LABORATORIO DE
ESTRUCTURAS ANTISÍSMICAS

PUCP

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE UN ENSAYO DINÁMICO DE SIMULACIÓN SÍSMICA –TRANSVERSAL AL PLANO-, EN SISTEMA "TABIQUE MUROMAX" ARRIOSTRADO A UN PÓRTICO DE C.A.; Y DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS DE FLEXIÓN Y CORTE

INFORME TÉCNICO DE RESULTADOS: INF-LE 235-17 y INF-LE 235-17(A)

SOLICITANTE: **GENERACIÓN DE TÉCNICAS INNOVADORAS PARA LA CONSTRUCCIÓN S.A.C. (GEINCO)**
Carretera Panam. Sur km 37.2 Mz. D, Lt.02, Lurín– Lima

PROYECTO: **CONTROL DE CALIDAD**

FECHA: **15 DE MARZO DE 2018**

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ Laboratorio de Estructuras Antisismicas

Ing. Wilson Silva Berríos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Av. Universitaria 1801, San Miguel
T: 51-1 626-2000 anexo 4640
F: 51-1 626 2089
ledi@pucp.pe

www.pucp.edu.pe

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE UN ENSAYO DINÁMICO DE SIMULACIÓN SÍSMICA –TRANSVERSAL AL PLANO-, EN SISTEMA "TABIQUE MUROMAX" ARRIOSTRADO A UN PÓRTICO DE C.A.; Y DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS DE FLEXIÓN Y CORTE

INFORME TÉCNICO DE RESULTADOS: INF-LE 235-17 y INF-LE 235-17(A)

1. GENERALIDADES

La empresa GENERACIÓN DE TÉCNICAS INNOVADORAS PARA LA CONSTRUCCIÓN S.A.C (GEINCO), ha contratado los servicios del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas – PUCP, para realizar Ensayos de Simulación Sísmica -Transversal al Plano- en un *Tabique* prefabricado de un piso -hecho de paneles de poliestireno expandido y concreto lanzado-, denominado "*Sistema Aligerado MUROMAX*", a escala natural -arriostrado en sus bordes perimetrales- a un pórtico de concreto armado, anclado a la plataforma del simulador de sismos en su base (viga de cimentación). Además, se realizaron Ensayos Mecánicos individuales (Flexión y Corte) de los elementos componentes del sistema.

En el presente documento se presentan el análisis de los ensayos y la interpretación de los resultados obtenidos de un ensayo de simulación sísmica perpendicular al plano del tabique (INF-LE 235-17 y de los ensayos mecánicos INF-LE 235-17(A), realizados en la PUCP en el año 2017.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN DE ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA, PROCEDIMIENTO DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN

Las características geométricas del "Tabique *MUROMAX*" están descritas y se ilustran gráficamente en el acápite 4 de la Ref. 1. En resumen, el tabique es de 2.40m de altura, 2.50m de largo y 0.12m de espesor total. La característica relevante es que el "Tabique" está arriostrado a un pórtico de concreto armado cuyas columnas y viga superior son de 25 x 25cm de sección transversal, mediante dowells o conectores de acero, propias del sistema.

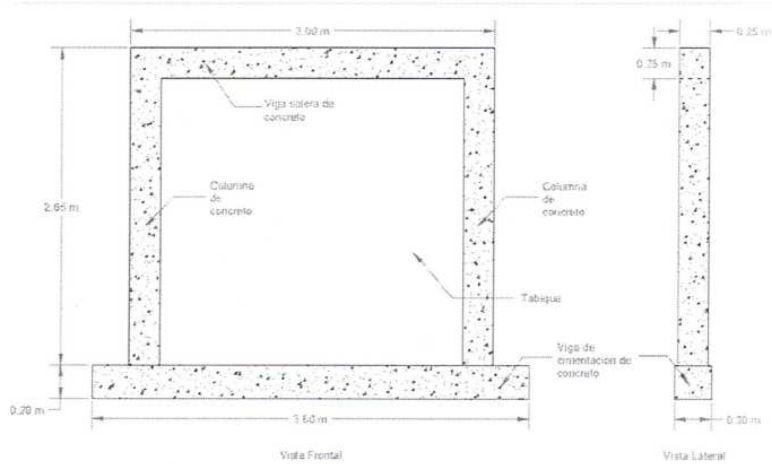


Figura 1: Características geométricas del Tabique arriostrado a un Pórtico de Concreto Armado

La base del pórtico (viga de base) va fija a la plataforma del simulador. Los paneles interiores (prefabricados) -de 10cm de espesor-, que conforman el "Tabique", están compuestos por un núcleo de poliestireno, reforzados con mallas electro-soldadas por ambas caras. Estos paneles interiores

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

fueron cubiertos por concreto lanzado por ambas caras -a manera de tarrajeo-, que le incrementa el espesor y la masa del espécimen.

El Ensayo de Simulación Sísmica se ha realizado en dirección perpendicular al plano del espécimen, es decir, de manera tal que la dirección del movimiento de la plataforma del simulador es perpendicular al plano del espécimen ("*Tabique*"), como lo muestra la Figura 2. El pórtico de concreto armado (considerado un marco rígido en este caso) fue arriostrado directamente a la plataforma del simulador de sismos, para restringir el movimiento relativo entre viga superior del pórtico y la plataforma de simulador, de manera que sólo el "*Tabique*" pueda vibrar transversalmente a su plano –arriostrado en sus bordes-, mostrando aparentemente un efecto bi-axial, cuando se active el simulador.

Según información recibida, el peso propio del Tabique de ensayo ("solo", sin pórtico de concreto armado) –medido en el Laboratorio- ha sido establecido en 1456Kg, lo que representa, una masa (peso) por unidad de área de 242.67 kg/m². Aun siendo alto, se considera este valor en el presente análisis.

La información del fabricante es que el peso del tabique tarrajeado es 140 kg/m², lo que para el espécimen de similares características de 2.40 x 2.50m, sería 840kg (aproximadamente el 73% menos que el considerado en el análisis de este documento).

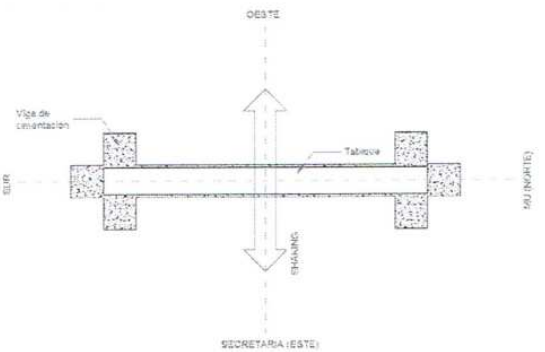


Figura 2: Dirección del movimiento "Shaking" para el Ensayo de Simulación Sísmica del "Tabique"

Procedimiento General del Ensayo Dinámico de Simulación Sísmica

El *Tabique* ha sido sometido a un Ensayo Dinámico de Simulación Sísmica unidireccional (ver fig.2), aplicándole solicitaciones sísmicas simuladas, a partir de una señal (registro sísmico) de comando de intensidad creciente, que corresponde a un sismo real, registrado previamente.

Fases de Ensayo

Las Fases de Ensayo (Desplazamiento **Do** y Aceleración **Ao**, máximas de la plataforma del simulador de sismos, correspondientes a desplazamientos nominales de la señal de comando del simulador de sismos de 30mm, 70mm y 120mm) se han definido en base a expectativas especulativas acerca del comportamiento de elementos no estructurales ("*Tabiques*") ante sismos de diferente tamaño, adicionalmente se aplicó una señal armónica de "barrido" (de frecuencia creciente entre {0 y 10 Herts}) para establecer parámetros dinámicos propios del Tabique (especialmente la frecuencia predominante del "*Tabique*"). Las tres fases de ensayo, representan características de intensidad de sismos que van desde Sismos Leves/Moderados (Fase 1) y Muy Severos (Fase 2 y 3). Para todas las fases, se ha utilizado la misma forma de la señal sísmica de comando para el simulador de sismos -

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

incrementándose la amplitud del movimiento secuencialmente en cada fase-, de tal modo de simular sismos de intensidad creciente que sean representativos de los sismos frecuentes, ocasionales, raros y muy raros, o equivalentemente, a sismos leves, moderados, severos y muy severos.

