

# Comportamiento dinámico de estructuras, determinado mediante instrumentación

Mario González-Durán<sup>1</sup>, Alejandro Mungaray-Moctezuma<sup>2</sup>, Ulises Mena-Hernández<sup>3</sup>, Michelle Hallack-Alegría<sup>1</sup>, Luis Rodríguez-Valenzuela<sup>2</sup>

Centro de Ingeniería y Tecnología<sup>1</sup>, Facultad de Ingeniería<sup>2</sup>, Gerencia de Ingeniería Civil<sup>3</sup>

Universidad Autónoma de Baja California<sup>1,2</sup>, Instituto de Investigaciones Eléctricas<sup>3</sup>

Tijuana, B. C.<sup>1</sup>, Mexicali, B. C.<sup>2</sup>, Cuernavaca, Mor.<sup>3</sup>; México

[gonzalezduranmario, mhallack]@uabc.edu.mx, [alejandro.mungaray, lrodriguez15]@uabc.edu.mx, umena@iie.org.mx

**Abstract**— The purpose of this research was to determine the dynamic behavior of the structure based on apartment built unconfined masonry and soil where they are grounded, using instrumentation, in terms of the fundamental periods of vibration of the structure ( $T_E$ ) and soil ( $T_0$ ); shear wave velocities of soil ( $V_S$ ) and density walls. The  $T_0$  and  $T_E$  obtained are on the order of 0.427 seconds and in the range between 0.13 and 0.21 seconds respectively; The  $V_S$  obtained range between 122 and 262 m/s. Analysis  $T_E$  values show a degradation of stiffness of the structure, in the case of soil values,  $T_0$  and  $V_S$  values are associated mainly soft soils with some areas of hard ground.

*Keywords* - structure, performance, period, velocity, stiffness and degradation.

**Resumen**— El propósito de esta investigación fue determinar el comportamiento dinámico de la estructura en viviendas construidas a base mampostería no confinada y del suelo donde están desplantadas, mediante instrumentación, en términos de los periodos fundamentales de vibrar de la estructura  $T_E$  y suelo  $T_0$ ; velocidades de onda de corte del suelo  $V_S$  y densidad en muros. Los  $T_0$  y  $T_E$  obtenidos, están en el orden de 0.427 segundos y en el rango de 0.13 a 0.21 segundos respectivamente; Las  $V_S$  obtenidas oscilan entre 122 y 262 m/seg. El análisis de los valores de  $T_E$  manifiestan una degradación de la rigidez de la estructura, en el caso del suelo, los valores de  $T_0$  y  $V_S$  están asociadas a suelos medianamente duros a blandos.

*Palabras claves*— estructura, comportamiento, período, velocidad, rigidez y degradación.

## I. INTRODUCCIÓN

El 04 de abril del 2010 se manifestó un sismo en la Ciudad de Mexicali, Baja California, noroeste de México, Fig. 1, con una magnitud de 7.2 en la escala de Richter, con epicentro localizado a 18 kilómetros al Suroeste de la mancha urbana[1], afectando principalmente infraestructura agrícola, pública y residencial. Dado lo anterior, en nuestro estudio propusimos revisar el comportamiento dinámico estructural en viviendas construidas a base de mampostería, eligiendo como caso de estudio el Fraccionamiento Sevilla Residencial, ubicado al este de la ciudad, dado que varias de sus viviendas manifestaban grietas en sus muros, las cuales aparecieron después del sismo. El análisis del comportamiento de la estructura se realizó en función de su período fundamental de vibrar ( $T_E$ ), de la caracterización del suelo de desplante, determinando su período fundamental ( $T_0$ ) y las velocidades de onda de corte ( $V_S$ ) y la revisión de la densidad de muros. Estos parámetros fueron determinados mediante instrumentación, conformada por siguiente equipo: acelerómetro, sismómetro y esclerómetro.

En el caso de la estructura,  $T_E$  está asociado su masa ( $m$ ) y rigidez ( $k$ ) [2], a su vez, la rigidez es una función de las propiedades de los materiales, tales como: módulo de elasticidad ( $E$ ) y momentos de inercia ( $I$ ), cuando una estructura sufre agrietamientos, su correspondiente  $E$  e  $I$  se modifican, en el caso de módulo de elasticidad disminuye, es decir, la rigidez de la estructura se degrada; en el caso de los parámetros  $T_0$  y  $V_S$ , dependen de las propiedades del suelo, como estratigrafía y litología.

Con base en una inspección preliminar al desarrollo habitacional, se observó que las viviendas afectadas habían sido principalmente las de dos niveles. Estas viviendas arquitectónicamente son de dos tipos, particularmente en la planta alta, Fig. 2. Así mismo, la manifestación del sismo dio pie a que las

viviendas de este sitio se pudieran clasificar conforme al daño mostrado: dañada, aparentemente no dañada y rehabilitada por los propietarios después de la manifestación del fenómeno. El monitoreo se realizó a cinco viviendas, tres viviendas dañadas, una vivienda rehabilitada y una vivienda aparentemente no dañada. En este artículo solo presentamos el análisis realizado a la vivienda rehabilitada y dañada.

La estructura de las viviendas es a base de mampostería no confinada, compuesta de bloque de 12 centímetros de espesor, reforzada con acero corrugado en el sentido vertical y horizontal, cimentación a base de losa de concreto armado, sistemas de entrepiso y azotea aligerados a base de vigueta de alma abierta y casetón de poliestireno, la superficie de construcción es aproximadamente 96.0 metros cuadrados.

