

MODELACIÓN DE RESPUESTA DE ESTRUCTURAS LONGITUDINALES A ONDAS SÍSMICAS

RESPONSE MODELING OF LONGITUDINAL STRUCTURES TO SEISMIC WAVES

Franco P. Soffietti^a, Rodrigo J. Contreras^b y Federico Pinto^{c,d}

^a *Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (UNC - CONICET), Av. Vélez Sarsfield
1611, Córdoba, Argentina, fpsoffietti@conicet.gov.ar*

^b *Unidad de Ingeniería, Emprendimientos Energéticos Binacionales, Ministerio de Energía y Minería*

^c *Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

^d *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

Palabras clave: Respuesta sísmica, Comportamiento longitudinal, Interacción cinemática, Interacción suelo-estructura.

Resumen. La respuesta sísmica de estructuras longitudinales enterradas, es generalmente controlada por la interacción cinemática. En la práctica, estos escenarios son tenidos en cuenta introduciendo a la estructura patrones de deformación del suelo relacionados con la demanda sísmica. En general estas acciones se aproximan como una onda simple, frecuentemente despreciando la rigidez de la estructura e introduciendo aproximaciones cinemáticas en el comportamiento estructural que permiten evaluar esfuerzos de una manera sencilla. Los métodos habituales utilizados en la práctica consideran la hipótesis de Euler – Bernoulli para el comportamiento flexional y deformaciones de corte puro para el comportamiento transversal, introduciendo aproximaciones inconsistentes entre sí. En este trabajo se presenta una aproximación consistente al problema que, en el límite permite obtener las soluciones simplificadas de la literatura, a la vez que representa comportamientos intermedios considerando tanto deformaciones de corte como flexionales. Luego, se estudia la sensibilidad del modelo a los parámetros de la estructura y del suelo, comparando finalmente, las soluciones cerradas del modelo analítico con las respuestas del sistema modelado en tres dimensiones por elementos finitos.

Keywords: Seismic response, Longitudinal behavior, Kinematic interaction, Soil-Structure Interaction.

Abstract. The seismic response of underground longitudinal structures is mainly controlled by kinematic interaction. In practice, these scenarios are taken into account by applying simplified deformation patterns to the structure, which are derived based on the expected seismic demands in the ground. In general, these actions are approximated as simple waves, ignoring the structure stiffness and introducing kinematic approximations that allows a straightforward evaluation of structural demands. Current practice generally relies on the Euler-Bernoulli hypothesis for flexural behavior, and pure shear deformations for transverse demands, which results in an inconsistent approximation. This article presents an alternative approach, whereby a consistent kinematic approximation is considered, and in the limit represents the previous solutions widely used in practice. A parametric study is presented in order to evaluate the sensibility of the system to the set parameters. A comparison with a 3D finite elements model is also presented in order to validate the proposed solution.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace relativamente poco, la percepción dentro de la comunidad ingenieril era que las estructuras enterradas no necesitaban diseñarse para resistir esfuerzos sísmicos porque las mismas se mueven con el terreno debido a su menor masa comparada con la del suelo circundante (Bobet, 2011). Luego de numerosas investigaciones de daños sísmicos en estructuras subterráneas (Dowding y Rozen, 1978; Owen y Scholl, 1981; Sharma y Judd, 1991; Yu et al 2017; Jaramillo, 2017) se desarrollaron métodos de cálculo, estudios detallados y recomendaciones técnicas específicas.

El diseño de estructuras longitudinales enterradas (ELE) se realiza tanto en el sentido axial como en el sentido transversal de las mismas. El comportamiento sísmico sobre el eje longitudinal considera el paso de ondas de corte o de compresión que avanzan en sentido horizontal, para túneles, o vertical en el caso de chimeneas.

Un análisis preliminar de la respuesta sísmica longitudinal puede ser llevado a cabo ignorando la presencia física del túnel asumiendo que este tendrá la misma deformación que el terreno en campo libre. Sin embargo, este método de análisis sobreestima o subestima los resultados, dependiendo de la rigidez relativa entre ellos (Hashash et al, 1998). Es bien comprendido en la literatura, que la rigidez relativa entre el suelo y la estructura es una propiedad del sistema que controla las deformaciones estructurales durante un terremoto. Si la estructura es significativamente más rígida que el terreno, los esfuerzos están controlados por la rigidez del suelo, mientras que para estructuras flexibles el terreno circundante no tiene mayor influencia sobre los esfuerzos, por lo tanto, la presencia de una estructura más rígida que el suelo circundante limita las deformaciones del suelo (Bobet et al, 2008).

