

Interacción Suelo-Estructura en Pilotes Cargados Lateralmente Mediante Elementos de Viga Embebidos en Sólidos

Diego F. TURELLO ^a, Federico PINTO ^{b,e,1}, Pablo J. SÁNCHEZ ^{c,d}

^a FCEfYn Universidad Nacional de Córdoba – Universidad Tecnológica Nacional-FRSF– CONICET, Santa Fe, Argentina.

^b FCEfYn Universidad Nacional de Córdoba – CONICET, Córdoba, Argentina.

^c CIMEC-UNL-CONICET, Güemes 3450, CP 3000 Santa Fe, Argentina

^d GIMNI-UTN-FRSF, Lavaisse 610, CP 3000 Santa Fe, Argentina.

^e IDIT UNC-CONICET, Córdoba, Argentina

Palabras Claves: Comportamiento lateral de pilotes, elementos embebidos, interacción suelo-estructura, deformaciones laterales moderadas, interfaz no-lineal.

Resumen. La modelación del problema de interacción suelo-pilote debido a cargas laterales mediante métodos numéricos requiere la representación de dos subdominios: el suelo y el pilote. Con el objeto de optimizar el proceso de modelación, resulta atractiva la idea de representar el pilote mediante elementos de viga y el suelo mediante elementos de sólidos. En los últimos años se desarrolló el concepto de elementos finitos embebidos, donde los elementos de vigas interactúan directamente con los elementos de sólidos circundantes a través de restricciones cinemáticas que se verifican en la superficie de interacción suelo-pilote. La respuesta mecánica del pilote a carga lateral en el rango de deformaciones laterales moderadas, está influenciada por el comportamiento no lineal del material del suelo en la zona cercana al pilote. Actualmente, uno de los métodos más empleados para estimar la respuesta lateral no lineal del pilote, es el método de las curvas p-y, donde la interacción suelo-pilote se tiene en cuenta a través de resortes no lineales colocados en los nudos del pilote. Las curvas no lineales que caracterizan a estos resortes, que representan la fuerza en función del desplazamiento lateral, fueron calibradas con ensayos a escala real. En este trabajo se propone acoplar una interfaz no lineal a los elementos de vigas embebidos, a fin de tener en cuenta el comportamiento plástico en las proximidades del pilote. Debido a la gran aceptación que tiene el método de las curvas p-y, se propone usar este tipo de curvas para la definición del comportamiento mecánico en la interfaz. Finalmente se ilustra el desempeño numérico del modelo que resulta de acoplar el elemento de viga embebido y la interfaz no lineal en el medio sólido.

Introducción

La respuesta mecánica de pilotes sometidos a carga lateral está fuertemente influenciada por fenómenos de interacción suelo-estructura que se desarrollan en la superficie del

¹ Corresponding Author: FCEfYn Universidad Nacional de Córdoba – CONICET. Casilla de Correo 916, Córdoba, Argentina; E-mail: fpinto@efn.uncor.edu

pilote, por la relación entre las rigideces relativas entre el suelo y el pilote y por el rango de cargas al que está sometido éste.

Con el objeto de obtener estimaciones confiables sobre esta respuesta mecánica, se pueden utilizar modelos de complejidad creciente, que van desde simples modelos de vigas sobre fundación elástica bidimensionales, métodos de curvas de transferencia de carga, métodos de equilibrio límite, hasta modelos de elementos finitos tridimensionales.

La técnica de elementos finitos, si bien es adecuada para la resolución de estos problemas, lleva consigo un costo computacional elevado si se pretende modelar mediante elementos sólidos el suelo y pilote, dado que en general resultan modelos tridimensionales (3D) con un gran número de grados de libertad, ya que el tamaño de malla se ve influenciado por el tamaño de los pilotes a modelar mediante elementos finitos.

El uso de la técnica de elementos de contorno (por ejemplo en [1]) reduce el número de grados de libertad necesarios para modelar la interacción. Sin embargo, esta técnica posee ciertas limitaciones para problemas no lineales.

