

UNA APROXIMACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA Y SU APLICACIÓN A LA EVALUACIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Francisco H. Bañuelos-García⁽¹⁾, A. Gustavo Ayala Milián⁽²⁾ y Marco A. Escamilla García⁽²⁾

RESUMEN

En este artículo se presenta un procedimiento simplificado para la evaluación sísmica de estructuras fundamentado en la curva de capacidad dinámica, y en su validez como una propiedad estructural asociada a un tipo de demanda sísmica. El procedimiento permite estimar el desempeño de una estructura ante demandas sísmicas correspondientes a un espectro de peligro uniforme mediante una aproximación de la curva de capacidad dinámica construida a partir de análisis modales espectrales asociados a demandas de intensidad creciente. Para considerar la reducción de rigidez y la disipación de energía debida a histéresis se resuelve un oscilador de un grado de libertad con las características del modo fundamental. La aproximación de la curva de capacidad dinámica obtenida a partir del procedimiento propuesto se valida comparándola con la obtenida de análisis dinámicos paso a paso ante demandas de intensidades crecientes, para dos estructuras de concreto reforzado, un marco plano de 12 niveles irregular en elevación, y un puente continuo tipo viaducto.

Palabras clave: curva de capacidad dinámica; análisis aproximados; análisis dinámico incremental; análisis modal espectral; desempeño sísmico

A DYNAMIC CAPACITY CURVE APPROACH AND ITS APPLICATION TO THE SEISMIC EVALUATION OF STRUCTURES

ABSTRACT

This paper presents a simplified procedure for the seismic evaluation of structures based on the dynamic capacity curve and its validity as a structural property associated to a seismic demand. The proposed procedure calculates the performance of a structure subjected to seismic demands corresponding to a uniform hazard spectrum through an approximation of the dynamic capacity curve constructed from modal spectral analyses associated to increasing intensity demands. To considering stiffness reduction and energy dissipation due to hysteresis, a one-degree-of-freedom oscillator with the characteristics of the fundamental mode is solved. The approximation of the dynamic capacity curve obtained from the proposed procedure is validated by comparing it with the obtained from step-by-step dynamic analyses under increasing intensity

Artículo recibido el 24 de junio de 2022 y aprobado para su publicación el 27 de junio de 2023. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec S/N, C.U., 50110, Toluca de Lerdo, Estrado de México. fhbanuelos@hotmail.com

⁽²⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, Ingeniería S/N, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX. GAyalaM@iingen.unam.mx; MEscamillaG@iingen.unam.mx

[DOI: 10.18867/ris.110.620](https://doi.org/10.18867/ris.110.620)

demands, for two reinforced concrete structures, a 12-story plane frame irregular in elevation, and a continuous viaduct-type bridge.

Keywords: dynamic capacity curve; approximate procedures; incremental dynamic analysis; modal spectral analysis; seismic performance

INTRODUCCIÓN

Los efectos de algunos de los sismos destructivos recientes, *e.g.*, Michoacán 1985, Northridge 1994, Kobe 1995, Chile 2009, Tohoku 2011 y Puebla-Morelos 2017, entre otros, han mostrado la vulnerabilidad de las estructuras diseñadas bajo códigos pasados y vigentes ante este tipo de demandas. Debido a esto diferentes grupos de investigación han dedicado esfuerzos importantes al desarrollo de procedimientos simplificados para la evaluación sísmica de estructuras aplicables en la práctica de la ingeniería estructural *i.e.*, utilizando programas de análisis sísmicos comerciales y conceptos básicos de dinámica estructural asequibles a los profesionales. Entre los procedimientos más utilizados están el del Espectro de Capacidad, originalmente, propuesto por Freeman (1978); el de los Coeficientes, FEMA (2005); el N2 de Fajfar y Gaspersic (1996), entre otros. Estos procedimientos ofrecen resultados sobre el desempeño de una estructura que los convencionales, generalmente basados en hipótesis de linealidad, no pueden estimar, como lo son: su fluencia, el daño, y el desempeño esperado ante diversos niveles de intensidad de la demanda sísmica. A pesar de las ventajas mostradas en la aplicación práctica de estos procedimientos, aún existen incertidumbres sobre en qué condiciones pueden ser usados y sobre la validez de los resultados obtenidos, dudas que justifican el por qué algunos códigos de diseño vigentes no han incluido estos procedimientos en sus normativas, *e.g.*, la Norma Chilena NCh 433, INN (2009) y la Norma Peruana NTE-E.030, SENCICO (2013), entre otras.

La mayoría de estos procedimientos simplificados de evaluación sísmica utilizan la curva de capacidad como una propiedad de la estructura a partir de la cual es posible estimar el desempeño sísmico ante demandas sísmicas, caracterizadas generalmente por una distribución de cargas laterales como las recomendadas en diversos códigos de diseño sísmico vigentes que aceptan como procedimiento de análisis sísmico el método estático. Sin embargo, ante demandas extremas este procedimiento puede generar resultados no congruentes con los que se obtendrían ante una demanda sísmica real mediante un procedimiento de análisis más robusto. Diversas investigaciones demuestran que esta deficiencia se debe a que la curva de capacidad es muy sensible al vector de carga utilizado, a la técnica de empuje y a el modelo de daño considerado Antoniu y Pinho (2004a), Escamilla *et al.* (2022). Debido a lo anterior se han propuesto una gran cantidad de procedimientos para construir esta curva que muestra la variación del desplazamiento lateral de un punto característico de la estructura con su correspondiente cortante basal, que realmente caracterice el desempeño de la estructura ante una demanda sísmica creciente.

Para construir la curva de capacidad se han propuesto diversas técnicas de análisis como: las basadas en fuerzas, como es el caso de las propuestos por Requena y Ayala (1999), Chopra y Goel (2001), Antoniu y Pinho (2004a), entre otros, las basadas en desplazamientos Antoniu y Pinho (2004b), así como el uso de análisis modales espectrales secuenciales, Aydinoglu (2003) y Alba *et al.* (2005). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos hasta ahora realizados para desarrollar procedimientos para generar la curva de capacidad y obtener un desempeño sísmico congruente, en la actualidad todavía persisten dudas sobre los alcances de estos procedimientos ya que, la mayoría de estos, no siempre logran aproximar la evolución del desempeño sísmico y del daño estructural ante demandas sísmicas de intensidad creciente. Debido a lo cual surge la denominada curva de capacidad dinámica, DCC por sus siglas en inglés; la cual se obtiene mediante un análisis dinámico incremental, IDA por sus siglas en inglés.

Un análisis IDA proporciona resultados asociados a índices de desempeño “robustos”, los cuales pueden ser plasmados en una curva de capacidad dinámica, en la que también es posible obtener los diferentes índices de desempeño asociados a distintos niveles de intensidad sísmica. Un ejemplo de la aplicación de este procedimiento que muestra la variación del cortante basal *vs.* los desplazamientos de azotea para diversas demandas sísmicas de intensidad creciente se muestra en la Figura 1 (Fragiadakis y Vamvatsikos, 2011). A pesar de que este análisis proporciona resultados congruentes con el diseño, se considera como demanda sísmica un conjunto de registros sísmicos; sin embargo, la mayoría de los códigos de diseño actuales recomiendan el uso de espectros sísmicos suavizados.

