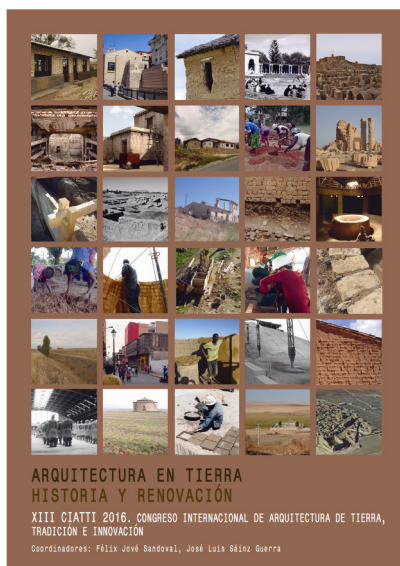




Arquitectura en Tierra

Historia y Renovación

XIII CIATTI 2016

Congreso de Arquitectura de Tierra en Cuenca y Villagarcía de Campos 2016.

Coordinadores: Félix Jové Sandoval, José Luis Sáinz Guerra.

ISBN: 978-84-697-4387-4

D.L.: VA 531-2017

Impreso en España

Julio de 2017

Publicación online.

Para citar este artículo:

MASSÓ, Francesc. "Nepal, muros de bahareque como solución antisísmica para un país en ruinas". En: *Arquitectura en tierra. Historia y Renovación. XIII CIATTI. Congreso de arquitectura en tierra en Cuenca y Villagarcía de Campos 2016*. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2016. Pp. 259-272

URL de la publicación: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html>

Este artículo sólo puede ser utilizado para la investigación, la docencia y para fines privados de estudio. Cualquier reproducción parcial o total, redistribución, reventa, préstamo o concesión de licencias, la oferta sistemática o distribución en cualquier otra forma a cualquier persona está expresamente prohibida sin previa autorización por escrito del autor. El editor no se hace responsable de ninguna pérdida, acciones, demandas, procedimientos, costes o daños cualesquiera, causados o surgidos directa o indirectamente del uso de este material.

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Copyright © Todos los derechos reservados

© de los textos: sus autores.

© de las imágenes: sus autores o sus referencias.

NEPAL, MUROS DE BAHAREQUE COMO SOLUCIÓN ANTISÍSMICA PARA UN PAÍS EN RUINAS

XIII CIATTI 2016. Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Tradición e Innovación
Valladolid

Francesc Massó, Graduado en Arquitectura Técnica*

Universidad de Girona

PALABRAS CLAVE: Nepal, antisísmico, bahareque

1. Introducción

La primavera de 2015, dos grandes terremotos de 7,8 (25 de abril) y 7,3 (12 de mayo) en la escala de Richter y más de 400 réplicas, algunas con magnitudes de hasta 6,6, generaron una situación de extrema emergencia en varias regiones de Nepal (MoHA & DPNet-Nepal, 2016). Según cifras oficiales se registraron 8.896 muertos y 22.302 heridos por los efectos directos de los temblores. Más de 2,5 millones de personas quedaron sin hogar y en total se contabilizaron 775.793 edificaciones privadas y públicas afectadas (Government of Nepal, 2016).

Ante esta situación de emergencia y la ineficacia del gobierno para hacer frente a una crisis humanitaria de esta magnitud, el papel de las pequeñas ONGs y asociaciones, locales o extranjeras, ha sido crucial para ofrecer soluciones reales que permitan la reconstrucción de las zonas rurales del país. Las asociaciones Don't Forget Nepal, Hugging Nepal (www.huggingnepal.org), los integrantes del proyecto Recoop Nepal¹ (www.recoopnepal.org) y la firma de arquitectos Nepalí ABARI (www.abari.org) impulsaron este proyecto de Cooperación Internacional con la intención de sumar esfuerzos en este proceso de reconstrucción.



Figura 1. Ejemplo de vivienda tradicional con cerramientos elaborados con la técnica del Bahareque en la zona del Terai, Nepal. Fuente: Francesc Massó.

2. Antecedentes

2.1 Nepal, un país en alerta sísmica constante

Nepal es una de las zonas sísmicas más activas del planeta.

Según la teoría de la tectónica de placas, la colisión entre la placa India y la placa Eurasia empezó a formar la cordillera del Himalaya hace cerca de 70 millones de años. Actualmente, la placa India sigue desplazándose hacia el norte a una velocidad de 5 cm/año y subduciéndose bajo la placa Eurasia. Este fenómeno origina, además de la elevación del Himalaya y la meseta tibetana, la aparición de fricciones y desplazamientos bruscos que emiten las ondas que hacen temblar el suelo.

Este es un proceso muy activo a día de hoy, prueba de ello son los numerosos eventos registrados en la zona la última centuria. Entre los más severos cabe destacar el de 1934 en la región de Bihar de magnitud² 6,1; el de 1905 en Kangra de magnitud 7,5; el terremoto de 2005 en la zona de Cachemira de magnitud 7,6 y por último, los citados en el punto anterior la primavera de 2015 con epicentro en la región central de Nepal. Todos ellos han tenido unas consecuencias devastadoras,

han dejado sin hogar a millones de personas y han causado miles de muertos y heridos.

A pesar de no poder determinar cuándo ocurrirá de nuevo, las previsiones científicas más rigurosas aseguran que los temblores volverán a azotar la zona durante los años venideros.

2.2 El Bahareque en la arquitectura popular de Nepal

Si bien es cierto que la arquitectura popular de Nepal está mayormente acaparada por la piedra, la cerámica y la madera; existen también numerosos ejemplos de edificaciones tradicionales y populares construidas según los principios de la técnica del bahareque. Edificaciones con muros de cerramiento elaborados con entramados vegetales ligeros a base de bambú que posteriormente se revisten con barro, barro y paja o excrementos de bovino.