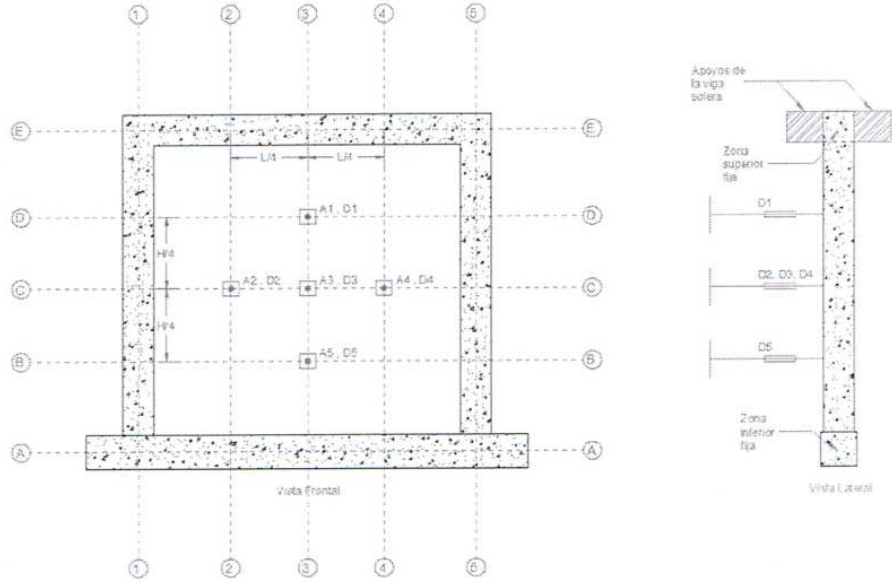
Antes y después de cada fase -siguiendo la técnica de ensayos dinámicos-, el *Tabique* ha sido sometido a ensayos de vibración libre (V.L.), consistentes en la aplicación de pulsos de pequeña amplitud en la mesa vibradora. El objetivo de esta prueba ha sido medir la variación de las propiedades dinámicas del *Tabique* (frecuencia y períodos -natural y amortiguado-, y el factor de amortiguamiento estructural del *Tabique*).

La "señal de comando" lo constituye un sismo real, registrado directamente en intervalo de tiempo real (digitalizada a un paso "Δt" original de 0.005), repetida o duplicada en su extensión (doble extensión en el tiempo de duración en el caso de las tres Fases 1, 2 y 3), según la fase de ensayo.

La señal (solicitación sísmica) ha sido derivada del registro del sismo de 31 de mayo de 1970, captado en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), correspondiente a las condiciones de suelo de la ciudad de Lima (grava densa), que constituye una de las señales sísmicas peruanas con mayor poder destructivo. La componente N82E de esta señal (*f=3.22 Hz*) es la que, escalada a la máxima amplitud deseada de cada fase y repetida o duplicada en su extensión, se utilizó en cada una de las tres fases de simulación sísmica.

Instrumentación

En el acápite 5.1.4 de la Ref.1, se describe e ilustra la instrumentación utilizada y la función de cada instrumento, en el ensayo de simulación sísmica. Así, se han colocado doce (12) instrumentos: seis (6) transductores (sensores) de desplazamiento lineal (LVDT's), seis (6) de aceleración horizontal (acelerómetros) ubicados en lugares específicos y un medidor de presión del actuador dinámico (**ΔP**), que permitieron medir o registrar tanto la solicitación sísmica de entrada (**Ao**, **Do**, **Fa**), como la respuesta estructural del espécimen (**A1** a **A5** y **D1** a **D5**). La ubicación de los instrumentos, se detalla esquemáticamente en la Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-3.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Figura ***¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.****-3: Instrumentación del "Tabique" – (Acelerómetros Ai y/o Sensores de Desplazamiento LVDT (Di), en las diferentes posiciones indicadas).*

3. ENSAYOS MECÁNICOS DE FLEXIÓN Y DE CORTE, DE COMPONENTES PRE-FABRICADOS DE CONCRETO – "TABIQUE MUROMAX"

Se presentan los esquemas de ensayo y el resumen de los resultados obtenidos, tanto de la resistencia a la tracción por flexión, como de la resistencia al corte -medidos en ensayos de flexión pura y de compresión diagonal-, respectivamente.

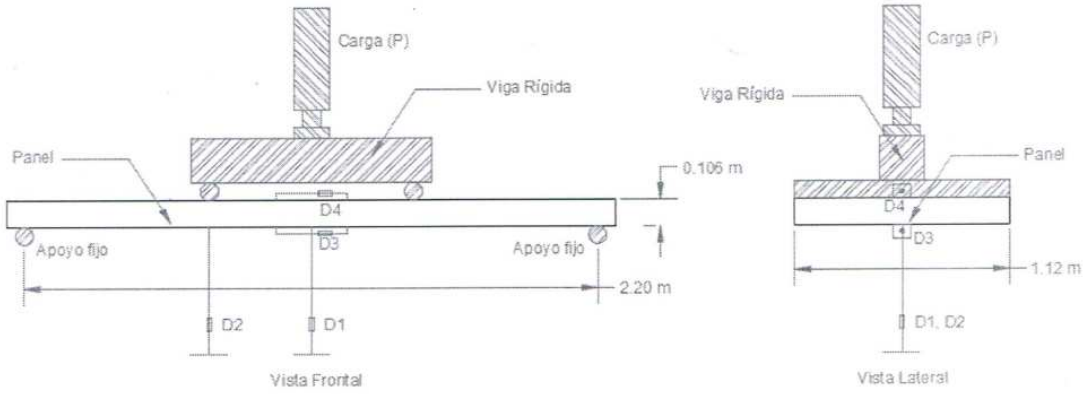


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-4: Panel en el Ensayo de Flexión Simple

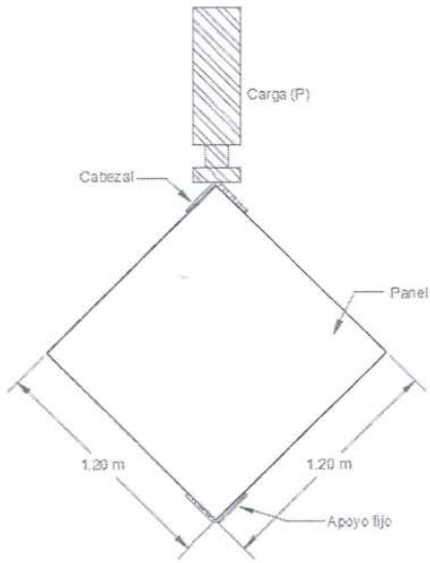


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-5: Panel en el Ensayo de Compresión Diagonal

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

RESUMEN: ENSAYO DE FLEXIÓN PURA EN PANEL
TABIQUE GEINCO

Espécimen	Dimensiones (mm)				P_{1-P}	$\Delta 1_{1-P}$ en Lo/2	$P_{Máx}$	$\Delta 1_{Máx}$ en Lo/2	$\Delta 2_{Máx}$ en Lo/3	$\Delta 3_{Máx}$ fibra inf.	$\Delta 4_{Máx}$ fibra sup.	$M_{Máx.}$	$R_{Máx.}$
	A	t	L	L_o	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kN-m)	(MPa)
Panel 01	1120	106	2400	2200	6.264	24.633	8.101	100.371	54.612	1.109	0.806	2.971	1.416

donde:

A, t, L y L_o	Ancho del panel ensayado
P_{1-P}	Carga asociada a la fluencia del espécimen (definido como el primer pico en el Gráfico P-D)
$P_{Máx}$	Carga máxima alcanzada por el espécimen
$\Delta 1_{1-P}$	Deflexión asociada a la fluencia del espécimen, medida en el centro de la Luz entre apoyos
$\Delta 1_{Máx}$	Deflexión máxima asociada a la carga máxima, medida en el centro de la Luz entre apoyos
$M_{Máx.}$	Momento flector máximo alacanzado por el espécimen
$R_{Máx.}$	Resistencia máxima a la tracción por flexión (en la fibra extrema)
$\Delta 2_{Máx}$	Deflexión máxima, medida al tercio de la Luz entre apoyos (debajo de la zona de aplicación de la carga)
$\Delta 3_{Máx}$	Deformación máxima en la fibra inferior en racción (alargamiento)
$\Delta 4_{Máx}$	Deformación máxima en la fibra superior en compresión (acortamiento)

