

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS NO ESTRUCTURALES EN EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO EN EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE 2017

Santiago Pujol ⁽¹⁾ y Mario E. Rodríguez ⁽²⁾

RESUMEN

Se evalúa el desempeño observado de muros divisorios y de fachada durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Se pretende interpretar las razones de los daños observados en este terremoto para definir posibles cambios en normativas de construcción tanto en México, como en Latinoamérica, que lleven a un comportamiento aceptable de edificaciones no sólo para el terremoto de diseño, sino también para terremotos de menor intensidad, como fue el ocurrido en la Ciudad de México el 19 de septiembre 2017. Se estiman de manera aproximada las distorsiones de entrepiso de una población de edificios empleando un registro de aceleraciones obtenido en este terremoto, y los resultados se comparan con distorsiones permisibles para la población de edificios y para dos casos de estudio seleccionados para esta investigación.

Palabras Clave: Daños por sismo; edificios; elementos no estructurales; distorsiones de entrepiso

EVALUATING THE BEHAVIOR OF NONSTRUCTURAL WALLS IN MEXICO-CITY BUILDINGS IN THE SEPTEMBER 19, 2017 EARTHQUAKE

ABSTRACT

The response of masonry infill walls to motions caused by the September 19, 2017 earthquake in Mexico City is evaluated. Plausible reasons for the observed damage are studied. Changes to design codes used in Mexico and Latin America are proposed to try to produce more acceptable behavior of buildings in the design earthquake and in earthquakes of smaller intensity such as the earthquake of September 19, 2017. Estimates of story drift are obtained using an acceleration record from this earthquake and the results are compared with allowable drift for a generic case and for two specific examples.

Keywords: masonry; partitions; earthquake; drift

Artículo recibido el 25 de septiembre de 2018 y aprobado para su publicación el 31 de diciembre de 2019. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Purdue University, West Lafayette, Indiana, Estados Unidos, spujol@purdue.edu

⁽²⁾ Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, CP 04510, México DF, mrod@unam.mx

INTRODUCCIÓN

A los muros divisorios, así como a los elementos de fachadas, generalmente se les considera como “no estructurales”, y en general no se toman en cuenta en el proceso del análisis de la respuesta del edificio a demandas sísmicas. El tipo de edificio que se estudia en este trabajo es muy común en México, y también en varios países en Latinoamérica, y se caracteriza por el empleo de estructuras de marcos de concreto reforzado, con muros divisorios de ladrillo o bloque de concreto, instalados después de la construcción de los marcos. Interesa conocer el comportamiento sísmico de estos edificios considerando el efecto de los muros mencionados. Cuando los muros se interrumpen en el nivel planta baja, lo que en general se hace con el fin de contar con espacio para estacionamiento, se produce el llamado efecto de “planta baja débil”. Como se muestra más adelante, esta característica aumenta de manera considerable la demanda de distorsiones de entrepiso en la planta baja del edificio.

En este trabajo se describe el comportamiento observado de muros divisorios y de fachada durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. El objetivo es entender las razones de los daños observados con el fin de aprovechar esta experiencia para definir posibles cambios necesarios en normativas de construcción tanto en México, como en Latinoamérica. Se busca que estos cambios lleven a un comportamiento aceptable de edificaciones no sólo para el sismo de diseño, sino también para sismos de menor intensidad, como fue el ocurrido en la Ciudad de México en septiembre 2017. Para lograr el objetivo deseado se compara la demanda estimada de distorsión de entrepiso durante el terremoto en estudio con distorsiones permisibles (asociadas con niveles de daño). La distorsión de entrepiso se define como la diferencia de desplazamientos laterales de dos niveles consecutivos dividida por la altura de entrepiso.

EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN LA CIUDAD DE MÉXICO

El 19 de septiembre 2017 ocurrió un terremoto de magnitud M_w 7.1 en México del tipo intraplaca, con epicentro en el Estado de Morelos, a aproximadamente 120 km de la Ciudad de México. El terremoto causó el colapso de aproximadamente 40 edificaciones, así como daños severos en más de 350 edificaciones. Estos números se estimaron de acuerdo con los datos obtenidos por ingenieros especialistas en estructuras distribuidos en alrededor de 35 brigadas que inspeccionaron edificaciones en la Ciudad de México. Esta labor la llevaron a cabo sociedades técnicas como la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE) y fue coordinada por el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM). La fig. 1 muestra la ubicación de los edificios mencionados, así como la zonificación sísmica de la Ciudad de México vigente desde 2004 (NTCS, 2004). Como muestra la fig. 1, estos daños y colapsos se concentraron principalmente en zonas de transición o en zonas de suelo blando (zonas II y IIIa en la fig. 1, respectivamente) con periodos naturales en el intervalo de 1 s a 1.5 s (zonas II, IIIa, IIIb). Se debe considerar que en la zona con más daños existen más edificios (con más de 3 niveles) que en otras zonas de la ciudad con suelos más blandos (zonas IIIc, IIIId). Por esto resulta difícil atribuir la concentración de daño sólo a las propiedades del suelo. En zonas con suelos rígidos y roca (zona I) no hubo daño severo y la intensidad del movimiento de terreno medida fue mucho menor.

