

COMPARATIVO DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO CFE 2015 Y NTC 2020

COMPARISON OF THE PARAMETRIC MODELS OF SEISMIC DESIGN SPECTRA CFE 2015 AND NTC 2020

Juan Alberto Sánchez Hernández ¹

Miembro de la Comisión de Estructuras del Colegio de Ingenieros Civiles de Chiapas A.C. (CICCH).
proyest.ingenieria@gmail.com

RESUMEN

México, un país con alta sismicidad requiere desarrollar normativas municipales que tomen lo mejor de las ya desarrolladas a fin de que reflejen las condiciones de sitio y permitan asegurar estructuralmente la infraestructura que en estas localidades se desarrollan. Lo anterior nos lleva a analizar las normas y manuales emitidos por los dos principales referentes a nivel nacional en materia sísmica, y particularmente en el desarrollo de espectros de diseño sísmico, es decir el Instituto de Investigaciones Eléctricas y Energías Limpias (INEEL) representada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Gobierno de la Ciudad de México a través de sus Normas Técnicas complementarias aplicables únicamente a la Ciudad de México.

Como resultado del análisis comparativo realizado sobre puntos ubicados en la Ciudad de México se determinó que ambas metodologías presentan consideraciones a favor y en contra, siendo de ellas la de CFE la más conservadora.

Palabras clave: Espectros Sísmicos, amortiguamiento, redundancia, ductilidad, sobre resistencia.

ABSTRACT

Mexico, a country with high seismicity, needs to develop municipal regulations that take the best of those already developed in order to reflect the site conditions and allow structurally assuring the infrastructure that is being developed in these localities. The foregoing leads us to analyze the standards and manuals issued by the two main references at the national level in seismic matters, and particularly in the development of seismic design spectra, that is, the Institute for Electrical and Clean Energy Research (INEEL) represented by the Federal Electricity Commission (CFE) and the Government of Mexico City through their complementary Technical Standards applicable only to Mexico City.

As a result of the comparative analysis carried out on points located in Mexico City, it was determined that both methodologies present considerations in favor and against, of which the CFE is the most conservative.

Keywords: Seismic spectra, damping, redundancy, ductility, over resistance.

INTRODUCCIÓN

A raíz de los sismos de septiembre del 2017, ocurridos en las costas de Chiapas y alrededores de Puebla, el interés por el estudio de los espectros sísmicos y su determinación ha tomado nueva relevancia.

En el 2015, la CFE a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas y Energías Limpias (INEEL) emitió la actualización a su Manual de Obras Civiles, Capítulo de Diseño

Sísmico (CFE, 2015) el cual tiene aplicación para todas aquellas obras de infraestructura eléctrica en el país, siendo este hecho el que ha permitido que el mismo manual sirva de referencia para algunos códigos y reglamentos de construcción a nivel municipal en México. Inclusive las Normas Técnicas Complementarias (NTC) de Ciudad de México (CDMX) en el apartado de Análisis Sísmico menciona a manera de comentario la aplicación del manual de CFE en su capítulo de sismos, para las estructuras industriales.

Uno de los grandes aportes del Manual de CFE desde el 2008 (CFE, 2008), fue sin duda la inclusión del programa PRODISIS (INEEL-CFE, 2015) que considera el peligro sísmico para generar espectros de respuesta en roca, es decir las probabilidades de que determinadas aceleraciones fueran excedidas por los eventos sísmicos de las regiones sismogénicas para cada punto de la geografía nacional de acuerdo con el grado de influencia gobernada por la magnitud y distancia del movimiento.

En diciembre del 2017, se publicaron las nuevas normas de CDMX (Gaceta de CDMX, 2017) mismas que entrarían en vigor de forma progresiva en el 2018, estas normas incluían una novedosa forma de elaborar los espectros sísmicos a partir de una zonificación continua del suelo basado en parámetros dinámicos de la metrópoli a diferencia de la anterior edición de la normativa que se refería más a clasificaciones zonificadas por áreas y parámetros basado en capacidades. Dicha norma incluye, al igual que la de CFE, el programa SASID (CDMX-IIUNAM, 2017) que permite evaluar el espectro sísmico para las condiciones de sitio de cada punto ciudadano.