RESUMEN: ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN PANEL
TABIQUE MURO MAX (GEINCO)

Espécimen	Dimensiones (mm)				P_{1-P}	Δ_{1-P} diag.	$P_{Máx}$	$\Delta_{Máx}$ diag.	P_{Final}	Δ_{Final} diag.	$\tau_{Máx}$
	A	t	L	D	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN/m² = kPa)
Panel 01	1200	110	1200	1700	78.660	10.492	82.385	12.757	23.648	30.558	440.5613

donde:

A	Ancho del panel ensayado
t	Espesor total del panel ensayado
L	Longitud del panel ensayado
D	Longitud de la diagonal del panel ensayado
P_{1-P}	Carga asociada al primer pico
$P_{Máx}$	Carga máxima alcanzada por el espécimen
P_{Final}	Carga final alcanzada en el ensayo por el espécimen
Δ_{1-P}	Deformación diagonal global asociada al primer pico
$\Delta_{Máx}$	Deformación diagonal global máxima asociada a la carga máxima
Δ_{Final}	Deformación diagonal global final asociada a la carga final
$\tau_{Máx}$	Esfuerzo cortante máximo (referido al área de la sección diagonal "bruta")

Se aprecia que la resistencia a la tracción por flexión o Módulo de Rotura (**R**) es 1.416 MPa (ó 14.43 kg/cm²); y la Resistencia al Corte (τ) -medido en un ensayo de compresión diagonal-, es 440.5612 kPa (ó 4.49 kg/cm²).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

4. RESULTADOS - COMPORTAMIENTO OBSERVADO

a. RESULTADOS DE ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA: TABIQUE MUROMAX

El Anexo 1 del Informe de Resultados de Ensayo (Ref. [1]) en "Resultados Procesados", contiene los principales resultados procesados, obtenidos a partir del tratamiento numérico de los datos registrados durante todas las fases del ensayo de simulación sísmica [cuatro (4) etapas de Vibración Libre "V.L." y tres (3) Fases de simulación propiamente dichas], reportadas por el Laboratorio.

A partir de la información registrada en la Fase 4 (Barrido de una solicitación armónica) se ha encontrado que la frecuencia fundamental de vibrar del Tabique es $\boldsymbol{f}$ = 7.645 Hertz (**T** = 0.131 seg), medido en el centro del Tabique (con el acelerómetro **A3**)

b. COMPORTAMIENTO OBSERVADO - PATRÓN DE FISURACIÓN

A juzgar por el estado final observado y por los resultados procesados de todas las Fases, el comportamiento del *Tabique* -en la primera fase del ensayo (Do=30mm, Ao = 0.3g)-, fue prácticamente elástico.

A partir de la segunda fase -(Do=70mm, Ao = 0.7g)-, el *Tabique* empezó a sufrir pequeñas variaciones en sus propiedades dinámicas, aunque estas variaciones no fueron significativas.

En la tercera fase -(Do=120mm, Ao = 1.20 g)-, se evidenció agrietamiento en los bordes perimetrales del *Tabique* (uniones o juntas entre Tabique-Pórtico) y en fisuras más finas en las juntas interiores entre paneles.

No se apreciaron evidencias de deterioro o daño visible localizado en los paneles, tampoco se apreció que el sistema estructural haya perdido estabilidad, pese al nivel de exigencia de la solicitación (exagerada e irreal, asociada a un sismo muy raro).

Finalmente, se auscultaron cuidadosamente las uniones (interfase tabique-pórtico) -en las zonas de las aristas-, para inspeccionar el estado de las uniones, las mismas que mostraron fisuración en los bordes perimetrales del *Tabique* y los elementos de arriostramiento de concreto armado (pórtico formado por columnas y vigas).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

5. ALGUNAS CONSIDERACIONES REGLAMENTARIAS (SEGÚN E030)

El riesgo sísmico en Perú –según la Norma Peruana Sismorresistente E030-, está definida por la zonificación sísmica, que establece para cada una de las cuatro zonas sísmicas, el nivel de amenaza en términos de aceleraciones máxima horizontal en suelo rígido (expresado como fracción de la gravedad) que podría desarrollarse, cuantificada como el parámetro "**Z**" en el macizo rocoso, mostrado a continuación:

Mapa de Zonificación sísmica Norma E.030-2016

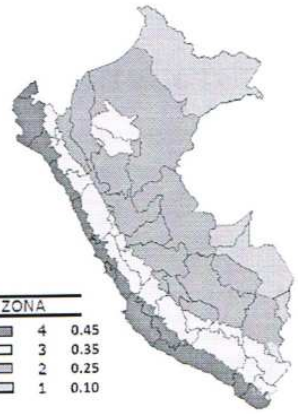


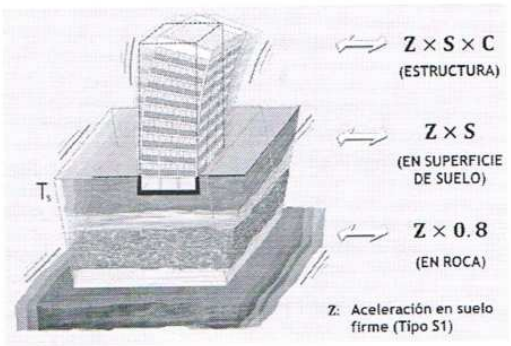
Tabla N° 1 FACTORES DE ZONA "Z"	
ZONA	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

La micro zonificación sísmica y estudios de sitio (parámetro "**S**" de E030), permiten establecer los efectos locales a partir de las condiciones geotécnicas y perfiles de suelo, que podrían amplificar las solicitaciones sísmicas, modificando el parámetro "**Z**", es decir, la aceleración de entrada en la base de la cimentación de la edificación podría ser "**Z** x **S**".

- El factor "S" depende del suelo y de la Zona

Tabla N° 3 FACTOR DE SUELO "S"				
SUELO / ZONA	S_0	S_1	S_2	S_3
Z_4	0,80	1,00	1,05	1,10
Z_3	0,80	1,00	1,15	1,20
Z_2	0,80	1,00	1,20	1,40
Z_1	0,80	1,00	1,60	2,00

El Factor de Amplificación Sísmica "**C**" define las características dinámicas de la estructura (se interpreta como el factor de amplificación estructural respecto a la aceleración del suelo). Este parámetro condiciona el valor de la aceleración correspondiente a los diferentes niveles (en altura) de la edificación.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

6. COMENTARIO RESPECTO A LA ELECCIÓN DE LA SOLICITACIÓN PARA EL ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA

La fase 1 (de 0.30 g) representa a sismos frecuentes, para observar el comportamiento elástico; la fase 2 (de 0.70 g) representa a sismos de naturaleza rara, definida por una aceleración de 0.45 g amplificada por efectos locales de un mal suelo (con un factor de amplificación local de 1.5, superior al de un suelo S3; es decir, Z x S = 0.45 x 1.5=0.70 g). La fase 3, representa un cataclismo (de 1.20 g), aplicado con fines ilustrativos, para ver si se alcanzaba comportamiento extremo.

7. FUERZAS DE DISEÑO DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES (E.N.E.)

Elementos No Estructurales (E.N.E.) son aquellos que estando o no conectados al sistema resistente a fuerzas horizontales, aportan masa al sistema, pero no rigidez ni resistencia. Algunos E.N.E. constituyen: "*Tabiques*", parapetos, paneles prefabricados, cercos, paneles prefabricados; Elementos arquitectónicos y decorativos (cielos rasos, enchapes, etc.), vidrios y muros cortina, etc.

Fuerzas de Diseño (Sección 6.3, Cap.6, E030). Los E.N.E., sus anclajes, y sus conexiones deberán diseñarse para resistir una fuerza sísmica horizontal (***F***) en cualquier dirección, asociada a su peso (P_e) cuya resultante podrá suponerse aplicada en el centro de masas del elemento, con:

$$F = \frac{a_i}{g} . C_1 . P_e$$

donde:

F : es la fuerza sísmica (horizontal) de diseño del E.N.E.

a_i : es la aceleración horizontal en el nivel donde el E.N.E. está soportado o anclado al sistema estructural de la edificación. Depende de las características dinámicas del sistema estructural de la edificación.

g : es la aceleración de la gravedad

P_i : el peso de dicho nivel

P_e : peso del elemento no estructural (E.N.E.)