Los métodos habituales utilizados en la práctica consideran la hipótesis de Euler – Bernoulli para el comportamiento flexional y deformaciones de corte puro para el comportamiento transversal, introduciendo aproximaciones inconsistentes entre sí. Las soluciones además ignoran la interacción dinámica, despreciando la masa estructural. Numerosos autores obtuvieron expresiones analíticas teniendo en cuenta la interacción suelo – estructura (ISE) considerando que los modelos de vigas esbeltas se apoyan sobre fundaciones elásticas representadas a través de la teoría de Winkler, como resortes longitudinales independientes (Constantopoulos et al 1979; St. John y Zahra, 1987; Wang, 1993; Hashash et al, 2001; Anastopoulos et al, 2008; Yu et al, 2018). Una mejora en los modelos fue implementar modelos de viga de Timoshenko, permitiendo considerar y obtener deformaciones de corte constantes en la sección a través de modelos continuos.

Siguiendo las investigaciones anteriormente mencionadas, en este trabajo se presenta, a través de modelar una ELE como viga de Timoshenko sobre fundación elástica según la teoría de Winkler, en un medio con rigidez axial y rotacional, una aproximación consistente al problema que, en el límite permite obtener las soluciones simplificadas de la literatura, admitiendo representar comportamientos intermedios donde se consideran tanto deformaciones de corte como flexionales.

2. PLANTEO DEL PROBLEMA

Cuando una onda de corte viaja paralela al eje longitudinal de una ELE, polarizadas verticalmente en túneles u horizontalmente en chimeneas, estas estructuras se deforman. Si se tiene en cuenta la ISE, considerando que la presencia de la estructura ejerce influencia en la deformación libre del terreno, los cuales por sus características friccionales presentan restricciones rotacionales (Contreras, 2015), la estructura en contacto con el medio, presentará patrones de deformaciones de flexión y de dislocación, como se ve en la Figura 1. Ante esta situación, utilizar la teoría de viga de Euler – Bernoulli, presentaría inconsistencias en los

resultados, no pudiendo representar apropiadamente la situación descrita. Por lo tanto, para determinar los desplazamientos, curvaturas y distorsiones de corte actuando en la sección transversal, y mediante las ecuaciones constitutivas obtener los esfuerzos correspondientes, se considera una ELE, modelada como viga de Timoshenko apoyada en el suelo a través de un modelo tipo Winkler, con resortes axiales y rotacionales para modelar el medio, representados por k_w y k_β , para la rigidez axial y rotacional respectivamente.

Si la longitud de onda simple que se considera como aproximación del movimiento sísmico, es significativamente más larga que la estructura en consideración, puede pensarse que en realidad la ELE, tendrá una deformación de corte puro (Figura 2).

2.1. Teoría de Timoshenko

La teoría de Timoshenko asume que las secciones se mantienen planas luego de deformarse. En este tipo de vigas, la pendiente de la deformada de la ELE, no depende sólo de la rotación seccional, sino también de la deformación de corte de la misma (Figura 3).

Bajo esta perspectiva, la estructura tiene dos modos de deformación, deformación flexional y distorsión de corte (dislocación) (Figura 1). Para el análisis se considera un sistema de coordenadas donde el eje de las X es tangente al eje baricéntrico del elemento estructural. Los ejes Y y Z, coinciden con las direcciones principales de inercia de la viga (Figura 3). Entonces,

$$w(x)' = \beta(x) + \gamma_{yz}(x) \quad (1)$$

Por lo tanto, el momento flector y el corte en cada sección de la ELE se obtienen como

$$M(x) = -EI\beta(x)' \quad (2)$$

$$Q(x) = GA_\kappa(w(x)' - \beta(x)) \quad (3)$$

donde, manteniéndose constantes a lo largo del elemento de viga, E y G representan los módulos de Young y de corte del material de la viga respectivamente; I representa el momento de inercia seccional y A_κ el área de corte efectiva, según Bathe (1996), con un coeficiente de corte de 0,5. El apóstrofe (') hace referencia a la derivada espacial de la variable en consideración.

