

Evaluación del desempeño dinámico de estructuras mixtas de bambú estructural y concreto armado mediante ensayos a escala con un simulador de aceleraciones sísmicas

Evolution of dynamic performance of bamboo composite and structural concrete structures through scaled trials with a seismic acceleration simulator

Recibido: abril 25 de 2014 | Revisado: mayo 28 de 2014 | Aceptado: junio 10 de 2014

EDUARDO PUMA ALVAREZ*

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

ABSTRACT

This research has as objective to unite the safety of conventional design with the features of sustainable design investigating the combined dynamic behavior of structures made of structural bamboo and reinforced concrete during an earthquake. Two types of analysis were made: 1) Theoretical dynamic analysis considering the combined properties of both bamboo and reinforced concrete present in the composite structure. 2) Real scaled dynamic analysis using seismic acceleration simulator or vibratory table, regulated by the UCIST (University Consortium on International Shake Tables). To measure the response in the structure, we would normally use one or more accelerometers located on each floor of the test building, which would record the real dynamic behavior of the model. In this particular case, since we did not yet have access to these types of equipment, we devised an alternative method in which we use the acceleration sensors integrated within smartphones as accelerometers. For this research, we used as national regulations source the RNE in its sections E.020, E.030, E.060 and E.100, and references to other studies in Colombia, Ecuador, China and Japan. In conclusion, we proved that it is possible to match the behavior of the scaled model to both the mathematical models we used and the simplifications of seismic analysis recommended for bamboo structures. We also observed that the concrete column fulfills its function of handling the excessive weight and that a bamboo structure placed sideways helps strengthen the building against earthquakes.

Keywords: dynamic analysis, structural bamboo reinforced concrete, earthquake resistant, scale test

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo cohesionar la seguridad del diseño convencional con el diseño sustentable y sostenible investigando el comportamiento dinámico combinado de estructuras fabricadas con bambú estructural y concreto armado ante los sismos. Se realizaron dos tipos de análisis: 1) Análisis dinámico teórico considerando las propiedades combinadas del bambú y concreto armado presentes en la estructura mixta. 2) Análisis dinámico real a escala mediante la utilización de un simulador de aceleraciones sísmicas o mesa vibratoria, normalizada por la UCIST (the University Consortium on Instructional Shake Tables). Para la medición de la respuesta de la estructura, normalmente se utiliza uno o más acelerómetros ubicados en cada piso del edificio de prueba, los cuales registran el comportamiento dinámico real del modelo. Para este caso ya que todavía no se contaba con estos accesorios (acelerómetros) se ideó un método alternativo que consistió en utilizar el sensor de aceleraciones integrado dentro de los equipos conocidos como "Smartphone" como un acelerómetro. Para esta investigación se utilizó como fuente normativa nacional el RNE en sus secciones E.020, E.030, E.060 y E.100 y referencias de investigaciones en Colombia, Ecuador, China y Japón. Como conclusión se logró comprobar la concordancia del modelo a escala con los modelos matemáticos utilizados y simplificaciones de análisis sísmicas recomendadas para el bambú. También se observó que la columna de concreto armado cumple su función de soportar correctamente el peso excesivo y la estructura de bambú colocado lateralmente cumple la función de rigidizar el edificio ante sismos, con arriostres laterales.

Palabras Claves: análisis dinámico, bambú estructural, concreto armado, diseño sismo resistente, prueba a escala

* eduardomecatronic@hotmail.com

Introducción

En los últimos años han ocurrido eventos sísmicos de múltiples orígenes y en muchas partes del mundo, que dejan en evidencia y refuerzan la necesidad constante de diseñar nuestras construcciones considerando estos eventos, más aún tomando en cuenta la condición del Perú como país sísmico. A esto se suma el planteamiento y búsqueda de sistemas alternativos de construcción, por motivos de sostenibilidad y sustentabilidad, además de los económicos “The Anatomy of Bamboo Culms”. Liese (1998). Como por ejemplo el sistema de construcción con adobe y bambú. De estos dos sistemas, particularmente el más recientemente incluido en el RNE (Reglamento Nacional de Edificaciones 2012) es el de bambú estructural (*Gadua angustifolia*), el cual se separa de la madera por sus propiedades sobresalientes de relación peso-resistencia entre otros. A su vez por la novedad y uso minoritario en comparación con los sistemas predominantes en el Perú, cuenta con pocos estudios y normas respecto a su desempeño dinámico ante sollicitaciones sísmicas. De los sistemas predominantes el más utilizado estudiado y seguro en el Perú es el de Concreto Armado, el cual a su vez es uno de los más confiables para resistir los eventos sísmicos.

Se desconoce la factibilidad de construir estructuras de bambú y concreto armado de más de dos pisos puesto que la norma E.100 del RNE que concierne al bambú estructural, menciona que esta solo se refiere, regula y permite el diseño de edificaciones de hasta dos pisos hechos básicamente con bambú estructural y simplifica el análisis sísmico al uso de factores dependientes del tipo de cobertura y área techada “Reglamento Nacional de Edificaciones” de Vásquez (2013).

Se sabe que los ensayos a escala real son una de las formas más fiables de verificar el comportamiento dinámico de estructuras y una de las más costosas, por ende los ensayos a escala constituyen una forma alternativa para obtener estos resultados.