Para resolver las limitaciones de los modelos de elementos finitos, se han planteado elementos de viga embebidos en sólidos. Sadek y Shahrour [2] proponen una técnica en la cual el suelo es representado mediante elementos sólidos y los pilotes mediante modelos de viga. En esta metodología, se debe prestar especial atención a la hora de ensamblar la contribución de los elementos de viga, debido a la diferencia de significado físico entre las variables nodales, como consecuencia de las diferentes aproximaciones cinemáticas. Cabe destacar que los elementos embebidos propuestos por Sadek y Shahrour [2] no consideran la transferencia de cargas entre suelo y pilote a través de una superficie de interacción en forma explícita, y degeneran en un simple ensamble de una matriz de rigidez de viga con una de sólido para el caso en que el eje del pilote coincida con una arista del elemento de sólido.

Según los resultados obtenidos en trabajos anteriores de Turello y Pinto [3], este tipo de aproximación carece de sentido mecánico estricto, hecho que se evidencia en el modelo numérico a través de una falta de convergencia para tamaños de malla decrecientes, en los modelos de elementos de viga convencionales embebidos en sólidos. Para evitar este inconveniente, se desarrolló un elemento de viga embebido en sólidos, con fuerzas de contorno definidas en una superficie de interacción finita.

La respuesta no-lineal inicial en este tipo de estructuras, obedece a la interacción de un gran conjunto de factores, lo que hace muy compleja la tarea de determinar correctamente la rigidez inicial del sistema y los mecanismos a través de los cuales se desarrollan las deformaciones plásticas. Para capturar correctamente el mecanismo plástico que se genera alrededor del pilote, en el caso de que se modele toda la geometría con elementos 3D, es necesaria una malla muy densa, lo que resulta en un gran número de grados de libertad.

Es por ello que en este trabajo se plantea el uso de elementos de vigas embebidos en sólidos con una superficie de interacción finita, y la incorporación de una interfaz que capturen la respuesta plástica en una forma global para este tipo de problemas.

En este trabajo se describe el desarrollo de la interfaz propuesta y el desempeño numérico del modelo completo.

1. Interfaz no-lineal propuesta

Se propone en este trabajo una interfaz que tiene como fin capturar el comportamiento plástico que se desarrolla en la zona de suelo adyacente al pilote, en particular a lo largo de la longitud activa.

Debido a que el método de las curvas p-y [4] es ampliamente aceptado en la práctica ingenieril, se propone considerar las características más relevantes de la definición de estas curvas para definir un modelo de plasticidad unidimensional que modelará mediante una ley constitutiva las fuerzas no-lineales disipativas que se desarrollen en esta interfaz.

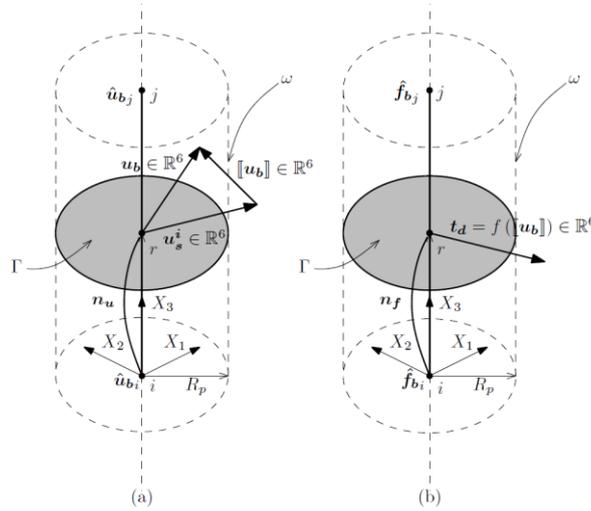


Figura 1. (a) Definición del salto de desplazamientos $[[\mathbf{u}_b]]$ en cinemática de vigas y (b) Fuerzas de interacción modeladas en función del salto de desplazamientos.

Estos modelos de plasticidad unidimensional se adoptan con endurecimiento isotrópico lineal o exponencial, dependiendo del tipo de suelo que se esté modelando (friccional o cohesivo respectivamente), con una carga última t_{du} que se verifica para un desplazamiento relativo, o salto de desplazamiento, $[[\mathbf{u}_{bu}]]$ (Ver Figura 1 (a)).

