



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

PROCEDIMIENTO PARA INCORPORAR LA EXCENTRICIDAD ACCIDENTAL EN EL DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:
Ing. Gustavo Santos Gálvez Cortés

Tutor académico:
Dr. Jaime De la Colina Martínez



Ciudad Universitaria, Toluca, México, Diciembre 2017

DEDICATORIA

Con todo mi amor a mi abuelita Eva

AGRADECIMIENTOS

Mi admiración y gratitud a mis tutores académicos, el Dr. Jaime De la Colina Martínez y el Dr. Jesús Valdés Gonzales, por su paciencia, consejo y su acertada guía brindada durante el desarrollo de esta investigación y mis estudios de maestría.

Al Dr. David Joaquín Delgado Hernández y al Dr. Julio César Díaz Montes, por sus invaluable consejos en la clase de Seminario de investigación al igual que a mis compañeros de maestría los cuales siempre me regalaban sus críticas constructivas.

A mi abuelita, porque siempre desde que inicie mi carrera como Ingeniero Civil e incluso ahora durante mis estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, no ha reparado en sentirse preocupada por mi bienestar y siempre ha estado para escucharme y aconsejarme.

A mi amada esposa Fabiola Colín Antonio y su familia por todo el apoyo y admiración que me muestran siempre. Por regalarme una familia maravillosa y por hacerme inmensamente feliz. Sin todo su apoyo esto no sería posible.

Gracias infinitas, a mis amigos más cercanos por brindarme siempre su tiempo para escucharme, apoyarme y divertirnos (Mauricio, Mario, Alfonso, Juan Pablo, Araceli, Damaris, Cesar, Guillermo e Israel).

Finalmente, deseo agradecer a mi familia y a todas aquellas personas que quiero, amo, valoro, admiro y respeto pues siempre serán parte de mi persona y de una u otra forma han contribuido a mi formación y la culminación de este trabajo.

RESUMEN

El diseño sísmico de edificios contempla la posibilidad de que las estructuras giren alrededor de un eje vertical. Este comportamiento se conoce como torsión sísmica. Los reglamentos de diseño incluyen este comportamiento a través de un momento torsor el cual involucra a la excentricidad de diseño, formada de la suma de dos excentricidades la natural (e_s) y la accidental (e_a).

El cálculo de la excentricidad natural es aproximado, por variaciones en las distribuciones de masas y rigideces. Lo anterior conlleva a tener valores distintos de e_s y esto es contemplado en los reglamentos por la llamada excentricidad accidental.

Para cubrir los efectos debidos a la excentricidad accidental, los reglamentos de diseño recomiendan que la misma se calcule como un porcentaje (β) de la dimensión en planta (b) del edificio perpendicular a la dirección de análisis del sismo. Sin embargo, no existe un consenso entre los reglamentos para estimar la e_a .

Lo anterior sugiere que las recomendaciones ofrecidas requieren mayor estudio; sobre todo debido a que dichas recomendaciones fueron obtenidas a partir de estudios basados en modelos sencillos de un sólo piso. Por ello, algunos autores (Escobar, *et al.*, 2004) (De la Colina y Benítez, 2006) han llegado a la conclusión de que las recomendaciones de diseño para resolver el problema de la excentricidad accidental deben basarse en otras distribuciones de excentricidades, considerando por ejemplo, cambios de la excentricidad accidental con respecto a la altura de los edificios o utilizando relaciones simples que permitan incorporar sus efectos.

Por otro lado, Escobar, *et al.*, en 2004 mencionan que el uso de las recomendaciones de los reglamentos de diseño sísmico, en modelos tridimensionales conduce a tener que realizar un número de análisis igual a 4^{np} donde np es el número de pisos.

En este trabajo se propone un procedimiento simplificado que requiere de un sólo análisis dinámico lineal para tomar en cuenta los efectos de la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios, a través de una relación simple que utiliza un factor que amplifica la respuesta de un modelo torsionalmente balanceado.

El valor y uso del factor mencionado se basa en 10,000 observaciones obtenidas a través de simulación Monte Carlo (Metropolis y Ulam, 1949) en cada uno de los ocho modelos representativos de edificios de oficinas estudiados. Garantizando estadísticamente a partir del coeficiente de variación de los datos, que el factor mencionado toma en cuenta la amplificación producida por los efectos de la excentricidad accidental.

En detalle, las observaciones corresponden a los elementos mecánicos y cinemáticos de todas y cada una de las trabes y columnas, así como los desplazamientos relativos de entrepiso de todos los pisos que conforman cada modelo.

Lo anterior, se obtuvo simulando los efectos de la excentricidad accidental a través de variaciones en la magnitud y posición de la carga viva instantánea, así como los cambios en la rigidez de los

elementos estructurales y realizando análisis lineales paso a paso utilizando un registro sísmico bidireccional correspondiente a terreno firme.

Este documento se organiza en dos capítulos: En el primero de ellos se presenta el protocolo de investigación aprobado. El segundo capítulo presenta el artículo enviado en el cual se muestra el procedimiento simplificado de diseño por sismo en edificios, la metodología para la obtención de los denominados factores de amplificación por excentricidad accidental, los datos de los modelos estructurales y el registro sísmico utilizado. Además, se describe la aplicación del Método de Monte Carlo donde se definen las variables aleatorias consideradas para simular los efectos de la excentricidad accidental y los parámetros de respuesta seleccionados. Posteriormente se muestran los resultados y su discusión donde pueden encontrarse gráficas y tablas que resumen los datos obtenidos de los ocho modelos estudiados. Finalmente, se muestran las conclusiones del trabajo realizado.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
CONTENIDO.....	V
CAPÍTULO 1 PROTOCOLO DE TESIS	6
1. Descripción del proyecto	7
1.1 Motivación del proyecto	7
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivo general.....	9
1.5 Objetivos particulares	9
1.6 Alcances y limitaciones	10
2. Metodología propuesta	10
3. Estado del arte	10
4. Cronograma de Actividades	13
5. Infraestructura requerida.....	14
6. Contribuciones esperadas	14
7. Referencias	14
CAPÍTULO 2 ARTÍCULO ENVIADO.....	16
COMPROBANTE DE ENVIO	17
RESUMEN	18
ABSTRACT	18
INTRODUCCIÓN.....	18
PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE DISEÑO POR SISMO EN EDIFICIOS.....	19
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE FACTORES A_{ea} con $p = 0.02$	20
DATOS DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES Y REGISTRO SÍSMICO.....	21
Materiales de los elementos estructurales.....	21
Registro sísmico.....	22
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTE CARLO	22
Variables aleatorias y sus parámetros	22
Justificación del número de simulaciones N.....	23
Parámetros de respuesta seleccionados.....	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
Resultados de histogramas de factores A_{ea} modelo M4C6.....	25
Resultados de factores A_{ea} con $p = 0.02$ del modelo M4C6	28
Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ de todos los modelos estudiados	30
CONCLUSIONES.....	35
REFERENCIAS	36

CAPÍTULO 1

PROTOCOLO DE TESIS

1. Descripción del proyecto

1.1 Motivación del proyecto

En la actualidad el diseño sísmico de edificios toma en cuenta la posibilidad de que la estructura gire alrededor de un eje vertical. Este comportamiento se conoce como torsión sísmica la cual incluye la torsión natural del edificio y la torsión accidental, causadas por la excentricidad natural y la excentricidad accidental respectivamente. Lo anterior produce fuerzas cortantes y momentos de torsión. Estos efectos se deben considerar en el diseño sísmico, ya sea bajo un análisis dinámico o estático.

En el caso del método estático, para el cálculo del cortante y del momento de torsión se requieren estimar las distribuciones de fuerzas sísmicas laterales, tanto en altura, como en planta. Para la distribución vertical de fuerzas en los pisos, se acepta que éstas se distribuyan en proporción a sus pesos y a sus alturas (NTCDS-04, 2004). Para la distribución de las fuerzas en planta se asume que las fuerzas sísmicas se apliquen en los centros de masa de cada nivel.

Para calcular el lugar por donde pasa el cortante sísmico V en un entrepiso, sólo se requiere calcular la resultante de las fuerzas sísmicas localizadas por arriba de dicho entrepiso, tomando en cuenta sus puntos de aplicación en planta (centros de masa).

Por otro lado, para determinar los momentos de torsión de entrepiso utilizando el método estático se requiere de conocer el punto donde teóricamente actúa la fuerza lateral de reacción elástica en cada entrepiso R . Esto conduce al concepto de centro de rigidez o torsión; el centro de rigidez también llamado centro de torsión CT se define como un punto con coordenadas tales que, al aplicar la fuerza cortante correspondiente al piso en estudio, éste únicamente se traslade horizontalmente (Paulay y Priestley, 1923).

En el caso hipotético de que V y R están alineados en todos los entrepisos, se tienen fuerzas concurrentes, por lo que el momento resultante es igual a cero y solo se tiene movimiento lateral del edificio sin torsión. Sin embargo, si las fuerzas no son concurrentes, se tiene un momento de torsión respecto al eje vertical del edificio.

Lo anterior implica que el momento de torsión es proporcional a la magnitud de la fuerza cortante multiplicada por la distancia entre V y R . Esta distancia se conoce como excentricidad de entrepiso.

“Ya sea, para un método estático o dinámico se deben calcular las fuerzas cortantes, la diferencia es que en el método dinámico las fuerzas laterales aplicadas en los centros de masa de los entrepisos se determinan a partir de la respuesta dinámica de la estructura” (García, 2015).

Lo anterior hace evidente la necesidad de información respecto al diseño por torsión; Los reglamentos de diseño por sismo tienen establecidos procedimientos para incluir el efecto de la torsión. Sin embargo algunos autores (Escobar *et al.*, 2004) mencionan que se invierte mucho tiempo de cálculo en un análisis que considere la torsión, a pesar de contar con los ordenadores actuales y a su vez han propuesto simplificaciones (Escobar *et al.*, 2004) a los procedimientos que marcan los reglamentos o han abordado investigaciones con el fin de contribuir con información referente al comportamiento de algunas variables que definen la torsión, en particular estos últimos

se han enfocado en la torsión accidental producida por la excentricidad accidental (García, 2015), (De la Colina y Benítez, 2006), (De la Colina *et al.*, 2011) y (De la Colina *et al.*, 2016).

La excentricidad accidental es causada por diversas incertidumbres (Álvarez, 2003) como la distribución de las cargas vivas en un piso y las propiedades y características de los materiales que conforman los elementos estructurales. Esta incertidumbre es abordada en los reglamentos proponiendo valores fijos de la posición del centro de masas y requiriendo que se realicen análisis de los edificios moviendo las masas a estas posiciones fijas, lo anterior lleva a realizar 4^º análisis (Álvarez, 2003) para un edificio. Sin embargo, algunos autores (García, 2015), (De la Colina, *et al.*, 2016) enfatizan que la naturaleza aleatoria de la excentricidad accidental solo es una estimación útil para el propósito del diseño. Por lo que hay que mencionar que se obtienen estimaciones fijas de la respuesta estructural aun cuando la misma en esencia tiene una componente aleatoria y si a esto se agrega la cantidad de análisis que se deben realizar se invierte mucho tiempo de cálculo en un análisis que considere la torsión, a pesar de contar con los ordenadores actuales.

Por esta razón, en este trabajo se propone un procedimiento simplificado para incorporar la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios considerando en el proceso la naturaleza aleatoria de la excentricidad accidental, con la limitante de considerar que los modelos estudiados tienen excentricidad natural igual a cero.

En este trabajo utilizando simulación Monte Carlo y un programa de análisis estructural (SAP2000 y/o Canny-E), se analizarán dinámicamente ocho modelos estructurales representativos de edificios de marcos de concreto de 4, 7 y 10 niveles, con el objetivo de establecer un procedimiento simplificado para incorporar la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios.

La principal motivación de esta investigación es simplificar el procedimiento de diseño por torsión, y reducir el tiempo de análisis en modelos tridimensionales.

El tener métodos que simplifiquen la cantidad de cálculos, garantizarán un ahorro de tiempo. Adicionalmente, investigaciones como ésta en las que se considera la naturaleza aleatoria de la excentricidad accidental, pueden formar parte de los procedimientos incluidos en los reglamentos de diseño por sismo.

1.2 Planteamiento del problema

Los reglamentos de diseño por sismo existentes permiten analizar las estructuras de edificios tomando en cuenta únicamente traslación de los pisos. Para incluir el efecto de la torsión sísmica los reglamentos consideran un momento de torsión en cada entrepiso, obtenido del producto de la fuerza cortante sísmica en cada dirección de análisis y la llamada excentricidad de diseño, la cual a su vez se forma de la suma de la excentricidad natural y la excentricidad accidental.

