman, 2010). También aumenta su conocimiento del sistema de construcción, que puede ayudar en el mantenimiento (Sección 9.3).

9.3 Mantenimiento

La vivienda de bahareque encementado no requiere un mantenimiento significativo más allá de lo siguiente:

- Asegurándose de que no haya fugas desde el techo a las paredes.
- Pintar periódicamente las paredes y arreglar grietas.
- Verificación de bambú o madera dañados y reemplazo, según corresponda.
- Verificando si hay tubos de refugio de termitas y destruyéndolos.

Garantizar que la reparación y reconstrucción es posible tanto por los mismos ocupantes como por mano de obra local, preferiblemente mediante el uso de instrumentos de baja tecnología. Se recomienda un programa de capacitación para el mantenimiento de la vivienda para los beneficiarios .

9.4 Salud y bienestar de los ocupantes de la vivienda

Se ha demostrado que el bahareque encementado es muy popular entre los beneficiarios en muchos estudios de casos. Las consideraciones clave para la salud y el bienestar de los ocupantes incluyen:

- Higiene: la vivienda de bahareque encementado puede ser muy higiénica al asegurar acabados duraderos de paredes y pisos con pocas grietas (donde las alimañas pueden esconderse); el uso de cemento para las paredes y los pisos ayuda con esto. La introducción de tierra en la mezcla de mortero de cemento puede reducir la durabilidad de la pared, lo que puede provocar grietas y alimañas. Cuando use madera tratada o bambú, asegúrese de que sea seguro usarlo dentro del edificio; esta es una de las ventajas del boro en comparación con otros productos químicos. Asegúrese de que todos los orificios de ventilación a las cavidades de la pared (que son esenciales para permitir que la madera y el bambú "respiren", como se describe en la Sección 4.0) estén sellados contra las alimañas (roedores e insectos).
- Calidad del aire interior: garantice un nivel razonable de ventilación natural, no solo para el suministro de aire fresco, sino también que, si es culturalmente deseable, permita a los ocupantes, por ejemplo, cocinar en el interior. En países cálidos, una regla general es que todas las habitaciones deben tener una ventana con una abertura clara de al menos 10% del área de la habitación según el plan.
- Iluminación interior: asegure una cantidad razonable de luz natural a través de ventanas y claraboyas.
- Ruido: el uso de paredes de mortero de cemento puede proporcionar barreras acústicas razonablemente buenas entre las habitaciones.
- Seguridad: las paredes de bahareque encementado son muy fuertes y proporcionan una excelente protección contra los intrusos.
- Personalización del hogar: proporcione a los beneficiarios la capacidad de personalizar la decoración y el diseño interno tanto como sea posible. Utilice un enfoque dirigido por el propietario siempre que sea posible (IFRC, 2010).

- Aspiraciones de los beneficiarios: la investigación ha demostrado que el bahareque encementado bien construido es muy popular entre las comunidades, y que la percepción de la gente sobre la madera y el bambú como un "material de pobres" puede cambiarse (Sección 2.3).

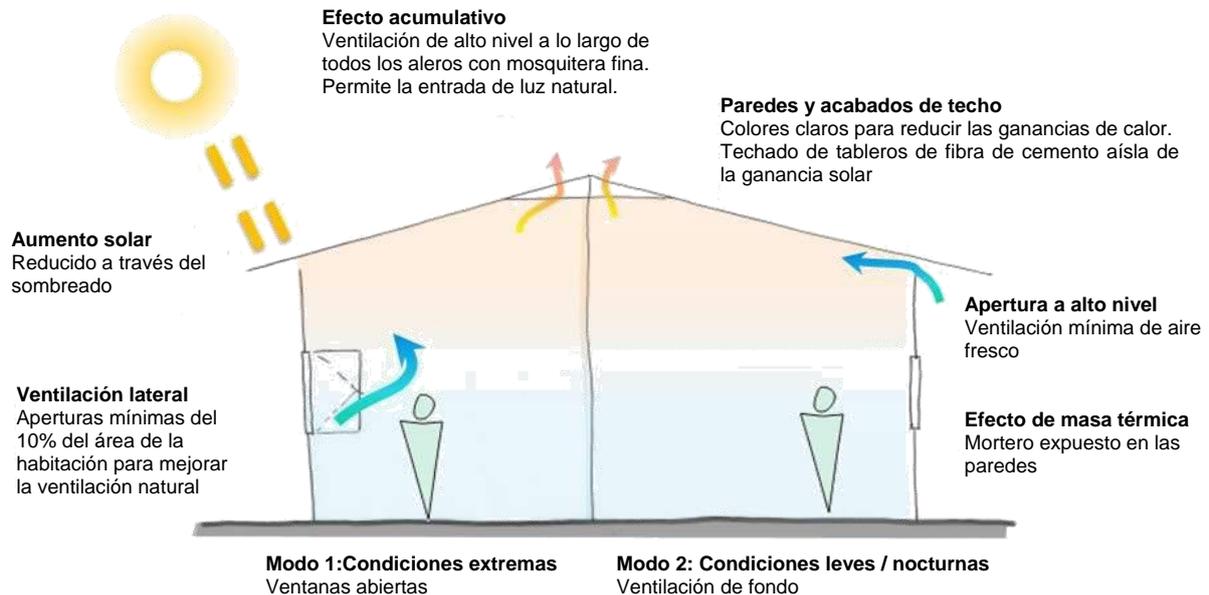


Figura 75: Técnicas para mantener fría la vivienda de bahareque encementado en climas cálidos

- Consideraciones térmicas:
 - En climas cálidos, el bahareque encementado puede ser una excelente solución para la vivienda debido a su masa térmica inherente que puede igualar las temperaturas diurnas y nocturnas. Otras técnicas para mantener la casa fresca durante el día incluyen alentar la ventilación natural a través de ventanas y orificios de ventilación, aumentar la longitud del techo para reducir la ganancia solar en las paredes, un techo alto, techo de color claro y paredes para reducir la luz solar ganancia y utilizar un material aislante para techos como láminas de paneles de cemento (Figura 75)....
 - En climas fríos, se puede requerir calefacción. También considere agregar un material aislante a la cavidad de la pared.

El estudio de caso en El Salvador en la Sección 2.3 (Kaminski, 2016a) los analiza en más detalle.

10.0 Resumen

Este informe técnico ha demostrado que cuando el bahareque encementado adecuadamente puede ser una forma de vivienda económica, respetuosa con el medio ambiente, resistente a los peligros, segura y duradera. Tiene un potencial significativo en muchos países del mundo donde crece el bambú o la caña, y es particularmente adecuado para viviendas de una y dos plantas. Al igual que cualquier forma de construcción, tiene algunas limitaciones. Sin embargo, con un buen diseño puede cumplir con la mayoría de los requisitos de incendios del país, puede tener una vida útil superior a 50 años y puede resistir terremotos y vientos fuertes incluso en las regiones más peligrosas del mundo.

Referencias

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE7-10. Virginia, USA: ASCE
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2016) *ASTM A153 / A153M: Standard specification for zinc coating (hot-dip) on iron and steel hardware*. Conshohocken, PA: ASTM International
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2015) *ASTM A780: Standard practice for repair of damage and uncoated areas of hot-dip galvanised coatings*. Conshohocken, PA: ASTM International
- American Wood Council (2015) *National Design Specification for Wood Construction*. Leesburg, VA: American Wood Council
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2010) *NSR-10: Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. Título G: Estructuras de madera y estructuras de guadua*. Bogotá, Colombia: AIS
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2002) *NSR-98: Capítulo E.7: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente - Casas de uno y dos pisos en bahareque encementado*. Bogotá, Colombia: AIS
- Beteta M., Gil J., Cabrera A., Kaminski S. & Alemán J. (2015) *Ensayo en mesavibratoria de estructura de vivienda experimental en bahareque mejorado: construcción y programa experimental*. Internal Report, University Mariano Gálvez, Guatemala
- BRE (2003) *Recognising wood rot and insect damage in buildings, 3rd edition (BR453)*. Bracknell, UK: BRE
- BRE (1999) *Termites and UK Buildings: Biology, detection and diagnosis – Digest 443 Part 1*. Bracknell, UK: BRE
- British Standards Institution (BSI) (2011) *BS EN 15978:2011: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. London: BSI
- British Standards Institution (BSI) (1987) *BS 476-22: Fire tests on building materials and structures. Method for determination of the fire resistance of non-loadbearing elements of construction*. London: BSI
- Bunclark L. (2013) *ICE QUEST Travel Award Report: People-centred seismically-resistant sustainable housing in El Salvador*. ICE Report

Carazas-Aedo W. & Rivero-Olmos A. (2013) *A Wattle and Daub Anti-seismic Construction Handbook*. [Online]. Available at: <http://www.misereor.org/fileadmin/redaktion/Wattledaub%20handbook%20anti-seismic%20construction.pdf>. (Accessed: September 2016)

CEN (2014) *EN 1995-1-1: 2004 +A2 2014: Eurocode 5: Design of Timber Structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*. Brussels: CEN

CEN (2013) *EN 1998-1 (2004+A1: 2013): Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: CEN

Chan C. (2014) *The Mechanical Properties of the Local Cane in El Salvador and its Utilisation in Wall Matrix Structure of Bespoke Housing*. MSc dissertation, Coventry University, Coventry, UK

Chaves, A. (2016) *Personal photo collection*

Correal, J. (2016) Bamboo design and construction. In: Harries, K. & Sharma, B. eds. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing. pp. 393-429

Davies E. (2014) *Out-of-plane shake table testing of cane and mortar walls*, Graduate Dissertation, Cambridge University, Cambridge, UK

Eco-Indicators (EI99) (2000) *Manual for Designers*. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Netherlands

Environmental Bamboo Foundation (2003) *Vertical soak diffusion for bamboopreservation*. [Online]. Available from: <http://www.bamboocentral.org>. (Accessed September 2016)

