INFRAESTRUCTURA DE SALUD Y FORMACION DE CAPACIDADES LOCALES EN CONSTRUCCION SISMORRESISTENTE EN TIERRA

Comportamiento sísmico de bóvedas nubicas reforzadas con geomallas

Alexander Fischer[1]
Proyecto AMARES. Av. Ricardo Palma 857, Miraflores, Lima – Perú
www.amaresperu.org

Palabras clave: sismoresistencia - gestión - capacitación

Resumen

La presente ponencia describe los resultados de la investigación acerca del comportamiento sísmico de bóvedas nubicas reforzadas con geomallas. La propuesta tecnológica sismorresistente fue diseñada por el autor en el marco de la estrategia de intervención del Proyecto AMARES "Programa de apoyo a la modernización del sector salud y aplicación en una región del Perú" financiado por la Unión Europea y cuyo objetivo general es fortalecer el proceso de reforma del sistema de salud en tres regiones del Perú.

El Perú se localiza cerca del borde sur occidental de América del Sur caracterizada por ser una de las zonas sísmicas más activas del mundo, El terremoto ocurrido en 2001, afectó a los departamentos de la zona sur del Perú y despertó el interés y la preocupación del gobierno así como de los organismos de cooperación sobre la importancia de la implementación y correcta difusión de tecnologías sismorresistentes en tierra en el país.

Se estima que en el Perú el 65 % de la población rural y el 30 % de la población urbana vive en construcciones de tierra construidas sin ninguna supervisión técnica, poniendo en riesgo a sus moradores durante un evento sísmico. Si bien existe una normativa para la construcción con tierra en el Perú, esta regula la construcción formal y por tanto la mayoría de los constructores con tierra desconocen sus recomendaciones.

La propuesta del autor es emplear los procesos constructivos de infraestructura de salud para la formación de las capacidades locales y difusión de los lineamientos de un correcto empleo de las tecnologías sismorresistentes.

Toda la estrategia esta sustentada por un estudio técnico efectuado en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontifica Universidad Católica del Perú (PUCP) donde se realizaron dos ensayos dinámicos en mesa vibradora. Los dos módulos ensayados a escala natural y construidos bajo condiciones reales y con las mismas características geométricas solo se diferencian en el refuerzo.

Ambos módulos se ensayaron simulando sismos leves, moderados y severos variándose la intensidad del movimiento en seis fases seguidas. El comportamiento observado durante los ensayos del modulo reforzado fue excelente manteniéndose la estructura estable y sin daños estructurales en la fase seis.

La ponencia describe en detalle los ensayos efectuados en el laboratorio y la aplicación del refuerzo en construcciones reales. Se concluye que el sistema puede dotar de gran resistencia sísmica a construcciones de adobe, protegiendo así la vida de los pobladores de menores recursos económicos.

Introducción

El Proyecto AMARES "Programa de apoyo a la modernización del sector salud y aplicación en una región del Perú", tiene como objetivo principal el contribuir con el Ministerio de Salud en la implementación de la reforma del sector salud y asegurar su aplicación en el ámbito de intervención de la región de Ayacucho, Huancavelica y Andahuaylas en Apurimac.

La propuesta de AMARES en relación a la construcción, mejoramiento o mantenimiento de la infraestructura de salud pone énfasis en las acciones orientadas al mejoramiento de la capacidad resolutiva de los establecimientos de salud con un enfoque de interculturalidad y calidad.
AMARES tiene como uno de sus principios de intervención, el desarrollo de las capacidades locales como elemento básico de desarrollo y sostenibilidad de las intervenciones. Una solución eficaz para afrontar los problemas de las infraestructuras tanto para el hábitat así como para establecimientos públicos es el empleo de materiales de construcción locales y técnicas de construcción con participación local que contribuyen a la transferencia de capacidades en las comunidades para la construcción con tecnologías apropiadas.

El adobe es empleado como material de construcción por un gran porcentaje de los habitantes de países en desarrollo. El Perú posee una larga historia de secuelas desastrosas provocadas por movimientos sísmicos expresadas en considerables pérdidas económicas y lamentables perdidas humanas. Se estima que en el Perú el 65 % de la población rural y el 30 % de la población urbana viven en construcciones de tierra las mismas que son construidas sin ninguna supervisión técnica y que por tanto representan un riesgo para sus habitantes debido a la ubicación geográfica del Perú respecto a las zonas de riesgo sísmico en el mundo.

Si bien existe una normativa para la construcción con tierra en el Perú, la mayoría de los constructores con tierra no están regidos a la actividad formal que abarca la Norma y en consecuencia desconocen sus recomendaciones.
La estrategia de AMARES para el Componente IV "Modelo de atención Integral" esta basada en un diagnostico situacional de la infraestructura de establecimientos de salud y posee dos líneas de acción. La primera orientada al mejoramiento de infraestructura existente y la segunda a la construcción de infraestructura con tecnología apropiada.
Los ensayos dinámicos descritos en la presente ponencia son el resultado de una preocupación por buscar soluciones tecnológicas validadas que permitan una aplicación responsable de tecnologías apropiadas en el ámbito de intervención del proyecto.
La visión de AMARES de emplear los procesos constructivos de infraestructura de salud para la formación de las capacidades locales es una manera de implementar el concepto de sismoresistencia en la construcción de infraestructura y vivienda, así como de transmitir los lineamientos de un correcto empleo de estas tecnologías. Este es sin duda un aporte a la difusión y la reducción de riesgos en la construcción en el ámbito rural.

Sismo-resistencia en la construcción con tierra

Generalidades

Hacia la creación de un concepto de sismo resistencia

El Perú se ubica en la parte central y occidental del continente Sudamericano, se forma la cadena orogénica montañosa de los Andes, que se extiende en casi toda la margen occidental del continente con aproximadamente 800 Km de longitud.
Eventos sísmicos destructores, actividad volcánica y el surgimiento de la corteza terrestre, son comunes en esa región.

Macro zona
La norma nacional del Perú divide el territorio peruano en tres zonas sísmicas. Esta propuesta de zonificación se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral.

Norma E 0.30 Diseño Sismorresistente

A cada zona se asigna un factor Z según se indica en la Tabla N°1.
Este factor se interpreta como la aceleración pico del suelo del suelo con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

Tabla N°1 FACTORES DE ZONA	
ZONA	Z
3	0,4
2	0,3
1	0,15

Tabla N°1 Factores de Zona

Zonas sísmicas del Perú
Norma Sismorresistente E 0.30

La zonificación normativa es una globalización de todos los parámetros sísmicos significativos: foco, distancia epicentral y representando una aceleración sobre terreno firme. A esta generalización se agrega las amplificaciones de las ondas sísmicas por las condiciones locales.

