

CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO Y SISTEMA DUAL

Fernando de Jesús Velarde Cruz⁽¹⁾, Juan Bojórquez Mora⁽¹⁾ y Edén Bojórquez Mora⁽¹⁾

RESUMEN

En el presente trabajo se compara la confiabilidad estructural de un edificio de concreto reforzado destinado a uso de oficinas y ubicado en el suelo blando de la Ciudad de México, utilizando dos sistemas estructurales distintos. El primero es a base de marcos resistentes a momento de concreto reforzado (sistema convencional) y en el segundo se incorporan muros de cortante ubicados estratégicamente en los marcos exteriores (sistema dual). Para las dos edificaciones se utilizan modelos estructurales complejos los cuales son sometidos a varios registros sísmicos del suelo blando con la finalidad de estimar y comparar la confiabilidad de ambos sistemas utilizando curvas de peligro de demanda. Es importante mencionar que también se hace una comparación de los resultados obtenidos del diseño de los dos sistemas estructurales en términos de otros indicadores de demanda ingenieril. El parámetro utilizado para estimar la confiabilidad estructural es la distorsión máxima de entrepiso, la cual se obtiene mediante análisis dinámicos incrementales que permiten la elaboración de curvas de fragilidad sísmica. La estimación de la confiabilidad estructural se hace mediante modelos probabilísticos al combinar las curvas de fragilidad y de peligro sísmico. Finalmente, con los resultados obtenidos se comprueba que utilizar el sistema dual puede ser una buena alternativa de diseño, obteniendo una solución más económica y un mejor comportamiento sísmico.

Palabras clave: edificio de concreto reforzado; muros de cortante; sistema dual; confiabilidad estructural

STRUCTURAL RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS AND DUAL SYSTEM

ABSTRACT

This paper compares the structural reliability of a reinforced concrete building for office use located in the soft soil of Mexico City, using two different structural systems. The first one is based on reinforced concrete moment resisting frames (conventional system) and the second one incorporates shear walls strategically located in the exterior frames (dual system). Complex structural models are used for both buildings, which are subjected to several seismic records of the soft soil in order to estimate and compare the reliability of both systems using demand hazard curves. It is important to say that a comparison of the results obtained from the design of the two structural systems in terms of other engineering demand parameters is also

Artículo ganador del concurso nacional de tesis de licenciatura de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica celebrado en el marco del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (2022). Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calzada de las Américas y Boulevard Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México, C.P. 80040. juanbm@uas.edu.mx eden@uas.edu.mx

studied. The parameter used to estimate the structural reliability is the maximum inter-story drift, which is obtained through incremental dynamic analyses in order to compute seismic fragility curves. The estimation of structural reliability is assessed by means of probabilistic models by combining the fragility and seismic hazard curves. Finally, the results obtained show that the use of dual system can be a good design alternative, providing a more economical solution and a better seismic behavior.

Keywords: reinforced concrete buildings; shear walls; dual system; structural reliability

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Los últimos eventos sísmicos ocurridos en diferentes partes del mundo como en México, Chile y Japón, han traído consigo una exigencia de fomentar considerablemente las estrategias de reducción de riesgos de desastres en zonas de alta sismicidad (Morales y López, 2020); así como también han reflejado la necesidad de mejorar los diseños sismo-resistente que se utilizan comúnmente en las edificaciones. Uno de los sistemas constructivos que se ha estudiado durante las últimas décadas, es la incorporación del sistema de muros de concreto reforzado a una edificación (sistema dual), diseñados principalmente para resistir esfuerzos de corte y flexión. El sistema dual es esencialmente un sistema estructural en el que se combina la resistencia de marcos de concreto reforzado o acero para proveer el soporte de las cargas de gravedad y un muro de cortante que se encarga de resistir la mayor porción de las fuerzas cortantes producidas por una actividad sísmica, o en algunas ocasiones para edificios de gran altura el viento; la porción de cada elemento depende de la rigidez, módulo de elasticidad y de su ductilidad. Los marcos deben de resistir por lo menos el 25% del cortante basal y el sistema completo debe resistir la carga lateral total. Los muros de cortante se utilizan para resistir fuerzas sísmicas en un edificio o estructura, también resisten fuerzas en su plano que son aplicadas a lo largo de su altura (Mibang y Choudhury, 2021). La importancia del comportamiento estructural de un edificio radica en la correcta selección del sistema estructural, investigaciones recientes han demostrado que la versatilidad que tienen los muros de cortante para reducir desplazamientos laterales es significativa y por esta razón han sido utilizados ampliamente como una alternativa de diseño estructural (Ahkam, D. et al., 2022).

Uno de los aspectos más importantes en el diseño sísmico de edificios es la revisión por cortante basal, especialmente si se utilizan muros de cortante. Este criterio de diseño ha sido revisado en numerosas ocasiones por diferentes autores por ejemplo Wallace (1998) y Kim (2016). El modo de falla, así como la capacidad estructural fue estudiado por Wallace (2013), quien realizó y examinó pruebas experimentales de 40 muros de cortante, que fueron diseñados con la normativa vigente en Estados y Unidos y tenían una relación de aspecto de 1 a 3, algunos investigadores realizaron experimentos en muros de cortante con dobles placas de acero embebidas en concreto reforzado como Wang et al. (2020) y Hu et al. (2020). Además, el análisis y diseño de muros de cortante también ha sido recomendado en investigaciones recientes sobre las fallas y daños observados en las estructuras ante eventos telúricos cómo lo fue el sismo de la Ciudad de México de 2017, donde se ha expresado la conveniencia del empleo de estos elementos para lograr una reducción en el potencial de daños y colapsos ante terremotos de gran magnitud (Rodríguez, 2019). Por otra parte, Abidi y Madhuri (2012) realizaron una propuesta para mejorar el comportamiento de edificios de gran altura con sistema de piso débil. Para la correcta selección del sistema estructural es necesario estudiar el efecto de la posición y el tamaño de los muros; algunas investigaciones en edificios fueron realizadas por: Agrawal y Charkha (2012), Youssef et al. (2019), J. Taringan et al. (2018) y Haopeng Lou et al. (2021). Adicionalmente, para resolver el problema de la ubicación de los muros de cortante algunas publicaciones hacen énfasis en el uso de la inteligencia artificial para abordar el problema; por ejemplo, Wenjie et al.

(2021), Salim et al. (2019) y Xuhong (2022) utilizaron algoritmos genéticos para resolver este problema de optimización.

Planteamiento del Problema

La evaluación del daño estructural por eventos sísmicos es un problema que ha sido abordado desde diferentes perspectivas; por ejemplo, Xiong et al. (2019) ha propuesto usar la curvatura de entrepiso como el parámetro de demanda ingenieril para evaluar el daño estructural en muros de cortante donde sus resultados fueron validados en pruebas experimentales utilizando una mesa vibradora a tamaño real con un edificio de muros de cortante de siete niveles. La respuesta sísmica de edificios de C/R sujetos a un evento sísmico y a replicas fue estudiado por Jamnani et al. (2018), sus resultados demostraron que es necesario incrementar los requisitos para el diseño sísmico en cuantías de acero al someter al edificio a sismos repetidos y sus secuencias.