Expamet (2016) *Expanded metal mesh and lath*. [ONLINE]. Available from: <http://www.expamet.co.uk/products/expanded-metal-mesh-and-lath>. (Accessed September 2016)

Forestry Stewardship Council (FSC) (2016) *Forestry Stewardship Council*. [ONLINE]. Available at: <https://ic.fsc.org/en> (Accessed September 2016)

Franco G., Stone H., Ahmed B., Chian S., Hughes F., Jirouskova N., Kaminski S., López J., van Drunen N. & Querembás M. (in press) The April 16 2016 MW7.8 Muisne Earthquake in Ecuador – Preliminary Observations from the EEFIT Reconnaissance Mission of May 24 - June 7. In *16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017*, Santiago, Chile, January 2017

Gonzalez G. & Gutierrez J. (2003) *Cyclic Load Testing of Bamboo Bahareque ShearWalls for housing protection in Earthquake Prone Areas*. Internal report. Materials and Structural Models National Laboratory, School of Civil Engineering, University of Costa Rica

Green Building Press (n.d.) *Boron, our Health and the Environment*. [Online] Available from: <http://www.greenbuildingpress.co.uk/archive/Boron.php>. (Accessed November 2014)

Gutiérrez J. (2000) *Technical Report 19: Structural adequacy of traditional bamboo housing in Latin America*. Beijing: INBAR

Gutiérrez J. (2004) Notes on the seismic adequacy of vernacular buildings. In *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada*. Paper No. 5011

INBAR (2015) *Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado*. Beijing: INBAR

International Federation of the Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC) (2010) *Owner-Driven Housing Reconstruction Guidelines*. IFRC, Geneva, Switzerland
International Network of Bamboo and Rattan (INBAR) (2015) *Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado*. Beijing: INBAR

International Organization for Standardization (ISO) (2015) *ISO 5660-1. Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – art 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2014) *ISO 834-11. Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2009a) *ISO 1461. Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles – specifications and test methods*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2009b) *ISO 3506-1. Mechanical properties of corrosion-resistant stainless steel fasteners – Part 1: Bolts, screws and studs*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2007) *ISO 12944-5: Paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 5: Protective paint systems*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2004a) *ISO22156. Bamboo: Structural design*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2004b) *ISO22157-1. Bamboo: Determination of physical and mechanical properties. Part 1: Requirements*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (2004c) *ISO22157-2. Bamboo: Determination of physical and mechanical properties. Part 2: Laboratory manual*. Geneva: ISO

International Organization for Standardization (ISO) (1997) *ISO 14040:1997. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. Geneva: ISO

Janssen J. (2000) *Technical Report 20: Designing and Building with Bamboo*. Beijing: INBAR

Kaminski S. (2016) *Personal photo collection*

Kaminski S. (2013) Engineered Bamboo Houses for Low-Income Communities in Latin America. In *The Structural Engineer*, October 2013, pp.14-23

Kaminski S., Coates K., Lawrence A. & Aleman J. (2015) Seismic Design of Low-Cost and Sustainable Cane, Timber and Mortar Housing for El Salvador. In *SECED2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, Cambridge, UK. July 2015

Kaminski S., Lawrence A., Coates K. & Foulkes L. (2016a) A low-cost vernacular improved housing design. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*: 169(5): 25–31

Kaminski S., Lawrence A. & Trujillo D. (2016b) Technical Note Series: Structural use of bamboo – Part 1: Introduction to bamboo. In *The Structural Engineer*, August 2016, pp.40-43

Kaminski S., Lawrence A., Trujillo D. & King C. (2016c) Technical Note Series: Structural use of bamboo – Part 2: Durability and Preservation. In *The Structural Engineer*, October 2016, pp. 38-43

Kaminski S., Lawrence A. & Trujillo D. (in press a) Technical Note Series: Structural use of bamboo – Part 3: Design Values. In *The Structural Engineer*. In press

Kaminski S., Lawrence A. & Trujillo, D. (in press b) Technical Note Series: Structural use of bamboo – Part 4: Durability and Preservation. In *The Structural Engineer*. In press

Kaminski S., Lawrence A. & Trujillo D. (in draft a) Technical Note Series: Structural use of bamboo – Part 5: Connections. In *The Structural Engineer*. In draft

Kaminski S., Lawrence A. & Trujillo D. (in draft b) *Technical guide for full-scale testing of engineered bahareque shear walls*. Beijing: INBAR. In draft

Kuehl Y. & Yiping L. (2012) *INBAR Working Paper 71: Carbon Off-setting with Bamboo*. Beijing: INBAR

Lebow S. (2004) *Alternatives to chromated copper arsenate for residential construction*. Research Paper FPL-RP-618. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory

Liese W., Gutiérrez J. & González G. (2002) Preservation of bamboo for the construction of houses for low income people. In *Bamboo for Sustainable Development*, pp.481-494

Liese W. & Kumar S. (2003) *INBAR Technical Report 22: Bamboo Preservation Compendium*. Beijing: INBAR

López M., Bommer J. & Méndez P. (2004) The seismic performance of bahareque dwellings in El Salvador. In *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada*. Paper No. 2646

Lyons M. & Schilderman T. (eds) (2010) *Building Back Better, Delivering People-centred Housing Reconstruction at Scale*. Practical Action Publishing, Rugby, UK

Málaga-Chuquitaype C., Kaminski S., Elghazouli A. & Lawrence A. (2014) Seismic response of timber frames with cane and mortar walls. In *Proceedings of the Institute of Civil Engineers – Structures and Buildings*, December 2014, 167(SB12), 693-703

Mena J., Vera S., Correal J. & Lopez M. (2012) Assessment of fire reaction and fire resistance of *Guadua angustifolia kunth* bamboo. In *Construction and Building Materials*. 27 (2012) pp 60–65

Mendoza H. & Villalobos C. (1990) *Capacidad Estructural de Paneles de Bambú*.

Graduation Project, School of Civil Engineering, University of Costa Rica

Murphy R., Trujillo D. & Londoño, X. (2004) Life Cycle Assessment (LCA) of a *Guadua* House. In *Simposio Internacional Guadua 2004*. Pereira-Colombia, 27 Sept – 2 Oct 2004

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (in press) *Código NEC-SE-Guadua – Estructuras de Guadua (GaK)*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Quito

National Fire Protection Association (NFPA) (2015) *NFPA 914: Code for Fire Protection of Historic Structures*. Washington: NFPA

Paulay T. & Priestly M. (1992) *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Prieto S., Mogollón J. & Farbiarz J. (2002) Manual for earthquake-resistant construction of one and two storey houses with cemented bahareque. In *Proceedings of the International Workshop on the Role of Bamboo in Disaster Avoidance*. Guayaquil, Ecuador, 6-8 August 2001. pp.149-166

Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) (2016) Programme for the Endorsement of Forest Certification. [ONLINE]. Available at: <http://www.pefc.org/>. (Accessed September 2016)

Ridout, B. (1999) *Timber Decay in Buildings: The Conservation Approach to Treatment: (Guides for Practitioners)*. UK: Historic Scotland

Salzer C., Wallbaum H. & Tambunan L. (2016) Fire Resistance for Low-Rise Housing in The Tropics: Test Results For Bamboo-Based Construction Systems. In *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, Austria

Shyama P. (2016) *INBAR Working Paper No. 77: Bamboos and Invasiveness*. Beijing: INBAR

Standards Australia (2006) *AS 1720-4: Timber structures - Fire resistance for structural adequacy of timber members*. Sydney: Standards Australia

System Three (2013) *Material Safety Data Sheet: Board Defence*. [Online]. Available from: https://www.systemthree.com/reslibrary/msds/Board_Defense_MSDS.pdf. (Accessed September 2016)

Tistl M. & Velásquez J. (2002) 'Roofs instead of tents: a reconstruction project in the Colombian Coffee Zone after the Earthquake of January 25th, 1999', *Proceedings of the International Workshop on the Role of Bamboo in Disaster Avoidance*. Guayaquil, Ecuador, 6-8 August 2001. pp.140-148

Trujillo D. (2007) Bamboo structures in Colombia. In *The Structural Engineer*, March 2007, pp.25-30

Trujillo D., Ramage M. & Chang W. (2013) Lightly modified bamboo for structural applications. In *Proceedings of the Institute of Civil Engineers – Construction Materials*, 166(4), pp. 238–247