Los reglamentos de diseño recomiendan posiciones fijas de la resultante de las masas, con los cuales se estima el valor de la excentricidad accidental ($\pm\beta b$) Sin embargo, en la realidad la ubicación de dichas masas durante la ocurrencia de un sismo es aleatoria. Adicionalmente, estudios recientes que han abordado este problema (De la Colina y Almeida, 2004) y (De la Colina, *et al.*, 2011) muestran, que se experimentan excentricidades mayores en pisos superiores de los edificios.

Lo que permite creer que las recomendaciones de diseño para resolver el problema de la excentricidad accidental deben basarse en otras distribuciones de excentricidades. Por ejemplo, García, 2015 sugiere considerar cambios de la excentricidad accidental con respecto a la altura de los edificios

Por otro lado, no existe un consenso en los reglamentos en cuanto a la forma de estimar el valor de la excentricidad accidental; La siguiente tabla muestra las recomendaciones de cuatro reglamentos de diseño por sismo. En los reglamentos, la excentricidad accidental se estima como un porcentaje β de la dimensión en planta del edificio perpendicular a la dirección de análisis.

CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN	β
<i>Uniform Building Code, 1997</i>	5.00 %
<i>European Committee for Standardisation (ECS), 2004;</i>	5.00 %
Reglamento de contrucciones del Distrito Federal, NTC, 2004	10.00 %
<i>National Building Code of Canada, 2010</i>	10.00 %
<i>International Building Code, 2015-ASCE7-05</i>	$(5.00\%)A_x$

En la tabla anterior A_x es un factor que considera el desplazamiento máximo del nivel en estudio y el desplazamiento promedio de los extremos de dicho nivel. El valor de A_x está limitado a ser menor o igual que tres, por lo que el máximo valor que puede alcanzar β es 15.00%.

A su vez, si se quisiera seguir al pie de la letra las recomendaciones de los reglamentos, su uso en modelos tridimensionales de estructuras conduce a realizar un número de análisis igual a 4^{np} (Escobar, *et al.*, 2004).

1.3 Justificación

Al establecer un procedimiento simplificado se logrará una reducción del tiempo de cálculo de la respuesta a torsión accidental y esto puede ayudar a realizar más estudios que permitan obtener nuevos criterios para incluirse en los reglamentos de diseño por sismo. También, es justificable el trabajo ya que poder realizar análisis analíticos en menor tiempo y con la seguridad de que los resultados son comparables con los obtenidos de análisis rigurosos es el pretexto perfecto para realizar más pruebas en modelos reales y corroborar los resultados obtenidos tanto de forma analítica como práctica. Las potencialidades internas de poder simular fenómenos reales, será siempre justificable además de las ventajas de simular un modelo mejorado que represente con mayor precisión el comportamiento de una estructura (Alberto, 2003).

1.4 Objetivo general

Establecer un procedimiento simplificado para incluir los efectos de la excentricidad accidental, en modelos estructurales representativos de edificios de marcos de concreto reforzado.

1.5 Objetivos particulares

1. Realizar análisis lineales de los modelos estructurales sin excentricidad accidental.

2. Usar el Método Monte Carlo (*MMC*) y estimar la magnitud de la carga viva instantánea y su posición, a su vez con el *MMC* estimar valores de rigidez a flexión de traveses y columnas.
3. Realizar “n” análisis lineales de los modelos aplicando los datos obtenidos anteriormente
4. Obtener histogramas de los elementos mecánicos de los elementos estructurales y normalizarlos respecto al primer punto.
5. Establecer una relación entre los resultados del punto anterior y los resultados de obtenidos en el objetivo particular 1.

1.6 Alcances y limitaciones

- Los modelos son representativos de edificios de oficinas a base de marcos de concreto reforzado de 4, 7 y 10.
- Se realizarán los análisis con un único registro de aceleraciones correspondiente a terreno firme en dos direcciones ortogonales (Sismo “El centro-1940”).
- Se analizarán únicamente el efecto de la excentricidad accidental, por lo que los modelos tienen excentricidad natural igual a cero.

2. Metodología propuesta

Utilizando simulación Monte Carlo y un programa de análisis estructural, se analizarán dinámicamente ocho modelos estructurales representativos de edificios de marcos de concreto reforzado de 4, 7 y 10 niveles, con el objetivo de establecer un procedimiento simplificado para incorporar la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios. Se asume para fines de este trabajo, que la excentricidad accidental se debe a las siguientes variables aleatorias: magnitud y posición de la carga viva instantánea y la rigidez a flexión de los elementos estructurales.

Los valores de las variables aleatorias se estimarán utilizando funciones de densidad de probabilidad (*fdp*). Posteriormente, se realizarán simulaciones para obtener un conjunto de respuestas estructurales de los casos torsionalmente desbalanceados.

Posteriormente se comparan dichas respuestas con las respuestas obtenidas de un análisis de un modelo equivalente sin excentricidad accidental (caso torsionalmente balanceado).

Finalmente, normalizando los elementos mecánicos obtenidos de la simulación Monte Carlo para probabilidades de excedencia específicas respecto a los elementos mecánicos obtenidos del caso balanceado, se obtendrán factores de amplificación por excentricidad accidental.

3. Estado del arte

De la Llera y Chopra (1994) estudiaron la respuesta de tres modelos de una sola planta, asumiendo la rigidez lateral de elementos resistentes como una variable aleatoria con una distribución normal (gaussiana). Ellos concluyen que los efectos de la torsión disminuyen al aumentar el número de elementos resistentes en el entrepiso y que las deformaciones por torsión atribuibles a la incertidumbre en la rigidez son menores que aquellas implicadas por excentricidades accidentales

especificadas por los reglamentos. Sin embargo, su estudio está limitado a modelos de un solo piso con magnitud y posición del centro de masa determinista.

Ruiz S. *et al.*, (2001) realizan un estudio de las cargas vivas en edificios de oficinas, reportando conclusiones para cambiar valores utilizados en el diseño sísmico. Adicionalmente sus resultados comprueban la forma en que se distribuyen las cargas vivas. Sus resultados concuerdan con los de otros autores, la carga magnitud de la carga viva instantánea sigue una distribución de probabilidad del tipo gamma con media 75.10 kg/m² y un coeficiente de variación igual a 0.292.

Dimova y Alashki (2003) presentan una estimación analítica de los efectos dinámicos, causados por el desplazamiento del centro de masa en estructuras simétricas. En este trabajo se analizó una estructura de un piso, considerando la masa uniformemente distribuida sobre la losa. La carga sísmica de diseño se calculó utilizando el espectro de respuesta del *European Committee for Standardisation* (ECS, 2002). La solución analítica aproximada demostró que la recomendación del ECS para el análisis multimodal subestima los efectos torsionales accidentales de hasta un 21% para una excentricidad de 0.05b. Aportando información consistente con otros autores de que los valores de la excentricidad accidental en edificios no deben considerarse únicamente de forma determinista.

Escobar *et al.*, (2004) presentan el método denominado Procedimiento Simplificado de Diseño, *PSD* el cual reduce los cálculos en el diseño por torsión sísmica estática de edificios. Para ello se estudió la distribución de las fuerzas cortantes entre los elementos resistentes de entrepiso en edificios diseñados por torsión sísmica. Se analizaron los factores que afectan la excentricidad de diseño, particularmente la excentricidad accidental, con el objetivo de simplificar su manejo en el criterio de diseño por torsión sísmica del Reglamento de construcciones del Distrito Federal y sus normas técnicas complementarias del 2001.

Sin embargo, el reglamento de construcciones actual es el RCDF-2004, por lo que es conveniente seguir realizando estudios e investigación enfocada al diseño por torsión. Además, sus resultados se limitan a comprarse con el ejemplo de un libro de la referencia (Bazán y Meli, 1998).

De la Colina y Almeida (2004) estudiaron la torsión accidental de edificios de baja altura. En ese trabajo se estudió la excentricidad accidental de manera probabilista basada en simulaciones Monte Carlo. Se utilizaron modelos con tres elementos laterales resistentes ante carga lateral a lo largo de cada dirección ortogonal. En dicho estudio dinámico, se calcularon las probabilidades de exceder los valores prescritos de las demandas de ductilidad. En este estudio, la ubicación del centro de masa en cada piso, así como los valores de rigidez fueron tratados como variables aleatorias tomando como consideración que no hay correlación entre ellas. La función de probabilidad que se empleó para la variación espacial de los centros de masa (carga muerta y viva) se consideró de tipo triangular. Ellos concluyen que la demanda de ductilidad de los elementos resistentes ante carga lateral disminuye al incrementar la excentricidad natural y muestran que la probabilidad de que se supere un determinado valor de la excentricidad accidental va disminuyendo en el entrepiso de abajo y aumenta con el número de plantas por encima del entrepiso.

De la Colina y Benítez (2006) presentan resultados de un estudio probabilista de la excentricidad accidental (e_a) en edificios de varios pisos. El estudio incorpora resultados estadísticos de

mediciones recientes de cargas vivas en edificios de tres tipos: departamentos, oficinas y escuelas. El trabajo, utiliza el Método Monte Carlo y estudia el efecto de varias variables en el cálculo de las funciones de densidad de probabilidad de la excentricidad accidental en edificios. A diferencia de algunos códigos de construcción actuales que dan un solo valor de la excentricidad accidental para todo tipo de edificios, el propósito de su estudio es proponer fdp's para diferentes condiciones de diseño, llevando a recomendaciones específicas de e_a asociadas con una probabilidad de excedencia dada y constante. El estudio reconoce que se deben especificar diferentes valores de e_a dependiendo de: 1) Tipo de estructura 2) Uso del edificio y 3) Altura de entrepiso. Se incorpora también en su estudio la rigidez a flexión de los elementos estructurales como una variable aleatoria. Del estudio se concluye que las variaciones de la rigidez a flexión de los elementos siguen una distribución normal (gaussiana) de media 0.498 y desviación estándar 0.037.

De la Colina *et al.* (2011) abordaron la excentricidad accidental bajo un enfoque probabilista mediante el método de Monte Carlo. Este estudio incorpora la posición y la magnitud de las cargas vivas para estimar la probabilidad de excedencia de las excentricidades accidentales.

En dicho trabajo se emplearon 5 modelos de edificios de oficinas con una geometría en planta cuadrada y 10 rectangular, por cada uno se tomaron en cuenta tres cantidades diferentes para la carga muerta. Se generaron cantidades aleatorias con distribución gamma para la intensidad de la carga viva, distribución normal para la posición de la carga viva, así como una distribución normal para la rigidez de los elementos resistentes a fuerzas laterales. Se consideró que no hay una correlación entre las propiedades de las columnas como la rigidez de las mismas, que la excentricidad natural es cero, y se tomó en cuenta sólo el comportamiento elástico. Este estudio mostró el efecto que provoca la posición del entrepiso, el número de columnas, y la dirección de análisis en los planos rectangulares en la excentricidad accidental. Se observó que la probabilidad de exceder un cierto valor de excentricidad accidental en los entrepisos superiores es mayor que en los entrepisos inferiores. Es importante mencionar que en este estudio se utilizó un valor del coeficiente de variación de 0.272 sin importar las diferencias entre las áreas de los modelos.

Para la ubicación del centro de masas por carga viva utilizan una función de densidad de probabilidad del tipo normal (gaussiana) con media $0.5b$ (b es una de las dimensiones en planta del piso estudiado) y desviación estándar de $0.037b$.

García, (2015) analizó algunos parámetros de la excentricidad accidental utilizando simulación Monte Carlo y comparó sus resultados contra los valores obtenidos utilizando las recomendaciones de algunos reglamentos. Su estudio concluye que la incertidumbre de la carga viva y las rigideces afectaron principalmente a los valores de carga axial en columnas.

Adicionalmente, reporta que las probabilidades de excedencia de la excentricidad accidental fueron mayores para modelos con relaciones 1:2. Por otro lado, concluye que los entrepisos superiores son más vulnerables a la torsión ocasionada por la excentricidad accidental que los entrepisos inferiores, corroborando resultados de otros autores.