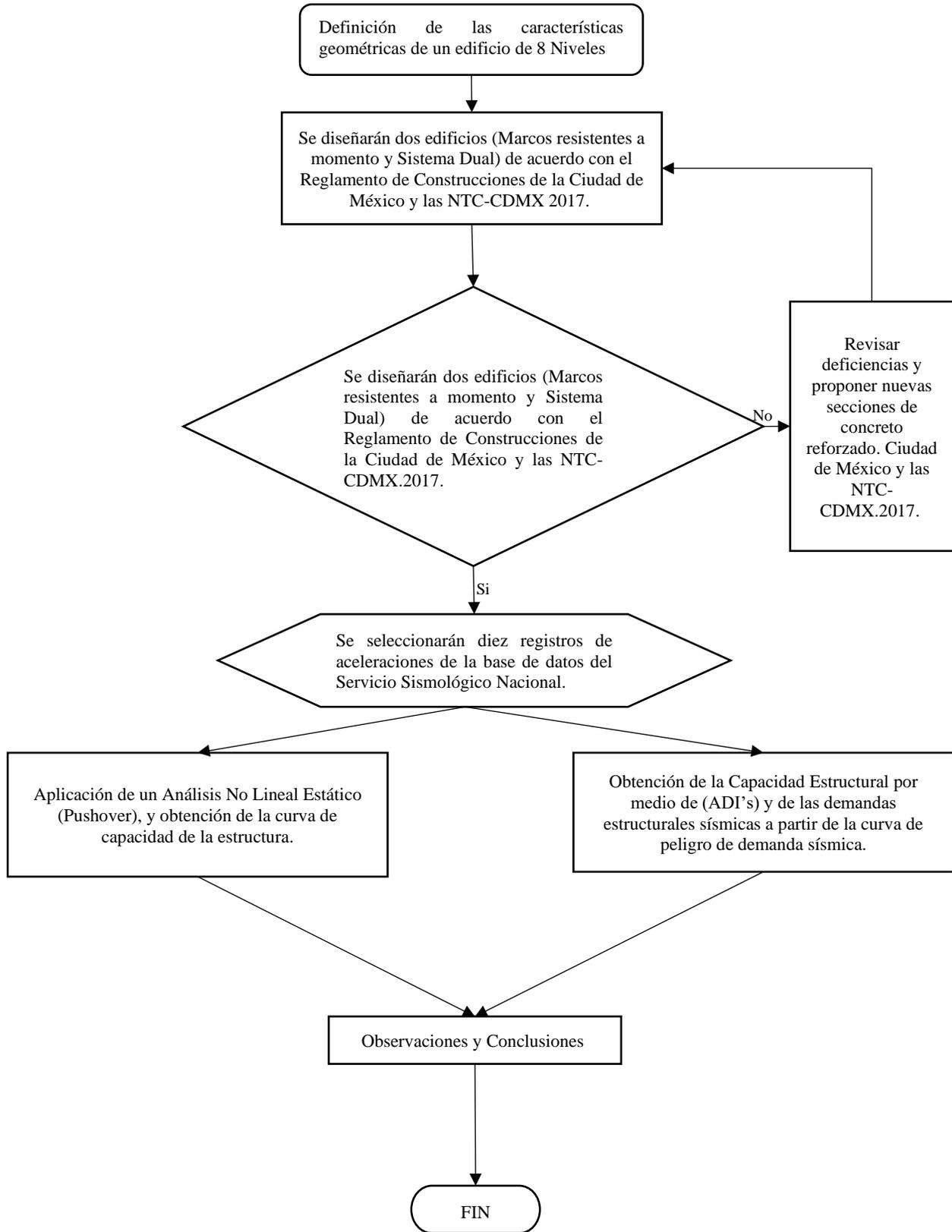
Otros estudios se han enfocado en la optimización de edificios de C/R utilizando la confiabilidad estructural; Ozkul et al. (2019) evaluó la confiabilidad estructural de dos edificios de C/R con muros de cortante utilizando análisis no lineales paso a paso y sometidos a un evento sísmico, el sismo de Van 2011 en Turquía. Tuken, Dahesh y Siddiqui (2017) proponen utilizar una confiabilidad objetivo para un evento sísmico extremo, consecuentemente es necesario que el muro de cortante tenga una confiabilidad estructural mínima. Abdulrahman et. al. (2022) propusieron agregar como la confiabilidad estructural en el diseño de muros de cortante como una restricción adicional, esta metodología fue evaluada en edificios simétricos y no simétricos sometidos a un registro sísmico, El-Centro 1940 en California.

A pesar de todas las evidentes ventajas que presentan los muros de cortante en edificios de concreto reforzado, estos son un componente con un costo considerable en edificios de concreto reforzado y por esta razón es necesario realizar un diseño sísmico adecuado de lo contrario se podría incurrir en diseños poco prácticos o muy costosos. Por estas razones, en este estudio se realiza el diseño estructural de un edificio de concreto reforzado considerando dos sistemas estructurales, primero a base de marcos de concreto reforzado y para el segundo caso se diseña el mismo edificio, pero utilizando sistema dual. Se utiliza la confiabilidad estructural para la comprobación del diseño desde un punto de vista probabilístico, se consideran modelos tridimensionales complejos, se realizan análisis paso a paso no lineales con diferentes registros de aceleraciones obtenidos del suelo blando de la Ciudad de México.

Finalmente, los resultados obtenidos son comparados utilizando diferentes parámetros, se hace un cotejo de la respuesta en términos de cortantes basales, curvas push-over, geometría, cuantías de acero obtenidas, y, por último, se realiza una comparación de la confiabilidad estructural utilizando la curva de peligro de demanda en términos de la distorsión máxima de entrepiso. De los resultados obtenidos se comprueba que utilizar el sistema dual puede ser una buena alternativa de diseño obteniendo una solución más económica y con un comportamiento sísmico más adecuado.

METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL COTEJO DE LOS DOS EDIFICIOS EN ESTUDIO

La metodología a seguir en el presente estudio, de forma general, se encuentra a manera de un diagrama de flujo a continuación.



CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

La confiabilidad estructural se puede describir en términos de la tasa media anual de excedencia, $v_D(d)$ (Esteva, 1968), como se muestra en la Ec. (1), la cual representa el número esperado anual de veces que las solicitaciones, d , exceden D , evaluadas para una intensidad, S_a , de acuerdo con la curva de peligro del sitio $v(S_a)$. $P(D > d | S_a)$ representa la probabilidad condicional de que D sea mayor que d dado S_a .

$$v_D(d) = \int \left| \frac{dv(S_a)}{d(S_a)} \right| P(D > d | S_a) d(S_a) \quad (1)$$

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA NO LINEAL

Existen diversos métodos simplificados para construir una curva de capacidad. Estos pueden basarse en fuerzas o en desplazamientos. Los métodos basados en desplazamientos son los que representan de manera más realista las características y los efectos de la demanda sísmica sobre las estructuras. Entre esos métodos destacan los propuestos por Aydinoglu (2003), Antoniou y Pinho (2004) y Alba (2005); sin embargo, el método para obtener una curva de capacidad suficientemente aproximada a la “exacta” bajo la acción de carga sísmica, se basa en la aplicación de análisis dinámicos incrementales Vamvatsikos y Cornell (2002). El Análisis Dinámico Incremental (ADI) consiste en aplicar una serie de análisis no-lineales “paso a paso” a una estructura, usando uno o varios registros sísmicos, cada uno escalado a diferentes niveles de intensidad. De estos análisis se obtienen curvas ADI en las cuales se representan índices de desempeño dependientes de los niveles de intensidad sísmica (e.g. distorsiones máximas de entrepiso vs aceleraciones espectrales). Al punto donde las respuestas estructurales (p. ej., distorsiones máximas de entrepiso) crecen muy rápidamente ante pequeños incrementos de intensidad sísmica se conoce como “capacidad de la estructura al estado límite de colapso”. Con base en el resultado de las curvas ADI se puede obtener la media y desviación estándar de la capacidad máxima asociada al estado límite de interés (por ejemplo, estado de colapso, de servicio, etc.).