Las construcciones permanentes más significativas realizadas con esta técnica se han observado en la zona del Terai, cerca de la frontera con India (Ver figura 1). Las características del territorio de clima subtropical con grandes llanuras cubiertas por selva, campos de cultivo y humedales, y la naturaleza humilde de sus pobladores

favorecieron su popularidad. En otras zonas climáticas más montañosas, también se han observado ejemplos de bahareque en construcciones de poca complejidad, usadas para resguardar a los animales o para almacenar materiales y alimentos. A pesar de estos ejemplos, y de que en Nepal se contabilizan 81 especies diferentes de bambú (5,2% del total mundial) (Raj Pokhrel, 2011), en las construcciones de hoy en día este material tiene un papel totalmente secundario y prácticamente solo se comercializa y se usa en la elaboración de andamios para los trabajos en altura.

2.3 Los entramados vegetales en las construcciones provisionales y de emergencia

Muchas edificaciones de emergencia construidas los meses posteriores al terremoto como aulas, viviendas y refugios temporales utilizaron sistemas estructurales con largueros de bambú y cerramientos basados en los principios de los entramados vegetales. Estos cerramientos se finalizaban a veces con chapas o lonas pero también con lamas de bambú que a menudo con el paso del tiempo se revocaban según la necesidad y la emergencia de cada momento.

2.4 El bambú estructural de ABARI

ABARI (*Adobe Bambu and Research Institute*), firma de arquitectos Nepalí, lleva años promoviendo una arquitectura sostenible y respetuosa gracias al uso de materiales naturales como el bambú o la tierra arcillosa. En sus edificaciones es habitual encontrar imponentes estructuras cerchadas realizadas con esta planta. El bambú que utilizan proviene de determinadas especies con excelentes propiedades mecánicas y sometidas siempre a tratamiento químico para asegurar su durabilidad.

Debido a la falta de tradición en el uso de este material, ABARI ha tenido que generar la infraestructura necesaria para cultivar y manufacturar el bambú. Bajo un programa social, reparte plantel de especies como la *Bambusa Balcoa* entre pequeños agricultores. Estos agricultores cuidan las plantaciones y venden después a ABARI las piezas de bambú aptas para la construcción. Los agricultores adquieren una buena rentabilidad por su trabajo y ABARI consigue una materia prima de calidad a buen precio.

3. El proyecto de Cooperación Internacional

3.1 Contexto

Nuestra acción se focalizó en la escuela de primaria *Shree Saraswhotti Primary School* que es una de las escuelas públicas de la municipalidad de Kashikhanda en el distrito de Kavrepalanchok, Nepal.

Los terremotos afectaron de gravedad tres de los cuatro auleros de la escuela. Estos edificios representaban un serio problema de seguridad para alumnos y profesores. No habían colapsado y eso permitió que se siguieran utilizando haciendo caso omiso al aviso de los ingenieros nepalíes. Estos impulsaron la marca roja que advertía del peligro y prohibía su uso sin una actuación previa que los asegurase. En las viviendas de la zona, la situación era muy parecida. Algunas casas habían colapsado parcialmente, otras eran solo un montón de escombros, pero la gran mayoría había resistido en pie a pesar de haber sufrido daños estructurales irreversibles.

El proyecto de cooperación se estructuró sobre los cimientos de dos objetivos prioritarios.

- Reconstruir y reparar los edificios afectados de la escuela de primaria *Shree Saraswhotti Primary School* que entrañaban un peligro para sus usuarios.
- Empoderar a la población local para que a medio y largo plazo sea capaz de reconstruir sus hogares implementando prestaciones antisísmicas.

3.2 Ubicación

Las coordenadas exactas del emplazamiento de la escuela son 27° 32' 06,5" N, 85° 38' 40,6" E.

Según las características habituales del Nepal, la ubicación de la escuela queda definida como: ambiente rural, poco aislado y con buena comunicación por carretera con núcleos urbanos con servicios mínimos (menos de 10 Km) y con buena, o muy buena comunicación con Katmandú (54 Km). Dispone de luz eléctrica con las restricciones propias de Nepal y suministro de agua de depósito con restricciones durante la época seca.

FASE 0



Figura 2. Croquis de la distribución original de la escuela. Fuente: Recoop Nepal.

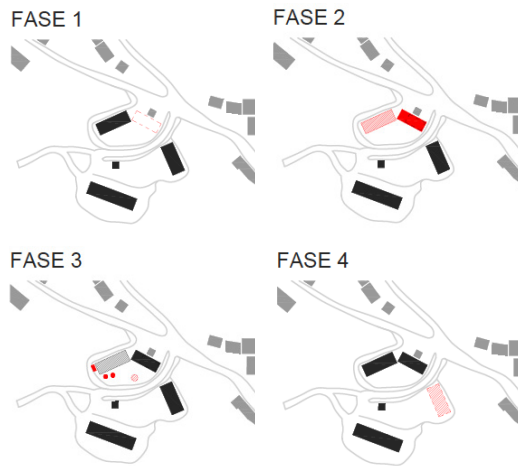


Figura 3. Representación de la actuación realizada en cada fase del proyecto. Fuente: Recoop Nepal.

4. El proyecto Arquitectónico

4.1 Descripción general del estado inicial

La escuela se distribuía en cinco edificios (cuatro aularios y unos baños) repartidos sobre tres parcelas organizadas en terrazas orientadas al sur.

La terraza superior situada a la cota de calle, constituye la entrada natural a la escuela. En ella se levantaban dos aularios de planta rectangular y una sola altura (a partir de ahora E1 y E2). Ambos edificios quedaron muy afectados por los seísmos.

En la terraza central se encontraban los baños y otro aulario de planta rectangular de solo una altura que albergaba la biblioteca y también sufrió daños importantes (a partir de ahora E3).

La última parcela acoge el último y más nuevo de los aularios, que soportó favorablemente los temblores y no requería ninguna actuación (A partir de ahora E4).