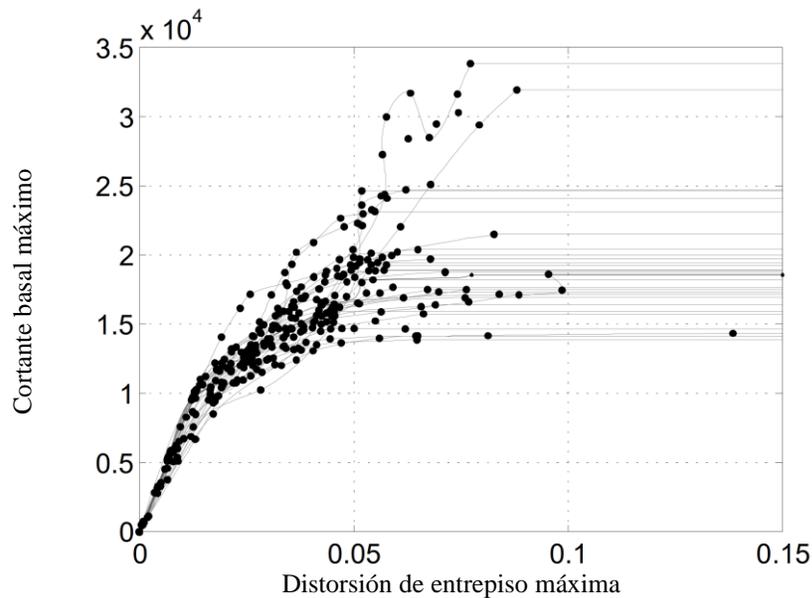


Figura 1. Curva de capacidad dinámica (Fragiadakis y Vamvatsikos, 2011)

Debido a lo anterior, en este artículo se propone un procedimiento de evaluación sísmica de estructuras basado en la DCC calculada mediante el uso de análisis modales espectrales evolutivos (MEAP), que incluyen la participación de los modos superiores en el desempeño y en los que intrínsecamente se considera la evolución de la degradación de rigidez y la disipación de energía por histéresis ante una demanda sísmica de intensidad creciente caracterizada por una forma espectral suavizada correspondiente a un registro particular o a un conjunto de registros sísmicos. Para validar los resultados del procedimiento propuesto, se compararon las DCCs, y los desempeños sísmicos con los resultados correspondientes con un análisis IDA. Como ejemplos de aplicación se consideraron dos estructuras de concreto reforzado, un marco plano irregular de 12 niveles y un puente continuo. Las demandas sísmicas de intensidad creciente utilizadas en la determinación de ambas DCCs fueron correspondientemente las componentes EW registrada en la estación SCT durante el sismo de Michoacán de 1985 y la EW, registrada en la estación Kalamata del sismo de Atenas de 1989. Finalmente se discuten las ventajas y limitaciones del procedimiento propuesto.

PROCEDIMIENTO PROPUESTO

Este procedimiento es una evolución de los propuestos por Requena y Ayala (2000), Alba *et al.*, (2005) y Mendoza y Ayala (2011). En esta nueva versión se implementa, por primera vez, la consideración de degradación de rigidez y la energía disipada por histéresis asociadas a los incrementos de la intensidad de la demanda sísmica en los análisis modales espectrales evolutivos empleados para el cálculo aproximado de la DCC.

Este procedimiento, como los que le precedieron, se fundamenta en la consideración de que es posible aproximar el desempeño sísmico de una estructura de múltiples grados de libertad, MGL, a partir del desempeño de un oscilador bilineal de un 1GL, considerado como de referencia y de la validez de la curva de capacidad considerada como propiedad de la estructura para un tipo de demanda sísmica dada.

La curva de capacidad dinámica aproximada se construye mediante una serie de análisis modales espectrales evolutivos, cada uno de ellos asociado a una intensidad creciente de la demanda sísmica y a un correspondiente estado de daño. Para cada rama de la curva de capacidad se realiza una corrección, degradación de rigidez y por disipación de energía por histéresis mediante la solución de un oscilador bilineal con características de un sistema de referencia asociado al modo fundamental de la estructura (Figura 2). Para su aplicación es necesario realizar tantos análisis como estados de daño ocurran antes de que la estructura alcance un desplazamiento objetivo. Sin embargo, para fines prácticos, se pueden realizar asociar varios estados de daño a cada incremento de intensidad.

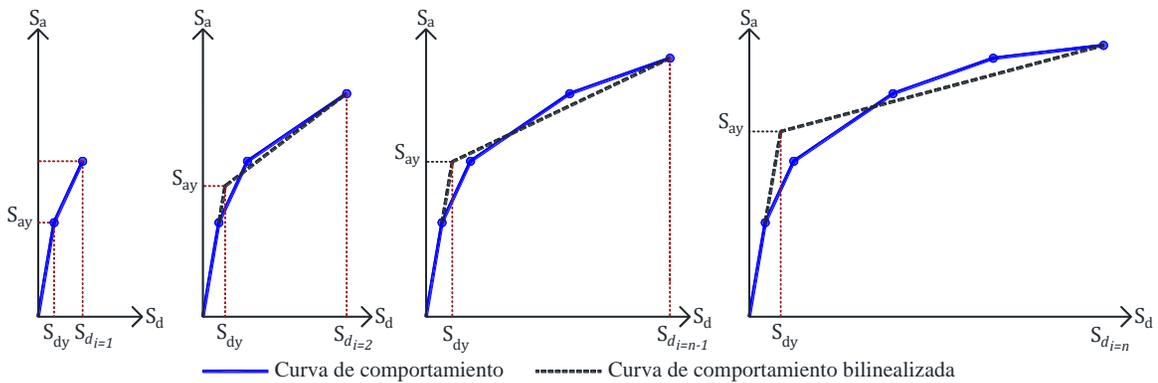


Figura 2. Aproximaciones bilineales de una curva de comportamiento para diferentes estados de daño

El cálculo de la curva de capacidad aproximada involucra la obtención de las respuestas del oscilador de 1GL con propiedades asociadas a un sistema de referencia de un modo, como son: la masa modal, el periodo fundamental y rigideces elástica y de posfluencia (Figura 3).

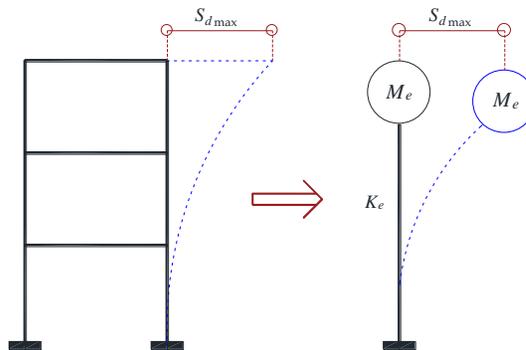


Figura 3. Sistema equivalente de un grado de libertad

En los siguientes incisos se describe el procedimiento propuesto y los pasos para su aplicación. En la Figura 10 se observa de forma esquemática la secuencia de aplicación del procedimiento.