Trujillo D. (2014) *Personal photo collection*

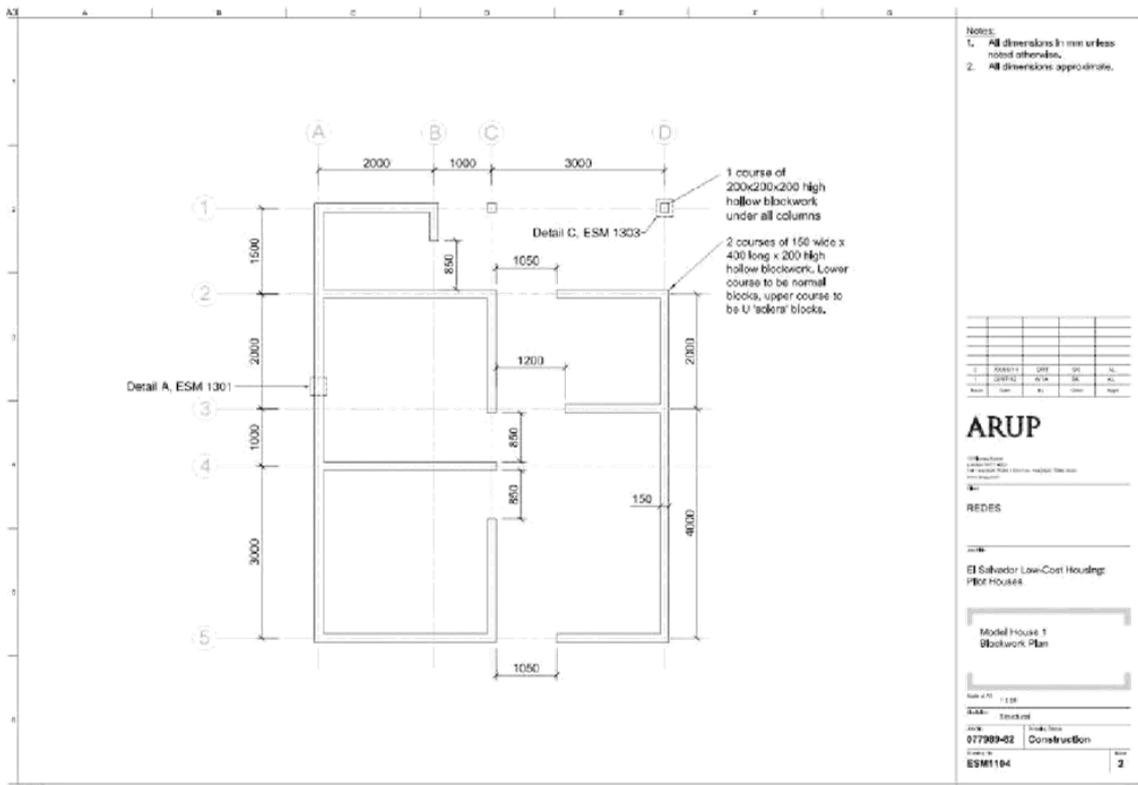
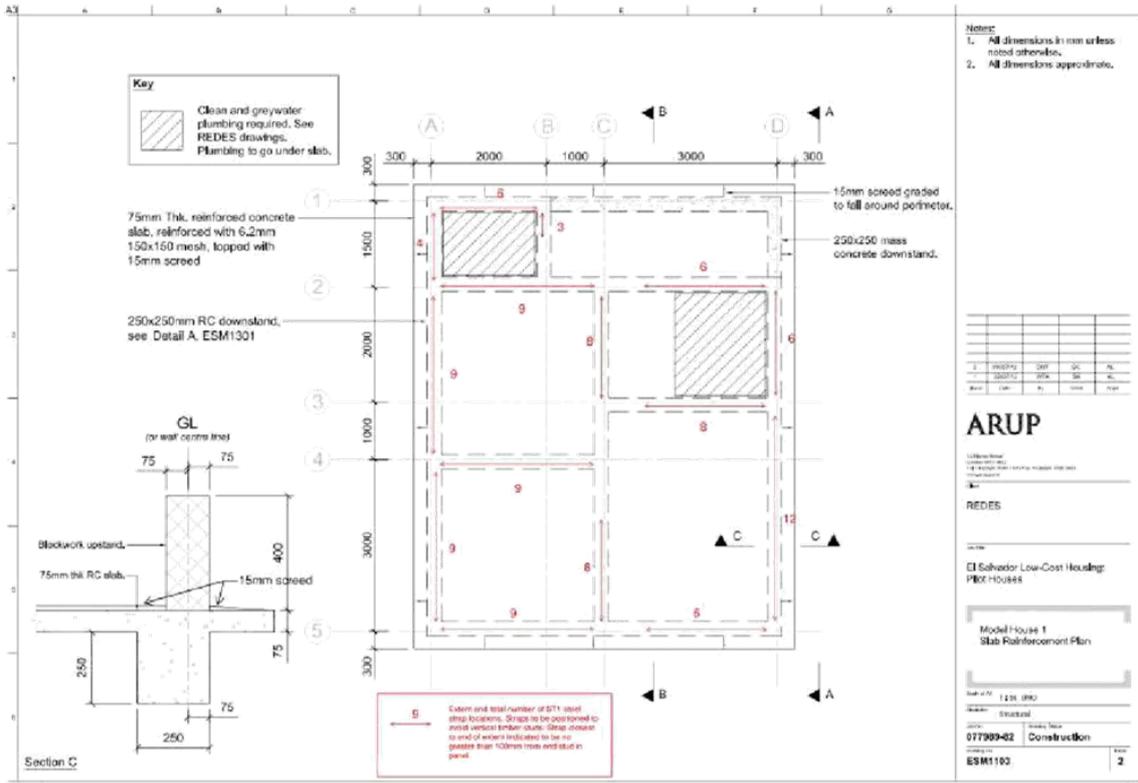
Webb K. (2015) *Investigation of the Fire Performance of Bamboo and the Construction Method Bahareque*, Report for Department of Civil Engineering, Architecture and Building, Coventry University. [ONLINE]. Available from:

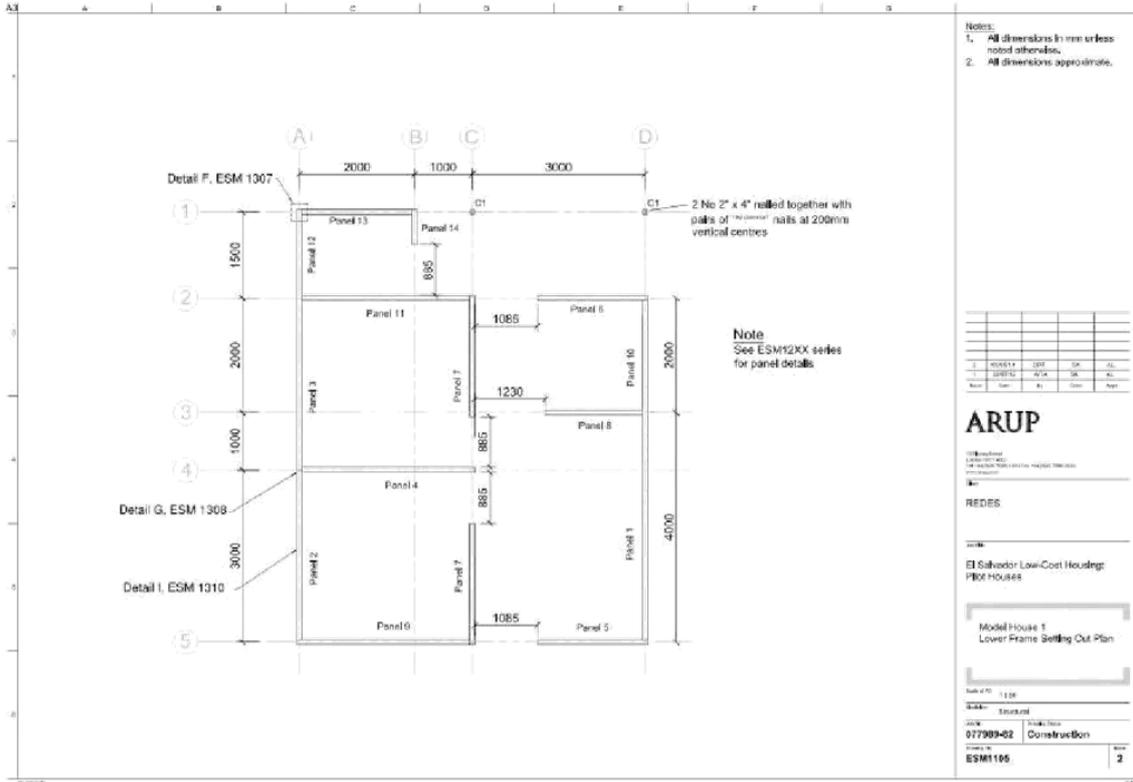
<https://connect.engr.pitt.edu/p421i6wlkzn/?launcher=false&fcsContent=true&pbMode=normal>. (Accessed September 2016)

WHO (2010) *Fact sheet 340: Chagas disease*. [Online]. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs340/en/index.html>. (Accessed: September 2016)

Wood Database (2016) *Bamboo*. [ONLINE]. Available at: <http://www.wood-database.com/bamboo/>. (Accessed September 2016)

Ya-mei W., Xi-ming W. & Jun-liang L. (2011) Decay and leach resistances of bamboo treated with CuAz preservatives. In *2011 International Conference on Agricultural and Biosystems Engineering: Advances in Biomedical Engineering*. Vols.1-2. pp. 338-341





ARUP

100 Brook Drive
London EC2A 4NE
UK
Tel: +44 (0)20 7843 5000
Fax: +44 (0)20 7843 5001
www.arup.com

REDES

El Salvador Low-Cost Housing
PRO HOUSERS

Model House 1
Lower Frame Setting Out Plan

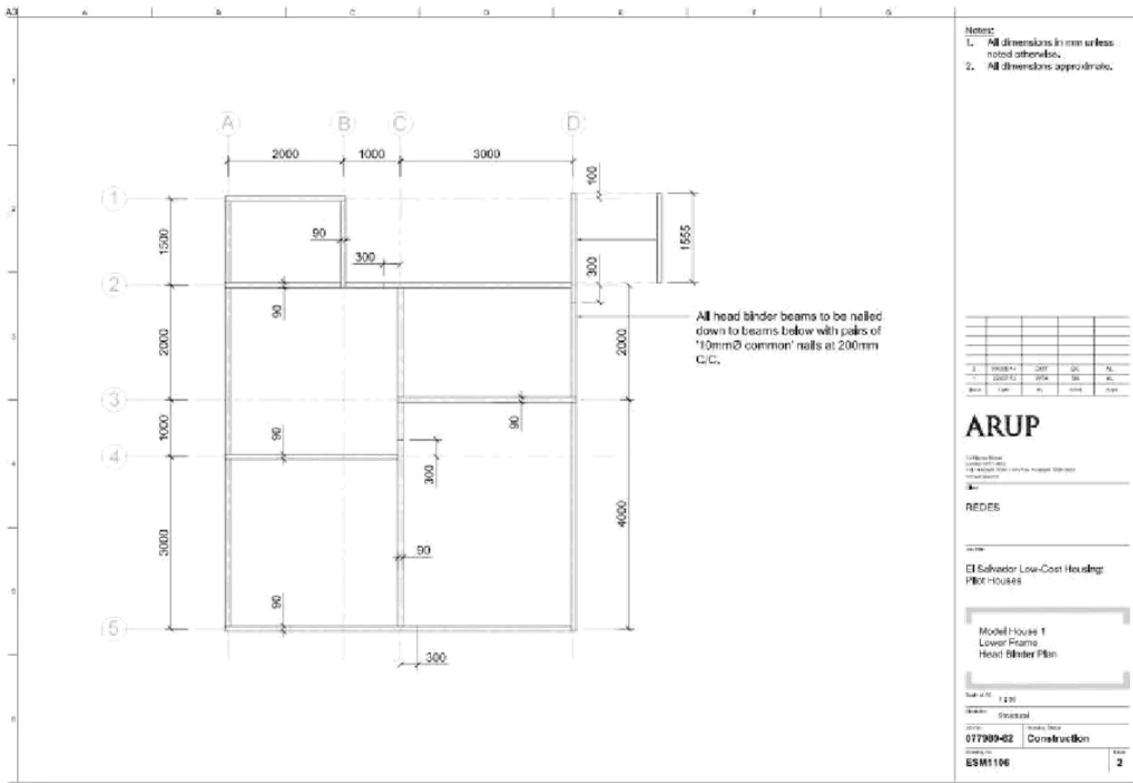
Scale: 1:50

Drawn: [Name]