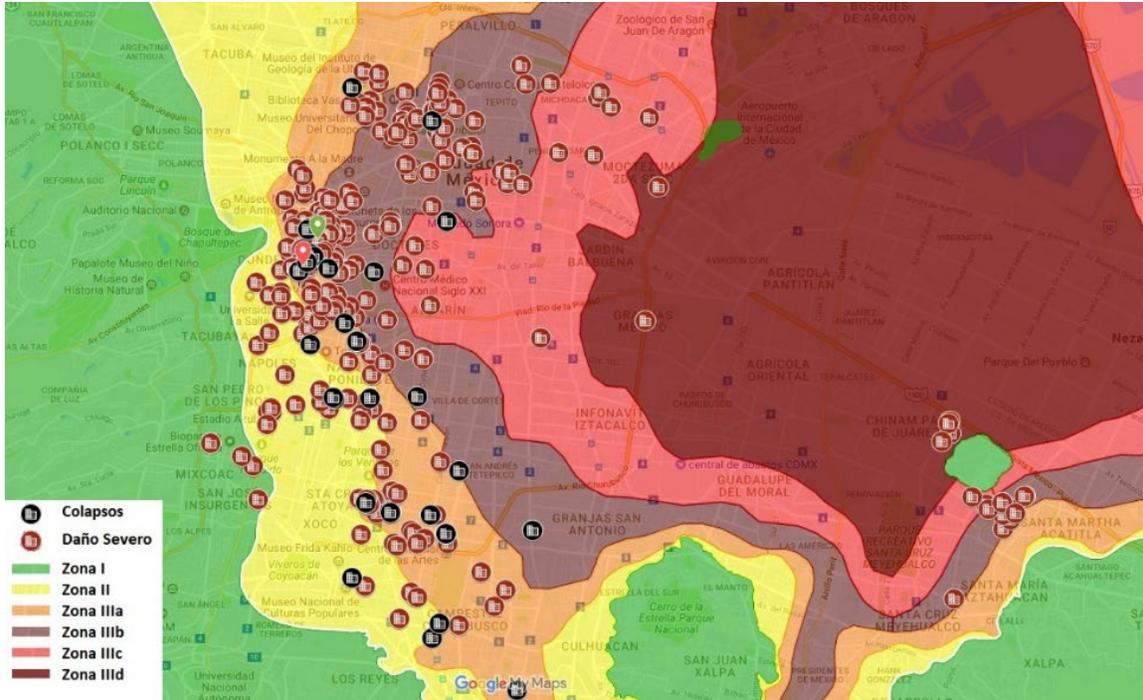


Figura 1. Ubicación de edificios con colapsos o daños severos causados por el terremoto del 19 de septiembre 2017 y zonificación geotécnica

La fig. 2 muestra el número de colapsos en este evento en función del número de niveles. Esta figura indica que todos los edificios con colapsos tenían menos de 10 niveles, y la gran mayoría ya habían experimentado el terremoto M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985, el cual fue del tipo de subducción interplaca (Berrón, 2018).

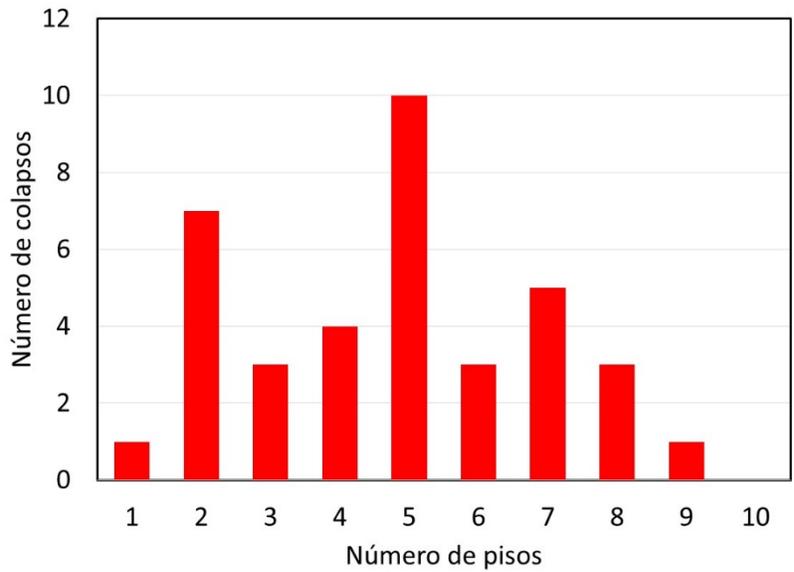


Figura 2. Número de colapsos vs. número de pisos

Estos colapsos en el terremoto de septiembre 2017 produjeron la muerte de más de 200 personas en la Ciudad de México. Como en estos casos de colapsos, la mayor parte de casos de daños severos estructurales y no estructurales ocurrieron en edificaciones de menos de 10 niveles construidas antes de 1985. El sistema estructural típico de la mayoría de estas edificaciones es a base marcos de concreto reforzado, con muros de mampostería divisorios, en muchos casos con la llamada “planta baja débil”. Una característica típica de edificaciones a base de marcos es su poca rigidez lateral causada en parte por el uso de vigas de bajo peralte embebidas en losas reticulares, problema que se agrava si ellas tienen “planta baja débil”, como se ilustra en lo que sigue. En casos extremos la losa reticular no tiene vigas. Como se muestra más adelante, el empleo de muros divisorios continuos en edificios a base de marcos y con una buena densidad de estos muros, aumenta de manera considerable la rigidez lateral del edificio,