Efectos de microzona
Una construcción ubicada sobre suelo duro no tiene el mismo comportamiento que una construcción ubicada sobre suelo blando.
Los estudios del grado de daños y de distribución geográfica sobre sismos ocurridos en diferentes partes del mundo en áreas relativamente pequeñas y muy cercanas entre si, han dejado establecido que las condiciones locales del suelo, geología y topografía, pueden causar diferencias sustanciales en las intensidades hasta 3 o 4 grados en la escala MM.

Tales contrastes se deben a la influencia del suelo. El sismo de 1970 por ejemplo dejó destruido el centro de la ciudad de Huaráz casi por completo. Sólo a 2 km al norte, en Centenario construcciones tan débiles como las del centro de Huaráz no fallaron. Este fenómeno se denomina efecto de microzona. (*Kuroiwa, 2002)*
La norma técnica de edificación E 0.80 Adobe del Perú determina las fuerzas sísmicas horizontales considerando un factor de corrección de 1,2 para suelos blandos con capacidad portante admisible de 1 kg/cm² hasta 3 kg/cm².

Investigaciones recientes demuestran que la intensidad de la aceleración influye de una manera muy significativa en el tema de la amplificación por condiciones del suelo. Para aceleraciones (PGA) mayores a 0.5 g los factores de amplificación son diferentes para un mismo tipo de suelo blando.
Mientras que para aceleraciones menores hay que considerar una amplificación de los efectos sísmicos, para el caso de aceleraciones mayores el suelo blando puede resultar ventajoso absorbiendo los movimientos sísmicos.

La Norma reconoce que dar protección completa frente a todos los sismos no es técnica ni económicamente factible para la mayoría de las estructuras. En concordancia con tal filosofía se establecen en esta norma los siguientes principios para el diseño:

a. La estructura no debería colapsar, ni causar daños graves a las personas debido a movimientos sísmicos severos que puedan ocurrir en el sitio.
b. La estructura debería soportar movimientos sísmicos moderados, que puedan ocurrir en el sitio durante su vida de servicio, experimentando posibles daños dentro de límites aceptables.

La norma correspondiente no desarrolla una especificación exacta del movimiento moderado o severo en términos de aceleración horizontal máxima que se espera en el sitio para un periodo de retorno específico.
Algunas Normas de otros países consideran 500 años para el sismo severo y 50 años para el sismo moderado. (Piqué del Pozo, 2005)

Respuesta constructiva
La magnitud de los valores máximos de la deformación horizontal d, de la velocidad horizontal v y de la aceleración horizontal a en un sismo de intensidad mediana se puede establecer de la siguiente manera:

d = 0.1 a 0.3 m
v = 0.1 a 0.3 m/s
a = 0.1 a 0.3 m/s² = 0.15 a 0.30 g
Una aceleración horizontal de 0.3 g significa que 30% del peso propio de los elementos constructivos actúan como fuerza en el sentido horizontal en la construcción.

Con respecto al riesgo de colapso de construcciones se puede establecer la relación siguiente:
Calidad del comportamiento = Resistencia X Ductilidad

En la que resistencia es la resistencia contra fuerzas horizontales.
Ductilidad es la capacidad de una estructura de sufrir deformaciones sin romperse.
Entre ambas características existe una interdependencia intima.
De acuerdo con esta relación, una estructura debe tener por ejemplo una gran resistencia y una baja ductilidad o una resistencia baja y una ductilidad alta. (Minke, 2001)

La primera solución posible consiste en construir una estructura con una resistencia tan alta, que resista el sismo sin deformación plástica. Esta solución normalmente es muy poco económica, debido a que exige grandes esfuerzos que garanticen la resistencia.
Ejemplos de esta solución son las antiguas viviendas coloniales de tierra con muros de un espesor de más de 80 cm y con muy pocas aberturas que sobreviven hasta hoy.

La segunda solución posible consiste en construir una estructura con una ductilidad tan alta, que resista el sismo sin colapso total. Ejemplo de estas construcciones es la quincha o bahareque. Por los elementos verticales y horizontales de madera, bambú o carrizo el sistema resulta ser muy dúctil lo que lo hace resistente a los impactos de los sismos.
En este caso se aceptan conscientemente daños que se producen por causa de la salida del rango elástico.
Esta solución solamente es aplicable en zonas que ofrecen rollizos de madera, bambú o carrizo, debido a que exige grandes cantidades de estos materiales para la construcción.

Frecuentemente se escoge una solución con estructura de resistencia mediana. Con ello, los movimientos sísmicos causaran solamente deformaciones plásticas moderadas y el requerimiento de ductilidad se mantiene relativamente bajo.

Las construcciones de tierra reforzada deben conducir a esta solución intermedia ya que poseen capacidad de deformación. Durante un sismo moderado o fuerte, se espera que los muros de tierra reforzada presenten fisuras que no interfieran con su capacidad portante evitando así el colapso del techo.

La implementación del concepto de sismoresistencia

Desde el punto de vista de la sismoresistencia se puede concluir que a pesar haber en el Perú investigación acerca de la construcción sismorresistente en tierra que se ha plasmado en la elaboración de Normas de Diseño en Adobe, estas aún no cumplen con su cometido, pues no llegan a beneficiar a aquellos que más la necesitan.

En un país como el Perú donde más del 40 % de las viviendas son actualmente de tierra, la mayor parte de los constructores de las viviendas de tierra se encuentran en asentamientos rurales donde la construcción es informal y por lo tanto las normas de construcción les son desconocidas.

Esta informalidad se manifiesta en las nuevas viviendas de adobe altamente vulnerables debido a la falta de asesoría técnica presentando debilidades por dimensiones largas entre arriostres, muros de espesor mínimo y aplicando vanos para puertas y ventanas muy grandes y mal ubicadas.

Asimismo, las soluciones técnicas desarrolladas por diversos organismos de cooperación e investigación no han resuelto todavía el problema de la vivienda de tierra en zonas sísmicas debido a que en la mayoría de los casos se trata de proyectos que se ejecutan en situaciones de post desastre que requieren soluciones rápidas y por lo general con altos niveles de mano de obra calificada y materiales industriales para paliar las necesidades urgentes de las poblaciones afectadas.

"En el estudio del caso del Perú, vimos que la ayuda de emergencia se otorgó de tal manera que los proyectos de desarrollo de autoayuda no fueron posibles durante muchos años después.
Esto se debió a que el carácter de la ayuda de emergencia creó dependencia y expectativas poco realistas de ayuda de emergencia material en las áreas afectadas."

Vulnerabilidad: El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres (Blaikie Piers et al. 1996)

Por ello, es importante buscar alternativas complementarias, sencillas y accesibles para transmitir las pautas del diseño sismorresistente. La clave entonces en el trabajo de difusión del concepto sismorresistente es el énfasis en la relevancia de la vivienda en el desarrollo sostenible y la salud de los pobladores.