En el caso elástico, no hay inconvenientes en considerar que el campo de desplazamientos horizontales u_h se proyecta en las direcciones x_1 y x_2 de la terna principal de referencia, generando las componentes u_{h1} y u_{h2} , para luego tratarse individualmente a estas componentes a través de relaciones constitutivas elásticas. Sin embargo, para el caso plástico no se pueden hallar las componentes de la carga reactiva en el plano de la deformación por flexión, aplicando criterios individuales a cada componente y luego componiendo la resultante en el plano.

Es por ello que se plantea un modelo para la interfaz no-lineal donde la relación entre cargas reactivas de suelo y desplazamientos relativos o saltos de desplazamientos $[[\mathbf{u}_b]]$, se verifican en el plano que contiene a la resultante aplicada en cada punto del pilote. Estos saltos en desplazamientos se verifican entre la cinemática de viga y la cinemática de sólido en los elementos embebidos. Entonces, se define el salto en desplazamientos en cinemática de vigas como $[[\mathbf{u}_b]]$ y su expresión es:

$$\llbracket \mathbf{u}_b \rrbracket = \mathbf{u}_b - \mathbf{u}_s^i \quad (1)$$

donde \mathbf{u}_b es el campo de desplazamientos en la viga y \mathbf{u}_s^i es el campo de desplazamiento del sólido en la superficie de interacción, ω , expresado en términos de las variables cinemáticas de la viga. De esta manera, el campo de desplazamientos del sólido en la superficie de interacción se puede escribir como:

$$\mathbf{u}_s^i = \mathbf{B} \mathbf{u}_s \quad (2)$$

donde \mathbf{B} es un operador que mapea la cinemática 3D de sólido en la superficie de interacción ω en una cinemática 3D de viga en el eje de la misma.

El salto en el campo de desplazamientos en el eje de la viga está caracterizado por 6 componentes, 3 desplazamientos y 3 giros, que son las componentes del vector $\llbracket \mathbf{u}_b \rrbracket$. Sin embargo, para la definición del modelo constitutivo se usan solo 4 componentes: el salto de desplazamiento axial, el salto de desplazamiento en el plano de flexión, el salto de giro de torsión, y el salto de giro asociado a la flexión. Estas componentes se agrupan en un vector $\llbracket \mathbf{u}_b^* \rrbracket$, que se define como:

$$\llbracket \mathbf{u}_b^* \rrbracket = \mathcal{P} \llbracket \mathbf{u}_b \rrbracket \quad (3)$$

donde \mathcal{P} es un operador de proyección que mapea el vector de 6 componentes $\llbracket \mathbf{u}_b \rrbracket$ en el vector de 4 componentes $\llbracket \mathbf{u}_b^* \rrbracket$.

Luego, introduciendo la relación constitutiva $\mathbf{t}_d^* = f(\llbracket \mathbf{u}_b^* \rrbracket)$ se obtienen las 6 componentes del vector de fuerzas no-lineales de interacción \mathbf{t}_d como:

$$\mathbf{t}_d = \mathcal{P}^T \mathbf{t}_d^* = \mathcal{P}^T f(\llbracket \mathbf{u}_b^* \rrbracket) \quad (4)$$

donde \mathbf{t}_d^* es el vector de 4 componentes de fuerzas de interacción no-lineales en el plano de la resultante.

La relación constitutiva $\mathbf{t}_d^* = f(\llbracket \mathbf{u}_b^* \rrbracket)$ se adopta de la siguiente manera: una relación elástica lineal para el comportamiento axial y torsional, y un comportamiento elasto-plástico para la fuerza normal y el momento distribuido asociados a la flexión.

Introduciendo la discretización de los campos de desplazamientos y adoptando las funciones de interpolación estándar para éstos, se llega a expresar el vector de fuerzas internas disipativas en la interfaz como:

$$\mathbf{T}_d = \begin{matrix} e = N_b \\ \mathbf{A} \int_l \mathbf{n}_u^T \mathbf{t}_d dl \\ e = 1 \end{matrix} \quad (5)$$

donde \mathbf{A} es un operador de ensamble apropiado, N_b es el número de elementos de vigas en el problema y \mathbf{n}_u es la matriz con las funciones de interpolación clásicas de vigas.

