

Diseño sísmico de estructuras enterradas empleando el método de la desangulación. Propuesta de un procedimiento numérico mediante elementos volumétricos

Seismic Design of Buried Structures Using the Deangulation Method. Proposal of a Numerical Procedure Using Volumetric Elements

Javier Moreno Robles^{1*}, Svetlana Melentijevic²

Resumen

Las estructuras enterradas en zonas sísmicas están sometidas a unos esfuerzos dinámicos que pueden ser importantes y de cuantificación compleja. Habitualmente los métodos de cálculo empleados se basan en la metodología de Mononobe-Okabe que se desarrolló en los años 30 del siglo pasado para estudiar los empujes en muros de gravedad, por lo que su aplicación a estructuras flexibles es, cuanto menos, discutible.

Existen otros métodos de cálculo más actuales, pero parecen, por su complejidad de aplicación, reservados a técnicos especializados en mecánica del suelo dinámica y estructural, por lo que habitualmente no se emplean en los diseños.

Como procedimiento intermedio se ha desarrollado una metodología de interacción cinemática denominada “desangulación sísmica” que es la recogida en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Este método requiere el empleo de resortes que modelizan el terreno y actúan sobre la estructura.

El procedimiento de transformar el terreno en resortes se ha empleado tradicionalmente para poder realizar los cálculos con programas de cálculo matriciales, que eran los únicos existentes en los inicios del cálculo numérico. Sin embargo, actualmente los cálculos geotécnicos estructurales se realizan modelizando el terreno con elementos volumétricos y no con resortes, por lo que la aplicación del método de la desangulación sísmica se hace más tediosa al tener que realizar un modelo complementario de barras y muelles al realizado para el diseño estático de la estructura.

En el presente artículo se pretende mostrar un procedimiento mixto donde la acción sísmica debida a la desangulación sea una fase más de cálculo (habitualmente la última) dentro un único modelo de cálculo (realizado mediante elementos finitos o diferencias finitas), presentando adicionalmente la ventaja de eliminar la incertidumbre de la influencia de la distancia de los contornos en los esfuerzos obtenidos en la estructura.

Palabras clave: desangulación sísmica, estructuras enterradas, elementos finitos volumétricos, pseudoestático, contornos.

Abstract

The structures buried in seismic zones are subjected to important dynamic effects. Usually the calculation methods used are based on the Mononobe-Okabe methodology that was developed in the 30s of the last century to study the ground pressure on gravity walls, so its application to flexible structures is, at least, questionable.

There are other calculation methods which, due to the complexity of their application, are only applied by specialized technicians in dynamic and structural soil mechanics, and for that reason they are not usually used in designs.

As an intermediate procedure, a kinematic interaction methodology called “seismic desangulation” has been developed, which is included in the Manual for Infrastructures of the Ministry of Public Works of Chile. This method requires the use of springs that model the ground and act on the structure.

The transformation of the ground into springs has traditionally been used to perform analysis by matrix calculation programs, which were the only ones existing at the beginning of the use of numerical modelling. However, current structural geotechnical calculations are made by modeling the ground by volumetric elements and not with springs, so the application of the method of seismic desangulation is made more tedious by having to make a complementary model of bars and springs to the one made for the static design of the structure.

In this paper a mixed procedure is presented with the seismic action due to the desangulation as one more calculation phase (usually the last one) within a unique model of calculation (realized by means of finite elements or finite differences), presenting additionally the advantage of eliminating the uncertainty of the influence of the distance of the contours in the stresses obtained in the structure.

Keywords: seismic deangulation, buried structures, volumetric finite elements, pseudostatic, boundary.

* Autor de contacto: jmoreno@cedex.es

¹ Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Ministerio de Fomento).

² Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Facultad Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

1. INTRODUCCIÓN

El diseño sísmico de estructuras enterradas flexibles (marcos, pantallas con arriostramientos a diferentes cotas, cajones, etc.) habitualmente se realiza empleando el