Asimismo, la aplicación de una tecnología participativa y sencilla en términos de ejecución de obra formaría parte de esta línea de trabajo. El desarrollo de capacidades locales es la clave para dar incentivo a las mejoras en la construcción, así como la inclusión del concepto sismorresistente. El desarrollo de capacidades locales debe estar basado en un costo menor de ejecución de obra que hace que la capacitación tenga un sentido real de replica y que promueva mayor participación en los procesos de construcción y decisión.

Una técnica de construcción sismorresistente que permita la participación de la familia durante todo el proceso de construcción es otro factor de importancia para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones. Las capacitaciones dirigidas a los pobladores en muchos casos están dirigidas solamente a hombres con experiencia en construcción debido a las condiciones que dicta el sistema aplicado. Si el sistema constructivo hiciera posible la inclusión de las mujeres en el proceso constructivo se podría incrementar de manera considerable el efecto multiplicador.

Descripción del ensayo

Marco General

La Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe (Perú), esta orientada a mejorar los sistemas constructivos convencionales de adobe tomando como base la realidad de las construcciones de este tipo. “Los proyectos que se elaboran con alcances y bases distintas a las consideradas en la norma E.080 Adobe, deberán estar respaldados con un estudio técnico”. (Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe).

Respondiendo a los requerimientos de la Norma para la implementación de un sistema constructivo no convencional se realizaron con financiamiento de la Unión Europea en los años 2005 y 2006 dos estudios técnicos relacionados al comportamiento sísmico del sistema constructivo de la bóveda Núbica de adobe.

Objetivo

El estudio técnico tiene como fin el desarrollar infraestructuras de bajo costo con utilización de materiales locales y participación social en el marco de las acciones del Proyecto AMARES.

El objetivo de las pruebas fue de documentar el comportamiento sísmico del sistema constructivo de bóvedas nubicas de adobe con y sin refuerzo para obtener conclusiones que permitan la utilización y la difusión del sistema constructivo de manera más adecuada.

Propuesta Tecnológica - Bóvedas Nubicas de Adobe

Generalidades acerca del material

Resistencia característica a compresión del adobe

En efecto el adobe es un material destinado a trabajar preponderantemente a compresión. Su capacidad resistente a otras solicitaciones, tales como la tracción y el esfuerzo cortante, es bastante reducida. Estos valores no están orientados al diseño de elementos constructivos sometidos a esfuerzos de tracción o flexión.

La tierra como material de construcción brinda varias ventajas

El barro almacena el calor

Al igual que otros materiales densos, el barro almacena calor. En zonas climáticas con diferencias de temperatura amplias o en aquellas en las que es necesario almacenar la ganancia térmica por vías pasivas, el barro puede balancear el clima interior.

El diagrama a continuación muestra una relación del balance térmico de un muro de adobe y de uno de hormigón.

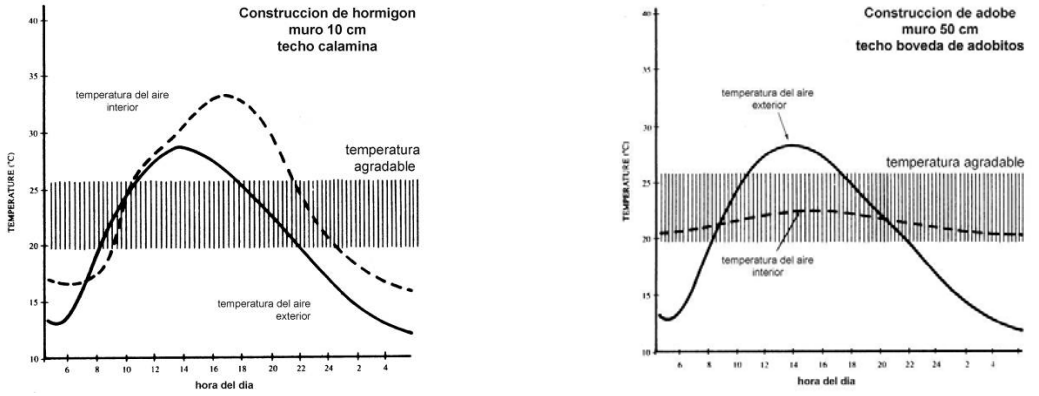


Diagrama Nº 1 Relación Balance Térmico, Hassan Fathy

El barro ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental
El barro prácticamente no produce contaminación ambiental a diferencia de otros materiales de uso frecuente, para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita solo 1 % de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración de hormigón armado o ladrillos cocidos.

Es necesario poner énfasis en el hecho que el barro no produce ningún escombro que contamine el medio ambiente debido a que su reutilización es ilimitada.

El barro es apropiado para la autoconstrucción
Las técnicas de construcción con tierra pueden ser ejecutadas por personas no especializadas en la construcción, la presencia de una persona experimentada supervisando el proceso de construcción es suficiente. Las herramientas necesarias para trabajar el barro son sencillas y económicas. (Minke, 2001)

Comportamiento estructural de las Bóvedas Núbicas
La sección transversal de una bóveda que por lo general esta cargada solo por su propio peso, debe tener la forma de una catenaria invertida, de tal manera que solo contenga cargas de compresión.

Estructuralmente las bóvedas son superficies curvas que transfieren principalmente cargas de compresión a sus apoyos. Las bóvedas de adobe pueden resistir fuerzas de tracción y flexión muy pequeñas, por ello es importante diseñar el perfil de estas estructuras de tal manera que solo resistan fuerzas de compresión.

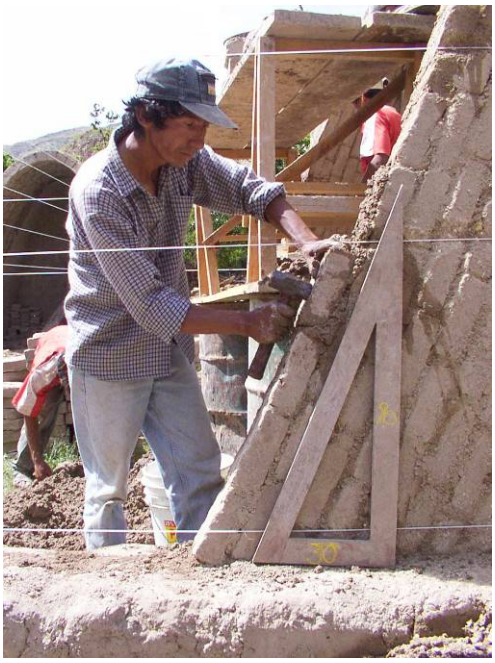
La sección transversal ideal de una bóveda con alta carga muerta es una catenaria invertida.

Una cadena colgada libremente que tiene solo fuerzas de tracción bajo la influencia de la carga de sus eslabones (carga muerta) forma una curva específica denominada catenaria. Si esta curva se invierte define la línea de soporte ideal (línea de empuje) para una bóveda en la que solo ocurren fuerzas de compresión bajo cargas muertas.

