

MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN SUELO-PILOTE EN PILOTES CARGADOS LATERALMENTE MEDIANTE ELEMENTOS DE VIGA EMBEBIDOS EN SÓLIDOS

Diego F. Turello^a, Federico Pinto^b y Pablo J. Sanchez^c

^a*Becario Doctoral CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional-FRSF, Santa Fe, Argentina. diegoturello@gmail.com.ar*

^b*Investigador CONICET, Departamento de Estructuras, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, Córdoba, Argentina, fpinto@efn.uncor.edu*

^c*Investigador CONICET, CIMEC, Universidad Tecnológica Nacional-FRSF, Santa Fe, Argentina. psanchez@intec.unl.edu.ar*

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

Resumen. La modelación de problemas 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 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-estructura se tiene en cuenta a través de curvas no-lineales, calibradas con ensayos a escala real, que representan la respuesta no-lineal de resortes discretos distribuidos en la longitud del pilote. En este trabajo se propone acoplar un elemento de 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 de este elemento. 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.

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

A la hora de hacer 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 se aplica a 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, (Pinto y Prato, 2006)) 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 estas limitaciones de los modelos de elementos finitos, se han planteado elementos de viga embebidos en sólidos (Sadek y Shahrour, 2004) en los cuales el suelo es representado mediante elementos sólidos y los pilotes mediante modelos de viga, donde se debe prestar especial atención a la hora de ensamblar la contribución de los elementos de viga en el problema de sólidos, 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 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 (2011), 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 que se genera en esta porción de suelo, en el caso de que se modele toda la geometría con elementos 3D, es necesario una malla fina, lo que exige 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 elementos de interfaz que capturen la respuesta plástica global en este problema.

En este trabajo se muestra el desarrollo de los elementos de interfaz propuestos y el desempeño numérico del modelo logrado.

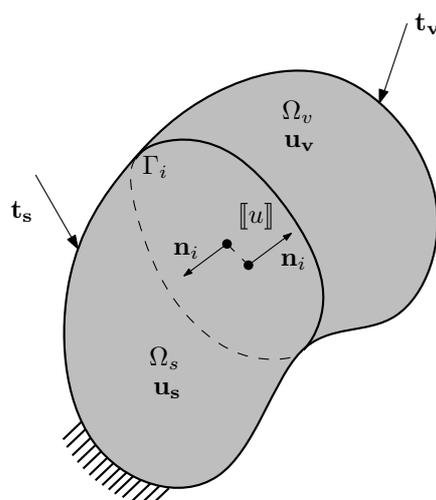


Figura 1: Esquema del modelo propuesto.

2. MODELO MECÁNICO

2.1. Planteo general del problema

El problema de pilotes cargados lateralmente involucra la respuesta lateral del suelo en las proximidades del pilote. La respuesta mecánica de este tipo de estructuras, cuando son sometidas a cargas laterales en la superficie, está fuertemente influenciada por la interacción suelo-estructura que se desarrolla en la porción de suelo que abarca algunos diámetros alrededor del pilote.

Es por ello que en este trabajo se plantea incorporar una interfaz que capture el comportamiento plástico del suelo que se encuentra en la porción de suelo inmediatamente adyacente al pilote, e incorporar esta misma en un esquema donde la parte elástica se captura con elementos de vigas embebidos en sólidos. De esta manera se espera capturar con precisión el comportamiento inicial, donde no hay un desarrollo marcado de las deformaciones inelásticas.

2.2. Principio Variacional

El principio variacional que utilizamos en la formulación del modelo, corresponde a plantear la existencia de una superficie interna al dominio del problema que lo separa en 2 sub-dominios, el dominio Ω_s y el dominio Ω_v , como se muestra en la Figura 1. Para que la solución de este nuevo problema sea la misma que el del problema original, es necesario incluir una restricción cinemática que asegure (en alguna manera), la continuidad del campo de desplazamientos. Luego se adopta una cinemática de vigas para el dominio Ω_v con el objeto de disminuir el número de grados de libertad.