4.2 Descripción general de la actuación realizada

La actuación se organizó en distintas fases para dar más claridad a la planificación y permitir la división del proyecto a nivel económico (Ver figura 3).

4.3 Las condiciones y condicionantes del proyecto

- Fase 0: Se concentraron todas las tareas de obtención de datos. Se realizaron numerosas visitas al lugar para tomar muestras y realizar catas. Fue también en este periodo cuando se generó la documentación necesaria para presentar el proyecto arquitectónico a las autoridades competentes.
- Fase 1: Se realizó el desmontaje y derribo del edificio E1, y se asentó el campamento para los voluntarios.
- Fase 2: Se realizó la reconstrucción del edificio E1 y se reparó y aseguró el edificio E2.
- Fase 3: Se destinó a la construcción de unos nuevos urinarios en la parcela superior para facilitar el acceso a los alumnos más pequeños, y se ejecutó la instalación de recogida y distribución de agua de lluvia mediante grandes depósitos enterrados.
- Fase 4: Se desmontó y aseguró el edificio E3 y se realizaron las tareas de adecuación del entorno.

Se contaba con un presupuesto ajustado y eso hizo que se buscara la máxima seguridad de los edificios con la mínima intervención.



Figura 4. Edificio E1 antes de su demolición. Se puede observar la marca roja impuesta por los ingenieros nepalís. Fuente: Francesc Massó.

Queríamos que nuestra actuación sirviera de modelo para la reconstrucción de las casas del pueblo, por eso se utilizó siempre que se pudo los materiales de la zona o tecnologías fácilmente apropiables.

Queríamos que los jóvenes del pueblo aprendieran el oficio y las técnicas que aplicábamos. Se constituyó un equipo de trabajo donde, además de voluntarios occidentales, siempre había un mínimo de cinco trabajadores locales sin una especialización previa y a los que se remuneraba.

Esto dificultó mucho la labor de los coordinadores y responsables de la obra en ciertas fases, incluso ralentizó su evolución, pero con ello se ayudó a fomentar la microeconomía local de las familias del pueblo y a favorecer el empoderamiento de la población.

5. El edificio E1

El E1 era la construcción más antigua, una parte del edificio llevaba años sirviendo de almacén y la otra se usaba como sala de profesores (Ver figura 4). La cubierta se soportaba sobre una estructura de pilares y cerchas con perfiles tubulares metálicos. Los muros de cerramiento eran de ladrillo cerámico macizo unidos con mortero de barro,

y la cubierta de chapa metálica ondulada. La cimentación consistía en una base hecha de piedras y ladrillos unidos con mortero de barro y reforzado por una fina riostra perimetral de hormigón armado, de no más de 8 cm de espesor.

Su estado ruinoso desaconsejaba plantear una reparación. Las paredes amenazaban con derrumbarse en cualquier momento incluso sin la necesidad de un nuevo temblor. La estructura metálica de la cubierta estaba muy oxidada y se temía por el estado de los pilares embebidos en el muro y el terreno. La cimentación era insuficiente para poder garantizar la estabilidad del edificio si un temblor de grandes magnitudes se producía de nuevo. Se procedió al desmontaje del edificio y se recuperaron todos los materiales que lo componían.

5.1 El nuevo edificio E1

Acotamos el diseño del nuevo edificio a las necesidades del proyecto. La primera y más importante, era que fuera seguro ante un nuevo terremoto de gran magnitud, es decir, que cumpliera el requisito antisísmico. La segunda era que aprovechara al máximo los materiales reciclados del antiguo edificio para ahorrar costes económicos y de impacto

ambiental. La tercera y última, era que mejorara las prestaciones de confort y de utilidad del viejo aulario.

Se decidió mantener el viejo sistema estructural de la cubierta. Previamente, se sanearon y pintaron todos sus componentes. La comprobación estructural se hizo siguiendo el procedimiento de la normativa india (Bureau of Indian Standards 2005) y considerando siempre el más desfavorable de los factores sísmicos.

Utilizar la vieja estructura acotó completamente la fisonomía del nuevo edificio. Mantuvimos su posición original y nos limitamos a redistribuir los espacios, optimizando su uso y su interacción con el exterior. Reducimos de tres a dos el número de habitaciones y generamos un espacio exterior cubierto que da amplitud a la entrada del colegio y crea una zona de recreo protegida de la lluvia. Se decidió comunicar la biblioteca y la sala de profesores entre sí con una divisoria deslizante. Una vez abierta la divisoria se origina una gran sala polivalente donde poder realizar reuniones y actividades para el pueblo o para los alumnos.

Se reforzó la cimentación. Se eliminó la antigua e insuficiente riostra, y se excavó una parte de la base de ladrillo y piedra para conseguir la cota deseada y realizar una nueva cimentación con una viga de hormigón de 36x25 cm con un armado 4Ø12, eØ7 c/25 cm. La parte inferior de los pilares de la estructura metálica se saneó hasta la cota excavada, y se unió al sistema de cimentación con unas patillas de acero corrugado (Ø10) electrosoldadas.

La cubierta se soportaba con su propia estructura y eso significaba que los muros solo debían cumplir la función de cerramiento. Realizar un muro de ladrillos implicaba plantear sistemas de ligazón y refuerzo importantes tales como cerchas, dinteles, armados verticales o pilastras. Se determinó que era demasiado costoso en esfuerzo y materiales para un muro sin capacidad portante. Entonces se decidió realizar un sistema mucho más ligero y flexible que combinara mejor con el sistema estructural de cubierta y que por lo tanto, soportara mejor los esfuerzos generados en un sismo. Planteamos hacer un muro de Bahareque.

6. El muro de bahareque

6.1 Características generales

El muro de cerramiento queda definido por una banqueta perimetral de ladrillo cerámico de 90 cm de altura y sobre ésta, y prolongándose hasta la cubierta, el muro de bahareque.