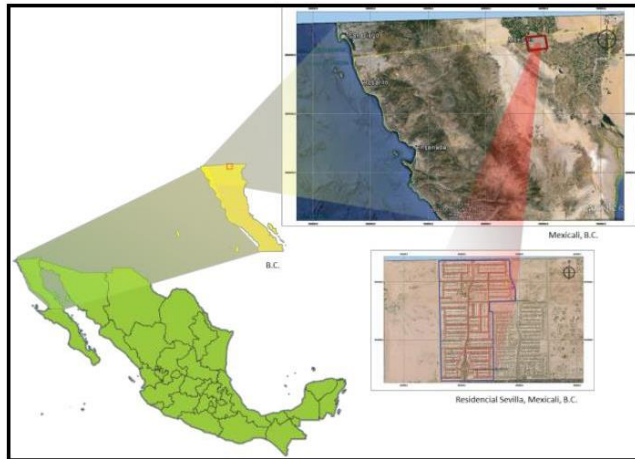
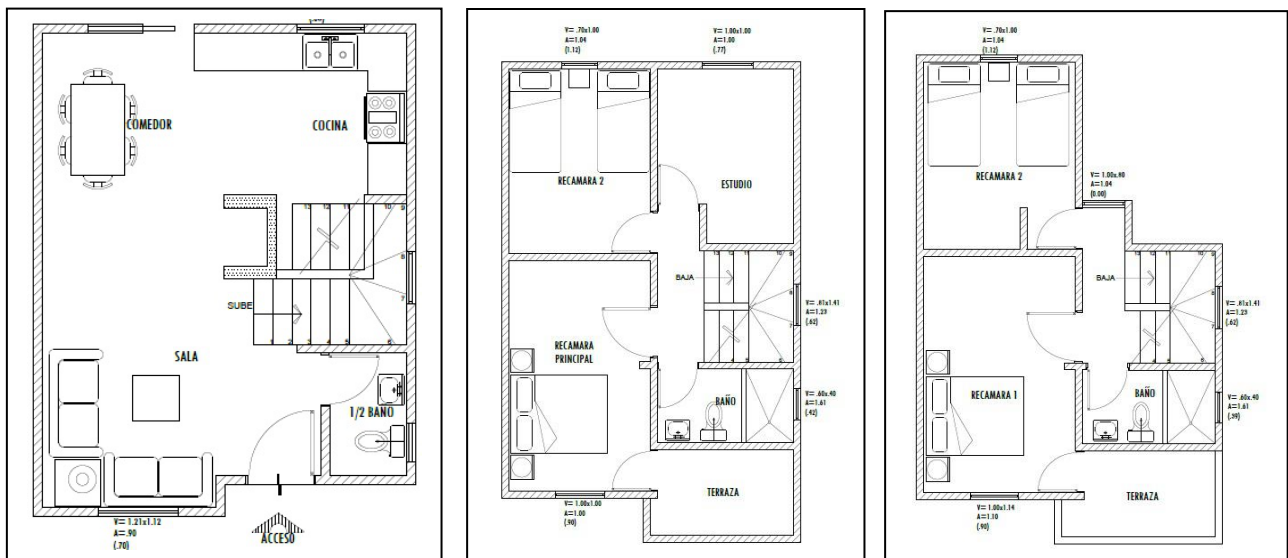


Fig. 1. Localización del sitio de análisis



a). Planta baja.

b). Planta alta, configuración 1

c). Planta alta, configuración 2

Fig. 2. Características arquitectónicas de viviendas monitoreadas a), b), y c).

## II. METODOLOGÍA

La determinación de  $T_E$  y  $T_0$  se basó en el empleo la técnica de cocientes espectrales H/V [3], la determinación de  $V_S$  se realizó mediante el Análisis Multicanal de ondas Superficiales (MASW) [4], la determinación de la densidad de muros se realizó conforme al procedimiento que dicta la Norma Mexicana NMX-C-192 [5], además se elaboró un modelo analítico empleando un software de estructuras denominado SAP 2000, el cual se construye con la arquitectura de la estructura, propiedades de los materiales, combinación de cargas actuantes, y el espectro sísmico del sitio.

El propósito de elaborar un modelo analítico de la estructura fue observar el comportamiento de la estructura, construido con los parámetros de diseño que establecen las Normas Técnicas Complementarias de la Ley de Edificaciones del Gobierno del Estado de Baja California, bajo un criterio lineal,

### A. Cocientes espectrales H/V.

Esta metodología permite determinar el período fundamental de vibrar, a partir del registro de vibraciones ambientales, con las que calculan los espectros de Fourier y las funciones de transferencia, derivadas del cociente de los espectros de amplitudes de Fourier horizontales, lateral (L) o transversal (T), en el numerador y la vertical (V) en el denominador. Esta técnica no hace uso de una estación de referencia, supone que el cociente de espectro o razón espectral de amplitudes horizontales (L ó T) y el espectro de amplitudes vertical (V) en la roca basal (1), corresponde a la función de transferencia de los niveles superficiales sometidos a movimientos horizontales [6],

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (1)$$

De donde,  $S_T$ , es la función de transferencia de estratos superficiales,  $S_{HS}$  y  $S_{VS}$  son el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontales y verticales, respectivamente.