2.2. Viga de Timoshenko sobre fundación elástica

En problemas de estructuras sobre fundaciones elásticas, aparecen fenómenos de ISE. Siguiendo lo postulado por Winkler (1867), quien consideró una viga apoyada sobre una fundación elástica, el suelo puede ser modelado con resortes, siendo las deflexiones del sistema linealmente proporcionales a la presión de contacto en un punto determinado, independientemente de los esfuerzos de contacto en otros puntos. Haciendo una extensión del concepto anterior, se considera al medio capaz de restringir las rotaciones, generando una reacción ante los giros impuestos sobre el mismo (Figura 4a).

$$q(x) = k_w w(x) \quad (5)$$

$$m(x) = k_\beta \beta(x) \quad (6)$$

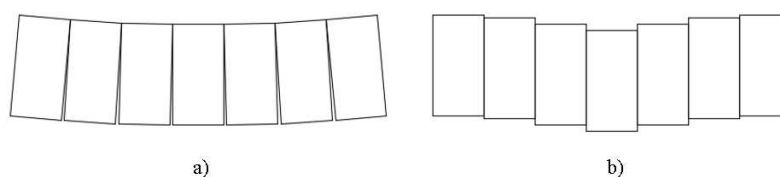


Figura 1 - Patrones de deformación. a) Flexional. b) Dislocación

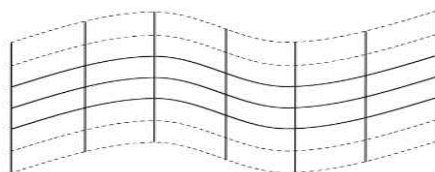


Figura 2 – Deformación de campo libre (corte puro)

Donde $w(x)$ es la deflexión en cualquier punto de la superficie de interacción, $q(x)$ es la presión de contacto, $\beta(x)$ los giros de las secciones que interactúan y $m(x)$ es la reacción rotacional. Los coeficientes de proporcionalidad constantes característicos del medio, k_w y k_β , son obtenidos mediante las formulaciones analíticas de Novak et al (1978) en función de las dimensiones de la estructura, los parámetros estáticos y dinámicos del medio y las características de la excitación sísmica, tomando solo la parte real de los mismos.

El equilibrio diferencial de un sistema que contemple lo expuesto anteriormente, puede verse en la Figura 4b llegando a que

$$Q(x)' = -q^* = -(q - k_w w_r) \tag{7}$$

$$M(x)' = Q + m^* = Q + m - k_\beta \beta \tag{8}$$

Finalmente, el sistema que gobierna el comportamiento de una viga de Timoshenko sobre fundación elástica con rigidez axial y rotacional:

$$\beta^{IV} - \left(\frac{k_\beta}{EI} + \frac{k_w}{GA_\kappa}\right)\beta^{II} + \left(\frac{k_\beta}{EI} + \frac{k_w k_\beta}{GA_\kappa}\right)\beta = 0 \tag{9}$$

Siendo la representación del problema una ecuación diferencial lineal homogénea de cuarto orden a coeficientes constantes en función de los giros de las secciones. Existen cuatro posibles raíces según el planteo.

$$\lambda_i = \pm \left[\left(\frac{k_\beta}{2EI} + \frac{k_w}{2GA_\kappa}\right) \pm \left(\frac{k_\beta}{2EI} + \frac{k_w}{2GA_\kappa}\right)^2 - \left[\left(\frac{k_w}{EI} + \frac{k_w k_\beta}{EIGA_\kappa}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

Al depender el problema de dos parámetros estructurales y dos parámetros representativos del medio, no es posible determinar una longitud característica única, mas se propone como una medida geométrica y de normalización que represente al conjunto suelo – estructura, la media geométrica de las mismas definida como

$$\Lambda = \sqrt[4]{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4} \tag{11}$$

La incorporación de los efectos de interacción a la Ec. 9 exige su planteo en términos de desplazamientos relativos, entonces

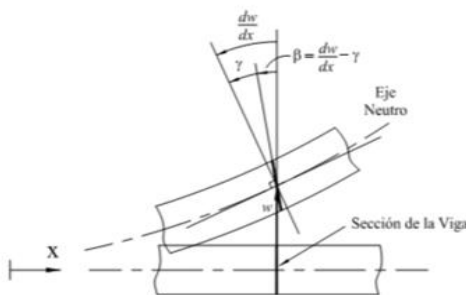


Figura 3 - Viga de Timoshenko.(Contreras, 2015)