En el 2020 las NTC de CDMX (NTC S, 2020, pág. Cap. 3), incluyeron comentarios y aclaraciones de la propuesta metodológica vertida en la normativa y el SASID también tomó en cuenta los efectos del hundimiento regional para proyectar los espectros transparentes y con estos parámetros que requerían ser actualizados de manera continua también se vino la necesidad de incluir el programa en un servidor de internet que permitiera dichas intervenciones periódicas para ser considerado en los análisis de las edificaciones.

Ambos modelos, de CFE y las NTC de CDMX, fueron elaborados por autoridades en materia sísmica en México, pero debidos a la base conceptual de cada modelo, no es fácil apreciar las similitudes, si las hay, entre los resultados de cada uno y en donde se bifurcan.

El presente trabajo, considerando la Ciudad de México como referencia, realiza un comparativo a nivel pa-

ramétrico tanto de los modelos transparentes, como de los utilizados para considerar los efectos inelásticos en dichos espectros con la intención de poder tener una mejor percepción de los alcances y limitaciones de cada uno que pudieran ser aprovechados en el desarrollo de modelos paramétricos en la provincia que den oportunidad al desarrollo de reglamentos municipales confiables.

COMPARATIVOS DE LOS MODELO PARAMETRICO DE ESPECTROS SISMICOS.

El modelo de (CFE, 2015, pág. Secc. 3.1), considera una curva envolvente en cuatro partes cuyos límites intermedios y parámetros de forma están definidos por periodos característicos asociados al tipo de suelo en el que las estructuras se encuentran desplantadas, esto es muy acorde con las tendencias internacionales (ASCE 7-16, 2016). En tanto que las (NTC S, 2020, pág. Cap. 3) plantean la envolvente en solo tres secciones, las cuales han logrado cubrir la amplia variedad de espectros generados por la densa red acelerográfica distribuida en la ciudad de México.

La meseta espectral de los espectros de (CFE, 2015) está vinculada a la aceleración máxima en roca (aor) obtenida a partir de un estudio de peligro sísmico para distintos periodos de retorno, desarrollada a través de dos factores que modelan el comportamiento del suelo y el de la estructura, dependiendo de su ubicación geográfica y tipo de suelo subyacente, el cual también es modelado de forma paramétrica intentando estimar los periodos del suelo que definen los puntos de inflexión (T_a , T_b y T_c) de la envolvente espectral a través de características basadas en una microzonificación. En el caso de las NTC los parámetros del suelo corresponden a interpolaciones discretas basadas en los puntos cuyos datos han podido extraerse de la nutrida red acelerográfica y los diversos estudios del subsuelo de la ciudad.

Los coeficientes de caída de las curvas (k y r) de (CFE, 2015), tratan de vincularse a parámetros físicos como lo es la relación entre el periodo del suelo y la estructura, así como a la configuración de espectros físicos de referencia, tal como ocurre con el coeficiente k de las NTC2020 aplicado a su última rama.

En cuanto al amortiguamiento, las ecuaciones de las curvas se plantean de manera original considerando el 5%, lo cual es similar al modelo usado por las (NTC S, 2020), no obstante, la formulación de la función de ajuste por amortiguamiento $\beta(T_e, \zeta)$, de (CFE, 2015) es

más sencilla que la planteada por las NTC2020 (Reyes, Miranda, Ordaz, & Meli P, 2002). Esta función es importante para realizar adecuaciones a las curvas espectrales con el fin de considerar el uso de nuevas tecnologías de disipación de energía y materiales de construcción.

En general la configuración de los espectros elásticos transparentes de ambas formulaciones resulta para similares puntos de inflexión y meseta espectral, también similares en sus primeras dos ramas, mostrándose más conservador el modelo de (CFE, 2015) para las ramas posteriores.

En figuras siguientes (Figura 1, 2 y 3) se presenta un comparativo teórico entre ambos modelos, considerando la misma aceleración sísmica en el suelo basal (a_0r) y en la meseta $c=452.50$ cm/s², con T_a , y T_b , determinados de acuerdo con el modelo de suelos del Manual de CFE. En el gráfico, la ordenada espectral representa el porcentaje de la aceleración de gravedad considerada por el espectro. En dicho comparativo se observa la similitud en el trazo de los espectros transparentes generado por ambos modelos a nivel paramétrico.

COMPORTAMIENTO ESPECTRAL INELÁSTICO.