Finalmente, el sistema de ecuaciones no-lineales que se deben resolver de forma iterativa resulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \mathbf{K}_s \hat{\mathbf{U}}_s - \hat{\mathbf{P}}_{es} - \mathbf{A} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{T}_d \\ \mathbf{0} &= \mathbf{K}_b \hat{\mathbf{U}}_b - \hat{\mathbf{P}}_{eb} + \mathbf{T}_d \end{aligned} \quad (6)$$

donde las variables con sombrero indican valores nodales, y las letras mayúsculas indican que son variables a nivel global del problema, $\hat{\mathbf{P}}_{es}$ son las fuerzas externas en sólidos y $\hat{\mathbf{P}}_{eb}$ son las cargas externas aplicadas al problema de vigas. En esta ecuación se distingue el acople que producen las cargas no-lineales \mathbf{T}_d que se desarrollan en la interfaz. Las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B}^{-1} son matrices que embeben la cinemática de los elementos de vigas en los elementos de sólidos como se describe en [5].

2. Resultados Obtenidos

2.1. Ejemplo 1: Pilote sometido a carga horizontal en suelo homogéneo.

Se presentan a continuación, los resultados obtenidos al modelar un pilote vertical de sección circular dispuesto en un suelo arenoso, con un incremento de rigidez lineal en el suelo, como se muestra en el esquema de la Figura 2, cuando se acopla a los elementos de viga embebidos la interfaz no-lineal propuesta.

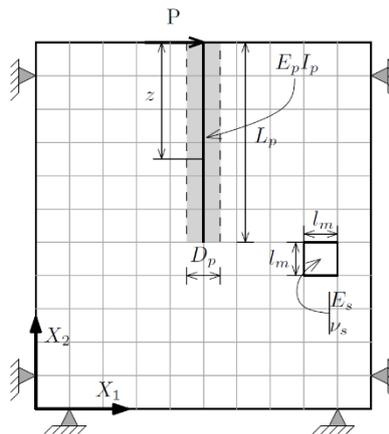


Figura 2. Esquema del pilote vertical sometido a carga lateral del Ejemplo 1.

Se comparan estos resultados con los obtenidos con una rutina que implementa el método de las curvas P-y, en donde se utilizaron las curvas para arenas propuestas por O'Neill [6] y las propuestas por Reese [7].

Los parámetros materiales y geométricos para el suelo y el pilote son los siguientes: módulo de Yung del suelo se incrementa en profundidad como $E_s = 14,42MN/m^3 \times z$, coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,25$, $\gamma_s = 16 KN/m^3$, $\phi = 32^\circ$, $n = 40 MPa$; mientras que las propiedades del pilote son: $E_p = 30.000 MPa$, $L_p = 15,00 m$, $D_p = 0,50 m$.

En la Figura 3 (a) se muestra la deformación que sufre el eje del pilote, la que evidencia un buen acuerdo entre la respuesta del modelo numérico propuesto y la respuesta hallada mediante las curvas p-y.

En la Figura 3 (b) se muestran los desplazamientos en la cabeza del pilote para los distintos escalones de carga, donde se puede ver que en la respuesta numérica es más rígida en la zona de deformaciones iniciales que la observada en la respuesta de las curvas P-y. Luego la respuesta del modelo propuesto se sitúa entre las respuestas obtenidas con

las curvas P-y y los modelos para arenas propuestos por O'Neill y los propuestos por Reese.

En las Figura 3 (c) y (d) se muestran los esfuerzos internos, momentos flectores y corte, los que muestran un buen acuerdo entre la solución numérica propuesta y la hallada mediante las curvas P-y.

2.2. Ejemplo 2: Pilote vertical metálico.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de modelar con la formulación propuesta el caso presentado por Ashour y colaboradores [8], para un pilote vertical metálico, dispuesto en una arena media a densa sumergida cuyo comportamiento es representado mediante los siguientes parámetros: $E_p I_p = 1,67 \times 10^5 \text{ KNm}^2$, $L_p = 21,30 \text{ m}$, $D_p = 0,61 \text{ m}$, $d = 0,30 \text{ m}$, según el esquema de la Figura 4.