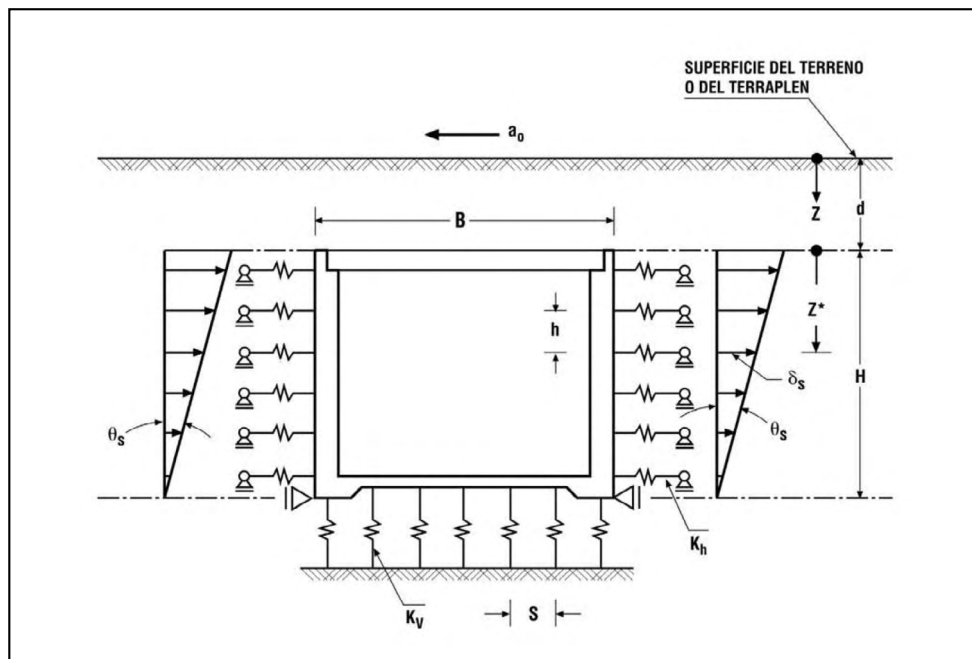


Figura 1. Modelo conceptual del método de desangulación. Tomado de la lámina 3.1003.501(1) A del Manual de Carreteras. Edición 2014.

procedimiento de Mononobe-Okabe (desarrollado en los años 30) que fue diseñado para estudiar los empujes en muros de gravedad.

El Ministerio de Obras Públicas de Chile, en su Manual de Carreteras, describe un procedimiento alternativo al anterior, aplicable con mayor rigor al caso de estructuras flexibles.

Este procedimiento, conocido como de desangulación sísmica, fue desarrollado a finales de los años 60 y principio de los 70, por lo que su aplicación estaba orientada a su empleo con modelo de barras y muelles, que era la herramienta disponible en esa fecha.

Actualmente, los modelos de cálculo han evolucionado hacia el empleo de elementos volumétricos para la simulación del terreno, por lo que la aplicación del método de la desangulación implica realizar un modelo de vigas y muelles específico adicional al modelo numérico empleado para el diseño estático de la estructura que se está analizando.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DESANGULACIÓN

En el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas de Chile, que como es conocido es uno de los países con una cultura de diseño sísmico más avanzado del mundo debido a su elevadísima sismicidad, se incluye el método de la desangulación para el diseño de estructuras enterradas tipo marco o cajón.

Este método, que se encuadraría dentro de la categoría de métodos de interacción cinemática, fue propuesto por Kuesel (1969) para el Metro de San Francisco, modificándose posteriormente por Ortigosa y Musante (1991) para el Metro de Santiago.

2.1. Principios básicos del método

En la figura 1 se esquematiza un marco o estructura enterrada que se conecta al suelo que le rodea con un

conjunto de resortes que representan la interacción dinámica suelo-estructura.

Estos resortes horizontales están unidos a la estructura en uno de sus extremos, mientras que en el otro se imponen unos desplazamientos sísmicos de campo libre (δ_s), relativos a la base de la estructura, en cuya cota el valor sería nulo.

La imposición de estos desplazamientos en el extremo del resorte que no está fijo a la estructura, introduce unos esfuerzos sísmicos a la misma, que serán tanto más pequeños como flexible sea la estructura.

Según se puede colegir, para obtener estos esfuerzos sísmicos, se deben determinar tanto los desplazamientos δ_s como la rigidez y distribución de los resortes horizontales K_{hi} .

2.2. Determinación de desplazamientos de campo libre δ_s

Para obtener el valor de la desangulación θ_{si} y los desplazamientos de campo libre δ_s se deberían emplear, según el Manual de Carreteras, las siguientes fórmulas:

$$\delta_{si} = \sum_i^n \theta_{si} h \quad [1]$$

$$\theta_{si} = \frac{(1-0,0167z_i)a_0\gamma z_i}{G_{ci}} \quad [2]$$

$$G_{ci} = 53K_{2i}\sqrt{\sigma_{vi}} \quad [3]$$

Siendo:

h = espesor de las capas, en m

δ_s = desplazamiento sísmico horizontal en el límite superior de la capa i , en m

γ = peso específico, en t/m^3

z_i = profundidad del centro de la capa i , medida desde la superficie del terreno, en m

a_0 = aceleración sísmica máxima en la superficie del terreno, en porcentaje de g

θ_{si} = desangulación sísmica de corte, en el centro de la capa i , en rad

$\overline{\sigma_{vi}}$ = tensión vertical efectiva en el centro de la capa i , en t/m^2

K_{2i} = coeficiente reductor del módulo de corte para el centro de la capa i , adimensional

G_{ci} = módulo de corte reducido en el centro de la capa i , en t/m^2

El valor del K_{2i} se puede obtener de las curvas de degradación que se incluyen en el propio Manual de Carreteras (materiales granulares figura 2 y materiales cohesivos figura 3), teniendo en cuenta el valor K_{2max} de la tabla 1.

Tabla 1. Valores recomendados de K_{2max} . Tomado del Manual de Carreteras. Edición 2014

Tipo de suelo	Rango K_{2max}
Arenas	50 – 85
Gravas arenosas	160 – 220
Suelos finos y suelos con cementación	25 $q_u^{(1)}$

⁽¹⁾ Relación aproximada en la que q_u es la resistencia a la compresión no confinada en (kgf/cm^2).

La obtención de los desplazamientos δ_s y la desangulación θ_{si} mediante las ecuaciones (1) a (3) requiere un proceso iterativo, ya que la desangulación es función del módulo de corte G_{ci} y éste es función de la desangulación.