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para analizar los edificios se seleccionaron 12 acelerogramas registrados en las estaciones del valle de México como se indican en la Tabla 1. Todos los registros de aceleraciones corresponden a eventos sísmicos con una magnitud igual o mayor que 6.9. Las estaciones se ubican en la Zona IIIb según la zonificación sísmica de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS-2017) del RCDF. Las características principales de los eventos sísmicos se muestran en la Tabla 1. Con el fin de contar con diferentes intensidades sísmicas, los registros se multiplicaron por diferentes factores de escala. Dichos factores son la relación que existe entre la pseudoaceleración correspondiente al periodo de vibración del sistema en estudio y la pseudoaceleración correspondiente a la intensidad a la que se desea escalar el movimiento (Shome y Cornell, 1999; Chan et al., 2005).

El factor se multiplica por la historia completa de aceleraciones del registro en estudio. Las curvas de peligro sísmico que se utilizan en este trabajo corresponden al sitio de la secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). En la figura 1, se muestran los espectros de respuesta elástica de pseudoaceleración correspondientes a los registros de aceleraciones utilizados, estos fueron obtenidos considerando un porcentaje de amortiguamiento crítico igual al 5%.

Tabla 1. Características de los registros sísmicos

SISMO	FECHA DEL SISMO	COORDENADAS DEL EPICENTRO	MAGNITUD	ESTACIÓN
S1	95-10-09	18.74; 104.67	7.3	VALLE GÓMEZ
S2	95-09-14	16.31; 98.88	7.4	TLATELOLCO
S3	95-10-09	18.74; 104.67	7.3	GARIBALDI
S4	95-09-14	16.31; 98.88	7.2	ALAMEDA
S5	95-09-14	16.31; 98.88	7.2	TLATELOLCO
S6	97-01-11	17.91;103.04	6.9	VALLE GÓMEZ
S7	95-10-09	18.74; 104.67	7.3	CORDOBA
S8	95-09-14	16.31; 98.88	7.2	CORDOBA
S9	95-10-09	18.74; 104.67	7.3	CUJP
S10	97-01-11	17.9; 103.19	6.9	CUJP
S11	85-09-19	18.08; 102.94	8.1	SCT B-1
S12	95-10-09	18.74; 104.67	7.3	SECTOR POPULAR

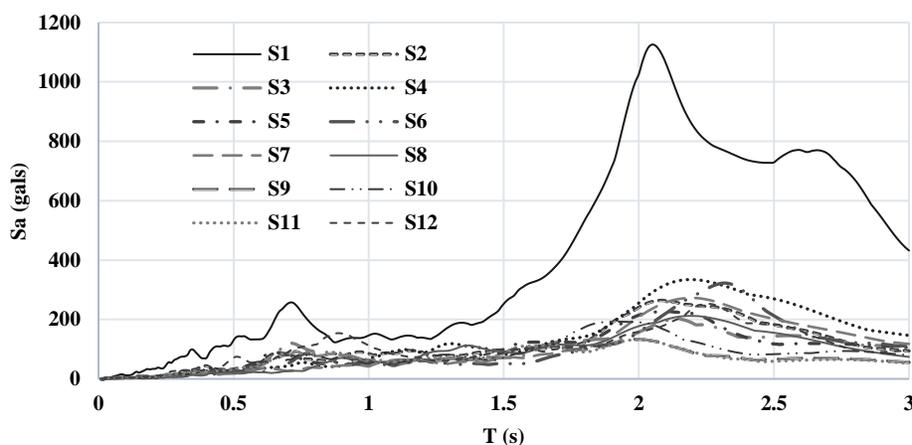


Figura 1. Espectros elásticos en suelo blando de los registros seleccionados ($\alpha=5\%$)

CARÁCTERÍSTICAS DE LOS EDIFICIOS EN ESTUDIO

Se analizan 2 edificios de concreto reforzado de 8 niveles. Para los modelos de los edificios se utilizó un factor de comportamiento sísmico $Q = 2$. Las distorsiones de entrepiso de los edificios de concreto reforzado se limitaron para el estado límite de colapso a $d/h = 0.015$ y $d/h = 0.01$ para el sistema convencional y sistema dual respectivamente. En cuanto al estado límite de servicio, se consideró una distorsión límite para ambos sistemas de $d/h = 0.002$; donde d , es el desplazamiento y h , la altura del entrepiso.

Las características geométricas para ambos edificios se disponen de 4 crujiás en dirección X de 6 metros, y 3 crujiás en dirección Y de 7 metros. Para los dos casos se considera una altura de entrepiso de 3.5m. El sistema de piso es a base de losa maciza. También, se considera que las estructuras son regulares. En la figura 2 se muestran las distribuciones en planta y elevación tipo.

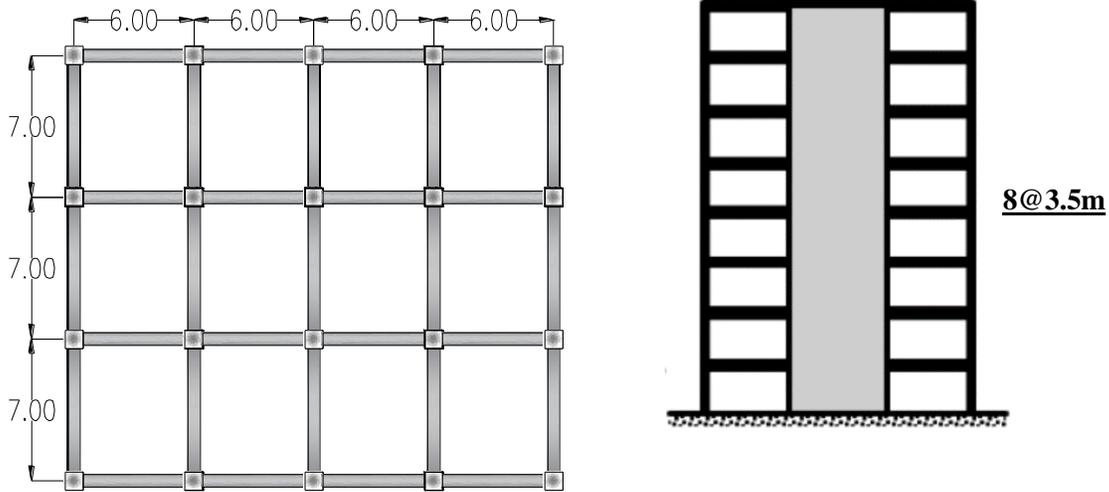


Figura 2. Características geométricas de los edificios: vista en planta (izquierda, dimensiones en metros) y vista en elevación (derecha).