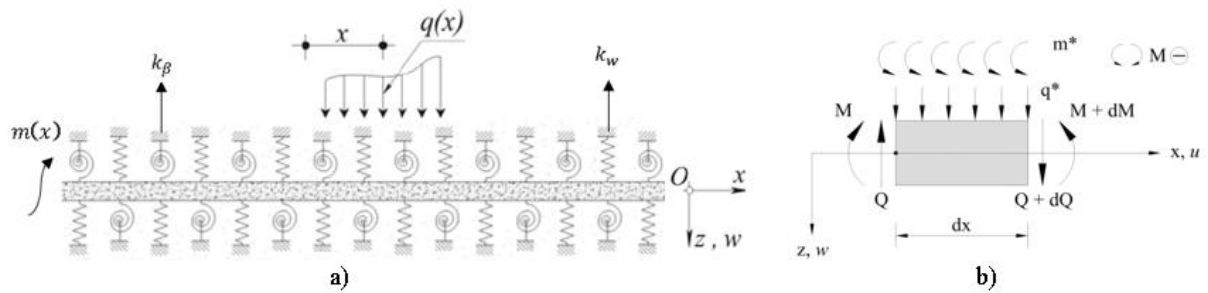


Figura 4 – a) Modelo de ELE. b) Equilibrio diferencial (Contreras, 2015)

$$w_r = w_e - w_{ff} \tag{12}$$

$$\beta_r = \beta_e - \beta_{ff} \tag{13}$$

Donde w_e y β_e son las funciones de desplazamiento y de rotación de la sección de la viga respectivamente y w_{ff} y β_{ff} son los desplazamientos y rotaciones de campo libre (aquellos obtenidos sin tener en cuenta la existencia física de la estructura).

Es importante recordar que el campo de desplazamientos adoptado como modelo de deformación del medio es un modelo de corte puro (Figura 2), el cual lo considera infinitamente rígido a flexión, lo que exige k_β distinto de cero. En estas condiciones, un evento sísmico generará un campo de desplazamientos constituido solo por desplazamientos transversales a la dirección de propagación de la onda y las rotaciones resultarán despreciables, siendo $\beta_{ff} = 0$.

Se propone como excitación externa una función lineal (Ec. 16). Bajo estas condiciones, el giro en el segmento estudiado es constante, por lo tanto, la ecuación diferencial toma la siguiente forma,

$$w_{ff} = w_0 \frac{x}{L} \tag{16}$$

$$w'_{ff} = \frac{w_0}{L} \tag{17}$$

$$\frac{d^4 \beta_e}{dx^4} - \left(\frac{k_\beta}{EI} + \frac{k_w}{GA_\kappa} \right) \frac{d^2 \beta_e}{dx^2} + \left(\frac{k_\beta}{EI} + \frac{k_w k_\beta}{GA_\kappa} \right) \beta_e = k_w w'_{ff} \tag{18}$$

Con lo cual se plantea como función de respuesta particular,

$$\beta_e^p = B_0 \tag{19}$$

Sustituyendo β_e^p en Ec. 18, se llega a que,

$$B_0 = \frac{w_0}{L} \left(1 + \frac{k_\beta}{GA_\kappa} \right)^{-1} \tag{20}$$

Obteniéndose así la solución particular del problema ante un desplazamiento lineal como modelización de una excitación sísmica. La solución completa, se obtiene con condiciones de borde de corte y momento nulo en los extremos. Las expresiones para la deformación de corte y curvatura en la estructura modelada como viga de Timoshenko son,

$$\gamma_e = (w_e' - \beta_e) = \frac{Q}{GA_\kappa} \tag{21}$$

$$\kappa_e = \beta_e' = -\frac{M}{EI} \tag{22}$$

Siendo γ_e las deformaciones seccionales de corte y κ_e la curvatura del túnel.

3. RESULTADOS

Tomando un valor de giro constante impuesto por el sismo $w_o/L = 0,1$, se busca evaluar qué sucede con los momentos flectores (M) y los esfuerzos de corte (Q), con las curvaturas y distorsiones de corte en las secciones, analizar la sensibilidad del sistema a las características estructurales y finalmente la modelización numérica por elementos finitos para comparar y evaluar la precisión del modelo analítico.

Se considera como parámetro característico de la esbeltez de la estructura a la relación entre la longitud del segmento (L) y el diámetro exterior de la misma (D). En los casos estudiados, el diámetro exterior varía tomando valores entre 2 y 15 metros. El diámetro interior se considera como un 7% menos del diámetro exterior.

