

Cost evaluations due to seismic damage to concrete buildings

César Castillo-Castillo¹, Jesús Valdés-González¹, Francisco Bañuelos-García

¹ Universidad Autónoma del Estado de México

Abstract

The study of earthquake losses in structures has been traditionally addressed for a single seismic intensity, but this could be unrealistic since throughout the life of a building it can be subjected to several earthquakes with different intensities. This paper analyzes the relations between the seismic intensities with the corresponding damage costs. Three nonlinear analytical models of reinforced concrete were analyzed. Each model differs in dynamic characteristics and was designed by scaling the design spectrum for three amplification factors. A firm soil earthquake was analyzed, which was scaled to 22 intensities and with this results, dynamic capacity curves of the studied models were constructed. From the analyses it was obtained interstory drift and maximum accelerations, with which the following seismic damage costs were estimated: structural and non-structural damage, contents replacement, income and profits, injuries and deaths. The results show different types of relations between intensity and each type of loss. They also justify the importance of introducing amplification factors at the design stage to minimize the cost of a particular type of damage.

OPEN ACCESS

Published: 21/09/2022

Accepted: 08/09/2022

DOI:
10.23967/j.rimni.2022.09.005

Keywords:
damage
reparation costs
earthquake
concrete buildings

Resumen

El estudio de costos por sismo en edificios ha sido tradicionalmente abordado para un solo factor de amplificación del espectro de diseño, pero pudiera ser de utilidad utilizar otros factores de amplificación para aminorar costos. En este artículo se analiza la evolución de los costos por daño sísmico en tres modelos en función del nivel de desempeño que alcancen dichas estructuras, así como del factor de amplificación del espectro de diseño. Se analizaron tres modelos de edificios de concreto reforzado con comportamiento no lineal. Cada modelo tiene características dinámicas propias y fueron diseñados escalando el espectro de diseño para tres factores de amplificación. Se analizó un sismo de suelo firme, el cual fue escalado para obtener 22 intensidades y con ello se construyeron curvas de capacidad dinámica de los modelos estudiados. De estos análisis se obtuvieron distorsiones de entrepiso y aceleraciones máximas con lo cual se estimaron los costos asociados a daño estructural, no estructural, reposición de contenidos, rentas y ganancias, heridos y fallecidos. Los resultados muestran distintas relaciones entre intensidad y costo. Los resultados justifican la importancia de introducir factores de amplificación en la etapa de diseño con la finalidad de minimizar el costo de los distintos tipos de daño.

Palabras clave: Daño, costos de reparación, sismo, edificios de concreto

1. Introducción

Uno de los objetivos principales de los códigos de diseño sísmico es proporcionar criterios que ayuden a preservar la vida de los usuarios, el cual se ha logrado, pero se han producido pérdidas económicas considerables debido a las consecuencias destructivas de los sismos, por ejemplo, el sismo ocurrido en 1989 en Loma Prieta, Northridge en 1994 [1], la Ciudad de México en 2017 y Chile en 2014. Por tal motivo ha sido necesario desarrollar una aproximación más "realista" de los diferentes costos ocasionados por los sismos. Estos costos son un elemento importante para prevenir y tomar decisiones en materia del manejo de desastres naturales. Estas decisiones se toman en base a la reparación de elementos estructurales, al mantenimiento de elementos no-estructurales, a la reposición de contenidos, a rentas y ganancias, muertes y heridos, las cuales son medidas cuantitativas del desempeño estructural [2].

Para evaluar las pérdidas económicas en estructuras sujetas a sismos existen distintos documentos técnicos especializados, como es el caso de la Agencia Federal del Manejo de Emergencias FEMA, donde se propone el uso del programa HAZUS [3]. En el cual es necesario calcular algunos parámetros del comportamiento estructural (por ejemplo, distorsiones de entrepiso y aceleraciones) los cuales pueden obtenerse mediante análisis estáticos no-lineales (Push Over). Una vez determinados estos parámetros se estima la probabilidad de alcanzar un estado de daño

mediante las denominadas curvas de fragilidad. Estas curvas relacionan la probabilidad de exceder un nivel de daño en función de un índice de desempeño (por ejemplo, aceleraciones) [4]. A partir de los resultados obtenidos con estas curvas se pueden determinar las pérdidas económicas directas (costos de reparación de los edificios, pérdidas de contenido e inventario de las empresas).

Los costos de reparación que considera Hazus se aplican a grupos de elementos (por ejemplo, estructurales y no-estructurales), y no a componentes individuales (por ejemplo, vigas y columnas). Cabe mencionar que en esta metodología no se considera la incertidumbre asociada al costo de reparación cuando se ha observado un estado de daño en un grupo de componentes estructurales o no estructurales [2]. Para salvar esta situación, en PEER [2] se propone una metodología, en la cual se calculan las pérdidas para cada elemento estructural, y se considera la incertidumbre del costo de las pérdidas.

La metodología del PEER se puede resumir en 4 pasos: 1) Análisis de riesgo, 2) Análisis estructural y no estructural, 3) Análisis de daños sísmicos y 4) Análisis de pérdidas económicas. En esta metodología se considera algunas variables como la medida de intensidad (IM), el parámetro de demanda de ingeniería (EDP), la medida de daños (DM) y la variable de decisión (DV). Esta metodología consiste en realizar un análisis probabilístico de riesgo sísmico (PSHA) para un sitio determinado. Posteriormente se hace un análisis no lineal de la respuesta a la aceleración realizado en diferentes IM para obtener los correspondientes EDP. Estos parámetros se relacionan con la DM de cada uno de los componentes estructurales y no estructurales mediante curvas de fragilidad desarrolladas a partir de los datos de las pruebas realizadas, y de las evaluaciones posteriores al sismo.

Finalmente, las DMs se transforman en DVs esperadas, como los costos de reparación, los tiempos de reparación, los heridos y las víctimas mortales [5].

Estas metodologías (Hazus y Peer) han sido ampliamente utilizadas, debido a su versatilidad para adaptarse a distintos tipos de materiales y elementos estructurales (por ejemplo, muros de madera postensada [6] y mampostería reforzada [7]), así como también a otros tipos de sistemas estructurales como por ejemplo marcos de acero perimetrales [8].

Además de las adecuaciones mencionadas en Hazus y Peer, estas metodologías también han sido ajustadas para su uso en otras regiones del mundo. Tal es el caso de Polese y otros [9,10], quienes propusieron una herramienta similar al Hazus, la cual permite evaluar rápidamente las pérdidas económicas en edificios de concreto reforzado representativos de la región mediterránea europea. De la misma forma Chen y otros [11] realizaron una evaluación rápida del daño estructural de varios edificios en China.

Los procedimientos mencionados no relacionan las pérdidas por sismo en edificios con niveles de desempeño y solamente consideran un solo factor de amplificación del espectro de diseño. Adicionalmente no consideran la evolución de cada tipo de costo (por daños estructurales y no estructurales, contenidos, rentas, ganancias, lesiones y muertes) para distintos niveles de desempeño. Lo anterior sería de gran ayuda a para tomar mejores decisiones en la etapa de diseño, ya que un factor de amplificación en el espectro de diseño distinto al comúnmente utilizado (de uno) permitiría mitigar costos por daño sísmico para el máximo nivel de desempeño que razonablemente se considere pueda alcanzar la estructura.

En este trabajo se analiza la variación de costos por daño sísmico en función de niveles de desempeño, utilizando distintos factores de amplificación del espectro de diseño del edificio. Este factor puede ayudar a estudiar el impacto de las pérdidas económicas por reparación de elementos estructurales y no estructurales, reposición de contenidos, rentas, ganancias, atención de heridos y víctimas mortales. Se evalúan tres marcos tridimensionales de concreto de un solo nivel, con distintas propiedades dinámicas. Estos modelos se diseñaron utilizando el código RC-CDMX [12] y se aplicaron factores de amplificación de 1.0, 1.5 y 2.0 en todos los casos. Para determinar el desempeño se calculó la curva de capacidad dinámica, utilizando análisis dinámicos incrementales [13].

Finalmente, se relaciona el nivel de daño y la distorsión de entrepiso con las pérdidas económicas debidas al sismo (costo por daños estructurales, daños no estructurales, reposición de contenidos, rentas, ganancias, lesiones y muertes). Los resultados muestran que el análisis proporciona una herramienta que permite al proyectista tomar mejores decisiones en la fase de diseño considerando el impacto económico que es más relevante (daños estructurales y no estructurales, contenidos, rentas, ganancias, heridos y muertes).

2. Evaluación de costos

La evaluación de costos se utiliza para estimar las pérdidas económicas generadas por los sismos en edificios. En este estudio, las pérdidas consideradas son por daño estructural, daño en elementos no estructurales, reposición de contenidos, pérdida de ingresos por la interrupción del uso de la estructura (ganancias), los ingresos por rentas, lesiones y muertes.

En este trabajo se utilizó el procedimiento de pérdidas económicas por sismo propuesto por HAZUS [14]. Se utilizó este procedimiento por ser una forma práctica de calcular las pérdidas y considerar los costos globales de los daños del modelo en estudio.

Las pérdidas económicas por daño estructural se calculan de la siguiente manera [14]:

$$CS_{ds,i} = BRC_i * \sum_{i=1}^{33} PMBTSTR_{ds,i} * RCS_{ds,i} \quad (1)$$

$$CS_i = \sum_{ds=2}^5 CS_{ds,i} \quad (2)$$

donde $CS_{ds,i}$ es el costo del daño estructural del edificio debido al estado de daño ds , correspondiente al tipo de ocupación i . Los tipos de ocupación que considera Hazus son: residencial, comercial, industrial, agricultura, religión, gobierno y educación. Cada categoría cuenta con subcategorías y en total existen 33. De estos tipos de ocupaciones para este trabajo se utilizó únicamente ocupación residencial (RES1). BRC_i es el costo de reemplazo del edificio; $PMBTSTR_{ds,i}$ es la probabilidad del tipo de ocupación i , de que se encuentre en el estado de daño ds . Existen 5 estados de daño de acuerdo con Hazus. $RCS_{ds,i}$ es el costo de reparación (como fracción del costo de reemplazo del edificio) para el tipo de ocupación i y el estado de daño, ds .