Esta línea se puede medir con la formula catenaria
y = a * cosh(x/a) y puede definirse con la posición de dos puntos de apoyo y la cima proporcionalmente.

Con la técnica de bóveda núbica utilizada durante siglos en Egipto se pueden construir bóvedas sin encofrado utilizando arcos inclinados hechos de adobes. Estas bóvedas están comúnmente construidas con adobes de 20 cm de ancho 20 cm de largo y solo 5 a 6 cm de espesor.

Esto significa que el peso de los adobes por unidad de área de junta de mortero es muy bajo para evitar el deslizamiento de los adobes en la posición inclinada durante la construcción. El ángulo de inclinación de los arcos es un factor decisivo en el proceso de construcción. Este debe ser entre 65° y 70° (igual a una proporción 1: 3) con respecto a la horizontal.



Angulo de inclinación bóveda núbica

Las bóvedas nubicas requieren uno o dos muros verticales sobre los cuales descansan los arcos inclinados. La sección transversal de una bóveda núbica que por lo general esta

cargada solo por su propio peso, debe tener la forma de una catenaria invertida, de tal manera que solo contenga cargas de compresión.

Metodología

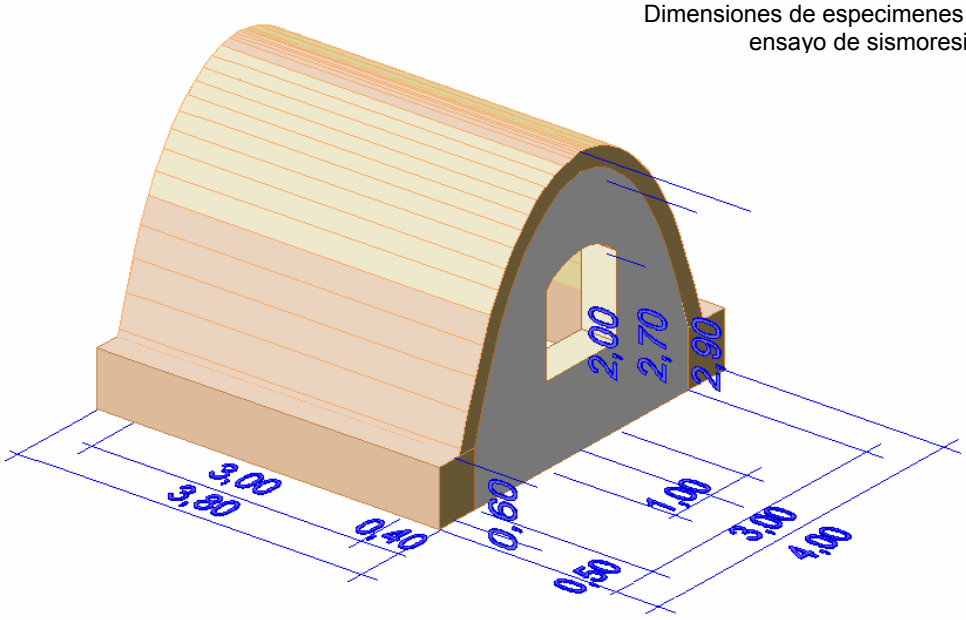
Para fines de la investigación, se realizaron dos ensayos dinámicos en mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Se construyeron dos módulos a escala natural, construidos en condiciones reales y con las mismas características geométricas. Los módulos se diferenciaron en el refuerzo.
Para obtener resultados cuantitativos sobre el comportamiento sísmico del sistema constructivo de la bóveda núbica se compararon los datos con ensayos anteriormente realizados de módulos tradicionales de adobe.

Con tal motivo el dimensionamiento de los módulos en cuanto al espesor de los muros y las medidas de los módulos así como las características de los movimientos sísmicos a aplicar fueron idénticos a los ensayos realizados en el marco del proyecto COPASA-GTZ, llevados a cabo en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Descripción de los especimenes

Dimensiones de especimenes para el ensayo de sismoresistencia



Datos técnicos de las bóvedas sin zócalo

Dimensiones exteriores (Ancho x Largo): 3,40 x 3,80 m
Dimensiones interiores 3,00 x 3,20 m
Altura del módulo: 2,60 m
Espesor de la bóveda: 20 cm
Superficie exterior de la bóveda: 22,91 m²
Perímetro de la bóveda (eje): 5,815 m
Relación Altura / Ancho: 0.7
Peso del módulo completo sin considerar el anillo de concreto armado:11750 kg (1800 kg/m³)
Cantidad de adobitos para bóveda: 1600 unidades del formato 20 x 20 x 6 cm
Cantidad de adobes para los muros verticales: 350 unidades del formato 30 x 30 x 10 cm
Cantidad de mortero de barro requerido: 2m³

Los vanos de los módulos consistieron de una ventana de 0,80 x 0,90 metros y una puerta de 1,00 x 2,00 metros en cada muro longitudinal (paralelo al movimiento del simulador).
Los dos módulos fueron construidos en las instalaciones del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) con adobes previamente elaborados con tierra de chacra de la ciudad de Lima.

Para reproducir el proceso constructivo de la zona alto andina de Ayacucho y Huancavelica se empleó mano de obra local de Ayacucho contratando comuneros instruidos en procesos de capacitación en la comunidad de Niño Yucay / Ayacucho.

Todo el proceso de construcción de los dos módulos así como todos los trabajos relacionados y todas las etapas de la ejecución del ensayo se realizarán en el mismo emplazamiento empleando la misma mano de obra.
Los dos módulos no se recubrieron con tarrajeo, para no exceder el límite de peso máximo de los especimenes de ensayo (16 to).

En ensayos realizados en la PUCP de simulación sísmica en escala natural de especimenes de adobe tradicional reforzado se llegó a la conclusión que el revoque de barro contribuye de manera significativa a la rigidez durante las fases elásticas.

Técnica del ensayo
Con el fin de permitir una comparación de los resultados con ensayos anteriores se aplicó las mismas características sísmicas de desplazamiento horizontal *D*, aceleración horizontal *A* y señal *L*.

Equivalencia de Intensidades MMI con Valores Nominales de la Aceleración (Ao) y de la Amplitud (Do) de la Mesa Vibradora			
Fase de Ensayo	Característica del Sismo	Ao (g)	Do (mm)
1	Muy Frecuente o muy leve, III MM	0,15	15
2	Frecuente o Leve, VI MM	0,35	30
3	Poco Frecuente o Moderado (Ocasional), VII MM	0,65	60
4	Intermedio entre moderado y severo, VIII MM	0,80	80
5	Raro o Severo, IX MM	1,00	100
6	Muy raro o Catastrófico, X MM	1,20	120

Tabla N°2 – Equivalencia de intensidades

La tabla muestra las aceleraciones nominales (A o), conjunto con los desplazamientos correspondientes (D o) asociados, aplicados en el ensayo de simulación sísmica.