En la figura 3 se muestran los modelos 3D realizados mediante el software ETABS v18 por elemento finito en el cual se utilizaron elementos tipo “Frame” para el modelado de vigas y columnas, mientras que para las losas se hizo uso de elementos tipo “Slab”. Para modelar los muros se hizo uso de elementos tipos “Wall”. Se considera que las losas forman diafragmas rígidos y que las columnas y vigas están unidas monolíticamente; además, se consideran los efectos de segundo orden P-delta.

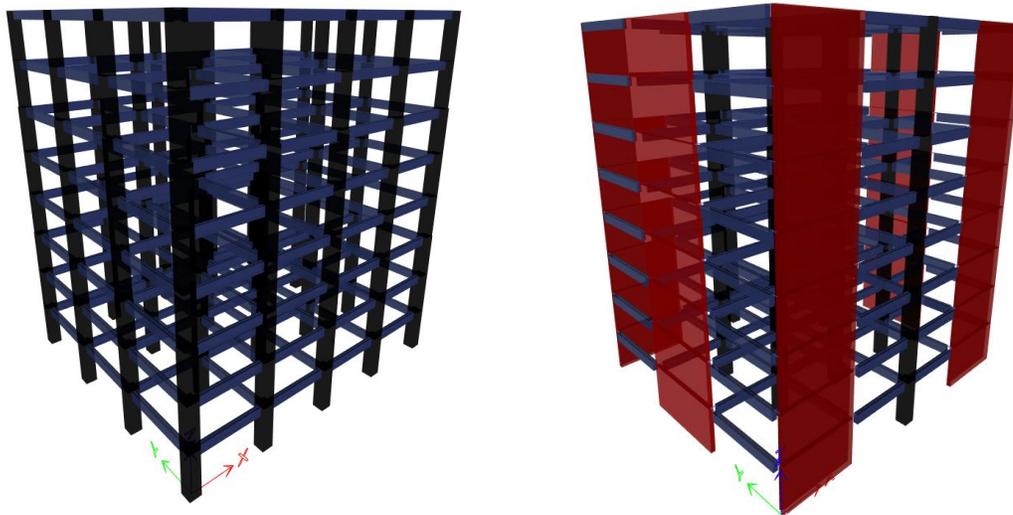


Figura 3. Modelos matemáticos tridimensionales desarrollados en el software ETABS: Sistema convencional (izquierda) y Sistema Dual (derecha).

RESULTADOS DE LOS DISEÑOS EN AMBOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

En las Tablas 3 y 4 se resumen los diseños obtenidos para cada elemento que conforma al edificio con sistema convencional y con sistema dual respectivamente. Se puede observar en la tabla que las secciones para ambos sistemas son muy diferentes, el sistema dual presenta una reducción significativa en el tamaño y en las cuantías de refuerzo en las vigas y columnas.

Tabla 2. Columnas y Vigas diseñadas por nivel – Sistema Convencional.

Nivel	Columnas	Área de Acero (cm ²)	Vigas	Área de acero Lecho superior (cm ²)	Área de acero Lecho inferior (cm ²)
1 al 3	C-1: 90x90 cm	190.02	V-1: 35x70	28.5	25.65
4 al 6	C-2: 85x85 cm	81.12	V-2: 30x70	25.65	22.17
7 al 8	C-3: 75x75cm	62.08	V-3: 30x60	25.65	19.32

Tabla 3. Columnas y Vigas diseñadas por nivel – Sistema Dual

Nivel	Columnas	Área de Acero (cm ²)	Vigas	Área de acero Lecho superior (cm ²)	Área de acero Lecho inferior (cm ²)
1 al 3	C-1: 55x55 cm	46.56	V-1: 35x65	11.88	11.88
4 al 6	C-2: 50x50 cm	46.56	V-2: 30x60	11.88	11.88
7 al 8	C-3: 50x50cm	46.56	V-3: 30x60	11.88	11.88

En las Tablas 4 y 5 se resumen los diseños obtenidos para los muros que conforma al edificio con sistema dual. Se puede observar que se utilizan elementos de borde en todos los muros que van cambiando con la altura, una de las principales ventajas de utilizarlos es que se logra un mejor comportamiento en el muro de cortante logrando generar una falla adecuada en el muro. Otro aspecto importante en el diseño de muros de cortante es su ubicación, en este estudio se probaron diferentes variantes; por ejemplo, utilizar muros en “L” en cada esquina o ubicar muros en las crujeas centrales en el eje X entre otras.

La ubicación final y óptima para este caso se muestra en la figura 4. Las otras alternativas de estructuración no se muestran porque resultaron en soluciones más costosas o con un menor desempeño sísmico.

Tabla 4. Columnas y Vigas diseñadas por nivel – Sistema Convencional.

Nivel	Muro 6 metros	Elemento de Borde (cm)	Área de acero Elementos de borde (cm ²)	Cuantía de refuerzo en el alma
1 al 2	M6-1	35 x 110	152	0.0036
3 al 4	M6-2	35 x 85	121.68	0.0036
5 al 8	M6-3	35 x 60	70.98	0.0036

Tabla 5. Columnas y Vigas diseñadas por nivel – Sistema Convencional.

Nivel	Muro 6 metros	Elemento de Borde (cm)	Área de acero Elementos de borde (cm ²)	Cuantía de refuerzo en el alma
1 al 2	M7-1	45 x 120	152	0.0036
3 al 4	M7-2	45 x 90	91.26	0.0036
5 al 8	M7-3	45 x 60	70.98	0.0036

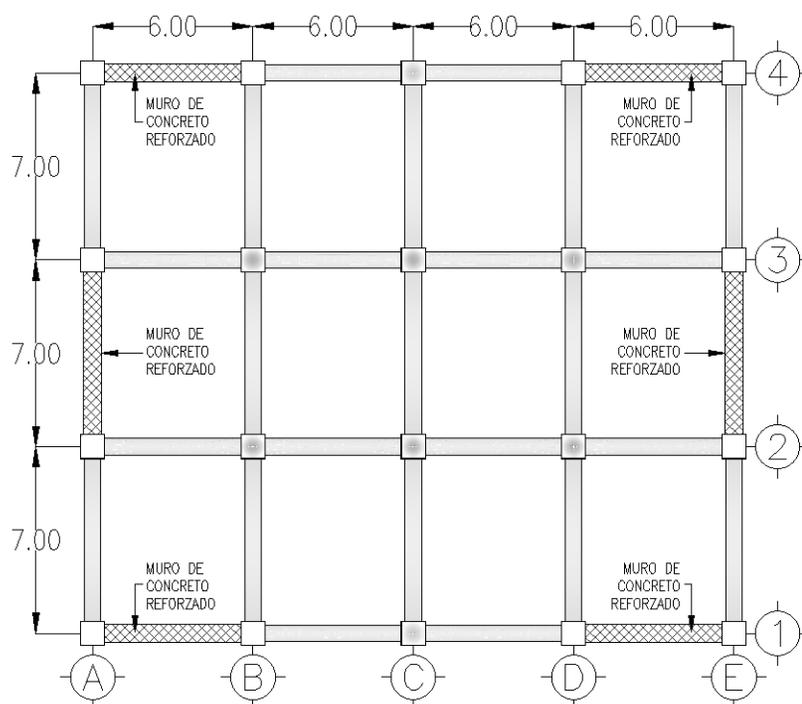


Figura 4. Localización en planta de los Muros de C/R (dimensiones en metros).

