



Comparativa de desempeño estructural de edificios con Interacción Suelo-Estructura

Horacio Nangullasmú, Lucero Rivas y Cristian Londoño

B. Midasoft S.A.S., México, Ciudad de México
hnangullasmu@midasoft.com, lcruz@midasoft.com, clondono@midasoft.com

Resumen: En el presente trabajo de investigación se presentan algunos resultados obtenidos a partir de análisis modales espectrales donde se compara la importancia del uso de los efectos de interacción suelo estructura y el cambio de las propiedades dinámicas de una edificación con elementos de acero de 83 metros de altura. Para el sistema de cimentación de la estructura, se hacen variaciones entre tomar en cuenta su base como rígida, considerar la rigidez del suelo circundante de los cajones de cimentación y finalmente la contribución del sistema integral de la superestructura y de la subestructura compuesto por cuatro niveles de sótanos y pilas de cimentación desplantadas sobre terreno rocoso.

Palabras clave: ingeniería estructural, suelos arcillosos, Interacción Suelo-Estructura, análisis modal espectral, edificios, efectos de sitio

1. INTRODUCCIÓN

Debido a las condiciones de sitio peculiares que se presentan en ciertos lugares como Ciudad de México (gran capacidad de deformación de sus capas de arcilla), se deben considerar los efectos de interacción suelo-estructura. Éste consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos entre la estructura y el suelo como resultado de su capacidad de deformación ante una excitación sísmica.

La Interacción Suelo-Estructura (ISE) modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en las cercanías del sistema de cimentación (Avilés y Perez-Rocha 2004). Dicho efecto es de suma importancia para estructuras flexibles desplantadas en suelos con periodos de sitio predominantemente largos.

El uso del efecto de la ISE se ve reflejado en el incremento del periodo y el amortiguamiento asociado, dependiendo del periodo resonante de la estructura en el espectro de respuesta (Avilés y Perez-Rocha 1998). Por otra parte, los desplazamientos y demandas de resistencia incrementan o reducen dependiendo principalmente de la relación de periodos entre la estructura y el sitio; sin embargo, estos efectos disminuyen conforme la capacidad de deformación del sistema estructural es mayor (Avilés y Perez-Rocha 2005).

Para tomar en cuenta los efectos de la ISE hay tres conceptos primordiales que son necesarios conocer y que se ilustran con la figura 1:

- Efecto de Sitio:** Es la respuesta que se presenta en un lugar ante un evento sísmico, influenciado por las condiciones geológicas, topográficas locales y en gran medida por las propiedades mecánicas del subsuelo. Es decir, dado que el suelo que descansa sobre el terreno firme (punto A) tendrá propiedades distintas, significa que el movimiento entre los puntos A, B y C serán diferentes, incluso en ausencia de la cimentación.
- Interacción Cinemática:** Es la modificación del movimiento de campo libre, debido a la presencia de la cimentación. Es decir, toma en cuenta que la cimentación, que es un elemento de mayor rigidez que el suelo, introduce una excitación rotacional en la base de la cimentación (punto D), ya que los puntos C y B no pueden moverse independientemente entre ellos. Es decir, se generan movimientos traslacionales y desplazamientos debido a giros en el sistema suelo-cimentación. Estos dos movimientos corresponden a un movimiento de cuerpo rígido de la superestructura respecto al terreno.
- Interacción Inercial:** Es el desplazamiento relativo de la cimentación respecto al terreno, producido por las fuerzas de inercia de la superestructura sobre el sistema suelo-cimentación. La interacción inercial puede incrementar o reducir las fuerzas de diseño con respecto a los valores que corresponden a base rígida, dependiendo del periodo y amortiguamiento efectivos del sistema y de la forma del espectro de diseño.

La ISE es de suma importancia para estructuras desplantadas en suelos con gran capacidad de deformación debido a que modifica las propiedades dinámicas de la estructura. Por tal motivo, se debe realizar un modelado riguroso que de alguna manera permita compatibilizar los análisis estructurales y geotécnicos. Del *software* disponible en el mercado, pocos logran el nivel de intercambio de datos y facilidad requeridos para las distintas revisiones del proyecto con las consideraciones de modelado directo del suelo. Por ejemplo, en midas Gen (programa de análisis estructural), el suelo se modela como un conjunto de resortes que contemple la rigidez y el amortiguamiento del suelo (método indirecto); mientras que con midas GTS NX (programa de análisis geotécnico) el suelo se modela como un medio continuo con elementos sólidos y modelos constitutivos no lineales (método directo).