Este procedimiento es conceptualmente análogo al empleado en el método lineal equivalente que habitualmente

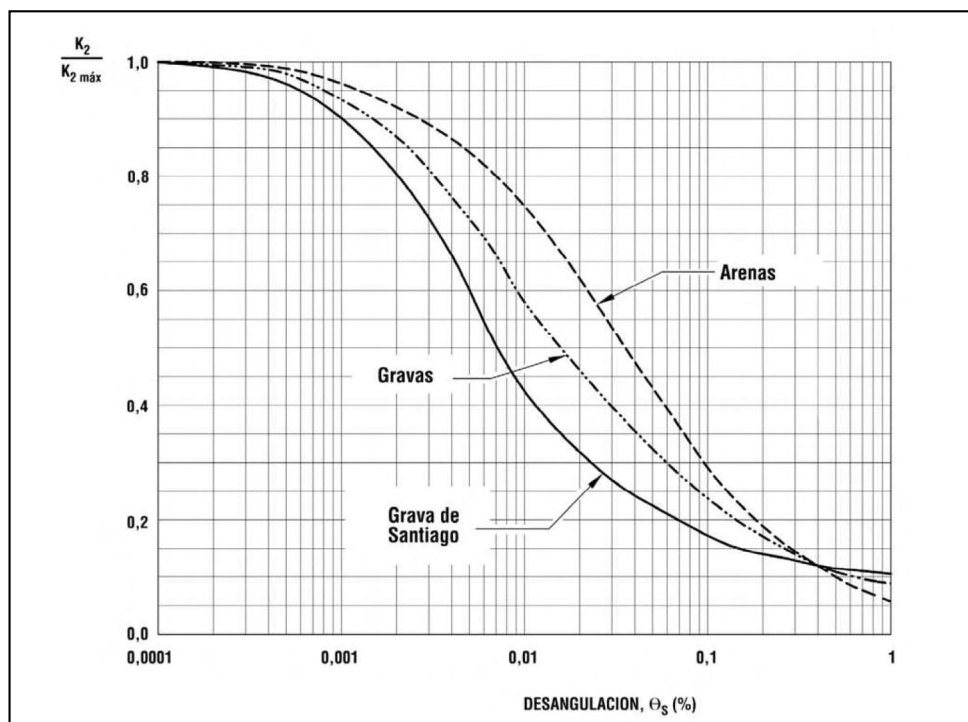


Figura 2. Curva de degradación del módulo de corte para materiales granulares. Tomado de la lámina 3.1003.501(2) A2 del Manual de Carreteras. Edición 2014.

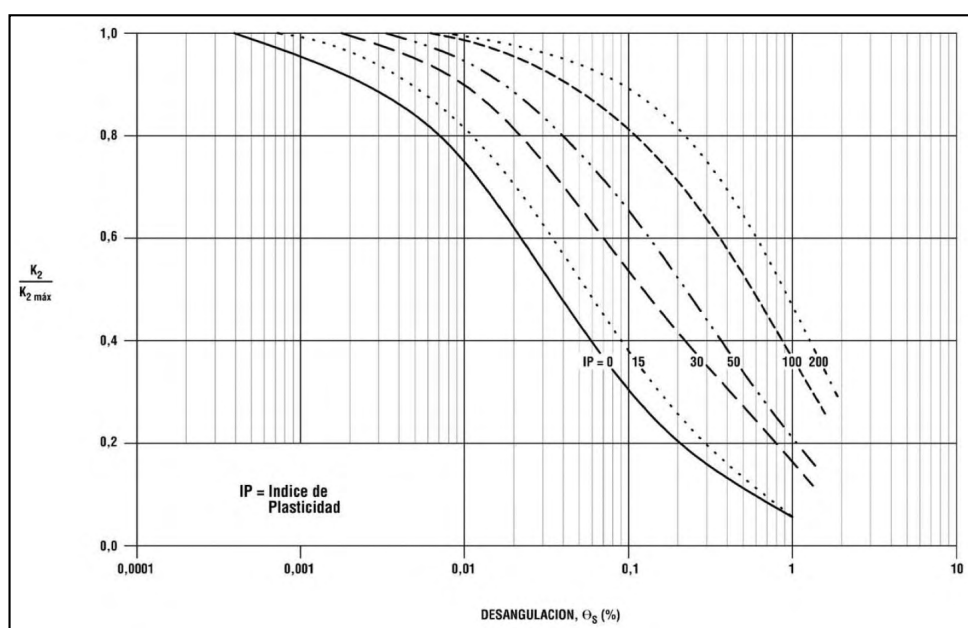


Figura 3. Curva de degradación del módulo de corte para materiales cohesivos. Tomado de la lámina 3.1003.501(2) A3 del Manual de Carreteras. Edición 2014.

se ha empleado en el estudio de la transmisión de ondas de corte en el suelo.

Además, este procedimiento analítico se puede implementar fácilmente en una hoja de cálculo para obtener el perfil de movimientos horizontales para un perfil litológico determinado sometido a cualquier acción sísmica definida por una aceleración máxima a_0 .