4. Cronograma de Actividades

Actividades	Meses del semestre 2015B				
	08	09	10	11	12
Aprendizaje intermedio-avanzado del software de análisis estructural SAP2000 y Canny-E.	X	X			
Recopilación de información actual referente a los estudios, investigaciones y trabajos que incluyan la torsión sísmica en los edificios.			X	X	
Acreditación de los cursos del programa de maestría en estructuras correspondientes al periodo 2015B.	X	X	X	X	X
Revisión del estado del arte.	X	X	X	X	X
Elaboración del protocolo de investigación	X	X	X	X	X
Escritura del primer capítulo de la tesis (Introducción)					X

Actividades	Meses del semestre 2016A				
	02	03	04	05	06
Actualización y revisión del estado del arte.	X	X	X	X	X
Acreditación de los cursos del programa de maestría en estructuras correspondientes al periodo 2016A	X	X	X	X	X
Escritura del segundo capítulo de la tesis (Estado del arte).	X	X	X	X	X

Actividades	Meses del semestre 2016B				
	08	09	10	11	12
Actualización y revisión del estado del arte.	X	X	X	X	X
Creación de rutinas correspondientes para el uso de SAP200 y/o Canny-E, así como la automatización de los cambios requeridos en las variables aleatorias a utilizar		X	X	X	
Acreditación de los cursos del programa de maestría en estructuras correspondientes al periodo 2016B.	X	X	X	X	X
Escritura del tercer capítulo de la tesis (Metodología propuesta).	X	X	X	X	X
Escritura del cuarto capítulo de la tesis (Experimentación)				X	X

Actividades	Meses del semestre 2017A				
	02	03	04	05	06
Realizar “n” análisis lineales para obtención de elementos mecánicos considerando que los modelos tienen excentricidad accidental diferente de cero.	X	X			
Realizar un análisis lineal por modelo considerando que se tiene excentricidad accidental igual a cero.		X			
Establecer relación entre los elementos mecánicos del caso sin excentricidad accidental y los casos con excentricidad accidental.		X	X		
Actualización y revisión del estado del arte.	X	X	X		
Acreditación de los cursos del programa de maestría en estructuras correspondientes al periodo 2017A.	X	X	X	X	X
Escritura del quinto capítulo de la tesis (Resultados)			X	X	X
Escritura del sexto capítulo de la tesis (Conclusiones)			X	X	X

5. Infraestructura requerida

Las principales fuentes de información que se utilizarán para la realización de este trabajo serán, libros, tesis, artículos, conferencias, etc. Una de las principales formas para acceder a la información mencionada es mediante el uso de Internet el cual será proporcionado en la sala de residentes 2 en la cual tengo asignado un lugar para trabajar.

Para la realización de los modelos analíticos se utilizará el programa Canny-E, y para la realización de algunas tareas automáticas, revisiones y cálculos se utilizarán el software MatlabR2015a y la paquetería Microsoft Office Excel 2010-2013.

6. Contribuciones esperadas

Las contribuciones originales que se espera se deriven de esta investigación son las siguientes:

- Publicación de un artículo en revista indexada.
- Presentación del trabajo realizado en el XXI congreso nacional de ingeniería sísmica.
- Resultados que comprueben el procedimiento propuesto simplifica el cálculo del diseño sísmico por torsión accidental.

7. Referencias

(ICBO), I. C. o. B. O., 1997. Uniform Building Code. Whittier, CA: s.n.

Alberto, P. V. L., 2003. Análisis estructural con el método de elemento finito asistido por computadora. México DF.: s.n.

Álvarez, C. M. C., 2003. Evaluación de criterios de distribución del cortante por torsión sísmica estática. México DF.: Tesis de Licenciatura IPN.

American Society of Civil Engineers, 2006. Minimum design loads for buildings and other structures-ASCE. Standard 7-05: ASCE. EUA.

Associate Committee on the National Building Code, 2010. National building code of Canada: National Research Council of Canada, Ottawa.

Bazán, E. y Meli, R., 1998. Diseño sísmico de edificios. México D.F: Limusa.

Canada, N. R. C. o., 1995. National Building Code of Canada. Ottawa, Canada: s.n.

De la Colina, J. y Almeida, C., 2004. Probabilistic study on accidental torsion of low-rise buildings: Earthquake Spectra, 20:25-41.

De la Colina, J. y Benítez, B., 2006. Estudio probabilista sobre excentricidad accidental en edificios utilizando el método Monte Carlo. Puerto Vallarta, Jalisco: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.

De la Colina, J., González, C. A. y Valdés, J., 2016. Accidental eccentricities, frame shear forces and ductility demands of buildings with uncertainties of stiffness and live load: Engineering Structures 124, 113-127.

De la Colina, J., Ruiz, S. y Benítez, B., 2011. Accidental eccentricity of story shear for low-rise office buildings: *Journal of Structural Division, ASCE*, 137 (4), 513- 520..

De la Llera, J. y Chopra, A., 1994. Accidental and natural torsion in earthquake response and design of buildings: Report No. UCB/EERC-94/07. Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley.

Dimova, S. y Alashki, I., 2003. Seismic design of symmetric structures for accidental torsion: *Journal of Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 303-320.

Escobar S., A., Mendoza S., A. y Gómez M., R., 2004. Diseño simplificado para diseño por torsión sísmica estática. *Revista de Ingeniería Sísmica*, Issue 70, pp. 77-107.

European Committee for Standardisation (ECS), s.f. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Parte 1: general rules, seismic actions and rules for buildings: EN 1998-1:2004. Brussels, Belgium.

García D, G. V., 2015. Análisis de las probabilidades de excedencia de las respuestas de modelos estructurales con torsión sujetos a sismos usando simulación Monte Carlo. Toluca, Méx.: Tesis de Maestría UAEMex.

International Code Council (ICC), 2015. International building code: Country Club Hilss, IL, EUA.

NTCDS-04, 2004. Normas técnicas complementarias para diseño por sismo: *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México.

Paulay, T. y Priestley, M., 1993. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*: Wiley Interscience.

Soriano, A. y Ruiz, S., 2001. Cargas vivas máximas para edificios de oficinas en la Ciudad de México: Reporte de investigación, Instituto de ingeniería UNAM.

UNAM, 1991. Comentarios y ejemplos a las normas técnicas complementarias para diseño por sismo, DDF. México, DF. Instituto de Ingeniería.

CAPÍTULO 2
ARTÍCULO ENVIADO

COMPROBANTE DE ENVIO

INICIO ACERCA DE ÁREA PERSONAL BUSCAR ACTUAL ARCHIVOS AVISOS NORMAS PARA AUTORES

Revista
de Ingeniería
Sísmica


Sociedad
Mexicana
de Ingeniería
Sísmica

Inicio > Usuario/a > Autor/a > Envíos > #490 > Resumen

#490 RESUMEN

RESUMEN
REVISIÓN
EDICIÓN

ENVÍO

Autores/as Título Archivo original Archivos comp. Emisor/a Fecha de envío Sección Editor/a Comentarios del autor/a	Gustavo Santos Gálvez Cortés, Jaime De la Colina Martínez, Jesús Valdés González ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE TORSIÓN ACCIDENTAL SÍSMICA A PARTIR DE LA AMPLIFICACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN MODELO TORSIONALMENTE BALANCEADO 490-1204-1-SM.DOCX 2017-11-30 Ninguno AÑADIR UN ARCHIVO COMPLEMENTARIO Chao Gustavo Santos Gálvez Cortés <input type="checkbox"/> noviembre 30, 2017 - 03:13 Ninguno asignado/a Excelente tarde. De antemano agradezco la atención brindada. Envío el siguiente artículo para su consideración.
--	---

ESTADO

Estado	Asignación en espera
Iniciado	2017-11-30
Modificado por última vez	2017-11-30

METADATOS DEL ENVÍO

EDITAR METADATOS

AUTORES/AS

Nombre Institución País Resumen biográfico Contacto principal para la correspondencia editorial.	Gustavo Santos Gálvez Cortés <input type="checkbox"/> Facultad de ingeniería UAEMex México Estudiante de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Contacto principal para la correspondencia editorial.
Nombre Institución País Resumen biográfico	Jaime De la Colina Martínez <input type="checkbox"/> Facultad de ingeniería UAEMex México Profesor - Investigador. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México
Nombre Institución País	Jesús Valdés González <input type="checkbox"/> Facultad de ingeniería UAEMex —

OPEN JOURNAL SYSTEMS

Servicio de ayuda de la revista

USUARIO/A
 Ha iniciado sesión como...
gusantos90
 Mi perfil
 Cerrar sesión

NOTIFICACIONES
 Vista
 Gestionar

AUTOR/A
 Envíos
 Activo/a (1)
 Archivar (0)
 Nuevo envío

IDIOMA
 Español (España) ▼

CONTENIDO DE LA REVISTA
 Buscar
 Ámbito de la búsqueda
 Todo ▼

Examinar
 Por número
 Por autor/a

ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE TORSIÓN ACCIDENTAL SÍSMICA A PARTIR DE LA AMPLIFICACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN MODELO TORSIONALMENTE BALANCEADO

Gustavo Santos Gálvez Cortés⁽¹⁾, Jaime De la Colina Martínez⁽²⁾, Jesús Valdés González⁽²⁾

RESUMEN

Utilizando simulación Monte Carlo y el programa de análisis Canny-E, se analizan dinámicamente ocho modelos estructurales representativos de edificios de marcos de concreto reforzado de 4, 7 y 10 niveles, con el objetivo de establecer un procedimiento simplificado para tomar en cuenta los efectos de la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios. Los resultados muestran que es posible estimar los elementos mecánicos y cinemáticos de un modelo estructural, representativo de edificios con uso de oficinas sometido a acción sísmica, empleando una relación simple que utiliza un factor que amplifica la respuesta del modelo correspondiente torsionalmente balanceado.

Palabras clave: excentricidad accidental; simulación Monte Carlo; análisis dinámico; diseño sísmico; torsión sísmica

ESTIMATION OF THE SEISMIC ACCIDENTAL-TORSION EFFECTS FROM THE AMPLIFICATION OF THE RESPONSE OF A TORSIONALLY-BALANCED MODEL

ABSTRACT

Using Monte Carlo simulation and the Canny-E analysis program, eight structural models representing 4, 7 and 10-level reinforced concrete frames are dynamically analyzed with the aim of establishing a simplified procedure to take into account the effects of the accidental eccentricity in the seismic design of buildings. The results show that it is possible to estimate the mechanical and kinematic elements of structural models, representative of office buildings subjected to seismic action, using a simple relationship that uses a factor that amplifies the response of the corresponding torsionally-balanced model.

Keywords: accidental eccentricity; Monte Carlo simulation; dynamic analysis; seismic design; seismic torsion

INTRODUCCIÓN

El diseño sísmico de edificios considera la posibilidad de que las estructuras giren alrededor de un eje vertical. A este comportamiento se le conoce como torsión sísmica. Los reglamentos de diseño por sismo incluyen el efecto de la torsión sísmica a través de un momento torsor. El cálculo de dicho momento recurre

⁽¹⁾ Estudiante de maestría, ⁽²⁾ Investigador. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria, Toluca, México C.P. 50100, gusantos.gc@gmail.com, jaime_delacolina@yahoo.com, jvaldes@uaemex.mx.

al concepto de excentricidad de diseño, el cual se asume como la suma de dos excentricidades: la natural (e_s) y la accidental (e_a).

La excentricidad natural es aquella que se puede estimar a nivel de proyecto a partir de los valores nominales de las rigideces de los elementos estructurales y de la distribución supuesta de masas en el modelo. Por otro lado, la excentricidad accidental es una distancia que se estima para compensar, en la excentricidad de diseño, la posibilidad de variaciones en rigideces y masas.

Los reglamentos de diseño recomiendan que la excentricidad accidental se estime como un porcentaje (β) de la dimensión en planta (b) perpendicular a la dirección de análisis del sismo. El reglamento de diseño *International Building Code* (ICC, 2009), (ASCE, 2010) y el código europeo (ECS, 2004) estiman la excentricidad accidental igual a $0.05b$, por otro lado, el código de la ciudad de México (RCDF, 2004) especifica un valor de la misma igual a $0.10b$. La falta de consenso entre los reglamentos de diseño para estimar la excentricidad accidental de proyecto sugiere que las recomendaciones ofrecidas requieren mayor estudio.

Las excentricidades accidentales estimadas por los reglamentos para el diseño de edificios son sólo valores útiles para dicho propósito (García, 2015). Debe quedar claro que la excentricidad accidental es de naturaleza aleatoria, por lo que el valor recomendado por los reglamentos es solamente una aproximación determinista.

Estudios recientes que han abordado el problema de la excentricidad accidental (De la Colina, *et al.*, 2011), (De la Colina, *et al.*, 2016) sugieren proponer otros procedimientos para tomar en cuenta los efectos de la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios. Estos procedimientos alternativos deben ser congruentes con la magnitud de los efectos atribuibles directamente a la excentricidad accidental. Por otro lado, algunos autores (Padilla, 2002) y (Escobar, *et al.*, 2004) mencionan que el uso de las recomendaciones de los reglamentos en modelos tridimensionales de estructuras, conduce a tener que realizar un número de análisis igual a 4^{np} donde np es el número de pisos.

A partir de los argumentos anteriores, en este trabajo se propone un procedimiento simplificado que requiere un sólo análisis para tomar en cuenta los efectos de la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios. El procedimiento usa una relación simple empleando un factor que amplifica la respuesta del correspondiente modelo torsionalmente balanceado.

PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE DISEÑO POR SISMO EN EDIFICIOS

El procedimiento simplificado de diseño por sismo propuesto tiene por objetivo principal, estimar los elementos mecánicos o cinemáticos requeridos por el diseñador cuando un edificio presente cierta excentricidad accidental. El procedimiento utiliza la siguiente relación simple (ecuación 1) y tiene aproximadamente una probabilidad de excedencia del 2% ($p \approx 0.02$).

$$E_{dea2} = A_{ea2} * E_{bal} \quad (1)$$

Donde:

E_{bal} : Elemento mecánico o cinemático de cualquier elemento estructural que conforme el edificio y se obtiene de un único análisis dinámico lineal del modelo torsionalmente balanceado del edificio que desea diseñarse. Así, E_{bal} puede representar momentos flexionantes, cortantes, esfuerzo normal, desplazamientos relativos de entrepiso, etc. Debe quedar claro que torsionalmente balanceado implica que $e_s = 0$ y $e_a = 0$.

E_{dea2} : Son los elementos mecánicos o cinemáticos de diseño por sismo correspondientes a E_{bal} pero tomando en cuenta los efectos de la e_a y tienen una $p \approx 0.02$.

A_{ea2} : Es un factor de amplificación por excentricidad accidental con $p \approx 0.02$ aplicable a todos los elementos mecánicos o cinemáticos de diseño de cualquier elemento estructural. Este factor tiene un valor promedio igual a 1.20. La justificación del valor de este factor se presenta más adelante.

Los pasos del procedimiento simplificado de diseño por sismo propuesto se describen a continuación:

1. Obtener E_{bal} realizando un análisis dinámico lineal del edificio a diseñarse torsionalmente balanceado.
2. Obtener los E_{dea2} amplificando las respuestas anteriores por $A_{ea2} = 1.20$.

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE FACTORES A_{ea} con $p = 0.02$

El factor de amplificación $A_{ea2} = 1.20$ recomendado en el procedimiento propuesto se obtuvo del análisis estadístico de factores A_{ea} con $p = 0.02$. En esta sección se describe el procedimiento seguido para la obtención de dichos factores.

Se utilizó el Método de Monte Carlo (MMC) para simular los efectos de la excentricidad accidental en un total de ocho modelos representativos de edificios de concreto reforzado con uso de oficinas de 4, 7 y 10 niveles sometidos a un registro sísmico en dos direcciones ortogonales. Para cada modelo se realizaron 10,000 análisis lineales paso a paso. Se obtuvieron la misma cantidad de observaciones de cada parámetro de respuesta seleccionado en esta investigación, dichos parámetros se presentan en detalle más adelante. Las 10,000 observaciones obtenidas de un parámetro de respuesta se denominaron $\overline{E_{dea}}$. Se aclara que a partir de este momento se utiliza la notación con línea superior en las variables para denotar vectores.

Una vez obtenidas las 10,000 observaciones de cada modelo y cada parámetro de respuesta de cada elemento estructural, se normalizaron los 10,000 datos contenidos en $\overline{E_{dea}}$ respecto a los valores obtenidos al realizar un análisis lineal paso a paso considerando $e_s = 0$ y $e_a = 0$. Los resultados obtenidos del análisis mencionado se denominan (E_{bal}). La normalización realizada da lugar a los denominados *factores de amplificación por excentricidad accidental* ($\overline{A_{ea}}$), dichos factores se trataron estadísticamente para obtener histogramas de factores A_{ea} . Lo anterior da lugar a un histograma por cada parámetro de respuesta y por cada elemento estructural. Finalmente, de cada histograma se obtuvo un factor A_{ea} con $p = 0.02$. El diagrama de la figura 1 resume las actividades realizadas para la obtención de los factores A_{ea} y A_{ea} con $p = 0.02$

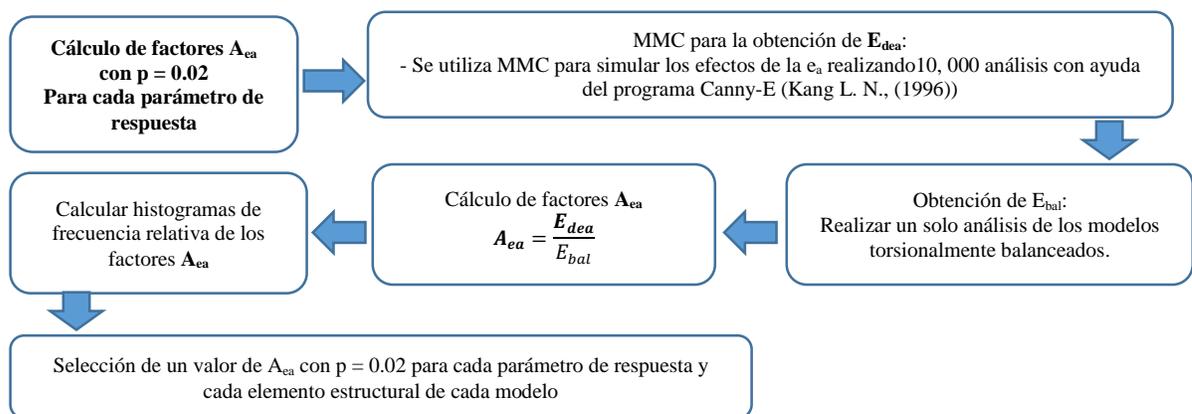


Figura. 1 Diagrama de flujo para el cálculo de factores A_{ea} con $p = 0.02$ para cada modelo y parámetro de respuesta

DATOS DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES Y REGISTRO SÍSMICO

Las geometrías de los modelos se seleccionaron con el objetivo de observar los efectos de la e_a en modelos con planta cuadrada y rectangular. Para cada modelo, se consideraron dos relaciones de aspecto en planta: 1:1 y 1:2. Se tienen modelos con 4, 7 y 10 niveles. Las alturas de entrepiso para todos los casos se consideraron de 3.00m. En todos los casos se asume que la losa de cada piso es un diafragma rígido.

En resumen, se tienen 8 modelos estructurales representativos de edificios de marcos de concreto reforzado para el uso de oficinas, 4 modelos con crujiás de 6.00 m en dirección “X” y dirección “Y” para 4 y 7 niveles; 4 modelos con crujiás de 8.00 m en dirección “X” y dirección “Y” para 7 y 10 niveles.

Las acciones que actúan sobre los modelos son la carga muerta y la carga viva instantánea, la primera específica en la tabla 1 siendo ésta una variable determinista, mientras que la segunda es una de las variables aleatorias a considerar en este estudio. Las secciones transversales de columnas y trabes, así como los valores de la carga muerta para los ocho modelos se resumen en la tabla 1.

En la tabla 1 se dio una identificación abreviada a cada uno de los modelos estudiados, ejemplo M4C6, la primer letra se refiere a la palabra Modelo (M), el primer número, se refiere al número de pisos que tiene dicho modelo, la segunda letra C o R se refieren a la relación en planta de cada modelo, relación 1:1 modelo cuadrado letra C, mientras que la relación 1:2 es un modelo rectangular letra R, finalmente el segundo número que aparece se refiere a las dimensiones de las crujiás en metros.

Tabla 1 Modelos, dimensiones nominales de trabes y columnas y cargas muertas

Modelo	Dimensión en planta y tamaño de crujiás (m)	Sección transversal de columnas (cm)	Sección transversal de trabes (cm)	Carga muerta (kg/m ²)
M4C6	En dirección X: 18.00 En dirección Y: 18.00 Crujiás a cada: 6.00	Pisos 1-2: 50 x 50	Todos los pisos: 50 x 25	Todos los pisos: 450.00
M4R6	En dirección X: 24.00 En dirección Y: 12.00 Crujiás a cada: 6.00	Pisos 3-4: 40 x 40		
M7C6	En dirección X: 18.00 En dirección Y: 18.00 Crujiás a cada: 6.00	Pisos 1-4: 60 x 60	Todos los pisos: 50 x 25	Todos los pisos: 450.00
M7R6	En dirección X: 24.00 En dirección Y: 12.00 Crujiás a cada: 6.00	Pisos 5-7: 50 x 50		
M7C8	En dirección X: 24.00 En dirección Y: 24.00 Crujiás a cada: 8.00	Pisos 1-4: 60 x 60	Todos los pisos: 60 x 25	Todos los pisos: 550.00
M7R8	En dirección X: 32.00 En dirección Y: 16.00 Crujiás a cada: 8.00	Pisos 5-7: 50 x 50		
M10C8	En dirección X: 24.00 En dirección Y: 24.00 Crujiás a cada: 8.00	Pisos 1-4: 70 x 70	Todos los pisos: 60 x 25	Todos los pisos: 550.00
M10R8	En dirección X: 32.00 En dirección Y: 16.00 Crujiás a cada: 8.00	Pisos 5-7: 60 x 60 Pisos 8-10: 50 x 50		

Materiales de los elementos estructurales

Los modelos se conforman de marcos de concreto reforzado. El módulo de elasticidad del concreto (E) es igual a 242, 487 kg/cm². La resistencia a la compresión del concreto es de $f'_c = 300$ kg/cm².

Registro sísmico

Para llevar a cabo los análisis dinámicos, los modelos estructurales se sometieron al registro sísmico del sismo del 18 de mayo de 1940 ocurrido en Imperial Valley al sureste de California también llamado sismo de “El Centro” en dos direcciones ortogonales. En principio, lo que interesa es conocer las estadísticas de los parámetros de respuesta de los casos con excentricidad accidental normalizados con respecto a los modelos sin excentricidad accidental por lo que cualquier otro registro podría utilizarse. Cabe mencionar que dicho registro corresponde a terreno firme. En la figura 2 se muestran los periodos a torsión de los modelos estudiados y el espectro de aceleraciones del registro sísmico utilizado.

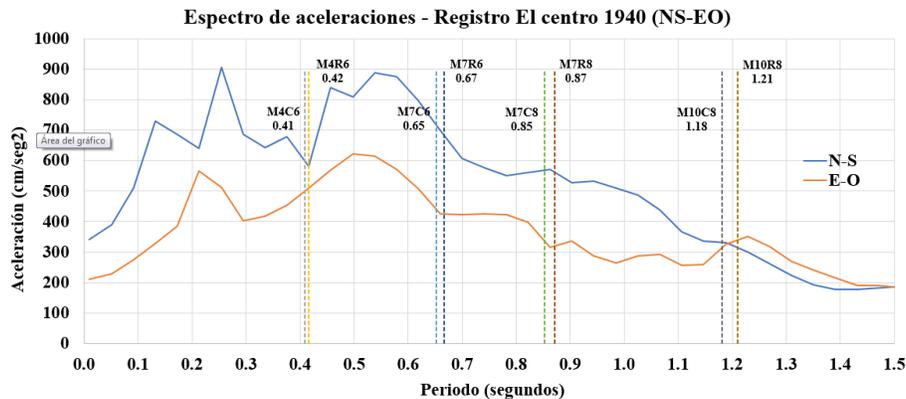


Figura. 2 Espectro de aceleraciones “El centro” (NS-EO) periodos a torsión de modelos estudiados

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTE CARLO

En este trabajo se analizaron dinámicamente ocho modelos estructurales con el fin de obtener información de los elementos mecánicos y cinemáticos que se presentan ante el caso de que un edificio presente excentricidad accidental y al mismo tiempo ocurra un evento sísmico. Se utilizó el Método Monte Carlo para simular los efectos de la e_a a partir de las variables aleatorias que la definen y obtener información de los parámetros de respuesta seleccionados descritos más adelante.

El Método Monte Carlo se aplicó de la siguiente manera y se resume en la figura 2:

1. Generar valores de las variables aleatorias utilizando sus funciones de densidad de probabilidad (fdp).
2. Introducir los valores generados al sistema en estudio, es decir, los modelos estructurales.
3. Obtener las respuestas que proveen información del comportamiento del sistema, para este caso son los parámetros de respuesta. Obtenidos después de realizar análisis dinámicos.
4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 “N veces”, para tener la misma cantidad de observaciones de cada parámetro de respuesta. Para este caso $N = 10,000$.
5. Una vez que se tienen las “N respuestas” de cada parámetro, se obtuvieron histogramas de frecuencia relativa de los mismos para todos los elementos estructurales que conforman cada modelo para observar su comportamiento estadístico.

VARIABLES ALEATORIAS Y SUS PARÁMETROS

Las variables consideradas como aleatorias se utilizan con el fin de simular los efectos de la excentricidad accidental en los modelos. Las variables aleatorias que definen la excentricidad accidental

consideradas en este trabajo son la magnitud y posición de la carga viva durante la ocurrencia de un sismo (carga viva instantánea), así como también las rigideces a flexión de traveses y columnas.

El MMC requiere conocer el comportamiento de las variables aleatorias, el cual se define a partir de sus respectivas funciones de densidad de probabilidad (fdp). Para los parámetros de la rigidez de los elementos estructurales (EI_t, EI_c) y la posición de la carga viva (GX, GY) se consideraron los estudios de las referencias (Soriano y Ruiz, 2001), (De la Colina, *et al.*, 2011) y (García, 2015). Para el valor de la media de la carga viva instantánea (WCVi) se siguieron las recomendaciones de la Norma ASCE (ASCE, 2010) que indica que en las combinaciones de carga que incluyen cargas muertas, cargas vivas y sismo se utilice un factor de 0.5 para reducir la intensidad de la carga viva. En tal caso, la carga viva que resulta tiene un valor de 122.01 kg/m² con un coeficiente de variación igual a 0.292 obtenido de los estudios de las referencias (García, 2015) y (De la Colina, *et al.*, 2016). La tabla 2 resume las variables aleatorias y los parámetros requeridos para construir sus respectivas fdp's.