Las pérdidas económicas por daño a elementos no estructurales se calculan con la ec. (3) [14]

$$CNSA_{ds,i} = BRC_i * PONSAs_{ds,i} * RCA_{ds,i} \quad (3)$$

$$CNSA_i = \sum_{ds=2}^5 CNSA_{ds,i} \quad (4)$$

$$CNSD_{ds,i} = BRC_i * PONSDD_{ds,i} * RCD_{ds,i} \quad (5)$$

$$CNSD_i = \sum_{ds=2}^5 CNSD_{ds,i} \quad (6)$$

donde $CNSA_{ds,i}$ es el costo del daño no estructural debido a las aceleraciones que ocasionaron el estado de daño ds , correspondiente al tipo de ocupación i ; $CNSA_i$ es el costo del daño no estructural sensible a la aceleración para el tipo de ocupación i y $CNSD_{ds,i}$ es el costo del daño no estructural debido a las distorsiones de entrepiso para el tipo de ocupación i ; $CNSD_i$ es el costo del daño no estructural debido a las distorsiones de entrepiso para el tipo de ocupación i ; BRC_i es el costo de reemplazo del edificio para el tipo de ocupación i , como lo describe FEMA [15]; $PONSAs_{ds,i}$ es la probabilidad de que se presente el estado de daño ds ocasionado por las aceleraciones, para una estructura con tipo de ocupación i ; $PONSDD_{ds,i}$ es la probabilidad de que se presente el estado de daño ds ocasionado por distorsiones de entrepiso, para una estructura con tipo de ocupación i ; $RCA_{ds,i}$ es el porcentaje del costo de reparación no estructural sensible a la aceleración (como fracción del costo de reemplazo del edificio) para el tipo de ocupación i y el estado de daño, ds , y $RCD_{ds,i}$ es el porcentaje del costo de reparación no estructural sensible a la distorsión de entrepiso (como fracción del costo de reemplazo del edificio) para el tipo de ocupación i y estado de daño, ds .

Para determinar el costo total de reparación de los elementos no estructurales se debe realizar la suma de los costos calculados con las ecs. (4) y (6) [14].

Las pérdidas económicas por reposición de contenidos se estiman con la ec. (7) [14]:

$$CCD_i = CRV_i * \sum_{ds=2}^5 CD_{ds,i} * PONSAs_{ds,i} \quad (7)$$

donde CCD_i es el costo por daño a contenidos del edificio para el tipo de ocupación i ; CRV_i es el valor de reemplazo de los contenidos para el tipo de ocupación i , como lo describe FEMA [17]; $CD_{ds,i}$ es el porcentaje de contenidos dañados para el tipo de ocupación i y el estado de daño ds y $PONSAs_{ds,i}$ es la probabilidad de que el edificio que tiene un tipo de

ocupación i al alcance un estado de daño ds sensible a las aceleraciones.

Por otro lado las pérdidas económicas por ingresos (producción, interrupción del servicio y pago de impuestos) se estiman con la ec. (8) [14]:

$$YLOS_i = (1 - RF_i) * FA_i * INC_i * \sum_{ds=1}^5 POSTR_{ds,i} * LOF_{ds} \quad (8)$$

donde $YLOS_i$ es el costo por ingresos (producción, interrupción del servicio, pago de impuestos) para el tipo de ocupación i ; RF_i es el factor de recuperación (sueldos, empleos) para el tipo de ocupación i ; FA_i es el área total de construcción del edificio con ocupación i (en pies cuadrados); INC_i son los ingresos por día (por pie cuadrado) para el tipo de ocupación i ; $POSTR_{ds,i}$ es la probabilidad de que el edificio con tipo de ocupación i , alcance un estado de daño estructural ds ; LOF_{ds} es la función de pérdida de tiempo por interrupción de uso para el estado de daño ds ; $LOF_{ds} = BRT_{ds} * MOD_{ds}$; BRT_{ds} es el tiempo de recuperación del edificio del estado de daño ds y MOD_{ds} es el tiempo de modificaciones por reconstrucción para el estado de daño ds .

Las pérdidas por rentas se calculan de la siguiente manera [14]:

$$RY_i = (1 - \%OO_i) * FA_i * RENT_i * \sum_{ds=3}^5 POSTR_{ds,i} * RT_{ds} \quad (9)$$

donde RY_i es el costo por pérdida de rentas para el tipo de ocupación i ; $\%OO_i$ es el porcentaje ocupado del edificio para el tipo de ocupación i ; FA_i es el área ocupada del edificio para el tipo de ocupación i (en pies cuadrados); $RENT_i$ es el costo de la renta (en dólares por pie cuadrado por día) para el tipo de ocupación i [15]; $POSTR_{ds,i}$ es la probabilidad de que el edificio con tipo de ocupación i , alcance el estado de daño estructural ds y RT_{ds} es el tiempo de recuperación del edificio del estado de daño ds .

Las ecs. (10) y (11) se basan en el procedimiento recomendado por FEMA 174 [16] para calcular las pérdidas económicas debidas a heridos y fallecidos.

Pérdidas económicas por heridos:

$$CH = NP * CHE * \sum_{ds=2}^3 POSTR_{ds,i} * T_h \quad (10)$$

donde CH es la pérdida económica por heridos; NP es el número máximo de personas que ocupan la construcción [15]; CHE es el costo por herido por severidad en las lesiones [17]; $POSTR_{ds,i}$ es la probabilidad de que el edificio con tipo de ocupación i alcance el estado de daño estructural ds [14]; T_h es la tasa de heridos para el estado de daño ds [14].

Pérdidas económicas por fallecidos:

$$CM = NP * CF * \sum_{ds=4}^5 POSTR_{ds,i} * T_m \quad (11)$$

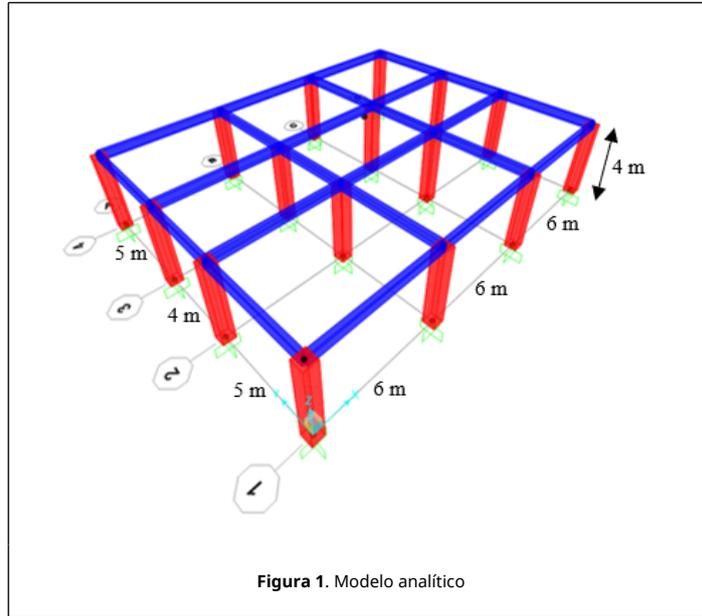
donde CM es la pérdida económica por fallecidos; NP es el número máximo de personas que ocupan la construcción [15]; CF es el costo de una persona fallecida [18]; $POSTR_{ds,i}$ es la probabilidad de que el edificio con tipo de ocupación i alcance el estado de daño estructural ds [14]; T_m es la tasa de personas fallecidas para el estado de daño ds [14].

El procedimiento ignora la incertidumbre en la cuantificación de los costos de reparación mencionados [2].

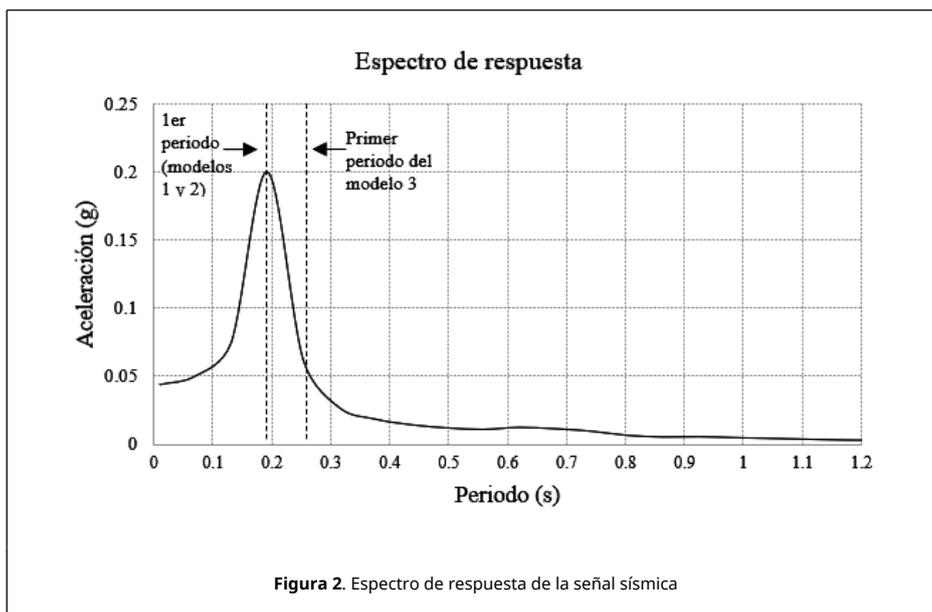
3. Caso de estudio

Para analizar la relación entre los costos generados por los sismos y el factor de amplificación del espectro de diseño de los edificios, se utilizó un modelo analítico correspondiente a marco de concreto reforzado tridimensional de un solo nivel, cuya geometría se muestra en la [Figura 1](#). El modelo tiene tres grados de libertad, dos de traslación y uno

de rotación. Se estudiaron tres variaciones del mismo modelo, estas variaciones consisten en las propiedades dinámicas. Los periodos del modelo 1 son $T_1 = T_2 = 0.19s$, los periodos del modelo 2 son $T_1 = 0.19s$, $T_2 = 0.10s$ y los periodos del tercer modelo fueron $T_1 = 0.26s$ y $T_2 = 0.24s$.