2.3. Determinación de las constantes de resortes horizontales

Se deberá disponer un resorte en cada centro de capa de espesor h , siendo su rigidez:

$$K_{hi} = k_{hi}h \quad [4]$$

$$k_{hi} = \frac{2,7G_c}{H} \frac{1}{\sqrt{1-(Z_i^*/H)^2}} \quad [5]$$

$$G_c = 53K_2\sqrt{\sigma_{vi}} \quad [6]$$

$$K_2 = \left(\frac{K_2}{K_{2max}}\right)K_{2max} \quad [7]$$

Siendo:

K_{hi} = rigidez del muelle horizontal en el centro de la capa i , en t/m/m

H = altura de la estructura enterrada, en m

Z_i^* = distancia del centro de la capa i desde el techo de la estructura, en m

2.4. Procedimiento de cálculo

Una vez obtenidos los movimientos de campo libre δ_s y la distribución de las rigideces de los resortes K_{hi} se deberá realizar un modelo de vigas y muelles, para calcular los efectos del sismo.

A partir de la geometría del modelo se impondrán, en los extremos no fijados a la estructura, el perfil del movimiento obtenido analíticamente.

Este perfil de movimientos, según se verá gráficamente en el ejemplo del apartado 3.3, tiene un aspecto parabólico aunque se puede asumir que entre las cotas a las que se encuentra la estructura es asimilable a una recta.

Sin embargo, no hay que olvidar que la acción dinámica es sólo una carga de las que actúan en la estructura, estando habitualmente muy condicionado el diseño por las cargas estáticas (empujes de tierras, sobrecargas de tráfico, empuje de agua, etc).

Lo más habitual actualmente es que el ingeniero proyectista tenga preparado un modelo numérico tensodeformacional en el que el terreno se ha modelizado con elementos finitos volumétricos para el diseño estático, no siendo adecuado este modelo para incorporar los cálculos de muelles y vigas que requiere el método tradicional de la desangulación.

3. PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO DE CÁLCULO

3.1. Conceptos generales

Analizando con detalle el método de la desangulación sísmica se puede observar que el fundamento del mismo

consiste en suponer que se debe producir una compatibilidad cinemática de los movimientos del terreno y de la estructura.

Sin embargo, esta compatibilidad es difícil de analizar en el entorno más próximo de la estructura, ya que los movimientos del terreno debidos al sismo están afectados por la estructura y los de la estructura están a su vez afectados por los del terreno.

En el caso de que no hubiera estructura, o cuando ésta se encuentra muy alejada, se pueden obtener los movimientos de campo libre (δ_s) también conocidos en terminología inglesa como *free field (ff)*.

La aplicación de estos movimientos en los bordes laterales de un modelo numérico de elementos finitos tiene su relativa complejidad (habitualmente estos contornos tienen impedidos los movimientos horizontales y libres los verticales), pero esta dificultad puede ser solventada o bien con un código numérico que permita una introducción avanzada de condiciones de contorno (tipo Midas GTS NX) o mediante algún procedimiento aproximado.

Sin embargo, la mayor incertidumbre está asociada a la distancia de la estructura a la que se deben imponer estos movimientos de campo libre, ya que su posición tiene mucha influencia en los esfuerzos pseudoestáticos que inducirá el sismo en la estructura.

3.2. Descripción del procedimiento

En este apartado se va a realizar una descripción detallada de cada uno de los pasos a seguir para que se pueda reproducir fácilmente la metodología planteada.

A diferencia del método propuesto por el Manual de Carreteras, se puede partir del modelo numérico que se haya realizado para diseñar la estructura desde un punto de vista estático, sin más que añadir unas fases adicionales al final del cálculo estático.

Como dato de partida se necesita el tipo de terreno que definirá la curva de degradación del módulo de corte con la desangulación y el valor máximo de la acción sísmica a_0 .

Los pasos a seguir serían los siguientes:

Paso 1. Se deberá realizar un modelo complementario muy sencillo para obtener los movimientos de campo libre δ_s a los que se verá sometido el terreno sin tener presente la estructura.

Este modelo incluirá una columna de suelo vertical, con los movimientos verticales impedidos en todos los nodos (el sismo introduce en el terreno una acción de corte por lo que es la mejor forma de representarlo) y movimientos horizontales impedidos en la base.

La anchura del modelo, según se verá en el apartado siguiente, no tiene influencia en los resultados.

Es importante tener en cuenta que en esta columna de suelo se deben aplicar los parámetros deformacionales dinámicos, que podrían estimarse a partir de los estáticos aplicándoles un coeficiente de corrección en función de la magnitud del sismo.

Paso 2. Los movimientos horizontales obtenidos en el paso anterior se considerarán como los valores a obtener en el contorno del modelo global (terreno-estructura).

En ambos bordes del modelo global se deberá introducir una banda vertical de nodos con movimientos verticales impedidos para poder reproducir adecuadamente las condiciones de campo libre, de forma análoga a lo realizado en el paso 1.

Paso 3. Se aplicará a todo el modelo la aceleración a_0 y se estimarán los movimientos horizontales de los contornos.

En función de las dimensiones del modelo se observará que los movimientos obtenidos en el contorno son similares a los del modelo simplificado (contornos bastante alejados) o los movimientos son ligeramente superiores (contornos próximos a la estructura).

En este último caso, se deberá repetir el cálculo modificando ligeramente la aceleración horizontal de forma que se obtengan los movimientos de campo lejano en el borde del modelo.

Según queda de manifiesto en la metodología propuesta, el valor de diseño a imponer son los movimientos de campo libre, pero en lugar de introducirlos directamente se introducen mediante la aceleración horizontal.

En el caso de pretender introducir los movimientos directamente como acción exterior, existe la incertidumbre de la distancia de la estructura a la que se debe introducir los movimientos de campo libre.