La fig. 3 muestra un marco regular con altura de entrepiso, h , constante, con muros divisorios en todos los niveles, fig. 3a, así como el caso donde se interrumpen estos muros en la planta baja, fig. 3b. En el primer caso, si δ es el desplazamiento máximo del nivel azotea del edificio, la distorsión global, D_r , se define como:

$$D_r = \frac{\delta}{H} \quad (1)$$

donde H es la altura del edificio. Para este caso se puede mostrar que la distorsión de entrepiso, d_r , a la cual se le asocia los daños en muros divisorios, tendría valores algo mayores que el valor de la distorsión global, D_r . Sin embargo, para el caso de “planta baja débil”, fig. 3b, si se considera de manera simplista que el desplazamiento δ se concentra en el nivel planta baja, se puede mostrar que para un sismo de intensidad alta, en este nivel el valor de la distorsión de entrepiso, d_r , sería casi igual a $N D_r$, donde N es el número de niveles del edificio- Esta es una distorsión extremadamente grande que podría llevar al colapso del edificio debido al colapso de las columnas de planta baja, como se pudo apreciar en el terremoto en estudio.

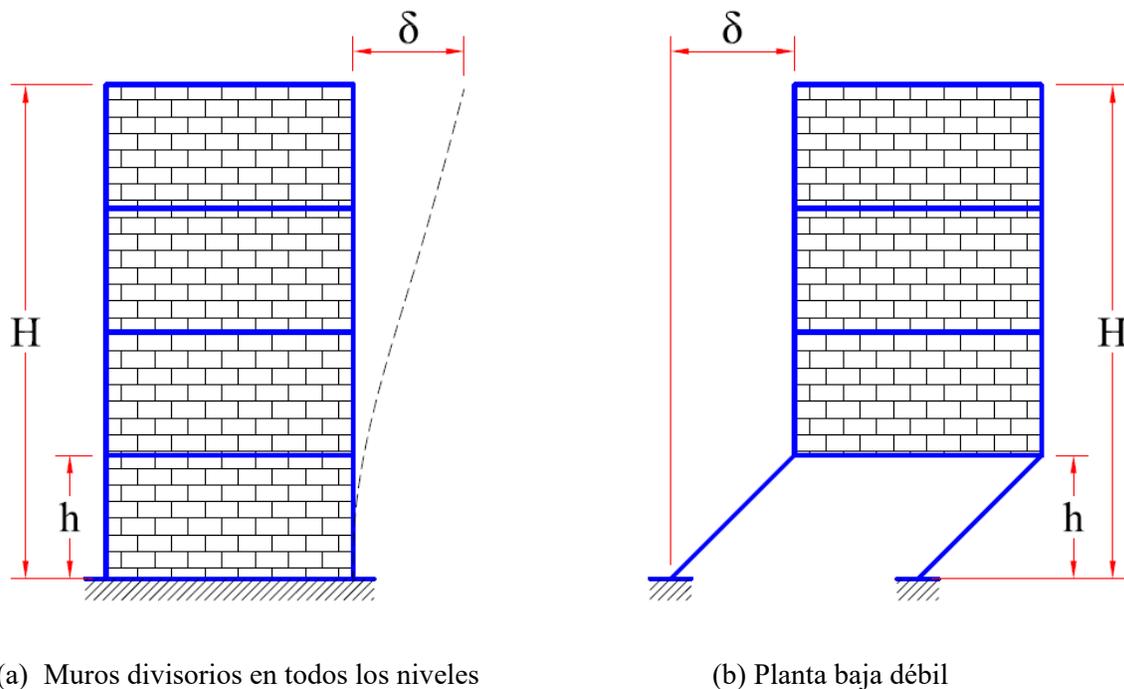


Figura 3. Desplazamientos laterales en edificios a base de marcos con muros divisorios en todos los niveles, y con planta baja débil

EDIFICIOS CON DAÑOS EN MUROS DIVISORIOS

La fig. 4 muestra la ubicación de los dos casos de estudio seleccionados, correspondientes a los edificios Oaxaca 80 y Amsterdam 82 en la Ciudad de México, los que sufrieron daños en elementos no estructurales durante el terremoto de 2017. El sistema estructural sismorresistente de estos edificios era típicamente a base de marcos de concreto reforzado, con muros divisorios, y en general con menor densidad de muros divisorios en la dirección paralela a la calle, principalmente en la planta baja. El edificio Oaxaca 80 también presentó daños en elementos estructurales. Los edificios Oaxaca 80 y Amsterdam 82 son de 7 y 8 niveles, respectivamente, y se seleccionaron por su cercanía a la estación Roma, donde se obtuvieron registros de aceleraciones en el terremoto del 19 de septiembre de 2017 (Cires). Estos edificios fueron parte de un estudio hecho por varias universidades de EEUU (Behrouzi et al., 2019) en el que, entre otras actividades, se hicieron mediciones de periodos fundamentales de vibración en una docena de edificios representativos. Como se muestra más adelante, estas mediciones indican que los muros divisorios continuos (sin ventanas ni interrupciones de cimentación a techo) como los que usualmente se usan a lo largo de linderos perpendiculares a la calle, pueden llegar a aumentar la rigidez de una estructura de marcos por un factor de casi 4 en edificios de 10 o menos niveles. El periodo se reduce entonces casi a la mitad del periodo de la estructura sin muros.