C_1 :se toma de la Tabla N°12 (E030-2014). Para muros y tabiques soportados horizontalmente en dos niveles consecutivos, se tomará el promedio de las aceleraciones de los dos niveles.

Tabla N° 12 VALORES DE C_1	
- Elementos que al fallar puedan precipitarse fuera de la edificación y cuya falla entrañe peligro para personas u otras estructuras.	3,0
- Muros y tabiques dentro de una edificación.	2,0
- Tanques sobre la azotea, casa de máquinas, pérgolas, parapetos en la azotea.	3,0
- Equipos rígidos conectados rígidamente al piso.	1,5

Se considera el valor de $C_1 = 3$, por ser el caso más crítico: "Elementos perimétricos, que al fallar pueden precipitarse fuera del edificio".

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Nótese sin embargo que -en la versión anterior de E.030 2014-, el valor de C_1 era 1.3 (en vez de $C_1 = 3$ en E.030 actual, es decir 2.3 veces más). Este valor se compatibilizará en la Nueva Norma de Albañilería E.070, actualmente en revisión), como se aprecia en la Tabla N° 9 tomada de E.030 versión anterior.

Tabla N° 9
VALORES DE C_1

- Elementos que al fallar puedan precipitarse fuera de la edificación en la cual la dirección de la fuerza es perpendicular a su plano. - Elementos cuya falla entrañe peligro para personas u otras estructuras.	1.3
- Muros dentro de una edificación (dirección de la fuerza perpendicular a su plano).	0.9
- Cercos.	0.6
-Tanques, torres, letreros y chimeneas conectados a una parte del edificio considerando la fuerza en cualquier dirección.	0.9
- Pisos y techos que actúan como diafragmas con la dirección de la fuerza en su plano.	0.6

F_i : es la fuerza lateral en el nivel donde se apoya o se ancla el E.N.E. calculada de acuerdo a un análisis dinámico de la estructura. Alternativamente se podrá emplear la siguiente expresión:

$$F = \frac{F_i}{P_i} . C_1 . P_e$$

F_i se determina a partir de la fuerza cortante (**V**) en la base de la estructura, según la dirección considerada, así:

$$V = \frac{Z.U.C.S}{R} . P \qquad \frac{C}{R} \geq 0.125$$

Las fuerzas sísmicas horizontales (F_i) en cualquier nivel i, correspondientes a la dirección considerada, se calculan mediante:

$$F_i = \alpha_i \cdot V \qquad \alpha_i = \frac{P_i (h_i)^k}{\sum_{j=1}^{n} P_j (h_j)^k}$$

donde n es el número de pisos del edificio, k es un exponente relacionado con el período fundamental de vibración (**T**) de la estructura, en la dirección considerada.

Para calcular las solicitaciones de diseño en el "*Tabique*" (también aplica a muros, parapetos y en general a E.N.E. con masa distribuida), la fuerza F se convertirá en una carga uniforme distribuida por unidad de área (w).

La fuerza horizontal mínima de diseño (F mín.), en ningún caso será menor que:

$$F = 0.5 . Z . S . P_e$$

Una vez calculada la fuerza F, se multiplica por 0.8, ya que ésta se condiciones últimas, y la verificación se hace para esfuerzos admisibles.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Posteriormente, se calcula el momento flector actuante, utilizando la relación 0.1.7 de E070.

$$M_s = m.\dot{w}.a^2$$

donde:

w : Fuerza sísmica por unidad de área (en condición de esfuerzos admisibles).

m : coeficiente adimensional, depende de las condiciones de borde del tabique (Tabla N°12 de E070-Albañilería).

a : Dimensión crítica del tabique, depende de las condiciones de borde del tabique (Tabla N°12 de E070-Albañilería).

Luego, con el momento sísmico (M_s) se halla el esfuerzo de tracción en el tabique (f_s) -por ser la condición más desfavorable-.

$$f_s = 6.\frac{M_s}{t^2}$$

donde:

f_s : Esfuerzo de tracción máximo en el tabique

M_s: Momento flector actuante en el tabique

t : espesor del tabique

Luego, se verifica que el esfuerzo de tracción (fs) calculado sea menor al esfuerzo admisible. (p.e.: 1.5 kg/cm² para la albañilería confinada y 3.0 kg/cm² para la albañilería armada).

8. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA DEL "*TABIQUE MUROMAX*"

Los resultados de ensayo emitidos por el Laboratorio de Estructuras – PUCP (Ref. [1] y [2]), muestran los registros gráficos del comportamiento dinámico (registros en el tiempo, de la cantidad estructural medida) y tablas con los valores máximos, de cada una de las fases de ensayo, que incluyen cuatro (4) fases de Vibración Libre (**V.L.**) y tres (3) fases de ensayo de simulación sísmica propiamente dichas), del espécimen de ensayo.

El "*Tabique*" –materia del estudio- está arriostrado dentro de un pórtico de concreto armado, mediante dowells o conectores de acero, propios del sistema. El pórtico de concreto armado (formado por dos columnas y dos vigas, una inferior y otra superior) –ubicado en forma transversal a la dirección del movimiento de la plataforma del simulador de sismos- está fijo a la plataforma del simulador de sismos en la viga inferior del pórtico; y la viga superior del pórtico, está arriostrada también a la plataforma del simulador de sismos, para restringir la libertad de desplazamientos (traslación y giro) relativos, de la viga superior respecto a la viga inferior del pórtico; y así evitar que el pórtico tenga movimiento relativo entre sus partes, vale decir, que la viga superior no se mueva respecto a la viga inferior (que el pórtico de concreto tenga comportamiento de sólido rígido sólo, y sólo se mueve igual que la señal de comando de la plataforma del simulador de sismos). Así, el "*Tabique*" podrá vibrar libremente (arriostrado en sus cuatro bordes perimetrales), incluso, podrá desarrollar comportamiento bi-axial (comportamiento de una losa plana, arriostrada en sus cuatro bordes perimétricos, solicitada por un movimiento sísmicos simulado, transversal a su plano).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Las fases de ensayo -controladas por desplazamientos máximos de la plataforma de simulación sísmica (**Do**) de 30mm, 70mm y 120mm- corresponden a aceleraciones de aproximadamente 0.30 g, 0.70 g y 1.20 g.

En los ensayos de **Vibración Libre** (**V.L.**):

Experimentalmente -a partir de los ensayos realizados en Laboratorio-, se analizan los valores relevantes, especialmente a los instrumentos ubicados en la posición 3 (Acelerómetro **A3** y Sensor de Desplazamientos **D3**), en la intersección de los ejes 3-C (ver fig. 5.1, Ref. [1]).

El acelerómetro **A3** (ubicada en el centroide del "*Tabique*"), ha registrado –para las Fases 0, 1, 2 y 3 en **V.L.**-, las aceleraciones máximas 0.40g, 0.43g, 0.66g y 0.31g, respectivamente, asociadas a una aceleración máxima en la base (de la plataforma de simulación o "input") de 0.183g, 0.196g, 0.188g y 0.178g.