El principio variacional es el de la Ec. 1, donde se muestra la contribución del problema de sólidos y la del problema de vigas en lo que es la energía interna de deformación y el trabajo de las fuerzas externas y de volumen, además se muestra la restricción cinemática que se coloca en la superficie de interacción y el término que incluye la disipación debido a las deformaciones pásticas en el suelo que se encuentra en la zona inmediata a la superficie de interacción. Estas fuerzas disipativas se incluyen en el principio variacional a través de las fuerzas no-lineales \mathbf{T} , las que son función del salto en el campo de desplazamientos como se define en la Ec. 3. En esta ecuación, las variables con barra indican variaciones admisibles del campo correspondiente.

$$\begin{aligned}
0 = & + \int_{\Omega_v} \boldsymbol{\sigma}_v \cdot \nabla^s \bar{\mathbf{u}}_v \, d\Omega_v - \int_{\Gamma_v} \mathbf{t}_v \cdot \bar{\mathbf{u}}_v \, d\Gamma_v - \int_{\Omega_v} \mathbf{b}_v \cdot \bar{\mathbf{u}}_v \, d\Omega_v \\
& + \int_{\Omega_s} \boldsymbol{\sigma}_s \cdot \nabla^s \bar{\mathbf{u}}_s \, d\Omega_s - \int_{\Gamma_s} \mathbf{t}_s \cdot \bar{\mathbf{u}}_s \, d\Gamma_s - \int_{\Omega_s} \mathbf{b}_s \cdot \bar{\mathbf{u}}_s \, d\Omega_s \\
& - \int_{\Gamma_i} \lambda (\bar{\mathbf{u}}_v - \bar{\mathbf{u}}_s) \, d\Gamma_i - \int_{\Gamma_i} \bar{\lambda} (\mathbf{u}_v - \mathbf{u}_s) \, d\Gamma_i \\
& + \int_{\Gamma_i} \mathbf{T} (\mathbf{u}_v - \mathbf{u}_s^i) \, d\Gamma_i
\end{aligned} \tag{1}$$

2.3. Solución mediante curvas P-y

Originalmente el método se desarrolló en el ámbito de las plataformas petroleras off-shore y luego se extendió a otros campos de la ingeniería civil. Actualmente existen softwares comerciales que hacen uso del método de las curvas $P-y$ para hallar la respuesta de pilotes sometidos a carga lateral. En la Figura 2 se muestra el esquema que se utiliza en el método de las curvas $P-y$.

En este método, se adopta para el pilote la teoría de vigas clásica, pudiendo tener un comportamiento elástico o elasto-plástico y la interacción suelo-estructura se incorpora en el modelo a través de resortes discretos no-lineales que se colocan en los nudos del pilote.

Estos resortes no-lineales, definen una curva de reacción lateral P en función del desplazamiento lateral y , y la forma de esta curva ha sido propuesta por los diferentes autores en función de sus experiencias con los suelos donde se encontraban los pilotes estudiados, del tipo de carga aplicada al pilote (puede ser cíclica o estática), el tipo de suelo (friccional o cohesivo), etc. Cabe aclarar en este punto, que estas curvas $P-y$ representan resortes unidimensionales para carga monotónicas; es decir que no especifican nada acerca de la descarga y recarga, o el comportamiento del pilote cuando se somete a un cambio de dirección de la carga aplicada.

Generalmente, la carga última P_u , se obtiene de un modelo de equilibrio límite del suelo ajustado mediante observaciones, donde intervienen principalmente la profundidad de la sección en estudio, los parámetros resistentes y la densidad del suelo movilizado ante la carga lateral y los parámetros geométricos del pilote, mientras que los desplazamientos laterales últimos y_u se adoptan en función del diámetro del pilote y de forma tal que, los resultados ajusten a los datos obtenidos en ensayos a escala real.

Es por ello que, típicamente, el valor de la carga última P_u se incrementa a medida que crece la profundidad de la sección del pilote en estudio, como se muestra en la Figura 2. Al contrario, las curvas correspondientes a las secciones más superficiales, presentan una carga límite baja, y como en esta zona se concentran los desplazamientos horizontales, la capacidad de generar cargas reactivas horizontales se agota rápidamente.

La forma de la curva $P-y$ depende del tipo de suelo, ya sea este friccional o cohesivo, y para cada tipo de suelo se han propuesto diferentes curvas, por ejemplo para arcillas tenemos las propuestas por O'Neill y Gazioglu (1984) y para arenas las propuestas por Reese y Koop (1974).