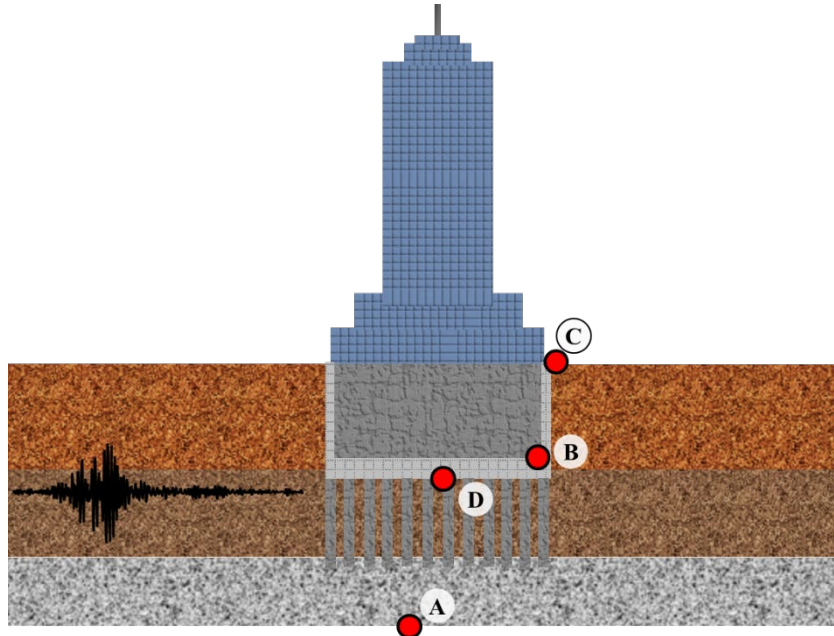


Figura 1. Efectos de la interacción suelo-estructura

2. Descripción del ejemplo

El ejemplo desarrollado en este estudio consiste en un edificio con pórtico resistente a momento con riostras en las dos direcciones principales. En la superestructura, el edificio tiene 20 niveles sobre la cota del terreno para un total de 83 metros de altura. Tres de estos niveles en la parte inferior corresponden a una plataforma con dimensiones superiores, similar a las edificaciones actuales con niveles dedicados al parqueo en los primeros pisos. En la subestructura (o infraestructura), el sistema está compuesto por cuatro niveles de sótanos y pilas de cimentación desplantadas sobre terreno rocoso. La visualización del modelo se aprecia en la figura 2.

La geometría en planta de la edificación, especialmente en los niveles de plataforma, obliga a un comportamiento irregular, además de una distribución asimétrica de las riostras. Estas características, sumadas a la altura del edificio, contribuyen a obtener un comportamiento dinámico muy diferente en todas las direcciones y además flexible, con lo que se hace más evidente la influencia de la rigidez del suelo de cimentación en la estructura.

Para la modelación numérica, se emplearon los programas de análisis estructural y geotécnico referenciados previamente.

3. Modelado de la estructura

El modelo para el análisis estructural debe incluir nodos, elementos y condiciones de apoyo. Los elementos finitos se utilizan para representar miembros de la estructura para el análisis numérico, y los nodos definen las ubicaciones de dichos miembros. Las condiciones de apoyo representan el estado de las conexiones estructurales y la unión entre la estructura y la cimentación (figura 2). El modelo de análisis para una estructura de un edificio se puede simplificar significativamente si se pueden suponer acciones de diafragma rígido para análisis de fuerza lateral. En tal caso, el sistema de piso se puede excluir del modelo implementando las condiciones de borde equivalentes, con lo que hay un ahorro computacional con los elementos finitos que en la práctica común se suelen emplear para estos fines. Si se desea importar el edificio de midas Gen a GTS NX se sugiere ampliamente no tomar en cuenta los diafragmas rígidos y considerar el sistema de piso con elementos “plate”.