La investigación de este trabajo considera muros de mampostería (o tabique) de arcilla hechos con piezas macizas típicos en la Ciudad de México. La mampostería hueca tiene menor rigidez (aproximadamente proporcional al área neta de la sección transversal del ladrillo).

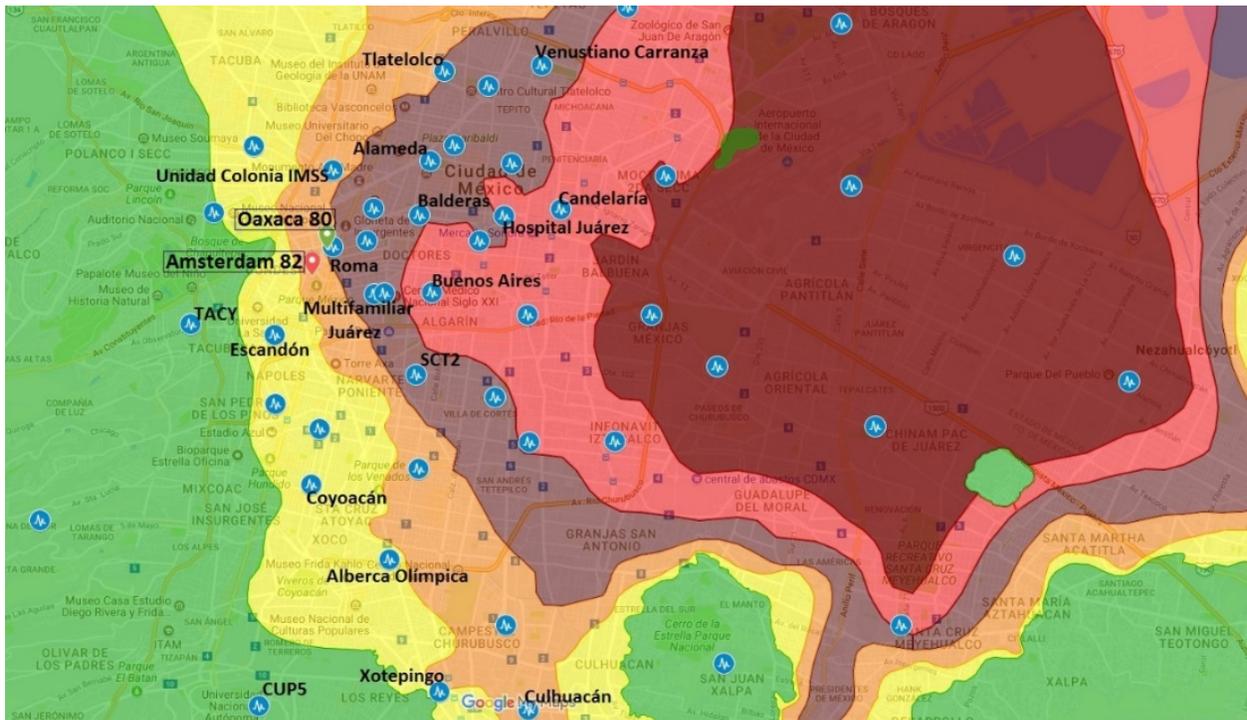


Figura 4. Ubicación de los edificios Oaxaca 80 y Amsterdam 82 en la Ciudad de México, y estaciones (en círculos) que registraron aceleraciones de terreno en el terremoto del 19 de septiembre 2017

El periodo medido en la dirección perpendicular a la calle fue en promedio cercano a $N/15$ (fig. 5). Si se tiene en cuenta que las mediciones se hicieron después del terremoto, se infiere que el periodo inicial de algunos edificios podría haber tenido valores cercanos o mayores que $N/20$. Ese tipo de rigidez se ha observado en estructuras con altas densidades de muros de concreto reforzado en Chile (Wallace y Moehle, 1992). Un factor que hace a los muros de mampostería tan eficientes en los edificios estudiados en México en la dirección perpendicular a la calle es su baja relación de altura a largo. Esta relación usualmente es menor que 2, ya que la altura máxima para un edificio de 10 niveles rara vez supera 30 m y el lote típico en México tiene unos 15 a 30 metros de largo (igual en este caso a la longitud horizontal del muro divisorio en el lindero perpendicular a la fachada).

La fig. 5 muestra la relación entre los periodos fundamentales medidos en función del número de niveles para un grupo de edificios estudiados que fueron afectados por el terremoto del 19 de septiembre de 2017 (Behrouzi et al., 2019). De acuerdo con los resultados de la fig. 5 el periodo medido en la dirección paralela a la calle fue en promedio cercano a $N/8$. En esta dirección, en general hay pocos muros continuos, excepto alrededor de un núcleo de escaleras y ascensores.