3.1. Análisis de las respuestas máximas en función de parámetros estructurales.

En la [Figura 6](#), se observa el comportamiento flexional para ELE de distintos diámetros, donde se grafican los valores máximos de momentos flectores normalizados en función de la esbeltez de la ELE. Los resultados se muestran en escala semilogarítmica para una mejor visualización. En primera instancia, mientras menor es el diámetro, menores son los momentos flectores que se desarrollan internamente. Es interesante observar que los esfuerzos tienen tendencia a crecer asintóticamente a partir de esbelteces iguales a 1, mientras que, para valores menores, los momentos flectores decaen significativamente con tendencia no lineal.

En la [Figura 7](#), donde se grafican los máximos esfuerzos de corte en función de la esbeltez de la ELE, se observa que, similar al gráfico anterior, los esfuerzos se reducen al reducir el diámetro de la ELE. Para esbelteces menores a 1, los esfuerzos de corte caen considerablemente mostrando un comportamiento no lineal. A partir de esbelteces igual a 1, los esfuerzos de corte toman valores que tienden a un valor máximo al aumentar la relación L/D.

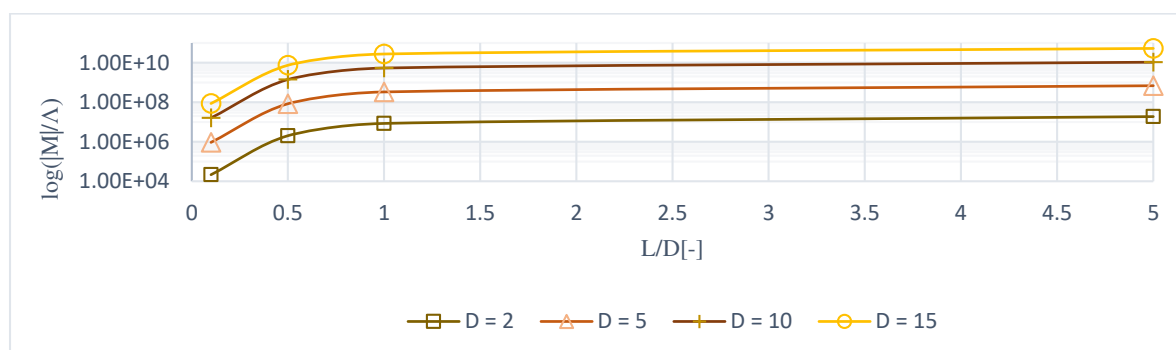


Figura 6 - Momento flector vs. esbeltez para distintas ELE

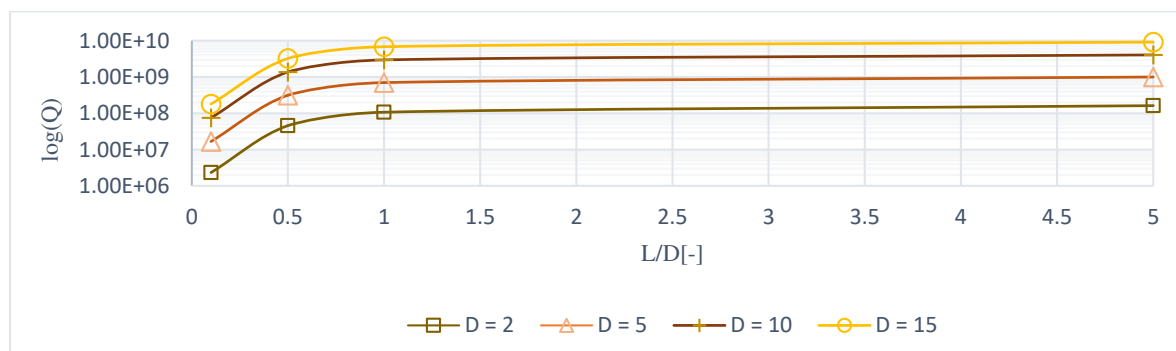


Figura 7- Esfuerzo de corte vs. esbeltez para distintas ELE

Si ahora, en vez de los esfuerzos, se grafican las deformaciones, es destacable ver en las [Figura 8](#) y [Figura 9](#), un comportamiento de análoga naturaleza. En estos casos, la respuesta tanto de las curvaturas normalizadas, como de las distorsiones de corte para todo tipo de ELE, se vuelve independiente de las dimensiones y parámetros de la estructura, y de las propiedades del medio.