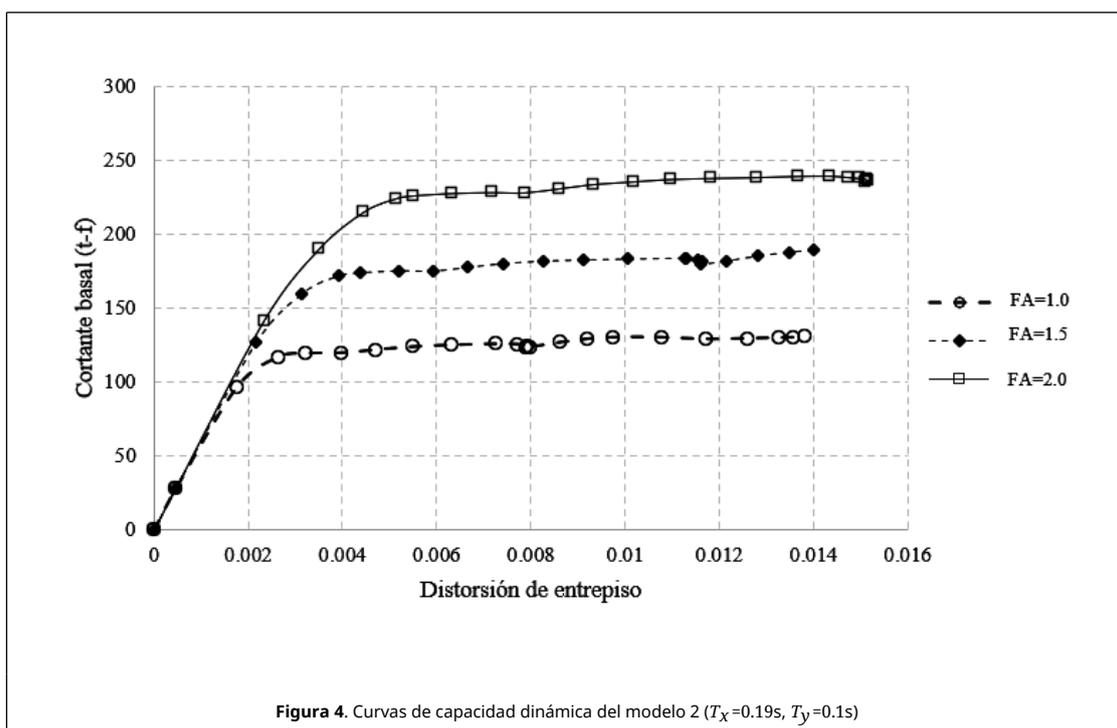
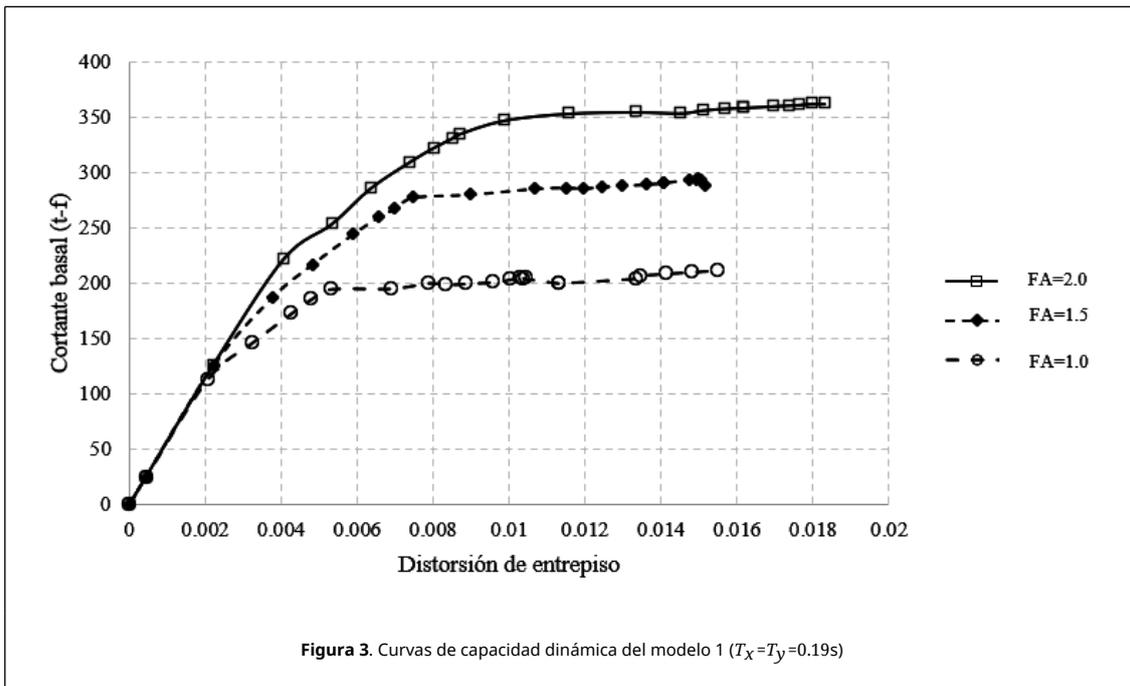


Los diferentes periodos estudiados se obtuvieron modificando algunos parámetros del modelo. La selección de los periodos del modelo se hizo para que sus valores coincidieran con los principales periodos contenidos en el registro sísmico considerado. Se utilizó un amortiguamiento del 5% para todos los modelos, tal y como se indica en algunos códigos de diseño. Se realizó un análisis modal espectral utilizando el espectro de respuesta de la señal sísmica estudiada como espectro de diseño (Figura 2). Las vigas y columnas se diseñaron de acuerdo con el RCDF [12] considerando factores de reducción de carga y resistencia de 1. En el diseño se utilizó una ductilidad de 4. El modelo estudiado no representa un edificio determinado, se trata de un modelo cuyo comportamiento puede aproximarse al de una estructura real. El sismo utilizado corresponde a la componente NS de un registro de terreno firme de Manzanillo México, ocurrido el 2018 con magnitud de 5.9, con una aceleración máxima de 43.37 cm/s^2 . La profundidad focal del sismo fue de 3.5 km y la duración de la fase intensa del mismo fue de 73 segundos. La Figura 2 muestra el espectro de respuesta del sismo utilizado. El sismo estudiado se eligió considerando el tipo de suelo en el que se registró (terreno firme) y considerando que su intensidad se modificó escalando el registro por distintas constantes.



4. Análisis y discusión de resultados

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran las curvas de capacidad dinámica para diferentes factores de amplificación del espectro de diseño ($AF = 1.0, 1.5$ y 2.0). En la Figura 3, se presentan los resultados del modelo 1, y en las Figuras 4 y 5 los resultados de los modelos 2 y 3, respectivamente. El eje horizontal representa la distorsión de entrepiso calculada a partir del desplazamiento de un nodo de esquina (Figura 3). El eje vertical muestra el cortante basal total de la estructura. Estas curvas de capacidad se obtuvieron mediante análisis dinámicos no lineales utilizando el acelerograma del sismo estudiado, escalado para 22 intensidades. Los análisis se realizaron con el programa PERFORM-3D [19].



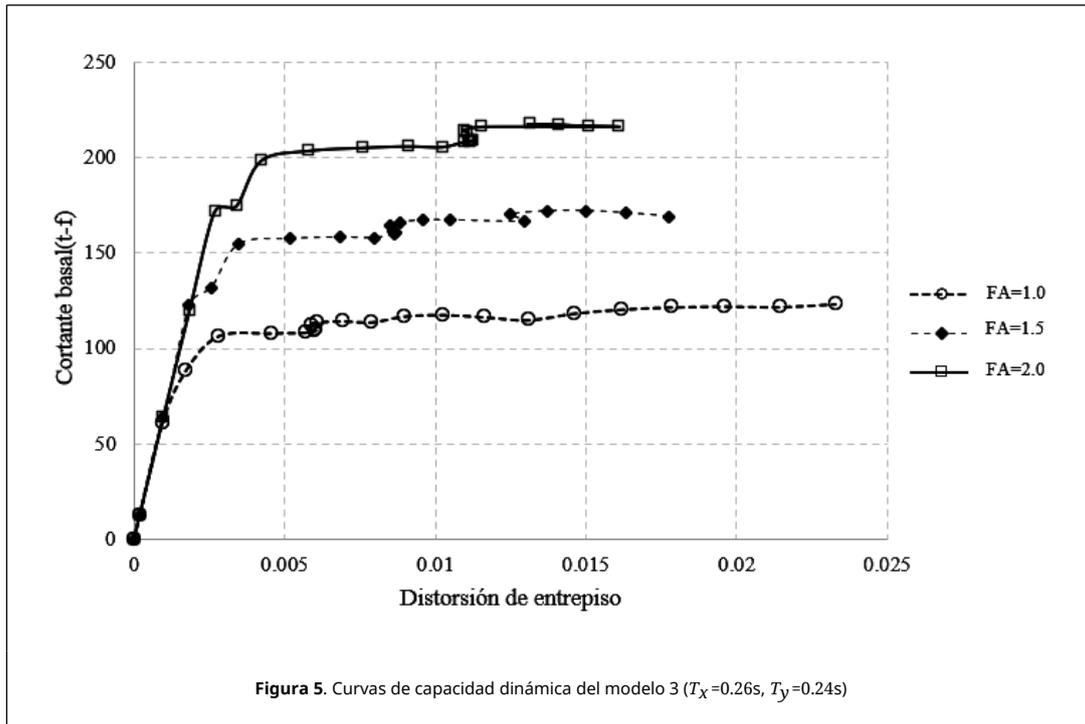


Figura 5. Curvas de capacidad dinámica del modelo 3 ($T_x=0.26s$, $T_y=0.24s$)

Las Figuras 6 a 13 muestran los costos correspondientes a los diferentes tipos de daños sísmicos que se producen en los modelos estudiados. Los resultados se muestran para diferentes factores de amplificación del espectro sísmico de diseño (FA=1.0, 1.5 y 2.0). El eje horizontal de las gráficas muestra las diferentes intensidades sísmicas estudiadas y el eje vertical muestra el costo correspondiente para cada tipo de pérdida. Estos costos están normalizados con respecto al costo de construcción inicial.