El bahareque se unió a la estructura metálica de la cubierta y no al muro de ladrillo. De esta manera, el muro de ladrillo y el muro de bahareque representaban dos elementos independientes.

Se tomó esta decisión por dos motivos:

- Las propiedades mecánicas del entramado de bambú del muro de bahareque eran similares a las características de los perfiles metálicos de la estructura de cubierta. Ante una situación de estrés producida por los esfuerzos de un sismo, ambos elementos tendrán una respuesta parecida en el modo y la capacidad de absorber la energía generada. Como consecuencia, un sistema nunca comprometerá al otro, al contrario, el entramado vegetal actuará como una malla que arriostra los pilares verticales ante los esfuerzos laterales.
- En el supuesto de que el muro de ladrillo recibiera el entramado de bambú del bahareque, la complejidad técnica de este elemento hubiera aumentado sustancialmente. Se debería haber dotado de un sistema de unión entre ambos elementos y de un sistema de ligazón para reforzarlo ante movimientos horizontales. A pesar de que la carga vertical transmitida por el bahareque no fuese excesiva en condiciones de estrés producidas por un sismo, los esfuerzos horizontales podrían originar el vuelco del muro de no estar bien arriostrado.

6.2 Definición y componentes

En sección vertical el muro queda definido por dos núcleos metálicos resistentes (superior e inferior) que actúan como puente de unión con la estructura de cubierta (2x perfil tubular metálico de sección cuadrada de 5 cm). Paralelos a ambos lados de los perfiles metálicos se sujetan los bambús en posición horizontal. Perpendicular el eje de los bambús horizontales se distribuyen los bambús verticales de manera que se crean

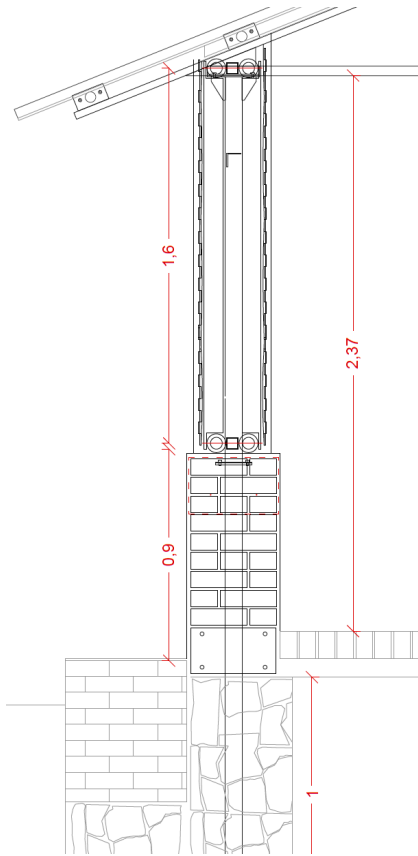


Figura 5. Sección constructiva del muro de bahareque. Fuente: Recoop Nepal.

dos subestructuras o marcos rectangulares autoportantes: la hoja interior y la hoja exterior. La unión entre los bambúes verticales y horizontales se realizó mediante un encaje en L tallado en los extremos de los postes verticales. Los bambúes horizontales de ambas hojas, los perfiles metálicos y los montantes verticales se unen entre sí en puntos simultáneos con un pasador metálico. Los pasadores están formados por una varilla rosca de acero inoxidable $\varnothing 8$, arandelas y una doble tuerca en cada extremo (Ver figura 5).

La parte externa de ambas hojas de la subestructura de bambú está cubierta por un entramado vegetal ligero y entretejido.

El entramado ligero funciona según una disposición vertical de Nígalos enteros (ver definición en el punto 6.3), unidos mecánicamente con tirafondos y alambres de acero a los bambúes horizontales. Los verticales son la base que permite tejer en sentido horizontal los Nígalos partidos y abiertos longitudinalmente.

La parte central del muro, se rellenó en todo su perímetro y altura, con paja de trigo prensada manualmente. La paja se introdujo después de realizar la hoja exterior del entramado y simultáneamente a la realización del entramado de la hoja interior.

El último componente del muro es el revoco de barro. Este revoco se dispone en toda la superficie exterior e interior del entramado vegetal. Consta de cuatro capas distintas, cada una con características y composiciones diferentes para garantizar una buena adherencia, protección y acabado del muro.

6.3 Relación de materiales y características

Bambú: es el material principal del muro de bahareque, usado para elaborar todos los elementos de su estructura y entramado ligero. Se emplearon dos tipologías distintas de bambú diferenciadas principalmente por su tamaño: el Bas (grande) y el Nigalo (pequeño). Ambos tipos de bambú eran especies propias de la región y se obtuvieron siempre por medio de la compra directa de las pequeñas plantaciones de los agricultores de la zona.

Bas: Todas las plantas extraídas se atribuyen³ como pertenecientes a una única especie, la *Dendrocalamus hamiltonii* (Shrestha 1996). Esta especie es característica por ser una planta de hoja perenne y tallo leñoso. Puede crecer hasta 12–25 m de altura. Los tallos son de 9–20 cm de diámetro en la base y sus entrenudos 30–50 cm con paredes de 12–20 mm de grosor. Se cosecha normalmente de la naturaleza o pequeñas plantaciones como fuente de alimento, para la manufacturación de útiles para la casa o para construcciones provisionales. No es habitual su uso en construcción.

La extracción de todas las plantas utilizadas en el proyecto se realizó en una sola tongada que se prolongó durante cuatro semanas entre los meses de febrero y marzo. Se extrajeron un total de 87 piezas con tallos de diámetros entre 6–15 cm. Se procuró cosechar siempre plantas de como mínimo 3 años de edad. La cosecha y su posterior transporte se realizó íntegramente con medios manuales por parte del equipo de construcción del proyecto. Se pagaron 100 NRP (0,85 €) a los agricultores, por cada planta extraída.



