

EVALUACIÓN DE DEMANDAS SÍSMICAS EN PILOTES EMBEBIDOS EN MEDIOS ESTRATIFICADOS

Soffietti, Franco Primo^a; Turello, Diego Fernando^b; Cocco, Leonardo José^c; Pinto,
Federico^d

^aFCEFYN (UNC); IDIT (UNC-CONICET), fpsoffietti@unc.edu.ar

^bFCEFYN (UNC); IDIT (UNC-CONICET), diego.turello@unc.edu.ar

^cFCEFYN (UNC), lcocco@unc.edu.ar

^dFCEFYN (UNC); IDIT (UNC-CONICET), fpinto@unc.edu.ar

Palabras clave: Interacción cinemática, Evaluación sísmica, Medios estratificados

RESUMEN

La interacción cinemática inducida por la propagación de ondas sísmicas puede generar demandas significativas en pilotes, especialmente en perfiles estratificados con grandes contrastes de rigidez. Si bien los modelos numéricos tridimensionales permiten representar con gran detalle el problema, su elevado costo computacional limita su utilización en estudios paramétricos y en etapas preliminares de diseño. En este trabajo se presenta una formulación analítica de aplicación práctica para evaluar las demandas cinemáticas en pilotes embebidos en suelos estratificados sometidos a sismos. El modelo se basa en una viga de Timoshenko sobre fundación de Winkler de dos parámetros que incorpora reacciones transversales y rotacionales del suelo. Los resultados analíticos se comparan con un modelo de elementos finitos tridimensional considerando base rígida y flexible. Los resultados muestran una buena concordancia entre los modelos, reproduciendo adecuadamente desplazamientos y tensiones a lo largo del pilote. El modelo analítico presentado constituye una herramienta eficiente para la evaluación preliminar de demandas sísmicas en fundaciones profundas y para el análisis paramétrico de problemas de interacción suelo–estructura.

ABSTRACT

Kinematic interaction induced by seismic wave propagation may generate significant demands in piles, particularly in layered soil profiles with strong stiffness contrasts. Although three-dimensional numerical models can represent the problem in great detail, their high computational cost limits their use in parametric studies and in preliminary design stages. This work presents an analytical formulation of practical applicability for evaluating kinematic demands in piles embedded in layered soils subjected to seismic loading. The model is based on a Timoshenko beam resting on a two-parameter Winkler foundation that incorporates both transverse and rotational soil reactions. The analytical results are compared with three-dimensional numerical models considering both rigid and compliant base conditions. The results show good agreement between the models, adequately reproducing displacements and stresses along the pile shaft. The analytical model thus provides an efficient tool for the preliminary evaluation of seismic demands in deep foundations and for the parametric analysis of soil–structure interaction problems.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Las demandas sísmicas sobre pilotes pueden clasificarse, en términos generales, en dos categorías (Wolf 1985; Fan et al. 1991): a) interacción inercial, asociada con la respuesta dinámica de la superestructura, y b) interacción cinemática, que surge de las deformaciones del suelo inducidas por la propagación de ondas sísmicas (Novak 1974; Mylonakis y Gazetas 2000). Las demandas inerciales afectan principalmente a la cabeza de los pilotes y tienden a atenuarse con la profundidad (por ejemplo, Karatzia y Mylonakis 2017). En contraposición, los efectos cinemáticos pueden inducir esfuerzos internos significativos a lo largo de todo el fuste del pilote; por ello, el daño no se limita a la cabeza del pilote, sino que con frecuencia se extiende a zonas más profundas, particularmente en las interfaces estratigráficas con contrastes abruptos del módulo de corte. En muchos casos, las demandas cinemáticas superan a las inducidas por los efectos inerciales (Kramer y Stewart 2024).

Las lecciones aprendidas de terremotos pasados han demostrado que ignorar los fenómenos cinemáticos puede conducir a predicciones inadecuadas de la respuesta estructural (Kanya 1982; Wolf 1985; Mylonakis y Gazetas 2000; Nikolaou et al. 2001). Se han documentado casos de daño en distintos tipos de estructuras fundadas sobre pilotes, como puentes, edificios y presas (Mizuno 1987; Tokimatsu et al. 1996; Kramer y Stewart 2024), frecuentemente asociados con fisuración, plastificación localizada y falla estructural (Boulanger et al. 1999; Finn 2005). Estas observaciones confirman el papel decisivo de la interacción cinemática suelo–pilote en la respuesta sísmica y justifican la necesidad de disponer de herramientas analíticas precisas para predecir las demandas sísmicas y proporcionar soluciones de referencia confiables para el diseño sismorresistente (por ejemplo, Eurocódigo 8). Por esta razón, el presente estudio se centra exclusivamente en la interacción cinemática; en consecuencia, la superestructura no se incluye deliberadamente con el fin de aislar este mecanismo de interacción.

El estudio de la interacción cinemática comprende la evaluación de la respuesta sísmica en campo libre del medio y los desplazamientos resultantes impuestos por el terreno al pilote (Kramer y Stewart 2024). Además, requiere una representación adecuada del mecanismo de interacción suelo–estructura, que gobierna la manera en que estas deformaciones y presiones impuestas por el terreno se transfieren al pilote y se transforman en esfuerzos internos (Di Laora et al. 2012; Maiorano et al. 2009).

Los avances en las técnicas de modelado numérico se han convertido en las principales herramientas para analizar este tipo de problemas (Fan et al. 1991; Kavvads y Gazetas 1993; Turello et al. 2016). No obstante, suelen implicar un costo computacional elevado y una considerable complejidad de modelado. En consecuencia, las formulaciones analíticas simplificadas continúan desempeñando un

papel central en las etapas preliminares de diseño y en las investigaciones paramétricas.