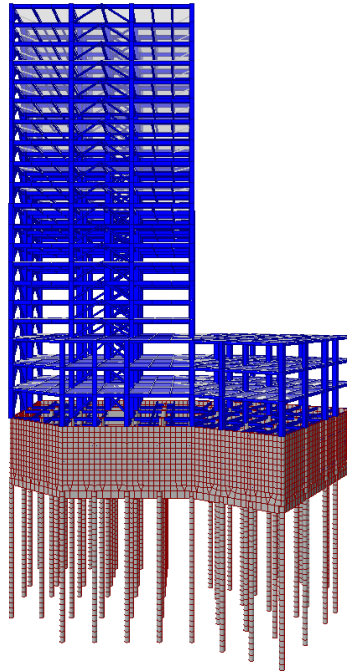


Figura 2. Modelo de un edificio con el sistema de cimentación en midas Gen

Es importante indicar que la aplicación de carga vertical en midas Gen se pueden hacer de dos maneras distintas. La primera, es directamente con una carga de presión (*Pressure Loads*) el cual tiene que ir ligado a una condición de mallado del sistema de piso para una adecuada distribución de la carga hacia los elementos de las vigas. La segunda, es directamente como una carga sobre las vigas con la función “*Assign Floor Load*”. Ésta última es la más común y si el modelo se usará para exportarlo a midas GTS NX se sugiere ampliamente mantener activa la opción “*Convert to Beam Load Type*”, para una adecuada evaluación no solo de los elementos que componen la cimentación sino también para los diversos miembros de la superestructura. Dichas cargas verticales se transforman a masa para ejecutar análisis modales donde se obtendrán periodos, formas modales, desplazamientos, etcétera, del sistema estructural y poder compararlos entre los dos programas como primera instancia antes de la aplicación de las cargas sísmicas.

El modelo numérico de midas Gen para exportar a GTS NX tiene que contener todos los parámetros necesarios para el análisis estructural con excepción de las condiciones de apoyo y de las cargas sísmicas. No se sugiere que se exporten las condiciones de apoyo debido a que se utilizará la metodología directa donde el suelo se simulará como elementos sólidos con modelos constitutivos que contengan las propiedades mecánicas del suelo.

4. Consideraciones del suelo

a. Método directo

Para la creación de los estratos del suelo en GTS NX, se usan los elementos continuos a partir de elementos sólidos para análisis tridimensionales, y elementos de deformación plana para análisis en 2D. Los elementos sólidos se utilizan frecuentemente para modelar también elementos estructurales con volumen predefinido, como paredes gruesas (figura 3). Los elementos sólidos disponibles en GTS NX son formas tetraédricas, pentaédricas y hexaédricas con 4, 5, 6, 8, 10, 13, 15 ó 20 nodos. Los elementos pentaédricos incluyen formas de cuña y formas piramidales. En estos modelos geotécnicos es importante asegurarse desde el estado geométrico de los estratos la adecuada conexión entre elementos sólidos, planos, lineales y nodales. Es usual en estos ejercicios que se deba realizar una intersección entre sólidos en casos de que dos sólidos estén en contacto entre sí, o que un sólido esté dentro de otro (incrustado) o parcialmente incluido (figura 3a).