El acelerómetro **A1** ubicado en el tercio superior, ha registrado valores algo mayores que los registrados por **A3**, debido a que el orificio de sujeción del conector Tabique-Viga de arriostre superior, es ovalado ("ojo chino"), y de alguna manera, permite alguna libertad de movimiento transversal (aunque limitada) a su plano. Las aceleraciones máximas en **A1**, son: 0.52g, 0.54g, 0.95g y 0.35g, respectivamente. Los resultados mencionados, se presentan en el recuadro de la tabla siguiente, adjunta:

TABLAS RESUMEN: VALORES EXTREMOS (MÁX., MÍN.) EN V.L. POR FASE (DE ACELERÓMETRO Ai)
S.S. TABIQUE GEINCO

	Instrumento:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
VL 0	Máx:	0.1834	0.5184	0.3067	0.4003	0.3423	0.2545
	Mín:	-0.1766	-0.4955	-0.2766	-0.3510	-0.3377	-0.2013
	Abs.:	0.1834	0.5184	0.3067	0.4003	0.3423	0.2545

	Inst.:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
VL 1	Máx:	0.1799	0.5427	0.3470	0.4313	0.3446	0.3179
	Mín:	-0.1857	-0.5007	-0.3085	-0.3857	-0.3294	-0.2728
	Abs.:	0.1857	0.5427	0.3470	0.4313	0.3446	0.3179

	Inst.:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
VL 2	Máx:	0.1803	0.9490	0.5232	0.6636	0.6693	0.9991
	Mín:	-0.1877	-0.7489	-0.4909	-0.6540	-0.4384	-0.7417
	Abs.:	0.1877	0.9490	0.5232	0.6636	0.6693	0.9991

	Inst.:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
VL 3	Máx:	0.1775	0.3539	0.2167	0.3059	0.1935	0.2439
	Mín:	-0.1769	-0.3120	-0.2164	-0.3050	-0.1840	-0.2379
	Abs.:	0.1775	0.3539	0.2167	0.3059	0.1935	0.2439

Las propiedades dinámicas –medidas en **A3** en **V.L.**-, tales como: Amortiguamiento (ξ), Períodos (T_d y T_n) y Frecuencias de vibración (ω_d y ω_n), amortiguados y natural, se muestran a continuación.

Se puede apreciar que el período fundamental (T_n) en cada una de las fases es: 0.10, 0.10, 0.11 y 0.17seg. Estos valores indican que el *Tabique* se ha mantenido intacto (sin fisuración y/o

UNIVERSIDAD CATÓLICA

agrietamiento), es decir, en franco comportamiento elástico, hasta la pre-fase 3. En la etapa post-fase 3, T_n disminuyó a 0.07s.

RESUMEN Y VARIACIÓN PROPIEDADES DINÁMICAS MEDIDAS EN V.L. (PARA A3 EJE 3 - C)
TABIQUE GEINCO, PARA TODAS LAS FASES DE ENSAYO

S.S. TABIQUE GEINCO

Variación sobre Aceleraciones (Acelerómetro A3 Centro del Tabique)					
Parámetro	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
ξ(%)	1.70	1.17	7.64	2.21	-
Td(seg)	0.10	0.10	0.11	0.07	-
ωd(rad/seg)	61.34	62.08	59.16	83.78	-
ωn(rad/seg)	61.34	62.09	59.34	83.80	-
Tn(seg)	0.10	0.10	0.11	0.07	-

En los **Ensayos de Simulación Sísmica** (**S.S.**):

El acelerómetro **A3** (ubicado en el centroide del *Tabique*), ha registrado –para las Fases 1, 2 y 3 en S.S.-, las aceleraciones máximas 0.79g, 3.16g y 5.46g, respectivamente, asociadas a una aceleración máxima en la base (de la plataforma de simulación o "input") de 0.30g, 0.75g y 1.25g, se muestran en la tabla siguiente:

TABLAS RESUMEN: VALORES EXTREMOS (MÁX., MÍN.) POR FASES (POR CADA INSTRUMENTO: Acel., Desplaz. Absoluto, Relativo, y Cortante Basal)

S.S. TABIQUE GEINCO

	Sensor:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
F 1	Máx:	0.2592	0.7969	0.6283	0.7163	0.6391	0.5112
	Mín:	-0.3408	-0.8687	-0.7713	-0.7893	-0.6804	-0.5944
	Abs.:	0.3408	0.8687	0.7713	0.7893	0.6804	0.5944

	Sensor:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
F 2	Máx:	0.5304	3.5212	2.0702	3.1585	2.9799	4.1484
	Mín:	-0.7511	-3.0547	-2.0111	-2.9579	-2.2613	-2.9732
	Abs.:	0.7511	3.5212	2.0702	3.1585	2.9799	4.1484

	Sensor:	A0 (g)	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	A5 (g)
F 3	Máx:	0.8799	4.5906	5.1057	5.4577	5.0804	5.5199
	Mín:	-1.2490	-4.1001	-3.1928	-3.8952	-2.8406	-4.9755
	Abs.:	1.2490	4.5906	5.1057	5.4577	5.0804	5.5199

El sensor de desplazamientos **D3** (ubicado en el centroide del *Tabique*), ha registrado –para las Fases 1, 2 y 3 en S.S.-, los desplazamientos absolutos máximos 35.61mm, 71.36mm y 122.85mm, respectivamente, asociados a un desplazamiento máximo en la base (de la plataforma de simulación o "input") de 30mm, 70mm y 120mm, respectivamente.

El máximo desplazamiento relativo entre **D3** y el de la plataforma del simulador **Do**, es decir, (**D3-Do**), en cada una de las fases es: 2.91mm, 8.78mm y 14.48mm.

El desplazamiento absoluto y relativo, descrito en los dos últimos párrafos, se muestran en las dos tablas siguientes.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Se muestra también, la fuerza cortante (**V**) desarrollada transversalmente al plano del tabique (sin incluir el peso del pórtico de concreto armado, ni el dispositivo metálico de arriostre, utilizados en el ensayo). Se aprecia que los cortantes totales máximos –en cada fase de ensayo-, son: $V_1 = 2569$, $V_2 = 4158$ y $V_3 = 6721$ kg.

El tabique ensayado es de 2.50 m de largo, 2,40m de alto y 0,12m de espesor total; si se considera que está arriostrado (apoyos simples) en todo su perímetro (cuatro bordes), la fuerza cortante por unidad de longitud perimetral sería: 262, 424 y 686 kg/m.

Asumiendo una distribución constante en todo el perímetro, el esfuerzo cortante máximo en cada fase, sería: 0.22, 0.35 y 0.57 kg/cm². Obviamente, parte de este cortante es tomado por el tarrajeo de los tabiques y otra por los dowells o conectores metálicos -usados en la sujeción de los tabiques a la estructura principal-.

TABLAS RESUMEN: VALORES EXTREMOS (MÁX., MÍN.) POR FASES (PARA CADA INSTRUMENTO: Acel., Desplaz. Absoluto, Relativo, y Cortante Basal)

S.S. TABIQUE GEINCO

	Sensor	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)
F 1	Máx:	37.036	33.861	35.608	34.187	33.586
	Mín:	-27.856	-25.913	-27.497	-25.899	-26.036
	Abs.:	37.036	33.861	35.608	34.187	33.586

	Sensor	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)
F 2	Máx:	76.104	68.514	71.357	69.407	67.847
	Mín:	-55.806	-51.956	-55.147	-52.043	-53.034
	Abs.:	76.104	68.514	71.357	69.407	67.847

	Sensor	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)
F 3	Máx:	136.452	122.008	122.859	120.674	117.200
	Mín:	-101.432	-90.501	-99.718	-92.351	-91.125
	Abs.:	136.452	122.008	122.859	120.674	117.200

TABLAS RESUMEN: VALORES EXTREMOS (MÁX., MÍN.) POR FASES (PARA CADA INSTRUMENTO: Acel., Desplaz. Absoluto, Relativo, y Cortante Basal)

S.S. TABIQUE GEINCO

	Sensor	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DR3 (mm)	DR4 (mm)	DR5 (mm)	D0 (mm)	Fa (Kg)	V (Kg)
F 1	Máx:	3.900	2.295	2.913	1.743	1.569	34.608	6443.757	2229.93
	Mín:	-2.811	-2.344	-2.356	-1.905	-1.870	-26.564	-9371.289	-2568.65
	Abs.:	3.900	2.344	2.913	1.905	1.870	34.608	9371.289	2568.65

	Inst.:	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DR3 (mm)	DR4 (mm)	DR5 (mm)	D0 (mm)	Fa (Kg)	V (Kg)
F 2	Máx:	12.459	6.397	8.776	6.003	5.218	69.667	13775.081	4157.75
	Mín:	-9.094	-6.662	-8.165	-6.188	-5.863	-53.531	-17636.830	-3840.68
	Abs.:	12.459	6.662	8.776	6.188	5.863	69.667	17636.830	4157.75

	Inst.:	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DR3 (mm)	DR4 (mm)	DR5 (mm)	D0 (mm)	Fa (Kg)	V (Kg)
F 3	Máx:	26.436	13.390	14.482	8.573	8.622	118.276	22388.636	4886.63
	Mín:	-15.863	-8.638	-14.213	-9.409	-9.279	-91.073	-26653.240	-6721.26
	Abs.:	26.436	13.390	14.482	9.409	9.279	118.276	26653.240	6721.26