Figura 6. Muro de Bahareque del edificio E1 durante su ejecución. Fuente: Francesc Massó.

Nigalo: Las plantas extraídas se atribuyen a ciertas especies de alguna de las familias *Himalayacalamus* o *Drepanostachyum* (Clayton, et al. 2006). No es posible determinar con más exactitud su pertenencia debido al elevado número de plantas extraídas (más de 1000 ut.) y a las grandes similitudes entre las características de ambas familias. Las plantas cosechadas se caracterizan por tener una altura de 200–300 cm. Los tallos son de 7–20 mm de diámetro en la base y sus entrenudos 15–30 cm. Se cosecha habitualmente de la naturaleza o plantaciones como fuente material para la manufacturación de útiles para la casa (cestas, alfombras y otros elementos tejidos).

La extracción de todas las plantas utilizadas en el proyecto se realizó en diferentes toncadas durante jornadas aisladas de trabajo repartidas entre los meses de marzo a mayo. Se procuró cosechar siempre plantas de como mínimo 1 año de edad. La cosecha y su posterior transporte se realizó íntegramente con medios manuales por parte del equipo de construcción del proyecto. Se pagaron 2 NRP (0,01 €) a los agricultores, por cada planta extraída.

Paja de trigo: se ha usado como aislante en el interior del muro de bahareque y como aditivo en la producción de paja-arcilla: un tipo de mezcla de arcilla y paja fermentada habitualmente utilizada en la construcción con balas de paja. Se obtuvo por medio de la compra directa a los agricultores de la zona y gracias a pequeñas donaciones de algunas familias de los alumnos de la escuela.

La paja procedía íntegramente de la última cosecha de trigo, era seca y limpia de grano. La paja de trigo es usada habitualmente como alimento para los bovinos de las familias, que son fuente principal de ingresos gracias a la leche que producen. Este factor dificultó mucho la obtención del material necesario para aislar todo el muro, ya que si no disponían de excedente muchas familias eran reticentes a venderla. Se pagaron aproximadamente 1500 NRP (13,5€) por cada camioneta. Se emplearon un total de 3–4 camionetas.

Tierra arcillosa: se ha usado como árido y conglomerante principal en la elaboración de los revocos, la mezcla de relleno (paja-arcilla) y la pintura aplicada en el muro de bahareque. Guiados por la experiencia de los nativos, extrajimos la tierra arcillosa de un campo de cultivo próximo a la escuela. Antes de iniciar la extracción se validaron las características del material según un análisis visual y organoléptico de una muestra significativa. Se preparó un pozo de extracción de 4x4 m y se despreciaron los primeros 20 cm de profundidad por contener grandes cantidades de materia orgánica. La extracción y transporte se realizó siempre con medios manuales por parte del equipo de construcción del proyecto.

A pesar que en el terreno natural aparecieron algunas vetas de tierra de color amarillo, la tierra obtenida es predominantemente de color rojo intenso. A partir de los 30 cm de profundidad el material es completamente mineral sin restos orgánicos. La tierra extraída cuenta con un rango granulométrico amplio, con presencia de algunas gravas y piedras



Figura 7. Tratamiento del bambú local con el sistema *Modified Boucherie Technique* o *Sap Displacement Technique* (Técnica del desplazamiento de la Savia). Fuente: Recoop Nepal. Autor: Arnau Mestre.

de hasta 10-15 cm, arenas y limos en cantidad no determinada, y un porcentaje de arcilla que se estima⁴ de 15-25 %, según criterio del autor. En la arquitectura popular de la región predomina el uso de la tierra arcillosa como material de construcción: en la producción de ladrillos cerámicos cocidos, con varias factorías tradicionales a escasos diez kilómetros del pueblo; en la elaboración de mortero para la colocación de piedra o ladrillos en muros de cerramientos, en todos los revocos exteriores e interiores de las viviendas del pueblo y en la formación de pavimentos.

En los revocos tradicionales se aprecian dos tipologías diferenciadas de tierra arcillosa que se caracterizan fácilmente por su color: *Rato Mato* (arcilla roja) y *Pahenlo Mato* (arcilla amarilla). La cultura popular de cada zona sabe distinguir empíricamente las propiedades y los usos de cada material. En este caso, el *Rato Mato* (arcilla roja) es la más apreciada para la elaboración de revocos por sus mejores prestaciones de resistencia y durabilidad ante la erosión de los agentes meteorológicos como el viento o la lluvia.

Se ha observado que estos revocos a menudo están estabilizados con algún tipo de fibra vegetal: cáscara de arroz, trazas pequeñas de paja de arroz o trigo, o por la mezcla de excrementos de bovino. En contraposición, la tierra arcillosa se suele usar directamente sin añadir otros áridos minerales. Probablemente esta es la razón por la que los revocos acostumbran a estar muy agrietados. Una granulometría descompensada, con un con-

tenido muy alto de arcillas, genera una gran retracción del material durante su secado y la aparición de grietas. El viento, pero sobre todo la lluvia, son los factores principales que favorecen su deterioro.

7. Tratamiento del bambú

El objetivo de los procesos aplicados al bambú es garantizar su durabilidad y estabilidad frente al ataque de agentes bióticos, como insectos u hongos.

Se aplicaron dos tipos de procesos, uno físico y otro químico.

El proceso físico es muy simple y consiste en controlar el momento más apropiado para cosechar la planta. En Nepal el periodo idóneo para su cosecha es durante la estación seca, entre los meses de septiembre y abril.