Los objetivos principales fueron:

- Investigar acerca del comportamiento dinámico combinado de estructuras fabricadas con bambú estructural y concreto armado ante los sismos.
- Demostrar la factibilidad de construir de forma segura una estructura (edificación) de tres pisos de bambú estructural con un mínimo uso de concreto armado.
- Establecer las consideraciones necesarias respecto a materiales, herramientas y aspectos teóricos para la realización de ensayos dinámicos con un simulador de aceleraciones a escala.

Se trabajó con la siguiente hipótesis: si se usa un material más resistente que el bambú como el concreto armado en una pequeña pero justa cantidad, entonces esta estructura mixta podrá construirse de más de dos pisos con un desempeño dinámico adecuado.

Método

Materiales

- Modelo físico a escala solo de bambú
- Modelo físico a escala de concreto armado y bambú
- Modelo teórico matemático computacional y/o matemático analítico
- Mesa vibratoria (Shake Table II)
- Sensor de aceleraciones (acelerómetro)

Procedimiento

1. Se fabricó un modelo a escala solo con bambú estructural semejante a una edificación básica de un piso y ensayó en una mesa vibratoria estandarizada, sometiéndola al movimiento de sismos conocidos a escala y con un sensor acelerómetro en el nivel superior para leer la respuesta de la estructura compuesta solo de bambú y comparar el gráfico de respuesta recibida con el gráfico del modelo matemático analítico para hacer los ajustes adecuados al material de bambú usado en los ensayos

- “Uniones Estructurales con Bambú (*Guaia Angustifolia*)” de Gutiérrez (2010).
2. Se construyó un modelo a escala con concreto armado y bambú, semejando a una edificación básica de tres pisos y se ensayó en la misma mesa vibratoria estandarizada sometiéndola al movimiento de sismos conocidos y a ondas aleatorias.
 3. Se compararon los resultados del modelo mixto de tres pisos con el modelo matemático analizado analítica y computacionalmente. Luego, finalmente, se evaluaron los resultados haciendo uso de parámetros, consideraciones constructivas y de las normas correspondientes.

Antes de seguir con los procedimientos enumerados definimos la Shake Table II como una mesa vibratoria normalizada a nivel internacional por la UCIST (The University Consortium on Instructional Shake Tables) “Advancing Earthquake Engineering Education through a Cooperative Effort Based on Instructional Shake Table” de Dyke, Johnson, Ranf, Caicedo y Soto-Fourier (s.f.), que básicamente sirve como un simulador de aceleraciones en una dirección sobre modelos a escala y es utilizada en muchos países desarrollados para investigaciones sobre vibraciones en estructuras.

Básicamente, el equipo reproduce movimientos vibratorios como sismos y otros, de forma reducida y mediante acelerómetros colocados en la estructura se obtiene la respuesta de esta.

En nuestro caso, se contó con el equipo Shake Table II, pero no con los sensores (acelerómetros), por lo que para esta investigación se utilizó una tecnología alternativa que consistió en utilizar el Smartphone, haciendo uso del sensor de aceleraciones interno, el cual mediante un software llamado “Vibration Monitoring” registró sus señales como acelerómetro y los exportó con extensión .txt y formato similar al de un acelerómetro comercial.

Para utilizar esta tecnología fue preciso ha-

cer las verificaciones de precisión respectivas. Según especificaciones de la aplicación en tecnología Android, el sensor posee:



Figura 1. Smartphone con el software Vibration Monitoring instalado

Resolución = 0.038 m/s²

Δt = 0.022 s (valor promedio)

Estos valores son adecuados tomando en cuenta que un acelerómetro estándar posee:

Δt = 0.020 s

Con estos datos, efectuamos los ensayos de verificación de precisión: colocamos y fijamos el equipo sobre la mesa sísmica, de tal forma que la lectura del Smartphone sea la del mismo sismo, por ende, los datos registrados deben tener coincidencia con los ingresados en la Shake Table II.

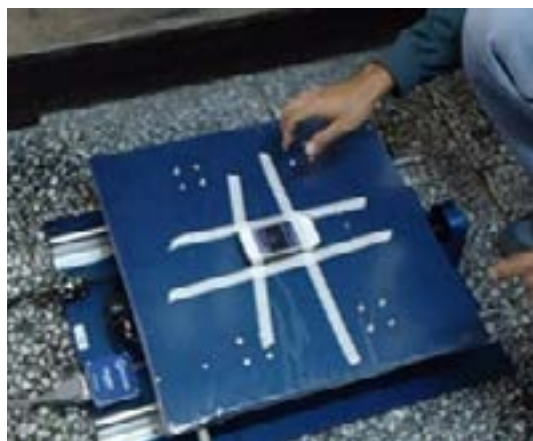


Figura 2. Verificación de precisión del sensor acelerómetro del Smartphone

Prueba 1. Sismo de Kobe

Los datos de ambos (Shake table II y Smartphone) se importaron a un Excel y se hizo el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 1
 Datos sismo de Kobe