COTEJO DE LAS PROPIEDADES PRINCIPALES

Las características principales de cada sistema son comparadas utilizando diferentes indicadores ingenieriles. Los periodos fundamentales de vibración fueron de 1.46seg para el sistema convencional y 0.78seg para el sistema dual, se obtuvo una reducción del 47% cuando se incorporaron los muros de cortante. El cortante basal fue estudiado para el caso más desfavorable, se encontró que el sistema dual tiene una reducción del 21% con respecto al sistema convencional. En la figura 5 se observan los cortantes en la altura de cada modelo. Por otro lado, en la figura 6 se muestran las comparaciones en términos de distorsiones máximas de entrepiso para ambas direcciones de análisis, con una línea continua se muestra la dirección X y con una línea discontinua la dirección Y. Por otro lado, se incluye la distorsión para el estado límite de colapso. Finalmente, el peso de ambos sistemas es prácticamente el mismo con una diferencia menor a 2%.

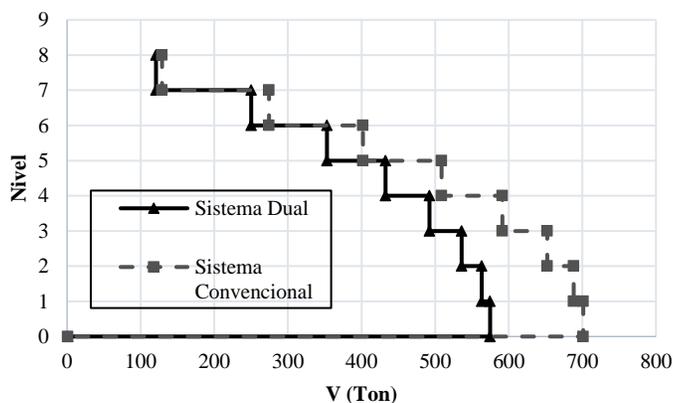


Figura 5. Comparativa de los cortantes por entrepiso en dirección Y de los dos casos de estudio.

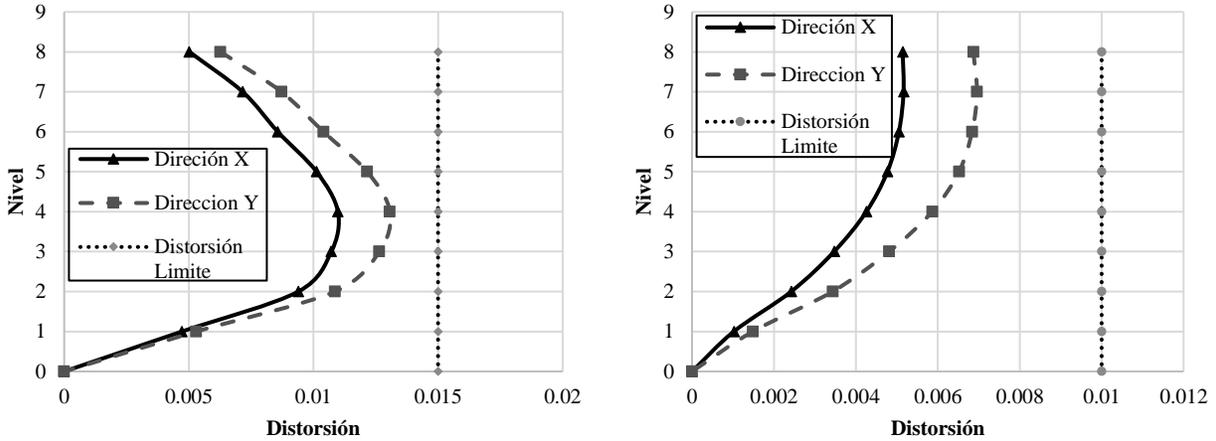


Figura 6. Revisión de las distorsiones de entrepiso con respecto al estado límite establecido en las NTC-CDMX-17: Edificio Convencional (izquierda) y Sistema Dual (derecha).

RESUMEN DE RESULTADOS

Análisis No Lineal Estático (Push-over)

Por un lado, se hace la comparación en términos de confiabilidad estructural, así como análisis push-over para ambos sistemas. Se aplicaron cargas incrementales con variación en altura en los centros de masa, a partir de un patrón de fuerzas equivalentes las cuales se obtuvieron en función del porcentaje de participación en el cortante basal total. En la figura 7 se muestran las curvas push-over para el sistema convencional y dual respectivamente

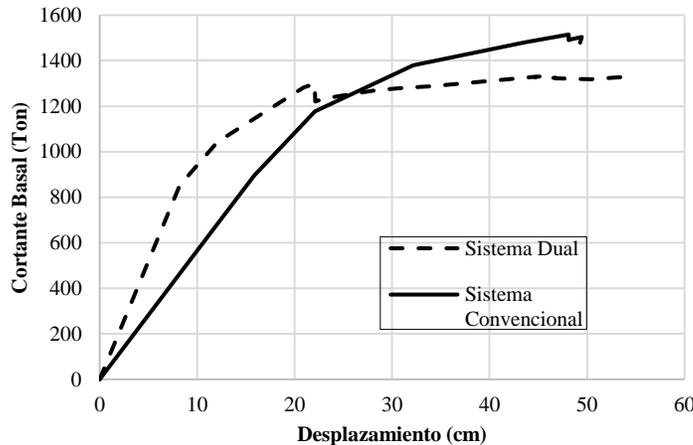


Figura 7. Curva push-over sistema convencional vs sistema dual.

De la figura 7 se puede observar que el sistema dual tiene una mayor rigidez pero tiene una menor capacidad de carga, esto se debe principalmente a que los ejes principales de inercia de los muros de cortante no coinciden con los puntos de aplicación de carga provocando efectos de torsión; además, analizando la curva fuerza desplazamiento se puede encontrar una de las limitaciones más importantes en los modelos tipo shell; para el sistema convencional el punto de falla queda claramente definido y por otro lado la falla

nunca ocurre en elemento shell. En este trabajo se consideró que el sistema dual presenta la falla si se alcanza una deformación en el concreto de 0.35% o una deformación en el acero de 2%. Finalmente, el factor de ductilidad obtenido es de 2.29 y 2.14 para el sistema convencional y el sistema dual.