Los registros de vibraciones ambientales se obtuvieron mediante un acelerómetro marca Kinemetrics K2 Altus, compuesto por una grabadora y sensor triaxial, el cual se coloca directamente sobre el suelo, firme de planta baja, de entepiso ó azotea, orientando la dirección X del sensor paralelo al sentido más largo, y al centro de cada losa. La comunicación entre la grabadora y la computadora se realizó mediante el software Quicktalk de Kinemetrics, el procesamiento de datos se realizó empleando el software Degtra A4 versión 5.1 [7] y una hoja de cálculo para la obtención de promedio y la construcción de gráficas de las funciones de transferencia.

### B. Análisis Multicanal de ondas Superficiales (MASW).

Es un método sísmico empleado en la investigación geofísica del suelo, que se utiliza para estimar las velocidades de ondas de corte o también conocidas como ondas S ( $V_S$ ), a partir de una fuente de energía artificial. La cual se genera en la superficie mediante un peso aproximado de 10 kilogramos [8]. En este estudio se utilizó un sismógrafo marca Sistronix modelo Raz-24 de 12 canales, el cual trabaja en conjunto con una computadora para el monitoreo de ruido, adquisición, control de calidad y almacenamiento de datos, además del tendido de 12 sensores llamados geófonos, separados uno del otro aproximadamente por un metro, los cuales registran las diferentes frecuencias de onda emitidas por la fuente artificial. Una vez que se han determinado las  $V_S$  estas se relacionan con los valores propuestos en el TABLA I, para establecer el tipo de sitio [9],

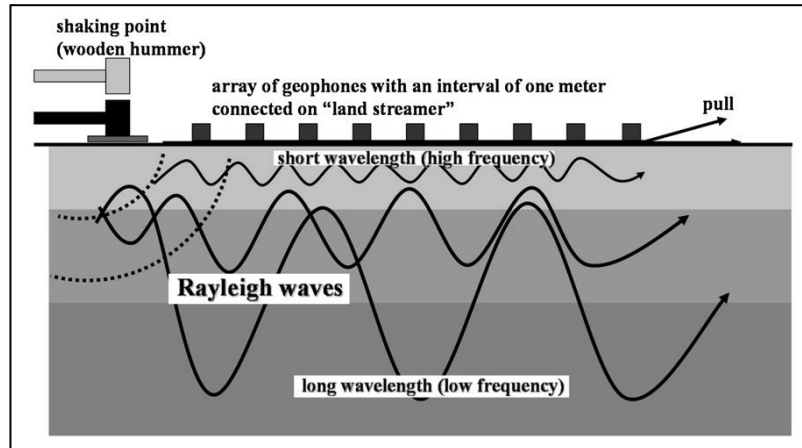


Fig. 3. Esquema del principio del Análisis Multicanal de Ondas Superficiales [4]

TABLA I. DETERMINACION DEL TIPO DE SUELO EN FUNCION  $v_s$  [9]

TIPO DE SUELO	PERFIL DE SUELO	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS PRIMEROS 30 METROS DE PROFUNDIDAD, SEGÚN SECCION 1613.5.5		
		Velocidad de onda de corte del suelo, $\bar{v}_s$ (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, $\bar{N}$ (número de golpes)	Resistencia al corte drenado del suelo, $\bar{s}_u$ (kg/m <sup>2</sup> )
A	Roca dura	$\bar{v}_s > 1,524$	N/A	N/A
B	Roca	$762 < \bar{v}_s \leq 1524$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso y roca blanda.	$366 < \bar{v}_s \leq 762$	$\bar{N} > 50$	$\bar{s}_u \geq 10,000$
D	Perfil de suelo rígido	$183 < \bar{v}_s \leq 366$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$5,000 \leq \bar{s}_u \leq 10,000$
E	Perfil de suelo blando	$\bar{v}_s < 183$	$\bar{N} < 15$	$\bar{s}_u < 5,000$

C. Densidad de muros.

De acuerdo con la NMX-C-192 [5], se establece la metodología para evaluar la uniformidad superficial del concreto In Situ, o delimitar áreas de diferentes resistencias utilizando un esclerómetro. El procedimiento consiste en colocar el esclerómetro en forma perpendicular sobre la superficie del concreto que se va a evaluar, dejando que se genere el impacto de la masa del martillo sobre la superficie, después del impacto, se oprime el botón pulsador y se toma la lectura. En este estudio se realizaron tres muestreos en cada fachada, por vivienda, cada muestreo está integrado aproximadamente por 25 impactos.

D. Modelo analítico estructural empleando software.

La elaboración del modelo de la estructura se realizó en el software de análisis de estructuras SAP 2000, el cual emplea la teoría de método de rigideces y elemento finito, para realizar análisis lineales y no lineales [10], para la elaboración del modelo en esta plataforma se requirió de capturar el proyecto arquitectónico, parámetros de diseño, propiedad de los materiales, la interacción de cargas internas y externas, para determinar el comportamiento mecánico y dinámico de las estructuras como un todo y de los elementos que lo integran.

Para este análisis se utilizó el software SAP 2000, un programa de computadora para el análisis dinámico y estático de sistemas estructurales, basado en el método de elemento finito [10]. Los parámetros de diseño considerados para la estructura a base de mampostería fueron:  $E = 7,000.00 \text{ kg/cm}^2$ , resistencia a la compresión  $f'c = 20.0 \text{ kg/cm}^2$ , peso volumétrico  $\gamma = 1,700 \text{ kg/m}^3$ , valor de ductilidad  $Q = 1.5$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0.2$ , coeficiente sísmico  $c = 0.38$ , combinación de cargas muertas, vivas y acción por sismo, y amortiguamiento  $\xi = 5\%$ , TABLA II.