Las contribuciones pioneras de Tajimi (1969), Novak y Aboul-Ella (1978), Dobry y O'Rourke (1983), Gazetas y Dobry (1984), y posteriormente Mylonakis (2001) y otros investigadores (por ejemplo, Nikolaou et al. 2001; Sica et al. 2011; Di Laora et al. 2012), establecieron soluciones analíticas basadas en formulaciones de medio continuo elástico y en modelos de vigas sobre fundación elástica, tales como vigas de Euler–Bernoulli o de Timoshenko apoyadas sobre fundaciones de Winkler, Vlasov o Pasternak. En el presente estudio, el pilote se modela como una viga de Timoshenko con el fin de proporcionar una representación general de su comportamiento estructural, permitiendo captar los posibles efectos de deformación por corte, particularmente en perfiles de suelo estratificados donde fuertes contrastes de rigidez pueden influir en la respuesta cinemática.

Investigaciones recientes han demostrado que las soluciones clásicas mencionadas pueden subestimar las demandas cinemáticas, particularmente en perfiles de suelo rígidos. Alamo et al. (2018) y Soffietti et al. (2022, 2024a) propusieron una mejora de estas herramientas analíticas mediante la introducción de un modelo tipo Winkler considerando una fundación de dos parámetros, con resortes traslacionales y rotacionales del suelo. Estudios posteriores demostraron que despreciar la rigidez rotacional en la interfaz suelo–pilote puede conducir a una subestimación significativa de las demandas cinemáticas de flexión (Soffietti y Pinto 2026). Esta observación motiva la incorporación explícita de las reacciones traslacionales y rotacionales del suelo en la formulación adoptada en el presente estudio.

Como la mayoría de las formulaciones analíticas existentes están enfocadas en cargas armónicas o pseudoestáticas, se vuelve interesante explorar la aplicación a demandas inducidas por registros sísmicos en el dominio del tiempo.

En este contexto, el presente estudio extiende un modelo de interacción suelo–pilote de dos parámetros, basado en la teoría de vigas de Timoshenko, al análisis de pilotes embebidos en suelos estratificados sometidos a registros sísmicos reales. La formulación incorpora tanto las reacciones traslacionales como las rotacionales del suelo y se acopla con una representación en el dominio de la frecuencia de la propagación de ondas sísmicas en medios estratificados. Las predicciones analíticas se validan mediante comparaciones con análisis tridimensionales por elementos finitos y con soluciones simplificadas disponibles en la literatura, proporcionando una evaluación consistente del desempeño del modelo y de su aplicabilidad para estimar las demandas sísmicas de origen cinemático.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema objeto de estudio consiste en un pilote circular embebido en un depósito de suelo estratificado de dos capas (Figura 1), con cabeza libre y punta empotrada rotacionalmente, es decir que sigue los desplazamientos de la base, pero el giro está impedido (socket pile). El pilote posee un radio r_0 , L , rigidez flexional EI , rigidez al corte GA y densidad de masa ρ . Los espesores de las capas de suelo se denotan mediante h_j , donde $j = 1$ corresponde a la capa superior y $j = 2$ a la inferior. Cada capa de suelo se modela como un medio viscoelástico homogéneo caracterizado por un módulo de Young complejo $E_{sj}^* = E_{sj}(1 + 2i\beta_{sj})$, coeficiente de Poisson ν_{sj} , densidad ρ_{sj} , velocidad de onda de corte compleja V_{sj}^* y amortiguamiento histérico β_{sj} . Se supone que no existe separación entre el pilote y el suelo.

La excitación sísmica considerada en este estudio corresponde al terremoto de Friuli (1976), registrado en la estación Tolmezzo (A-TMZ000), con magnitud $M_w = 6.5$ y una aceleración máxima del terreno $PGA = 0.357g$. Aunque esta estación se encuentra sobre un suelo de Clase B (suelo rígido/roca blanda) y no sobre un afloramiento de roca rígida, se adopta aquí como representación del movimiento en el nivel del basamento rígido.

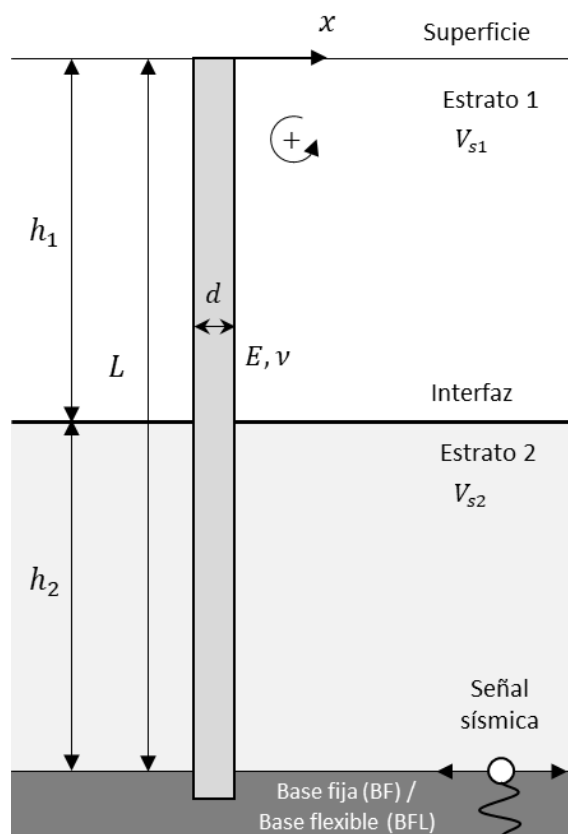


Figura 1. Pilote embebido en un depósito de suelo estratificado de dos capas sometido a excitación sísmica.

Con el fin de realizar una comparación consistente entre condiciones de Base Fija (BF) y Base Flexible (BFL), se utiliza el mismo acelerograma como referencia en ambos casos (Figura 2). Para el modelo BF, este movimiento se prescribe directamente como desplazamiento en la base. Para el modelo BFL, la excitación se aplica como una condición de borde de esfuerzo cortante derivada de la onda incidente (considerada como la mitad del movimiento de afloramiento), permitiendo que el desplazamiento real de la base se calcule dinámicamente teniendo en cuenta el amortiguamiento por radiación (por ej., Kramer and Stewart 2024).