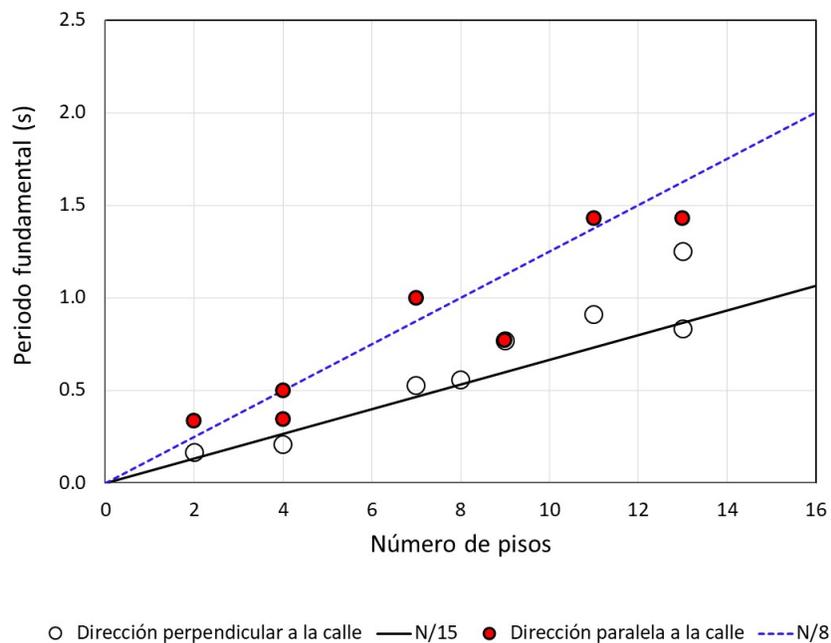


Figura 5. Periodos estimados de vibraciones ambientales registradas después del terremoto del 19 de septiembre de 2017

Las figs. 6 y 7 muestran fotografías de daños típicos observados en los edificios Oaxaca 80 y Amsterdam 82, respectivamente, después del terremoto del 19 de septiembre de 2017.



Figura 6. Daños observados en elementos estructurales y no estructurales en el edificio Oaxaca 80 (dirección paralela a calle)



Figura 7. Daños observados en elementos no estructurales en el edificio Amsterdam 82 (dirección paralela a calle)

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MUROS DIVISORIOS CONSIDERADOS COMO ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

Es común que los muros divisorios y de fachada en edificios de marcos se consideren como elementos no estructurales, y que no se tomen en cuenta en el estudio de la respuesta sísmica de edificios ante eventos sísmicos. Además, en muchos casos, en los planos para construcción no se indican detalles de separación entre el muro divisorio y el marco que lo rodea, en otros casos, cuando se indica en los planos separaciones entre muros y marcos, éstas se ignoran o no se toman en cuenta de manera adecuada durante la construcción de estos muros.

Por otro lado, cuando se separa la mampostería del marco se corre el riesgo de que el muro sufra volcamiento porque se pierde el efecto de arco que permite al muro resistir demandas laterales. A la vez, si se separa la mampostería del marco se pierde el efecto rigidizante, por lo que aumentaría el periodo fundamental y las distorsiones de entrepiso. En ese caso el marco típico resulta demasiado flexible y debería ser provisto con muros de concreto estructural para controlar estas distorsiones.

El daño por sismo en muros divisorios se debe a que los desplazamientos laterales en la estructura causan distorsiones en estos muros. Las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo en la Ciudad de México de 2004 (NTCS, 2004), vigentes en la fecha del terremoto del 19 de septiembre de 2017, permitían distorsiones de entrepiso para el sismo de diseño menores o iguales a 0.6 % en marcos con muros divisorios no estructurales ligados a los marcos. Como los espectros de diseño de las NTCS (2004) no eran “transparentes”, en realidad la distorsión máxima permitida en estos casos sería igual a 1.2%. Este valor se obtiene multiplicando el valor 0.006 especificado por las NTCS (2004) por el factor de sobrerresistencia, el cual en este estudio se consideró igual a 2. Con el mismo razonamiento se puede mostrar que para muros divisorios desligados de los marcos, el valor de la distorsión efectiva máxima permitida por las NTCS (2004) sería igual a $1.2\% \times 2 = 2.4\%$.

Normativas como la ASCE 7-16 (ASCE 7-16, 2016) permiten distorsiones en muros de mampostería que quizá puedan ser apropiadas para la práctica constructiva en Estados Unidos, lo que se confirmará o no en un terremoto, pero no lo son para muros divisorios hechos con mampostería en México o en otros países en Latinoamérica. En estos casos los muros divisorios o elementos de fachada son elementos rígidos y frágiles, características típicas de muros a base de bloques de concreto o de ladrillo de arcilla.

La fig. 8 (Algan, 1982) muestra valores de un índice de daños en muros ligados a un marco en función de la distorsión de entrepiso. En la fig. 8, el eje de las abscisas representa la distorsión del muro, y el eje de ordenadas representa la intensidad del daño. Esta intensidad se define como el cociente del costo de la reparación de un muro dañado entre el costo de un muro nuevo. Estos resultados indican que en muros divisorios de bloque de concreto o ladrillo, distorsiones de entrepiso tan pequeñas como 0.3% llevarían a un costo de daños en estos muros de más del 50% del costo de construir nuevos muros, y para distorsiones de entrepiso mayores que alrededor de 0.8%, el costo del daño o de reparación de muros sería casi el 100% del costo de muros nuevos.