El tratamiento químico es un poco más complejo y consiste en impregnar la estructura interna de la planta con una disolución conservante en base a Sal de Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y Ácido Bórico (H_3BO_3) en una relación 1:1:10. La sal de Bórax es un producto sencillo de obtener en Nepal ya que comúnmente se usa como fertilizante. Tiene un precio de 125 NRP/Kg (1 €/Kg). El ácido Bórico es un poco más difícil de encontrar, sobre todo si se busca en grandes cantidades y a precio razonable. Se tuvo que recorrer varias tiendas especializadas de productos químicos en Katmandú antes de dar con él. Tiene un precio de 400 NRP/Kg (3,80 €/Kg).

Existen distintas maneras de impregnar la estructura leñosa de las paredes del bambú con la disolución conservante. La más común es la impregnación por inmersión. Esta técnica es la más sencilla pero requiere de grandes cantidades de disolución química, una infraestructura difícil de montar y se debe emplear un periodo de tiempo mayor. No es rentable si solo se aplica a un numero reducido de bambús y es un problema al gestionar el gran excedente de disolución una vez finalizado el tratamiento.

Se aplicó una técnica conocida como *Modified Boucherie Technique* o *Sap Displacement Technique* (Técnica del desplazamiento de la Savia). El instrumental necesario y la metodología aplicada ha sido proporcionado por ABARI.

Las cañas de bambú se dividen en nudos y se componen de dos tipos de tejido: las células del parénquima⁵ y los haces vasculares.⁶ Estas últimas consisten en vasos, fibras de paredes gruesas y tubos cribosos y es a través de estos que el movimiento del agua se lleva a cabo en la planta viva. Esta técnica consiste en aplicar en el extremo basal la disolución química a mucha presión, esto empuja la savia contenida en el haz vascular hacia fuera y después lo reemplaza con la solución conservante. Este tratamiento debe realizarse durante las 24 horas posteriores al corte de la planta, cuando el haz vascular está todavía húmedo (Adhikary, 2011).

El instrumental usado es muy simple, ligero y permite desplazar el centro de tratamiento con facilidad incluso a zonas rurales y remotas. Consiste en un cilindro estanco y resistente a la presión, equipado con un circuito de alimentación de aire y otro de distribución del conservante. El cilindro cuenta con un manómetro para controlar que la presión se mantiene siempre entre 25–30 psi, la mínima necesaria para permitir la circulación del conservante a través del haz vascular del bambú. La alimentación de aire se realizó con un sistema manual (bomba de aire), pero puede equiparse con un sistema eléctrico (compresor). El circuito de distribución cuenta con un sistema de boquillas de goma y bridas que permiten adaptarse al diámetro de cada planta de bambú.

El tratamiento se realiza durante una hora a presión constante (25–30 psi) en piezas de bambú de 6 metros de longitud dispuestos en ángulo en sentido descendiente para asegurar la correcta circulación del conservante. Una vez tratados, los bambús se almacenan en posición horizontal, separados del suelo y en un lugar seco, sombreado y ventilado durante al menos 30 días, antes de ser usados en construcción.

8. Tratamiento de la paja de trigo

El objetivo del proceso aplicado a la paja de trigo es garantizar su durabilidad y estabilidad frente al ataque de agentes bióticos, como insectos u hongos. De igual modo, el producto aplicado actúa esterilizando los restos de grano incluidos en la paja, previniendo así su germinación una vez incorporada en el muro.

Se realizó un tratamiento químico consistente en una impregnación de cal aérea en pasta diluida en agua. El elevado pH de la cal ataca la acidez de los organismos vivos, de ahí su acción microbicida y antiparasitaria.

Para poder aplicar el tratamiento fue necesario realizar previamente un apagado tradicional de la cal viva en roca. La cal viva es fácil de encontrar en suministradores de materiales para la construcción de Katmandú. Tiene un precio de 1600 NRP (14 €) por saco de 40 Kg.

La cal aérea en pasta obtenida del proceso de apagado, se diluía ligeramente en agua una vez enfriada para facilitar su impregnación en la paja. La paja seca se sumergía unos segundos en la disolución, procurando que quedara bien impregnada. Inmediatamente después se introducía la paja impregnada en el interior del muro de bahareque prensando cada nueva hilada con las manos.

En todo el proceso de tratamiento relacionado con la cal aérea fue sumamente importante enseñar las medidas de protección y precaución necesarias para evitar sufrir quemaduras.

9. Tratamiento de la tierra arcillosa

En los procesos aplicados a la tierra arcillosa se han perseguido distintos objetivos, todos orientados a mejorar sus propiedades y prestaciones en su uso como conglomerante para revocar el bahareque.

Se aplicaron procesos físicos basados todos en las compensaciones granulométricas del material original. El objetivo principal ha sido mejorar su estabilidad volumétrica durante el proceso de secado para evitar la aparición de fisuras y grietas debido a la retracción. Los objetivos secundarios han sido facilitar el proceso de aplicación sobre la superficie del muro obteniendo un acabado resistente, buena adherencia y un resultado fino o grueso según la necesidad de cada capa.

Por último, se han aplicado procesos químicos con el objetivo prioritario de mejorar las propiedades hidrófugas del revoco; mejorando asimismo, de manera indirecta, la estabilidad y durabilidad del conjunto del muro de bahareque ante la acción de las inclemencias meteorológicas.

9.1 Estabilización física

La compensación granulométrica ha consistido en dos procesos fundamentales: un proceso de control y extracción de las partículas granulométricas de tamaño superior al máximo permitido contenidas en el suelo original y un proceso de agregación de partículas de áridos minerales de tamaño adecuado.

La extracción de las partículas de mayor tamaño se realizó según un proceso de cribado en seco con una criba de malla metálica de 8 mm de diámetro de orificios. Antes de cribar la tierra arcillosa se debieron deshacer con un pisón metálico los agregados generados por la compactación natural del terreno.