TABLA II . PARAMETROS UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO ANALITICO ESTRUCTURAL EN SOFTWARE SAP 2000 [11]

Parámetro de diseño	Valor considerado	Observaciones
1. Módulo de elasticidad (E)	$E = 7,000.00 \text{ kg/cm}^2$	El módulo de elasticidad es una constante de proporcionalidad, y es la pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación del material en la región lineal [12]
2. Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	$\nu = 0.14$ Para la mampostería $\nu = 0.18$ Para la vigueta	Es un cociente de la deformación en dirección lateral entre la deformación en dirección axial [12]
3. Resistencia a la compresión del concreto utilizado en la vigueta ( $f'c$ ) [13]	$f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$	
4. Coeficiente sísmico c	0.29	La zona donde se encuentra el sitio de estudio es en la zona D, con un coeficiente sísmico $c = 0.29$ [11]
5. Valor de ductilidad empleado (Q), o factor de comportamiento sísmico	$Q = 1.5$	Se considera el valor de $Q = 1.5$ , por tratarse de una estructura mampostería de piezas huecas [11]
6. Consideración de combinación de cargas.	a. $1.1S_m + 1.1S_v + 1.1S_s$	La combinación de los efectos de cargas, empleando factores de carga Fc. De donde $S_m$ es la carga muerta, $S_v$ carga viva y $S_s$ acción debida a sismo [11]
7. Amortiguamiento $\xi$	5%	El amortiguamiento $\xi$ considerado como la capacidad del sistema estructural para la disipación de energía, para la estructura de análisis de estructura de concreto reforzado se considera el 5% [2]
8. Factor de escala ( $F_s$ )	Los $F_s$ utilizados para este análisis en la combinación 100%, 30% en las fuerzas accidentales son, $F_s = (g)(F_I) / (Q)(f_i)$ , $g = 9.81 \text{ kg/cm}^2$ , $F_I = 1$ , $Q = 1.5$ , $f_i = 1.5$ , para la combinación del 100% resulta $6.54 \text{ m/seg}^2$ , para la combinación del 30% resulta $1.96 \text{ m/seg}^2$ .	$F_s$ es una reducción de la aceleración de la gravedad en términos de $F_I$ que es el factor de importancia, $Q$ es la ductilidad, $f_i$ factor de irregularidad, definido por la expresión.



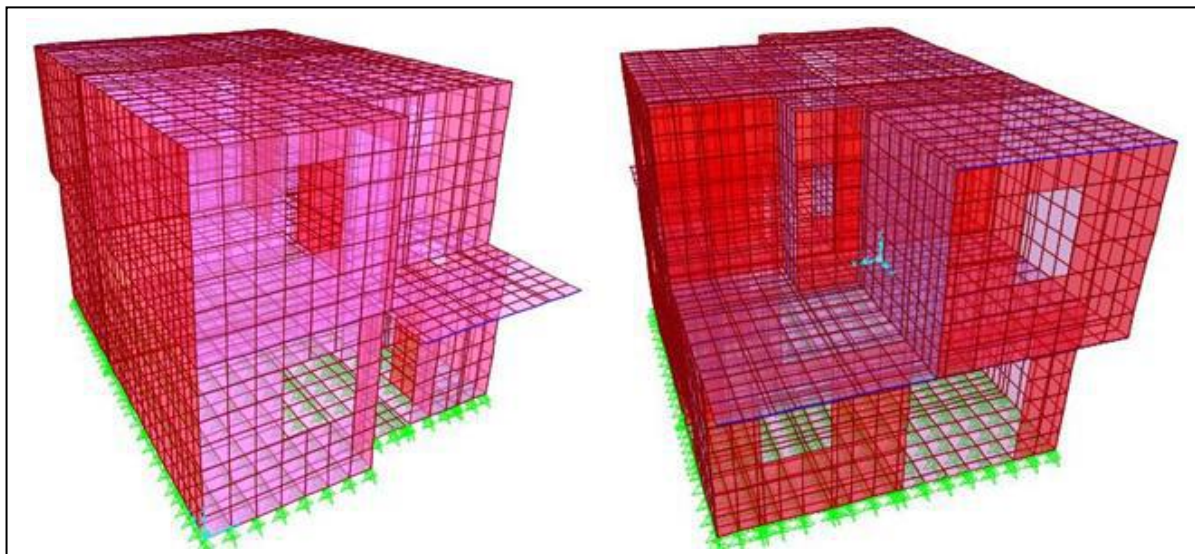


Fig. 4. Modelos analíticos estructurales de los dos tipos de viviendas.