En la solución analítica, el registro sísmico se propaga a través del perfil de suelo estratificado utilizando una formulación en el dominio de la frecuencia basada en la propagación unidimensional de ondas de corte. El campo de desplazamientos resultante se impone como entrada cinemática al sistema suelo–pilote, cuyas ecuaciones gobernantes se resuelven en el dominio de la frecuencia para obtener las funciones de respuesta en frecuencia correspondientes a los desplazamientos, rotaciones, momentos flectores y fuerzas cortantes a lo largo del pilote. Finalmente, las historias temporales de la respuesta se reconstruyen mediante la transformada inversa de Fourier. Este enfoque fue adoptado con el propósito de establecer un marco de referencia uniforme para la comparación entre los modelos analítico y numérico, en concordancia con estudios previos sobre interacción cinemática.

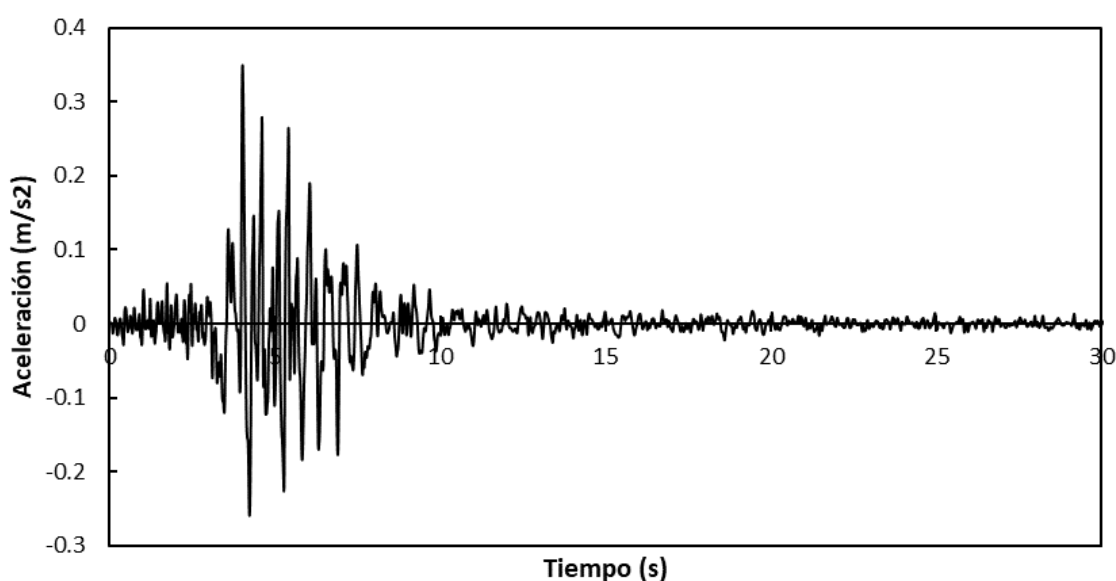


Figura 2. Aceleración del sismo de Friuli (1976) utilizada en el análisis.

VIGA DE TIMOSHENKO SOBRE FUNDACIÓN DE DOS PARÁMETROS

Organiza:

Mientras que en la práctica convencional suele omitirse la rigidez rotacional del suelo, en este estudio se incorpora una fundación elástica de dos parámetros con el fin de evitar la subestimación de las demandas cinemáticas, garantizando una representación más realista de la respuesta a flexión del pilote. Siguiendo los trabajos de Alamo et al. (2018) y Soffietti y Pinto (2026), se presenta un modelo de viga de Timoshenko apoyada sobre una fundación elástica que considera tanto resortes traslacionales K_s , como rotacionales K_φ (Figura 3a). En adelante, y por simplicidad, se omite el subíndice j , utilizado para identificar la capa de suelo correspondiente.