Para HAZUS [14] el costo de construcción es el mismo para cada factor de amplificación, sin embargo, una mejor estimación sería a través de la cuantificación de los materiales. Por esta razón, el costo total de construcción se obtuvo considerando que el costo de la estructura representa el 13% del costo total de la edificación, que incluye estructura, acabados y contenidos [20]. El costo de la estructura se calculó cuantificando el volumen de acero y concreto para cada modelo. Parametrizando los costos, se asumió que el costo total de construcción es de 1.0, 0.92 y 0.90 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente, y el costo de reposición fue 1.32 veces el costo de construcción para el modelo 1, 1.43 veces para el modelo 2 y 1.46 veces para el modelo 3. El costo de reposición fue el mismo para todos los modelos y se estimó según HAZUS [14]. Se manejaron 22 intensidades sísmicas y la última se asoció al colapso de la estructura. El colapso se relacionó con el estado de daño en el que todas las articulaciones plásticas de la base de las columnas del modelo fluyen.

Para el costo asociado al daño estructural (Figura 6), se observa que el factor de amplificación que minimiza los costos (FA_{MC}) para los tres modelos en las tres primeras intensidades es $FA_{MC} = 1.0$, a partir de la intensidad 4 el FA_{MC} varía para los tres modelos y su comportamiento se puede ver en la Figura 14(a). En el caso de la intensidad máxima (22) el FA_{MC} para el modelo 1 es 1.5, mientras que para el modelo 2 es de 1, y para el modelo 3 es de 2.

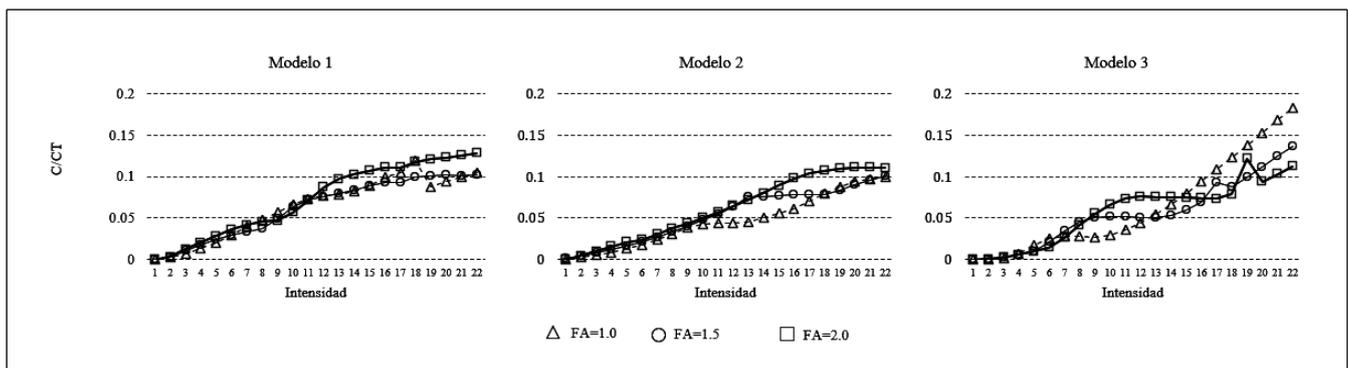


Figura 6. Pérdidas por daño estructural

En el caso del costo por daño no estructural (Figura 7), el FA_{MC} para los modelos 1 y 2 es 1.0 para todas las intensidades, mientras que para el modelo 3 el FA_{MC} es 1.0 desde la intensidad 1 hasta la 15 y para la intensidad 17. Mientras que para las intensidades 16 y 18 a 22 el modelo 3 tiene un FA_{MC} de 2. El comportamiento del FA_{MC} se muestra en la Figura 14(b).

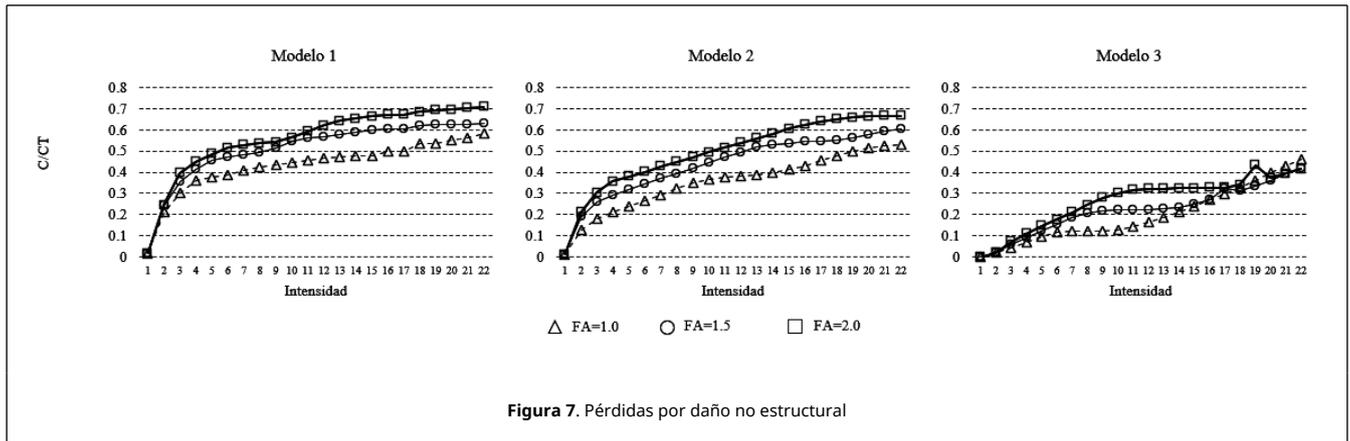


Figura 7. Pérdidas por daño no estructural

En cuanto a los costos por contenido (Figura 8), se observa que para los tres modelos y para todas las intensidades el factor de amplificación que minimiza los costos es 1.0 (Figura 14(c)).