### III. RESULTADOS

Una vez aplicada cada una de las metodologías descritas en la sección anterior, los resultados obtenidos al procesar los datos son:

#### A. Cocientes espectrales $H/V$ .

TABLA III. PERÍODOS FUNDAMENTALES DE VIBRAR DEL SUELO Y VIVIENDAS

Edificación o medio	Período Fundamental de vibrar (segundos)
<b>1. Suelo</b>	$T_0 = 0.427$ , Fig. 5.
<b>2. Vivienda rehabilitada</b>	
2.1 Centro de azotea	$T_E = 0.137$ , Fig. 6.
2.2 Azotea, esquina posterior	$T_E = 0.138$ ,
<b>3. Vivienda dañada, configuración 01</b>	
3.1 Centro de azotea	$T_E = 0.15$ , Fig. 7
3.2 Azotea, esquina posterior	$T_E = 0.15$
<b>4. Vivienda dañada, configuración 02</b>	
4.1 Centro de azotea	$T_E = 0.21$ , Fig. 8.
4.2 Azotea, esquina posterior	$T_E = 0.21$

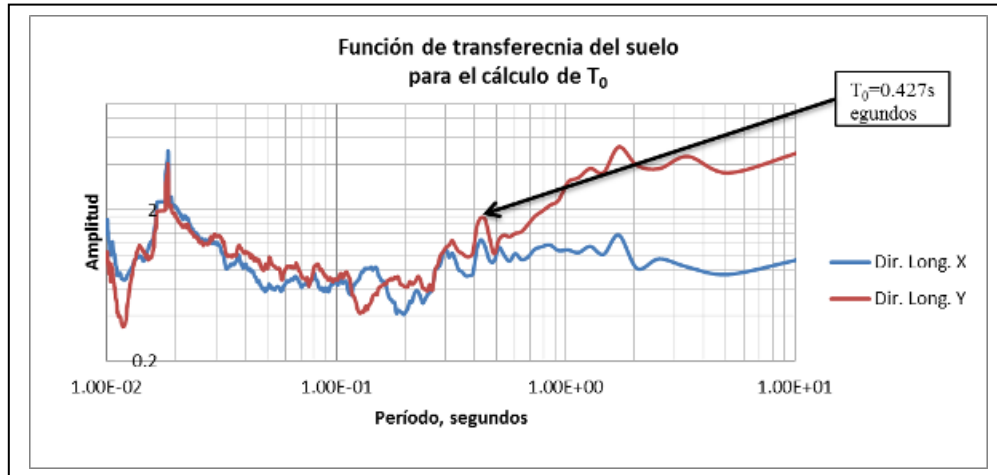


Fig. 5. Función de transferencia del suelo de desplante.

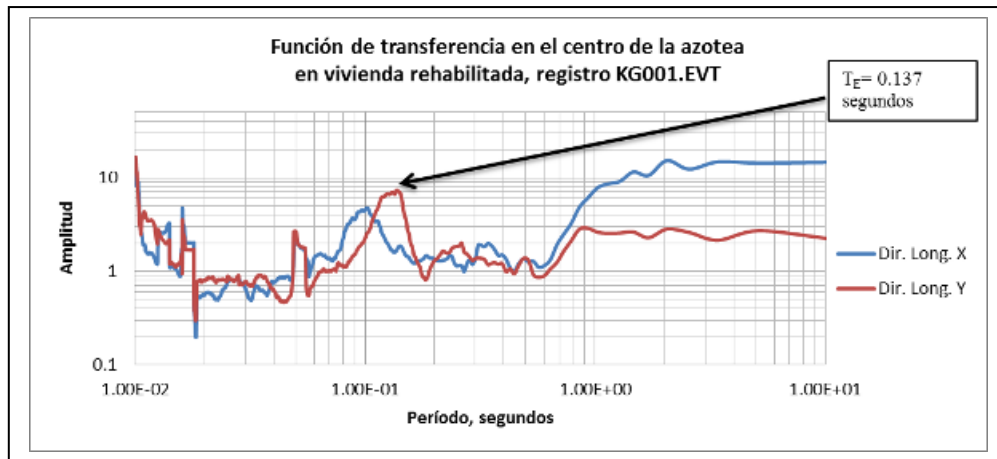


Fig. 6. Función de transferencia de vivienda rehabilitada, registro hecho en centro de azotea.

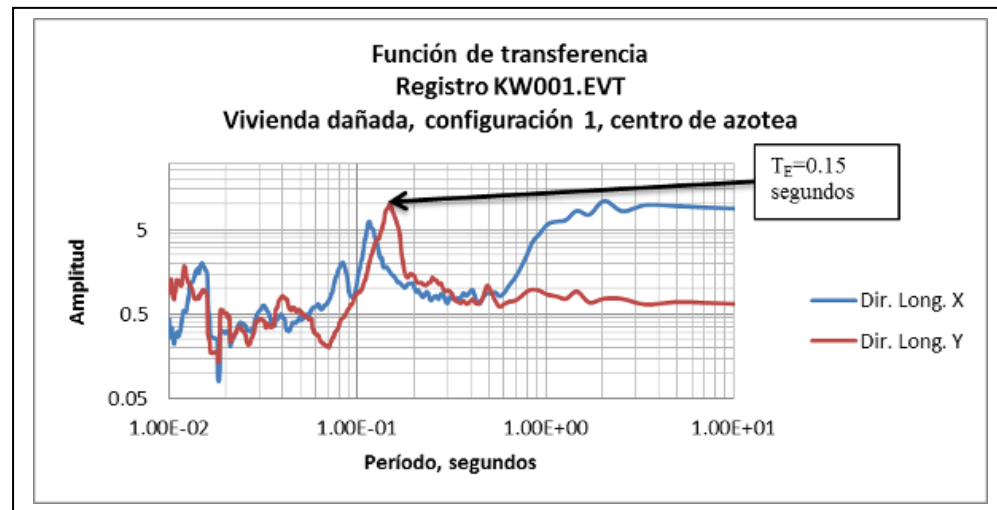


Fig. 7. Función de transferencia de vivienda dañada, configuración 1, registro hecho en centro de azotea.