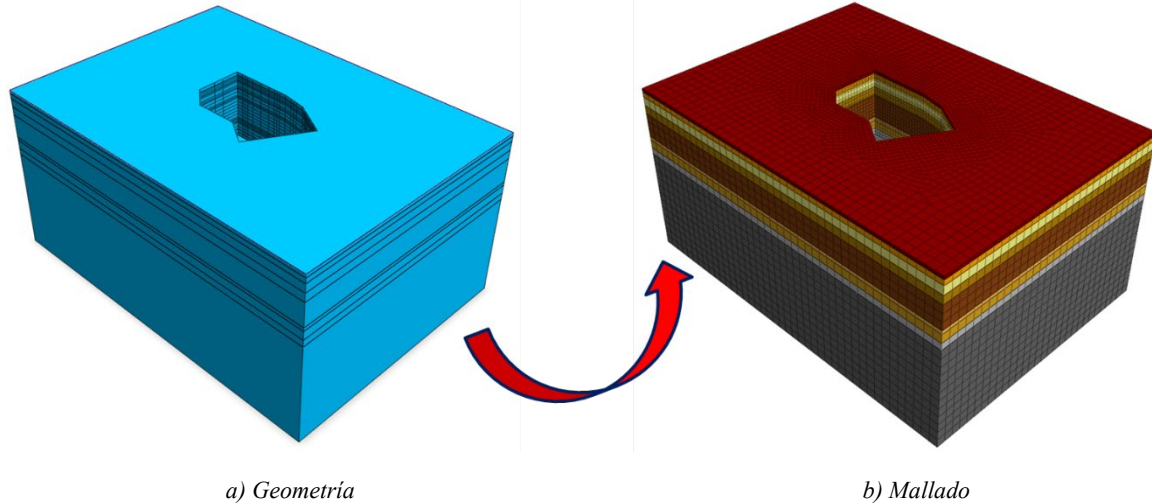


Figura 3. Elementos sólidos para simular estratos del suelo

Midas GTS NX incluye varios modelos constitutivos de material plástico para simular propiedades mecánicas estructurales y del terreno. No obstante, el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb se utiliza para simular la mayoría de los suelos y muestra resultados confiables para el análisis no lineal del terreno. El programa midas GTS NX puede simular cambios en el módulo de elasticidad y de cohesión conforme varía la profundidad del estrato. Si la variación de la cohesión con respecto a altura es cero, se utiliza un valor constante. Los análisis modales requieren una condición de frontera elástica que utiliza el módulo de elasticidad para calcular el coeficiente de reacción del suelo y un coeficiente *alfa* que depende del tipo de ensayo con el que se ha determinado el módulo de elasticidad del suelo que puede ser prueba de placa, triaxial o estimación por SPT. Esta condición se refleja a partir de los resortes de superficie del terreno, los elementos de contorno elásticos o viscosos necesarios para el análisis dinámico. La selección de una malla crea automáticamente condiciones de contorno a la izquierda, derecha y en la parte inferior de la malla seleccionada y la constante del resorte se calcula automáticamente a partir del material y de las características asignadas al elemento. Para el análisis dinámico, a la parte inferior del modelo a menudo se le asigna una condición fija (restricción de desplazamiento) para simular las condiciones de contacto con el lecho rocoso.

b. Método indirecto

En el programa midas Gen se utilizan funciones de “*Point Spring Support*”, “*Surface Spring Support*” y de “*Pile Spring Supports*” para tomar en cuenta elementos de frontera elásticos que se utilizan para definir la rigidez de las cimentaciones contiguas o suelos circundantes. Los apoyos con resortes se aplican fácilmente para reflejar la rigidez de las columnas, pilotes o las condiciones del suelo. Al modelar subsuelos para cimentaciones, el módulo de reacción de la subrasante se multiplica por las áreas tributarias de los nodos correspondientes. En este caso, se advierte que los suelos solo pueden soportar compresión.

Midas Gen proporciona resortes de superficie (*Surface Spring Supports*) para modelar fácilmente las condiciones de frontera con la interfaz del subsuelo. El resorte de superficie contiene la rigidez derivada del módulo de reacción de la subrasante en cada dirección. Después, la propiedad del suelo se aplica a las áreas efectivas de los nodos individuales para producir la rigidez del resorte puntual como condición de frontera. Para reflejar las verdaderas características del suelo, que solo pueden admitir compresión, se selecciona la opción *compression-only* y se ingresa el módulo de reacción de la subrasante para la condición de frontera.

Las componentes de los resortes rotacionales se utilizan para representar la rigidez rotacional de los límites contiguos de la estructura en cuestión. Si los límites contiguos son columnas, la rigidez se calcula mediante $\alpha EI/H$, donde “ α ” es un coeficiente de rigidez rotacional, I es el momento de inercia efectivo y H es la longitud efectiva. Generalmente, los apoyos de resortes en un nodo se ingresan en la dirección de cada grado de libertad. Sin embargo, para análisis más precisos, es necesario considerar la rigidez acoplada adicional asociada con otros grados de libertad. Es decir, los resortes que representan la rigidez acoplada pueden resultar necesarios para reflejar los desplazamientos de rotación acompañados de desplazamientos de traslación. Por ejemplo, puede ser necesario modelar la cimentación con pilotes como una condición de frontera con resortes. Se podría realizar un análisis más riguroso introduciendo la rigidez rotacional acoplada además de la rigidez traslacional en cada dirección. Es probable que se produzcan errores singulares cuando los componentes de rigidez en ciertos grados de libertad son deficientes después de formular la matriz de rigidez. Si los componentes de rigidez rotacional son necesarios para evitar este tipo de errores, se recomienda utilizar valores de 0,0001 a 0,01. El intervalo de valores puede variar dependiendo del sistema de unidades utilizado. Para evitar errores singulares, midas Gen proporciona una función que asigna automáticamente valores de rigidez, que son insignificantes para afectar los resultados del análisis.