077989-02 Construction

ESM1106

2



ARUP

100 Brook Drive
London EC2A 4NE
UK
Tel: +44 (0)20 7843 5000
Fax: +44 (0)20 7843 5001
www.arup.com

REDES

El Salvador Low-Cost Housing
PRO HOUSERS

Model House 1
Lower Frame
Head Blister Plan

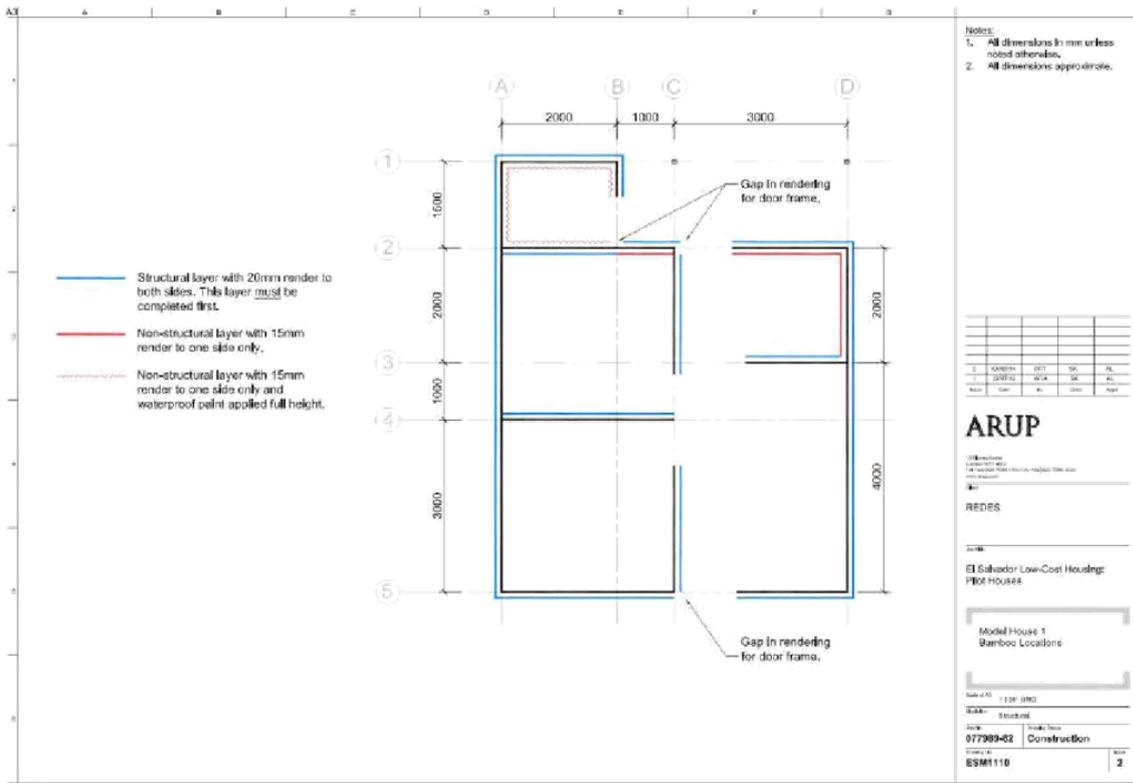
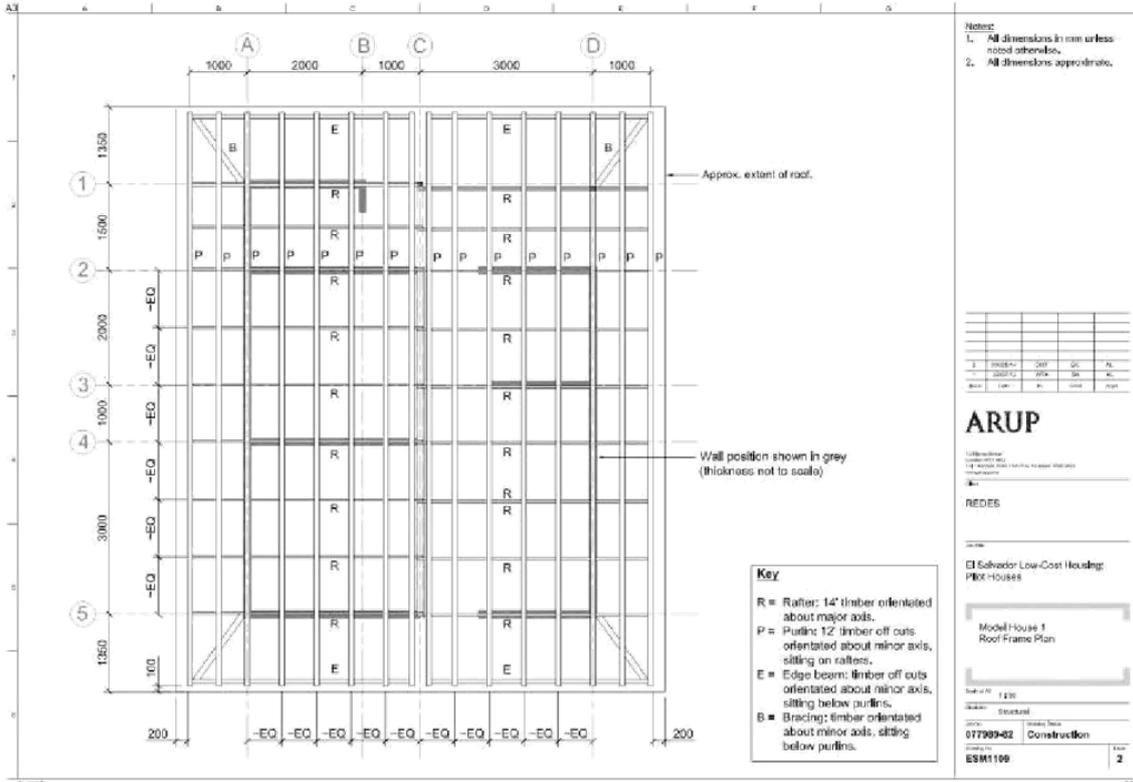
Scale: 1:50