Si la distancia es muy reducida, los esfuerzos en la estructura serán muy elevados, ya que se verá sometida prácticamente a los mismos movimientos de campo libre.

En el caso de situar los bordes del modelo muy lejanos, estos se verán muy amortiguados en el terreno existente entre los contornos y la estructura, por lo que los esfuerzos en la estructura serán muy reducidos.

Para mostrar que el método propuesto consigue reproducir los movimientos de campo libre sin la incertidumbre de la influencia de la distancia del contorno en los esfuerzos de la estructura, se presenta un ejemplo de aplicación.

3.3. Ejemplo de aplicación

Se pretende calcular los esfuerzos que produce un sismo de aceleración máxima $a_0 = 0,3g$ en un suelo arenoso de 30 m de potencia que existe sobre el lecho rocoso en el que se encuentra un marco de 10 m de altura y 10 m de anchura. Los elementos estructurales horizontales sirven de apuntalamiento de los verticales (la conexión se considera articulada).

El código numérico que se va a emplear es el Midas GTS NX v2016 (Seúl, Corea) ya que permite introducir las condiciones de contorno de forma muy detallada y precisa, a diferencia de otros códigos.

El terreno es una arena media con un valor de velocidad sísmica $v_s = 250$ m/s.

A partir de las características de la arena y de la acción sísmica, en el Manual de Carreteras se podría obtener el valor de desangulación promedio estimado en $\theta_{si} = 7,5 \times 10^{-4}$.

Como paso inicial se han realizado unos modelos sencillos con diferentes anchuras (1, 5 y 10 m) a los que se les ha impedido los movimientos verticales (según se indica en el paso 1 del apartado anterior) y se les ha aplicado las propiedades deformacionales dinámicas.

A estos modelos se les ha aplicado una aceleración horizontal de $0,3g$, pudiéndose ver cómo los movimientos

obtenidos son idénticos en los tres modelos y corresponderían a un valor medio de desangulación de $7,2 \times 10^{-4}$, muy similar al propuesto por el Manual de Carreteras.

En la figura 6 se incluye una comparativa del perfil de movimientos obtenido con la metodología del Manual de Carreteras (rojo) y los resultados del cálculo (azul).

Se puede ver que los resultados son muy similares, con una desangulación media en la zona de la estructura (línea naranja continua) asimilable a la desangulación media del conjunto del estrato arenoso (línea naranja discontinua).

Se considera, por lo tanto, que esta distribución de movimientos en profundidad reproduce adecuadamente la recomendada por el Manual de Carreteras.

Empleando el modelo global (estructura-terreno) se impone que los movimientos en los bordes del modelo sean únicamente verticales, permitiéndose los horizontales.

En función de la distancia a la que se sitúan los contornos laterales del modelo se deberá aplicar una aceleración horizontal de forma que el perfil de movimientos en el borde sea similar al obtenido anteriormente en campo libre.

Así, por ejemplo, si el borde está situado a gran distancia de la estructura (más de 15 veces la anchura de la estructura), prácticamente la aceleración que hay que introducir en el modelo es $0,3g$.

Sin embargo si el modelo tiene una anchura total de 80m (es decir, el contorno se sitúa a 35m de la estructura), si se aplica en el modelo una aceleración de $0,3g$, el movimiento horizontal obtenido en el contorno que se supone que representa el campo libre es de 2,34cm en lugar de los 2,16 cm que se habían obtenido en el modelo sin estructura.

De una manera elemental, modificando ligeramente el valor de la aceleración horizontal ($0,27g$) se obtiene el valor deseado del movimiento horizontal.

A modo de ejemplo, en la figura 7 se muestran los movimientos horizontales obtenidos en los modelos globales de 80 y 160 m de anchura, pudiéndose observar cómo se produce la distorsión de la estructura.

Empleando esta metodología se han realizado 4 diferentes modelos donde se ha variado la anchura total de los mismos, desde un valor muy elevado (500m) hasta un valor excesivamente reducido (40m) que sería inapropiado incluso para el modelo estático.

En la figura 8 se incluye la evolución del momento flector máximo en la estructura en función de la distancia entre el contorno y la estructura, presentando un valor sensiblemente constante con independencia de la distancia adoptada (dentro de un rango razonable de buena práctica).