1. **Definición de la demanda sísmica.** La acción sísmica puede definirse mediante: un espectro de respuesta de un sismo particular, un espectro de diseño suavizado, o un conjunto de registros sísmicos asociados a un sitio particular.
2. **Cálculo de la capacidad de los elementos estructurales.** Caracterizada por el momento de fluencia (M_y), mediante la construcción de diagramas de momento – curvatura o diagramas de interacción en el caso de vigas y columnas (pilas) y/o de la fuerza cortante de fluencia, en el caso que la estructura tenga muros.
3. **Cálculo de la rama elástica de la curva de capacidad.** Esta rama (Figura 4) se calcula mediante la aplicación de un incremento de intensidad (S_f), el cual se define como la intensidad de la demanda sísmica necesaria para generar el primer daño en la estructura (Figura 5). Los incrementos de intensidad (S_f) se calculan para cada extremo de los elementos estructurales, considerando en cada evento el menor de ellos, ec 1.

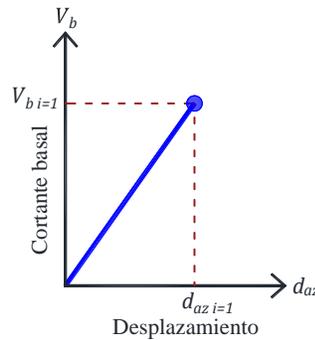


Figura 4. Rama elástica de la curva de capacidad

$V_{b_{i=1}}$ cortante basal asociado al primer incremento de intensidad

$d_{az_{i=1}}$ desplazamiento de azotea asociado al primer incremento de intensidad

$$S_{f_{i=1}} = \frac{M_{y_k} - M_{G_k}}{M_{us_k}} \quad (1)$$

donde

M_y momento flexionante de fluencia

M_G momento flexionante asociado a la carga gravitacional

M_{us} momento flexionante asociado a la aplicación del 100 % de la demanda sísmica

Los subíndices i y k indican el incremento de intensidad y el elemento estructural respectivamente.

El cortante basal ($V_{b_{i=1}}$) y el desplazamiento de azotea ($d_{az_{i=1}}$) se pueden obtener directamente de análisis estructural o bien multiplicando el factor de escala por el cortante basal total y el desplazamiento de azotea total respectivamente (ecs 2 y 3)

$$V_{b_{i=1}} = S_{f_{i=1}} V_b \quad (2)$$

$$d_{az_{i=1}} = S_{f_{i=1}} d_{az} \quad (3)$$

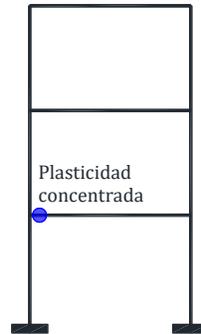


Figura 5. Modelo matemático asociado al incremento de intensidad $S_{f_{i=1}}$

En este artículo el daño de la estructura se caracteriza mediante un modelo de plasticidad concentrada, en donde las deformaciones inelásticas se concentran en los extremos de los elementos con un resorte rotacional con una rigidez de posfluencia dada por un 15% de la rigidez a flexión elástica (Bañuelos-García, 2013, Escamilla et al., 2022).

4. **Cálculo de la segunda rama de la curva de capacidad (primera rama inelástica).** Para definir esta rama (Figura 6) se aplica un incremento de intensidad en la demanda sísmica, definido por el factor de escala necesario para generar un segundo grupo de daños (ec 4). En esta segunda etapa se utiliza un modelo estructural que considere el daño correspondiente al primer nivel de intensidad de la demanda (Figura 5).

$$S_{f_{i=2}} = \frac{M_{y_k} - M_{ac_k}}{M_{us_k}} \quad (4)$$

donde

$S_{f_{i=2}}$ Factor de escala para construcción de la segunda rama de la curva de capacidad

M_{ac} Momento flexionante acumulado de los elementos estructurales

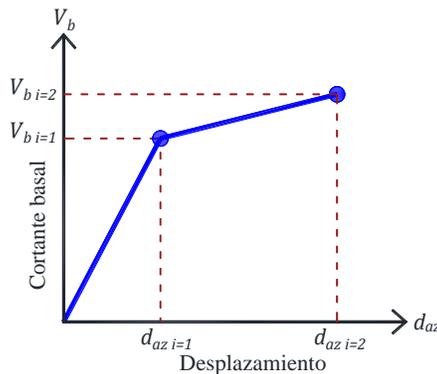


Figura 6. Curva de capacidad asociado a un segundo incremento de intensidad $S_{f_{i=2}}$

El cortante basal ($V_{b_{i=2}}$) y el desplazamiento de azotea ($d_{az_{i=2}}$) se obtienen sumando el cortante basal y desplazamiento de azotea acumulados más los incrementos de cortante basal, y desplazamientos obtenidos del segundo incremento de intensidad (ecs 5 y 6)

$$V_{b_{i=2}} = V_{b_{i=1}} + S_{f_{i=2}} V_{b_t} \quad (5)$$

$$d_{az_{i=2}} = d_{az_{i=1}} + S_{f_{i=2}} d_{az_t} \quad (6)$$

5. **Cálculo de la curva de comportamiento ($S_a - S_d$).** Esta curva se calcula considerando un sistema de referencia, generalmente asociado al modo fundamental de la estructura (Figura 7). Para ello, se utilizan las ecuaciones de la dinámica estructural básica (ATC 40, 2005), ecs. 7 a 10.

$$S_d = \frac{d_a}{\Phi_i \Gamma_i} \quad (7)$$

$$S_a = \frac{V_b}{\alpha} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{j=1}^N \frac{w\Phi_j}{g}\right)^2}{\left(\sum_{j=1}^N \frac{w}{g}\right)\left(\sum_{j=1}^N \frac{w\Phi_j^2}{g}\right)} \quad (9)$$

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{w\Phi_j}{g}}{\sum_{j=1}^N \frac{w\Phi_j^2}{g}} \quad (10)$$

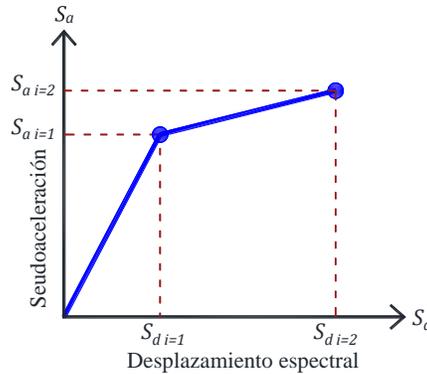


Figura 7. Curva de comportamiento asociado a un segundo incremento de intensidad $S_{f_{i=2}}$

6. **Corrección por disipación de energía por histéresis.** Se corrige el punto de desempeño de la curva de capacidad definida por los 2 primeros incrementos de intensidad; este punto se obtiene calculando la respuesta máxima del oscilador bilineal de un grado de libertad, considerando las características de la curva de comportamiento, calculada en el paso anterior y la intensidad de la demanda sísmica, definida mediante la suma de los factores de escala ($S_{f_{i=1}} + S_{f_{i=2}}$). En la Figura 8 se ilustra de forma esquemática de un punto de desempeño de la curva de capacidad, para 2 incrementos de intensidad.