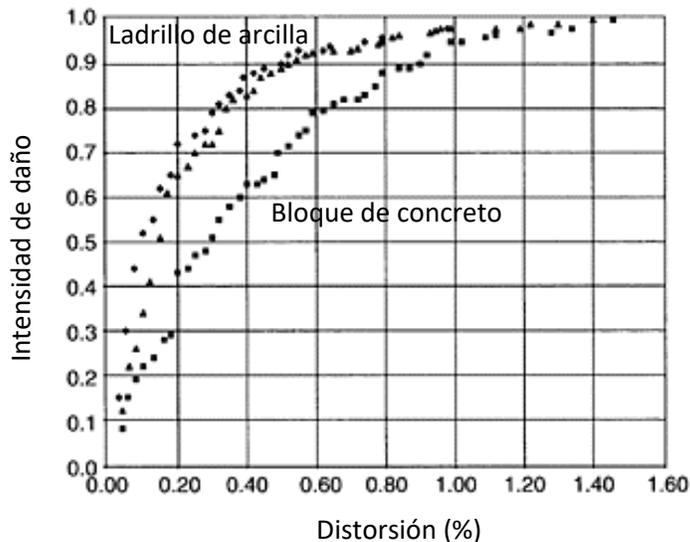


Figura 8. Intensidad de daño versus distorsión de entrepiso en marcos con muros divisorios (Algan, 1982)

Como se ha mencionado, las distorsiones de entrepiso máximas permitidas por las NTCS-2004 serían aproximadamente iguales a 1.2% y 2.4% para muros divisorios ligados y desligados al marco, respectivamente. De acuerdo con los valores de distorsiones de entrepiso que causan daños en muros divisorios dados por Algan (1982) que aquí se comentan, es claro que las distorsiones de entrepiso permitidas por las NTCS-2004 excederían por un factor de hasta tres el valor anteriormente comentado de 0.8%, el cual corresponde a un costo de daños en muros divisorios aproximadamente igual al costo de un muro nuevo. Se infiere que, para el sismo de diseño, las distorsiones de entrepiso permitidas por las NTCS-2004 en las edificaciones en estudio, tendrían valores que sugieren no sólo daño estructural severo, sino también daños severos en muros divisorios e incluso el colapso de estos muros.

El caso del terremoto del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, cuyas demandas fueron en general menores que las correspondientes al sismo de diseño de la NTCS-2004 (Rodríguez, 2019), y en el que se observó una cantidad considerable de daños en muros divisorios o de fachada, muestra claramente la necesidad de limitar las distorsiones de entrepiso a valores menores que las permitidas por las NTCS-2004. Los habitantes de las edificaciones para vivienda seriamente afectadas por el terremoto del 19 de septiembre de 2017, y que tuvieron que desalojar sus viviendas, difícilmente considerarían como algo aceptable que sus edificaciones cumplieron con la normativa vigente, y que sin embargo se dañaron seriamente, causándoles grandes pérdidas económicas e incluso la pérdida de vidas.

Es relevante revisar si las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de 2017 para la Ciudad de México (NTCS, 2017), en el aspecto de distorsiones máximas permitidas, son significativamente diferentes a las especificadas por la NTCS-2004. La NTCS-2017 se empezó a emplear en 2018, y por primera vez en México se emplean espectros “transparentes” en su cuerpo principal. Esta normativa especifica dos niveles de revisión de distorsiones de entrepiso en edificios. El primer nivel tiene como objetivo limitar el daño en sismos frecuentes, y la distorsión máxima permitida es 0.002 cuando los muros divisorios están ligados a los marcos. El segundo nivel tiene como objetivo limitar el daño en elementos estructurales para el sismo de diseño, y en el caso de marcos de concreto reforzado con muros divisorios ligados a los marcos, las distorsiones máximas permitidas varían entre 1.0% y 2%. Estos dos últimos valores no son muy diferentes a los valores máximos de distorsiones especificadas por la NTCS-2004, por lo que la necesidad de limitar las distorsiones máximas en edificios comentada para la NTCS-2004, también sería aplicable a la NTCS-2017 si se quiere limitar el daño en el sismo de diseño, y así disminuir el tiempo necesario para restablecer las operaciones de la ciudad.

En lo que sigue se estiman las posibles distorsiones de entrepiso que habrían ocurrido en edificios con marcos de concreto reforzado y muros divisorios durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Se estudian los casos de los edificios en Oaxaca 80 y Amsterdam 82, que mostraron daños en elementos no estructurales como muros divisorios o elementos de fachada. Estas estimaciones de distorsiones de entrepiso se comparan con las que causan daños severos o colapsos de estos elementos no estructurales.