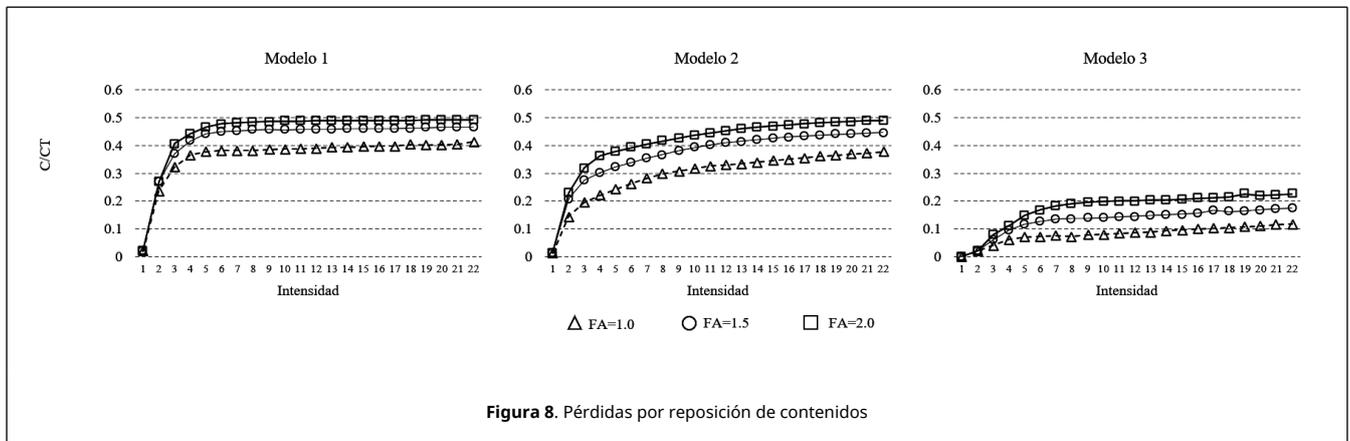
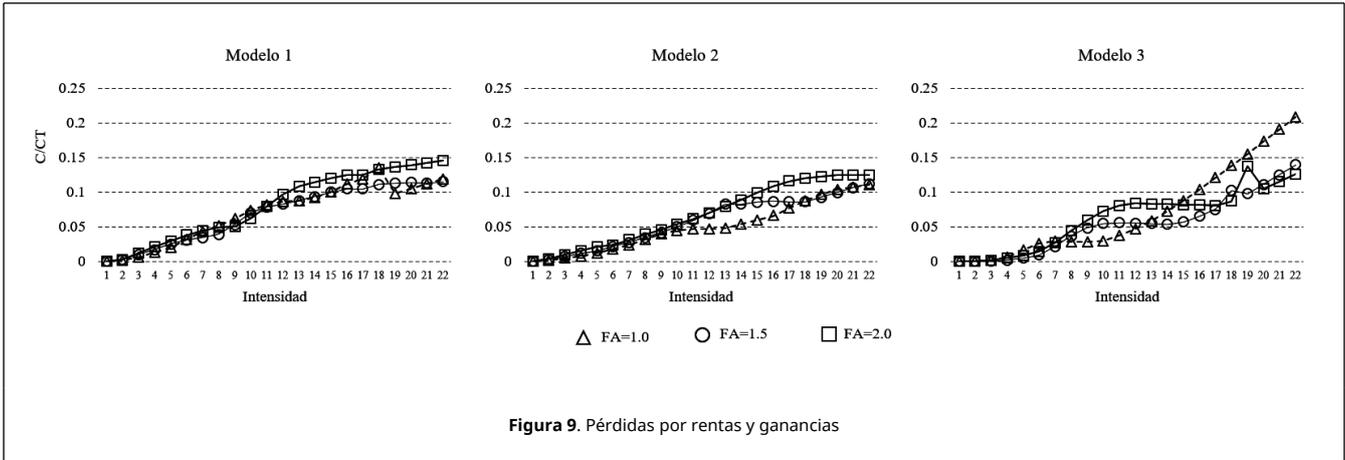
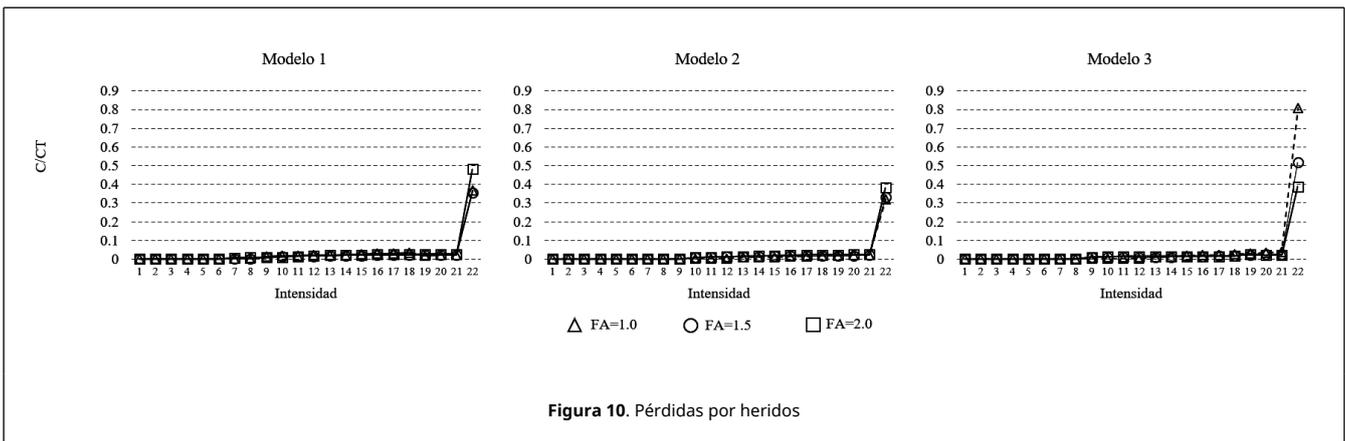


Figura 8. Pérdidas por reposición de contenidos

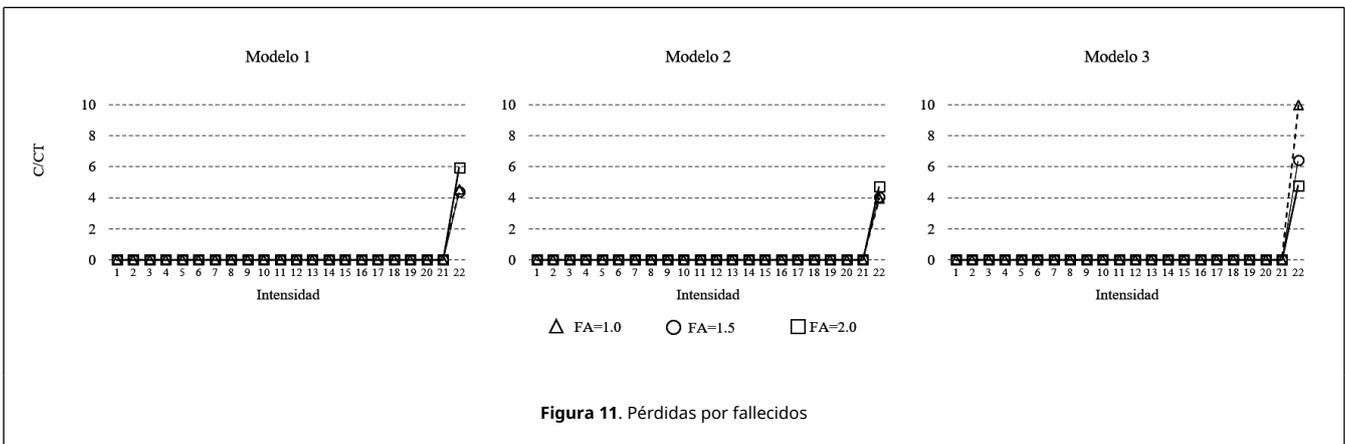
En las pérdidas por rentas y ganancias (Figura 9), se observa que para los tres modelos el FA_{MC} es de 1 hasta la intensidad 3. Para las intensidades 4 y 5 el FA_{MC} es de 1.0 para los modelos 1 y 2, y en las intensidades 6 a 17 el FA_{MC} es de 1 para el modelo 2. En la Figura 14(d) se observa que el FA_{MC} es de 2 para el modelo 3 en las tres últimas intensidades.



Los FA_{MC} que minimizan los costos por heridos son de 1 para los 3 modelos en las tres primeras intensidades. Para las intensidades 4 a 7, los modelos 1 y 2 también tienen un FA_{MC} que minimiza los costos de heridos de 1, mientras que para el modelo 3 el FA_{MC} que minimiza dichos costos varía entre 1.5 y 2.0. A partir de la intensidad 8, el FA_{MC} que minimiza los costos por heridos varía en los tres modelos (Figuras 10 y 14(e)).

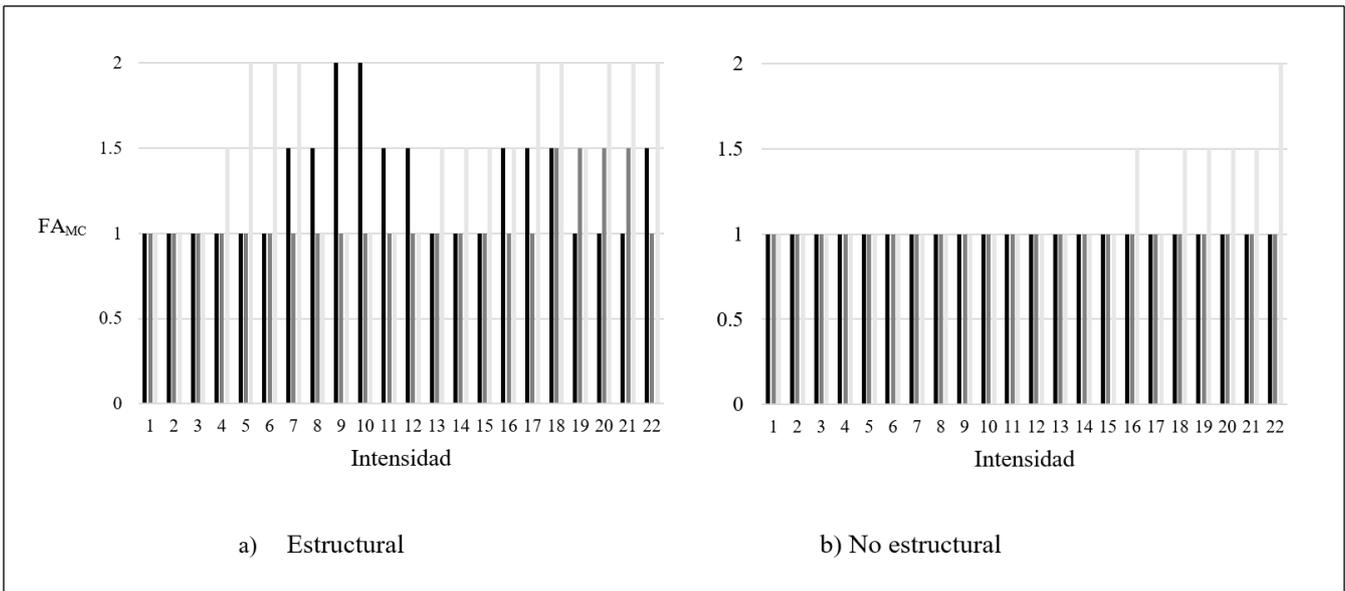
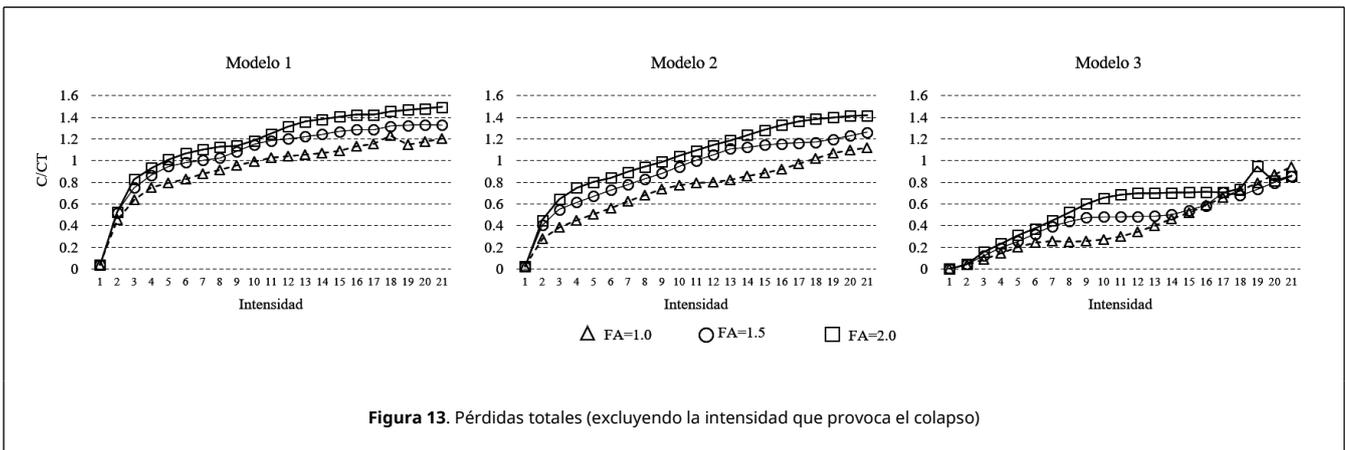
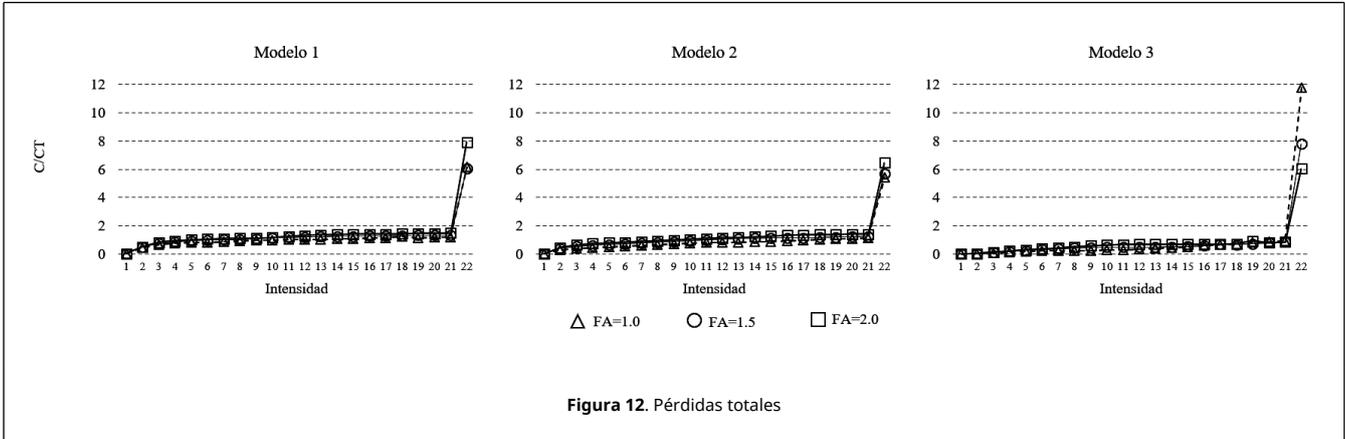