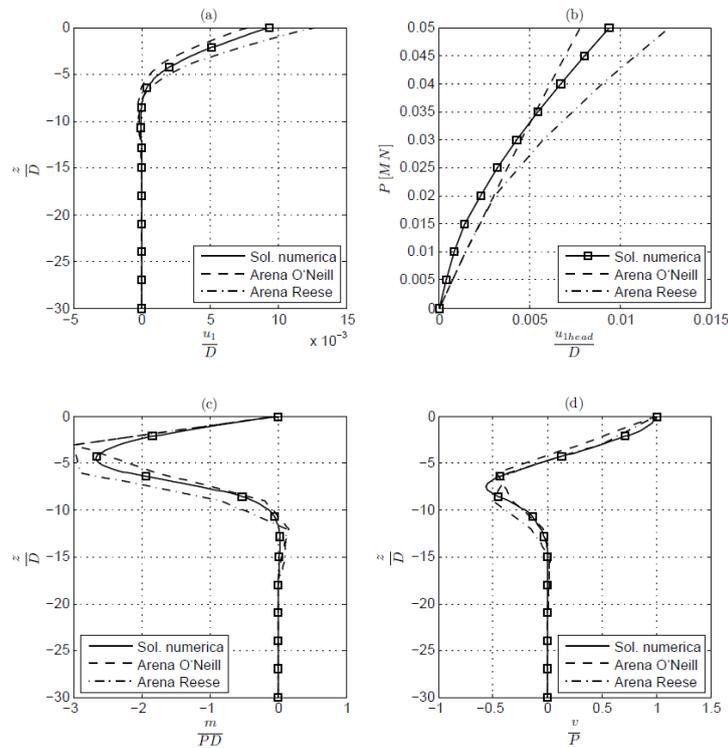


Figura 3. (a) Deformada. (b) Desplazamiento en la cabeza del pilote vs. Carga externa aplicada. (c) Diagrama de momentos flectores. (d) Diagrama de corte para el Ejemplo 1.

En la Figura 5 (a) se muestra el desplazamiento en la cabeza del pilote en función de la carga externa aplicada, donde se ve un muy buen acuerdo entre la respuesta observada con la formulación propuesta y los datos medidos del ensayo a escala real. Además se muestran las estimaciones realizadas mediante el método Strain Wedge

propuesto por Ashour y colaboradores [8] y las realizadas mediante el software COM624 [9].

En la Figura 5 (b) se muestra el momento flector máximo en función de la carga externa aplicada, donde se ve un buen acuerdo entra la formulación propuesta y las soluciones de referencia. En este caso, la formulación propuesta arroja resultados más cercanos a los obtenidos mediante el software COM 624.

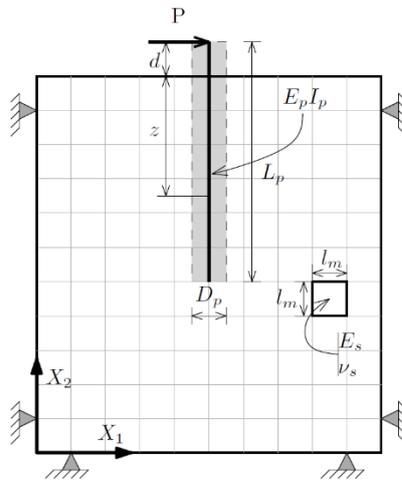


Figura 4. Esquema del pilote vertical sometido a carga lateral del Ejemplo 2.