3.2. Verificación numérica

Con el objetivo de verificar las hipótesis del modelo analítico, se realizaron una serie de simulaciones numéricas en un modelo tridimensional de elementos finitos a modo de comparación. El programa utilizado en la simulación fue ABAQUS. Tanto para el suelo, como para el túnel se utilizaron elementos tetraédricos cuadráticos de diez nodos de tensión tridimensional (C3D10).

El túnel del modelo tiene 15 metros de diámetro, el suelo 100 metros de ancho y 60 metros de altura. Las longitudes del dominio y del túnel varían según la esbeltez para cada caso ([Figura 10a](#)). En la [Figura 10b](#) puede verse el desplazamiento de corte aplicado al suelo, mientras que en la [Figura 10c](#), se observa el desplazamiento inducido en el túnel.

En la [Figura 11](#) se pueden observar los valores absolutos de los momentos flectores obtenidos mediante el modelo analítico y el numérico. Las cajas naranjas representan los máximos momentos flectores obtenidos en la modelación de elementos finitos.

Los resultados numéricos muestran un ajuste apropiado al modelo analítico. Se puede ver que la tendencia de disminución de los esfuerzos al disminuir las esbelteces se replica, confirmando lo predicho analíticamente.

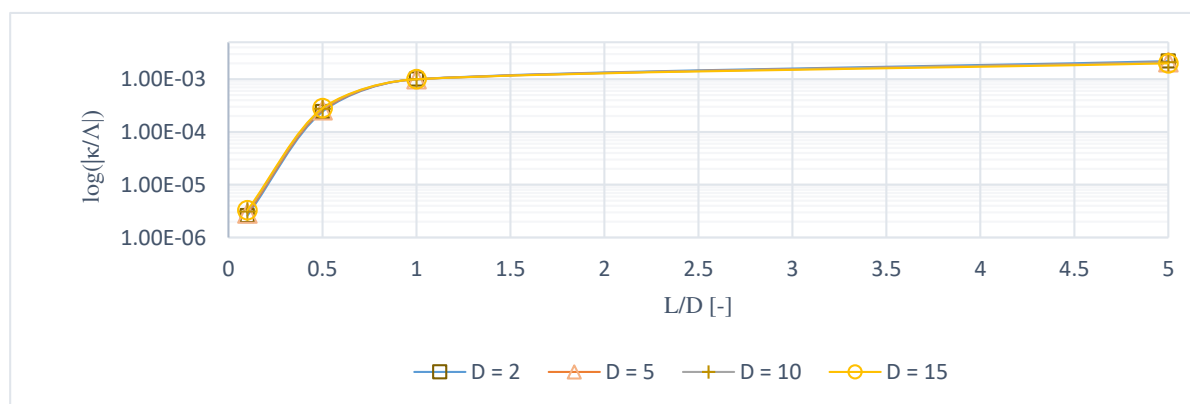


Figura 8 - Curvaturas normalizadas vs. esbelteces en función de D

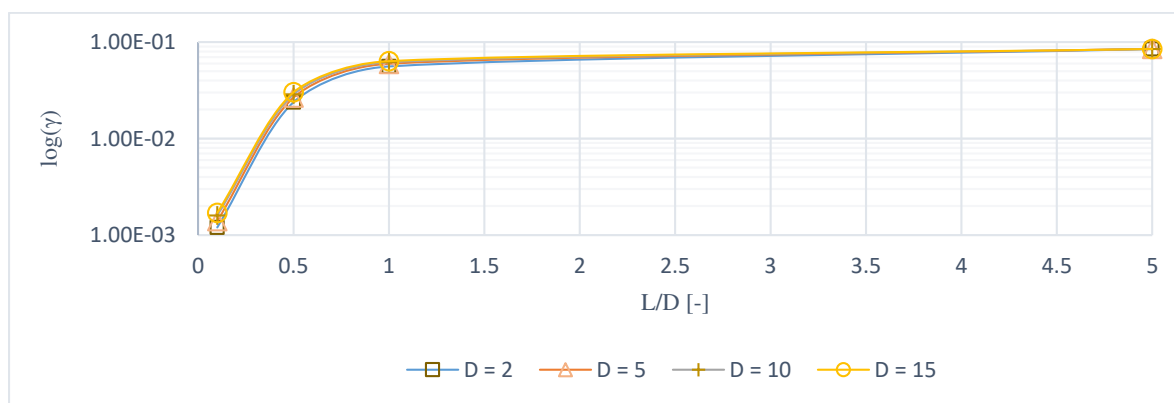


Figura 9 - Distorsiones de corte vs. esbelteces en función de D

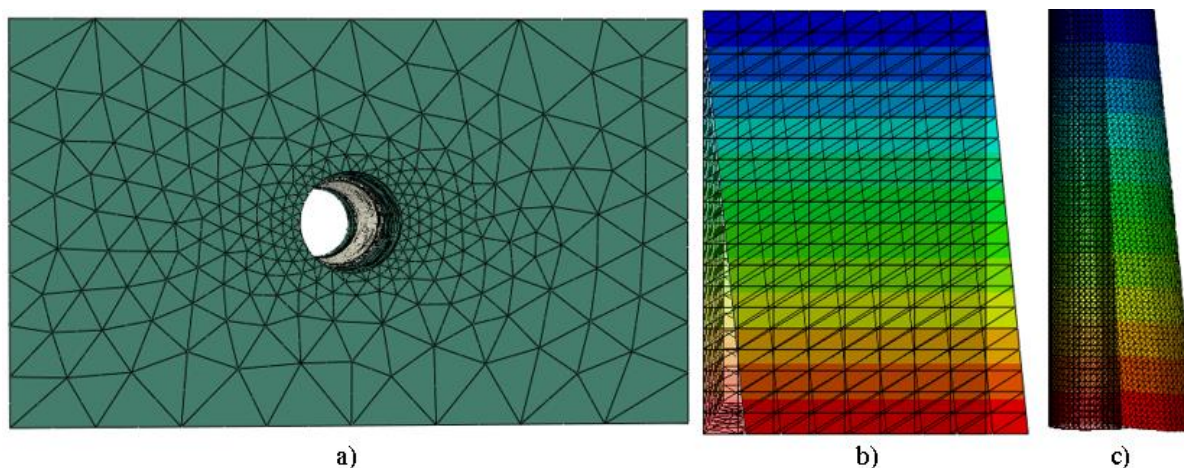


Figura 10 - Modelo de elemento finitos. a) Suelo-túnel. b) Desplazamiento suelo. c) Desplazamiento túnel