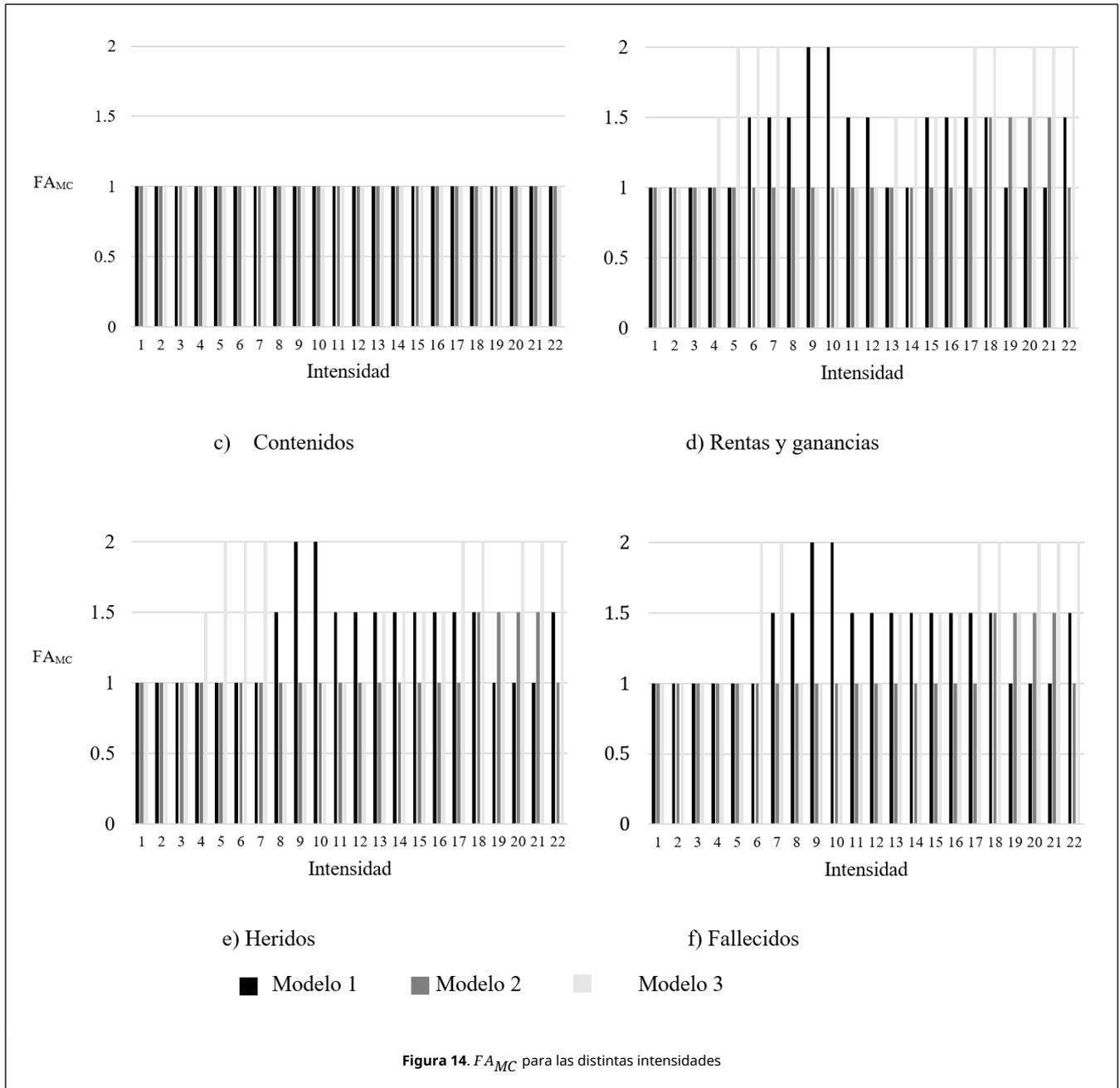
La Figura 11 muestra el FA_{MC} por fallecidos, y se observa que dicho factor es de 1 en las 5 primeras intensidades en los tres modelos. El FA_{MC} es de 1.0 para las intensidades 6 a 17 y 22 para el modelo 2. La variación para las intensidades 6 a 22 para los modelos 1 y 3 se muestra en la Figura 14(f).



Las Figuras 12, 13 y 15 muestran el FA_{MC} para los costos totales. El FA_{MC} es 1 para los tres modelos en las primeras 15 intensidades y en la intensidad 17. En las intensidades 16 y 18 a 21 se observa que el FA_{MC} es 1.0 para los modelos 1 y