COMPARATIVA DE ESTIMACIONES DE DEMANDAS DE DISTORSIONES DE ENTREPISO Y DISTORSIONES PERMISIBLES EN EDIFICIOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO DURANTE EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE 2017

Para un estudio riguroso del estudio de la respuesta de un edificio a un registro específico de aceleraciones del terreno se suele considerar necesario un análisis dinámico no lineal. Sin embargo, las incertidumbres relacionadas, tanto con la demanda sísmica, como con la respuesta estructural, tienden a contrarrestar la supuesta fidelidad de tales análisis. En este estudio, la respuesta dinámica de las edificaciones se estima empleando un modelo simple de la estructura. Este modelo es el llamado sistema de

un grado de libertad (1GDL), el cual para el registro de aceleraciones en estudio tiene el desplazamiento espectral (máximo) igual a S_d . Se puede mostrar el desplazamiento máximo de techo en el edificio, δ , se puede obtener con el producto ΓS_d , donde Γ es el factor de participación del primer modo. Para el cómputo de este parámetro, en este trabajo se emplea el procedimiento especificado por la ASCE/SEI 7-16 (ASCE 7, 2016) para el cómputo de Γ con fines de diseño sísmico de diafragmas en edificios. La ec. 1 muestra que para obtener D_r es necesario conocer además la altura H del edificio. Como en este trabajo se intenta estudiar la respuesta de una población de estructuras, no solo la de los dos edificios seleccionados, se requiere una altura generalizada H . Para la población de estructuras a base de marcos en estudio, el periodo fundamental, T , se considera que se puede obtener mediante el empleo de los resultados mostrados en la fig. 5. En la dirección crítica, i.e. la dirección paralela a la calle, en la que hay menos muros de mampostería continuos, se tiene:

$$T = \frac{N}{8} s \quad (2)$$

La altura del edificio H se puede considerar aproximadamente igual a $N h$. Con el empleo de la ec. 2, el número de niveles del edificio se estima como $N = 8 s^{-1} \times T$, y considerando $h = 3$ m, la altura H sería igual a $8 s^{-1} \times T \times 3 \text{ m} = 24 T$ (m), con lo cual de la ec. 1 la distorsión global (o de techo) máxima D_r sería igual a:

$$D_r = \frac{\Gamma S_d}{8 s^{-1} T(3m)} = \frac{\Gamma S_d}{24 m / s * T} \quad (3)$$

donde las unidades de S_d y $24T$ están en metros, y T en segundos. Para la estimación de la distorsión máxima de entrepiso, d_r , se considera que un posible límite inferior de este parámetro está dado por (Cecen, 1979; Miranda, 1999):

$$d_r = 1.5 D_r \quad (4)$$

Como se ha comentado, en un edificio con planta baja débil el valor de d_r podría ser bastante mayor que el valor dado por la ec. 4. Además, la respuesta no lineal puede ser mayor o menor que la respuesta lineal dependiendo del intervalo de periodos fundamentales de la estructura.

La fig. 9 muestra valores calculados para la distorsión de entrepiso, d_r , empleando las ecs. 3 y 4, para un valor de la fracción de amortiguamiento crítico igual a 2%, y utilizando el registro de aceleraciones horizontales EO obtenido en la estación Roma en el terremoto del 19 de septiembre de 2017. El primer paso del procedimiento empleado era el cómputo de espectros de desplazamientos S_d para el sismo empleado, para los valores de μ seleccionados. Para generar los resultados de la fig. 9, para el valor de T seleccionado, en el intervalo de 0 a 3 s, se obtenía el valor de S_d del paso anterior, con el mismo periodo se calculaba Γ , y estos valores se reemplazaban en la ec. 3 para obtener D_r , y posteriormente d_r con la ec. 4.

La fig. 9 muestra valores de d_r calculados para ductilidades de desplazamiento, μ , correspondiente al caso elástico ($\mu=1$), y para los valores 2 y 4 correspondientes a la respuesta no lineal. Para fines comparativos entre demanda y capacidad de distorsión de entrepiso, esta figura muestra los límites de capacidad de distorsiones en muros iguales a 0.3% y 0.8%, comentados anteriormente. También la fig. 9 muestra con líneas verticales punteadas, y punto y raya, estimaciones de los periodos fundamentales de los dos edificios seleccionados para este estudio. Los resultados indican que, en estos edificios, la distorsión de entrepiso producida por el sismo fue mayor que el límite 0.3% (valor para el cual de acuerdo con Algan (1982), el costo de las reparaciones sería 50% del costo del remplazo de los muros). Los resultados también muestran que las distorsiones de entrepiso en los dos edificios seleccionados habrían sido cercanas al límite 0.8% para

el cual se espera que la reparación sea casi tan costosa como el remplazo de los muros. En columnas de CR con poco refuerzo transversal se podría esperar que las distorsiones estimadas resultaran en daño estructural como la falla de corte en una columna observada en el edificio Oaxaca 80 (fig. 6).