Otra característica importante de las curvas $P-y$ es la rigidez inicial, la que puede variar desde infinito para el caso de suelos cohesivos hasta una rigidez inicial finita de carácter empírico para suelos friccionales. Cabe aclarar que esta rigidez inicial infinita puede generar inconvenientes numéricos a la hora de resolver el sistema no-lineal.

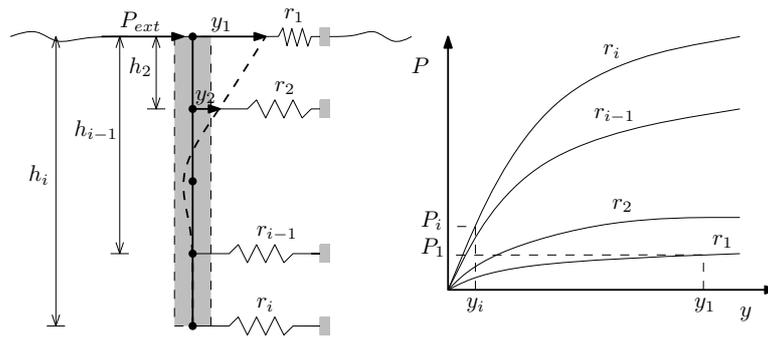


Figura 2: Esquema de resolución mediante el método de las curvas $P - y$.

2.4. Modelo Completo 3D

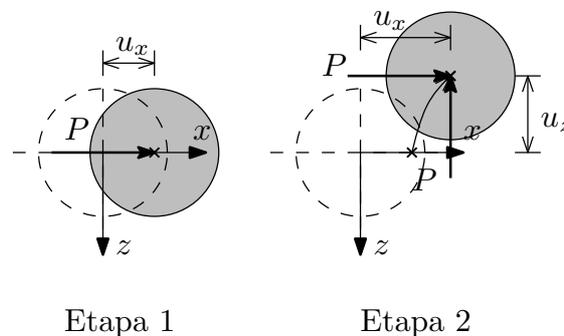


Figura 3: Esquema de cargas y desplazamientos en el plano horizontal para las 2 etapas de carga. Modelo en Abaqus.

Se modeló en Abaqus un pilote vertical de sección circular, dispuesto en un estrato de suelo homogéneo.

Se generó un *estado inicial* para el problema, para lo que se activó el valor de las cargas gravitatorias correspondientes al peso propio del suelo y el pilote. Luego, la carga externa se aplicó en sentido horizontal y a nivel de la superficie del estrato, en 2 etapas; en la Etapa 1 se aplicó una fuerza P en sentido $+x$ y en la Etapa 2 se aplicó una carga P en sentido $-z$, según el esquema que se muestra en la Figura 3. En lo que sigue, se muestran los resultados relativos al *estado inicial*.

Para el suelo, se adoptó un comportamiento elasto-plástico, según un modelo de Mohr-Coulomb, mientras que para el pilote, se adoptó un comportamiento elástico lineal. Los parámetros adoptados para el suelo y el pilote se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}
 E_s &= 100 \text{ Mpa} \\
 \nu_s &= 0,25 \\
 \gamma_s &= 1600 \text{ kg/m}^3 \\
 s_u &= 100 \text{ kPa} \\
 E_p &= 30,000 \text{ Mpa} \\
 \nu_p &= 0,30 \\
 D &= 0,50 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

En la Figura 4 se muestra un detalle de la malla utilizada en el entorno del pilote, junto con