El análisis estructural actual se basa en modelos elásticos en los que introducir adecuaciones que permitan considerar su funcionamiento dentro del rango plástico aun resultan complejo, por esa razón se prefiere afectar los espectros transparentes mediante factores que aluden

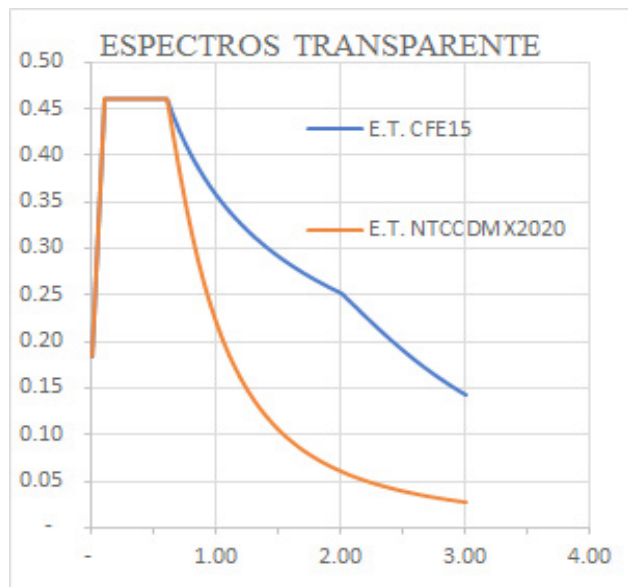


Figura 1. Espectro Transparente modelado sobre Región Sísmica C, suelo tipo I (elaboración propia).

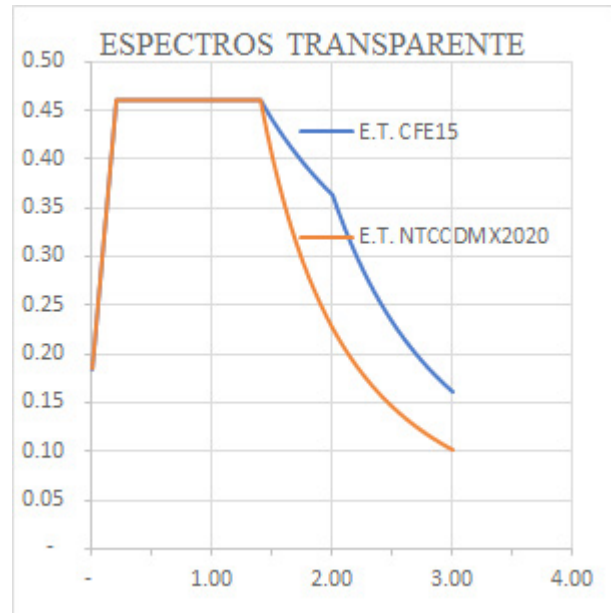


Figura 2. Espectro Transparente modelado sobre Región Sísmica C, suelo tipo II (elaboración propia).

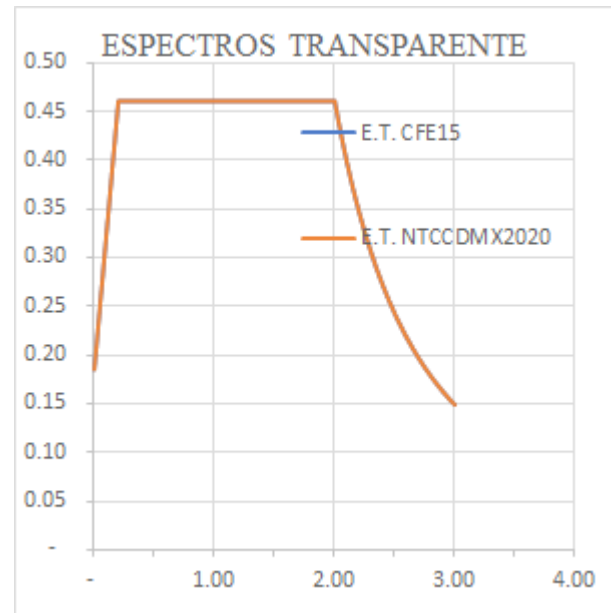


Figura 3. Espectro Transparente modelado sobre Región Sísmica C, suelo tipo III (elaboración propia).

la posibilidad de la estructura de incurrir en este rango para soportar sollicitaciones superiores. De esta manera, cuando la estructura diseñada para un espectro reducido es sometida a las demandas reales del espectro original, la sobre demanda es absorbida a través de la ductilidad, la sobre resistencia y la redundancia estructural implícita en un sistema bien estructurado.