5. Casos de análisis

a. Análisis Modal

El análisis modal se utiliza para evaluar las propiedades dinámicas inherentes del suelo y/o estructura, y se emplea para obtener los modos de vibrar, el período o frecuencia, los factores de participación modal, del suelo y de la estructura, entre otros resultados. En casos reales, la estructura no vibra en una forma de modo único y varios modos se superponen para mostrar una forma de vibración compleja. Para el sistema estructural, considerar los modos de vibración como una suma de factores de participación de masa alrededor del 90% se considera un análisis suficientemente preciso. Sin embargo, las propiedades mecánicas del suelo son relativamente más pequeñas que las propiedades estructurales y es difícil tener un factor de participación de masa del 90% en análisis modales.

Para este tipo de análisis hay que activar en el programa GTS NX todos los grupos de malla, condiciones de carga convertidas a masa y condiciones de apoyo de la etapa final de construcción para poder calcular los parámetros antes comentados. Para definir dicho caso de análisis se utiliza la función: “*Analysis / General*” y en las opciones de “*Solution Type*” se elige “*Eigenvalue*”. Cabe destacar que en las opciones de “*Analysis Control*” se debe ingresar el número de modos a calcular. Además, se necesita un método de combinación de modos para aproximar el valor máximo entre los que destacan la metodología “*CQC*” y “*SRSS*”.

b. Análisis de espectro de respuesta

El análisis del espectro de respuesta es un método para evaluar la respuesta estructural debida al movimiento de la base (movimiento uniforme de los nodos confinados por la condición de contorno), especialmente los sismos, y es el método más generalizado para el diseño sísmico. Este método asume una respuesta del sistema lineal y solo evalúa la respuesta máxima.

La respuesta máxima se evalúa como una combinación de modos, que reflejan el porcentaje de participación de cada uno de éstos en la respuesta modal correspondiente a la función del espectro predefinido. Los resultados para el diseño sísmico se obtienen generalmente utilizando el espectro de diseño, elaborado a partir de las ondas sísmicas históricas estadísticas en una región o país en particular. Para ingresar la función del espectro se hace desde las opciones de: “*Dynamic Analysis / Function / Response Spectrum*” y los casos de carga para que actúe en ambas direcciones se definen desde: “*Dynamic Analysis / Response Spectrum*”.

6. Comparativa de resultados

Existen pequeñas diferencias entre los resultados de los modelos en midas Gen (método indirecto) y de los obtenidos con midas GTS NX (método directo), debido a que en GTS NX el suelo se modela con elementos sólidos y un modelo constitutivo de Mohr Coulomb (no lineal); mientras que, en midas Gen el suelo se modela como un conjunto de resortes con comportamiento lineal incluyendo parámetros de rigidez y amortiguamiento.

Como se comentaba, en midas Gen se pueden tener una gama de posibilidades para simular los efectos de ISE. Por ejemplo, el uso de un solo resorte que concentre toda la rigidez y el amortiguamiento del suelo (figura 4a), subestima la respuesta de la estructura hasta en un 10% los periodos, en un 15% los desplazamientos y sobrestima los esfuerzos en muros perimetrales de la cimentación hasta en un 50% en comparación con la metodología directa simulada en GTS NX.

El uso de resortes distribuidos a lo largo de todo el cajón de cimentación en midas Gen incluyendo los elementos de las pilas o pilotes (figura 4b), se ajustan mejor a la simulación con el método directo en GTS NX con un porcentaje de error menor del 5% como se aprecia de la Tabla 1 y figura 5. Es importante destacar también que el uso de las pilas de cimentación hasta el estrato rocoso disminuye el cabeceo de la estructura en comparación con no utilizar ningún tipo de sistema de cimentación profunda.