La amplificación de aceleraciones máximas –medidas en **A3**-, son 2.55, 5.52 y 4.42 (valores

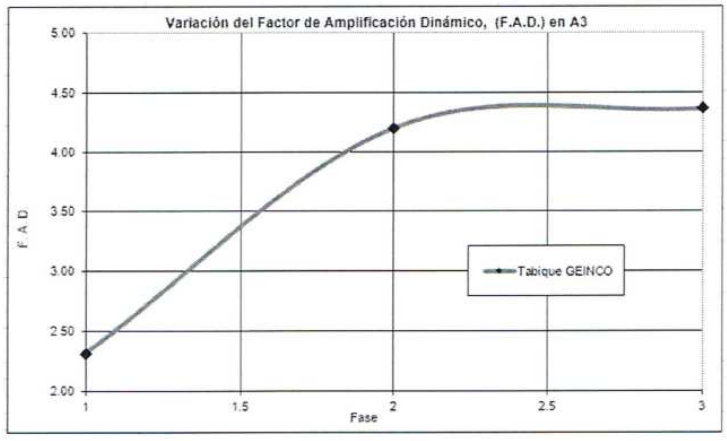
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

adimensionales, por ser el cociente de dos aceleraciones: aceleración máxima de respuesta, entre la aceleración máxima de entrada), tal como se muestra en la tabla y en el gráfico, siguientes.

Así mismo, se muestra –en forma gráfica-, la variación del Factor de Amplificación Dinámico (F.A.D.), según la fase de ensayo.

ACELERACIÓN MÁXIMA Y FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICO (F.A.D.), POR FASES
S.S. TABIQUE GEINCO

Aceleraciones	TABIQUE		
	Fase1	Fase 2	Fase 3
A0	0.341	0.751	1.249
A1	0.869	3.521	4.591
A2	0.771	2.070	5.106
A3	0.789	3.158	5.458
A4	0.680	2.980	5.080
A5	0.594	4.148	5.520
Amáx	0.869	4.148	5.520
FAD	2.549	5.523	4.420

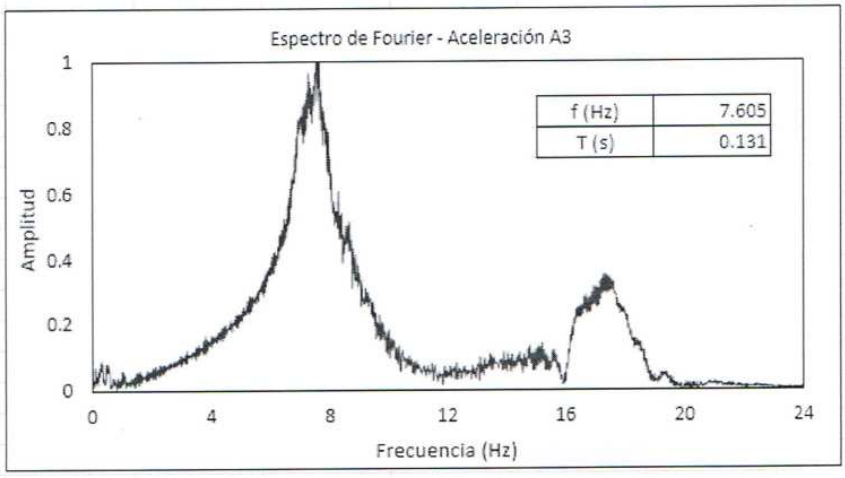


DESPLAZAMIENTO RELATIVO (Dr i) Y CORTANTE BASAL (V i), MÁXIMOS, POR FASES
S.S. Tabique GEINCO

Parámetro	Desplazamientos Relativos en mm			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	-
D0	34.608	69.667	118.276	-
DR1	3.900	12.459	26.436	-
DR2	2.344	6.662	13.390	-
DR3	2.913	8.776	14.482	-
DR4	1.905	6.188	9.409	-
DR5	1.870	5.863	9.279	
V (kg)	2568.65	4157.75	6721.26	-

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Al final de las tres fases de ensayo de simulación sísmica -para establecer la frecuencia predominante del Tabique-, se aplicó al espécimen de ensayo una señal armónica de frecuencia creciente (o de "barrido") en el rango {0 y 10 Hertz}. A partir de esta simulación, se estableció que la frecuencia de vibración predominante (f) es 7.605Hz., y en consecuencia, el período natural de vibración (**T**) -calculado como la inversa de la frecuencia-, es 0.131s, tal como se muestra en el "Espectro de Fourier" –encontrado a partir del registro de aceleraciones de **A3**-, mostrado a continuación.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

9. Ejemplo Explicativo y de Ilustración. Comparación con un caso real (Edificio de 25 pisos):

Se calcula la aceleración que se desarrollaría en los diferentes niveles de un edificio de 25 pisos (asumiendo características hipotéticas, pero representativas de un caso real), para compáralo con las aceleraciones alcanzadas en el tabique ensayado en el Laboratorio, durante la simulación sísmica.

Características del Edificio (datos asumidos):

Edificio de 25 Pisos

Altura de entrepiso: 3.00 m. Altura total: $h_n = 75.00$ m.

Sistema estructural sismorresistente: Sistema dual, formado por Muros y pórticos de C.A. los cuales proporcionan resistencia y rigidez lateral, además de resistir las solicitaciones de gravedad.

Sistema de piso / techo : Losa maciza de 0.20 m de espesor.

Parámetros Sísmicos (E030-2014)

Z = 0.45 Zona sísmica 4. (Anexo N°1 de E030)

U = 1 Edificio destinado a Oficinas (Tabla N° 5 de E030)

S = 1.0 Suelo S1 (asumido), p.e. en varios distritos de Lima, como en Miraflores, San Isidro, Magdalena, Lince, Pueblo Libre, Rímac, etc.

R = 5.25 Para sistema estructural Dual, R_0=7 (Tabla N°7 de E030). Se ha asumido que el edificio presenta irregularidad torsional, por lo que $I_P = 0.75$, e $I_a = 1.0$ al ser continuo en altura (sin irregularidad vertical), según Tablas N°8 y 9 de E030).

Por lo que $R = R_0 \times I_P \times I_a = 5.25$

C = $0.8T = h_n / C_T$, $h_n = 75.0$m, $C_T = 60$ $\Rightarrow T = 1.25$ s

Para $T < T_L$ (sección 2.5 de E030), $T_P = 0.4$ s para suelo S1

$\Rightarrow C = 2.5 \times (T_P / T) = 0.8$

Se verifica que C / R = 0.152 = (sección 4.5.2 de E030)

Determinación del **Cortante basal (V)** :

Con los valores definidos para cada uno de los parámetros, se obtiene

$$V = \frac{Z.U.C.S}{R}.P \qquad V = \frac{0.45.1.0.8.1.0}{5.25}.P = \quad 0.0686 \quad P$$

Distribución de la fuerza cortante (V) en la altura del edificio, en cada nivel (F_i) :

La fuerza cortante basal (**V**) se distribuye en cada nivel "***i***", en base a los criterios reglamentarios indicados en la sección 4.5.3 de E030.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

$$F_i = \alpha_i \cdot V \qquad \alpha_i = \frac{P_i (h_i)^k}{\sum_{j=1}^{n} P_j (h_j)^k}$$

donde α_i = se calcula con la expresión anterior, y

$k = (0.75 + 0.5\ T) = 1.375 \leq 2$, para $T > 0.5$ s

Aceleración sísmica (a_i) en los diferentes niveles o pisos del edificio

Una vez obtenida la fuerza en cada nivel (F_i), se puede determinar la aceleración (a_i) asociada a cada nivel, así;

$$a_i = \frac{F_i}{P_i} . g$$

Nota. A pesar que para el cálculo de la aceleración (a_i) en cada piso, no se requiere hallar el peso total del edificio -por simplicidad en los cálculos-. se ha asumido un peso por nivel (P_i) de 400 ton, por lo que, el peso total del edificio es 10,000 ton y el cortante basal **V** es 686 ton.

La **Tabla 1**, muestra las fuerzas y aceleraciones obtenidas en cada nivel, para el edificio del ejemplo.