Para la extracción de las partículas de menor tamaño pero aún excesivamente grandes de las capas finales del revoco o la pintura de arcilla, se realizó según un proceso de cribado con agua. Este proceso consiste en saturar en agua una cantidad determinada de tierra arcillosa dentro de un recipiente. La mezcla se deja humectar durante 1 h, removiéndola repetidamente. Finalizado el proceso de humectación se traspasa la mezcla de arcilla y agua a otro recipiente cribándola con una malla metálica de 3 mm de diámetro de orificio. Finalmente, se decanta parte del agua de la mezcla una vez que las partículas minerales han decantado por precipitación al fondo del recipiente. En este caso la mezcla se conservó humectada, aunque si es necesario se puede secar completamente.

Con este proceso se obtenían tres tipos diferentes de tierra arcillosa:

- T1: Tierra arcillosa de grano fino, humectada (partículas $\varnothing < 3$ mm)
- T2: Tierra arcillosa de grano medio, seca (partículas $\varnothing < 8$ mm)
- T3: Tierra arcillosa de grano grueso con agregados, seca (partículas variadas hasta $\varnothing 150$ mm)

Se agregaron dos tipos de árido mineral clasificados como arenas sin limpiar que también pasaron un proceso de cribado en seco con las mallas metálicas.

- A1: Arena de grano fino, seca (partículas $\varnothing < 3$ mm)
- A2: Arena de grano medio, seca (partículas $\varnothing < 8$ mm)

Se agregó un tipo de partículas vegetales: la paja de trigo entera.

Las composiciones granulométricas que se han aplicado son las siguientes:

- Composición 1: (T1 + Paja de trigo). Paja-arcilla. Este material se usó para regularizar los huecos de mayor tamaño del muro de bahareque.
- Composición 2: (T2 + A2 en una dosificación 1:4). Mortero grueso. Primera capa aplicada sobre el muro de bahareque. Esta capa se ha repetido hasta 3 veces en algunos puntos del muro para mejorar su planimetría.
- Composición 3: (T2 + A1 en una dosificación 1:4). Mortero fino. Segunda capa aplicada sobre el muro de bahareque.
- Composición 4: (T1). Pintura. Última capa aplicada sobre el muro de bahareque.

9.2 Estabilización química

Se ensayaron dos procesos diferentes de estabilización química antes de decidir y aplicar el más adecuado. Se testó una estabilización química basada en la caseína⁷ de la leche de bovino y otra basada en una disolución de cola blanca para madera.

1.- Caseína de la leche. La obtención de la caseína se realizó mezclando 300 c.c. de vinagre alimenticio sintético (ácido acético) con 3 litros de leche de vaca y búfala. La mezcla de leche y vinagre se calentó ligeramente sin llevar a ebullición, para acelerar el proceso de separación. Una vez cuajada la proteína se separó del líquido (suero) filtrándolo con un trapo de algodón. La cuajada o caseína se mezcló con 50 gramos de ácido bórico para atribuir propiedades fungicidas y antibacterianas a la pintura, se añadió un poco de agua y se mezcló todo hasta conseguir una sustancia homogénea. El preparado se conservó en un bote de plástico estanco hasta el momento de su utilización.



Figura 8. Ensayo realizado en obra para estudiar el comportamiento frente al agua de las pinturas de arcilla estabilizada con estabilizante químico (caseína y cola blanca).

2.- Cola blanca para madera. La cola blanca para madera se diluyó en agua en una relación 1:5 (cola / agua).

9.2.1 El ensayo y los resultados

Se realizó un sencillo ensayo consistente en elaborar pinturas de barro con diferentes dosificaciones de cada uno de los productos químicos (Caseína: C / Disolución cola blanca: CB), para aplicarlas sobre una superficie, secarlas y aplicar agua encima para ver y comparar cual era su comportamiento.

La base de la pintura de barro fue la pasta humectada de tierra arcillosa T1. Se ensayaron también 2 dosificaciones con árido mineral A1 para probar si el cambio granulométrico afectaba en su aplicación o propiedades finales.

Las dosificaciones ensayadas fueron las siguientes:

- Dosificación 1: (Referencia) T1 sin ningún aditivo
- Dosificación 2: (Caseína) C + T1 en una dosificación 1:10
- Dosificación 3: (Caseína) C + T1 en una dosificación 2:10
- Dosificación 4: (Cola blanca) CB + T1 en una dosificación 1:10

- Dosificación 5: (Cola blanca) CB + T1 en una dosificación 2:10
- Dosificación 6: (Caseína) C + A1 + T1 en una dosificación 2:1:10
- Dosificación 7: (Cola blanca) CB + A1 + T1 en una dosificación 2:1:10

Los resultados obtenidos fueron muy positivos en las dosificaciones que incorporaban la disolución de cola blanca. El ensayo pone de manifiesto que la Dosificación 1, sin ningún aditivo, es extremadamente vulnerable al agua y se deshace con mucha facilidad. Las dosificaciones con caseína siguen teniendo un comportamiento vulnerable ante el agua y solo en la dosificación al 20% se observaron mejoras significativas respecto a la Dosificación 1 de referencia. No se considera relevante la incorporación del 10% de A1 en la capacidad hidrófuga.

9.2.2 Conclusiones y elección

Basándose en los mejores resultados obtenidos se decidió utilizar la disolución de cola blanca. La mayor complejidad para producir el preparado de caseína y los problemas para conservarla al ser un producto natural fueron también condicionantes.

Se aplicó disolución de cola blanca en la última y penúltima capa del revoco exterior del muro de bahareque.

10. Las conclusiones finales

La reconstrucción y reparación de los aularios de la escuela han sido un éxito. La reutilización de los materiales y sistemas originales consolidando sus prestaciones antisísmicas se ha logrado satisfactoriamente.

El objetivo de incorporar materiales naturales y locales como el bambú o el barro en el muro de la nueva edificación se ha conseguido con el sistema de bahareque.

El equipo local de construcción ha aprendido a reproducir los sistemas utilizados y ahora es capaz de repetirlos en una nueva construcción. El empoderamiento técnico de un grupo de trabajadores locales se concluye muy positivo.