No obstante, el comportamiento de las estructuras dentro del rango inelástico resulta aún complejo de definir y cada grupo de investigadores sugieren alternativas para su consideración basados en las experiencias que resultan de eventos catastróficos que al ser re-evaluados pueden llegar a estimar hasta qué punto de demanda y/o desplazamiento presentaron la falla que los llevó al colapso.

Para poder comparar las formulaciones de (CFE, 2015) y las (NTC S, 2020), se eligió un terreno tipo II, en la zona sísmica C, congruente con los parámetros de (CFE, 2015), a fin tener un punto de similitud en ambos modelos. Así mismo se consideraron como datos de entrada las mismas aceleraciones en roca (a_{0r}) y en la meseta espectral (c), descrito en párrafos anteriores. De esta forma el comportamiento espectral transparente resulta ser el mismo que el reflejado en la figura 2.

Los parámetros base fueron los siguientes:
 $a_{0r} = 181.00 \text{ cm/s}^2$; $c = 452.50 \text{ cm/s}^2$; $T_a = 0.20 \text{ s}$; $T_b = 1.40 \text{ s}$; $T_c = 2.00 \text{ s}$; $k = 1.00$; $r = 2/3$.

En tanto que los coeficientes que modelan el comportamiento inelástico utilizados fueron básicamente los siguientes:

Para CFE2015: $Q = 2.00$; $R_o = 2.00$; $\rho = 1.25$.

Para NTC2020: $Q = 2.00$; $R_o = 2.00$; $k_1 = 0.80$.

Tratando con estos valores representar a la mayor parte de las estructuras en nuestro territorio nacional, conformado principalmente por edificaciones de mampostería.

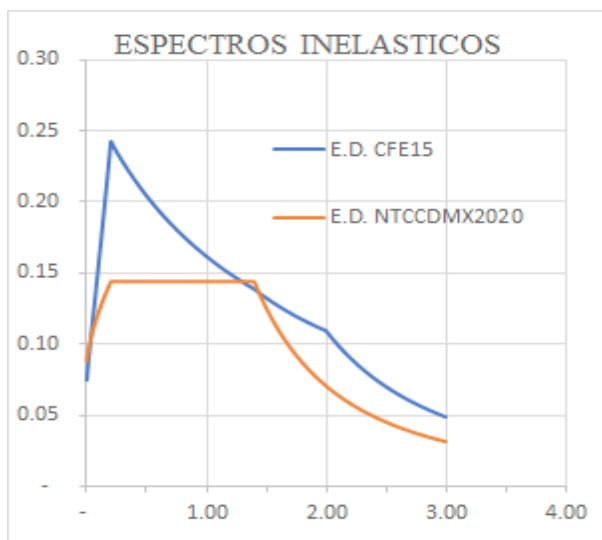


Figura 4. Espectro Inelástico Zona C, Terreno II, con parámetros $Q=2$, $R_o=2$ (elaboración propia).

Como resultado se obtuvieron espectros inelásticos donde podemos observar que el modelo de (CFE, 2015) continúa siendo más conservador que el correspondiente a las NTC2020, inclusive en toda su extensión.

EFICIENCIA DE LA MICROZONIFICACIÓN DE SUELOS CFE2015 PARA CDMX.

Evidentemente las (NTC S, 2020) y el SASID poseen valores que definen los límites de los segmentos de la curva espectral envolvente de una manera más precisa que los de la microzonificación generalizada de (CFE, 2015), pero en vista de su conservador planteamiento, ¿qué tan eficiente resulta para cubrir los parámetros reales de los suelos de CDMX? Ese cuestionamiento llevó a comparar algunos puntos dentro de la geografía de CDMX con la finalidad de obtener los parámetros y conciliar los mismos con los resultados del SASID con los del PRODISIS para las mismas ubicaciones.

Las coordenadas analizadas fueron:

- 1.- latitud 19.32, longitud -99.18
- 2.- latitud 19.42, longitud -99.15

En estos puntos las aceleraciones en roca y de la meseta, así como los parámetros límite de las envolventes (T_a , T_b , T_c , k y r) fueron obtenidos según las metodologías propias del Manual de CFE y las NTC de CDMX, respectivamente para cada formulación, en su defecto de acuerdo con los programas PRODISIS y SASID.