Se puede apreciar que la mayor aceleración se alcanza en el Piso 25, cuyo valor a_{25} es 0.155 g ó 152.5 cm/s².

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

TABLA 1. FUERZAS Y ACELERACIONES EN EDIFICIO

Fuerzas (F_i) y Aceleraciones (a_i) asociadas, por cada Nivel (i)

(25 Pisos)	V =	0.06857 x P =	685.7	ton
	g =	981	cm/s²	
	ki =	1.375		

Piso	*hi*	*Pi*	*Pi * (hi)^k*	*Fi*	a_i	
	(m)	(ton)		(ton)	(g)	(cm/s²)
1	3	400	1812	0.7	0.002	1.8
2	6	400	4699	1.9	0.005	4.7
3	9	400	8206	3.4	0.008	8.3
4	12	400	12188	5.0	0.013	12.3
5	15	400	16565	6.8	0.017	16.7
6	18	400	21284	8.7	0.022	21.4
7	21	400	26309	10.8	0.027	26.5
8	24	400	31612	13.0	0.032	31.8
9	27	400	37169	15.3	0.038	37.4
10	30	400	42964	17.6	0.044	43.2
11	33	400	48980	20.1	0.050	49.3
12	36	400	55205	22.7	0.057	55.6
13	39	400	61627	25.3	0.063	62.0
14	42	400	68238	28.0	0.070	68.7
15	45	400	75029	30.8	0.077	75.5
16	48	400	81991	33.7	0.084	82.5
17	51	400	89119	36.6	0.091	89.7
18	54	400	96405	39.6	0.099	97.0
19	57	400	103846	42.6	0.107	104.5
20	60	400	111434	45.7	0.114	112.2
21	63	400	119166	48.9	0.122	120.0
22	66	400	127038	52.1	0.130	127.9
23	69	400	135045	55.4	0.139	135.9
24	72	400	143183	58.8	0.147	144.1
25	75	400	151450	62.2	0.155	152.5
Total	-	10000	1670564	685.7	-	-

Por simple inspección de los valores calculados en la tabla (para los pisos 5, 10, 15, 20 y 25), se tienen las fuerzas (F_i) y la aceleración en cada piso "*i*":

La fuerza en el 5° piso (F_5) es 6.8 ton, y la aceleración asociada a_5 es 0.017 g ó 1.8 cm/s²;

La fuerza en el 10° piso (F_{10}) es 17.6 ton, y la aceleración asociada a_{10} es 0.044 g ó 43.2 cm/s².

La fuerza en el 15° piso (F_{15}) es 30.8 ton, y la aceleración asociada a_{15} es 0.077 g ó 75.5 cm/s².

La fuerza en el 20° piso (F_{20}) es 45.7 ton, y la aceleración asociada a_{20} es 0.114 g ó 112.2 cm/s².

La fuerza en el 25° piso (F_{25}) es 62.2 ton, y la aceleración asociada a_{25} es 0.155 g ó 152.5 cm/s².

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Para determinar la aceleración máxima que se desarrollaría en el centroide de un "*Tabique*" (de similares características que el ensayado experimentalmente, cuyo peso total –en el caso más desfavorable-, es 1456 kg (Ref. [1])), apoyado en cualquiera de los diferentes niveles o pisos del edificio, se debe aplicar a la aceleración del piso (base de apoyo del "*Tabique*") el factor de amplificación que puede desarrollar dicho tabique.

Así, se podrían comparar los valores de aceleración desarrollados en ambos sistemas (experimental y edificio hipotético). Recuérdese que en el caso experimental se aplicó en la base (input) aceleraciones de 0.30 g, 0.70 g y 1.12 g (ó equivalentemente, 295, 687 y 1177cm/seg²).

Recordemos que las *aceleraciones* registradas *experimentalmente* en el centro del tabique (acelerómetro **A3**) -para cada fase durante el ensayo de simulación-, son (de manera resumida):

	a (en A3, por Fases	
	(g)	(cm/s²)
Fase 1	0.7893	774.3
Fase 3	3.1585	3098.5
Fase 3	5.4577	5354.0

Se aprecia que la aceleración máxima (pico) alcanzada experimentalmente –registrada en **A3**, en la Fase 3-, es 5.5 g ó 5354 cm/seg². También se conoce –de los mismos resultados experimentales-, que la respuesta medida en el centro del "*Tabique*" (**A3**), *amplifica* respecto a la señal de comando ($\mathbf{A_0}$) -de cada fase (0.3g, 0.7g y 1.2g)-, en 2.55, 5.52 y 4.42 veces, respectivamente.

Si comparamos este valor experimental (5.5g ó 5354 cm/s²) con la aceleración máxima que se desarrollaría en el edificio propuesto (en particular en el piso N°25), a_{25} es 0.155g ó 152.5 cm/seg².

La aceleración en el centroide del "*Tabique*" ubicado en cada nivel, crece con respecto a la aceleración de la base de apoyo (nivel o piso) del "*Tabique*". Así, por ejemplo, la aceleración del piso 25, a_{25} es 0.155 g ó 152.5 cm/seg²; entonces la aceleración en el centroide de "*Tabique*" apoyado en ese piso, sería a_{25} x factor de amplificación de aceleración del tabique (experimental), o sea, 0.15 g x 5.52 = 0.828 g (ó 152.5 cm/seg² x 5.52 = 841.8 cm/seg².

Se aprecia que la aceleración máxima alcanzada en el "*Tabique*" ensayado (5.4577 g ó 5354 cm/seg²) es mucho mayor (en 6.6 veces) que la aceleración máxima que se desarrollaría en un "*Tabique*" similar al ensayado, que se colocaría -en igualdad de condiciones- en el piso 25 del edificio de 25 pisos (0.828 g ó 841.8 cm/seg²).

Esto permite concluir que un "*Tabique MUROMAX*" –colocados en cualquier nivel de cualquier edificio común-, soportarían holgadamente (con muy buena reserva de seguridad -al volteo y/o deslizamiento-) las máximas aceleraciones que demandaría el máximo sismo probable de diseño.

10. ANÁLISIS DE FUERZAS ACTUANTES Y RESISTENTES:

La sección 6.3 de E030, plantean expresiones para las fuerzas con la que debe diseñarse los E.N.E., tales como las citadas en el acápite **7**.

La **Tabla 2**, muestra las Aceleraciones en el "*Tabique*", las Fuerzas de Diseño del "*Tabique*" (calculadas con expresiones reglamentarias de E030: tanto la convencional, como la fuerza mínima

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

de diseño y la correspondiente a la condición de Servicio), la fuerza distribuida equivalente w (por unidad de área), el Momento Sísmico (M_s) y el Esfuerzo máximo de Tracción por Flexión (f_s) en el "*Tabique*".

Se puede apreciar que los esfuerzos máximos que se generan son pequeños, y menores a los admisibles. Si se toma como referencia los esfuerzos admisibles que puede desarrollar la albañilería confinada (3kg/cm²) y armada (5 kg/cm²), se nota que los esfuerzos están por debajo de esos valores.