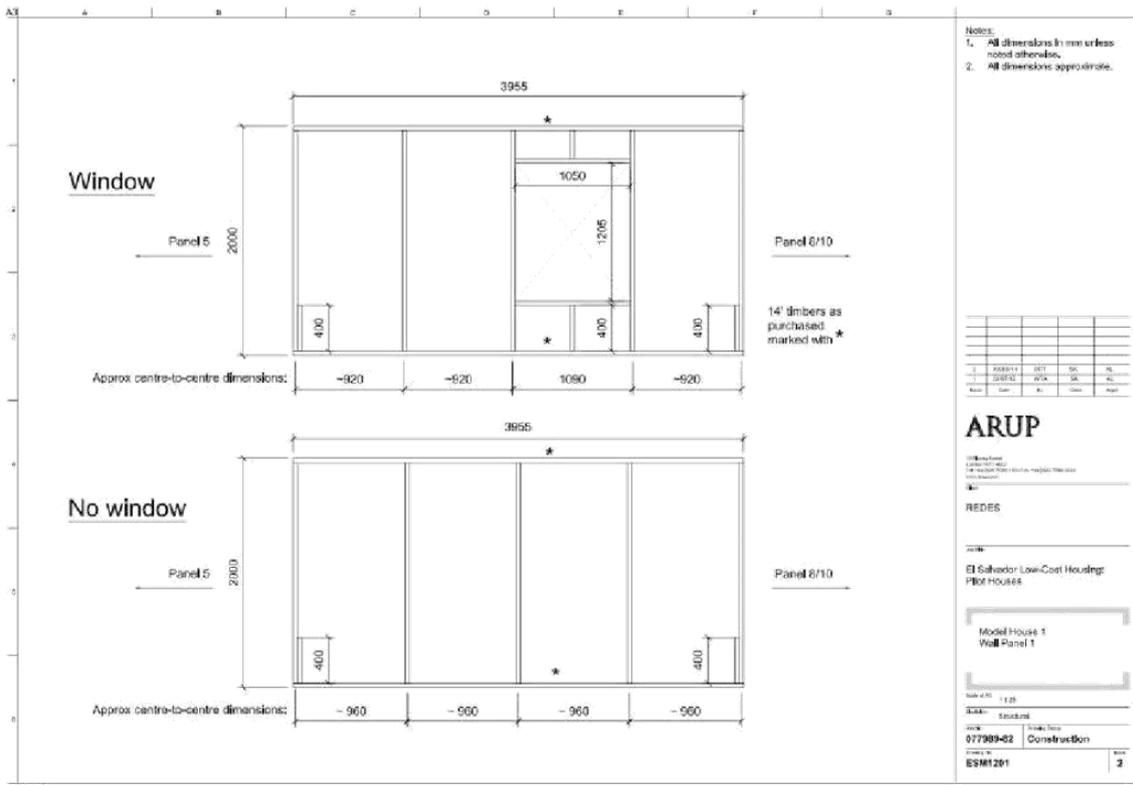
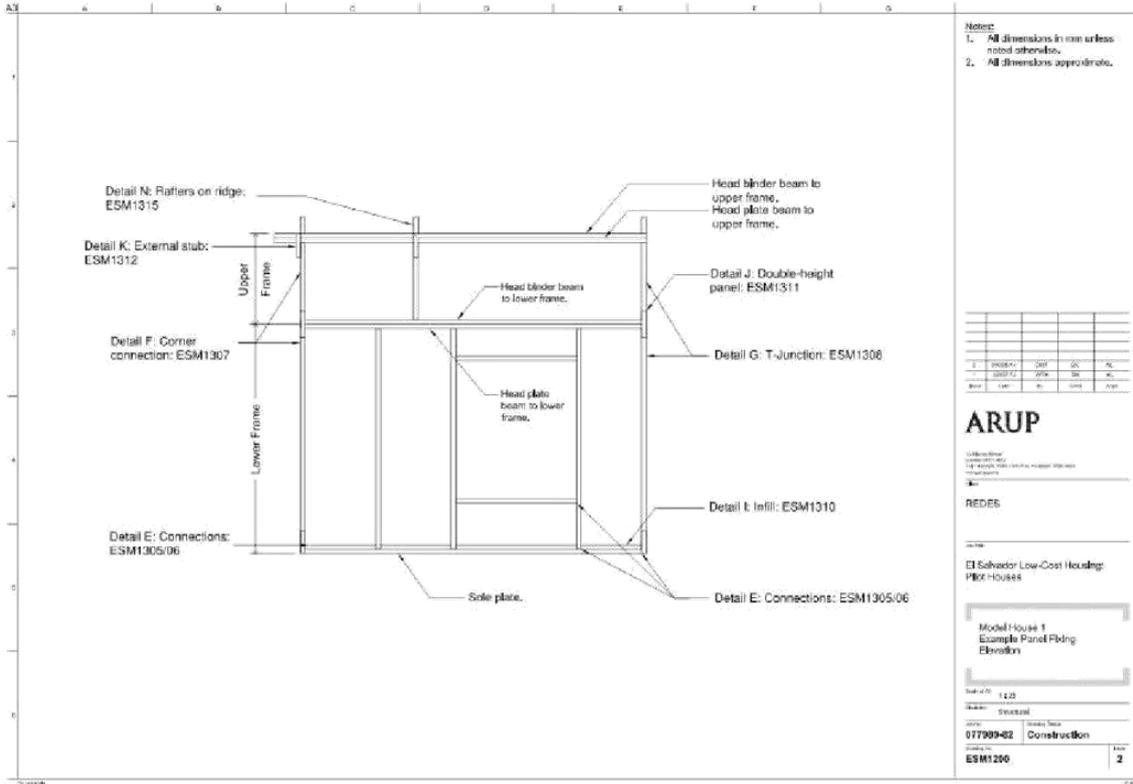
Drawn: [Name]

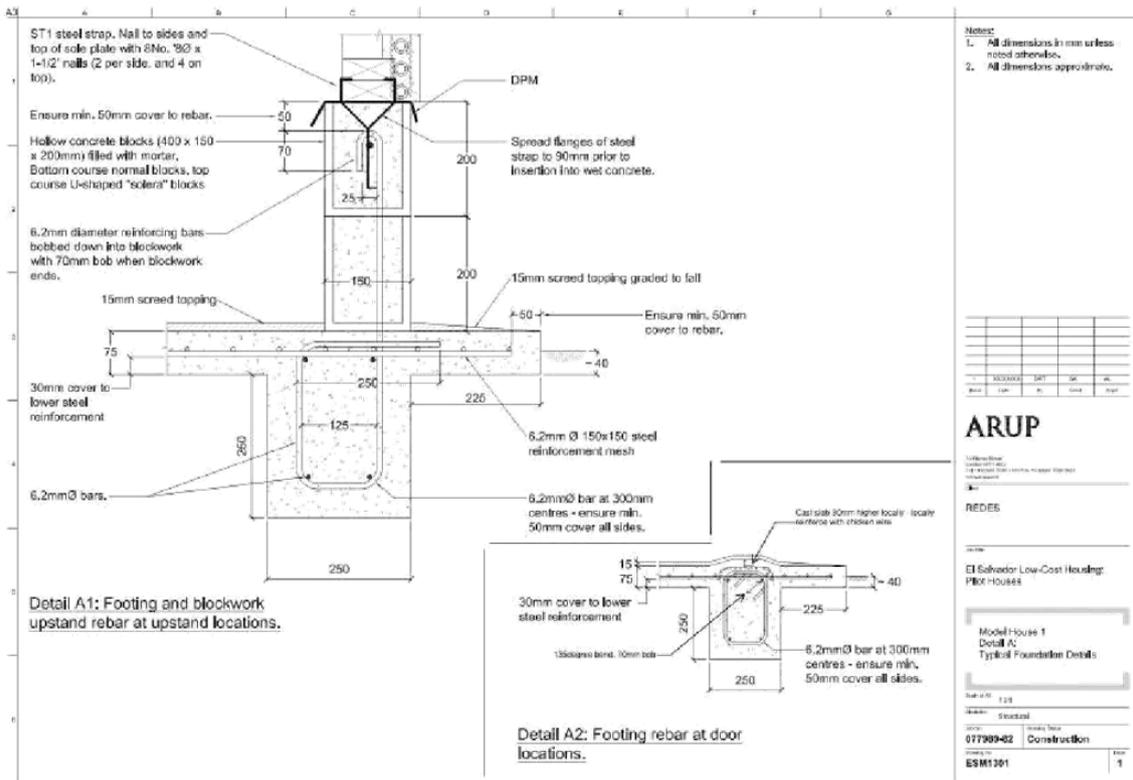
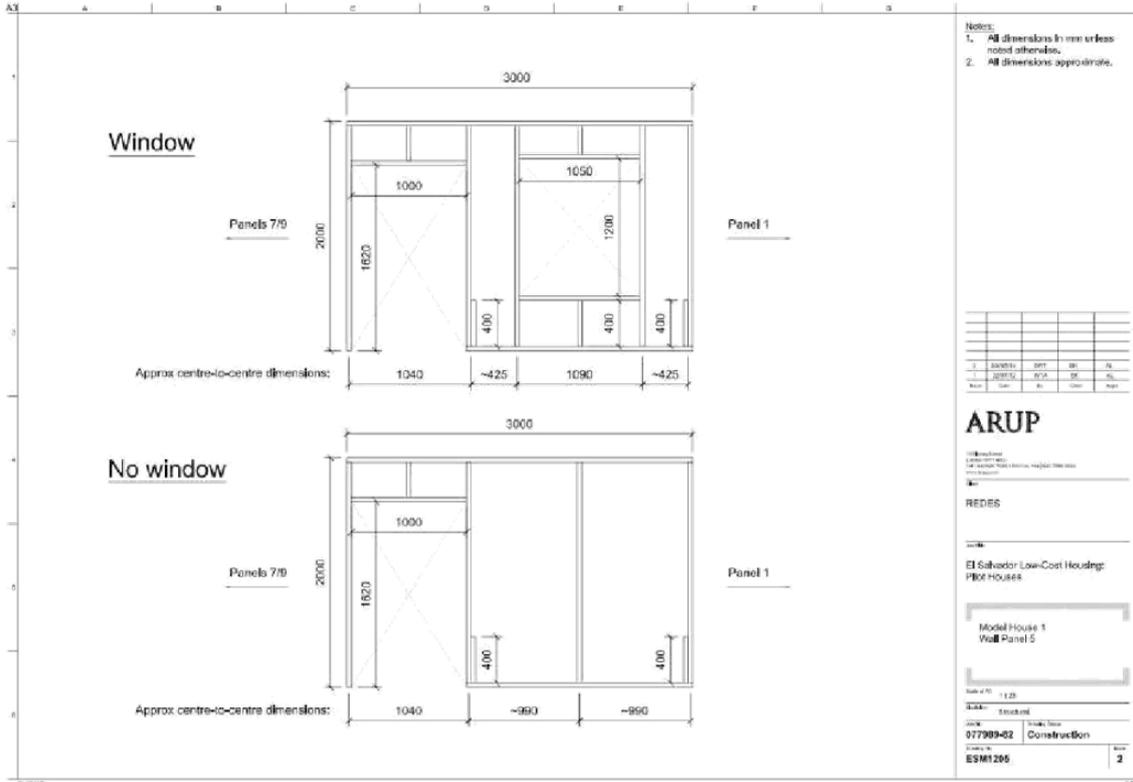
077989-02 Construction