Aparentemente los resultados en esta primera ubicación (Figura 5) con microzonificación estimada como tipo II, para el PRODISIS y el suelo particular de CDMX establecido en el SASID, muestran que los espectros transparentes y el inelástico resultaron similares en cuanto a los límites espectrales, no obstante, es conveniente notar que las aceleraciones de roca y suelo que definen las mesetas resultan muy diferentes. Nótese también, en línea punteada en rojo, la disposición de periodo natural del terreno en el sitio (T_s), obtenido del SASID.

En la segunda ubicación para el modelo (CFE, 2015), se eligió un terreno tipo III, en la misma región sísmica C, dentro de la geografía de CDMX, con los siguientes resultados:

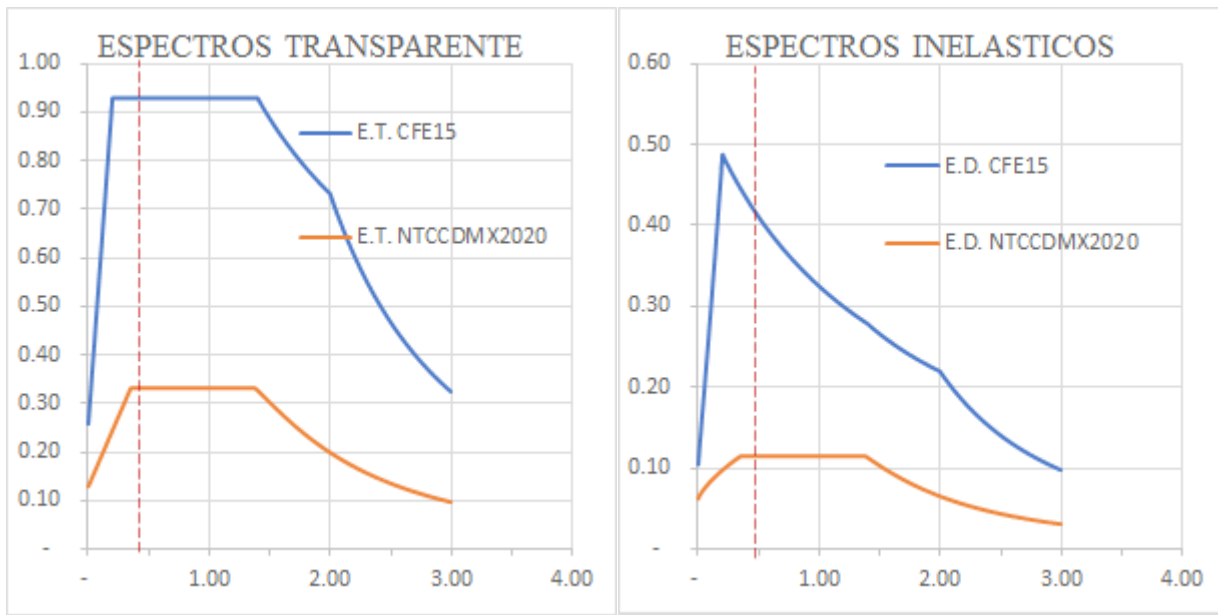


Figura 5. Comparativa de espectros transparentes y reducidos bajo condiciones de sitio, ubicación 1 (elaboración propia).