Tabla 2 Variables aleatorias y sus parámetros

Abreviación	Variables aleatorias	fdp	Media	Desviación estándar	Coef. de variación
WCVi	Magnitud de la carga viva	Gamma	122.01 kg/m ²	35.62 kg/m ²	0.292
GX, GY	Posición de la carga viva	Normal	0.498 b (m)	0.037 b (m)	0.074
EI _t	Rigidez de traveses	Normal	EI _{nominal}	0.11 EI _{nominal}	0.110
EI _c	Rigidez de columnas	Normal	EI _{nominal}	0.11 EI _{nominal}	0.110

Justificación del número de simulaciones N

Los trabajos de las referencias (Diaz, 1995), (García, 2015) y (De la Colina, *et al.*, 2016) han aportado criterios para la selección del número de simulaciones (N) en estudios relacionados con el MMC. Un primer criterio es la estabilidad de la media y desviación estándar de algunos parámetros de respuesta, mientras que otro criterio se basa en las recomendaciones de la referencia (Hogg y Craig, 1995) para calcular un intervalo de confianza para la estimación de una determinada probabilidad *p*. La proporción *p* corresponde a la probabilidad de excedencia de los parámetros de respuesta. Utilizando el criterio anterior, para un intervalo de confianza del 95%, *p* = 0.02 y considerando un error del 10% de *p*, N resulta igual a 9,604.

Utilizando el criterio de la estabilidad de la media y desviación estándar se calculó para todas las traveses del primer nivel del modelo M4C6 el valor promedio y la desviación estándar del momento flexionante en su extremo derecho (Mder). Estos resultados se grafican contra el número de simulaciones realizadas para mostrar el efecto del número de simulaciones en dichos valores calculados y se muestran en la fig. 3. De estas gráficas se observa que N ≈ 10, 000 permite la estabilización de los parámetros anteriores.

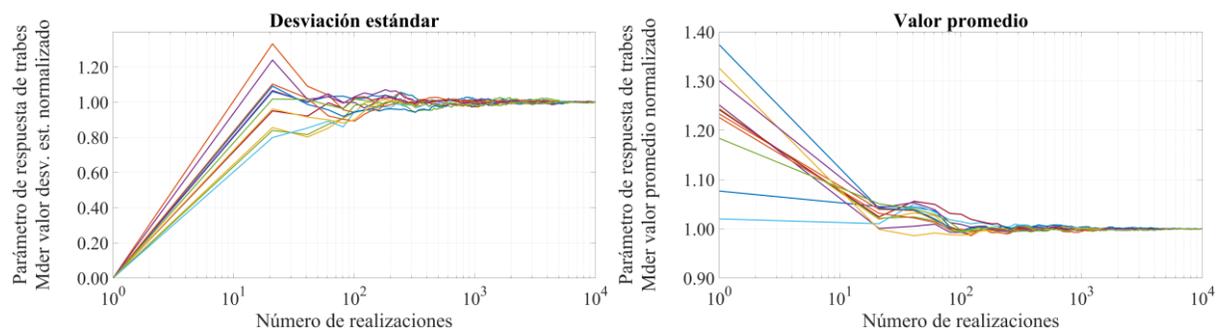


Figura. 3 Efecto del número de simulaciones (N) en la media y desviación estándar parámetro Mder de traveses del 1er nivel del modelo M4C6

Por otra parte, el trabajo realizado en la referencia (Diaz, 1995) muestra que para aproximar con un 95% de confianza la cola derecha de probabilidad 0.05 de una distribución desconocida obtenida a través de simulación el número mínimo de realizaciones a utilizar es 7,299 (Dato obtenido de la tabla 2 referencia (Diaz , 1995)).

Dada la naturaleza del MMC un mayor número de simulaciones conlleva a tener mayor precisión en los resultados por lo que N se selecciona igual a 10,000.

Parámetros de respuesta seleccionados

Para realizar el diseño de los elementos estructurales que conforman un edificio se utilizan los elementos mecánicos obtenidos del análisis sísmico y para revisar estados límite se revisan deformaciones y desplazamientos. Por esta razón se seleccionaron los siguientes parámetros de respuesta.

La selección de los parámetros de respuesta para traveses y columnas (ver tablas 3 y 4) obedece a que proporcionan la información necesaria para realizar el dimensionamiento y detalle de dichos elementos estructurales.

Tabla 3 Parámetros de respuesta de traveses

Parámetros de respuesta de traveses	Abreviación
Momento máximo flexionante en el extremo derecho de la trabe	Mder
Momento máximo flexionante en el extremo izquierdo de la trabe	Mizq
Cortante máximo de la trabe (no importa el extremo donde se presente)	VT

Para el caso de traveses no se requiere saber en qué instante del registro sísmico se presentó el momento flexionante o cortante máximo, debido a que la trabe debe diseñarse para soportar dichos valores máximos, según lo marcan distintos reglamentos de diseño por sismo.

Tabla 4 Parámetros de respuesta de columnas

Parámetros de respuesta de columnas	Abreviación
Esfuerzo normal máximo	Esf _N
Cortante máximo en dirección X	VXC
Cortante máximo en dirección Y	VYC

Se aclara que para la tabla 4 correspondiente a los parámetros de respuesta de columnas el Esf_N se calcula para cada instante del sismo y posteriormente se selecciona el valor máximo calculado.

La selección de los parámetros de respuesta cinemáticos mostrados en la tabla 5 obedece a que proporcionan la información necesaria para poder realizar revisiones de desplazamiento relativos de entrepiso. El cálculo de los desplazamientos relativos de entrepiso se realiza para cada instante del sismo y posteriormente se selecciona el valor máximo para cada uno de los entrepisos.

Tabla 5 Parámetros de respuesta cinemáticos

Parámetro de respuesta cinemáticos	Abreviación
Desplazamiento relativo de entrepiso máximo en dirección X	Idmx
Desplazamiento relativo de entrepiso máximo en dirección Y	Idmy

Es posible seleccionar otros parámetros de respuesta como por ejemplo los desplazamientos máximos de entrepiso o momentos y carga axial en columnas, sin embargo con los parámetros seleccionados es

posible la obtención de otras respuestas por ejemplo, el Esf_N involucra en su cálculo conocer los valores de la carga axial y momentos de la columna.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En resumen, se aplicó el MMC a ocho modelos estructurales para tomar en cuenta los efectos de la excentricidad accidental. Se realizaron 10,000 análisis dinámicos lineales en modelos con excentricidad accidental simulada. Los resultados de estos análisis se normalizaron respecto a la respuesta obtenida de un análisis lineal de los mismos modelos pero torsionalmente balanceados.

Resultados de histogramas de factores A_{ea} modelo M4C6

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del modelo M4C6 una vez aplicado el MMC. La figura 4 muestra el modelo M4C6 en tres dimensiones y su marco Y1. Como se puede observar se tienen doce traveses y dieciséis columnas por marco. Se utiliza la misma configuración del marco Y1 para mostrar los resultados de los factores A_{ea} para cada parámetro de respuesta obtenida en cada elemento estructural. Cabe mencionar que, aunque en principio se obtienen histogramas de factores A_{ea} para cada parámetro de respuesta, se optó por utilizar graficas de línea para poder mostrar los resultados de varios parámetros de respuesta en un solo elemento estructural. Sin embargo, el uso de la palabra histograma se mantiene en las figuras siguientes para no olvidar la naturaleza de los datos obtenidos.

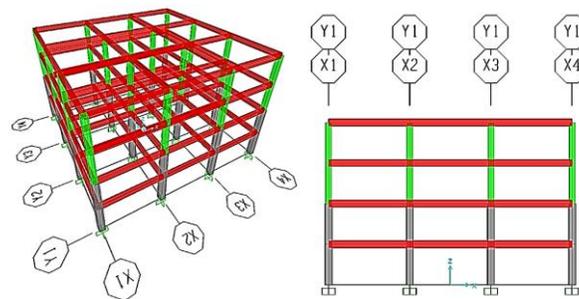


Figura. 4 Modelo M4C6 en tres dimensiones y su marco Y1

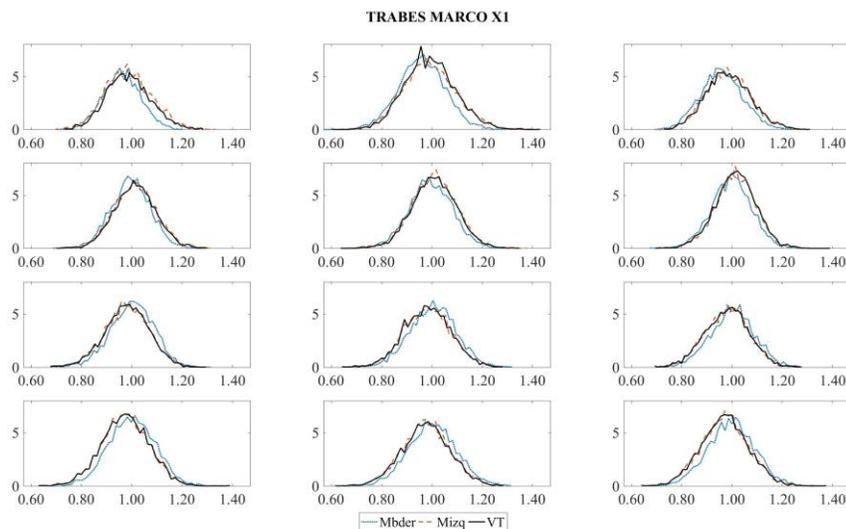


Figura. 5 Histogramas de factores A_{ea} en traveses – Marco X1 del modelo M4C6

En las figuras 5 y 6 se muestran los histogramas de frecuencia relativa de los factores A_{ea} para los tres parámetros de respuesta Mder, Mizq y VT de las doce travesas del marco X1 y Y1 respectivamente. Por facilidad se optó por graficar únicamente los valores de cada barra de cada histograma. Para una mejor lectura de los histogramas se omiten las leyendas de los ejes. Los factores A_{ea} se identifican en el eje horizontal mientras que las frecuencias relativas en porcentaje en el eje vertical. Los valores máximos de A_{ea} para el marco X1 son del orden de 1.40, mientras que para el marco Y1 el valor máximo es de 1.60.

En la figura 6 se observa que la cola derecha de los histogramas de los pisos superiores es mayor que en los pisos inferiores, indicando que para un valor fijo de A_{ea} la probabilidad de exceder dicho valor es mayor en los pisos superiores que en los inferiores. Este resultado concuerda con los de otros autores (De la Colina, *et al.*, 2011), (García, 2015) y (De la Colina, *et al.*, 2016).

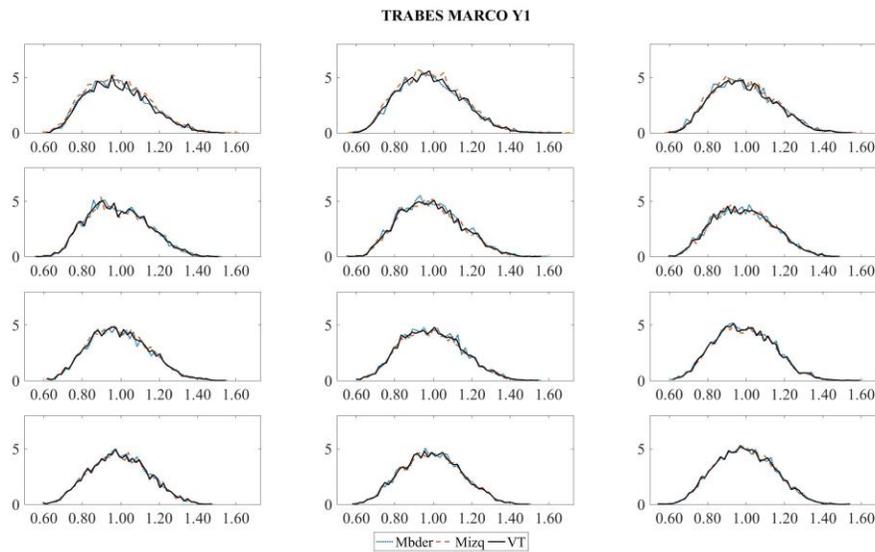


Figura. 6 Histogramas de factores A_{ea} en travesas – Marco Y1 del modelo M4C6

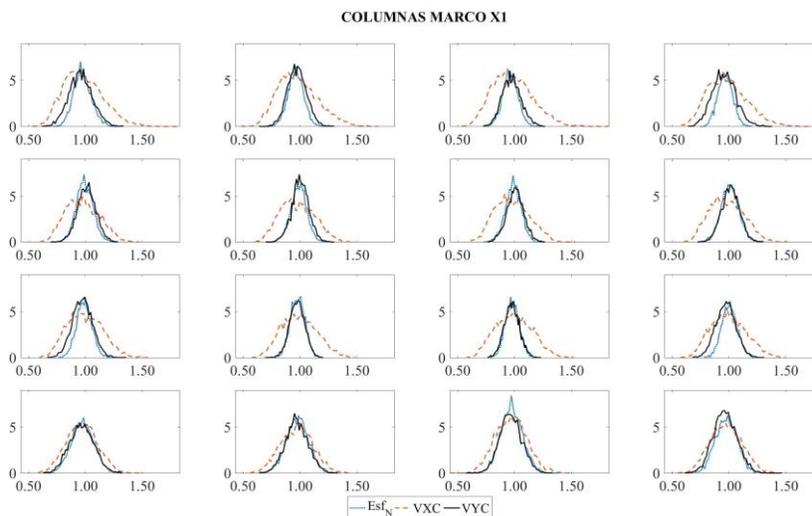


Figura. 7 Histogramas de factores A_{ea} en columnas – Marco X1 modelo M4C6

La figura 7 muestra los histogramas de factores A_{ea} para las 16 columnas del marco X1 del modelo M4C6 para los parámetros de respuesta Esf_N , VXC y VYC. Se observa que el valor máximo del factor A_{ea} del parámetro VXC es 1.50, mientras que para los parámetros VYC y Esf_N es 1.25.