Análisis Dinámico Incremental

Se realizó un análisis no lineal paso a paso a los dos modelos considerados, ambos sistemas fueron sometidos a los doce registros sísmicos mostrados en la Tabla 1. Los registros fueron escalados para diferentes niveles de intensidad en términos de la pseudoaceleración en el modo fundamental de vibración de la estructura $S_a(T1)$, estos van desde 100gals hasta 1500gals. Como se mencionó anteriormente esta técnica de análisis se conoce como ADI, y esta proporciona una idea clara de la capacidad y niveles de deformación que puede presentar un sistema. La figura 8 muestra el análisis dinámico incremental para los dos sistemas estructurales, se puede observar las diferencias que tienen ambos, por ejemplo, si consideramos un nivel de deformación de 0.2% se tiene que para el sistema convencional corresponde una pseudoaceleración espectral de 630gals mientras que para el sistema dual una pseudoaceleración espectral de 900gals. Por esta razón el sistema dual provee un mayor margen de seguridad ante diferentes estados límites de diseño o intensidades. Además, el sistema dual tiene una mayor rigidez que el sistema convencional esto se puede observar en la pendiente de las curvas mostradas, también un aspecto importante es que el sistema dual permanece en el rango elástico para niveles de intensidad más grandes.

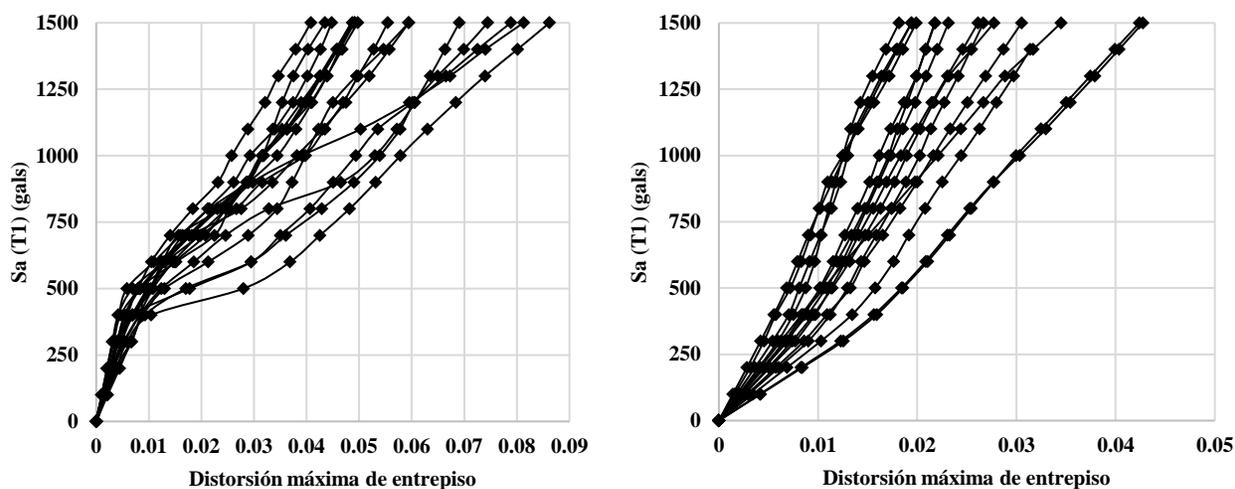


Figura 8. Análisis dinámico incremental convencional (izquierda) vs sistema dual (derecha).

Curvas de fragilidad sísmica

En esta sección se obtienen las curvas de fragilidad sísmica que fueron desarrolladas para los modelos estudiados. Es decir, las curvas fueron obtenidas utilizando la Ec. 2 en términos de la distorsión máxima de entrepiso. Si se considera una distribución lognormal (Shome, 1999; Shinozuka 2000) para evaluar la probabilidad condicional $P(D > d | S_a)$, la probabilidad de que D exceda d se puede calcular como:

$$P(D > d | s_a) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln d - \bar{\ln}_D | s_a}{\sigma_{\ln_D | s_a}} \right) \quad (2)$$

En la ecuación (2) $\hat{D} = \ln D$ y $\sigma = \ln D$ son la media y desviación estándar del $\ln D$, respectivamente, y $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución acumulada. En la figura 9 se muestran las curvas de fragilidad sísmica para los dos sistemas estudiados, dichas curvas fueron evaluadas para una distorsión máxima de entrepiso de 0.02. Como se puede observar en la figura el comportamiento es diferente para cada sistema, por ejemplo, si comparamos la probabilidad condicional para una intensidad de 600gals se obtiene para el sistema convencional 0.55 mientras que para el sistema dual se tiene una probabilidad de 0.28. Estos resultados reflejan un mejor comportamiento en el sistema con muros de cortante ya que tener una menor probabilidad de excedencia para el mismo nivel de intensidad genera una mayor seguridad estructural. Nótese que conforme la intensidad va aumentando los niveles de seguridad para el edificio con muros de cortante son mayores que para el edificio convencional, esto es especialmente cierto para niveles de intensidad mayores que 500gals.

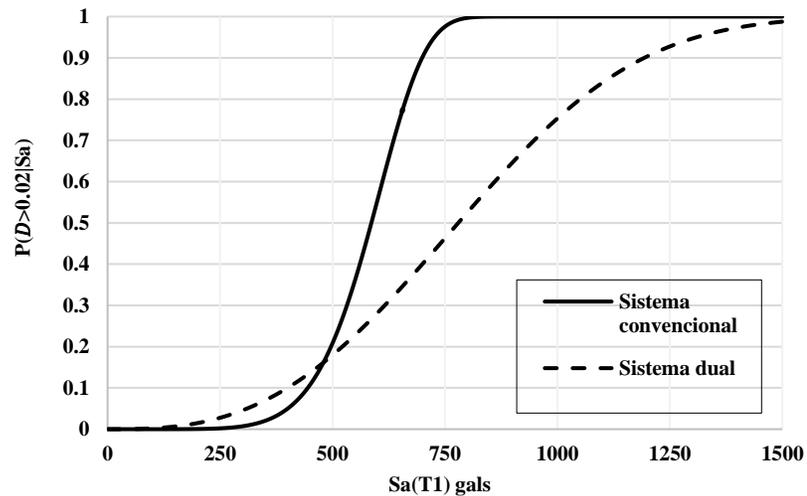


Figura 9. Curvas de fragilidad sísmica asociadas a una distorsión máxima de entrepiso de 0.02

Curvas de peligro de demanda

La confiabilidad estructural es evaluada utilizando curvas de peligro de demanda, dichas curvas fueron obtenidas a través de la Eq. (1) y representan las tasas medias anuales de excedencia de d . Para este propósito fue necesario utilizar las curvas de peligro sísmico del sitio SCT. En la figura 10 se muestran las curvas de peligro de demanda para los edificios aquí estudiados. Se puede observar que para distorsiones máximas de entrepiso pequeñas las diferencias entre ambos sistemas estructurales son pequeñas. Esto se debe al comportamiento lineal de los sistemas estructurales; sin embargo, a partir de cierto nivel de intensidad la diferencia aumenta considerablemente. Por ejemplo, si comparamos los periodos de retorno que tienen cada sistema para una distorsión máxima de 0.02 se tiene, para el sistema convencional un periodo de 805 años; por otro lado, el sistema dual tiene un periodo de 370 años, lo que representa un incremento importante en la seguridad estructural si se colocan muros de cortante.