Sin embargo, debe anotarse que estas equivalencias son solo referenciales, y su principal objetivo es proporcionar al público no técnico, información cuantitativa de la severidad del movimiento sísmico simulado.

Señal de simulación sísmica
La componente L aplicada es la señal captada en Lima correspondiente al terremoto ocurrido en el Perú el 31 de mayo 1970, con 30 segundos de duración, captado en el Instituto Geofísico del Perú (IGP). La señal corresponde a las condiciones de suelo de la ciudad de Lima (grava densa), que constituye una de las señales sísmicas peruanas con mayor poder destructivo.

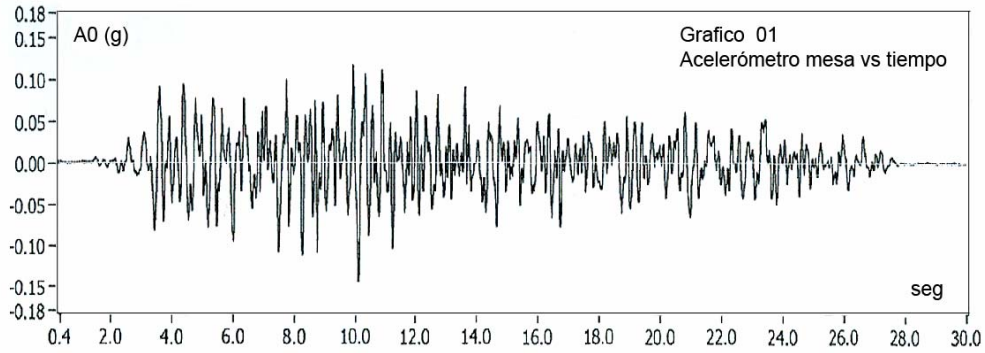


Diagrama N°2 – Muestra de la Señal L aceleración mesa vs. tiempo aplicada en los ensayos

Evaluación de la aceleración máxima en cada fase

Para determinar la aceleración máxima en cada fase del ensayo, se aplicó las siguientes consideraciones:

Los sismos reales presentan 3 componentes traslacionales más 3 componentes rotacionales que actúan en simultaneo, mientras que la mesa de simulaciones sísmicas del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) tiene un solo grado de libertad traslacional. Para contemplar estos efectos se ha supuesto un factor de corrección.

Instrumentación de los módulos

Durante el ensayo se utilizaron un total de 23 instrumentos.
11 sensores electrónicos de desplazamiento (LVDT o D) y 12 acelerómetros (A) y un medidor de presión del actuador dinámico (ΔP).

Peso de los módulos

Los especimenes fueron pesados (W T), incluyendo la cimentación, para posteriormente obtener el peso neto de cada módulo (W2 = WT – W1) y el peso neto por área en planta en Kg/m² (W = W2/A, donde A = 3,60 x 3,80m = 13,68m²).

Identificación del Módulo	Peso Registrado de los Módulos (en kilogramos)			Peso / Área
	w_1 Cimentación + Extras (Anillo de C°A° + Sistema de Fijación)	w_2 Módulo de Adobe (Bóveda Núbica)	$w_T = w_1 + w_2$ Total sobre la plataforma del Simulador de Sismos	$w = w_2 / A$ Peso Módulo / Área (en Planta) (kg /m²)
M-1 (Sin Refuerzo)	3708 + 80 = 3788	11933	15721	872,30
M-2 (Reforzado)	3708 + 80 = 3788	11770	15558	860,38

Tabla N°3 – Peso de los módulos

En cada fase del ensayo se registraron directamente la historia de aceleraciones y de desplazamientos, tanto de la plataforma de simulación sísmica como de cada instrumento colocado sobre el módulo.

De dichos registros se obtuvieron los valores máximos y el instante en que ocurrieron. Con esta información y conociendo la masa del sistema, se calculó la fuerza cortante asociada a la base del espécimen en cada fase.

Comportamiento Sísmico de los módulos
Basados en el informe final emitido por el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), podemos hacer un balance sobre el comportamiento sísmico de ambos módulos.

En términos generales, acerca del comportamiento de la bóveda núbica se pueden indicar las siguientes particularidades en su comportamiento sísmico:

- Los muros verticales planos o tímpanos que resisten el empuje lateral de la bóveda apoyada parcialmente en los mismos por la orientación de las hiladas y coinciden con la dirección del movimiento trabajan fundamentalmente a fuerza cortante coplanar y a flexión perpendicular a su plano cuando desarrolla formas de vibrar transversales.

- La bóveda misma, debido a la acción sísmica perpendicular a su eje trabaja fundamentalmente a flexión y a esfuerzos membranales.

- Los esfuerzos membranales axiales son principalmente de compresión debido a las características del material cuya capacidad resistente a otras solicitaciones, tales como la tracción y el esfuerzo cortante, es bastante reducida.

Modulo 01 (No reforzado)
Fase 1: No aparecieron fisuras. No se observó movimiento de la estructura.
Fase 2: No aparecieron fisuras. No se observó movimiento de la estructura.
Fase 3: Se observó un movimiento ligero de la bóveda. Se formaron fisuras escalonadas.
Fase 4: Condición de falla. Se observó un fuerte movimiento de la bóveda formando grandes grietas en la misma. Partes de la bóveda se desplomaron produciendo un empuje perpendicular a los muros verticales que colapsaron. La bóveda en si resistió la fase 4 pero quedo en un estado irreparable y de colapso inminente.

Comportamiento Sísmico del Módulo 02 (con refuerzo)
Fase 1: No aparecieron fisuras. No se observó movimiento de la estructura.
Fase 2: No aparecieron fisuras. No se observó movimiento de la estructura.
Fase 3: Se formaron fisuras escalonadas. La estructura quedo estructuralmente intacta.
Fase 4: Se observó un movimiento regular de la bóveda formando grietas mínimas en la misma. La estructura quedo estructuralmente intacta.
Fase 5: Se observó un movimiento regular de la bóveda formando grietas de hasta máximo medio centímetro. Hubo un desplazamiento de los muros verticales de 1,00 cm. La estructura quedo estructuralmente intacta.
Fase 6: Se observó un movimiento fuerte de la bóveda. Hubo un desplazamiento de los muros verticales hasta 1,50 cm como máximo. La estructura quedo estructuralmente intacta, constatándose así que los resultados del refuerzo son óptimos debido a que incluso con una intensidad de un sismo catastrófico la estructura permaneció en evidentes condiciones de estabilidad.

Posterior a la ejecución del ensayo el Modulo 02 fue izado por una grúa hasta el patio donde se construyeron ambos módulos para su posterior demolición. Después de retirar la malla que confinaba la estructura, la construcción se mantuvo en evidentes condiciones de estabilidad estructural y demolerla requirió de bastante esfuerzo.