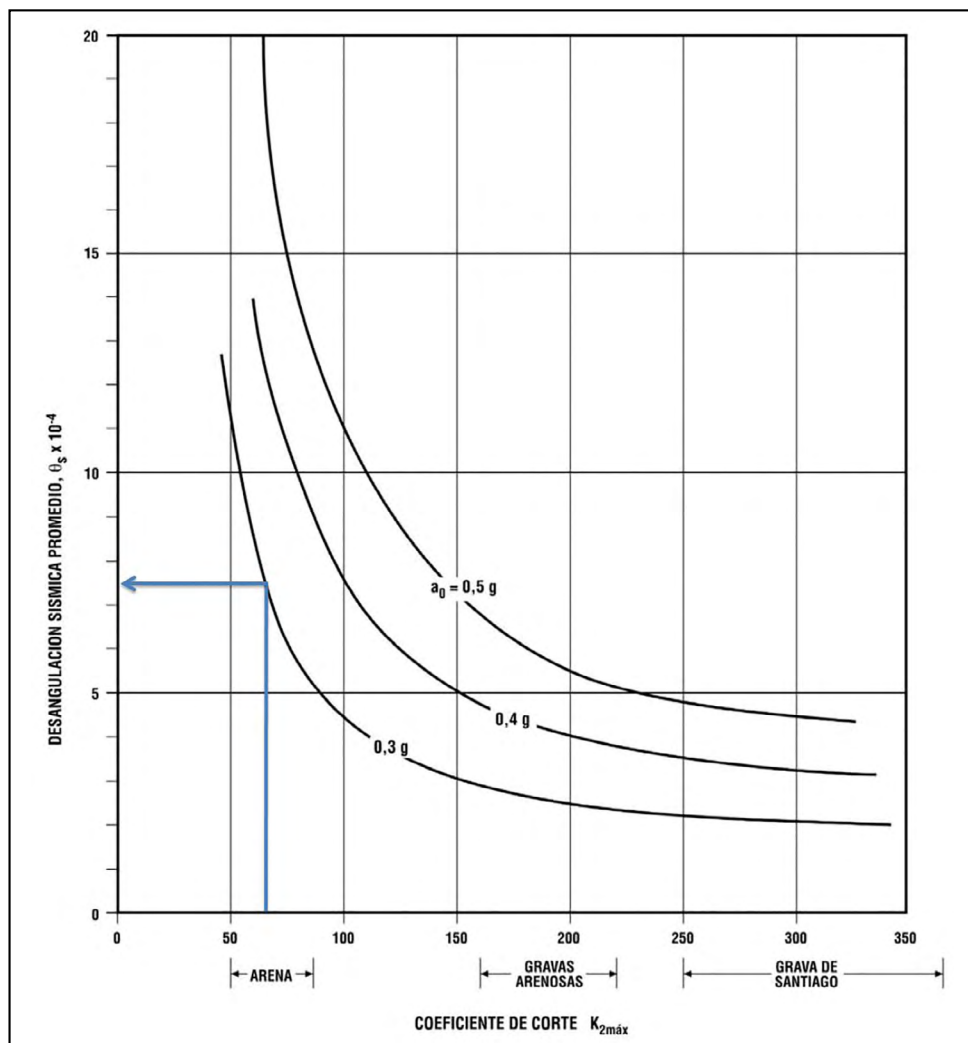


Figura 4. Estimación de la desangulación promedio del ejemplo. Tomado de la lámina 3.1003.501(3) A del Manual de Carreteras. Edición 2014.

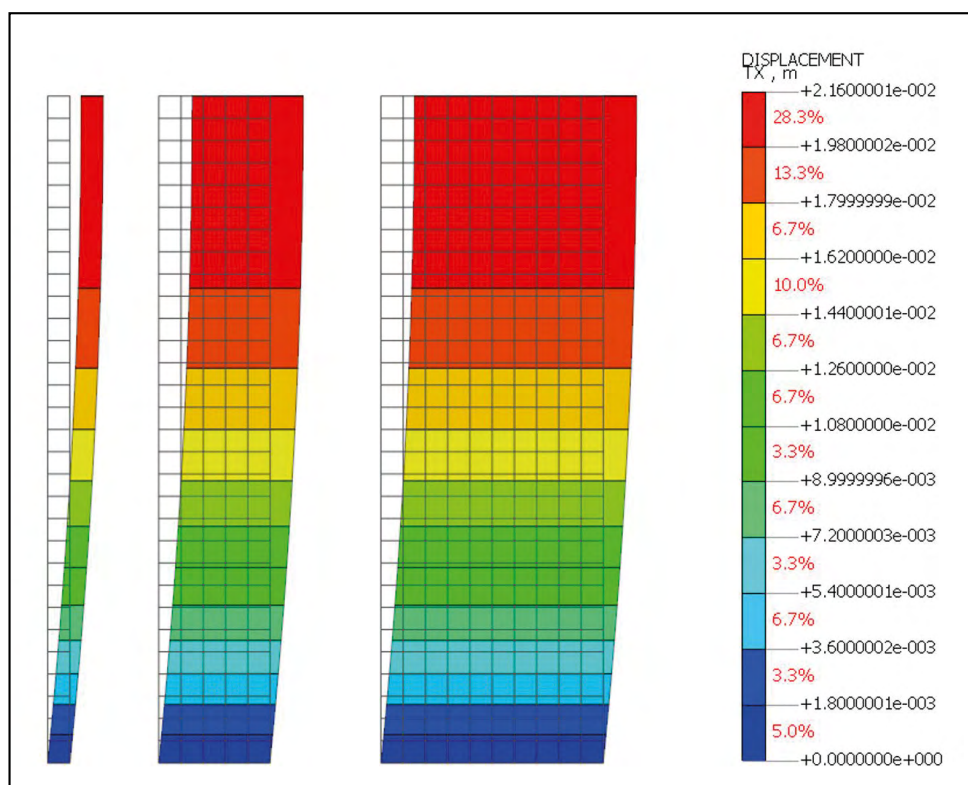


Figura 5. Perfil de movimientos horizontales del modelo elemental.