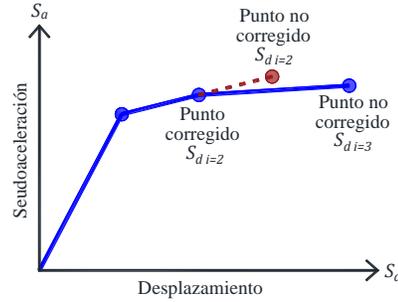


Figura 8. Curva de comportamiento, asociado a un segundo incremento de intensidad, considerando la corrección por de energía por histéresis

7. **Cálculo de las ramas subsecuentes de la curva de capacidad.** El procedimiento se repite a partir del paso 4. Para cada incremento de intensidad en la demanda, se realiza una corrección por histéresis resolviendo un oscilador de un grado de libertad bilineal asociado a un sistema de referencia con las características del modo fundamental de vibrar (Figura 9).

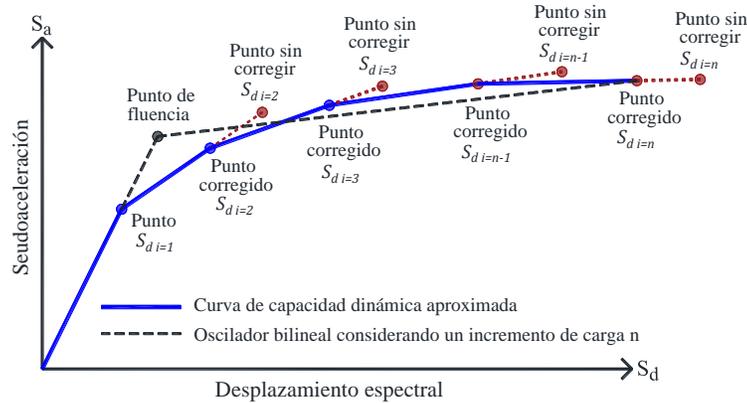


Figura 9. Curva de comportamiento, asociado a un incremento de intensidad n , considerando la corrección por disipación de energía por histéresis para cada uno de los incrementos de intensidad.

El cortante basal y los desplazamientos de azotea para un incremento de intensidad n ($V_{b_{i=n}}$, $d_{az_{i=n}}$) se calculan mediante las ecs 11 y 12

$$V_{b_{i=n}} = V_{b_{i=1}} + S_{f_{i=2}} V_{b_t} + \dots + S_{f_{i=n-1}} V_{b_t} + S_{f_{i=n}} V_{b_t} \quad (11)$$

$$d_{az_{i=n}} = d_{az_{i=1}} + S_{f_{i=2}} d_{az_t} + \dots + S_{f_{i=n-1}} d_{az_t} + S_{f_{i=n}} d_{az_t} \quad (12)$$

8. El procedimiento finaliza cuando se alcanza el desplazamiento de azotea o deriva de entrepiso predefinidos asociados al estado límite de diseño, establecido por el reglamento de construcción considerado.

Una vez definida la aproximación para la DCC es posible obtener el desempeño sísmico de la estructura ante intensidades de demanda sísmica particulares como las que se especifican para distintos estados límites (niveles de desempeño) en los códigos de diseño, no siendo necesario realizar acciones complementarias

como lo requieren los procedimientos de evaluación sísmica existentes, en los cuales solo se determina un punto de desempeño asociado a una sola intensidad de demanda sísmica.

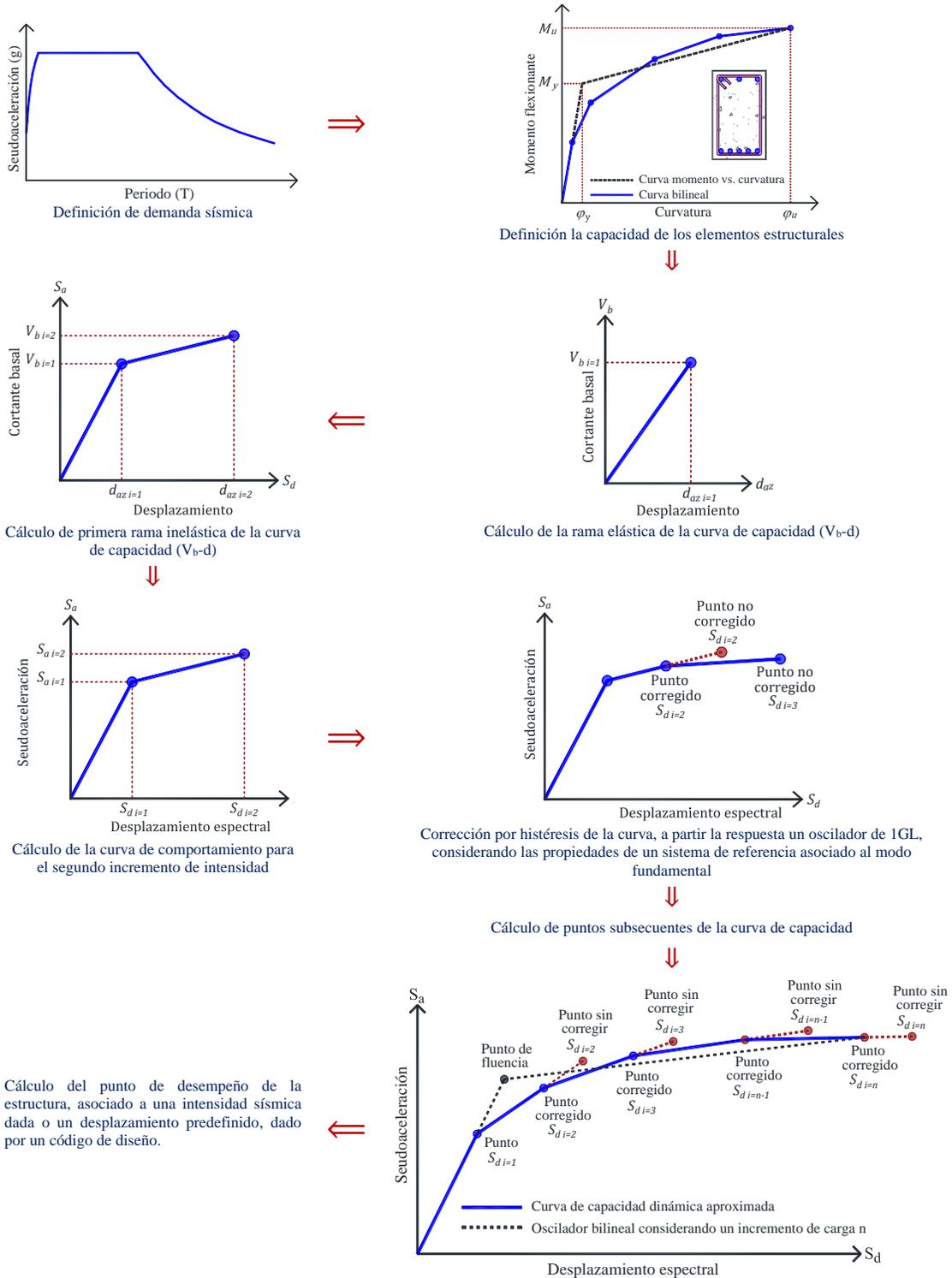


Figura 10. Secuencia de pasos a seguir en la aplicación del procedimiento propuesto

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para validar los resultados del procedimiento propuesto e ilustrar su aplicación se analizaron dos estructuras de concreto reforzado, la primera un puente continuo, tipo viaducto, (V232P) y la segunda un marco plano de 12 niveles (ER12).