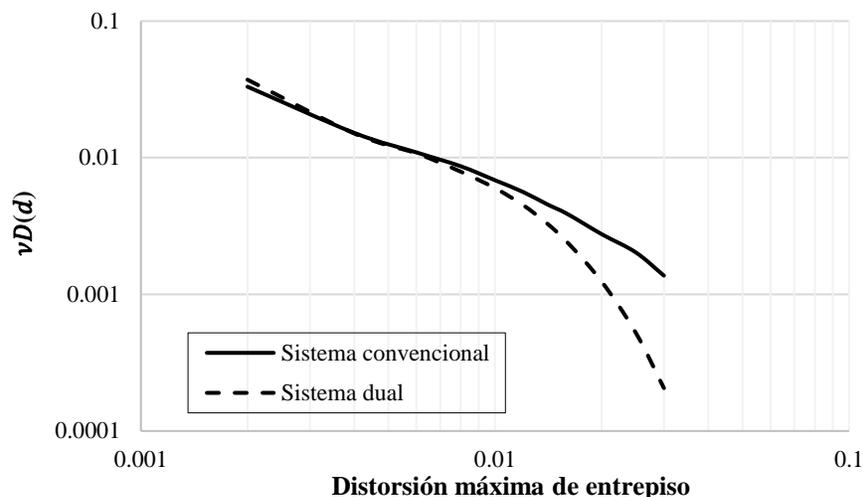


Figura 10. Curvas de peligro de demanda estructural

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el diseño estructural de un edificio de concreto reforzado considerando dos sistemas estructurales, primero a base de marcos de concreto reforzado y para el segundo caso se diseña el mismo edificio, pero utilizando sistema dual. Se utiliza la confiabilidad estructural para la comprobación del diseño desde un punto de vista probabilístico. El estudio se realiza en un edificio de mediana altura regular ubicado en el suelo blando de la Ciudad de México, a partir de los resultados se puede concluir lo siguiente:

El sistema más flexible es el convencional con un periodo fundamental de $T=1.46s$ siendo mayor que el sistema dual en un 46.81% el cual tiene un periodo fundamental de $T=0.78s$. El periodo del suelo para la zona en estudio es de $T_s=2s$, y se puede concluir que el rigidizar la estructura resulta conveniente ya que el periodo fundamental se aleja del periodo del terreno lo cual evita problemas de resonancia. Un aspecto importante en el diseño de edificios con muros de cortante es la correcta ubicación y longitud de los mismos, en este estudio se realizaron diferentes pruebas para ubicarlos en la mejor posición.

Los desplazamientos promedios obtenidos en el diseño estructural tuvieron una reducción de 79% para el sistema a base de muros de cortante. La implementación de los muros de concreto reforzado en localizaciones estratégicas en los edificios regulares reducen notoriamente no solo sus desplazamientos, sino que también son capaces de reducir las fueras laterales que toman los entrepisos, ya que como se observó, el edificio con sistema dual redujo los cortantes en la base para la condición más desfavorable de la edificación en 18%.

De los resultados obtenidos del análisis de confiabilidad estructural se concluye que los niveles de seguridad alcanzados por el sistema a base de muros de cortante son bastante mayores que los obtenidos con el sistema convencional. De la curva de peligro de demanda se concluye que para exceder una distorsión máxima de entrepiso de 0.02 es necesario un periodo de 370 años para el sistema convencional mientras que para el sistema dual el periodo es de 805 años. Esta diferencia es significativa e incluso aumenta para otros niveles de intensidad. Finalmente, como recomendación general se concluye que el sistema dual es un perfecto candidato como una opción de protección sísmica en los diseños de edificios de mediana altura en

zonas de alta sismicidad resultando en una solución más económica y con un mejor comportamiento sísmico.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado en el transcurso de los estudios de Licenciatura y Posgrado del primer autor. Los autores segundo y tercero agradecen al CONACYT por el apoyo recibido a través del proyecto Ciencia Básica 287103. De igual manera se agradece a la Universidad Autónoma de Sinaloa por el apoyo brindado por el proyecto PROFAPI 2022.

REFERENCIAS

- Abualreesh, A. M., Tuken, A., Albidah, A., & Siddiqui, N. A. (2022). Reliability-based optimization of shear walls in RC shear wall-frame buildings subjected to earthquake loading. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00978. DOI: doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00978
- ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)[and] Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)*.
- Aksu Ozkul, T., Kurtbeyoglu, A., Borekci, M., Zengin, B., & Kocak, A. (2019). Effect of shear wall on seismic performance of RC frame buildings. *Engineering Failure Analysis*, 100, 60-75. DOI: doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.032
- Alcocer, S. (1995). *Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado: Muros estructurales*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México, México: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Obtenido de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/ASH/pdf/spa/doc9208/doc9208-2.pdf>
- Arango, E., Valencia, W., & Viviescas, Á. (2018). Propuesta de modelamiento numérico de muros delgados de concreto reforzado diseñados para zona de amenaza sísmica alta. En E. S. M., *DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA* (pág. 460). Antioquía: Instituto Antioqueño de Investigación. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-M/publication/331385541_Desarrollo_e_innovacion_en_Ingenieria_ed_3/links/5c76e92b299bf1268d2b034d/Desarrollo-e-innovacion-en-Ingenieria-ed-3.pdf#page=143
- Ashish, S., & Charkha, S. D. (2012). Study of Optimizing Configuration of Multi-Storey Building Subjected to Lateral Loads by Changing Shear Wall Location. *Proceedings of international conference on advances in architecture and civil engineering*, 1, 287-289. http://conference.bonfring.org/papers/MSR_AARCV2012/SAM137.pdf
- Award, R. R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Medellín: Fondo Editorial Universidad Eafit. Obtenido de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=syWjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=An%C3%A1lisis+y+dise%C3%B1o+s%C3%ADsmico+de+edificios&ots=F7SUsBuKaL&sig=U-bc7Pv9b9bfCIaPeqlbJgZDxyM>
- Barros Bastidas, L. M., & Peñafiel Plazarte, M. J. (2015). Análisis comparativo económico–estructural entre un sistema aporticado, un sistema aporticado con muros estructurales y un sistema de paredes portantes, en un edificio de 10 pisos. Quito. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10314>
- Blandón, C., Rave, J., & Bonett, R. (2015). Comportamiento de muros delgados de concreto reforzado ante cargas laterales. VII Congreso Sísmica. Bogotá. https://www.researchgate.net/profile/Jose-Rave/publication/313632895_Behavior_of_thin_reinforced_concrete_walls_under_lateral_load/links/58a0a0eb92851c7fb4bf3fb4/Behavior-of-thin-reinforced-concrete-walls-under-lateral-load.pdf