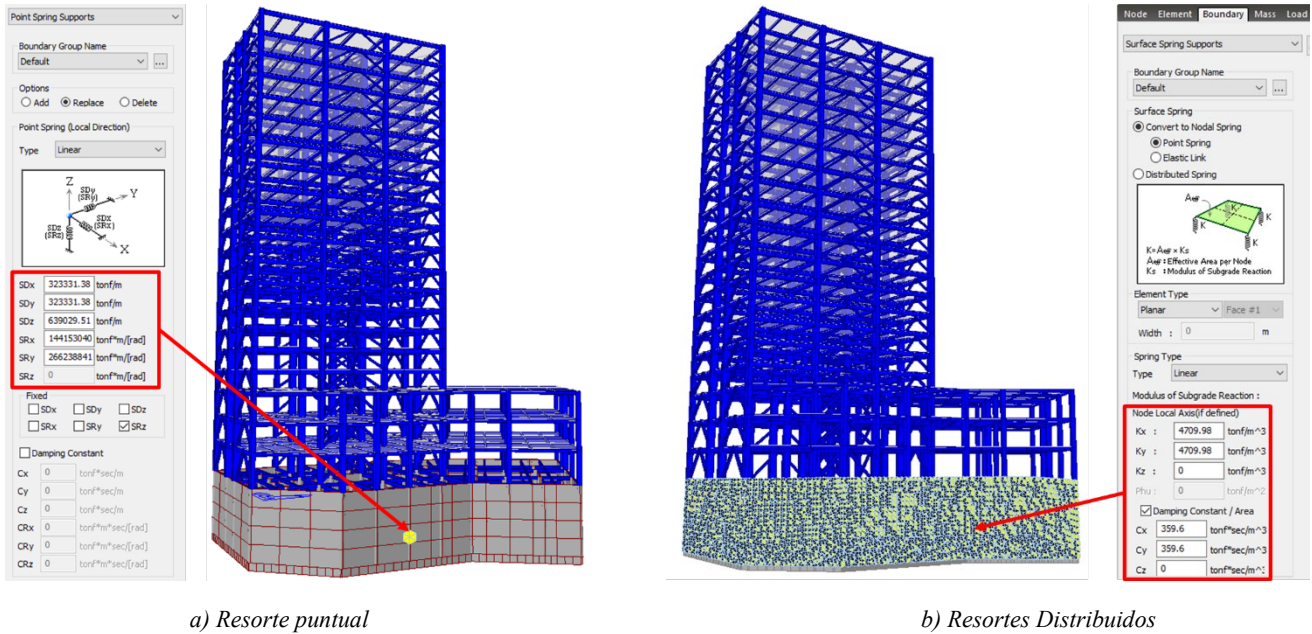


Figura 4. Consideraciones de Interacción Suelo-Estructura con resortes en midas Gen