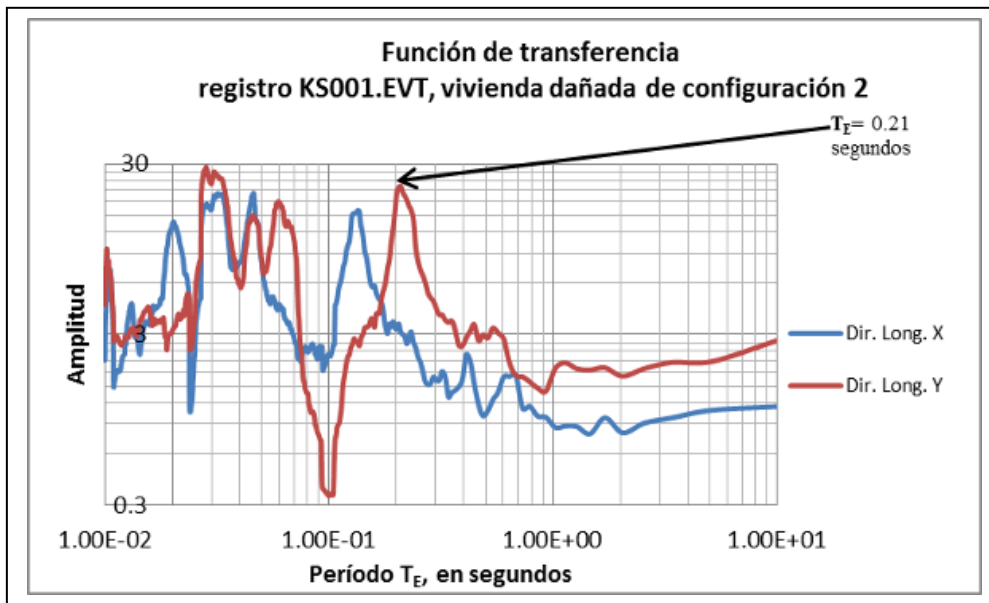


Fig. 8. Función de transferencia de vivienda dañada, configuración 2, registro hecho en centro de azotea.

**B. Analisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).**

Se obtuvieron tres secciones transversales del suelo de desplante, dos en el área de la vivienda rehabilitada, y la tercer sección en el área de las viviendas dañadas, a partir de la interpretación del comportamiento de las velocidades de la onda de corte  $V_S$ , según el análisis MASW. Los valores de  $V_S$  oscilan entre 122 y 262 m/seg, hasta una profundidad de 5 metros.

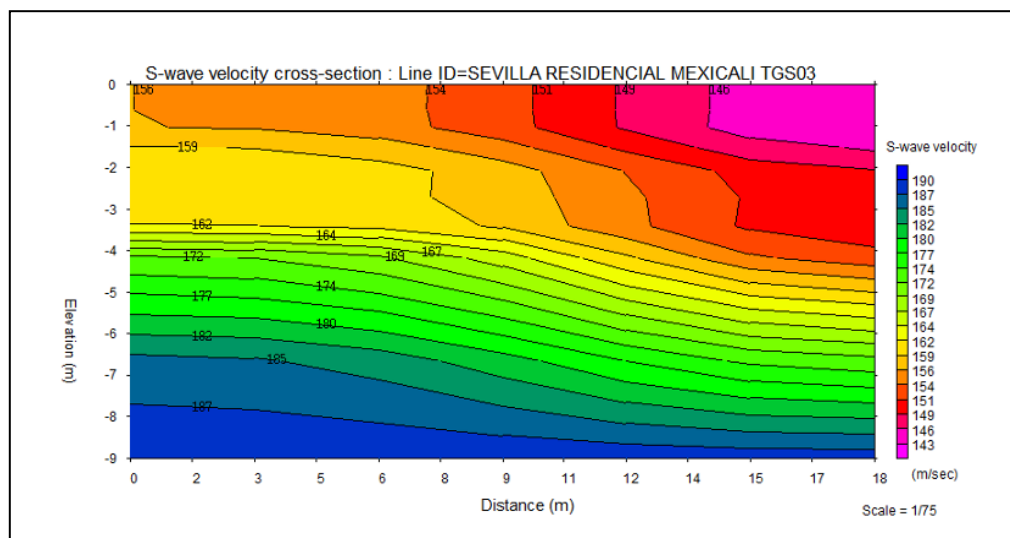


Fig. 9. Sección transversal de análisis MASW, en el área de vivienda dañadas

**C. Densidad de muros.**

De los registros obtenidos en cada uno de los muestreos, se realizó un análisis estadístico para conocer el comportamiento de la densidad de muros, mediante una distribución a través de un



histograma. En las figuras 10 y 11, se observan el comportamiento de la densidad en los muros muestreados de la vivienda rehabilitada y dañada,