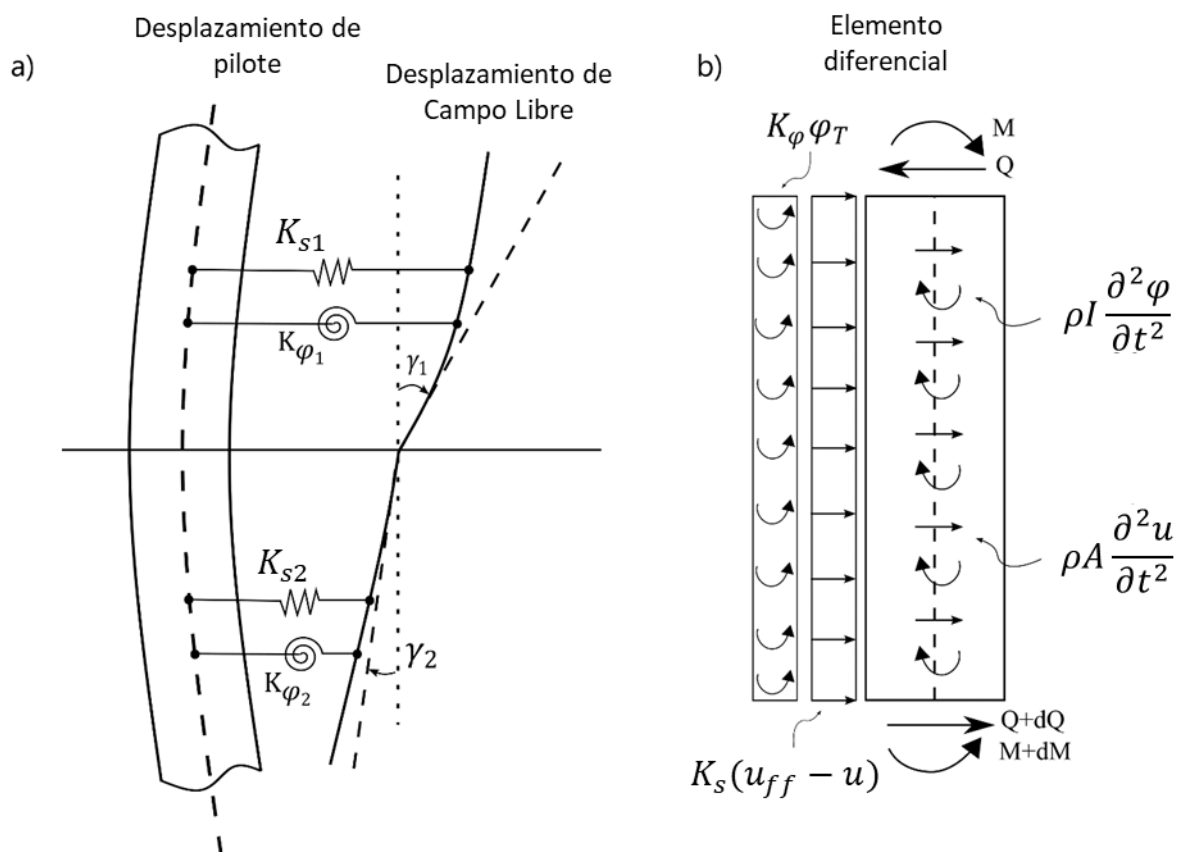


Figura 3. Representación de la interacción suelo–estructura: a) viga apoyada sobre una fundación elástica de dos parámetros; b) elemento diferencial de la viga en la capa superior del suelo.

Considerando el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 3b, el equilibrio de fuerzas y momentos sobre un elemento infinitesimal de la viga conduce a las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dQ}{dz} + p = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dz} + Q + m = 0 \quad (2)$$

donde Q es la fuerza cortante, p la reacción lateral del suelo, M el momento flector y m los momentos distribuidos ejercidos por el suelo como consecuencia de la rotación de la viga. Las leyes constitutivas que definen M y Q en la viga de Timoshenko son:

$$M = EI \frac{d\varphi}{dz} \quad (3)$$

$$Q = GA_k \gamma_{xz} = GA_k \left(\frac{dU}{dz} - \varphi \right) \quad (4)$$

donde E y G son los módulos de elasticidad longitudinal y transversal del pilote, respectivamente; U es el desplazamiento total de la viga; φ es la rotación de la sección transversal; y A_k es el área efectiva de corte. Por simplicidad, en adelante GA_k se denotará simplemente como GA .

Las fuerzas y los momentos distribuidos a lo largo de la viga, debidos a las reacciones del suelo y a las fuerzas de D'Alembert, se expresan como:

$$p = \rho A \omega^2 U + K_s (U_{ff} - U) \quad (5)$$

$$m = \rho I \omega^2 \varphi - K_\varphi \varphi \quad (6)$$

Considerando las relaciones constitutivas y el equilibrio de fuerzas, se obtiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria que gobierna el desplazamiento lateral de la viga en el dominio de la frecuencia:

$$\frac{d^4 U}{dz^4} - (\kappa_1 + \kappa_2) \frac{d^2 U}{dz^2} + \kappa_1 (\kappa_2 + \kappa_3) U = \kappa_4 (\kappa_2 + \kappa_3) U_{ff} - \kappa_4 \frac{d^2 U_{ff}}{dz^2} \quad (7)$$

donde U representa los desplazamientos laterales del pilote y U_{ff} el desplazamiento de campo libre, obtenido a partir de un análisis convencional de respuesta sísmica local del sitio. Los parámetros adimensionales se definen como: $\kappa_1 = \frac{(K_s - \rho A \omega^2)}{GA}$, $\kappa_2 = \frac{(K_\varphi - \rho I \omega^2)}{EI}$, $\kappa_3 = \frac{EI}{GA}$ y $\kappa_4 = \frac{K_s}{GA}$. Los resortes traslacionales y rotacionales del suelo, k_s y k_φ ,

respectivamente, se evalúan mediante una formulación propuesta en Soffietti y Pinto (2026).

La solución que satisface la ecuación diferencial puede ser expresada como:

$$U(z) = C_1 e^{\lambda_1 z} + C_2 e^{\lambda_2 z} + C_3 e^{\lambda_3 z} + C_4 e^{\lambda_4 z} + C_p U_{ff} \quad (8)$$

Donde λ_{1-4} son las raíces complejas de la ecuación, C_{1-4} las amplitudes que provienen de las condiciones de contorno y C_p es la amplitud de la solución particular relacionada a la carga dinámica:

$$\lambda_{1-4} = \pm \sqrt{\frac{(\kappa_1 + \kappa_2) \pm \sqrt{(\kappa_1 + \kappa_2)^2 - 4\kappa_1(\kappa_2 + \kappa_3)}}{2}} \quad (9)$$

$$C_p = \frac{\kappa_4(\kappa_2 + \kappa_3) + k_s^2 \kappa_4}{k_s^4 + (\kappa_1 + \kappa_2)k_s^2 + \kappa_1(\kappa_2 + \kappa_3)} \quad (10)$$

Una vez conocidos los desplazamientos laterales del pilote, la rotación de la sección transversal, el momento flector y la fuerza cortante pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$\varphi(z) = \frac{1}{\kappa_2 + \kappa_3} \left[\frac{d^3 U}{dz^3} - (\kappa_1 - \kappa_3) \frac{dU}{dz} + \kappa_4 \frac{dU_{ff}}{dz} \right] \quad (11)$$

$$M(z) = \frac{EI}{\kappa_2 + \kappa_3} \left[\frac{d^4 U}{dz^4} - (\kappa_1 - \kappa_3) \frac{d^2 U}{dz^2} + \kappa_4 \frac{d^2 U_{ff}}{dz^2} \right] \quad (12)$$

$$Q(z) = -\frac{GA}{\kappa_2 + \kappa_3} \left[\frac{d^3 U}{dz^3} - (\kappa_1 + \kappa_2) \frac{dU}{dz} + \kappa_4 \frac{dU_{ff}}{dz} \right] \quad (13)$$

Las condiciones de borde consideradas en este estudio corresponden a un pilote con cabeza libre ($z = 0$) y empotrado en la punta ($z = L$). En la condición de base BF, el desplazamiento del Estrato 2 es idéntico al movimiento de la roca. En la condición de base BFL, en cambio, el desplazamiento en la base no es conocido a priori. Por lo tanto, en lugar de prescribir un desplazamiento, se impone una tensión cortante en la base de la segunda capa para representar la impedancia finita de la roca y el correspondiente amortiguamiento por radiación. Por razones de brevedad, los detalles matemáticos no se presentan aquí; sin embargo, una descripción completa puede

encontrarse en (Kramer and Stewart, 2024).