			FACTOR DE ESCALA $k =$				1.20
DATOS SHAKE TABLE II			DATOS SMARTPHONE				
$\ddot{a}X_s$	Δt (s)	T (s)	$(\ddot{a}X) \cdot (k)$	Δt (ms)	Δt (s)	T (s)	$\ddot{a}X$
-1.14E-07	0.02	0.00	0	0		0.00	0.00E+00
-1.00E-07	0.02	0.02	-6.12E-04	23	0.023	0.02	-5.10E-04
-1.06E-07	0.02	0.04	-5.10E-04	24	0.024	0.05	-4.25E-04
-1.03E-07	0.02	0.06	2.96E-03	23	0.023	0.07	2.46E-03
-1.05E-07	0.02	0.08	2.65E-03	23	0.023	0.09	2.21E-03
-1.06E-07	0.02	0.10	2.34E-03	24	0.024	0.12	1.95E-03
-1.08E-07	0.02	0.12	2.14E-03	31	0.031	0.15	1.78E-03
-1.14E-07	0.02	0.14	-1.53E-03	24	0.024	0.17	-1.27E-03
-7.37E-08	0.02	0.16	-4.89E-03	23	0.023	0.20	-4.08E-03
-7.17E-08	0.02	0.18	-4.38E-03	23	0.023	0.22	-3.65E-03
-6.33E-08	0.02	0.20	-3.98E-03	24	0.024	0.24	-3.31E-03
-5.99E-08	0.02	0.22	0.00E+00	23	0.023	0.27	0.00E+00

La Tabla 1 contiene 3900 elementos con $\Delta t = 0.022$ s (intervalo de tiempo aproximado), luego se grafican y comparan.



Figura 3. Gráfico de los datos de aceleraciones del sismo de Kobe, que reprodujo la Shake Table II

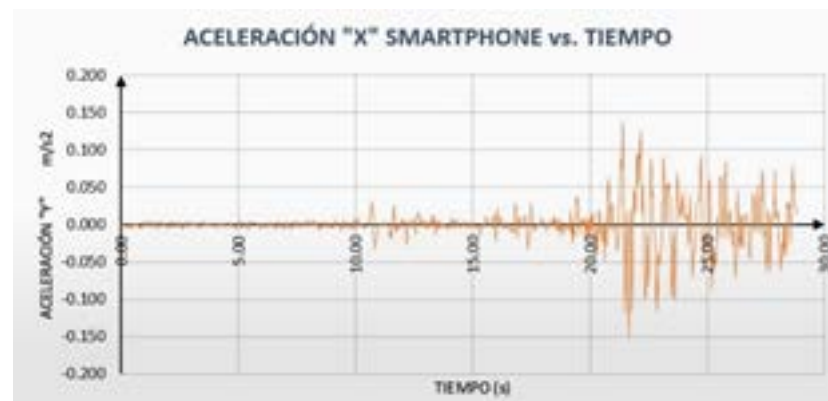


Figura 4. Gráfico de aceleraciones registradas y entregadas por el Smartphone

Con lo que podemos observar una lectura aceptable, tomando en cuenta que el primero son los datos matemáticos exactos ingresados a la Shake Table II.

Prueba 2. Onda Seno: $A=1.5\text{cm}$, $f=2\text{Hz}$

A = Amplitud f = Frecuencia

De forma similar se colocan los datos de ambos en cuadro comparativo:

Tabla 2

Datos de aceleración vs. tiempo producidos por una Onda Seno

DATOS SHAKE TABLE II			DATOS SMARTPHONE				FACTOR DE ESCALA $k =$
ΔX_s	Δt (s)	T (s)	$(\Delta X).(k)$	Δt (ms)	Δt (s)	T (s)	ΔX
-6.75E-01	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00E+00
-1.32E+00	0.02	0.02	-3.80E-02	23	0.023	0.02	-3.80E-02
-1.83E+00	0.02	0.05	-3.80E-02	24	0.024	0.05	-3.80E-02
-2.18E+00	0.02	0.07	-3.80E-02	23	0.023	0.07	-3.80E-02
-2.36E+00	0.02	0.09	0.00E+00	23	0.023	0.09	0.00E+00
-2.27E+00	0.02	0.12	0.00E+00	24	0.024	0.12	0.00E+00
-1.97E+00	0.03	0.15	0.00E+00	31	0.031	0.15	0.00E+00
-1.51E+00	0.02	0.17	0.00E+00	24	0.024	0.17	0.00E+00
-9.27E-01	0.02	0.20	0.00E+00	23	0.023	0.20	0.00E+00
-2.38E-01	0.02	0.22	-3.80E-02	23	0.023	0.22	-3.80E-02
4.44E-01	0.02	0.24	-3.80E-02	24	0.024	0.24	-3.80E-02
1.11E+00	0.02	0.27	-3.80E-02	23	0.023	0.27	-3.80E-02
1.71E+00	0.02	0.29	-3.80E-02	24	0.024	0.29	-3.80E-02

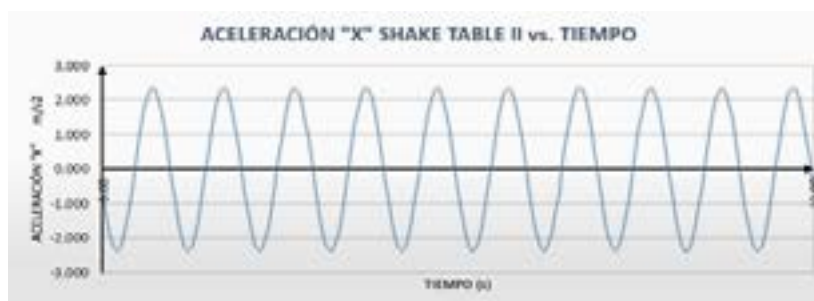


Figura 5. Gráfico de aceleraciones, matemáticamente de una Onda Seno reproducidas por la Shake Table II



Figura 6. Gráfico de aceleraciones de respuesta leídas por el sensor (Smartphone), producidas por una Onda Seno

Con la cual determinamos la efectividad y desempeño aceptable de esta tecnología para el propósito establecido.