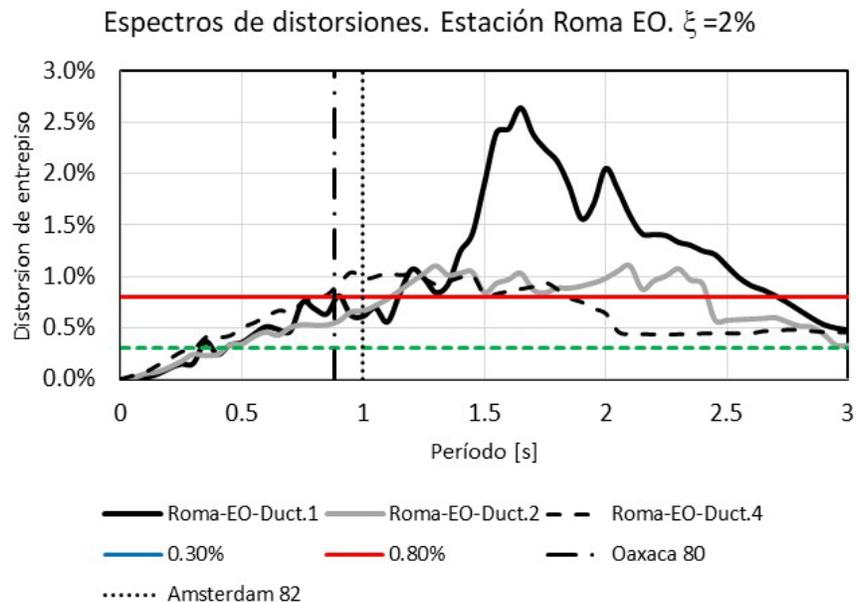


Figura 9. Distorsiones de entresuelo calculadas con el registro EO de la estación Roma y distorsiones máximas aceptables

De acuerdo con los resultados mostrados en la fig. 5, en la dirección perpendicular a la calle el periodo podría ser tan bajo como $N/15$, en vez de $N/8$ como muestra la ec. 2. Esto resulta en el efecto benéfico de una reducción de las distorsiones mostradas en la fig. 9 a casi la cuarta parte. Adicionalmente, la ausencia de efecto de piso débil en esa dirección causaría reducciones adicionales de distorsión de entresuelo. Esto explica la razón por la que los edificios estudiados hayan tenido menor daño en muros colindantes. Tampoco sorprende el que las grietas de corte en la columna, que se muestra en la fig. 6, aparecieran en las caras de las columnas paralelas a la fachada y no en las caras perpendiculares.



Figura 10. Contraste entre muros colindantes (izquierda) –perpendiculares a calle– y muros paralelos a calle (fondo) en edificio Oaxaca 80

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio muestran que es conveniente tener estructuras rígidas, que limiten sus desplazamientos laterales durante terremotos, y así reducir daños, tanto en los elementos no estructurales, como en los estructurales. Un estudio anterior de daños y colapsos observados en terremotos en el mundo (Rodríguez, 2018) también concluye en la conveniencia del empleo de estructuras rígidas, tanto en terrenos duros como en blandos. También el presente estudio sugiere la conveniencia de evitar estructuras irregulares en zonas sísmicas, por ejemplo, de planta baja débil, con el fin de lograr que la estructura no tenga grandes desplazamientos laterales concentrados en el primer entrepiso durante terremotos.

Se sugiere que las distorsiones máximas de entrepiso en un edificio para el sismo de diseño no excedan el valor de 0.8%, ya que valores de demandas mayores durante un terremoto podrían llevar a daños severos en muros divisorios cuya reparación podría ser excesivamente costosa o a colapsos de estos muros o elementos de fachada, con las posibles afectaciones a la seguridad de los ocupantes del edificio, o incluso con pérdidas de vidas.

Se concluye que la mampostería juega un papel relevante en la respuesta de un edificio a demandas sísmicas. Dentro de los intervalos de distorsiones de entrepiso recomendados, para el caso de edificaciones sin planta baja débil, este papel fue benéfico en el terremoto del 19 de septiembre de 2017 en México, ya que se tradujo en reducciones importantes de distorsiones evidentes en los edificios ilustrados en las figs. 6 y 10.

REFERENCIAS

- Algan, B B (1982), “Drift and Damage Considerations in Earthquake-Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings”, *Ph.D. Dissertation*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 227p. <http://hdl.handle.net/2142/69913>
- ASCE/SEI 7-16, (2016), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Estados Unidos.
- Behrouzi, A, S Breña, K Elwood, Irfanoglu, M Kreger, R M Lequesne, G Mosqueda, S Pujol, A Puranam, M Rodríguez, P Shah, A Stavridis y R Wood (2019), “Observations about the Seismic Response of RC Buildings in Mexico City”. Entregado a *Earthquake Spectra Journal* para publicación en el número especial sobre el terremoto de septiembre 19, 2017 en México.
- Berrón, R (2018), “Sismo del 19 septiembre de 2017”, Conferencia magistral en el *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Campeche, México.
- Cecen, H (1979), “Response of Ten Story, Reinforced Concrete Model Frames to Simulated Earthquakes”, *Tesis para obtener el grado de Doctor en la Escuela de Graduados de Ingeniería Civil de la University of Illinois at Urbana-Champaign*, Estados Unidos. <http://hdl.handle.net/2142/66859>
- CIRES, cires.org.mx
- NTCS (2004), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*, Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
- NTCS (2017), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*, Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, México.

- Miranda, E (1999), “Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No 4, pp. 417-425. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:4\(417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(417))
- Rodríguez, M E (2019), “Interpretación de los daños y colapsos en edificaciones observados en la Ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre 2017”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS. No. 101. pp. 1-18. DOI: [10.18867/ris.101.528](https://doi.org/10.18867/ris.101.528)
- Rodríguez, M E (2018), “Damage Index for Different Structural Systems Subjected to Recorded Earthquake Ground Motions”, *Earthquake Spectra*, Vol 34. No. 2, pp. 773-793. DOI: [10.1193/021117EQS027M](https://doi.org/10.1193/021117EQS027M)
- Wallace, J y J Moehle (1992), “Ductility and Detailing Requirements of Bearing Wall Buildings”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V 18, No. 6, pp. 1625-1644. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:6\(1625\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:6(1625))