El puente analizado (V232P) presenta una geometría regular con una distribución constante de masa y rigidez entre pilas adyacentes. En el diseño estructural se consideró que la calzada se comportaba elásticamente, aun cuando la estructura se encontrase sujeta a sismos de intensidad considerable y el comportamiento inelástico solo podría ocurrir en la subestructura del puente (pilas). El diseño sísmico se realizó conforme al euro-código EC8-2, 2004, considerando un espectro suavizado de diseño, tipo 1, asociado a una zona sísmica Z1, un factor de comportamiento sísmico igual a 3.0 y un factor de suelo igual a 1.20 asociado a terreno tipo C.

El puente tiene 200 m de longitud, dividida en 4 claros de 50 m cada uno (Figura 11), la calzada es a base de vigas de concreto presforzado tipo cajón de 2 m de altura y 12 m de ancho (Figura 12a). Las pilas son circulares de 2.5 m de diámetro (Figura 12b) con una altura de 14 m en sus extremos y 21 m en el centro. En la tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas de los materiales del puente estudiado.

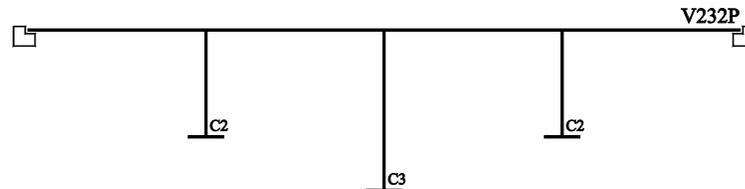


Figura 11. Geometría del puente V232P

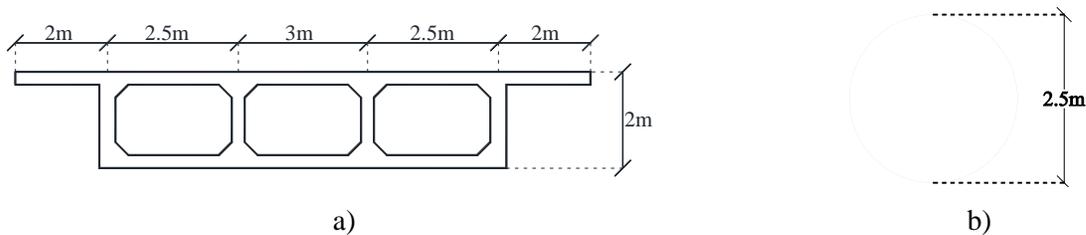


Figura 12. Sección transversal de las vigas (superestructura) y pilas (subestructura) del puente V232P

Tabla 1 Características de las propiedades mecánicas del concreto utilizado en el diseño del puente analizado

Elemento	f_c (Mpa)	E_c (Mpa)	γ_c (kN/m ³)	I_o (m ⁴)
Calzada	35	26716	24	50
Pilas	35	26716	24	1.92

El marco ER12 evaluado en este artículo fue extraído de un edificio de concreto reforzado diseñado conforme al Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias, NTC-DS-2017 y NTC-EC-2017 (GCDMX 2017). El marco consta de tres cruías, de 4.50 m de longitud en sus extremos y de 7.50 m en el centro, la altura de los entrepisos es de 3.50 m para los niveles superiores y de 4.5 m en la planta baja (ver Figura 13). La carga gravitacional considerada es variable de acuerdo con el nivel, 41.58 kN/m en azotea, 97.48 kN/m en la planta baja y 35.70 kN/m en el resto de los

niveles. En la tabla 2 se muestra las propiedades mecánicas de las secciones transversales del marco. El periodo elástico asociado al modo fundamental de este modelo es de 1.65 s.

Tabla 2. Propiedades de las secciones transversales del marco ER12

Elemento	f_c (Mpa)	E_c (Mpa)	γ_c (kN/m ³)	I_o (m ⁴)
Viga	25	22967	24	0.0054
Columna	25	22967	24	0.0108

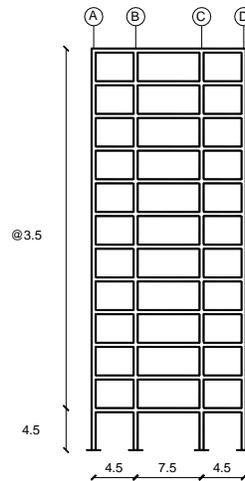


Figura 13. Geometría del marco plano ER12

Demanda sísmica

Para evitar algunas de las incertidumbres que se tienen al utilizar un espectro de diseño suavizado o un espectro de respuesta, *e.g.*, la validez de la regla de combinación modal cuando es aplicada a estructuras que no son gobernadas por el modo fundamental se utilizó como demanda sísmica acelerogramas de sismos particulares. Para el caso del viaducto, el registro fue el de la componente E-W del sismo ocurrido el 16 de noviembre de 1999 en la ciudad de Atenas, Grecia registrada en la estación Kalamata (Figura 14a). Para la evaluación sísmica del edificio se eligió un registro característico del valle de México, componente E-W del sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 (Figura 14b) registrada en la estación SCT en la CDMX.

Los registros sísmicos utilizados en este artículo se eligieron debido a que existe una correlación entre los dos primeros periodos de las estructuras estudiadas y las aceleraciones máximas del espectro de respuesta. Los Espectros de respuesta correspondiente a las demandas sísmicas se muestran en la Figura 15. En los análisis elásticos se utilizó el programa de análisis estructural comercial SAP2000, CSI (2009); para los realizar los análisis dinámicos no-lineales paso a paso se consideró el modelo bilineal, dada su facilidad de aplicación; estos análisis se realizaron en el software Perform 3D V7, CSI (2007).

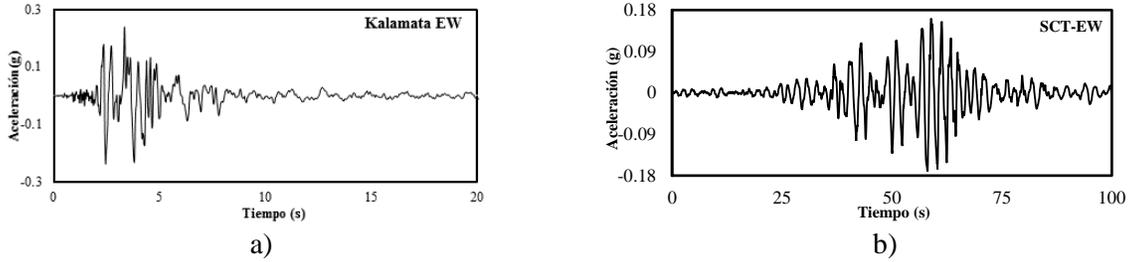


Figura 14. Registros sísmicos utilizados para la validación del procedimiento de evaluación sísmica propuesto; a) estación Kalamata -1999 y b) SCT-1985