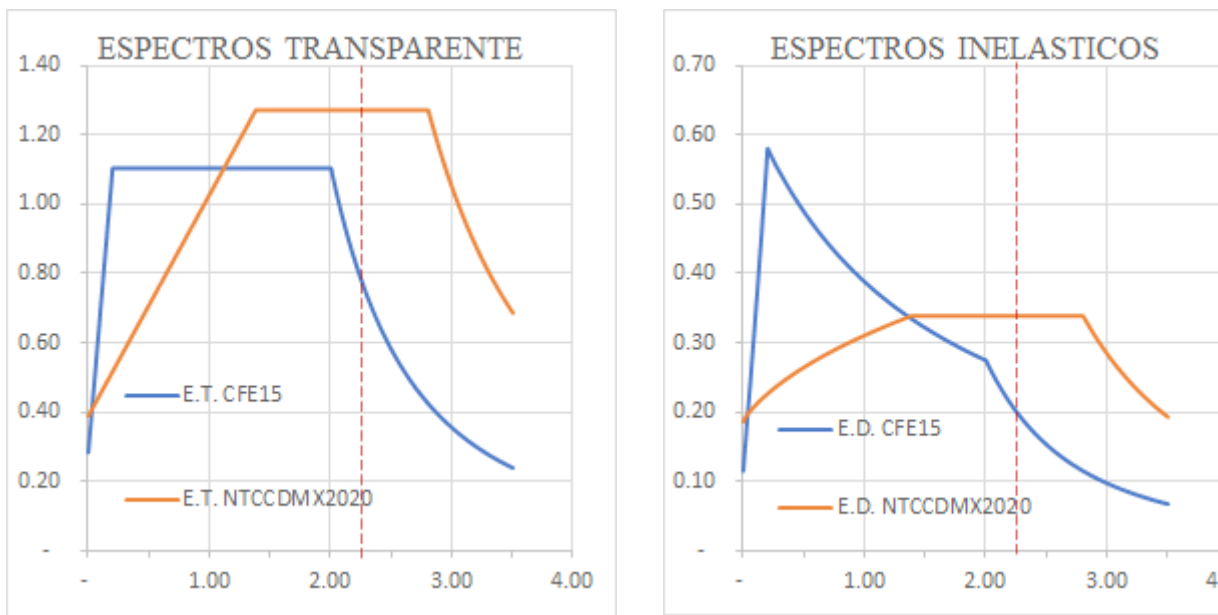


Figura 6. Comparativa de espectros transparentes y reducidos bajo condiciones de sitio, Ubicación 2 (elaboración propia).

Podemos apreciar que, en la zona del lago, la parametrización de la microzonificación de (CFE, 2015) pudiera no estar reflejando una configuración espectral segura, ya que las mesetas de los valores reales se encuentran desfasados y no cubren el periodo del suelo, esto lo notamos porque en las gráficas adicionalmente se indicó el periodo fundamental del suelo mediante una línea punteada.

Los modelos del SASID si se apegan a las configuraciones sísmicas representativas de cada zona dentro del territorio de CDMX.

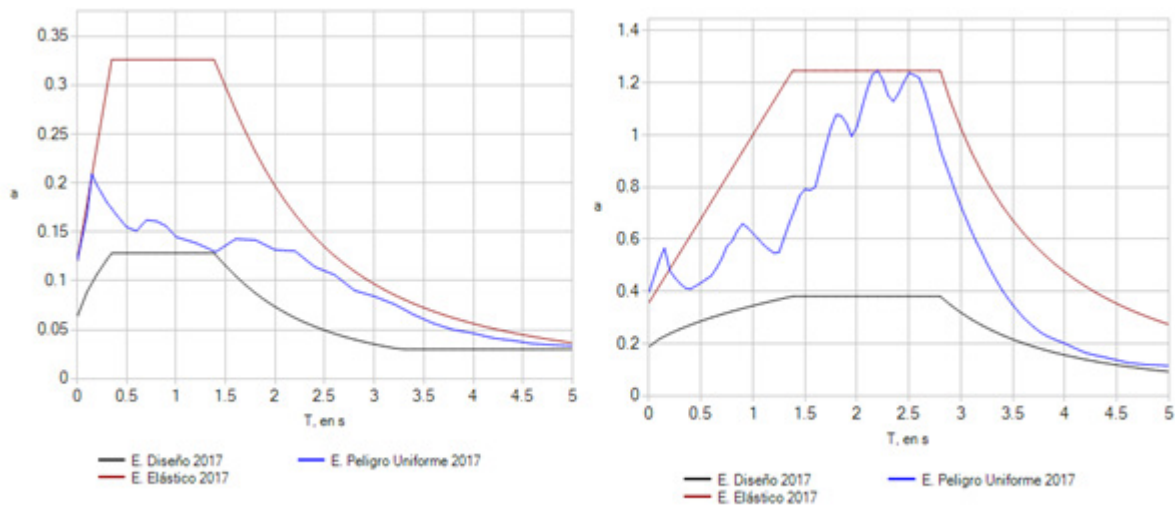


Figura 7. Espectros transparentes y de sitio generados directamente por el programa SASID Ubicación 1 y 2.