Sistema de refuerzo aplicado
Ambos módulos son de una planta y un ambiente. Presentan las mismas características geométricas, pero se diferencian en el refuerzo.
Mientras que el primer módulo (M1) carece completamente de refuerzo, el segundo módulo (M2) esta reforzado interior y exteriormente con una geomalla bidireccional de polipropileno. Las dos mallas se encuentran unidas con conectores de polietileno.

Sistema constructivos del refuerzo tipo "Sándwich"
Refuerzo con malla interior y exterior
La gran desventaja de refuerzos céntricos ubicados dentro del muro es que solamente es aplicable en construcciones nuevas.
Considerando que en todos los países en vías de desarrollo existe una cantidad inmensa de construcciones de tierra no reforzada, se llegó a desarrollar un sistema de refuerzo que sea aplicable a construcciones existentes.
Este sistema consiste en la aplicación de mallas interior e exteriormente unidas con conectores que traspasen el muro. Las mallas pueden ser de materiales naturales como sogas y carrizo o pueden ser de materiales industriales como la malla electro soldada galvanizada o mallas sintéticas.
En el Perú se aplicó el modelo de refuerzo que consiste en franjas de malla electro soldada galvanizada de ¾" recubierta con revoque de cemento con bastante éxito. En este caso las franjas se colocan vertical- y horizontalmente en las zonas de mayor concentración de fuerzas en el caso de movimientos sísmicos que son las esquinas y encuentros de muros.

La eficacia de este modelo con malla metálica y cemento fue analizada en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP. La gran desventaja del sistema constructivo es que *"…las franjas de mortero de cemento armado se comportan como cuerpos rígidos que golpean las zonas de mampostería de tierra sin armar, lo que demuestra que esta combinación de materiales no trabaja adecuadamente en conjunto."* (Julio Vargas, et al – 2005)

Considerando que los sistemas de sismorresistencia basados en la rigidez requieren mucha inversión en materiales como el acero y el cemento y tomando en cuenta que el estado de falla de este sistema sismorresistente es abrupta sobrepasando el nivel de rigidez, es aconsejable aplicar una sismorresistencia a base de ductilidad.
Los materiales requeridos para el refuerzo dúctil normalmente son más económicos y garantizan al mismo tiempo la sismorresistencia hasta el nivel catastrófico.

"El muro reforzado externamente con malla sintética en ambas caras tuvo un comportamiento muy satisfactorio, mucho mejor que el del muro reforzado con malla electro soldada.... Esto indica que en un terremoto fuerte, una vivienda reforzada con la malla electro soldada podría colapsar en forma frágil y súbita. " (Julio Vargas, et al 2005)

Debido a sus excelentes calidades como la alta resistencia a tracción y la resistencia a los rayos ultravioletas UV-A y UV-B que garantizan su función a largo plazo se llegó a la conclusión que la más apropiada técnica de reforzamiento consiste en aplicar una malla cuadrada de polipropileno, interior y exteriormente formando un sistema "Sándwich", unidos con conectores y recubierta con revoque de barro.

En el ensayo de las Bóvedas Núbicas del Proyecto AMARES se utilizó una geomalla biaxial simétrica de polipropileno de la empresa CIDEL SA / Perú - Tipo Tenax LBO 220 con una resistencia a tracción de 14 Kn/m en el momento de 5% de deformación y con una resistencia máxima de hasta 20 Kn/m. Este sistema de refuerzo garantiza ductilidad suficiente para permitir grandes deformaciones sin colapso de la estructura.

Las geomallas de polipropileno

Las geomallas de polipropileno son especialmente diseñadas para refuerzos de cimentaciones de cargas multiaxiales, refuerzo de bases, reducción de las capas de la estructura de pavimentos, estabilización de suelos, estabilización de terraplenes y refuerzo en taludes.

Recientemente se viene aplicando las geomallas de polipropileno en las construcciones sismorresistentes.

El estudio técnico ha demostrado que el refuerzo con malla de polipropileno es adecuado y asegura un buen comportamiento sísmico hasta las fases más intensas de la simulación sísmica.

Registros gráficos

Los registros gráficos muestran la respuesta del sistema estructural frente la solicitación sísmica aplicada.

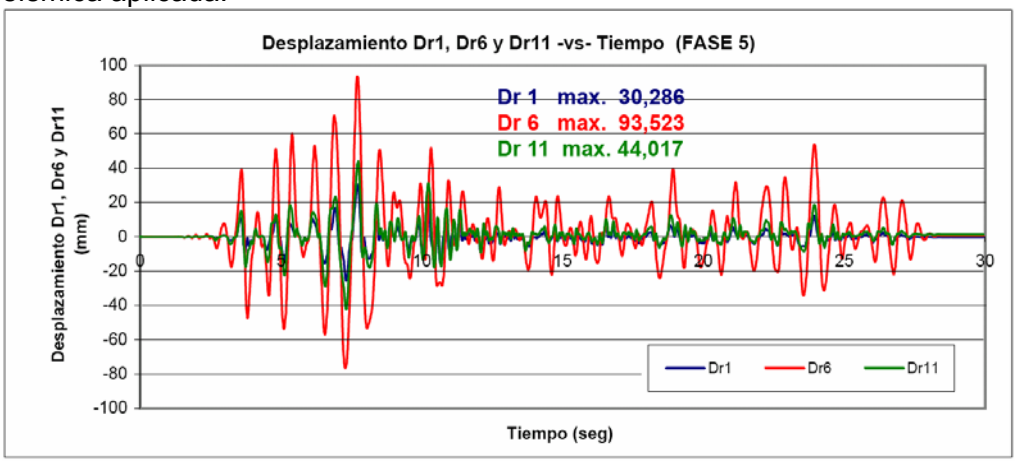


Diagrama N°3 Desplazamiento

Comparando el desplazamiento de los dos puntos extremos (D1 y D11) y del centro (D6) en la cima del módulo reforzado en la fase 05, se puede apreciar el alto grado de ductilidad que permite el sistema debido a la presencia de la malla de polipropileno.