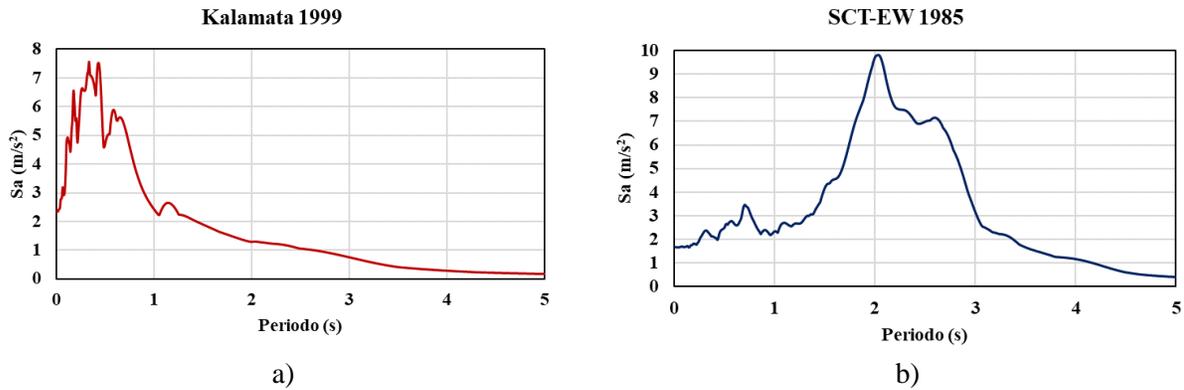


Figura 15. Espectros de respuesta de las demandas sísmicas a) estación Kalamata -1999 y b) SCT-1985

Análisis de resultados

Con el propósito de mostrar la aplicación del procedimiento de evaluación sísmica propuesto y validar sus resultados, se realizó una comparativa entre los resultados obtenidos con la DCC aproximada y los de la DCC obtenida a partir de un análisis dinámico incremental. En la Figura 16 se muestra el perfil de desplazamientos, desplazamientos modales, y la curva de capacidad del puente V232P obtenidas con el procedimiento aproximado propuesto y el análisis IDA. Se observa que para una misma magnitud de desplazamiento existe una correspondencia con la intensidad de la demanda sísmica, es decir el desempeño estimado utilizando un procedimiento aproximado es aproximado al desempeño obtenido de un análisis IDA.

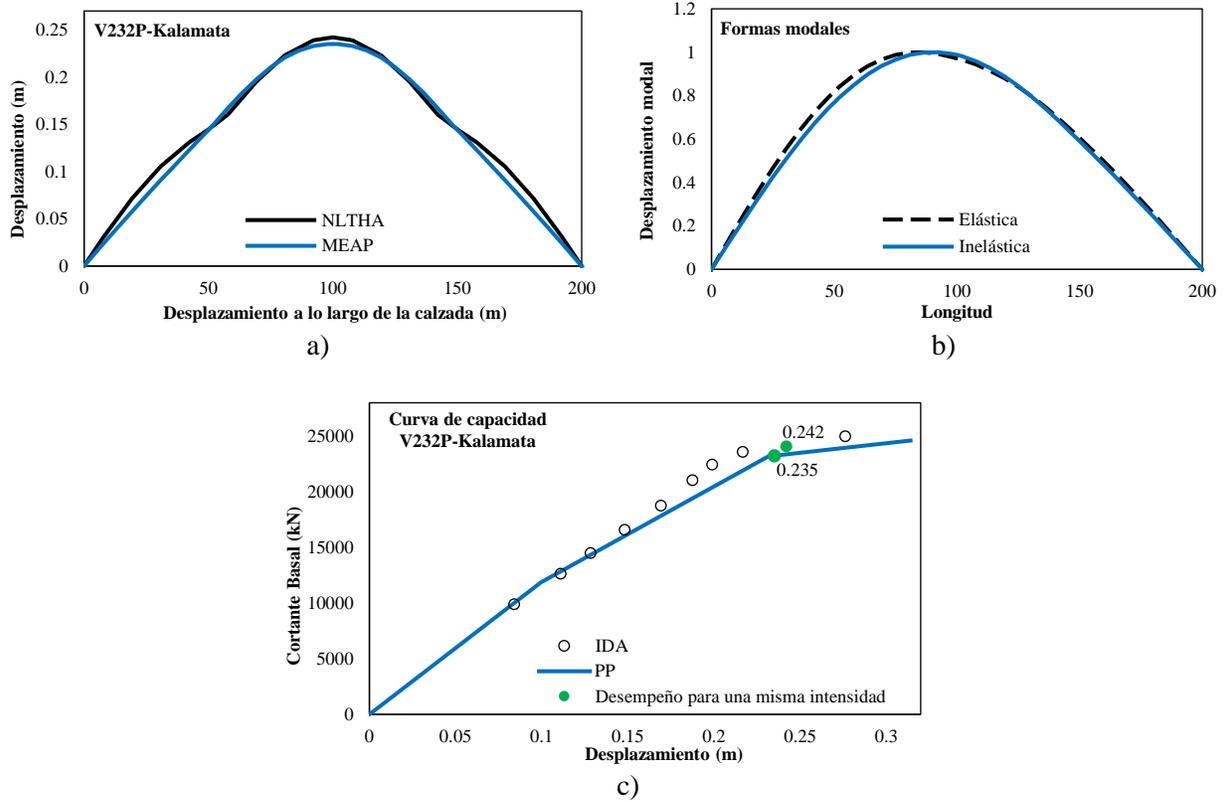


Figura 16. Desempeño del puente V232P considerando el procedimiento propuesto e IDA, a) Perfil de desplazamientos, b) desplazamientos modales, y c) curva de capacidad

En la Figura 17 se muestra las formas modales del ER12, para el modelo elástico e inelástico, como se puede apreciar no existe una diferencia significativa entre ambas. En la Figura 18 se muestra una comparativa del desempeño sísmico caracterizado por la curva de capacidad (DCC) obtenido con el PP y el IDA para las fracciones de intensidad del registro consideradas: $i=0.41, .71$ y 0.82 ; en donde se puede observar una congruencia en la forma de las curvas y en los desempeños para las diferentes intensidades consideradas. En la Figura 19 se muestra una comparativa de los perfiles de desplazamientos y derivas de entrepiso relativos para el PP (línea continua) y el IDA (línea punteada), se observa que hay una congruencia en el desempeño sísmico, en ambos perfiles. De la comparativa de las curvas de capacidad, perfiles de desplazamientos y derivas de entrepiso se observa que las diferencias entre ambos procedimientos no exceden el 15% (Figura 20), esto se debe principalmente a que el procedimiento considera la disipación de energía por histéresis. En la Tabla 3 se muestran los periodos de los osciladores de un grado de libertad con los cuales se ejecuta la corrección del procedimiento propuesto (ver paso 7).

Tabla 3. Periodos de los osciladores de un grado de libertad para modelo ER12

Intensidad	0.35	0.37	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46
Periodo (s)	1.65	1.75	1.85	1.91	2.03	2.10	2.14	2.25	2.30

En la Figura 21 se muestra una comparativa de la evolución del daño considerando el procedimiento propuesto y el análisis dinámico incremental en ella que se observa que existe una congruencia para una misma intensidad. Se muestran los estados de daños correspondientes a 4 puntos de desempeño, para una misma intensidad sísmica.