Las figuras 8 y 9 muestran los resultados de los parámetros de respuesta cinemáticos ($Idmx$ e $Idmy$) del modelo M4C6. En dirección Y el valor máximo de A_{ea} es 1.20 mientras que en dirección X es 1.40. La forma de los histogramas indica que no se tiene el mismo efecto en el desplazamiento de entresuelo en las dos direcciones (X y Y). Lo anterior sugiere que el registro sísmico seleccionado afecta a los factores de amplificación por excentricidad accidental, aunque no directamente a la excentricidad accidental. Sin embargo, se ha comprobado que la selección del sismo no afecta a la excentricidad accidental ni a otros parámetros comparando los resultados obtenidos a partir de los valores estadísticos de sus medias.

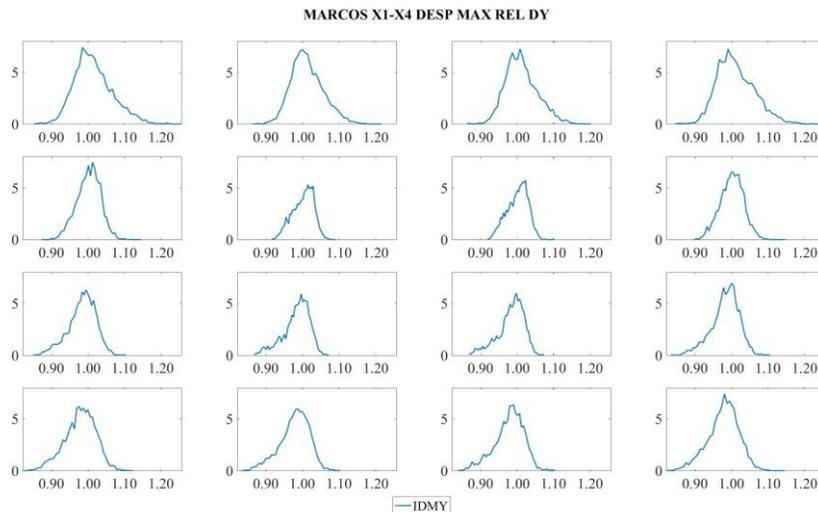


Figura. 8 Histogramas de factores A_{ea} parámetro de respuesta $Idmy$ modelo M4C6

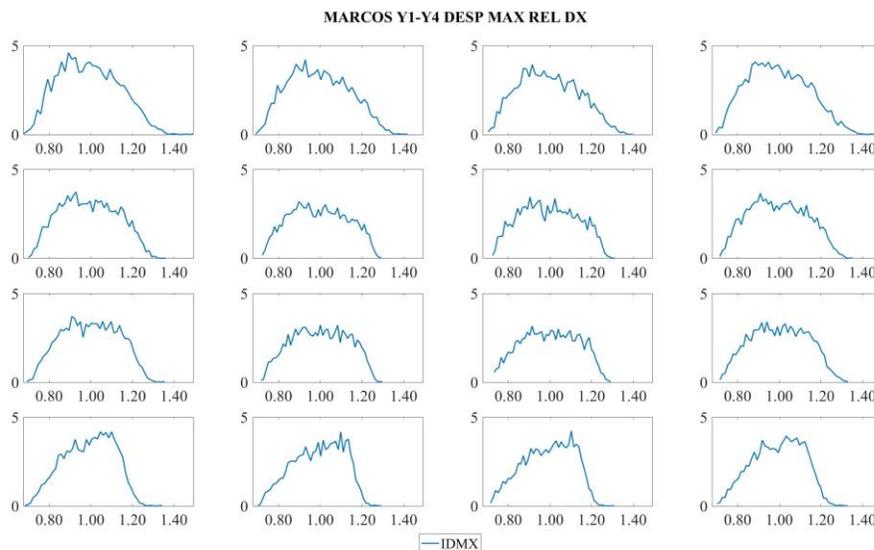


Figura. 9 Histogramas de factores A_{ea} parámetro de respuesta $Idmx$ modelo M4C6

Resultados de factores A_{ea} con $p = 0.02$ del modelo M4C6

Para aplicar el procedimiento simplificado propuesto en esta investigación se utiliza un factor de amplificación por excentricidad accidental A_{ea2} . Este factor tiene una probabilidad de excedencia aproximada de 2% ($p \approx 0.02$). Antes de poder obtener este factor se seleccionaron factores A_{ea} con probabilidad de excedencia igual a 2% ($p = 0.02$) para cada parámetro de respuesta.

En esta sección se muestran sólo los factores A_{ea} con $p = 0.02$ del modelo M4C6 para ejemplificar el trabajo realizado en los demás modelos.

Para un mejor entendimiento de las gráficas mostradas en las figuras 11 a 15, se explica lo siguiente: en la figura 10 (a) se muestran los histogramas de factores A_{ea} correspondientes a cada trabe del marco Y1 y se indica con una flecha la selección de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ de las trabes entre los marcos X2 y X3. En la figura 10 (b) se grafican los factores A_{ea} con $p = 0.02$ de los tres parámetros de respuesta (VT, Mder y Mizq) para cada piso de las trabes entre los marcos X2 y X3.

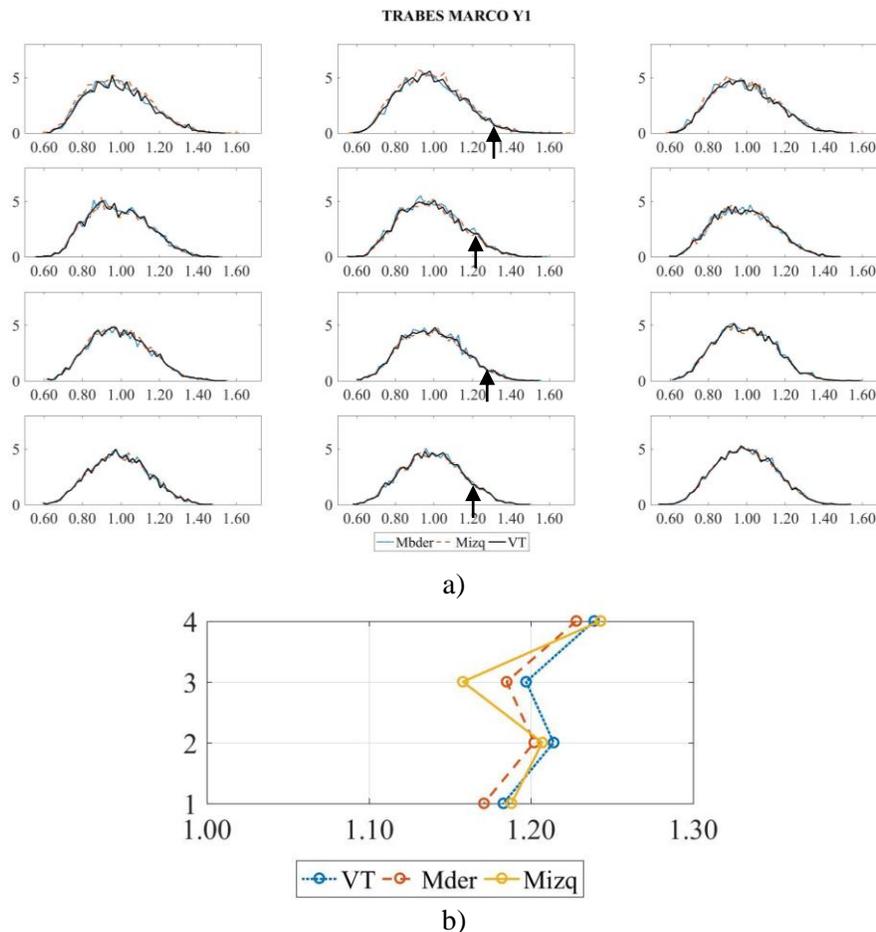


Figura. 10 Marco Y1 y selección de factores A_{ea} con $p = 0.02$ de trabes entre marcos X2 y X3 para los parámetros de respuesta VT, Mder y Mizq

En las figuras 11 a 14 se muestran los resultados de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ del modelo M4C6. Por facilidad, se omiten las leyendas en las gráficas, siendo el eje X los factores A_{ea} con $p = 0.02$ y el eje Y el número de piso del modelo.

Se añadieron etiquetas para indicar el marco del que se muestran resultados, así como las trabes correspondientes. La figura 11 muestra que para los marcos X la mayoría de los valores de A_{ea} oscilan entre 1.10 y 1.20. En la figura 12 para los marcos Y, la mayoría de los valores de A_{ea} oscilan entre 1.20 a 1.40.

Al igual que en los histogramas mostrados en la sección anterior, en las figuras 11 y 12 se observan valores distintos de los factores A_{ea} según la dirección de análisis a revisar. Lo anterior, es debido a los registros utilizados, los cuales tienen componentes de aceleración distinta en dirección X y dirección Y para el periodo a torsión del modelo estudiado.

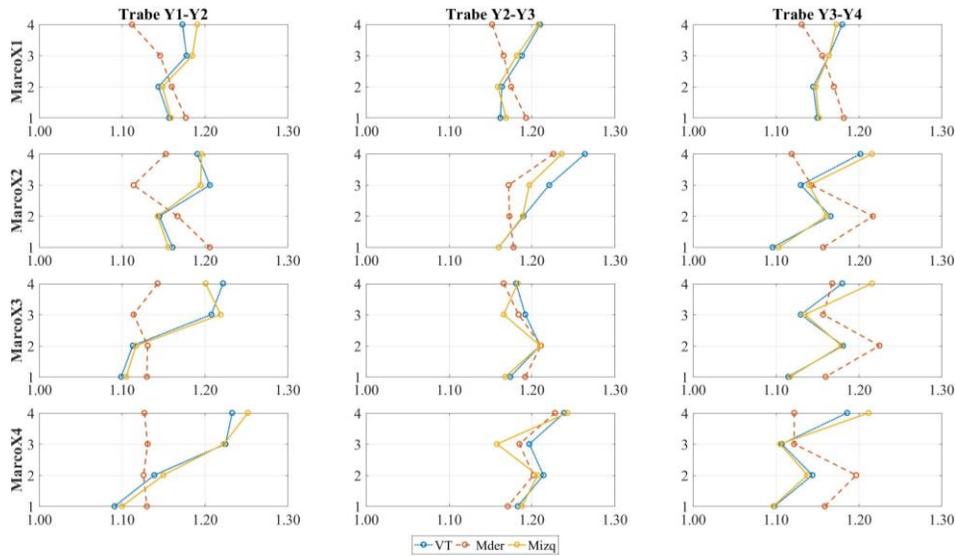


Figura. 11 Factores A_{ea} con $p = 0.02$ - Trabes marcos X del modelo M4C6

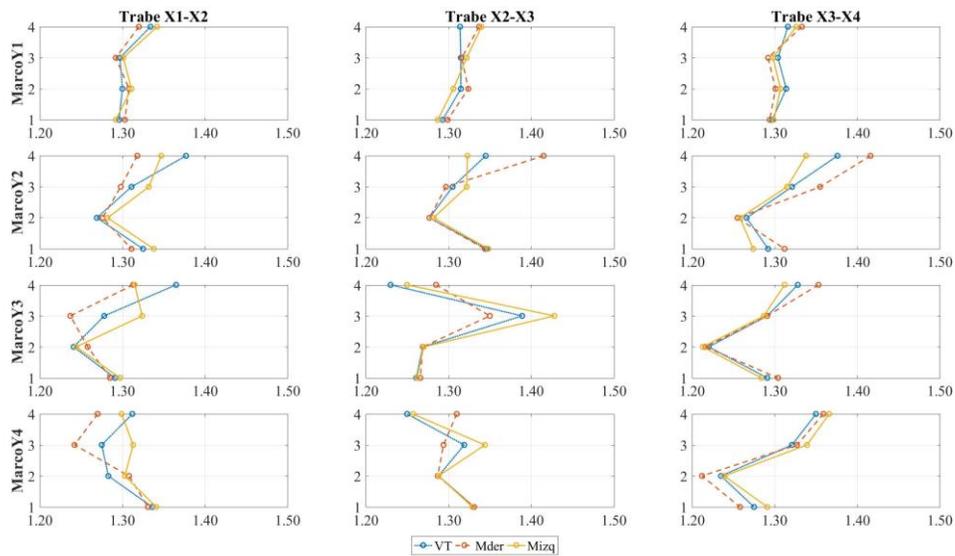


Figura. 12 Factores A_{ea} con $p = 0.02$ - Trabes marcos Y modelo M4C6

La figura 13 muestra los resultados de columnas. Se observa que el valor de A_{ea} para VXC es del orden de 1.30 mientras que para VYC y Esf_N es de 1.15 a 1.20.