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el trabajo presente se modeló una estructura longitudinal enterrada teniendo en cuenta la interacción suelo – estructura, sometida a una onda de corte que viaja paralela al eje longitudinal de la misma. Esta onda se modeló como un desplazamiento lineal, generando un giro constante a lo largo de la ELE (Figura 2) y a esta última, como una viga de Timoshenko sobre fundación elástica con rigidez en el sentido de los desplazamientos y rotacional. Luego, comparando los momentos flectores, esfuerzos cortantes, las máximas curvaturas normalizadas y distorsiones de corte para distintas relaciones de esbeltez (L/D), se observó en primer lugar, el comportamiento del sistema para ELE de diámetros externos de 2, 5, 10 y 15 metros. Finalmente, con el objeto de verificar numéricamente la precisión de la ecuación desarrollada, se realizaron simulaciones mediante el método de elementos finitos, comparando, para un túnel de 15 metros de diámetro, los máximos momentos flectores al variar la longitud del mismo. En base a los resultados comentados en las Figuras 6 - 10, se observa que, los valores absolutos de momentos flectores máximos normalizados según la media geométrica, muestran un comportamiento no lineal para esbelteces menores a 1, creciendo asintóticamente hasta un valor máximo, a partir de esta relación L/D . Este comportamiento es similar para las distorsiones de corte. A mayor diámetro, mayores esfuerzos se desarrollan.

Para esbelteces menores a 1 los esfuerzos de corte caen considerablemente con tendencia no lineal, creciendo asintóticamente para relaciones de L/D mayores a 1. Al igual que en el comportamiento flexional, a mayor diámetro, mayor esfuerzo se desarrolla.