CONCLUSIÓN

De este análisis podemos concluir que el modelo (CFE, 2015) y por tanto del programa PRODISIS resultan en espectros sísmicos más conservadores que el modelo propuesto por las (NTC S, 2020) y el SASID, tanto a nivel transparente como inelástico, para su uso genérico. Con excepción de las particularidades del suelo de CDMX, en las que los espectros transparentes generados por el SASID son más acordes con los espectros históricos.

Sin embargo, la diferencia entre ambos criterios, salvando lo referente a número de segmentos del espectro y el amortiguamiento, se encontró en el modelado de la ductilidad y el de la sobrerresistencia, que son la base de los espectros inelásticos. Y estas diferencias posiblemente se deben a la influencia del particular suelo de la CDMX, que afecta los desplazamientos y el periodo estructural y que podrían estar influenciados por los resultados obtenidos en diversos estudios analíticos realizados en osciladores elasto-plásticos con base rígida y flexible (Huerta Ecatl, 2015, pág. 31) en las que se subestima la demanda, no obstante el modelo de interacción suelo estructura (ISE) planteado Pérez Rocha y Avilés en (2003) y (2007) y que ha sido tomado en cuenta por el Manual de CFE (CFE, 2015) es el que mejor interpreta las observaciones realizadas por Miranda y Bertero (1994) en cuanto al comportamiento de las frecuencias estruc-

turales con ISE. Por lo que, para el resto de la república se antoja mayor idoneidad al modelo paramétrico de ductilidad y sobrerresistencia propuesto por (CFE, 2015) para su adopción generalizada, tal como lo mencionan, de acuerdo con su estudio, Romero Maldonado, Tena Colunga, y Nangullasmú Hernández (2017, pág. 15).

También se detecta un área de oportunidad en el pico del espectro inelástico de (CFE, 2015), a fin de direccionarlo al centro del rango de la meseta, debido que es la zona en que resulta más probable que se encuentre el período del suelo y por tanto la posibilidad de frecuencias en resonancia que demanden mayor capacidad, para lo cual podría resultar útil el enfoque originalmente planteado en el Manual de Obras Civiles (CFE, 2008).

Una de las ventajas más significativas del SASID, resulta ser el hecho de estar referido a parámetros específicos de sitio y el PRODISIS en cambio en una microzonificación arbitraria propuesta de manera genérica a fin de poder cubrir la mayor parte de los suelos en toda la República Mexicana.

Desde esta perspectiva, la adopción de una propuesta de tres segmentos, como los espectros de las NTC, con parámetros de comportamiento inelástico conservadores, como los de CFE, resulta mayormente atractiva para provincia debido al tamaño y rigidez de sus edificaciones, máxime si se puede contar con parámetros de sitio.

TRABAJOS CITADOS

- ASCE 7-16. (2016). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston, Virginia, US: American Society of Civil Engineers. doi:978-0-7844-1424-8
- CDMX-IIUNAM. (2017). SASID 4.0.2.0. Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID).
- CFE. (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo. México: IIE.
- CFE. (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo. México: INEEL.
- Gaceta de CDMX. (15 de Dic de 2017). Gaceta de CDMX 2017. Acuerdo por el que se modifican las Normas Técnicas Complementarias.
- Huerta Ecatl, J. E. (2015). Tesis: Evaluación de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura en el Comportamiento Inelástico de un Edificio de Concreto Reforzado. México: Universidad Autónoma Metropolitana (Azcapotzalco).
- INEEL-CFE. (2015). PRODISIS 4.1. Programa de Diseño Sísmico. México.
- Miranda, E., & Bertero, V. (1994). Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 10, 357-379.
- NTC S. (9 de Jun de 2020). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismos con comentarios.
- Pérez Rocha, L., & Aviles, J. (2003). Evaluación de efectos de interacción en resistencias inelásticas. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.69, 45-71.
- Pérez Rocha, L., & Avilés, J. (2007). Análisis de Daño en Estructuras con Apoyo Flexible. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.77, 89-111.
- Reyes, C., Miranda, E., Ordaz, M., & Meli P., R. (2002). Estimación de Espectros de Aceleraciones Correspondientes a Diferentes Períodos de Retorno para las Distintas Zonas Sísmicas de la Ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.66, 95-121.
- Romero Maldonado, T., Tena Colunga, A., & Nangullasmú Hernández, H. d. (2017). Determinación de Factores Globales de Diseño Sísmico para Marcos Dúctiles con Columnas SRC. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Guadalajara, Jalisco: SMIS.