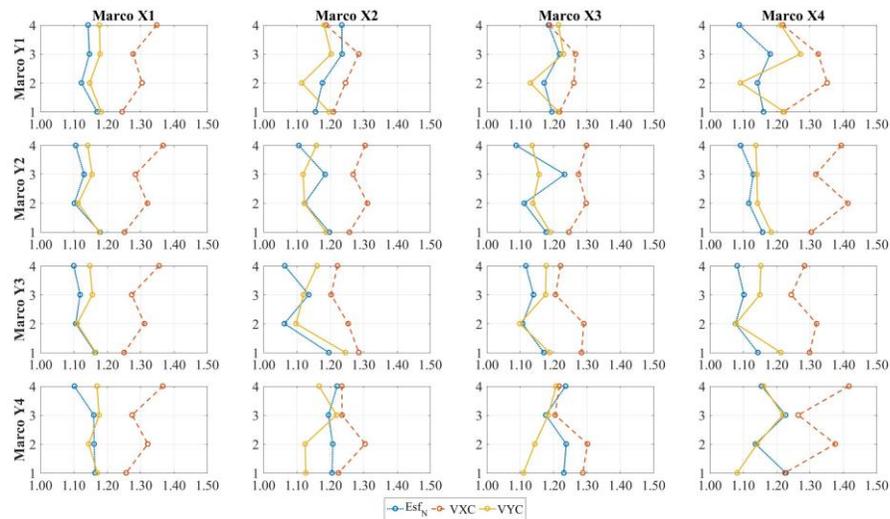


Figura. 13 Factores A_{ea} con $p = 0.02$ - Columnas modelo M4C6

La figura 14 a) y b) muestra los resultados del modelo M4C6 del parámetro de respuesta cinemático Id_{mx} e Id_{my} con valores de A_{ea} con $p = 0.02$ que oscilan entre 1.16 - 1.28 y 1.02 - 1.14 respectivamente. La diferencia entre los resultados de Id_{mx} e Id_{my} es aproximadamente del 12%.

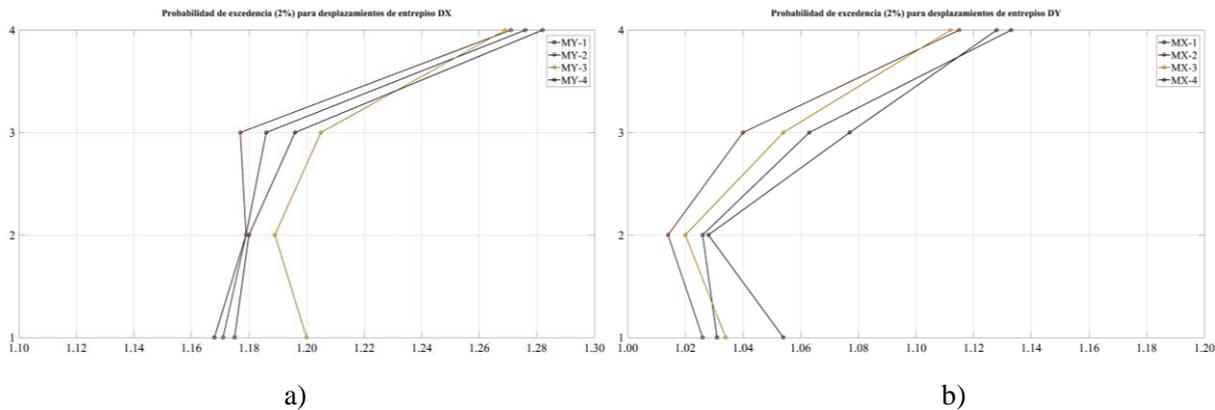


Figura. 14 Factores A_{ea} con $p = 0.02$ del parámetro Id_{mx} e Id_{my} del modelo M4C6

En general, de las figuras anteriores (11 a 14) se puede resumir lo siguiente: Los A_{ea} con $p = 0.02$ para traves de los marcos X tienen variaciones desde 1.10 hasta 1.26, para cualquiera de los parámetros de respuesta. Para traves de los marcos Y las variaciones son entre 1.21 y 1.43 y en cuanto a los resultados para columnas las variaciones de los factores A_{ea} son entre 1.10 y 1.42. En cuanto a los resultados para desplazamiento relativos máximos de entrepiso, en dirección X se obtienen factores mayores que en dirección Y.

Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ de todos los modelos estudiados

La sección anterior muestra los resultados de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ del modelo M4C6. Para resumir los resultados de todos los modelos se calcularon los siguientes valores estadísticos: la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y la varianza. Adicionalmente, se reportan los valores mínimos y máximos de dichos factores. Lo anterior, se realizó con todos los parámetros de respuesta seleccionados y se muestran en las tablas 6 a 13.

La nomenclatura utilizada en las tablas mencionadas es la siguiente:

A_{ea} min. – Corresponde al valor de A_{ea} mínimo.

A_{ea} máx. – Corresponde al valor de A_{ea} máximo abreviado.

A_{ea} media – Corresponde al valor de A_{ea} promedio o media geométrica de los datos.

A_{ea} media* – Corresponde al mismo valor anterior pero redondeado a 1 decimal.

A_{ea} Desv. Std – Corresponde al valor de la desviación estándar de A_{ea} .

A_{ea} Varianza – Corresponde al valor de la varianza de A_{ea} .

A_{ea} Coef. Var. – Corresponde al valor del coeficiente de variación de A_{ea} .

En los encabezados utilizados en las tablas siguientes se aclara lo siguiente:

Parámetros traveses MX y MY: Incluye los resultados de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ de los parámetros estudiados en traveses (Mder, Mizq y VT) para todos los marcos en dirección X y dirección Y respectivamente.

Parámetros columnas: Incluye los resultados de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ de los parámetros estudiados en columnas (Esf_N, VXC y VYC).

Parámetros Idmx e Idmy: Incluye los resultados de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ del parámetro Idmx e Idmy respectivamente de todos los pisos del modelo.

Tabla 6 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M4C6)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros traveses MX	Parámetros traveses MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} min.	1.091	1.212	1.063	1.014	1.168
A_{ea} máx.	1.264	1.428	1.417	1.133	1.282
A_{ea} media	1.168	1.304	1.199	1.060	1.206
A_{ea} media*	1.200	1.300	1.200	1.100	1.200
A_{ea} Desv. Std.	0.0372	0.0384	0.0745	0.0395	0.0405
A_{ea} Varianza	0.0014	0.0015	0.0056	0.0016	0.0016
A_{ea} Coef. Var.	3.10%	2.96%	6.21%	3.59%	3.38%

Tabla 7 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M4R6)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros traveses MX	Parámetros traveses MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} min.	1.102	1.201	1.059	0.978	1.238
A_{ea} máx.	1.279	1.483	1.577	1.138	1.325
A_{ea} media	1.151	1.330	1.207	1.035	1.279
A_{ea} media*	1.200	1.300	1.200	1.050	1.300
A_{ea} Desv. Std.	0.0295	0.0437	0.1077	0.0470	0.0286
A_{ea} Varianza	0.0009	0.0019	0.0116	0.0022	0.0008
A_{ea} Coef. Var.	2.45%	3.36%	8.97%	4.70%	2.20%

Tabla 8 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M7C6)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros traveses MX	Parámetros traveses MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} min.	1.101	1.111	1.071	1.034	1.024
A_{ea} máx.	1.351	1.345	1.514	1.187	1.233
A_{ea} media	1.189	1.241	1.197	1.106	1.132
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.200	1.100	1.100
A_{ea} Desv. Std.	0.0411	0.0459	0.0643	0.0464	0.0649
A_{ea} Varianza	0.0017	0.0021	0.0041	0.0021	0.0042
A_{ea} Coef. Var.	3.43%	3.83%	5.36%	4.21%	5.90%

Tabla 9 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M7R6)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.122	1.088	1.054	1.051	1.094
A_{ea} máx.	1.264	1.301	1.437	1.169	1.208
A_{ea} media	1.194	1.189	1.188	1.114	1.133
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.200	1.100	1.100
A_{ea} Desv. Std.	0.0290	0.0357	0.0654	0.0378	0.0311
A_{ea} Varianza	0.0008	0.0013	0.0043	0.0014	0.0010
A_{ea} Coef. Var.	2.42%	2.98%	5.45%	3.44%	2.83%

Tabla 10 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M7C8)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.078	1.062	1.032	0.993	1.010
A_{ea} máx.	1.233	1.231	1.307	1.082	1.094
A_{ea} media	1.163	1.165	1.143	1.039	1.056
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.100	1.050	1.100
A_{ea} Desv. Std.	0.0303	0.0316	0.0409	0.0257	0.0207
A_{ea} Varianza	0.0009	0.0010	0.0017	0.0007	0.0004
A_{ea} Coef. Var.	2.52%	2.63%	3.72%	2.57%	1.88%

Tabla 11 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M7R8)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.102	1.106	1.057	1.008	1.034
A_{ea} máx.	1.295	1.301	1.336	1.106	1.169
A_{ea} media	1.173	1.184	1.153	1.054	1.093
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.200	1.100	1.100
A_{ea} Desv. Std.	0.0339	0.0332	0.0459	0.0274	0.0405
A_{ea} Varianza	0.0012	0.0011	0.0021	0.0008	0.0016
A_{ea} Coef. Var.	2.83%	2.77%	3.82%	2.49%	3.68%

Tabla 12 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M10C8)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.025	1.057	1.032	0.989	0.990
A_{ea} máx.	1.296	1.363	1.341	1.104	1.060
A_{ea} media	1.153	1.171	1.129	1.029	1.017
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.100	1.050	1.050
A_{ea} Desv. Std.	0.0497	0.0458	0.0532	0.0292	0.0177
A_{ea} Varianza	0.0025	0.0021	0.0028	0.0009	0.0003
A_{ea} Coef. Var.	4.14%	3.82%	4.84%	2.92%	1.77%

Tabla 13 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ (Modelo M10R8)

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.043	1.088	1.063	1.021	1.016
A_{ea} máx.	1.274	1.276	1.326	1.191	1.076
A_{ea} media	1.175	1.177	1.154	1.070	1.041
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.200	1.100	1.050
A_{ea} Desv. Std.	0.0377	0.0263	0.0457	0.0413	0.0171
A_{ea} Varianza	0.0014	0.0007	0.0021	0.0017	0.0003
A_{ea} Coef. Var.	3.14%	2.19%	3.81%	3.75%	1.71%

De las tablas 6 a 13 se puede observar que los valores de A_{ea} media* oscilan entre 1.10 y 1.30 para los parámetros de traves y de columnas. Para los parámetros $Idmx$ e $Idmy$ los valores de A_{ea} media* oscilan entre 1.05 y 1.10.

Los resultados de las tablas 6 a 13 muestran que el coeficiente de variación máximo es de 8.97% correspondiente al modelo M4R6. Debido a que este valor es menor al 10% se puede afirmar que se tiene una *precisión buena* de los datos obtenidos de acuerdo con DANAE, 2008. Además, en ningún caso se excede un valor del 1% para los valores de la varianza, indicando por demás que la media es representativa de los datos obtenidos y que no existen grandes cambios entre los mismos.

Por otra parte, los valores máximos de A_{ea} con $p = 0.02$ obtenidos, se reducen conforme aumenta la altura de los modelos. Lo anterior, se ilustra en la figura 15 que muestra el parámetro de respuesta $Idmy$ del modelo M10R8. La figura 15 comparada con la figura 14 sugiere que se requieren factores A_{ea} con $p = 0.02$ mayores en modelos de baja altura (menos de 7 pisos).