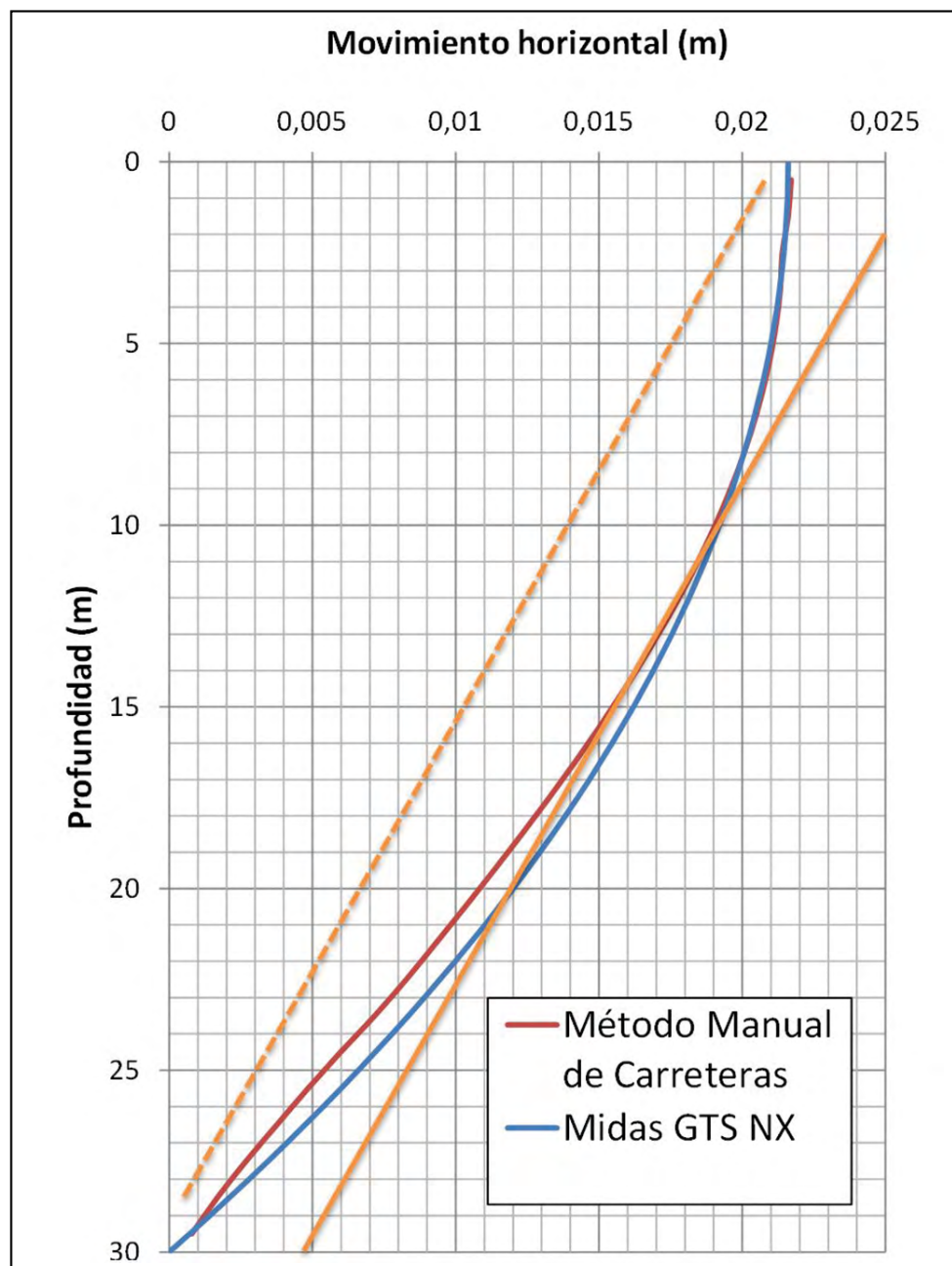


Figura 6. Comparativa de movimientos obtenidos entre el Manual de Carreteras y el cálculo numérico.

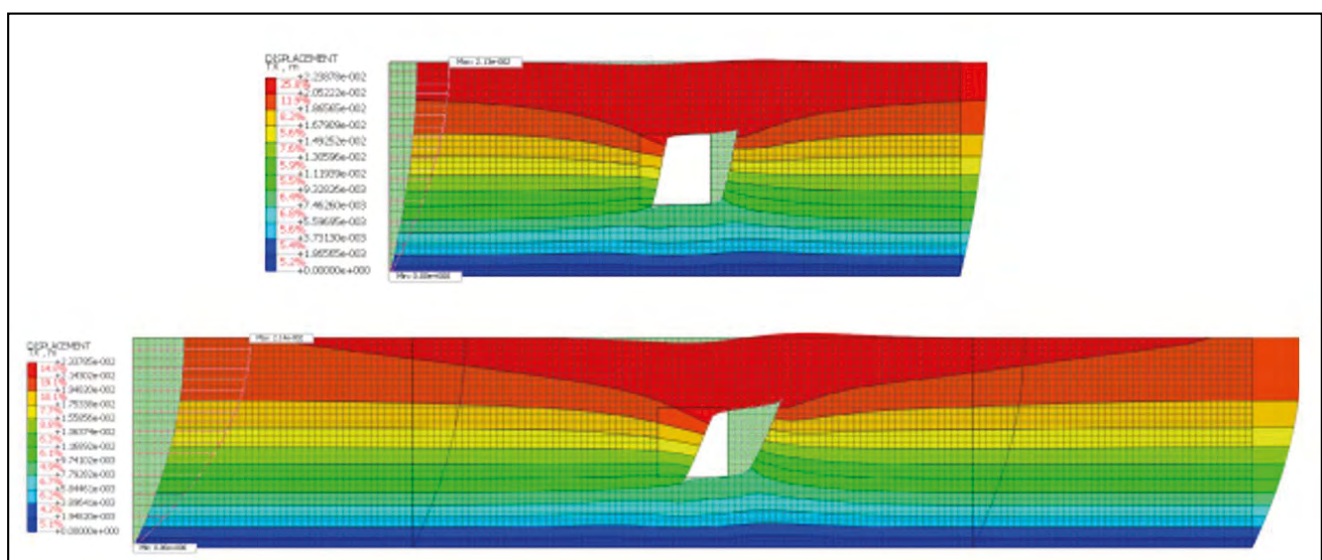


Figura 7. Isótopos de movimientos horizontales del modelo global de 80m y 160m.