- Corpus Villalba, J. J., & Morales Quispe, E. A. (2015). Análisis sísmico comparativo entre un sistema dual y el sistema de reforzamiento con disipadores de fluido viscoso para un edificio en el distrito de Víctor Larco Herrera aplicando ETABS 2013. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/686>
- Esteva, L., Díaz-López, O. J., Vásques, A., & León, J. A. (2012). Structural damage accumulation and control for life-cycle optimum seismic performance of buildings. DOI:doi.org/10.1080/15732479.2015.1064967
- Hu, Y., Zhao, J., Zhang, D.-f., & Li, Y. (2020). Cyclic performance of concrete-filled double-skin steel tube frames strengthened with beam-only-connected composite steel plate shear walls. *Journal of Building Engineering*, 31. DOI: doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101376
- Ilmih Ahkam, D. N., Teguh, M., & Saleh, F. (2022). Seismic behavior of structural models of dual system building and flat slab-drop panel strengthened with shear-wall. *AIP Conference Proceedings*, 2489(1), 030029. DOI: doi.org/10.1063/5.0094416
- Jamani, H. H., Amiri, J. V., & Rajabnejad, H. (2018). Energy distribution in RC shear wall-frame structures subject to repeated earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 116-128. DOI: doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.010
- Jünemann, R., de La Llera, J. C., Hube, M. A., Cifuentes, L. A., & Kausel, E. (2015). A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures*, 82, 168-185. DOI: doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.014
- Kim, S., & Wallace, J. W. (2016). Reliability of Structural Wall Shear Design for Tall Reinforced Concrete Core Wall Buildings. Doctoral dissertation, UCLA. <https://escholarship.org/uc/item/2vv3w1nn>
- Lou, H. P., Ye, J., Jin, F. L., Gao, B. Q., Wan, Y. Y., & Quan, G. (2021). A practical shear wall layout optimization framework for the design of high-rise buildings. *Structures*, 34, 3172-3195. DOI: doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.038
- Lou, H., Gao, B., Jin, F., Wan, Y., & Wang, Y. (2021). Shear wall layout optimization strategy for high-rise buildings based on conceptual design and data-driven tabu search. *Computers & Structures*, 250, 106546. DOI: doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106546
- Mansilla, E. (1993). Desastres y desarrollo en México. *Desastres y Sociedad*, 1(1). <http://cidbimena.desastres.hn/docum/lared/dys1-Todo-oct-24-2001.pdf#page=7>
- McCormac, J. C., & Brown, R. (2018). Diseño de concreto reforzado. México: Alfaomega Grupo Editor. <https://dspace.scz.uceb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/24103/3/13166.pdf>
- MIBANG, D., & Choudhury, S. (2021). Unied Performance-Based Design of RC Dual. *Research Square*. DOI: doi.org/10.21203/rs.3.rs-566220/v1
- Misam, A., & Mangulkar, M. N. (2012). Review on shear wall for soft story high-rise buildings. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 6(1), 52-54. <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v1i6/F0600071612.pdf>
- Morales-Fajardo, M. E., & Mejía López, M. (2020). Cooperación técnica y científica México-Japón con énfasis en la perspectiva sismológica. *Oikos Polis*, 5(2), 35-69. <https://files.uagrm.edu.bo/entidad/161/file/indexed/repec/grm/oikosp/202006.pdf>
- NTC-DCEC-17. (2017). Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*.
- NTC-DS-17. (2017). Normas Técnicas Complementarias sobre Diseño por Sismo. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*.

- Oh, Y.-H., Han, S., & Lee, L.-H. (2002). Effect of boundary element details on the seismic deformation capacity of structural walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(8), 1583-1602. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.177>
- Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: Wiley.
https://www.academia.edu/download/51966691/Seismic_Design_of_Reinforced_Concrete_and_Masonry_Building.pdf
- Quispe Choquemamani, E. D. (2018). Determinación de la ductilidad y resistencia para muros de corte de concreto armado cuyas secciones transversales tienen formas L, I, T y C. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5039>
- Ramirez Flores, T. J. (2018). Influencia del agrietamiento en la respuesta sísmica de edificios de concreto armado con sistema dual. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1982>
- 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*, 1-18. DOI: doi.org/10.18867/ris.101.528
- San Bartolomé, A., Quiun, D., & Silva, W. (2011). Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 3(1), 36-48. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112011000200004&script=sci_abstract&tlng=pt
- Segura, C. L., Wallace, J. W., Arteta, C. A., & Moehle, J. P. (2016). Deformation capacity of thin reinforced concrete shear walls. *Proceedings of the 2016 New Zealand Society of Earthquake Engineering Technical Conference*. New Zealand. <https://www.nzsee.org.nz/db/2016/Papers/O-64%20Segura.pdf>
- Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Statistical Analysis of Fragility Curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), 1224-1231. DOI: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:12\(1224\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1224))
- Shome, N. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. Stanford University: Ph.D.Thesis. <http://purl.stanford.edu/qp089qb1141>
- Smith, B. S., & Girgis, A. (1984). Simple analogous frames for shear wall analysis. *Journal of Structural Engineering*, 110(11), 2655-2666. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:11\(2655\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:11(2655))
- Standar, A. A. (August de 2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11)*. American Concrete Institute., American Concrete Institute.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=c6yQszMV2-EC&oi=fnd&pg=PT10&dq=Building+Code+Requirements+for+Structural+Concrete+\(ACI+318-11\)&ots=nYQrLS1CNF&sig=LtI27k_hKukQGrKVH-3I_y9WGY](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=c6yQszMV2-EC&oi=fnd&pg=PT10&dq=Building+Code+Requirements+for+Structural+Concrete+(ACI+318-11)&ots=nYQrLS1CNF&sig=LtI27k_hKukQGrKVH-3I_y9WGY)
- Tafraout, S., Bourahla, N., Bourahla, Y., & Mebarki, A. (2019). Automatic structural design of RC wall-slab buildings using a genetic algorithm with application in BIM environment. *Automation in Construction*, 106, 102901. DOI: doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102901
- Tarigan, J., Manggala, J., & Sitorus, T. (2018). The effect of shear wall location in resisting earthquake. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309(1), 012077. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/309/1/012077/meta>
- Tuken, A., Dahesh, M. A., & Siddiqui, N. A. (2017). Reliability assessment of RC shear wall-frame buildings subjected to seismic loading. *Computers and Concrete, An International Journal*, 20(6), 719-729. <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE10763255>

- Vásquez Martínez, A., & Gallardo Amaya, R. J. (2018). Respuesta no lineal de estructuras con muros de concreto reforzado. INGE CUC, 55-61. <http://hdl.handle.net/11323/2340>
- Wallace, J. (1998). Behavior and Design of High-Strength RC Walls. ACI Symposium Publication, 176, 259-280. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/5903>
- Wallace, J. W., Segura, C., & Tran, T. (2017). Strength and deformation capacity of shear walls. In 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, 9-13. <http://invenio.itam.cas.cz/record/19153?ln=en>
- Wang, J.-J., Nie, X., Bu, F.-M., Tao, M.-X., & Fan, J.-S. (2020). Experimental study and design method of shear-dominated composite plate shear walls. Engineering Structures, 215. DOI: doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110656
- Xiong, C., Lu, X., & Lin, X. (2019). Damage assessment of shear wall components for RC frame–shear wall buildings using story curvature as engineering demand parameter. Engineering Structures, 189, 77-88. DOI: doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.068
- Youssef, A., Mohamed, E., Adaway, R., & Hilima, I. (2019). The effect of Shear walls positions and dimensions variation on the analysis of multi-story building. International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER), 72-82. <https://www.ijser.in/>
- Zhou, X., Wang, L., Liu, J., Cheng, G., Chen, D., & Yu, P. (2022). Automated structural design of shear wall structures based on modified genetic algorithm and prior knowledge. Automation in Construction, 139, 104318. DOI: doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104318