Ejemplo del registro de acelerómetros durante la fase 05

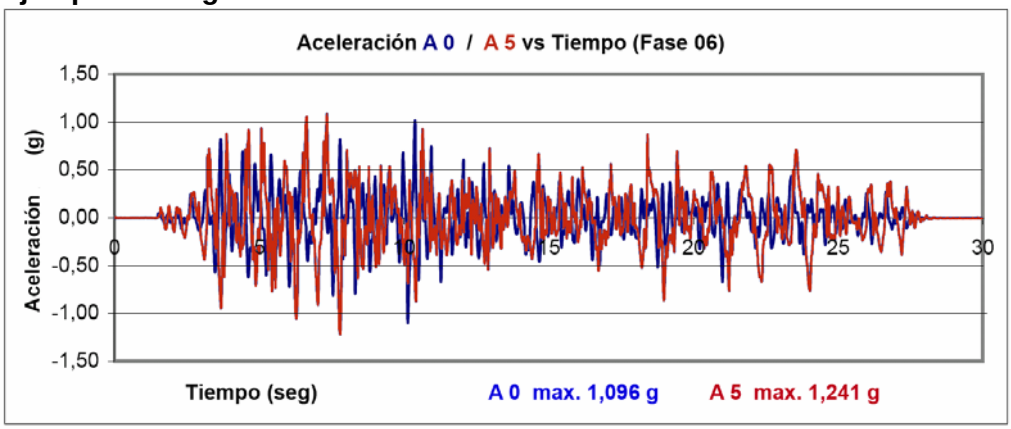


Diagrama N°4 - Amplificación de aceleración aplicada (A mesa) a la del módulo reforzado (A medidor 5) en la ultima fase

Detalle Colocación de Malla de Polipropileno Biaxial

Ensayo sísmico realizado en la Pontificia Universidad Católica del Perú investigando la aplicación de malla de polipropileno como refuerzo en la construcción.

Colocación en franjas en sentido horizontal de la malla de Polipropileno.

Sección del traslape de dos mallas unidas con alambre galvanizado no.18.

Incorporación del estudio técnico en la Norma Nacional de Adobe E 0.80

El estudio técnico realizado en la Universidad Católica del Perú ha demostrado que el sistema constructivo de la bóveda núbica es aplicable en zonas de sismicidad baja sin necesidad de un refuerzo y en zonas medianas con un refuerzo mínimo y en zonas de alto riesgo de movimiento sísmico aplicando el refuerzo investigado.

Además de la verificación del buen comportamiento sísmico que permitiría salvar vidas en caso de un movimiento telúrico este sistema constructivo brinda la posibilidad de construir infraestructura y vivienda con costos muy inferiores a los habituales. Una posta sanitaria empleando tecnología apropiada e incluyendo el costo del refuerzo requiere de un tercio de la inversión requerida para la construcción de una posta de las mismas características según el modelo empleado por el Ministerio de Salud.

Por tanto, se tiene planteada la inclusión del sistema constructivo en la Norma Nacional de Adobe E 0.80, debido a que su buen comportamiento sísmico ha sido comprobado. Esto facilitaría la incorporación del sistema a las propuestas de construcción en zonas alejadas a nivel nacional.

Implementación del concepto sismorresistente

La apropiación del concepto por los pobladores

El éxito y sostenibilidad de una intervención están estrechamente ligados a la apropiación del concepto por parte del grupo beneficiario. En un proceso de apropiación juega un papel fundamental la manera en la que el concepto es implementado y transmitido a través de diversas estrategias de ejecución y difusión.

En la mayoría de las propuestas nos vemos confrontados a elevados costos de ejecución en relación a los ingresos de los pobladores y a la imperativa necesidad de mano de obra calificada para su ejecución, limitando de manera significativa una posible capacidad de replica.

Lo que se busca es promover y difundir una tecnología que motive a las familias a adoptar la propuesta tecnológica por sus propios medios. La meta central es la reducción de vulnerabilidad orientando las intervenciones al desarrollo sostenible.

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP, fueron la base de una estrategia de difusión e implementación de un concepto de sismoresistencia en la construcción de infraestructura y vivienda que implique una participación más activa e independiente de los pobladores en los procesos de construcción, capacitación y difusión.

Posta Sanitaria de Niño Yucay

El Objetivo de esta obra fue la construcción de una infraestructura de salud aplicando una técnica constructiva adecuada que permita la utilización de materiales locales y su construcción con mano de obra local, la misma que seria capacitada para crear así un proceso de desarrollo de las capacidades humanas de cada región en la que se implemente este tipo de construcción.

Curso de Capacitación Niño Yucay, Ayacucho

Esta transmisión de conocimientos asegura un mejor mantenimiento de la infraestructura y mejoras en la calidad de vida de los habitantes de la comunidad ya que la técnica puede también ser aplicada a la construcción y al mejoramiento de sus viviendas.

El utilizar adobe para la construcción de los muros y la cubierta reduce los costos de manera muy significativa. Por lo general el precio de la cubierta en una construcción asciende a la mitad del precio final de la misma. Este precio puede ser aun mayor en el caso de una comunidad alejada debido a los insumos por transporte.

Aprendizaje práctico en obra

La mayor parte del aprendizaje tiene lugar en obra, el trabajo con el barro es sobre todo manual y por lo mismo la técnica se aprende con la práctica después de recibir una base teórica.

El proyecto en Niño Yucay se ejecuto con mano de obra no calificada, una de las metas del proyecto AMARES es crear capacidades en construcción en las comunidades beneficiarias. Esta meta se ha logrado, al finalizar la construcción los comuneros contaban con los conocimientos sólidos y suficientes para trabajar en obras posteriores.

Estos comuneros cumplen en la actualidad las funciones de instructores que al ser residentes de obra tienen a su cargo la supervisión y transmisión de la técnica de construcción.

Desarrollo de capacidades humanas

El desarrollo de capacidades humanas no se limita a la capacitación de mano de obra no calificada.

Se impartieron cursos a ingenieros y arquitectos con la finalidad de crear capacidades en el ámbito profesional sobre el concepto. Estos tuvieron a su cargo la elaboración de expedientes técnicos para la construcción de infraestructura sanitaria.

Curso de capacitación para profesionales

Aprendizaje teórico

A la fecha están en proceso de construcción 4 viviendas para personal de salud empleando tecnología sismorresistente y se han aprobado los expedientes técnicos para la construcción de 05 postas sanitarias.

Percepciones del riesgo en los pobladores

La percepción del riesgo en la población del ámbito de intervención es un tema central si se trata de difundir un concepto de construcción sismorresistente.

En la zona de intervención la población aun no emplea el criterio sismorresistente para la construcción de sus viviendas. Lo que sucede en la mayoría de los casos es que una vivienda segura en términos de sismoresistencia no tiene una alta prioridad.

Las condiciones de vida en el ámbito rural de la mayoría de los países Sudamericanos son tan precarias que la seguridad en la vivienda es un criterio demasiado abstracto para un poblador cuyo trabajo diario esta orientado a la supervivencia.
Si a ello sumamos el hecho que la mayoría de las propuestas exceden ampliamente las posibilidades económicas de los comuneros, podemos entender las graves limitaciones a la hora de buscar una replica de las propuestas tecnológicas.
El desarrollo de capacidades locales debe estar basado en un costo menor de ejecución de obra que hace que la capacitación tenga un sentido real de replica que promueva mayor participación en los procesos de construcción y decisión.