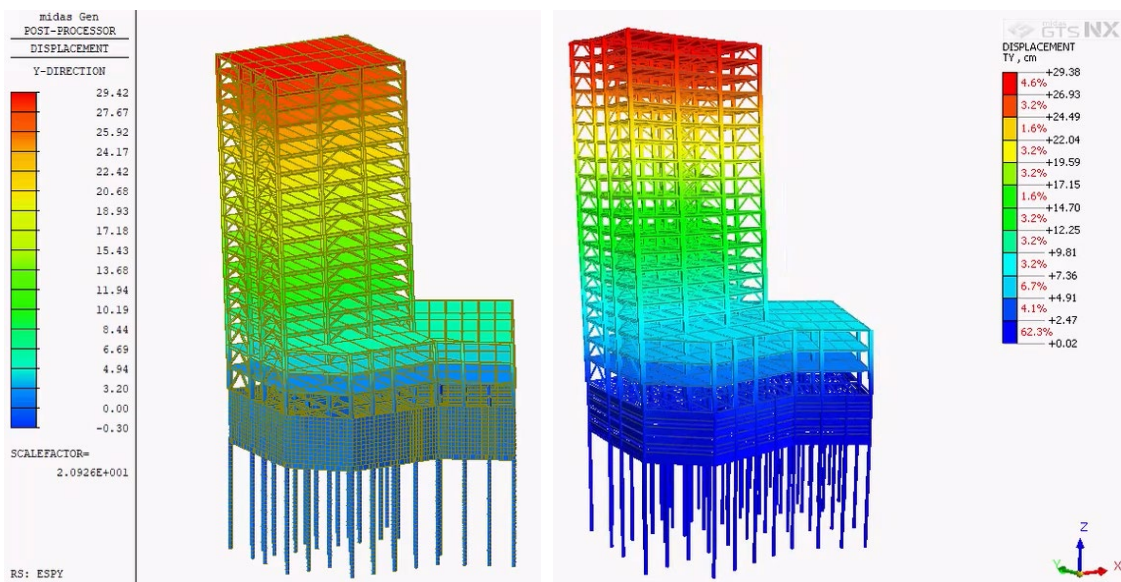


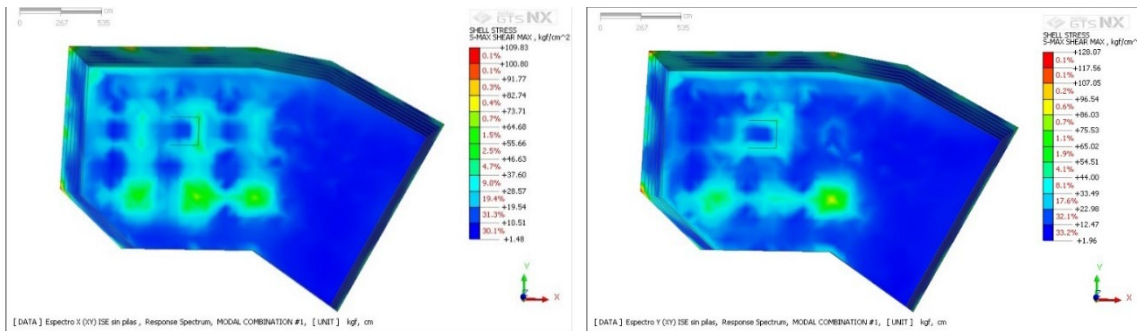
Figura 5. Comparativa de desplazamientos entre midas Gen y midas GTS NX, caso de espectro en dirección X

Las diferencias de los resultados entre periodos y desplazamientos máximos en la losa de azotea no son mayores al 3% con excepción del desplazamiento en la dirección X para el modelo con el cajón de cimentación y las pilas. Las diferencias representativas se encuentran en los resultados de los elementos de la cimentación, de hasta un 20% en esfuerzos de los muros del cajón de cimentación debido a la forma de modelar el suelo en ambos programas presentados y discutidos en el presente documento (figura 6). Gracias al intercambio de datos entre los programas MIDAS, tenemos la ventaja de realizar diversos y numerosos análisis de ISE, en un tiempo más corto, usando el método directo, el cual evita utilizar ciertas simplificaciones que pueden llevar a soluciones erróneas.

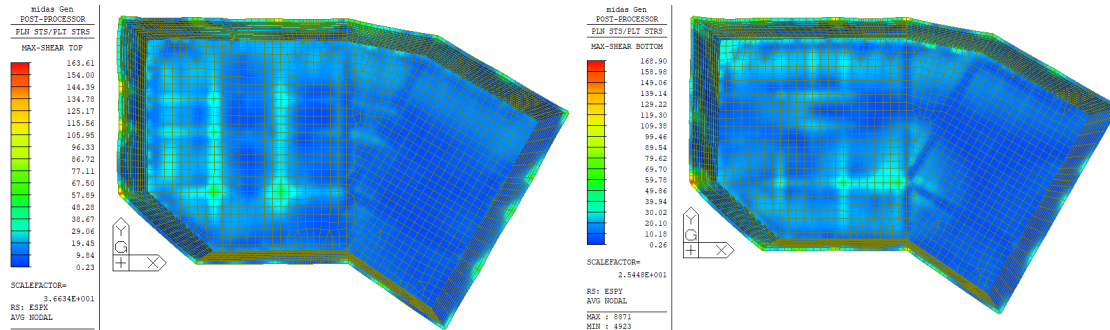
Tabla 1. Comparativa de resultados con diferencias en el modelado del suelo

Resortes en un Punto (midas Gen)	Resortes Distribuidos (midas Gen)	Midas GTS NX
----------------------------------	-----------------------------------	--------------

Modo 1	2.25 s	2.45 s	2.37 s
Modo 2	2.16 s	2.31 s	2.32 s
Modo 3	1.26 s	1.36 s	1.40 s
Desp X (Espectro X)	31.30 cm	34.27 cm	35.75 cm
Desp Y (Espectro Y)	34.67 cm	35.00 cm	35.17 cm



a) midas GTS NX



b) midas Gen

Figura 6. Esfuerzos cortantes máximos para muros del cajón de cimentación

7. Referencias

Avilés, J y LE Perez-Rocha (1998). "Site effects and soil-structure interaction in the Valley of Mexico". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 17, pp. 29-39.

Avilés, J y LE Perez-Rocha (2004). "Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura". *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 71, pp. 1-36.

Avilés, J y LE Perez-Rocha (2005). "Design concepts for yielding structures on flexible foundation". *Engineering Structures*, No. 27, pp. 443-454.

MIDAS (2021), *Integrated design systems for buildings and general structures*, MIDAS Gen v.1.1, Midas Information Technology Co. Ltd.