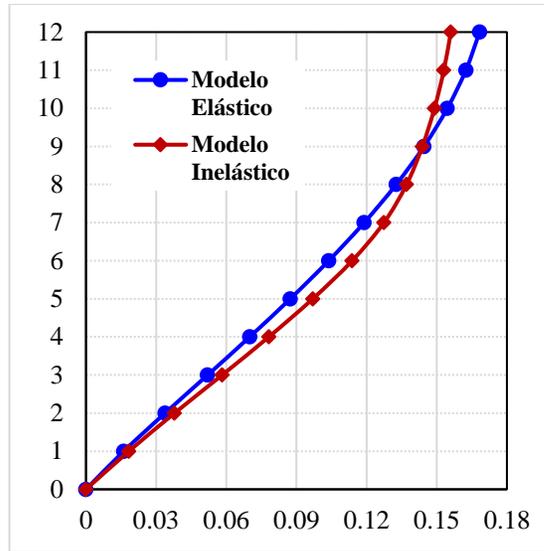


Figura 17. Formas modales del ER12

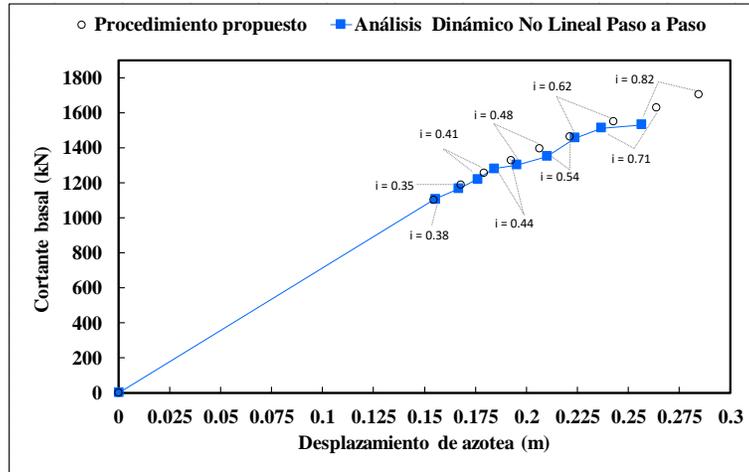


Figura 18. Curva de capacidad dinámica aproximada del marco ER12 considerando la disipación de energía por histéresis, para diferentes intensidades

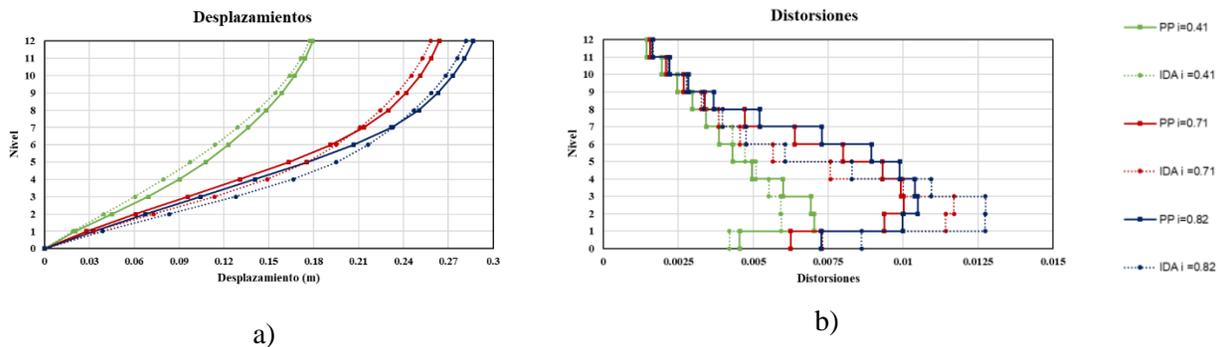


Figura 19. Comparativa de perfiles de: a) desplazamientos y b) derivas de entrepiso para para diferentes intensidades en el marco ER12.

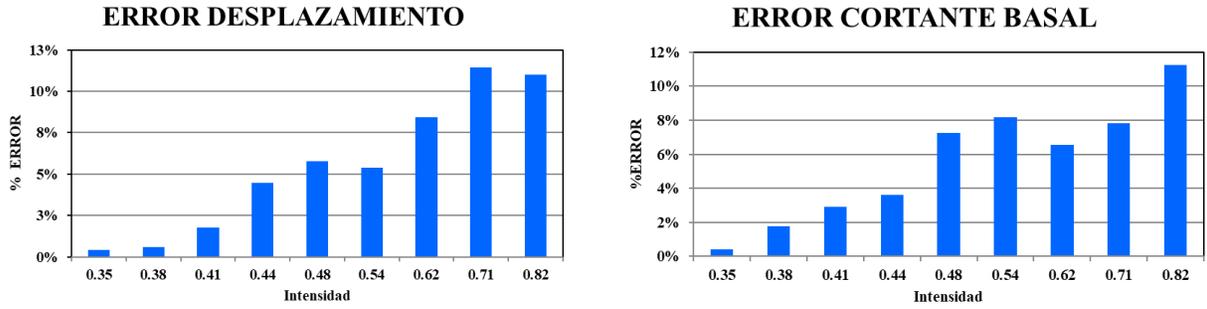


Figura 20. Porcentaje de error entre los resultados del procedimiento aproximado propuesto y el análisis IDA, a) desplazamiento, b) cortante basal.

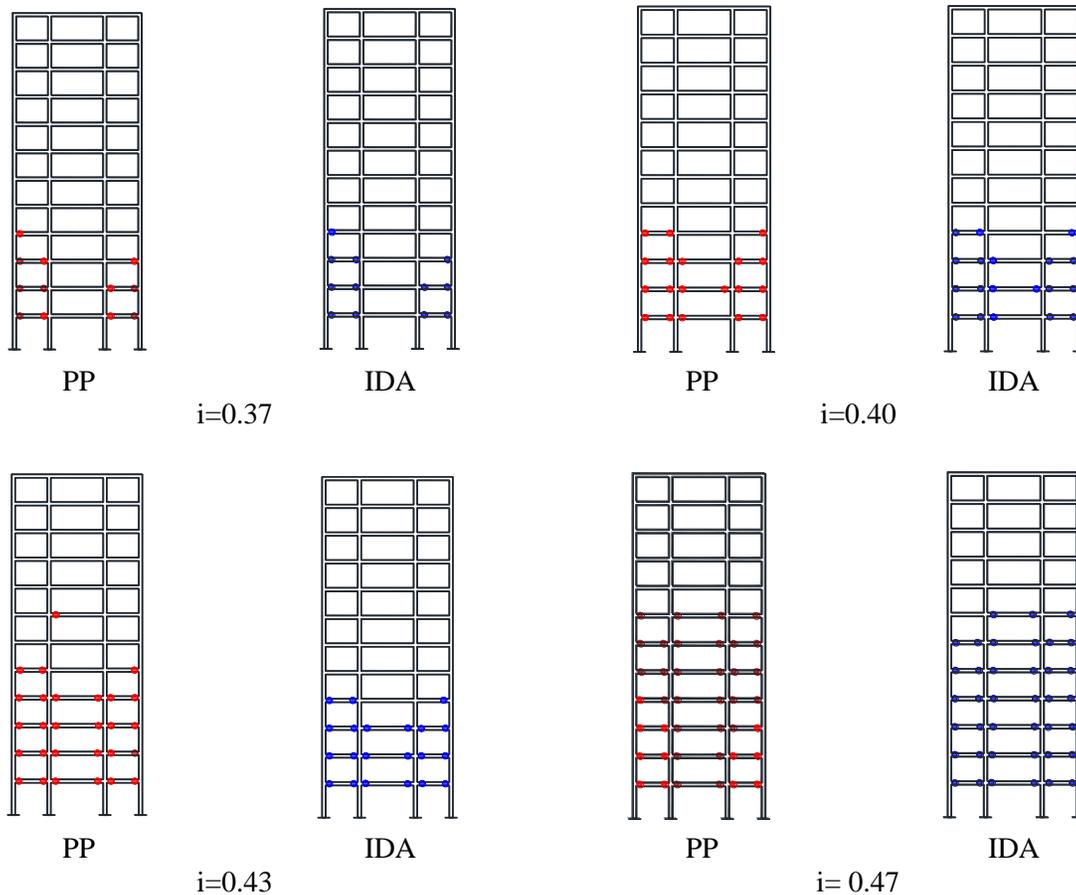


Figura 21. Estados de daño del marco ER12 obtenidos para diferentes intensidades

CONCLUSIONES

En este artículo se propuso y validó un procedimiento simplificado de evaluación sísmica de estructuras que considera la degradación de rigideces y la disipación de energía debida a histéresis ante intensidades sísmicas crecientes como una alternativa viable a los existentes en la literatura. Se demuestra como con este procedimiento es posible aproximar la DCC a partir de análisis modales espectrales incrementales. Este