RESULTADOS

Para evaluar el desempeño y la robustez de la formulación analítica propuesta, se llevó a cabo un estudio comparativo utilizando un modelo tridimensional de elementos finitos sólidos en ABAQUS. Esta comparación proporciona una referencia tanto frente a simulaciones de medio continuo de alta fidelidad como frente a enfoques numéricos orientados a la práctica de la ingeniería.

El modelo en ABAQUS (Simulia, 2017) configura un sistema tridimensional suelo–pilote con un medio continuo de suelo de dos capas contenido en un dominio de $60\text{ m} \times 60\text{ m} \times 60\text{ m}$ (Figura 4). Tanto el suelo como el pilote se discretizan mediante elementos sólidos hexaédricos lineales de ocho nodos con integración reducida (C3D8R).

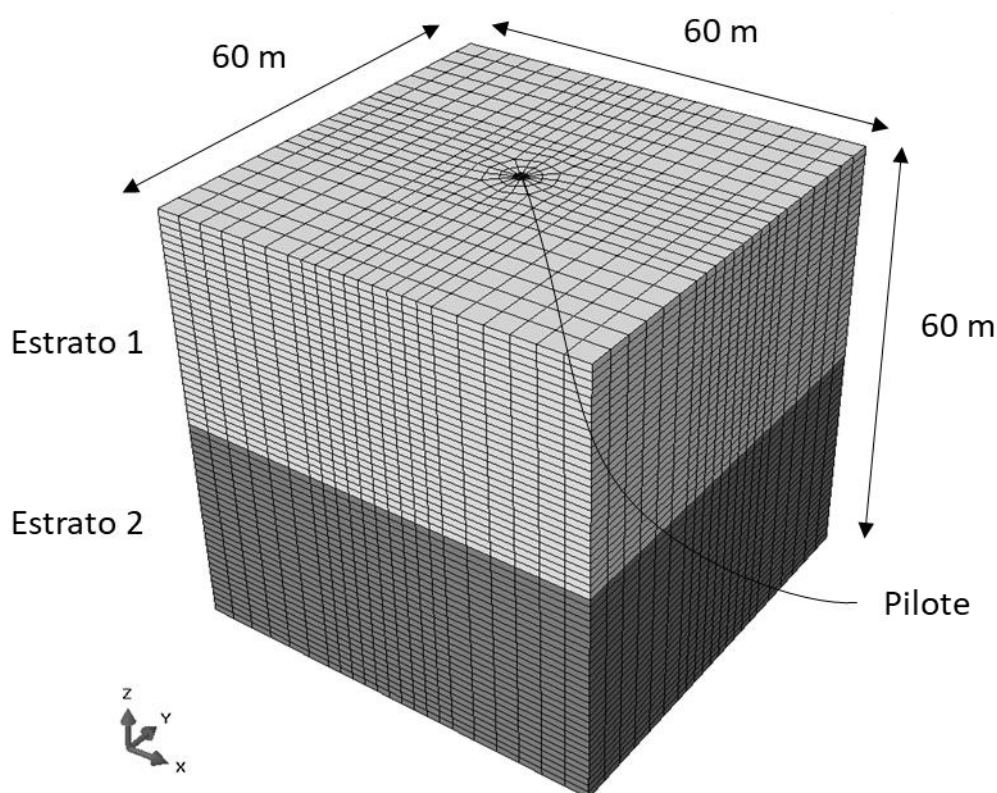


Figura 4. Representación del modelo de elementos finitos utilizado.

En la interfaz suelo–pilote se adoptó una malla regular para garantizar una adecuada representación de la interfaz. Para la condición de Base Fija (BF), la excitación sísmica se aplica directamente como una aceleración horizontal prescrita en los nodos

inferiores del dominio de suelo. En cambio, para la condición de Base Flexible (BFL), la aceleración se aplica a una placa rígida subyacente, acoplada a la base del dominio de suelo mediante amortiguadores viscosos. Esta configuración mecánica incorpora de manera efectiva el amortiguamiento por radiación y simula la flexibilidad del semiespacio subyacente, ya que el límite inferior del suelo no está rígidamente vinculado al movimiento impuesto. Los límites laterales se restringen en las direcciones transversal y vertical, permaneciendo libres en la dirección de propagación del movimiento sísmico. La superficie del terreno se considera libre y la punta del pilote se restringe frente a rotaciones.