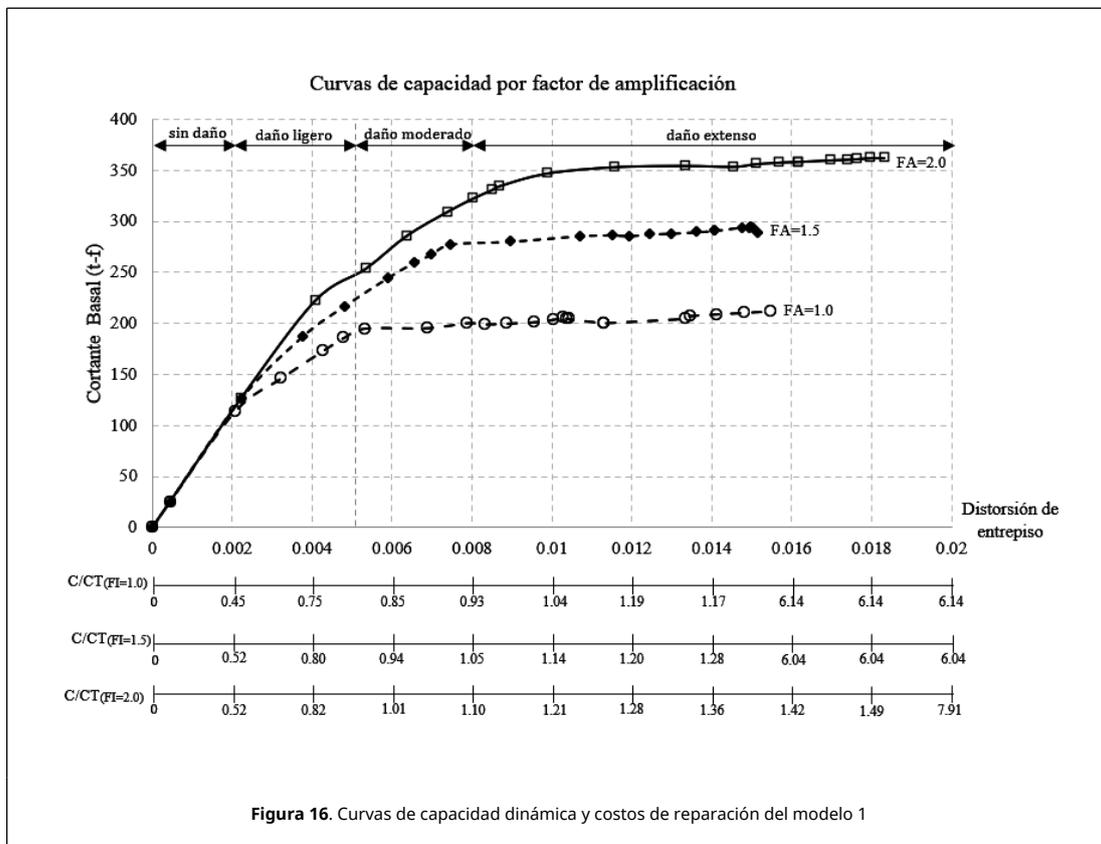
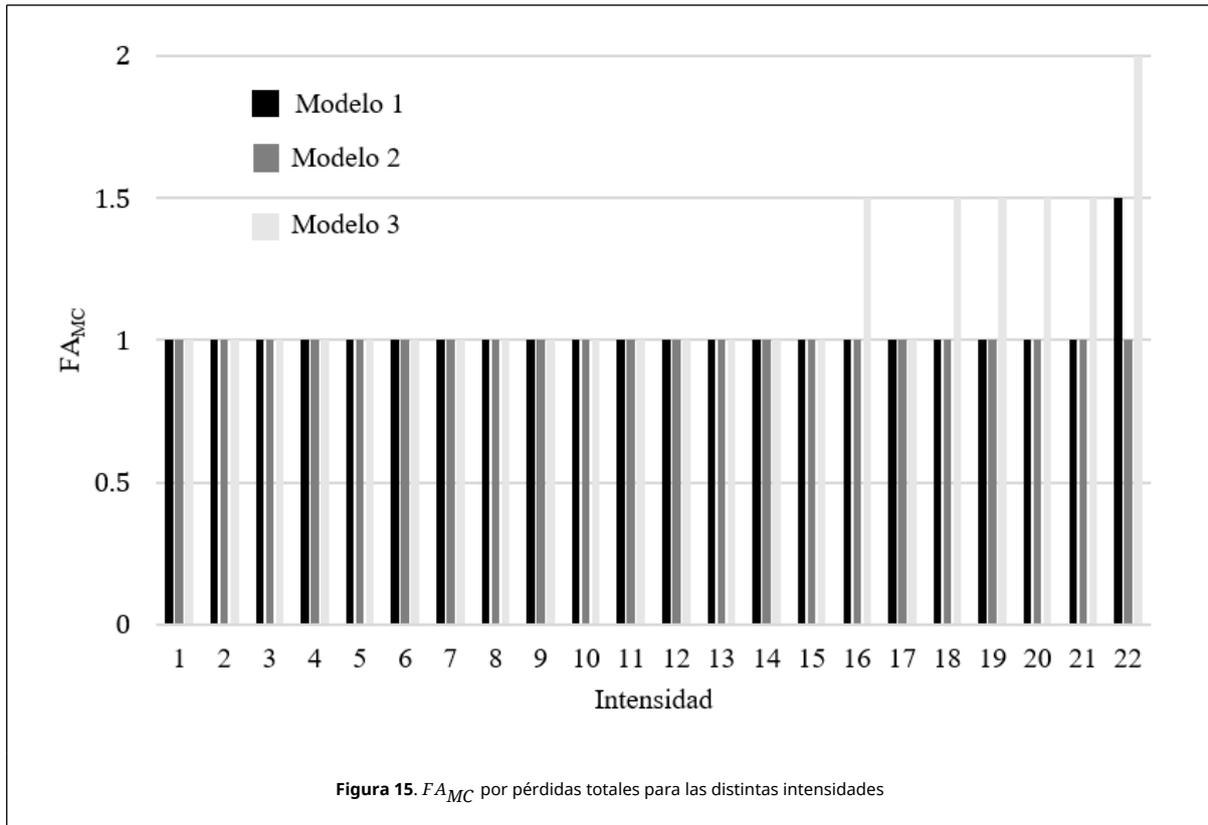
2 y para el modelo 3 es de 1.5. Finalmente, en la intensidad 22 el FA_{MC} es de 1.5 en el modelo 1, en el modelo 2 el $FA_{MC} = 1.0$ y en el modelo 3 el $FA_{MC} = 2$.





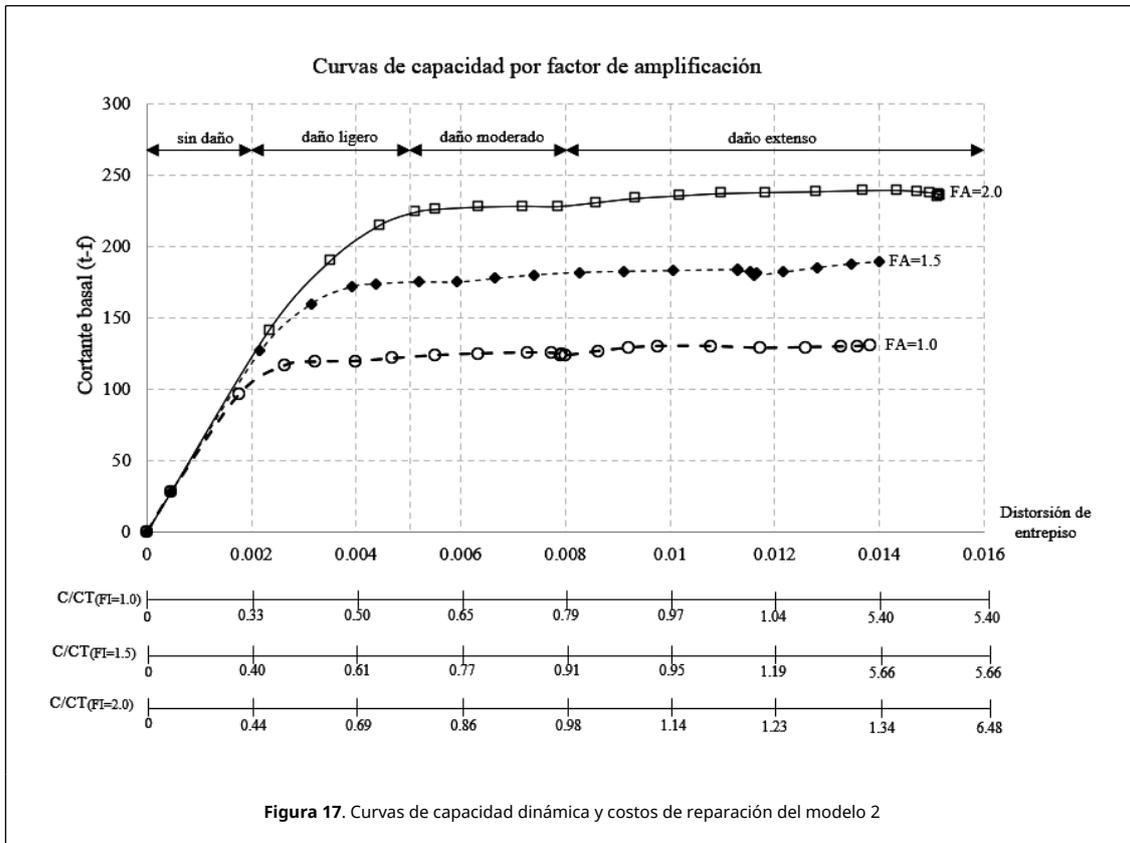
Sobreponiendo las pérdidas económicas totales por sismo con la curva de capacidad dinámica, se pueden hacer observaciones adicionales. Por ejemplo, la Figura 16 tiene tres ejes horizontales adicionales a la distorsión de entrepiso. Cada eje horizontal adicional representa el costo total por sismo dividido entre el costo de construcción inicial para cada factor de amplificación.

La Figura 16 corresponde al modelo 1 y se observa que para la mayoría de los valores de distorsión de entrepiso (hasta 0.014) el FA_{MC} es de 1.0, sin embargo, para una distorsión de 0.016, los modelos asociados los factores de amplificación de 1.0 y 1.5 ya han colapsado, mientras que el modelo con FA_{MC} de 2.0 todavía alcanza deformación lateral adicional. Este hecho hace que el FA que minimiza costos sea de 2.0 en ese punto de la curva de capacidad dinámica.



Para el modelo 2 (Figura 17), se observa que hasta una distorsión de 0.012 el FA_{MC} es de 1.0. Sin embargo, para una distorsión de entrepisos de 0.014 el FA_{MC} es de 2. Finalmente, en la Figura 18 se observa que hasta una distorsión de

entrepiso de 0.02 el FA_{MC} es 1.0.



En las Tablas 1 a 7 se muestran los valores promedio de los factores de amplificación que minimizan los costos para cada etapa de daño del modelo asociado a un intervalo de distorsión de entrepiso. Los valores promedio se calcularon de la siguiente forma: cada nivel de desempeño abarca varias intensidades (puntos de la curva de capacidad dinámica), el promedio se calculó considerando los distintos puntos de la curva de capacidad dinámica que corresponden a un mismo nivel de daño. De esta forma se pudo calcular un valor promedio del factor de amplificación que minimiza los costos para los distintos niveles de desempeño analizados.