Difusión de la Norma
La difusión de la normatividad que regula las construcciones de tierra en el Perú es muy importante. Si bien existe una Norma que regula la construcción en adobe, la misma esta dirigida a la construcción dentro de un marco formal, dejando de lado la verdadera producción de edificaciones en tierra que en su mayoría se realiza de manera informal. Lo que suele suceder es que a pesar de existir una norma, esta no llega a los usuarios que se pretende beneficiar.

La presente propuesta busca a través de la construcción de infraestructura de salud en el ámbito de intervención generar procesos de capacitación entre los pobladores y difusión de un correcto empleo de tecnologías sismorresistentes.

Relevancia de un enfoque activo más que pasivo
Orientando las intervenciones hacia el desarrollo sostenible debe apostarse por un enfoque mas activo que pasivo que implica la estimulación de los pobladores para ser artífices del cambio, mediante una tecnología que les permita participar activamente en el proceso constructivo, no solo cumpliendo la función de mano de obra no calificada sino pudiendo ser a través de su capacitación los encargados de difundir la tecnología.

Un enfoque activo implica que los individuos pasen de ser espectadores a artífices del cambio. Esto genera confianza y estimulo a la población afectada para atender sus propias necesidades, lo que da inicio a un desarrollo sostenible de las intervenciones.

Un sistema constructivo que requiera menos supervisión técnica es un gran paso hacia esta meta. Si bien es necesario crear una memoria institucional acerca de las secuelas del desastre es quizás más importante generar una memoria popular capaz de generar conciencia colectiva.

Conclusiones
Los resultados de las pruebas realizadas en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontifica Universidad Católica del Perú (PUCP) acerca del comportamiento de bóvedas nubicas con y sin refuerzo, son un aporte a la investigación de tecnologías de construcción sismorresistentes con adobe orientadas a mitigar las consecuencias de los sismos en zonas de alto riesgo.
De los resultados del estudio técnico se puede destacar que el sistema constructivo de la bóveda núbica reforzada tiene resultados óptimos debido a que incluso con una intensidad de un sismo catastrófico (X - MM) la estructura permaneció en evidentes condiciones de estabilidad sin alcanzar la condición de falla.

Asimismo cabe señalar que la bóveda núbica sin refuerzo alcanzo la fase 4 del ensayo correspondiente según la equivalencia de intensidades a un sismo intermedio entre moderado y severo (VII - MM).

La experiencia de AMARES en la aplicación y difusión de la propuesta sismorresistente se origina en respuesta a la necesidad de proveer de servicios de salud en condiciones

adecuadas. Lo que implica tener en cuenta a la hora de plantear propuestas tecnológicas que varias regiones del Perú son zonas de alto riesgo sísmico.

La construcción de edificaciones sismorresistentes de uso diferente a la vivienda es importante para demostrar el empleo de las tecnologías así como utilizar los procesos de construcción como herramientas de transferencia de capacidades. Se debe promover su empleo tanto en locales públicos como privados.

AMARES busca promover y difundir la tecnología, motivando a las familias a adoptar la propuesta tecnológica por sus propios medios o a través de apoyo externo. Asimismo aplica una metodología para la transferencia de capacidades orientada a la difusión de los lineamientos de la Norma para una correcta aplicación del concepto sismorresistente.
Este trabajo evidencia que la aplicación de un concepto sismorresistente en la construcción de infraestructura y vivienda de bajo costo es un trabajo que implica una sensibilización de la población beneficiaria así como un compromiso político y económico del Estado y los organismos de cooperación.
Lo que se busca es que a través del trabajo con múltiples contrapartes involucradas en el desarrollo poder contribuir a la difusión y concientización basadas en una propuesta de un modelo de construcción sismorresistente que pueda ser construido bajo la modalidad de autoconstrucción con la inclusión de los pobladores en los procesos de construcción y capacitación, convirtiéndolos así en actores del cambio.

Los pobladores deben internalizar el riesgo a su vida cotidiana para lograr que la creación de un ambiente más seguro sea entendido como un derecho.

Citas y Notas

[1] Consultor Internacional en Construcción y Diseño con Tecnologías Apropiadas Proyecto AMARES / PERÚ

Bibliografia

*BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I. Y WISNER B. (1996) Vulnerabilidad : el entorno social, político y económico de los desastres. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
*CAPECO (2002) " Reglamento Nacional de Construcciones –Edición Actualizada" Lima, Perú.
*CERESIS (2000), "Reforzamiento Sismo-Resistente de Viviendas de Adobe Existentes en la Región Andina", http://www.ceresis.org/proyect/padobe.htm
*GTZ (2003) "Perú – Proyecto de reconstrucción con inclusión de la gestión de riesgo", Eschborn, Alemania.
*Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI (2001) " Informe sobre el terremoto ocurrido en el sur del país el 23 de junio de 2001" INDECI. Lima, Perú
*KUROIWA Julio (2002) "Reducción de desastres" Lima, Perú
*MATOS G., QUIUN D. Y SAN BARTOLOMÉ A. 1997. "Ensayo de simulación sísmica en un módulo de adobe confinado por elementos de concreto armado". XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú. Trujillo.
*MINKE G., (2001) " Construction Manual for earthquake- resistant houses built of earth". GATE, GTZ. Eschborn, Alemania.
*SENCICO (1999). " Norma Técnica de Construcciones de Adobe – NTE-080",. Lima, Perú.
*PIQUÉ DEL POZO J. "Modificaciones a la Norma de diseño sismorresistente" (2005) Seminario Internacional de Arquitectura, Construcción y Conservación de Edificaciones de tierra en Áreas Sísmicas: Sismoadobe. PUCP. Lima, Perú
*SENCICO (1997) "Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificación E.030 – Diseño Sismorresistente", Lima, Perú.
*SENCICO (2003) "Construcción de Módulos Básicos de Vivienda en Adobe Reforzado", Convenio PNUD-SENCICO, Arequipa, Perú.
*ZEGARRA L., QUIUN D., SAN BARTOLOMÉ A. Y GIESECKE A (1999), "Reforzamiento de viviendas existentes de adobe – Proyecto Ceresis-GTZ-PUCP", Colegio de Ingenieros del Perú, Ponencias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huanuco, Perú, noviembre, Artículo No. EC-13.

*ZEGARRA L., QUIUN D., SAN BARTOLOMÉ A. (2002), "Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica", VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Chile, CDROM Vol. 1.

*VARGAS J., BLONDET M. Y TRAQUE N. (2005). “Reflexiones sobre la Norma Peruana vigente: E.080 Adobe” Seminario Internacional de Arquitectura, Construcción y Conservación de Edificaciones de tierra en Áreas Sísmicas: Sismoadobe 2005. PUCP. Lima, Perú

*HAIDER J., CHUQUIMIA E., HUERTA J. “Retos en la adopción de tecnología sismorresistente para viviendas de adobe en la sierra peruana“