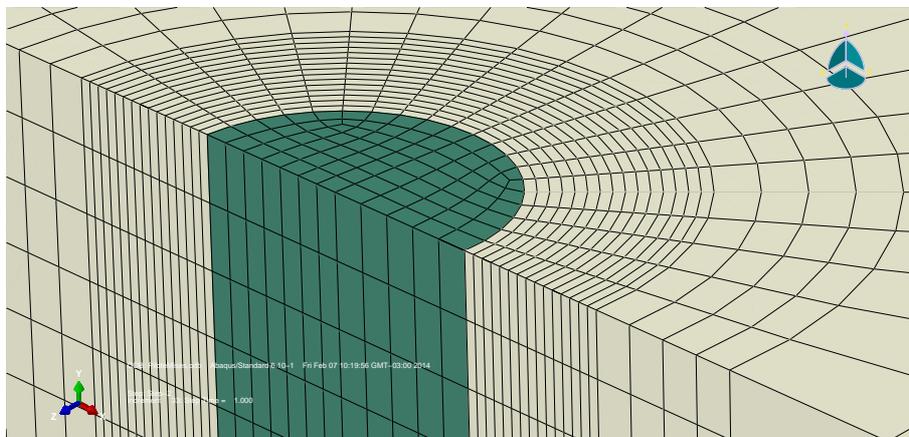
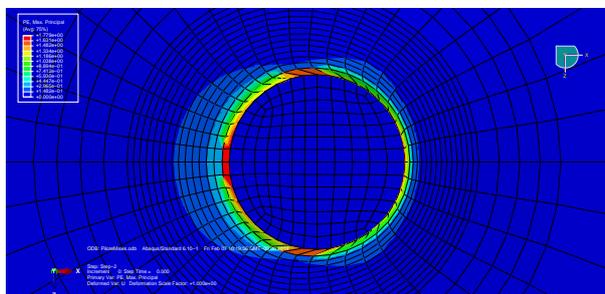
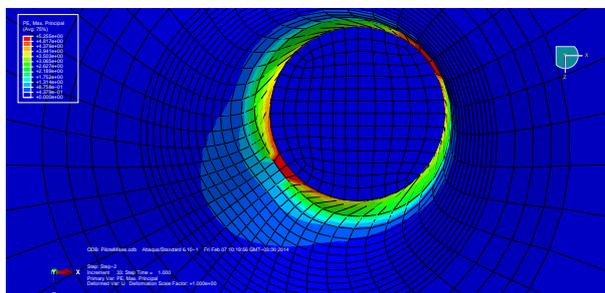


Figura 4: Detalle de la malla utilizada en el entorno del pilote. Modelo en Abaqus.

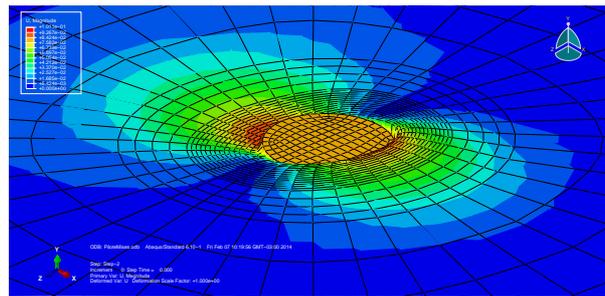


(a)

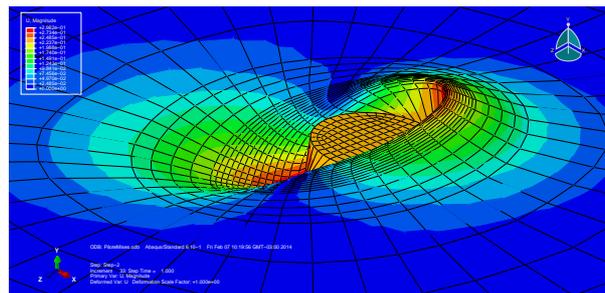


(b)

Figura 5: Deformaciones Plásticas en el entorno del pilote para (a) Etapa 1 y (b) Etapa 2.



(a)



(b)

Figura 6: Deformada en el entorno del pilote en (a) Etapa 1 y (b) Etapa 2. Vista axonométrica.

los diferentes materiales que componen el problema. Los elementos utilizados son los C3D8R de Abaqus.

Como se ve en la Figura 5, las deformaciones plásticas máximas en el entorno del pilote, para ambas etapas de carga, se concentran en un anillo alrededor del mismo de un espesor de 3 elementos, que aproximadamente es $D/10$.

En la Figura 6 se muestra la deformada 3D, en el entorno del pilote para las 2 etapas de carga. También se muestra un sombreado de la magnitud de los desplazamientos u para las 2 etapas.

Con los resultados de estos modelos, se calcularon las fuerzas resultantes y momentos aplicados por el suelo en la superficie del pilote para distintas secciones verticales ubicadas a diferentes profundidades, integrando en el perímetro las tensiones en la interfaz suelo-pilote.

En la Figura 8 se muestran los desplazamientos promedio en el plano $x - z$, obtenidos al promediar los desplazamientos en el perímetro del pilote, donde se ve que, en la etapa 1 en todas las profundidades, los desplazamientos se desarrollan según el eje x (se muestran en negro). En la segunda etapa de carga (que se muestra en rojo), se desarrollan desplazamientos y giros tanto en el eje x como en el z .