Figura 9. Muro de Bahareque acabado con todas las capas del revoco de barro finalizadas. Fuente: Recoop Nepal, Autor: Raúl Marroquín.

La visión de los habitantes del pueblo hacia los materiales naturales y la técnica del bahareque era muy contradictoria al inicio de la construcción. Muchos de ellos llegaron a reprocharnos su uso para un nuevo aulario de su escuela. Según sus propias palabras, en su pensamiento imaginaban la nueva escuela como un cobertizo o un refugio temporal. La consecución de un muro de bahareque con un aspecto y acabado equiparable a cualquier muro de obra convencional y las mejoras demostradas en el revoco de tierra arcillosa, han hecho cambiar de opinión a todos los detractores, y muchos están ahora interesados en aplicarlo en sus propias viviendas. El empoderamiento de la población local a través del ejemplo se considera satisfactoriamente logrado.

Agradecimientos

A Mónica, por ser siempre mi luz, a pesar de las dificultades.

A mi hermana y a mis padres, por su apoyo incondicional.

A Maria, Alvaro, Charo, Andres, Pau, Gerard, Nripal, Pranahti, Tenzing, Saghar, Rafa, Julio, Oriol, Joel, Susana, Arnau, Guiomar, Narayan, Umesh, Shova, Durgha, Ramkumar I y II, Ananta, Vasilisa, Marc, Raúl, David, Alba, Marina, Julia, Aixel, Angi, Natalia, Alessio, Jordi, Fernando, Jon, Javier, Estrella, Paulo, Dalbat.... a todas las personas que han compartido estos meses de arduo trabajo en Nepal, gracias.

Bibliografía

ADHIKARY, Nripal. *Experiment With a Locally Constructed Boucherie Treatment Plant in Nepal*. [en línea] Nripal Adhikary. 2011. <<http://www.abari.org/treatment/>>

AGUIAR FALCONÍ, Dr. Ing. Roberto. *Análisis Sísmico de Edificios. 1a Edición*. Ed. Escuela Politécnica del Ejército. Centro de Investigaciones Científicas. Quito, 2008.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS. *Manual de Construcción Sismo Resistente de Viviendas en Bahareque Encementado*. Bogotá, 2001.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. NSR-10. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá D.C: 2010.

Bureau of Indian Standards. *National Building Code of India*. 1ª Edición. New Dheli: Bureau of Indian Standards, 2005.

CARAZAS AEDO, Wilfredo, y Alba RIVERO OLMOS. *Bahareque, Guía de construcción para sísmica*. Ed. MISEREOR. Villefontaine Cedex: CRATerre, 2002.

CED 39. *Earthquake Resistant Design and Construction of Buildings - Code of Practice*. New Delhi: Earthquake Engineering Sectional Committee, 2005.

CLAYTON, W.D., M. Vorontsova, K.T. Harman, y H. Williamson. *The Online World Grass Flora*. [en línea] Kew Royal Botanic Gardens. 2006. <<http://www.kew.org/data/grasses-db/www/gen00289.htm>>

Department of Urban Development and Building Construction. *Nepal National Building Code*. Babar Mahal: Ministry of Physical Planning and Works. Kathmandu, 1994.

Government of Nepal. *Nepal Disaster Risk Reduction Portal*. [en línea] Government of Nepal.

2016.<<http://drrportal.gov.np>> [Consulta: 5 Septiembre 2016]

HaB - ETSAM. *¿Como construir una vivienda segura en Perú?* Ed. Área de Cooperación al Desarrollo. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Madrid, 2011.

International Code Council. *International Building Code*. Chicago, Illinois: ICC, 2009.

MoHA & DPNet-Nepal. *Nepal Disaster Report 2015*. Ministry of Home Affairs, The Government of Nepal, Kathmandu, Kathmandu: Disaster Preparedness Network-Nepal (DPNet-Nepal), 2016.

RAJPOKHREL, Ujjwal. *Challenges and Opportunities For Bamboo Engineered (Prefabricated) Housing in Nepal* [en línea]. 2011. <<http://www.abari.org/bamboo-engineered-house/>>

SHRESTH, Keshab. *Distribution and status of bamboos in Nepal*. [en línea] www.biodiversityinternational.org. 1996. <[http://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/biodiversity/publications / Web_version/572/ch29.htm](http://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/biodiversity/publications/Web_version/572/ch29.htm)> [Consulta: Septiembre 2016]

Citas y notas

* **Francesc Massó**, Graduado en Arquitectura Técnica y Master en Construcción Sostenible con Tierra, Univ. de Girona, España.

1. El proyecto Recoop Nepal esta impulsado en colaboración por las asociaciones Nousol ONG (www.nousol.org) Moviment Nòmada (www.movimentnomada.org) y Terram (www.terram.cat)

2. Magnitudes según la escala de Richter.

3. Hipótesis del autor basada en los indicios obtenidos por la observación directa de la planta, la información recabada de los agricultores locales y el análisis de diferentes fuentes bibliográficas especializadas.

4. Estimación derivada de los análisis visuales y organolépticos realizados in-situ a muestras de

suelo y de revocos de las viviendas tradicionales del pueblo, y de la comparativa con otras tierras similares de Nepal analizadas en el laboratorio por el autor.

5. En botánica, el parénquima es un tejido poco especializado implicado en una gran variedad de funciones como la fotosíntesis, el almacenamiento, la elaboración de sustancias orgánicas y la regeneración de tejidos.

6. En Botánica, un haz vascular es cada uno de los cordones individuales que forman el sistema vascular primario de las plantas.

7. La caseína es una fosfoproteína (un tipo de heteroproteína) presente en la leche y en algunos de sus derivados. En la leche, se encuentra en la fase soluble asociada al calcio (fosfato de calcio), en un complejo que se ha denominado caseinógeno.