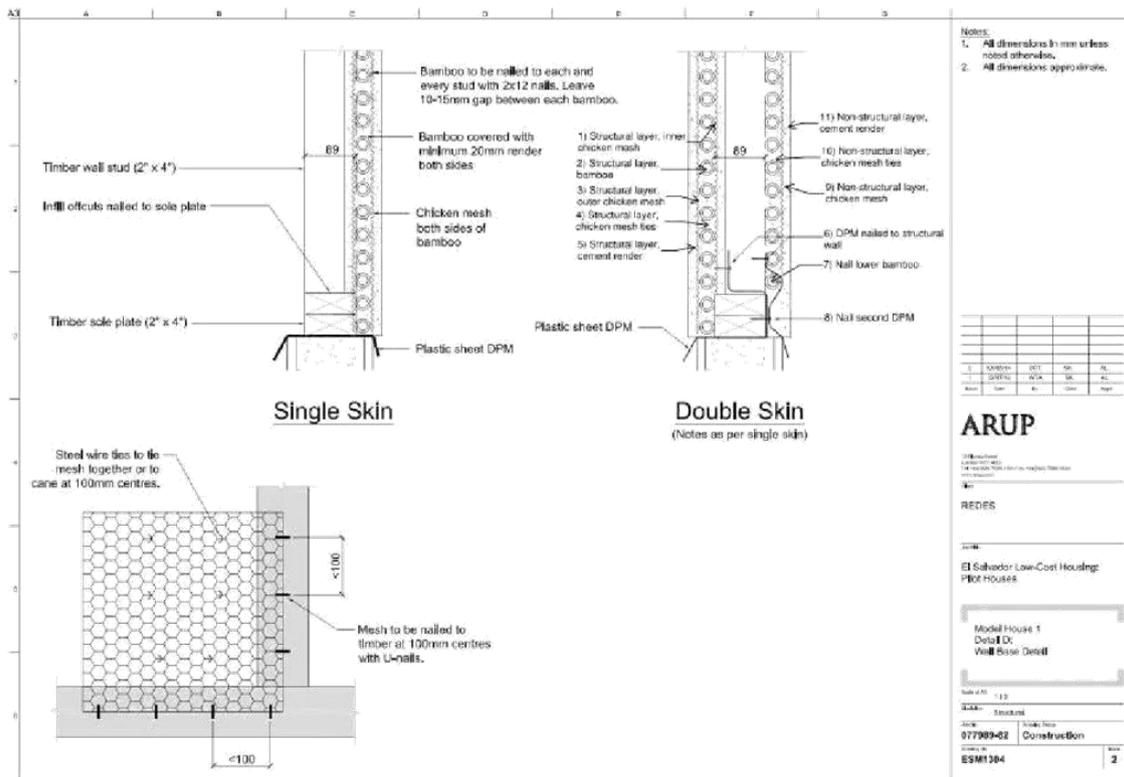
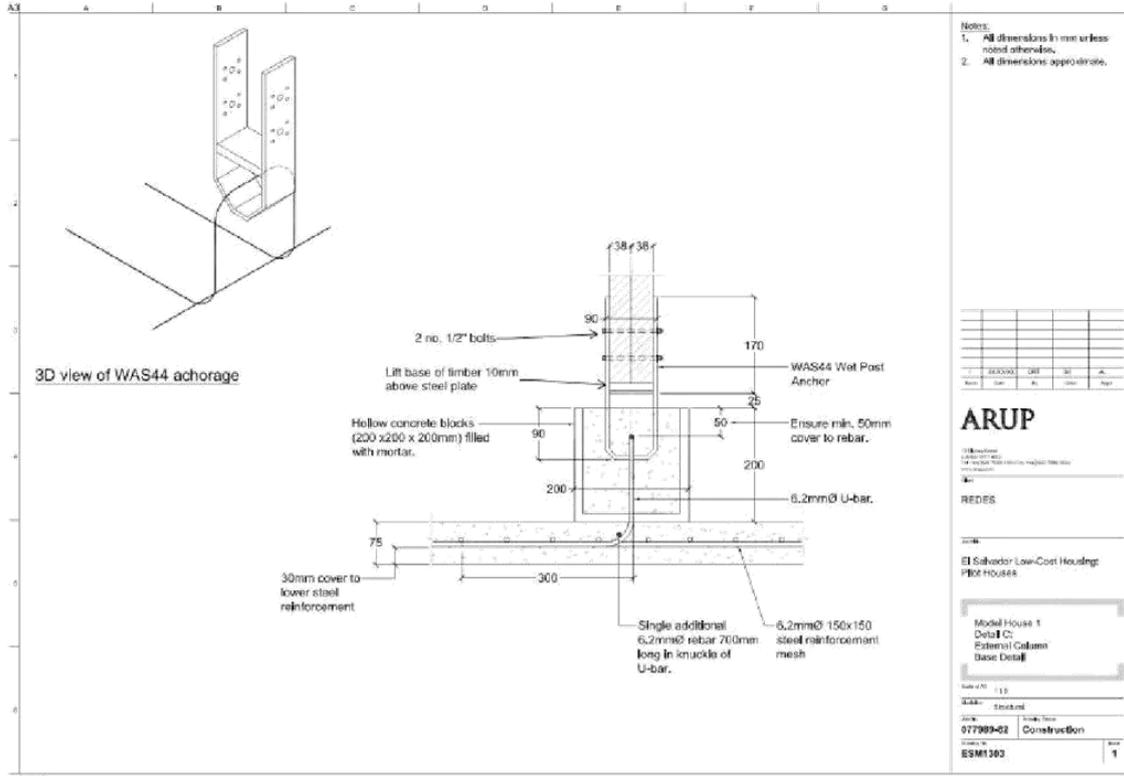
ESM1106

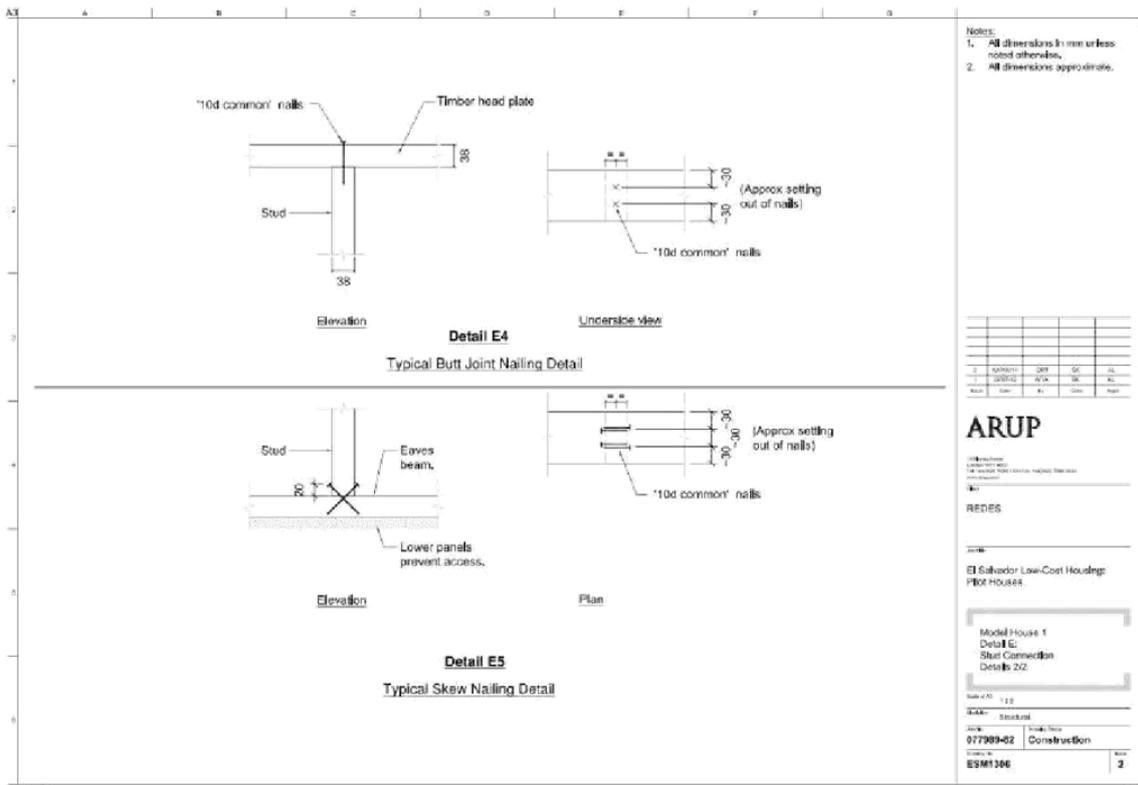
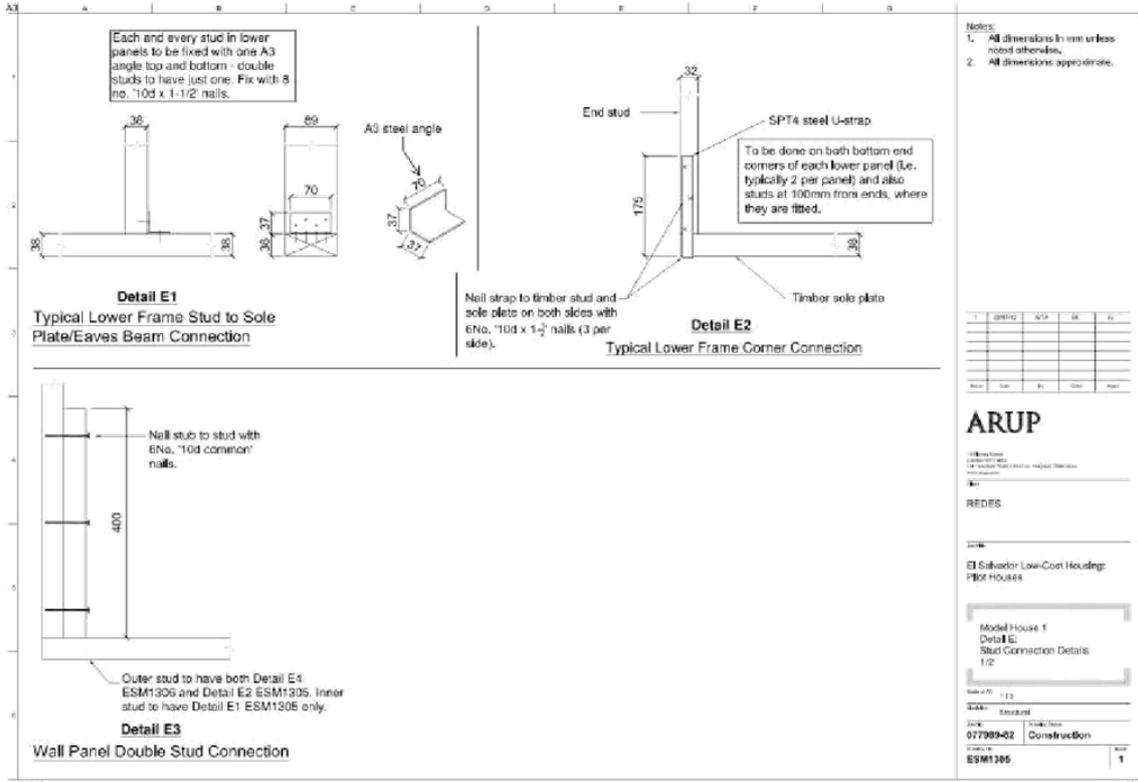
2