1. Modelo a escala solo bambú Construimos un prototipo básico (un piso) de una estructura con las siguientes características:
 - Diafragma rígido
 - Columnas de bambú empotradas

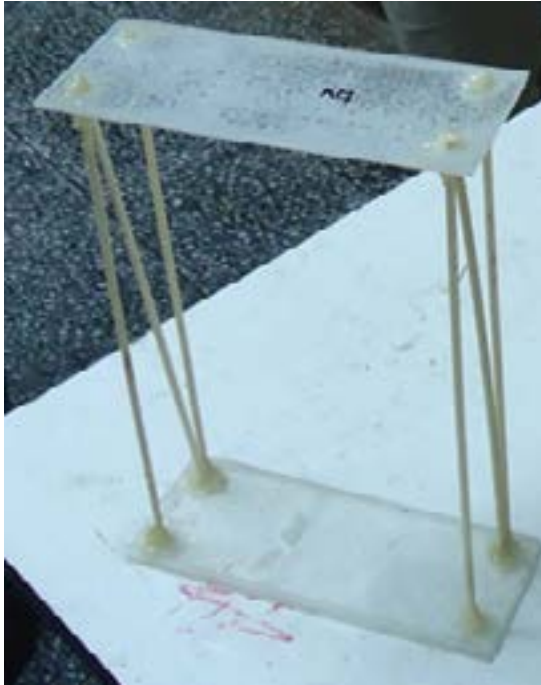


Figura 7. Prototipo de un piso, solo de bambú con piso rígido de acrílico

Para esto se usó láminas de acrílico rígido, palillos de bambú semejante a troncos de bambú escala 1/20, unidos con empotramiento mecánico y con resina epóxica.



Figura 8. Muestra de bambú utilizado



Figura 9. Prueba en Shake Table II

Esta prueba verificó la factibilidad de uso del bambú de muestra para los modelos a escala, ya que hay que acotar que el material es bambú, pero no es bambú estructural, con las características geométricas de una pieza real (interior hueco) “Manual de construcción sismo resistente de viviendas en Bahareque encementado” de Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2008). Para esto se utiliza como datos de partida los brindados por el RNE en su sección E.100:

Esfuerzo máximo de tracción = 160 kg/cm²

Módulo de elasticidad (prom.) = 95000 kg/cm²

Usando la ecuación dinámica:

$$m\ddot{U} + c\dot{U} + kU = F$$

Donde:

m = masa

c = amortiguamiento

k = rigidez

\ddot{U} = aceleración

\dot{U} = velocidad

U = posición

F = fuerza aplicada = $m \times g$

$$k = (12(\text{Mod.Elasticidad})I)/L^3$$

$$L = 22\text{cm}$$

$$m = 0.053\text{kg}$$

$$k = 0.25\text{ kg/cm}$$

Aplicando la ecuación general de Duhamel en su forma iterativa “Dinámica Estructural” de Paz, observamos el comportamiento real de la estructura con un amortiguamiento de 0.02 así:

Tabla 3

Cuadro iterativo de Duhamel

DATOS REFERENCIALES		VARIABLES SUSTITUIBLES		
w	2.1719	k	0.25	
WD	2.171426798	Δt	0.02	
T	2.892995771	E	0.02	
TD	2.893574544	m	0.053	
RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA				
EXITACIÓN DEL SUELO		RELATIVO AL SUELO		ABSOLUTO
TIEMPO	ACELERACIÓN	POSICIÓN	VELOCIDAD	ACELERACIÓN
t	\ddot{u}	Y	V	A(abs.)
0	6.1740	0.0000	0.0000	0.0000
0.02	3.5672	-0.0011	-0.0973	0.0135
0.04	0.9702	-0.0035	-0.1422	0.0291
0.06	4.1944	-0.0068	-0.1931	0.0488
0.08	7.4284	-0.0117	-0.3081	0.0819

E = Amortiguamiento



Figura 10. Respuesta esperada de la estructura mediante cálculo matemático de aceleraciones sísmicas por el método de Duhamel

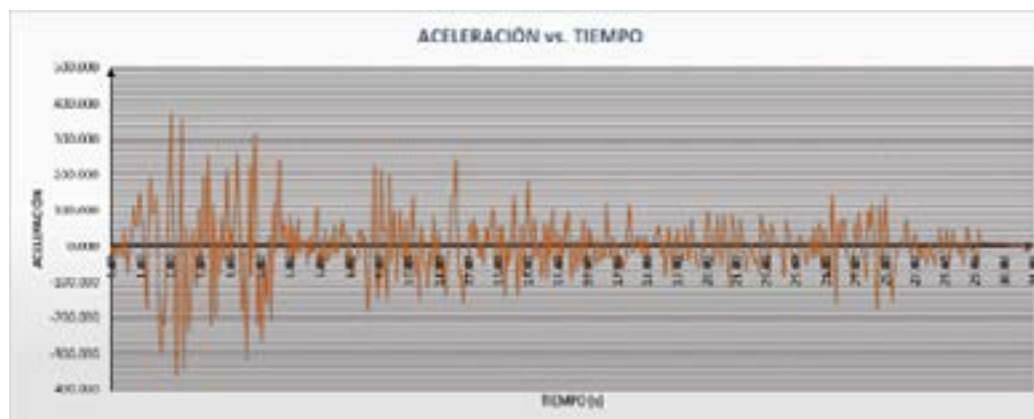


Figura 11. Respuesta real leída por el sensor (Smartphone)

2. Modelo de concreto armado y bambú

Para este caso ya se conoce un poco del comportamiento del bambú de los ensayos anteriores y este fue el modelo central de esta investigación, el cual tiene las siguientes características:

- Materiales principales: bambú y concreto armado
- Escala del modelo: 1/20
- Tipo: Edificación básica
- Niveles: 3
- Altura real equivalente de entrepiso: 3 m

Al inicio se creó el diseño en Autocad, con un área equivalente a 4m x 5m y básicamente conformado con una columna central de concreto armado y el resto de la estructura de bambú.