En la Figura 7 se muestran las curvas de fuerzas resultantes en función del desplazamiento promedio del pilote en esa sección transversal y el momento resultante en función del giro promedio de la sección transversal. Se puede ver que en la primera etapa de carga (que se grafica en negro) se desarrollan los desplazamientos según el eje x y los giros según el eje z con sus correspondientes esfuerzos asociados. Las fuerzas resultantes en x para las secciones a menor profundidad llegan a una carga límite, mientras que los momentos en esas secciones no parecen alcanzarlo, lo que indicaría que las fuerzas normales y los momentos aplicados no alcanzan sus correspondientes valores límites al mismo tiempo.

En la segunda etapa de carga, las fuerzas resultantes en sentido x disminuyen, en cambio que las de sentido z aumentan. Los momentos, tanto en x como en z , aumentan en esta segunda

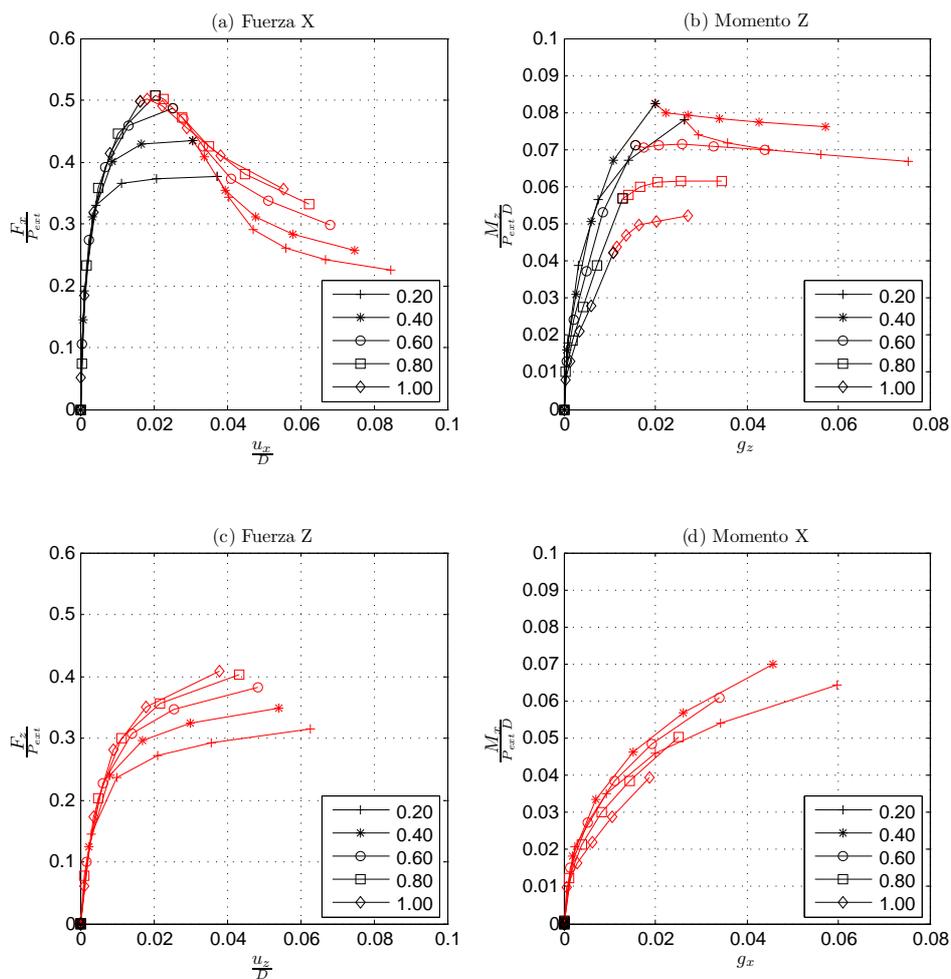


Figura 7: Curvas de respuesta del modelo en Abaqus, para las distintas profundidades desde la superficie del estrato. (a) Fuerza x vs. desplazamiento x . (b) Momento z vs giro z . (c) Fuerza z vs. desplazamiento z . (d) Momento x vs giro x . En negro corresponde a la Etapa 1 de carga y en rojo corresponde a la Etapa 2 de carga.