Las propiedades del pilote y del suelo utilizadas en este estudio fueron seleccionadas con el propósito de mantener un marco de referencia consistente con los parámetros de modelado establecidos en Maiorano et al. (2009) y Soffietti y Pinto (2026). El pilote se caracteriza por $r_0 = 1\text{ m}$, $L = 60\text{ m}$, $\rho = 2400\text{ kg/m}^3$, $E = 3.0 \times 10^{10}\text{ Pa}$ y $\nu = 0.15$. A las capas de suelo se les asignaron las propiedades $E_{s1} = 5.5 \times 10^7\text{ Pa}$, $E_{s2} = 5.5 \times 10^8\text{ Pa}$, $\nu_{s1} = \nu_{s2} = 0.4$, $\beta_{s1} = \beta_{s2} = 0.10$, $\rho_{s1} = \rho_{s2} = 1950\text{ kg/m}^3$, $V_{s1} = 100\text{ m/s}$ y $V_{s2} = 317\text{ m/s}$. La adopción de estos valores específicos garantiza que el desempeño de la formulación analítica propuesta pueda validarse directamente frente a resultados numéricos previamente establecidos en la literatura. Para las soluciones numéricas se empleó amortiguamiento de Rayleigh, correspondiente a un amortiguamiento equivalente del 10 %, aplicado dentro del intervalo de frecuencias comprendido entre la primera y la segunda frecuencia natural del perfil de suelo (0.76–2.12 Hz para la condición BF y 0.80–2.46 Hz para la condición BFL). Este amortiguamiento del suelo se adoptó para aproximar la disipación histórica de energía equivalente esperada bajo niveles de deformación sísmica moderados a elevados.

Con el fin de estudiar el comportamiento de la solución propuesta, en la Figura 5 se observan las historias temporales del desplazamiento de la cabeza del pilote (u) para ambas condiciones de la base. Se puede ver una excelente concordancia, tanto para las condiciones BF como BFL, entre la solución analítica y el modelo numérico MEF. El modelo de base flexible muestra algunas diferencias menores en picos secundarios alrededor del segundo 15 y 25, atribuido a las simplificaciones del modelo analítico en su representación del amortiguamiento.

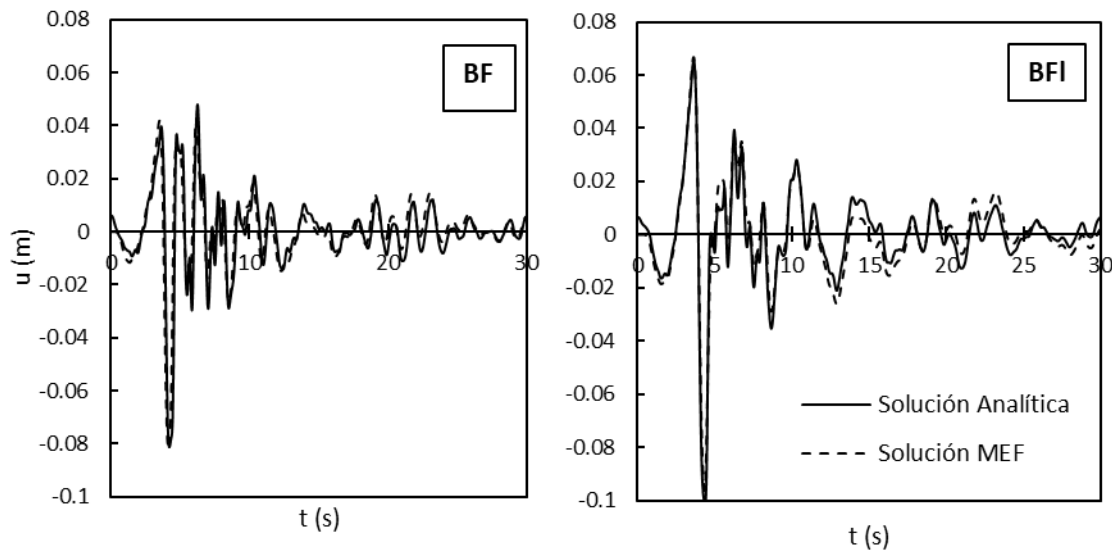


Figura 5. Historias temporales de los desplazamientos en la cabeza del pilote para: Base fija (BF) y Base flexible (BFI).

La Figura 6 ilustra las historias temporales de las tensiones flexionales (σ) en la interfaz del pilote, que es donde se concentran los picos en todo momento. Al igual que las historias de desplazamientos, la representación del modelo analítico sigue muy estrechamente los resultados numéricos, mostrando que su aplicabilidad se da para todos los tiempos evaluados.

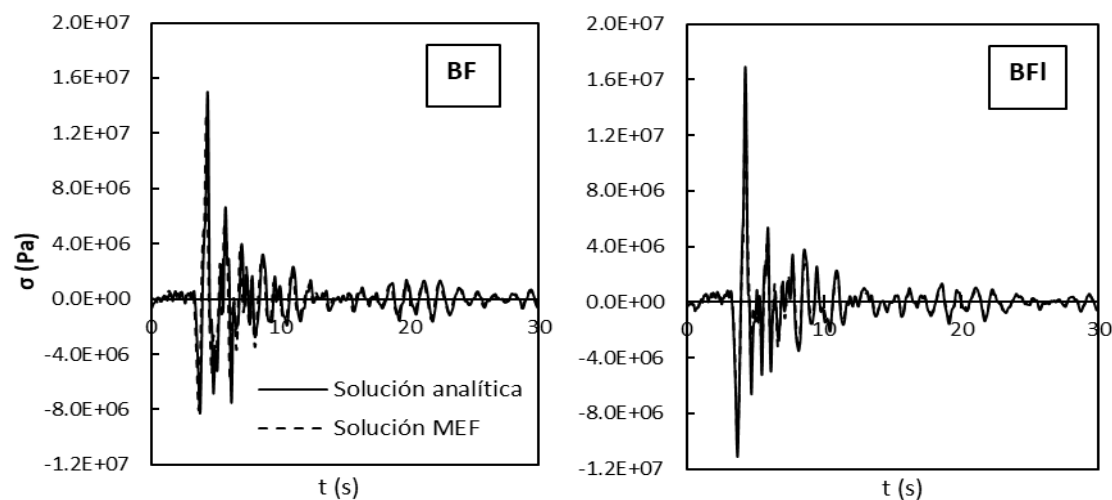


Figura 6. Distribución de las tensiones en la interfaz en función del tiempo.