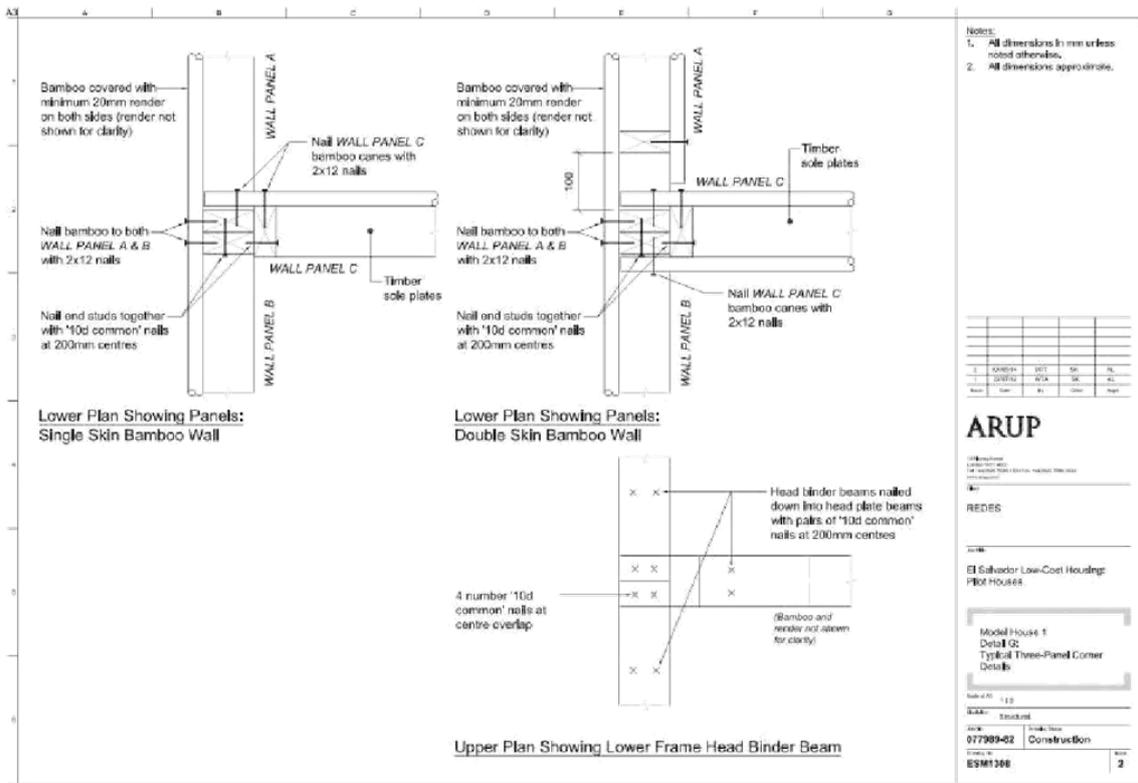
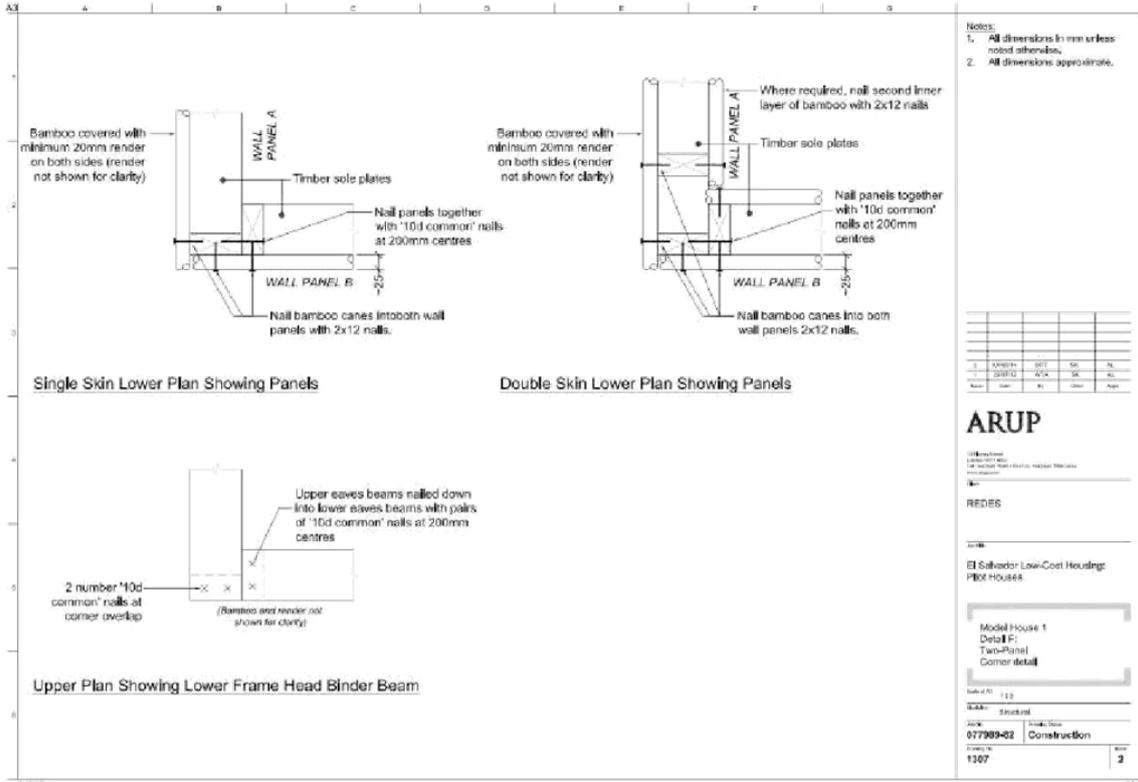


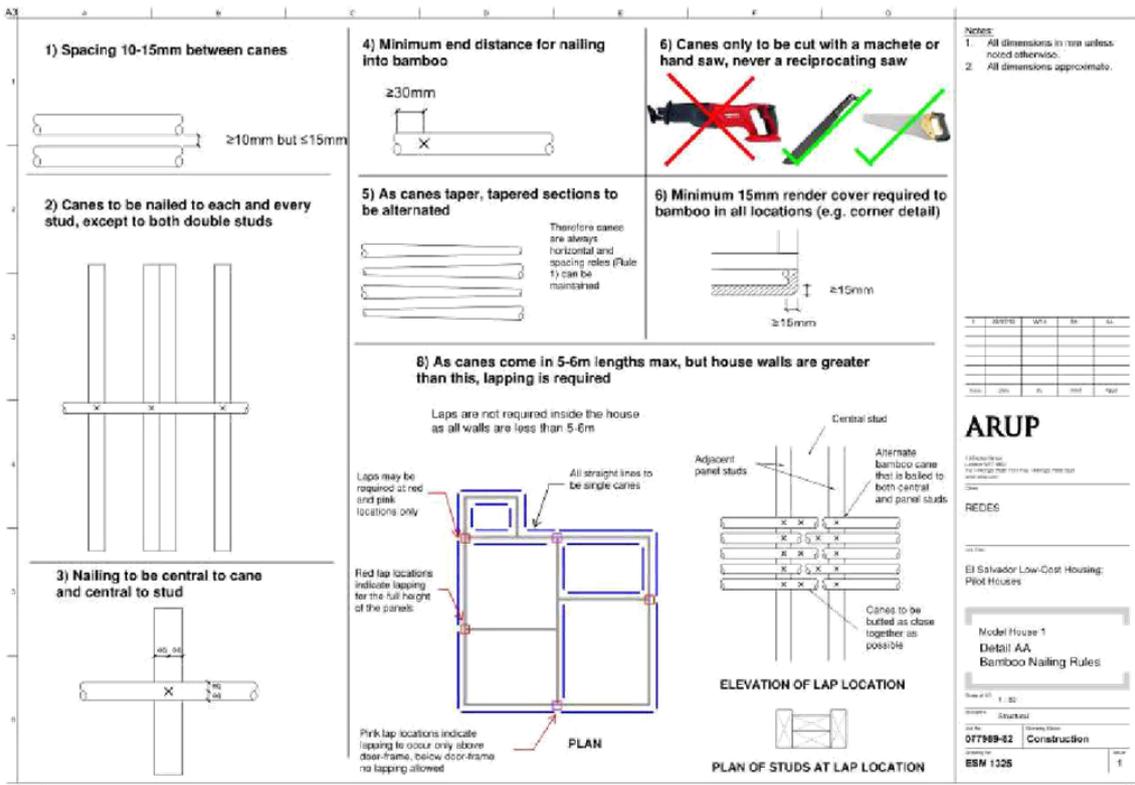
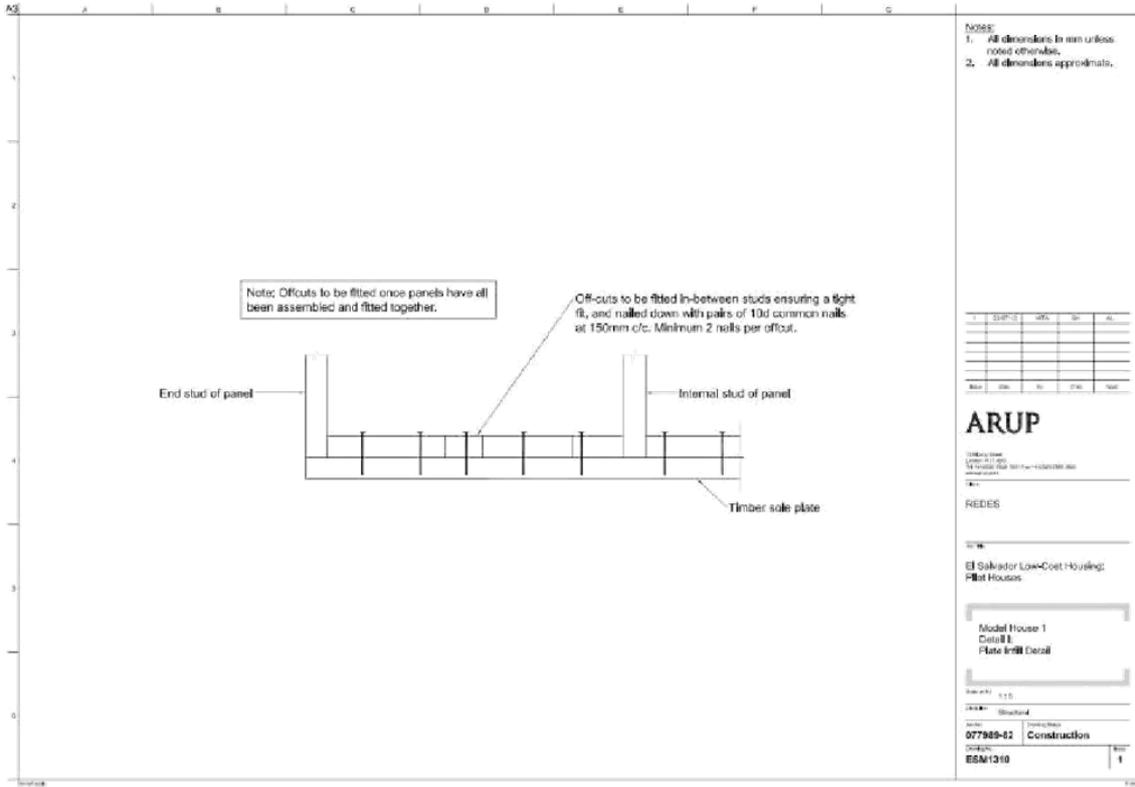