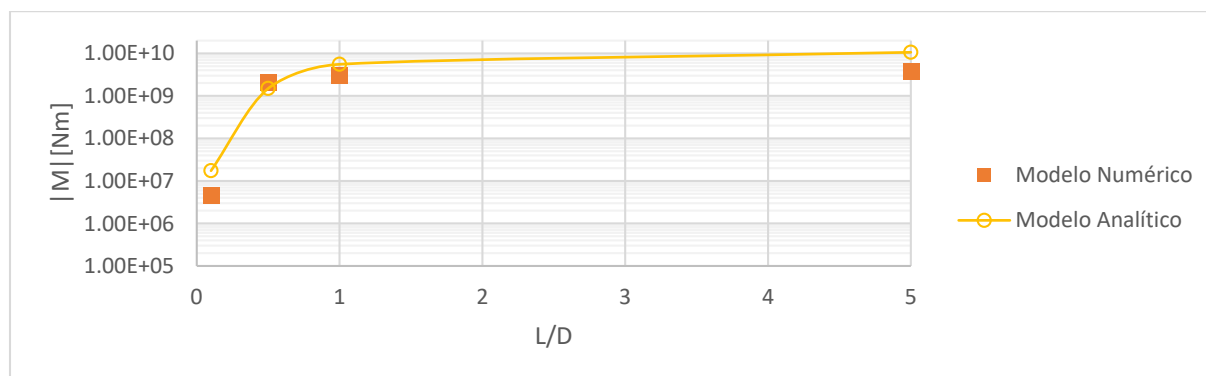


Figura 11 - Comparación de modelos numéricos y analíticos

Las curvaturas normalizadas como las distorsiones de corte, se vuelven independiente de las dimensiones y parámetros de la estructura y el medio.

Mediante las observaciones anteriores, es posible destacar que, cuando se considera la interacción de las estructuras con el medio, los resultados varían según cada caso en particular, remarcando la importancia de estudiar la ISE, volviéndose más complejo el comportamiento del sistema, mientras más parámetros se consideren. A la vez, es interesante destacar que cortar las ELE, considerando estructuras poco esbeltas (L/D menor a 1), en todos los casos, menores son los esfuerzos flexionales y cortantes desarrollados en las secciones.

Para finalizar, si bien la modelación numérica muestra ajustarse al modelo analítico en el comportamiento global, se observaron diferencias entre ambas metodologías, siendo necesario seguir estudiando ambos modelos.

REFERENCIAS

- Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Kourkoulis, R., Georgarakos, T. & Gazetas, G. (2008). Behaviour of Deep immersed tunnel under combined normal fault rupture and subsequent seismic shaking. *Bull Earthquake eng.*, 6, 213-239.
- Bathe, K. J. (1996). Finite Element Procedures. *Prentice-Hall, Inc.*
- Bobet, A. (2011). Comportamiento sísmico de túneles. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidente e Infraestructura*. Vol. 12(1), pp. 69 - 75.
- Bobet, A., Fernandez, G., Huo, H., & Ramirez, J. (2008). A practical iterative procedure to estimate seismic-induced deformations of shallow rectangular structures. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(7), 923-938.
- Constantopoulos, I. V., Motherwell, J. T., & Hall, J. R. (1979). Dynamic analysis of tunnels. *Numerical Methods in Geomechanics* (pp. 831-840). Balkema Rotterdam.
- Contreras, R. (2015). Respuesta sísmica de estructuras longitudinales enterradas. *Tesis de maestría*. FCEFyN – UNC.
- Dowding CH, Rozen A (1978) Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *J Geotech Eng Div ASCE 104(GT2):175–191*
- Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I., & Yao, C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and underground space technology*, 16(4), 247-293.
- Hashash, Y., Tseng, W. S., & Krimotat, A. (1998). Seismic soil-structure interaction analysis for immersed tube tunnels retrofit. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III* (pp. 1380-1391). ASCE.
- Jaramillo, J. D. (2017). *Design and construction of a low speed wind tunnel* (Doctoral dissertation, Houghton College).
- Novak M., Nogami, T. & Aboul-Ella, F. (1978). Dynamic Soil Reaction for Plane Strain Cases. *Technical Publications, ASCE, Vol. 104(4)*.
- Owen, G. N., & Scholl, R. E. (1981). Earthquake engineering of large underground structures. *NASA STI/Recon Technical Report N, 82*.
- Sharma, S., & Judd, W. R. (1991). Underground opening damage from earthquakes. *Engineering Geology*, 30(3-4), 263-276.
- St John, C. M., & Zahrah, T. F. (1987). Aseismic design of underground structures. *Tunnelling and underground space technology*, 2(2), 165-197.
- Wang, J. N. (1993). *Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach*. Parsons Brinckerhoff.

- Winkler, E. (1867). Die lehre elastizität und festigkeit. *Prague*, Dominicus.
- Yu, H., Yuan, Y. & Bobet, A. (2017). Seismic analysis of long tunnels: A review of simplified and unified methods. *Underground Space*. 2, 73-87.
- Yu, H., Zhang, Z., Chen, J., Bobet, A., Zhao, M., & Yuan, Y. (2018). Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel liners with sharp stiffness transition. *Tunneling and underground space technology*, 77, 103-114.