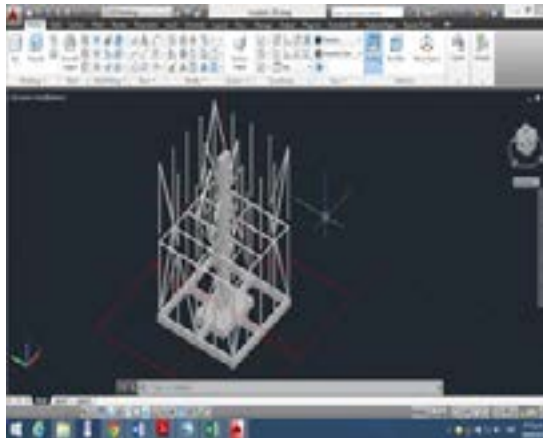


Figura 12. Modelado 3D de la estructura a escala

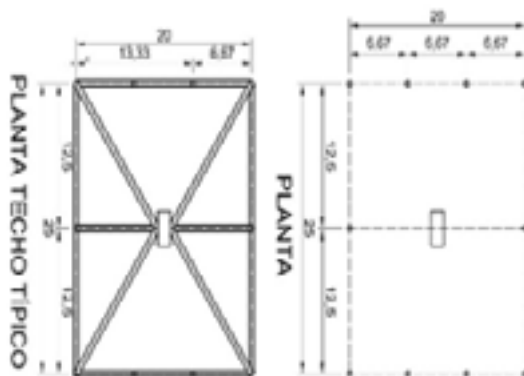


Figura 13. Plano planta y techo

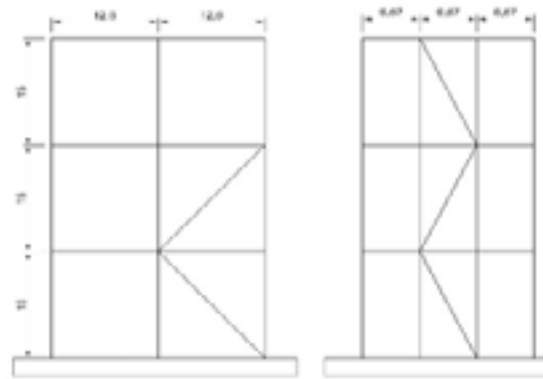


Figura 14. Plano elevaciones laterales

De tal manera que la columna de concreto armado funcione como soporte de cargas de gravedad que normalmente no soportaría una estructura de bambú de más de dos pisos. Además la estructura de bambú lateral se colocó de forma adecuada y brindó la resistencia a las cortantes sísmicas que se requería.



Figura 15. Armadura de columna y losa a escala

Como se puede ver en la Figura 15, la parte de la estructura correspondiente al concreto armado está compuesta por una losa de cimentación y una columna. El diseño real equivalente corresponde a una columna principal de una edificación de tres niveles con carga de gravedad (viva + muerta) repartida de 1000kg/m², en la que:

Sección real equivalente: 0.3m x 0.6m
 $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

El módulo de elasticidad para el concreto armado es el siguiente:

$$E=15000\sqrt{f'c}=217370 \text{ kg/cm}^2$$

El acero usado es alambre N°16 asemejando al acero principal, pero con una fluencia menor: $f_y = 3800 \text{ kg/cm}^2$

Para el estribado se utilizó el metal de clips.

Para la losa de cimentación, en realidad se optó por esta en lugar de utilizar una base de otro material rígido donde colocar los sobrecimientos de bambú, además de poder empujar de una manera más real la columna a la base, que a su vez debe tener puntos rígidos de sujeción a la base de la Shake Table II.



Figura 16. Tamizado o separación de los agregados para una correcta proporción granulométrica en el diseño de la mezcla de concreto.



Figura 17. Vaciado de la mezcla sobre la columna

Es importante tomar en cuenta las consideraciones del material concreto armado a la hora del escalado para obtener la misma resistencia. Esto se consiguió tamizando arena gruesa y confitillo, usando un diseño con 0.6 relación agua/cemento y 1/1/1 en cemento tipo I, agregado fino (tamaño de 1mm) y agregado grueso (tamaño 3mm).

Se tuvo que curar en agua tibia para acelerar la resistencia final que se diseñó para 210kg/cm².



Figura 18. Curado o hidratación luego de quitado los moldes de estructura de concreto armado, para obtener una buena resistencia del concreto.

En la columna, previo al vaciado se colocó clavos de acero tal como se ve en la Figura 18, para que sirvan como soportes de cada piso y también en medio de cada piso para recibir alguna posible carga del piso en una modificación del diseño original.