En la Figura 7a se muestran los desplazamientos del pilote en altura para el tiempo

de máximo desplazamiento, tanto para la solución analítica, como para la solución numérica con ambas condiciones en la base del estrato. Se puede observar nuevamente una muy buena correspondencia entre ambos modelos. La solución analítica para la condición BFL muestra algunas diferencias mayores que el caso BF, pero la tendencia es la misma.

En la Figura 7b se observan las tensiones flexionales a lo largo del pilote para los mismos casos. Estas tensiones son las que se desarrollan en el tiempo de pico, que puede verse en la Figura 6. Nuevamente se observa una muy buena correlación entre los modelos. Las diferencias entre ambas soluciones para el caso BF son en promedio del 5%, mientras que, para el caso BFL, del orden del 10%. Ambas soluciones, con este margen de error, pueden considerarse adecuadas dentro de los márgenes ingenieriles.

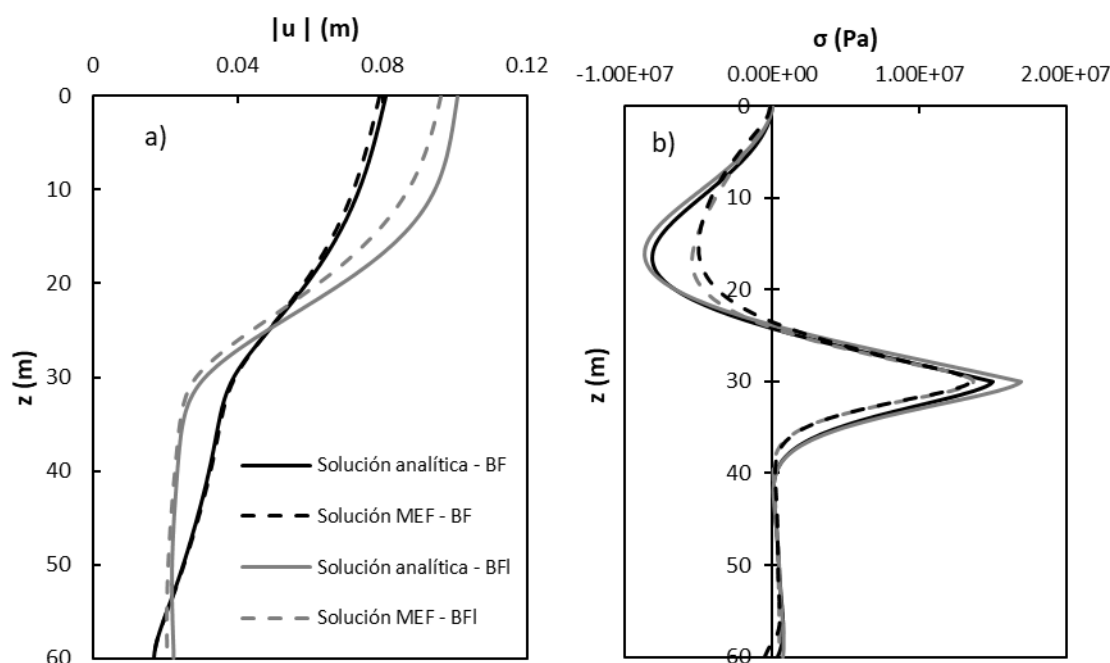


Figura 7. a) Distribución de los desplazamientos del pilote a lo largo del pilote, b) distribución de tensiones en altura.

Como en la actualidad, el modelo de uso más frecuente es el de Winkler, con un único resorte traslacional, se realizó también la comparación del modelo propuesto, considerando $K_\phi = 0$, simulando al modelo de fundación mencionado. Con el propósito de ilustrar la importancia relativa de los resortes rotacionales en el modelo analítico propuesto, la Figura 8 muestra una comparación de las tensiones a lo largo del pilote para el caso BF.

Los resultados indican que despreciar la rigidez rotacional conduce a una subestimación de las tensiones normales máximas de aproximadamente un 15 % para las condiciones estratigráficas consideradas en este estudio. Sin embargo, en estudios de la literatura (Soffiatti y Pinto 2022, 2026), estas diferencias aumentan considerablemente, al aumentar el contraste de rigidez entre los estratos.

Esta cuestión pone de manifiesto la necesidad de incorporar el resorte rotacional en las formulaciones a futuro, ya que los modelos actuales no logran representar adecuadamente la compleja interacción suelo–pilote en las interfaces entre capas.

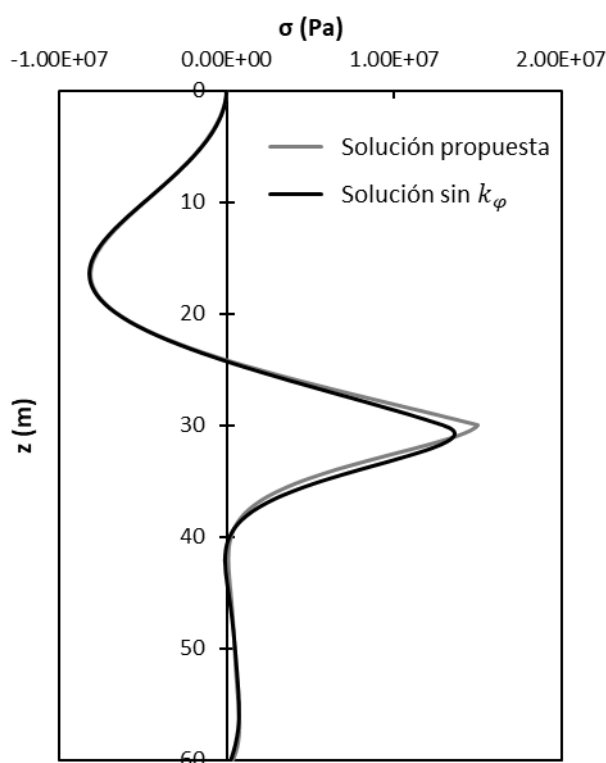


Figura 8. Comparación de la distribución en las tensiones flexionales para el modelo propuesto con y sin resorte rotacional.