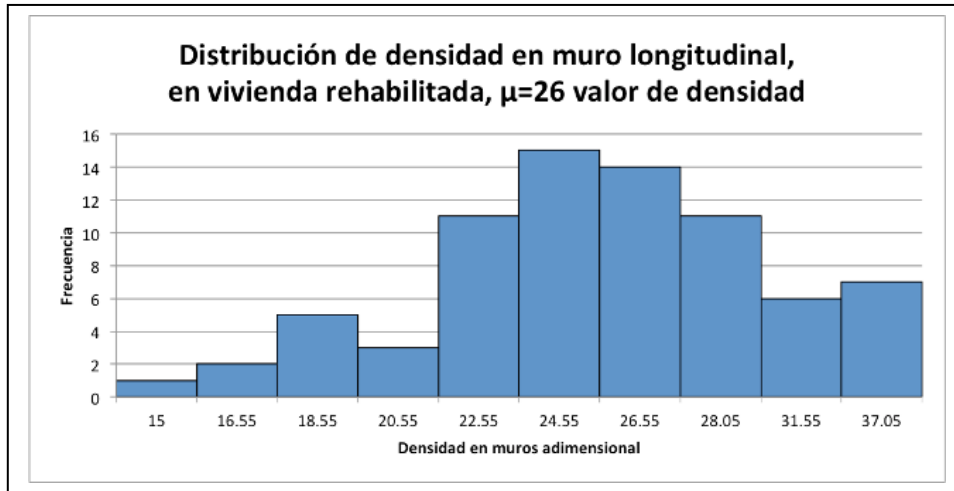


Fig. 10. Comportamiento de la densidad, en la vivienda rehabilitada.

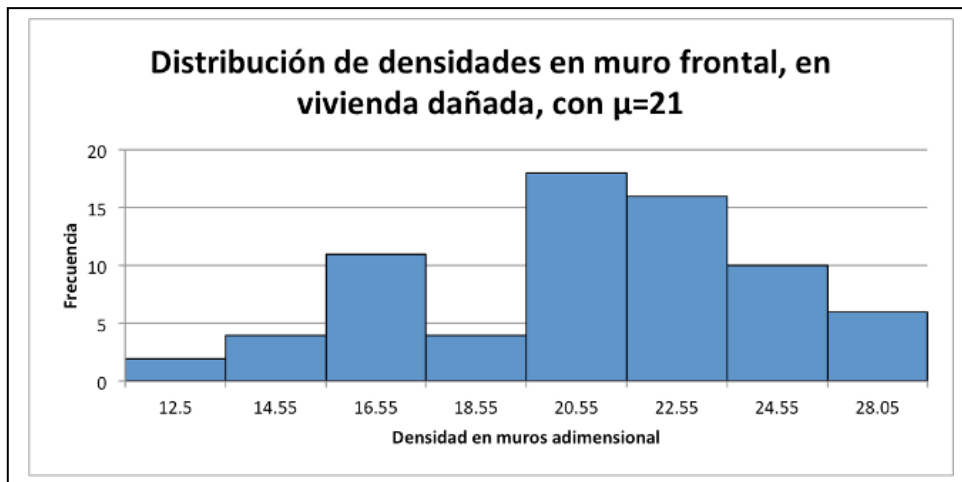


Fig. 11. Densidades en muro frontal de vivienda rehabilitada.

*D. Modelo analítico estructural empleando software.*

Una vez realizados los modelos analíticos estructurales en software SAP 2000, con las propiedades de materiales y combinaciones de carga, se obtuvo un rango del período fundamental de vibrar  $T_E$ , en el software, este período se observa como el modo de vibrar número 1, entre 0.22 a 0.24 segundos

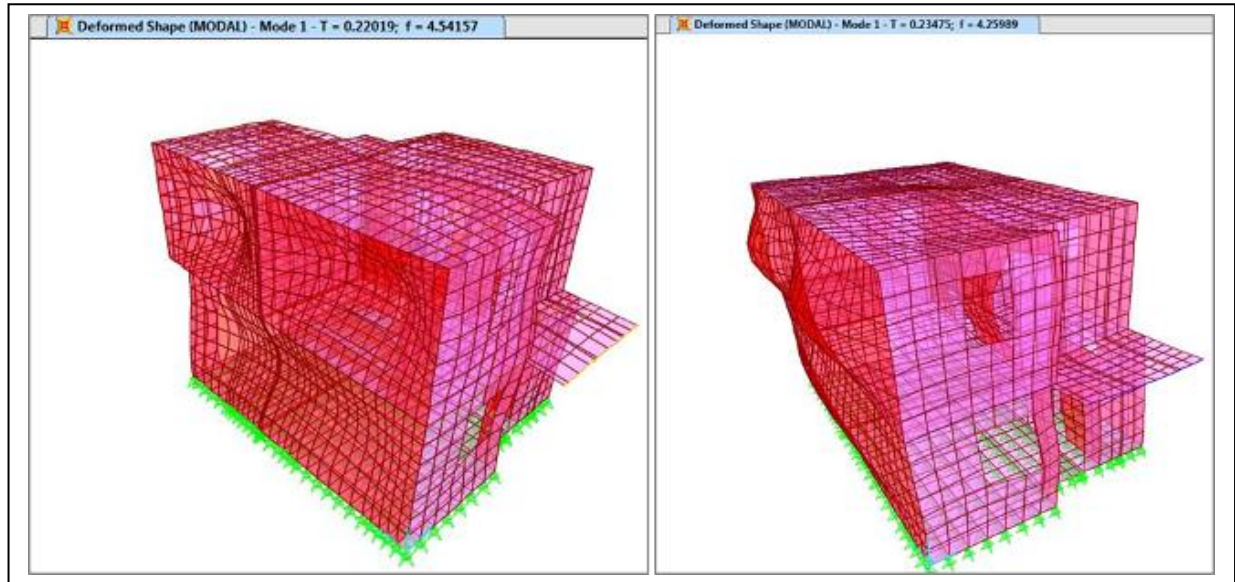


Fig. 12. Comportamiento del modelo analítico estructural elaborado en SAP 2000.