procedimiento puede ser aplicado a diversos tipos de estructuras reticulares, regulares o irregulares (Escamilla, 2016). Las conclusiones de este artículo son:

1. El uso de procedimientos simplificados de evaluación sísmica de estructuras basados en la curva de capacidad dinámica obtenida ya sea mediante la imposición desplazamientos laterales incrementales o mediante análisis modales espectrales evolutivos, como el propuesto en este artículo ofrecen, al tenerse una mejor aproximación de la curva de capacidad dinámica, desempeños que aproximan a los que se obtendrían con procedimientos de evaluación sísmica considerados como “exactos” pero que, sin embargo, son de alta complejidad, ya que se tienen que existe la dificultad de definir parámetros histerético, así como la interpretación de resultados.
2. Se demuestra que la correcta aplicación de los procedimientos aproximados es una herramienta de gran utilidad a los ingenieros involucrados en la evaluación sísmica de estructuras a construirse o existentes, ya que estos procedimientos simplificados solo requieren para su aplicación el uso de programas comerciales de análisis sísmico lineal, con conocimientos básicos de dinámica y análisis estructural. Los cuales pueden ofrecer resultados congruentes con los que se obtendrían de la aplicación de procedimientos más complejos.
3. El procedimiento propuesto es una alternativa eficaz para determinar el desempeño sísmico de estructuras nuevas y existentes. Ofrece parámetros que los procedimientos convencionales, basados en fuerzas, plasmados en los códigos de diseño vigentes no pueden estimar. El procedimiento simplificado de evaluación sísmica de estructuras propuesto en este artículo ofrece resultados cercanos a los obtenidos mediante la aplicación de procedimientos conceptualmente más robustos como el procedimiento IDA con un esfuerzo humano y computacional mucho más bajo. Además, de tener como ventaja la aplicación como demanda sísmica un espectro de diseño suavizado; como el que recomiendan la mayoría de los códigos de diseño vigentes, eliminado así la incertidumbre del usar en este proceso grupos de registros sísmicos consistentes con las demandas de diseño reglamentarias, algo que agrega complejidad a su aplicación por los analistas. Sin embargo, para considerar una validación más general se requiere analizar más ejemplos de aplicación con diferentes propiedades geométricas, mecánicas, y distintas demandas sísmicas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Ingeniería, UNAM, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo recibido y los patrocinios otorgados a los autores de este trabajo.

REFERENCIAS

- Alba F., Bento R. y Ayala A. G. (2005). Seismic performance evaluation of plane frames vertically regular and irregular. Proceedings of the Fourth European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures. EAEE, Salónica, Grecia.
- Antoniou S. y Pinho R. (2004b). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. Journal of Earthquake Engineering 8:5, 643-661. DOI:[10.1080/13632460409350504](https://doi.org/10.1080/13632460409350504)

- Antoniou S. y Pinho R. (2004a). Advantages and limitations of adaptative and non adaptative force based pushover procedures. *Journal of Earthquake Engineering* **8:4**, pp 497-522. DOI:[10.1080/13632460409350498](https://doi.org/10.1080/13632460409350498)
- Bañuelos-García F. (2013). “La curva de capacidad dinámica y su aplicación a la evaluación sísmica de estructuras”, *Tesis de Maestría*, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- ATC (1996). Seismic and evaluation of retrofit of concrete buildings. Technical report, ATC-40. Applied Technology Council. Redwood City, CA.
- Aydinoglu, M. (2003). An incremental response spectrum analysis based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering* **1:1**, 3-36. DOI:[10.1023/A:1024853326383](https://doi.org/10.1023/A:1024853326383)
- CEN, Eurocode 8 (1994). Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges. Committee European of Normalisation, European Pre-standard. ENV1998-2.
- CSI, (2007). Perform 3D V5. Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures. Computer and Structures, Inc. Berkeley, CA.
- CSI, (2009). SAP2000: Three dimensional static and dynamic finite element analysis and design of structures. Computers and Structures Inc.: Berkeley, CA.
- Chopra A.K. y Goel R.K. (2001). A Modal pushover analysis Procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 31, No 3, pp. 561-582. DOI:[10.1002/eqe.144](https://doi.org/10.1002/eqe.144)
- Escamilla M. (2016). “Influencia de la evolución de las formas modales en el desempeño sísmico de estructuras irregulares, utilizando métodos aproximados de evaluación y diseño sísmico”, *Tesis de Doctorado*, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Escamilla M.A, Reyna S.R y Ayala G.A (2022). Análisis Sísmico No-lineal de Edificios de Concreto Reforzado, Memorias del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Juriquilla, Querétaro, México.
- Fajfar, P. y Gaspersic, P. (1996), The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25(1)**, 31-46. DOI:[10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199601\)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V)
- FEMA (2005). FEMA 440 - Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Fragiadakis M. y Vamvatsikos D. (2011). Qualitative comparison of static pushover versus incremental dynamic analysis capacity curves, *Proceedings of the 7th Hellenic National Conference on Steel Structures*, Volos, Grecia.
- Freeman, S.A. (1978). Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motions. American Concrete Institute, Special Publication SP-55, 589-606. DOI:[10.14359/6629](https://doi.org/10.14359/6629)
- GCDMX (2017), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado, NTC-EC, Gaceta del Gobierno de la CDMX, México.

- GCDMX (2017), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, NTC-DS, Gaceta del Gobierno de la CDMX, México.
- INN (2009), NCh 433 Diseño Sísmico de edificios”. Instituto Nacional de Normalización, Chile
- Mendoza, M. y Ayala A.G. (2013). Procedimiento de Evaluación de Edificios de Concreto Reforzado Basado en Desempeño: Desarrollo y Validación. Revista de Ingeniería Sísmica, No. 88 23-41. DOI:[10.18867/ris.88.8](https://doi.org/10.18867/ris.88.8)
- Requena, M. y Ayala A.G. (2000). Evaluation of a simplified method for determination of the nonlinear seismic response of RC frames. Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering. Paper No 2109.
- SENCICO (2013). Norma Técnica de Edificaciones NTE-E.030 Diseño Sismo resistente. Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción. Lima, Perú.
- Vamvatsikos, D. y Cornell, C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 31:3, 491-514. DOI:[10.1002/eqe.141](https://doi.org/10.1002/eqe.141)