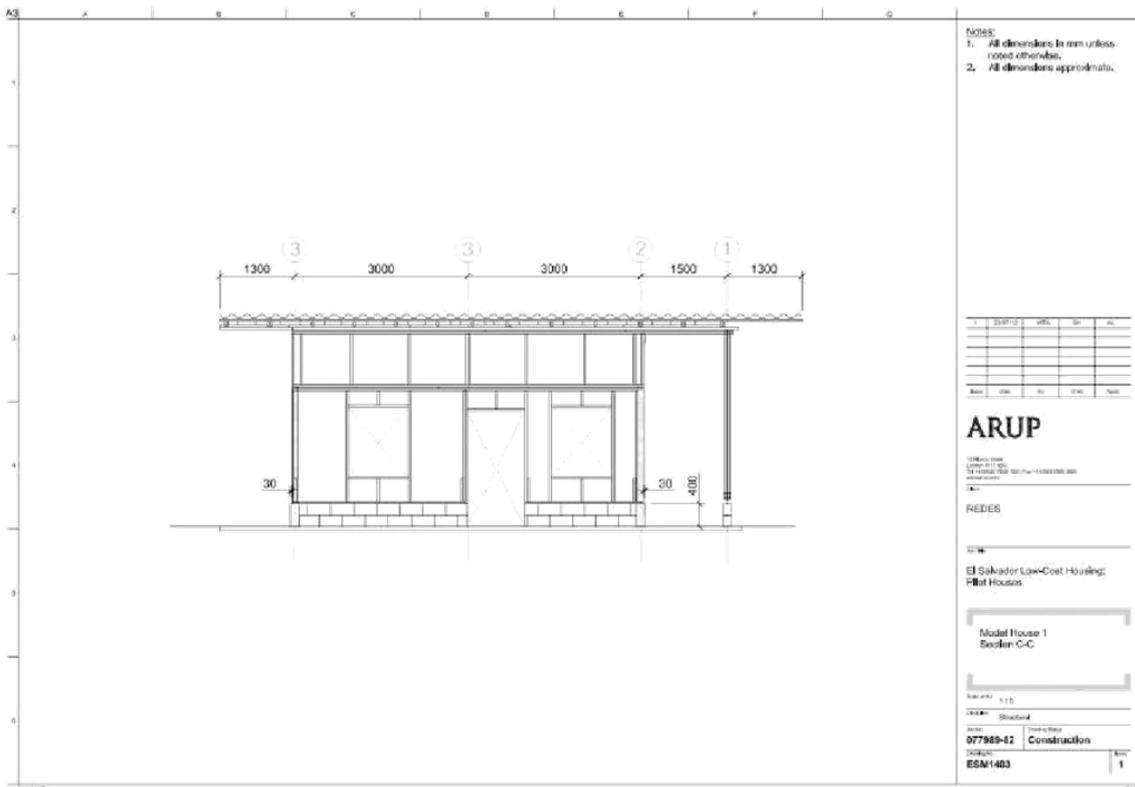
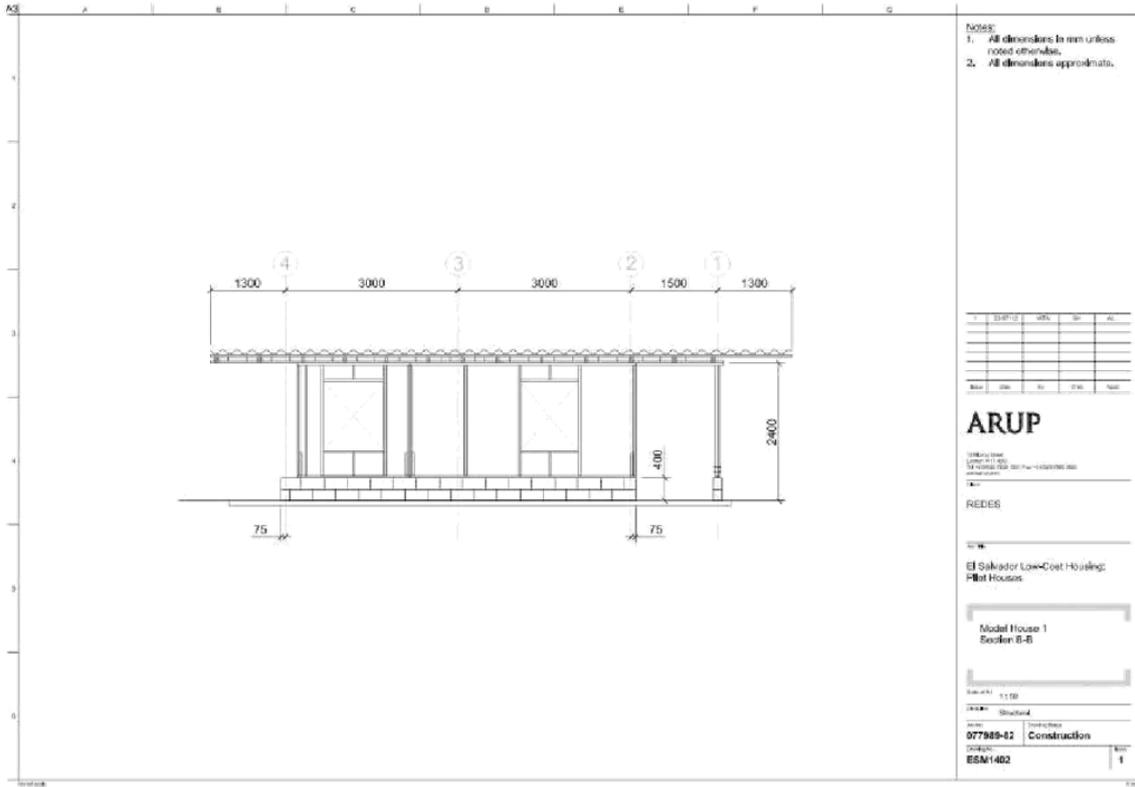


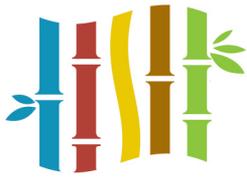












Acerca de los Informes Técnicos de INBAR

Los Informes Técnicos de INBAR ofrecen análisis detallado de aspectos específicos de la investigación de ratán y bambú. Se basan en resultados de investigación validada y / o lecciones aprendidas de INBAR o iniciativas asociadas reconocidas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado principalmente por el Gobierno de la República Popular China, con contribuciones de la Universidad de Arup y Coventry. También estamos agradecidos con el Fondo Común para los Productos Básicos, que ha permitido que esta investigación se divulgue al sector privado y socios gubernamentales en Nepal después del terremoto en el año 2015.

Palabras clave

Bambú, Bahareque y vivienda

Derechos de autor y uso justo

Esta publicación tiene licencia para uso bajo Creative Commons Attribution-Noncommercial-Sharealike 4.0 Unported License. Para ver esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> A menos que se indique lo contrario, usted es libre de copiar, duplicar o reproducir y distribuir, mostrar o transmitir cualquier parte de esta publicación o partes de ella sin permiso y para realizar traducciones, adaptaciones u otras obras derivadas bajo las siguientes condiciones:

Atribución: este trabajo debe ser atribuido, pero no de ninguna manera que sugiera el respaldo del editor o el (los) autor (es)

No comercial: Este trabajo no se puede usar con fines comerciales.

Compartir: Si este trabajo es alterado, transformado o construido, el trabajo resultante debe ser distribuido solo bajo la misma licencia o similar a esta.

Red Internacional de Bambú y Ratán (INBAR, por siglas en inglés)

PO Box 100102-86, Beijing, 100102, P. R. China

Tel: +86-10-6470 6161; Fax: +86-10-6470 2166;

E-mail: info@inbar.int

ISBN: 978-92-990082-3-2

©2016 INBAR – International Network for Bamboo and Rattan