#### IV. DISCUSIONES

Los  $T_E$  obtenidos mediante la técnica de cocientes espectrales del monitoreo de las tres viviendas, se observa que hay una variación en este parámetro, con un valor menor en la vivienda rehabilitada respecto al de la segunda vivienda dañada, tabla III, destacando que esta última construcción presentaba más agrietamientos que la primera vivienda dañada que se monitoreó, incluyendo que en algunas áreas de los muros, partes de bloque se habían desprendido. El valor del primer modo calculado con el modelo analítico estructural que se encuentra entre un rango de 0.22 a 0.24 segundos, es aproximado al valor de  $T_E$  de la segunda vivienda monitoreada. En el análisis de la densidad de muros en las viviendas destaca que el comportamiento de este parámetro es más uniforme en la vivienda rehabilitada. Del comportamiento dinámico del suelo de desplante en función de su  $T_0 = 0.427$  segundos, se asocia a suelos blandos con algunos puntos de material duro, respaldado con las secciones transversales obtenidas con el análisis MASW, donde al menos en los primeros cinco metros se tiene un suelo blando a medianamente duro, de acuerdo con la tabla I.

#### V. RESULTADOS

La variación del período fundamental de vibrar en viviendas con estructura arquitectónica y condiciones de carga similar, pero con condiciones de daño distinto, lo podemos asociar a la degradación de la rigidez en la estructura, que a su vez podemos relacionar con las características de suelo de desplante de la siguiente manera: *estructuras con una degradación en su rigidez desplantadas en suelos mayormente blandos*. Si bien es cierto que el proceso de monitoreo de las estructuras continua, podríamos establecer una hipótesis, de que el comportamiento de las estructuras en estas edificaciones dado que tienen una degradación en su rigidez, genera un cierto potencial de vulnerabilidad de daño mayor, incluso colapso, ante la manifestación de un nuevo sismo con características similares al ocurrido el 04 de abril del 2010.

## RECONOCIMIENTOS

Consideramos importante dar las gracias a las empresas que apoyaron con el patrocinio para gastos de movilidad: Rj Ingeniería, Trabis, S.A de C.V., Metromat, RB Ingeniería. A la empresa Geoservicios por el apoyo con el préstamo de equipo para la aplicación de la metodología MASW, bajo la Coordinación del Ing. Marco A. Berumen Rodríguez e Ing. José Munguía Rodelo. Además de reconocer la participación activa de los alumnos de las carreras de Ingeniería y Arquitectura del Centro de Ingeniería y Tecnología, Unidad Valle de las Palmas de la Universidad Autónoma de Baja California, Roberto Ramírez Alcantar, Thalia Alejandra Serrano Morales, Brenda Alejandra Rivera González, Flor Yesica González Durán, Omar de Jesús Francisco Ceballos, Julio Juárez Hernández, Silvia García Campos, Diego Noé López Fabián y Néstor Vicente Gaspar Zarate.

## REFERENCIAS

- [1] SSN, "Reporte de Sismos fuertes," *www.ssn.unam.mx*, 2010. [Online]. Available: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/fuertes.jsp>. [Accessed: 10-Nov-2013].
- [2] E. Bazán and R. Meli, *Diseño sísmico de edificios*, 12.1 ed. México, Distrito Federal: Limusa, S.A de C.V, 2010, pp. 99–174.
- [3] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface." Railway Technical Research Institute/Tetsudo Gijutsu Kenkyujo, Tokyo Japan, pp. 25–33, 1989.
- [4] Y. Watabe and S. Sassa, "Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation," *Mar. Geol.*, vol. 252, no. 3–4, pp. 79–88, Jul. 2008.
- [5] ONNCCE, "NMX-C-192-1997-ONNCCE." Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación S.C., México, Distrito Federal, 1998.
- [6] R. Arroyo, S. Sánchez, R. Guinto, A. Salgado, J. Corona, A. Vargas, R. Cuenca, and M. Rodríguez, *La vivienda guerrerense de adobe*, Primera ed. Chilpancingo, Guerrero, México, 2010, pp. 11–31.
- [7] M. Ordaz, F. Castellanos, and A. Zapata, "Degtra A4, versión 5.1." Instituto de Ingeniería, UNAM, Distrito Federal, México, 2005.
- [8] C.-P. Lin, C.-C. Chang, and T.-S. Chang, "The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 24, no. 9–10, pp. 689–698, Oct. 2004.
- [9] I. C. Council, *International Building Code*. U.S.A, 2006, p. 303.
- [10] E. L. Wilson, K. J. Bathe, F. E. Peterson, and H. . Dovey, "SAP- A structural analysis program for linear systems," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 25, no. 2, pp. 257–274, 1973.
- [11] S. de I. y D. U. del E. de B. C. SIDUE, *Normas Técnicas Complementarias de la Ley de Edificaciones del Gobierno de Baja California*. 2013, pp. 225–348.
- [12] J. Gere and S. Timoshenko, *Mecánica de materiales*, Segunda ed. México, Distrito Federal: Grupo Editorial Iberoamérica, S.A de C.V, 1986, pp. 1–47.
- [13] DEACERO, "Manual Técnico de losa y vigueta y bovedilla," México, Distrito Federal, 2004.