Tabla 1. Valores promedio del FA_{MC} por daño estructural

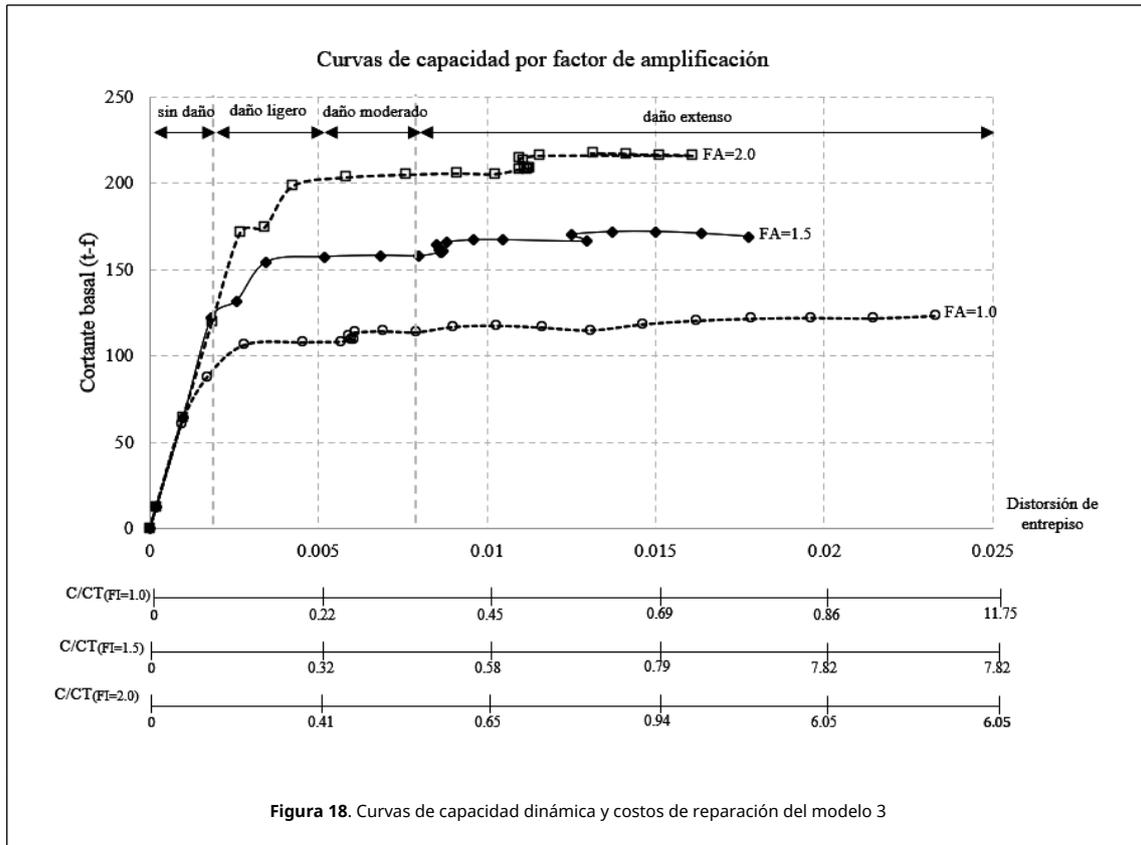
Tipo de daño	Distorsión de entrepiso (δ)	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.4
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.3	1.0	1.7
Extenso	$\delta > 0.008$	1.4	1.1	1.5

Tabla 2. Valores promedio del FA_{MC} por daño no estructural

Tipo de daño	Distorsión de entrepiso (δ)	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.0
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.0	1.0	1.0
Extenso	$\delta > 0.008$	1.0	1.0	1.2

Tabla 3. Valores promedio del FA_{MC} por reposición de contenidos

Tipo de daño	Distorsión de entrepiso (δ)	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.0
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.0	1.0	1.0
Extenso	$\delta > 0.008$	1.0	1.0	1.2



Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.0
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.0	1.0	1.0
Extenso	$\delta > 0.008$	1.0	1.0	1.0

Tabla 4. Valores promedio del FA_{MC} por rentas y ganancias

Tipo de daño	Distorsión de entrepiso ()	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.4
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.5	1.0	1.7
Extenso	$\delta > 0.008$	1.4	1.1	1.5

Tabla 5. Valores promedio del FA_{MC} por heridos

Tipo de daño	Distorsión de entrepiso ()	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.4
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.2	1.0	1.7
Extenso	$\delta > 0.008$	1.4	1.1	1.5

Tabla 6. Valores promedio del FA_{MC} por fallecidos

Tipo de daño	Distorsión de entrepiso ()	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.0
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.3	1.0	1.7
Extenso	$\delta > 0.008$	1.5	1.1	1.5

Tabla 7. Valores promedio del FA_{MC} por pérdidas totales

Tipo de daño	Distorsión de entrepiso ()	FA_{MC} promedio		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sin daño	$\delta \leq 0.002$	1.0	1.0	1.0
Ligero	$0.002 < \delta \leq 0.005$	1.0	1.0	1.0
Moderado	$0.005 < \delta \leq 0.008$	1.0	1.0	1.0
Extenso	$\delta > 0.008$	1.0	1.0	1.1

5. Conclusiones

Para evaluar los factores de amplificación del espectro de diseño, se estudiaron los costos por sismo de tres modelos analíticos no lineales con diferentes periodos de vibración para distintos niveles de daño. Cada modelo se diseñó para tres factores de amplificación (1.0, 1.5 y 2.0). Los tres modelos tuvieron una demanda de ductilidad de diseño de $Q = 4$. Las pérdidas económicas por sismo analizadas fueron los costos por daño estructural, por daño no estructural, por reposición de contenidos, por rentas y ganancias, por lesiones y por personas fallecidas. Estos costos se calcularon para diferentes intensidades de un sismo registrado en terreno firme. A partir de los resultados de los modelos estudiados, se presentan las siguientes conclusiones:

- En la etapa de comportamiento sin daño de los 3 modelos el FA_{MC} promedio es de uno para todos los tipos de costos por daño sísmico.
- En la etapa de daño ligero se observa que, para los costos por daño no estructural, reposición de contenidos, costos por fallecidos y costos totales el FA_{MC} promedio es de 1.0 para los tres modelos. Para los costos asociados a daño estructural, costos por rentas y ganancias, y costos por heridos el FA_{MC} promedio para los modelos 1 y 2 es de uno y para el tercer modelo el FA_{MC} promedio es de 1.4.
- En la etapa de daño moderado para los costos por daño no estructural y reposición de contenidos y costos totales el FA_{MC} para los 3 modelos es de 1. Para los costos por daño estructural el FA_{MC} promedio es de 1.3, 1.0 y 1.7 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. Los valores del FA_{MC} promedio para los costos por rentas y ganancias son de 1.5, 1.0 y 1.7 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. En cuanto a costos por heridos, los FA_{MC} promedio son de 1.2, 1.0 y 1.7 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. Y los FA_{MC} promedio para los costos por fallecidos son de 1.3, 1.0 y 1.7 para los modelos 1, 2 y 3, respectivamente.
- Finalmente, en la etapa de daño severo el valor promedio del FA_{MC} para los costos por daño estructural, rentas y ganancias, y heridos es de 1.4, 1.1 y 1.5 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. El valor promedio del FA_{MC} para los costos por daño no estructural es de 1.0, 1.0 y 1.2 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. En cuanto a reposición de contenidos el FA_{MC} promedio es de 1.0 para los tres modelos. Los valores promedio del FA_{MC} por fallecidos es de 1.5, 1.1 y 1.5 para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. En lo que respecta a pérdidas totales el FA_{MC} promedio es de 1.0, 1.0 y 1.1 para los modelos 1, 2 y 3, respectivamente.

Referencias

- [1] Kircher C., Seligson H., Bouabid J., Morrow G. When the big one strikes again - Estimated losses due to a repeat of the 1906 San Francisco Earthquake. *Earthquake Spectra*, 22(2):S297-S339, 2006.
- [2] Alsani H., Miranda E. Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in buildings. Report No. 157, Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University, 2005.
- [3] FEMA. Multi-Hazard loss estimation methodology-earthquake model. HAZUS-MH 2.1, 2020.
- [4] Nazri F. Fragility assessment for buildings due to earthquake excitation: Fragility curves. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, pp. 3-30, 2017.
- [5] Ramirez C., Liel A., Mitrani R., Haselton C., Spear A., Steiner J., Deierlein G., Miranda E. Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 41:1455-1475, 2012.
- [6] Wilson A., Philips A., Motter C., Lee J., Dolan J. Seismic loss analysis of buildings with post-tensioned cross-laminated timber walls. *Earthquake Spectra*, 37(1):324-345, 2021.
- [7] Erberik M. Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. 37(3):387-405, 2008.
- [8] Hwang S., Lignos D. Earthquake-induced loss assessment of steel frame buildings with special moment frames designed in highly seismic regions. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 46:2141-2162, 2017.
- [9] Polese M., Di Ludovico M., Marcolini M., Prota A., Manfredi G. Assessing reparability: simple tools for estimation of costs and performance loss of earthquake damaged reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44:1539-1557, 2015.
- [10] Polese M., Verderame G., Mariniello C., Iervolino I., Manfredi G. Vulnerability analysis for gravity load designed RC buildings in Naples-Italy. *Journal of Earthquake Engineering*, 12:234-245, 2008.
- [11] Chen X., Xinzhen L., Xuchuan L., Zhen X., Lieping Y. Parameter determination and damage assessment for THA-based regional seismic damage prediction of multi-story Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 21:461-485, 2016.
- [12] RCDF. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus normas complementarias. Ciudad de México, 2017.
- [13] Vamvatsikos D., Cornell C. Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3):491-514, 2002.

- [14] FEMA. Hazus Earthquake Model Technical Manual. Hazus 4.2 Service Pack 3, 2020.
- [15] FEMA. Hazus Inventory Technical Manual. Hazus 4.2 Service Pack 3, 2021.
- [16] FEMA - 174. Establishing programs and priorities for the seismic rehabilitation of buildings. A handbook. Building Systems Development, Inc. Washington D.C, 1989.
- [17] Porter K., Shoaf K., Seligson H. Value of injuries in the Northridge earthquake. Earthquake Spectra, 22(2):555-563, 2006.
- [18] Federal Aviation Administration (FAA). Economic values for FAA investment and regulatory decisions. A guide. Final Report, Aviation Specialists Group, Inc., 2007.
- [19] Perform 3D V7. Non-linear analysis and performance assessment for 3D structures. Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.
- [20] Taghavi S., Miranda E. Response assessment of nonstructural building elements. PEER Report 2003/5, 2003.