CONCLUSIÓN

El presente estudio desarrolló un marco analítico para evaluar la respuesta sísmica cinemática de pilotes individuales embebidos en suelos estratificados. La formulación emplea la teoría de vigas de Timoshenko sobre una fundación elástica de Winkler de dos parámetros, con el fin de representar explícitamente los mecanismos de interacción suelo–pilote tanto traslacionales como rotacionales. El enfoque está específicamente diseñado para perfiles estratificados sometidos a condiciones de pequeñas a moderadas deformaciones, en las cuales la excitación sísmica está

dominada por la propagación vertical de ondas de corte. Si bien los casos que involucran una fuerte no linealidad del suelo o campos tridimensionales complejos de propagación de ondas pueden requerir desarrollos adicionales, el modelo propuesto constituye una herramienta robusta para aplicaciones convencionales de ingeniería.

La metodología propuesta demostró una elevada capacidad predictiva al ser validada frente a simulaciones dinámicas tridimensionales por elementos finitos, presentando discrepancias en las historias temporales de las tensiones flexionales generalmente inferiores al 10%. Si bien en el presente trabajo, solo se mostró el resultado de un registro sísmico, en un trabajo más amplio en estado de revisión (Soffietti et al., 2026), se han hecho comparaciones más exhaustivas. Al proporcionar estimaciones más consistentes que las soluciones simplificadas clásicas, el modelo desarrollado evita las sobreestimaciones o subestimaciones sistemáticas que suelen observarse para distintos contrastes de rigidez entre capas de suelo.

Gracias a su reducido costo computacional, el marco propuesto resulta especialmente adecuado para la realización de estudios paramétricos extensivos y análisis de sensibilidad. Además, su eficiencia y consistencia física lo convierten en una herramienta idónea para generar grandes bases de datos destinadas al entrenamiento de Redes Neuronales basadas en la Física (surrogate models), tendiendo un puente entre la mecánica analítica y las aplicaciones de aprendizaje automático orientadas a predicciones rápidas.

REFERENCIAS

- Alamo G M, Bordón J D, Aznárez J J, Maeso O (2018) Relevance of soil-pile tangential tractions for the estimation of kinematic seismic forces: Formulation and setting of a Winkler approach. *Applied Mathematical Modelling* 59:1–19.
- Boulanger R W, Curras C J, Kutter B L, Wilson D W, Abghari A (1999) Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125(9):750–759.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:9\(750\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(750))
- Di Laora R, Mandolini A, Mylonakis G (2012) Insight on kinematic bending of flexible piles in layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 43:309–322.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.06.020>
- Dobry R, O'Rourke M J (1983) Discussion of "Seismic response of end-bearing piles" by Raul Flores-Berrones and Robert V. Whitman (April, 1982). *Journal of Geotechnical Engineering* 109(5):778–781.
- European Committee for Standardization (CEN) (2005) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
- Fan K, Gazetas G, Kaynia A, Kausel E, Ahmad S (1991) Kinematic seismic response of single piles and pile groups. *Journal of Geotechnical Engineering* 117(12):1860–1879. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:12\(1860\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:12(1860))

- Finn W D (2005) A study of piles during earthquakes: issues of design and analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering* 3(2):141–234. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-1241-3>
- Gazetas G, Dobry R (1984) Horizontal response of piles in layered soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 110(1):20–40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:1(20))
- Kanya A M (1982) Dynamic behavior of pile groups. In: *Proc 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, pp 509–532
- Karatzia X, Mylonakis G (2017) Horizontal stiffness and damping of piles in inhomogeneous soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143(4):04016113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001621](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001621)
- Kramer S L, Stewart J P (2024) *Geotechnical earthquake engineering*. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, Florida, EE. UU.
- Maiorano R M S, de Sanctis L, Aversa S, Mandolini A (2009) Kinematic response analysis of piled foundations under seismic excitation. *Canadian Geotechnical Journal* 46(5):571–584.
- Mizuno H (1987) Pile damage during earthquakes in Japan. In: *Dynamic response of pile foundations*, pp 53–78.
- Mylonakis G (2001). Simplified model for seismic pile bending at soil layer interfaces. *Soils and Foundations* 41(4):47–58.
- Nikolaou S, Mylonakis G, Gazetas G, Tazoh T (2001) Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements. *Geotechnique* 51(5):425–40. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.5.425>
- Novak M (1974) Effect of soil on structural response to wind and earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 3(1):79–96. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030107>
- Novak M, Aboul-Ella F (1978) Impedance functions of piles in layered media. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 104(3):643–661. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002366>
- Simulia D S (2017) *Abaqus 2017*.
- Sica S, Mylonakis G, Simonelli A L (2011) Transient kinematic pile bending in two-layer soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31(7):891–905. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.02.001>
- Soffietti F P, Pinto F (2022) Analytical solution for the evaluation of kinematic demands on underground linear structures subjected to S-Waves. *International Journal of Geomechanics* 22(11):04022213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002546)
- Soffietti F P, Pinto F (2026) Piles in two-layered soils subjected to S-waves: Comparative analysis and simplified analytical solutions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 202:110024. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.110024>
- Soffietti, F. P., Turello, D. F., & Pinto, F. An analytical model for seismic kinematic demands in piles embedded in layered soils. Available at SSRN 6210621.
- Tajimi H (1969) Dynamic analysis of structure embedded in an elastic stratum. In: *Proc 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol 6, pp 53–69
- Tokimatsu K, Mizuno H, Kakurai M (1996) Building damage associated with geotechnical problems. *Soils and Foundations* 36:219–234. https://doi.org/10.3208/sandf.36.Special_219

Turello D F, Pinto F, Sánchez P J (2016) Embedded beam element with interaction surface for lateral loading of piles. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 40(4):568–582.

Wolf J (1985) Dynamic soil-structure interaction. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