Recuérdese además que para los elementos "*Tabique MUROMAX*", en forma experimental –a partir de los ensayos mecánicos realizados en el Laboratorio (ver Ref. [2]).- se ha establecido que la resistencia a la tracción por flexión o Módulo de Rotura (**R**) es 1.416 MPa (ó 14.43 kg/cm²); y la Resistencia al Corte (τ) -medido en un ensayo de compresión diagonal-, es 440.5612 kPa (ó 4.49 kg/cm²).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

TABLA 2. ACELERACIONES, FUERZAS Y ESFUERZOS EN "*TABIQUES*" COLOCADOS EN EDIFICIO

Acel., Fzas de diseño [calculada, min. y Servicio] y Esfuerzos máx de Flexión en Tabique, por Nivel (i)

C1 =	3		m =	0.0479	a =	2.4	m
Pe =	1456	kg			t =	0.12	m

FAD F1	2.55
FAD F2	5.52
FAD F3	4.42

$$M_s = m.w.a^2 \quad f_s = 6.\frac{M_s}{t^2}$$

Acel. CG Tabique		F	F_{Min}	F *Serv.*	w	M_s	f_s
(g)	(cm/s²)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg/m²)	(kg-m/m)	(kg/cm²)
0.010	10.1	8.1	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.027	26.1	21.1	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.046	45.6	36.8	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.069	67.7	54.6	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.094	92.0	74.2	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.121	118.3	95.4	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.149	146.2	117.9	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.179	175.7	141.7	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.211	206.5	166.6	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.243	238.7	192.6	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.277	272.2	219.5	327.6	262.1	54.6	15.064	0.628
0.313	306.8	247.4	327.6	198.0	54.6	15.064	0.628
0.349	342.4	276.2	327.6	221.0	54.6	15.064	0.628
0.387	379.2	305.9	327.6	244.7	54.6	15.064	0.628
0.425	416.9	336.3	327.6	269.0	56.0	15.464	0.644
0.464	455.6	367.5	327.6	294.0	61.3	16.899	0.704
0.505	495.2	399.5	327.6	319.6	66.6	18.368	0.765
0.546	535.7	432.1	327.6	345.7	72.0	19.870	0.828
0.588	577.0	465.5	327.6	372.4	77.6	21.404	0.892
0.631	619.2	499.5	327.6	399.6	83.2	22.968	0.957
0.675	662.2	534.1	327.6	427.3	89.0	24.561	1.023
0.720	705.9	569.4	327.6	455.5	94.9	26.184	1.091
0.765	750.4	605.3	327.6	484.2	100.9	27.834	1.160
0.811	795.6	641.8	327.6	513.4	107.0	29.512	1.230
0.858	841.6	678.8	327.6	543.1	113.1	31.215	1.301
-	-	-	-	-	-	-	-

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

10. CONCLUSIONES

El "*tabique MUROMAX*" (Elemento No Estructural E.N.E.) –debidamente arriostrado en la estructura principal, según propuesta propia del sistema constructivo-, se ha ensayado en la posición más crítica para su estabilidad, es decir, orientado en posición transversal a la solicitación. En estas condiciones y considerando el arriostre perimetral del tabique a la estructura principal (o también, sólo en la base y con ojo chino en el extremo superior) -mediante conectores o dowells- el esfuerzo de tracción por flexión controlaría la fisuración y/o agrietamiento de la parte central del tabique.

Se puede ver en la **Tabla 2**, que los esfuerzos que se desarrollarían en estos tabiques, son menores a los esfuerzos admisibles que se presentarían ante un sismo máximo probable.

Además, la resistencia a la tracción por flexión (**R**) medida experimentalmente es 14.43kg/cm².

El tabique, debido a su continuidad y sujeción perimetral, puede desarrollar efectos bi-axiales o uni-axiales, dependiendo de las condiciones de borde empleadas.

A juzgar por el estado final observado y por los resultados procesados de todas las Fases, el comportamiento del *Tabique* -en la primera fase del ensayo (Do=30mm, Ao = 0.3g)-, fue prácticamente elástico. A partir de la segunda fase -(Do=70mm, Ao = 0.7g)-, el Tabique empezó a experimentar pequeñas variaciones en sus propiedades dinámicas, aunque estas variaciones no fueron significativas. La aceleración de la mesa para la fase 2, corresponde a la de una zona de mayor sismicidad en Perú, magnificada por una amplificación de 1,5 (correspondiente a efectos locales del peor suelo). En la tercera fase -(Do=120mm, Ao = 1.20 g)-, se evidenció fisuración en los bordes perimetrales del *Tabique* (uniones o juntas entre Tabique-Pórtico) y en fisuras más finas en las juntas interiores entre paneles. Debe notarse que la aceleración de la mesa corresponde a la de un cataclismo, y que sólo es importante para establecer el comportamiento extremo y de interés sólo en el Laboratorio.

El tabique ensayado es de 2.50 m de largo, 2,40m de alto y 0,12m de espesor total; si se considera que está arriostrado (apoyos simples) en todo su perímetro (cuatro bordes), la fuerza cortante por unidad de longitud perimetral sería: 262, 424 y 686 kg/m.

El esfuerzo cortante máximo en cada fase, sería: 0.22, 0.35 y 0.57 kg/cm². Obviamente, parte de este cortante es tomado por el tarrajeo de los tabiques y otra por los dowells o conectores metálicos -usados en la sujeción de los tabiques a la estructura principal-.

Nótese que la resistencia al corte (τ) medida experimentalmente –en ensayos de compresión diagonal-, es 4.49kg/cm².

La amplificación de aceleraciones máximas, son 2.55, 5.52 y 4.42 (valores adimensionales, por ser el cociente de dos aceleraciones: aceleración máxima de respuesta, entre la aceleración máxima de entrada).

A partir de la simulación sísmica –mediante un barrido de frecuencias-, se ha establecido que la frecuencia de vibración predominante (f) del "Tabique" es 7.605 Hz., en consecuencia, el período natural de vibración (**T**) del mismo -calculado como la inversa de la frecuencia-, es 0.131seg, tal como se muestra en el "Espectro de Fourier" de la (Ref. [1]).

Se creyó conveniente ***ilustrar este estudio***, con la solución (simplificada) de un edificio común de 25 pisos. A pesar que para el cálculo de la aceleración (a_i) en cada piso, no se requiere hallar el peso total del edificio -por simplicidad en los cálculos-. se ha asumido un peso por nivel (P_i) de 400 ton, por lo que, el peso total del edificio es 10,000 ton y el cortante basal **V** es 686 ton.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Se aprecia que la aceleración máxima alcanzada en el "*Tabique*" ensayado experimentalmente (a_3 = 5.4577 g ó 5354 cm/seg²) es mucho mayor (en 6.6 veces) que la aceleración máxima que se desarrollaría en un "Tabique" similar al ensayado, que se colocaría -en igualdad de condiciones- en el piso 25 del edificio de 25 pisos (0.828 g ó 841.8 cm/seg²).

Esto permite concluir que los "*Tabique MUROMAX*" –colocados en cualquier nivel de cualquier edificio común-, soportarían holgadamente (con muy buena reserva de seguridad –a la flexión, al corte, al volteo y/o al deslizamiento-) las máximas aceleraciones que demandaría el máximo sismo probable de diseño.

Los esfuerzos de tracción por flexión (f_s) en un tabique colocado en el piso 25 de un edificio de 25 pisos sería 1.30 kg/cm² (ver **Tabla 2**), valor menor al que puede desarrollar el tabique (incluso que la albañilería convencional). Recuérdese que la resistencia a la tracción por flexión (**R**) medida experimentalmente es un ensayo de flexión pura es 14.43kg/cm².

Se ha demostrado experimentalmente que los "*Tabiques MUROMAX*" cumplen con el objetivo de mantener su integridad, de mantenerse conectados o fijos al sistema estructural de cargas laterales, y de mantenerse estables aún en caso de sismos muy raros. Esta evidencia ha permitido extender –de manera explicada y justificada- que se pueden construir "*Tabiques MUROMAX*" livianos y de manera segura, en edificios de altura importante, aún en los casos más desfavorables (en posiciones perimetrales).

El diseño de estos elementos no estructurales ("*Tabiques MUROMAX*" y su sistema de anclaje o sujeción propio) se puede verificar con los criterios establecidos en las normas peruanas E030 Diseño Sismorresistente (Cap.6) y en lo que aplica la norma E070-Albañilería.

11. REFERENCIAS

1. INF-LE 235.2017 "Ensayo dinámico de simulación sísmica –transversal al plano- en sistema "TABIQUE MURO MAX". Laboratorio de Estructuras Antisísimicas – PUCP. 16 Nov. 2017.
2. INF-LE 235.2017 (A) "Ensayos Mecánicos (Flexión y Corte) de Componentes Pre-fabricados de Concreto – "TABIQUE MUROMAX". Laboratorio de Estructuras Antisísimicas – PUCP. 16 Nov. 2017.
3. Memoria de Descriptiva y Propuesta de Utilización del SISTEMA CONSTRUCTIVO NO CONVENCIONAL MUROMAX.
4. Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente". Reglamento Nacional de Construcciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2014.
5. Norma E.070 "Albañilería". Reglamento Nacional de Construcciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2002.
6. Norma E.020 "Cargas". Reglamento Nacional de Construcciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2006.

Lima 15 de marzo de 2018

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

Wilson E. Silva Berríos
Ingeniero Civil
Reg. C.I.P. N°27892