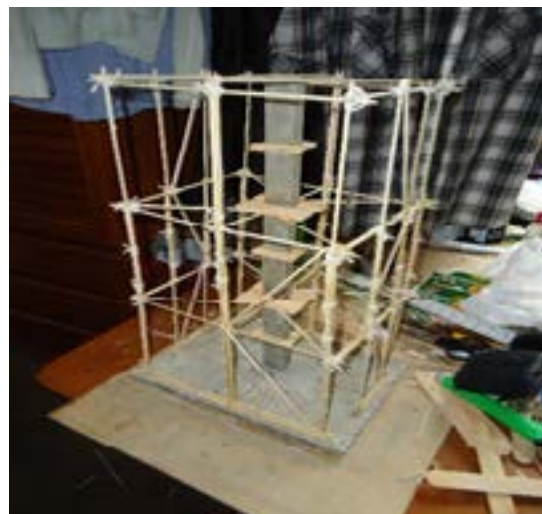


Figura 19. Estructura mixta Bambú-Concreto Armado

Prueba sísmica

Este modelo a escala de composición mixta de bambú y concreto armado se sometió a dos tipos movimientos:

- Sismo de Kobe
- Ondas seno:

Onda 1: $A=2\text{cm}$, $f=3\text{Hz}$

Onda 2: $A=2\text{cm}$, $f=2\text{Hz}$

Onda 3: $A=2\text{cm}$, $f=1\text{Hz}$

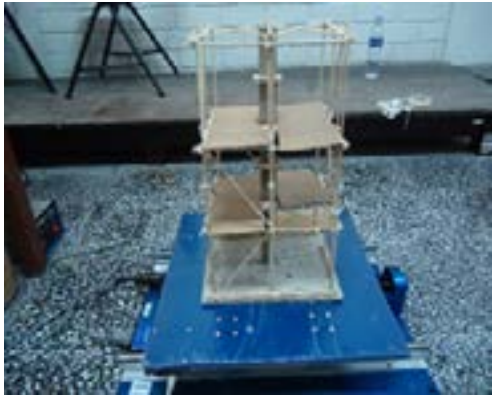


Figura 20. Colocación y fijación mediante pernos, de la estructura mixta a escala sobre la Shake Table II para la prueba dinámica

Este modelo se probó con una carga de gravedad (muerta + viva) superior que para una estructura de bambú convencional ($250\text{kg}/\text{m}^2$) que fue de $800\text{ kg}/\text{m}^2$, tomando en cuenta que el área equivalente es de $5 \times 4 = 20\text{ m}^2$, el peso del piso sería de 16000 kg (depósito) “Reglamento Nacional de Edificaciones” de Vásquez (2013), que escalado $1/20$ como es masa, depende directamente del volumen que sería la escala al cubo, entonces:

$$\text{Peso escalado} = \frac{16000}{20^3} = 2\text{ kg}$$

Por lo que se le colocan dos bolsas de cemento de 1 kg c/u :

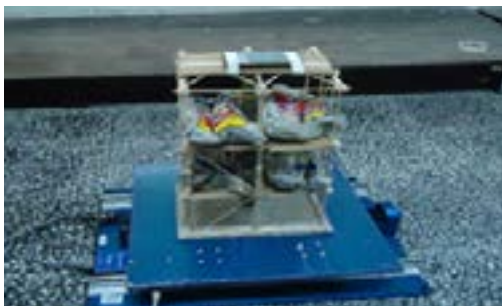


Figura 21. Edificio cargado en cada piso con bolsas de cemento que asemejan la carga o peso por piso de una edificación

Prueba sismo de Kobe

Se realizó previamente la calibración requerida para compatibilizar resultados. El Smartphone entrega datos reales, más el sismo que envía la Shake Table II está escalado, puesto que tiene un rango máximo de amplitud de $3''$ o 7.5 cm .

Para el escalamiento de sismos hay varios procedimientos y métodos, mas como ahora no es motivo de estudio principal, el más simple de ellos es escalar las aceleraciones hasta acercar los valores picos de las aceleraciones del acelerómetro y de la Shake Table II “Advancing Earthquake Engineering Education through a Cooperative Effort Based on Instructional Shake Table” de Dyke, Johnson, Ranf, Caicedo y Soto-Fourier (s.f.).

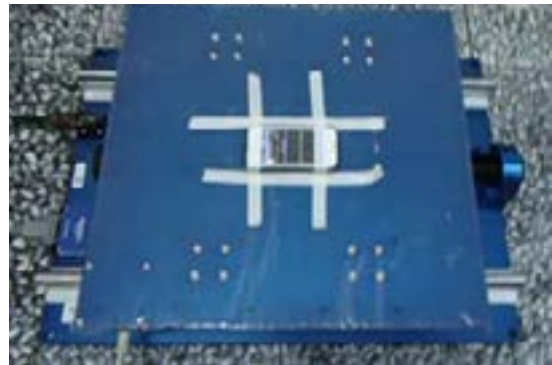


Figura 22. Calibración previa de lectura del Smartphone utilizado como acelerómetro

Luego de esto se colocó el Smartphone en el nivel más alto y se realizó la prueba sísmica de la estructura mixta, aplicando el sismo de Kobe. Sabiendo que la gráfica del sismo de Kobe es la siguiente:

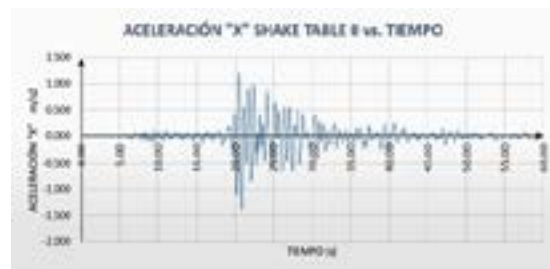


Figura 23. Gráfica de las aceleraciones del sismo de Kobe en m/s^2

Luego de la prueba sísmica, se obtuvo el siguiente gráfico de aceleraciones:

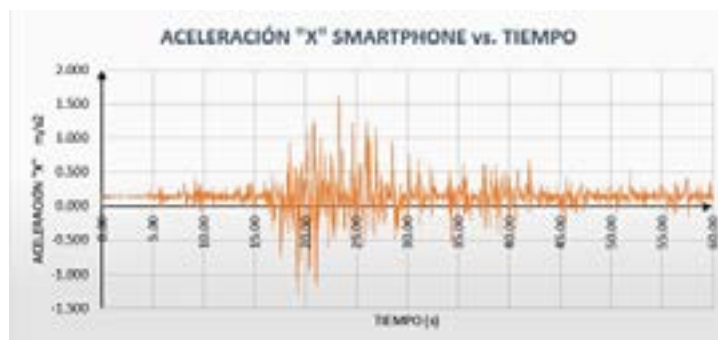


Figura 24. Respuesta de las aceleraciones de la estructura en el 3er nivel

Luego, restando las aceleraciones:

$$a \text{ (piso 3)} - a \text{ (base)} = a \text{ (relativa)}$$

Con lo que obtenemos una aceleración relativa al piso o base, luego como sabemos que la aceleración es la derivada de la velocidad y esta la derivada de la posición respecto del tiempo, integramos por medio de iteraciones “Dinámica Estructural” de Paz (2002), obteniendo el siguiente cuadro:

Tabla 4

Datos de integraciones de aceleración

DATOS SMARTPHONE						
T (s)	\ddot{a}_X		$\Delta \ddot{a}$	Δv	Δd (m)	Δd (cm)
0.00	0.00E+00		1.12E-06	0.001836	6.06E-05	6.06E-03
0.02	1.53E-01		1.53E-01	0.00321	7.54E-05	7.54E-03
0.05	1.15E-01		1.15E-01	0.003076	8.09E-05	8.09E-03
0.07	1.53E-01		1.53E-01	0.003962	9.31E-05	9.31E-03
0.09	1.92E-01		1.92E-01	0.004134	9.18E-05	9.18E-03
0.12	1.53E-01		1.53E-01	0.003519	7.89E-05	7.89E-03
0.14	1.53E-01		1.53E-01	0.003344	7.33E-05	7.33E-03
0.17	1.15E-01		1.15E-01	0.002519	5.91E-05	5.91E-03
0.19	1.15E-01		1.15E-01	0.002858	6.98E-05	6.98E-03
0.21	1.34E-01		1.34E-01	0.003216	7.82E-05	7.82E-03
0.24	1.34E-01		1.34E-01	0.003301	8.02E-05	8.02E-03
0.26	1.53E-01		1.53E-01	0.003672	8.63E-05	8.63E-03

Obteniendo las velocidades y desplazamientos relativos del 3er nivel de la estructura mixta.

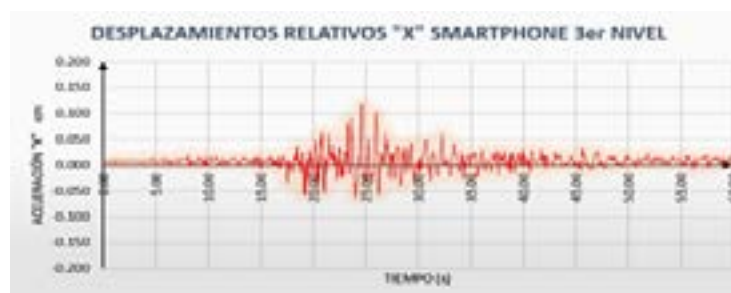


Figura 25. Gráfico de desplazamientos relativos

Con estos datos tenemos que el desplazamiento relativo máximo es de 0.115 cm, pero como está en escala 1/20, sería de 2.3cm.

Asumiendo el caso crítico más crítico de que esta deriva represente la deriva de entrepiso, es decir este desplazamiento relativo se compare con la altura de entrepiso 3m (menos favorable) y no con la altura total 9m (más favorable); la altura de entre piso equivale a 300cm, la deriva sería: $2.3/300 = 7.6/1000$. Lo cual es admisible para una estructura de bambú o madera, según norma 10/1000, pero no para una de concreto armado que es de 7/1000 “Reglamento Nacional de Edificaciones” de Vásquez (2013).

Conclusiones

Se consiguió verificar el valioso uso de la tecnología Smartphone con Android para investigaciones de este tipo.

Además de lo observado en los videos del último ensayo, la columna de concreto armado cumple la función de soportar correctamente el peso excesivo y la estructura de bambú colocada lateralmente cumple la misión de rigidizar el edificio ante sismos con arriostres laterales. La estructura mixta a escala logró soportar las dos cargas dinámicas que se le ensayó, una de sismo real y otra de una onda de seno de frecuencias variables: 4Hz, 3Hz, 2Hz y 1Hz.

Con estos últimos resultados podemos evidenciar que esta estructura mixta actúa superior a una estructura solo de bambú estructural, y que le falta muy poco para alcanzar una deriva aceptable a la de una estructura de concreto armado como indica la norma peruana.

Esta investigación no es aún suficiente para definir con certeza la seguridad de estructuras mayores de dos pisos como limita la norma actual en Perú. Sin embargo, es necesario obtener ensayos que establezcan límites para la

gran cantidad de combinaciones en lo que respecta a formas y tipos globales de estructuras mixtas, así como a la forma de combinarlos.