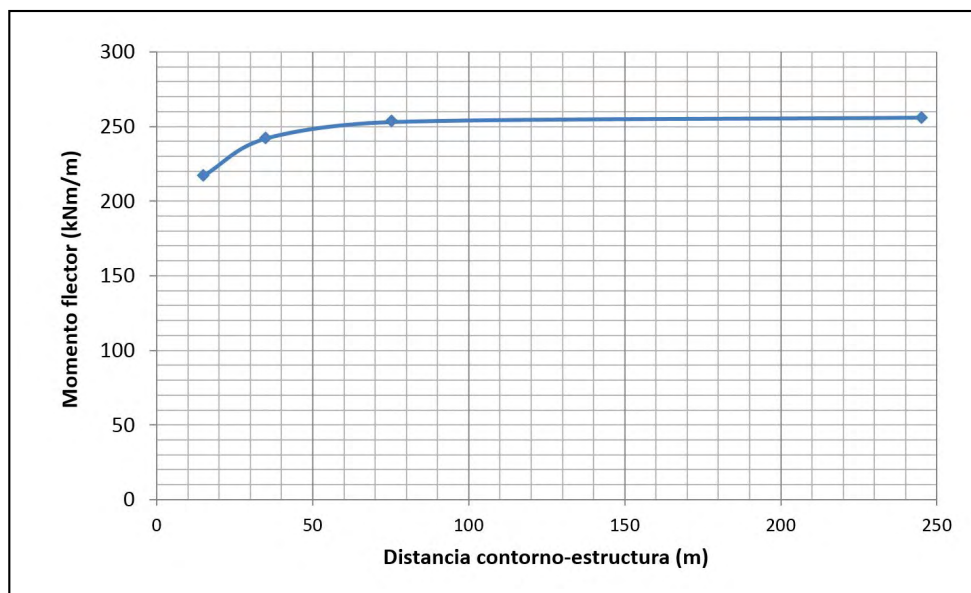


Figura 8. Variación del momento flector en la estructura en función de la distancia contorno-estructura.

4. CONCLUSIONES

El método de diseño sísmico de la desangulación es un método pseudoestático que se encuadra dentro de la metodología de la interacción cinemática.

La metodología propuesta por el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas de Chile permite estimar el perfil de movimientos en campo libre y, a partir de éste, estimar mediante un modelo de vigas y resortes los esfuerzos y deformaciones de la estructura.

Sin embargo, estos modelos estructurales actualmente están en desuso en el campo de la geotecnia, donde se emplea la modelización volumétrica de los terrenos en lugar de la simplificación de los resortes.

Para poder evitar realizar un modelo estructural diferente se incluye en este trabajo un procedimiento que consigue reproducir fielmente el perfil de movimientos de campo libre en el contorno del modelo, empleando un modelo similar al que se haya empleado en el diseño estático.

La idea inicial de imponer directamente el perfil de movimientos horizontales de campo libre en los bordes verticales del modelo presenta un triple inconveniente.

El primero es que el perfil de movimientos habitualmente es parabólico y no lineal, por lo que su aplicación puede ser más tediosa.

El segundo es que la acción dinámica se aplica únicamente en los bordes del modelo, aspecto éste poco realista ya que el efecto del sismo deberá afectar en cierta medida a todo el terreno.

Y por último, el mayor inconveniente de los tres, es que los resultados de los esfuerzos se verán muy afectados por la distancia contorno-estructura.

Frente a esa forma de modelización se plantea una metodología diferente, aplicando sobre el modelo, que presenta unas zonas laterales con los movimientos verticales impedidos, una aceleración horizontal.

Mediante este procedimiento se consigue reproducir adecuadamente el perfil de movimientos de campo libre, la acción sísmica se extiende a todo el modelo y se elimina prácticamente el efecto que tiene en los esfuerzos de la estructura la distancia contorno-estructura.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Mononobe, N., y Matsuo, H. (1929). On the Determination of Earth Pressure during Earthquakes. *Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo*, Vol. IX, Part 1, pp. 177-185.
- Okabe, S. (1924). General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam. *Journal Japan Society of Civil Engineering*, 10(6): pp. 1277-1324.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile (2014). *Manual de Carreteras*. Volumen III. Instrucciones y criterios de diseño.
- Kuesel, T. (1969). Earthquake Design Criteria for Subways. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 95(6): pp. 1213-1231.
- MIDAS (2016). *User Manual. Midas GTS NX. Versión 2016*.
- Ortigosa, P., y Musante, H. (1991). Seismic Earth Pressures Against Structures with Restrained Displacements. *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Miss.