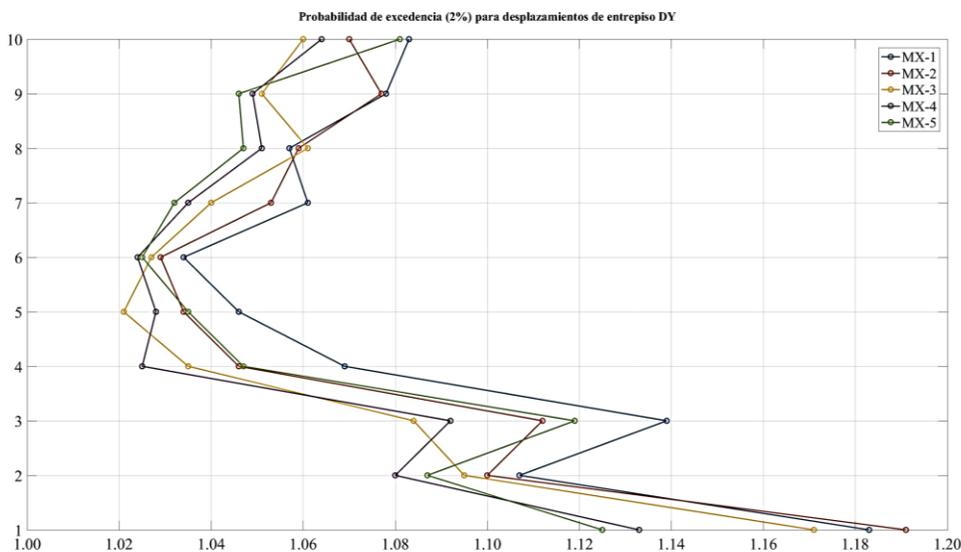


Figura. 15 Factores A_{ea} con $p = 0.02$ - Parámetro $Idmy$ del modelo M10R8

Resumiendo, un factor A_{ea} con $p = 0.02$ puede ser utilizado para aplicar el procedimiento simplificado descrito, sin embargo, en rigor debiesen aplicarse distintos factores para cada modelo, cada elemento estructural y cada piso. Debido a lo anterior, se optó por calcular algunos parámetros estadísticos de los factores A_{ea} con $p = 0.02$ para cada modelo y verificar que estadísticamente un valor promedio es representativo de los datos.

De lo anterior, se obtuvieron valores que oscilan entre 1.05 y 1.30, sin embargo, la aplicación de los mismos no es general para todos los de modelos, por lo que se realizó otro tratamiento estadístico similar al descrito con anterioridad a los datos de todos modelos, diferenciando entre los datos de los modelos cuadrados ($M_C_$) y los datos de los modelos rectangulares ($M_R_$). Las tablas 14 y 15 muestran los resultados mencionados respectivamente y utilizan la misma nomenclatura que las tablas 6 a 13.

La tabla 14 corresponde a los datos de todos los modelos cuadrados y muestra un valor de A_{ea} media* igual a 1.20 para los parámetros de traves y columnas. Por otro lado, para los parámetros cinemáticos $IDMX$ e $IDMY$ se obtiene un valor de A_{ea} media* igual a 1.10.

Tabla 14 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ modelos cuadrados

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.025	1.057	1.032	0.989	0.990
A_{ea} máx.	1.351	1.428	1.514	1.187	1.282
A_{ea} media	1.167	1.206	1.160	1.055	1.083
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.200	1.100	1.100
A_{ea} Desv. Std.	0.0439	0.0653	0.0650	0.0467	0.0777
A_{ea} Varianza	0.0019	0.0043	0.0042	0.0022	0.0060
A_{ea} Coef. Var.	3.66%	5.44%	5.42%	4.24%	7.06%

La tabla 15 corresponde a los datos de todos los modelos rectangulares y muestra un valor de A_{ea} media* igual a 1.20 para los parámetros de trabes y columnas. Por otro lado, para los parámetros cinemáticos Idmx e Idmy se obtiene un valor A_{ea} media* igual a 1.10. Notar que el uso de los valores anteriores conlleva a tener diferencias del 24% con respecto a los valores A_{ea} máximos reportados.

Tabla 15 Resumen de factores A_{ea} con $p = 0.02$ modelos rectangulares

Valores de factores A_{ea} con $p = 0.02$	Parámetros trabes MX	Parámetros trabes MY	Parámetros columnas	Parámetro Idmx	Parámetro Idmy
A_{ea} mín.	1.043	1.088	1.054	0.978	1.016
A_{ea} máx.	1.295	1.483	1.577	1.191	1.325
A_{ea} media	1.176	1.204	1.170	1.072	1.111
A_{ea} media*	1.200	1.200	1.200	1.100	1.100
A_{ea} Desv. Std.	0.0361	0.0615	0.0667	0.0468	0.0828
A_{ea} Varianza	0.0013	0.0038	0.0044	0.0022	0.0069
A_{ea} Coef. Var.	3.01%	5.13%	5.56%	4.25%	7.52%

De las tablas 14 y 15 se observa que el valor de A_{ea} máximo que se obtuvo es de 1.514 para modelos cuadrados y de 1.577 para modelos rectangulares, en ambos casos dicho valor corresponde a alguno de los parámetros de columnas. Lo anterior, sugiere que los elementos estructurales más afectados por el efecto de la excentricidad accidental son las columnas.

El coeficiente de variación máximo tiene un valor de 7.06 % para los modelos cuadrados y de 7.52% para los modelos rectangulares. Dados los valores del coeficiente de variación menores al 10%, el valor A_{ea} media* igual a 1.20, es estadísticamente representativo de todos los datos. Estadísticamente a partir de los datos anteriores se puede decir, que no hay diferencias importantes debidas al registro sísmico utilizado. El resultado anterior se mantiene para los modelos rectangulares y los modelos cuadrados.

Considerando los valores máximos de los factores A_{ea} reportados en las tablas 14 y 15, en la tabla 16 se muestra la probabilidad de exceder dichos valores máximos y se comparan contra la probabilidad de exceder el valor de A_{ea} media* = 1.20. Como se puede observar, para los valores máximos en ningún caso se tienen probabilidades de excedencia mayores al 0.02%. Por otro lado, para el valor de A_{ea} media* las probabilidades de excederlo en ningún caso exceden el 2%.

Tabla 16 Probabilidades de excedencia de los factores A_{ea} máx. y A_{ea} media*

Parámetros de:	p de A_{ea} máx. = 1.514	p de A_{ea} = 1.20	p de A_{ea} máx. = 1.577	p de A_{ea} = 1.20
Trabes	0.0020 %	1.9425 %	0.0106 %	1.0427 %
Columnas	0.0049 %	1.1102 %	0.0067 %	0.9746 %
IDMX	0.0000 %	0.0332 %	0.0000 %	0.0167 %
IDMY	0.0002 %	0.7940 %	0.0050 %	0.7930 %

CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación fue establecer un procedimiento simplificado para tomar en cuenta los efectos de la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios. El procedimiento propuesto permite calcular los elementos mecánicos y cinemáticos requeridos por el diseñador cuando se tiene un edificio con excentricidad accidental y que al mismo tiempo esté sujeto a un sismo. Los resultados se limitan a modelos con excentricidad natural $e_s = 0$.

El procedimiento simplificado propuesto utiliza una relación simple que permite calcular los elementos mecánicos o cinemáticos ($E_{\text{dea}2}$) de cualquier elemento estructural que conforme un edificio. Lo anterior se logra amplificando los elementos mecánicos y cinemáticos obtenidos del análisis del edificio a diseñarse con $e_s = 0$ y $e_a = 0$.

A partir de los resultados de las tablas 14 y 15, se recomienda utilizar un factor de amplificación por excentricidad accidental con $p \approx 2\%$ ($A_{\text{ea}2}$) igual a 1.20. Este factor es aplicable a cualquier elemento mecánico o cinemático obtenido de modelos a base de marcos de concreto reforzado con $e_s = 0$.

Utilizando el valor de $A_{\text{ea}2} = 1.20$ se tienen coeficientes de variación máximos de 7.52%. Debido a que dichos coeficientes son menores al 10% se puede afirmar que se tiene una *precisión buena* de los obtenidos de acuerdo con DANAE, 2008. Además. En ningún caso se excede un valor del 1% para los valores de varianza, indicando por demás que la media de los datos igual a 1.20 es representativa de los datos obtenidos y que no existen grandes cambios entre los mismos.

El uso del factores de A_{ea} mayores a 1.20 conlleva a tener probabilidades de excedencia de los elementos mecánicos y cinemáticos menores del 0.02%. Lo anterior se resumió en la tabla 16.

En este estudio se corroboró que la probabilidad de exceder un determinado factor A_{ea} de cualquier parámetro de respuesta en modelos con $e_a \neq 0$ es mayor en pisos superiores que en pisos inferiores.

Los resultados muestran que en el 60% de los casos, los factores A_{ea} con $p = 0.02$ obtenidos en modelos rectangulares son mayores que en los modelos cuadrados.

Los datos obtenidos muestran que para edificios de baja altura (menos de 7 pisos) se requieren factores A_{ea} con $p = 0.02$ aproximadamente 20% mayores que los requeridos en los modelos de mediana altura (entre 7 y 10 pisos).

Aun cuando el factor $A_{\text{ea}2} = 1.20$ es representativo en general de la amplificación de los parámetros de respuesta cuando estos son afectados por la excentricidad accidental, se observó que pueden seleccionarse valores más específicos de este factor dependiendo del elemento estructural, su ubicación en el modelo y del parámetro de respuesta.

Finalmente, se realizó un estudio amplio de los efectos de la excentricidad accidental en varios parámetros de la respuesta estructural considerados como claves para ser aplicados en los diseños sísmicos de edificios. Este estudio, permitió establecer un procedimiento simplificado para incorporar los efectos de la excentricidad accidental en el diseño sísmico de edificios. Dicho procedimiento conlleva a obtener elementos mecánicos y cinemáticos con una probabilidad de excedencia aproximada del 2%. A partir de una relación simple que requiere de un único análisis dinámico lineal de modelos torsionalmente balanceados y la amplificación de sus respuestas por un factor denominado $A_{\text{ea}2} = 1.20$.

REFERENCIAS

- ASCE (2010). American Society of Civil Engineers Minimum design loads for buildings and other structures-ASCE. Standard 7-05: ASCE. EUA.
- DANE. (2008). Estimación e interpretación del coeficiente de variación de la encuesta censal. Colombia: Departamento administrativo nacional de estadística.
- De la Colina, J., y Benítez, B., (2006). Estudio probabilista sobre excentricidad accidental en edificios utilizando el método Monte Carlo. Puerto Vallarta, Jalisco: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.
- De la Colina, J., González, C. A. y Valdés, J., (2016). Accidental eccentricities, frame shear forces and ductility demands of buildings with uncertainties of stiffness and live load: *Engineering Structures* 124, 113-127.
- De la Colina, J., Ruiz, S. y Benítez, B., (2011). Accidental eccentricity of story shear for low-rise office buildings: *Journal of Structural Division, ASCE*, 137 (4), 513- 520.
- De la Llera, J. y Chopra, A., (1994). Accidental and natural torsion in earthquake response and design of buildings: Report No. UCB/EERC-94/07. Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley.
- Díaz E., (1995). Selección del número de replicaciones en un estudio de simulación. Bilbao España: Departamento de econometría y estadística, Universidad del País Vasco.
- ECS, (2004). ECS. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1:2004. Brussels Belgium: European Committee for Standardization.
- Escobar S., A., Mendoza S., A. y Gómez M., R., (2004). Diseño simplificado para diseño por torsión sísmica estática. *Revista de Ingeniería Sísmica*, Issue 70, pp. 77-107.
- García D. V., (2015). Análisis de las probabilidades de excedencia de las respuestas de modelos estructurales con torsión sujetos a sismos usando simulación Monte Carlo. Toluca, Méx.: Tesis de Maestría UAEMex.
- Hogg, S. y Craig, F., (1995). Introduction to mathematical statistics. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall: s.n.
- ICC, (2009). ICC. International building code. International Code Council: Inc.
- Kang L. N., (1996). Canny-E User's Manual, Three-dimension nonlinear dynamic structural analysis computer program package: Canny Consultants Pte. Ltd., Singapur.
- Metropolis, N; Ulam, S., (1949). The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, 44, 335-341
- Padilla, A., (2002). Evaluación de un requisito complementario a los criterios de diseño por torsión del RCDF en sus edificios 1995 y 2001: Tesis maestría, DEPEFI, UNAM.
- RCDF, (2004). Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) "Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de edificaciones".
- Soriano, A. y Ruiz, S., (2001). Cargas vivas máximas para edificios de oficinas en la Ciudad de México: Reporte de investigación, Instituto de ingeniería UNAM.
- Zárate, G., Ayala, A. G. y García, O., (2003). Método sísmico estático para edificios asimétricos: revisión de enfoques. Distrito Federal, Méx.: *Revista de Ingeniería Sísmica*, núm. 69, julio-diciembre, pp. 25-44.