Este trabajo se presentó de la siguiente forma:

- Combinación del bambú y concreto de forma separada
- Diseño tipo Árbol, con una columna central de concreto armado (“tronco”) y arriostres laterales que le dan estabilidad ante los sismos.
- Las plataformas fueron de soporte central de forma que:
Carga Grav. Concreto = 50%
Carga Grav. Bambú = 50%
- Para este primer ensayo a escala de edificación, se consideraron las propiedades generales del bambú y del concreto, mas durante el ensayo es importante calcular los efectos que el esfuerzo cortante le genera al bambú normal, las fuerzas que soporta según el siguiente orden:
 - a. Fuerzas axiales, son soportadas de manera eficiente y sobresaliente.
 - b. Fuerzas cortantes, separan las fibras las cuales no tienen mucha adherencia transversal debido a que las fibras son en dirección recta en su mayoría y casi no se entrelazan.
 - c. Fuerzas de flexión, soporte relativamente adecuado siempre que estén correctamente reforzadas (estribos) las zonas críticas de corte.

Esto tras observar el estado del material de columnas laterales y vigas de bambú más fatigado y con mayores daños que el bambú colocado para cargas netamente axiales como los arriostres laterales inclinados.

Esto se comprobó en un trabajo de investigación de la UPC-Rio en Río de Janeiro “Bam-

boo as reinforcement in structural concrete elements” de Khosrow (2005) en el que se indica la dificultad que existe para hacer trabajar correctamente al bambú natural con los esfuerzos cortantes.

También se indica la variedad de formas en que se puede utilizar el bambú, en este caso fue internamente dentro del concreto y con unión en toda la longitud del elemento como se puede apreciar en las siguientes figuras:



Figura 26. Vaciado de concreto ligero sobre mitades de bambú unidas transversalmente con tiras de bambú y ungidas en su interior con aditivo para adherirse mejor al concreto.

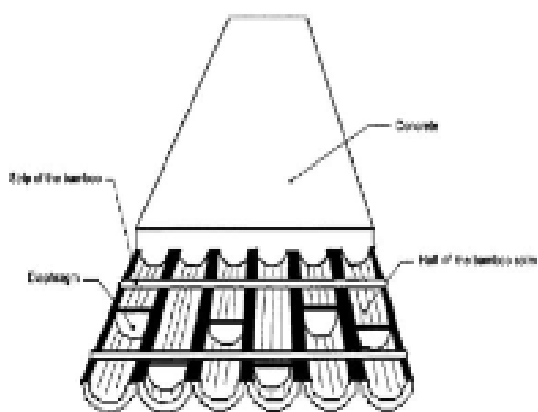


Figura 27. Estructura resultante, similar a una losa con el bambú colaborando a tracción debajo.

Se puede apreciar en la Figura 27 una losa que asemeja una “losa con acero colaborante”, pero en lugar del uso de acero está el bambú trabajando a tracción.

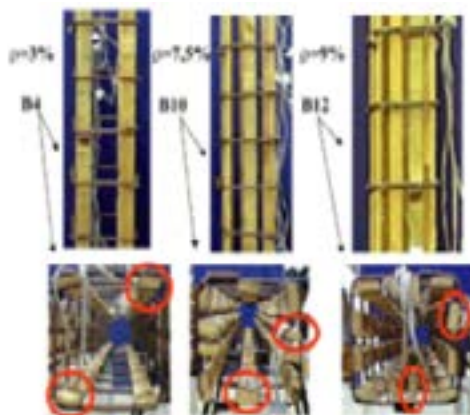


Figura 28. Listones de bambú verticales unidos transversalmente mediante estribos cuadrados (barras de acero dobladas alrededor y transversal a las piezas principales).

Igualmente se ve otras figuras donde se diseñan columnas con refuerzo interno de bambú estructural, en forma de trozos longitudinales de las cañas enteras.

Estos diseños de la investigación de referencia se ensayaron para esfuerzos estáticos individuales; pero requieren además, mayor atención para evaluar su desempeño durante los sismos.

El tema de estructuras mixtas de concreto armado y bambú recién se está trabajando con el análisis exhaustivo formal que se requiere para garantizar su correcto funcionamiento en las diferentes estructuras de las que puede formar parte “Proyecto: Iglesia De La Compañía De Jesús” (s.f.). Por ende, hay una opción tangible a futuro para su aprovechamiento de forma eficiente, sostenible y más segura.

Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2008). *Manual de construcción sísmo resistente de viviendas en Bahareque encementado*. Colombia: AIS.
- Gutiérrez, S. (2010). Uniones Estructurales con Bambú (*Guadua Angustifolia*). (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Khosrow, G. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Revista Cement & Concrete Composites*, 27 (6), 637 – 649.
- Liese, W. (1998). *The Anatomy of Bamboo Culms*. Recuperado de <http://perubambu.org.pe/Publicaciones.php>
- Paz, M. (2002). *Dinámica Estructural*. (3 ed). España: REVERTÉ.
- Proyecto: *Iglesia De La Compañía De Jesús*. (s.f.). Recuperado de http://www.usmp.edu.pe/centro_bambu_peru.
- Dyke, S., Johnson, S., Ranf, R., Caicedo, J. y Soto-Fourier, M. (s.f.). *Advancing Earthquake Engineering Education through a Cooperative Effort Based on Instructional Shake Table*. Recuperado de <https://engineering.purdue.edu/UCIST/>
- Vásquez, O. (2013). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. (3 ed.). Lima: Oscar Vásquez SA.