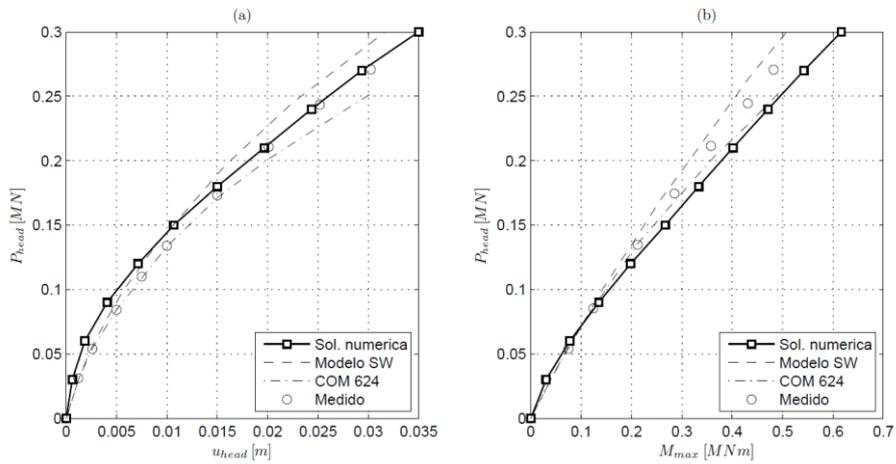


Figura 5. (a) Desplazamiento en la cabeza del pilote vs. Carga aplicada y (b) Momento flector máximo del pilote vs. Carga aplicada para el Ejemplo 2.

3. Conclusiones.

Se desarrolló una interfaz no-lineal que es capaz de modelar de forma constitutiva la plasticidad concentrada que se desarrolla en la porción de suelo inmediatamente adyacente al pilote. Esta interfaz no-lineal captura de forma satisfactoria el campo de fuerzas de interacción que se generan entre el problema de vigas y el problema de sólidos.

Como se muestra en el Ejemplo 1, el acuerdo entre los resultados obtenidos, acoplado un elemento de viga embebido y la interfaz no-lineal propuesta y la solución obtenida mediante el método de las curvas P-y es satisfactorio.

En el Ejemplo 2 se contrastan los resultados obtenidos mediante la formulación propuesta y los resultados informados por Ashour y colaboradores utilizando el método Strain Wedge y datos medidos por Reese [8] en arenas de las islas Mustang, siendo el acuerdo entre los resultados muy buenos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de UTN (PID IN 1759), de SECyT UNC, y especialmente por la beca de Posgrado a CONICET. P.J. Sánchez agradece el apoyo financiero de CONICET (PIP 2013-2015 631) y al European Research Council bajo FP7 (2007–2013) programa (ERC Grant agreement No. 320815 – Advanced Grant Project on Advanced tools for computational design of engineering materials COMP-DESMAT).

Referencias

- [1] Pinto F. y Prato C.A. Three dimensional indirect boundary element method formulation for dynamic analysis of frames buried in semi-infinite elastic media. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 132(3):967–978, 2006.
- [2] Sadek M. y Shahrou I. A three dimensional embedded beam element for reinforced geomaterials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28:931–946, 2004.
- [3] Turello D.F. y Pinto F. Efecto del tamaño de malla en la modelación numérica del comportamiento lateral de pilotes mediante elementos de barra embebidos en sólidos. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones., 2011.
- [4] Matlock, H., & Reese, L. C. (1962). Generalized solutions for laterally loaded piles. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), 1220-1247.
- [5] Turello, D. F., Pinto, F., & Sánchez, P. J. Modelación numérica del comportamiento lateral de pilotes mediante elementos de viga embebidos en sólidos. *Mecánica Computacional*, Volume XXXI. Number 7. Solid Mechanics (C).
- [6] O'Neill M. y Gazioglu S. An evaluation of p-y relationships in clay. Informe Técnico UHCE-84-3, A report to the American Petroleum Institute, (PRAC 82-41-2), University of Houston-University Park, Department of Civil Engineering, 1984.
- [7] Reese L.C. C.W. y Koop F. Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. Proceedings. Sixth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1974.
- [8] Ashour, M., Norris, G., & Pilling, P. (2002). Strain wedge model capability of analyzing behavior of laterally loaded isolated piles, drilled shafts, and pile groups. *Journal of Bridge Engineering*, 7(4), 245-254.
- [9] Reese, L. C., and Sullivan, W. R. ~1980!. “Documentation of computer program *COM624*, parts I and II: analysis of stresses and deflections for laterally loaded piles including generation of *p-y* curves.” *Geotechnical engineering software GS80-1*, Geotechnical Engineering Center, Bureau of Engineering Research, Univ. of Texas at Austin, Tex.