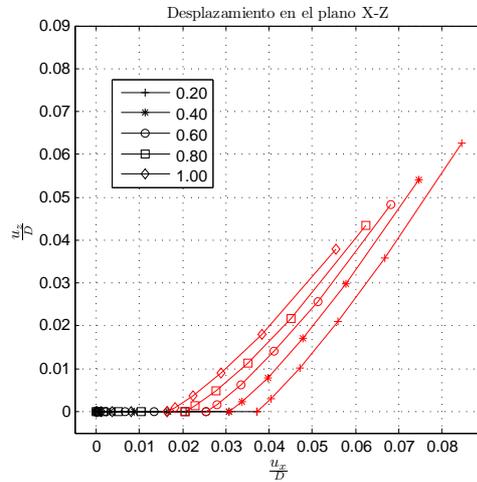


Figura 8: Curvas de desplazamientos en el plano $x - z$, para diferentes etapas de carga y profundidades desde la superficie del estrato.

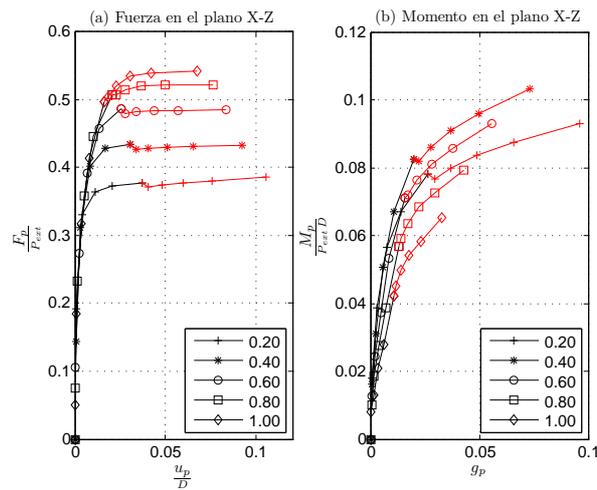


Figura 9: Curvas fuerza vs. desplazamiento y momento vs. giro en el plano de la resultante, para diferentes etapas de carga y profundidades desde la superficie del estrato.

etapa.

Tanto la rigidez en fuerzas-desplazamientos como en momentos-giros, es menor en esta etapa que en la primera.

Si se proyectan las fuerzas y momentos resultantes sobre la dirección de la carga externa aplicada, se ve como se suaviza la transición entre las 2 etapas de carga (ver Figura 9). Si bien las fuerzas resultantes presentan un pequeño escalón en la transición entre etapas, la forma de las curvas indica que, en las secciones más superficiales, al alcanzarse la carga límite en la primer etapa, ésta se mantiene en la segunda y en las secciones a mayor profundidad donde no se había alcanzado la carga límite se evidencia una continuidad en la curva fuerza-desplazamiento. Estos comentarios también se aplican a las curvas momentos-giros, donde la continuidad entre las 2 etapas es más notoria.

2.5. Interfaz no-lineal propuesta

Se propone en este trabajo un elemento de interfaz, que tiene como fin, capturar el comportamiento plástico que se desarrolla en la zona de suelo adyacente al pilote en la longitud activa.

Debido a que el método de las curvas $P-y$ es ampliamente aceptado en la práctica ingenieril, se propone utilizar los elementos más relevantes de la definición de las curvas $P-y$ para definir un modelo de plasticidad unidimensional que caracterizará al medio continuo tipo de Winkler de la interfaz.

Estos modelos de plasticidad unidimensional se adoptan con endurecimiento isotrópico lineal o exponencial, con una carga última P_u que se verifica para un desplazamiento relativo o salto de desplazamiento $[[u]]$.

Para el caso elástico, no hay inconvenientes en considerar que el campo de desplazamientos horizontales u_h se puede proyectar en las direcciones x_1 y x_2 de la terna principal de referencia, generando las componentes u_1 y u_2 , y tratarse a estas componentes de forma independiente. 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 donde la relación entre cargas reactivas de suelo y desplazamientos relativos, se verifica en el plano π que contiene a la resultante aplicada en cada punto del pilote, tal como se evidencia en el modelo de elementos finitos desarrollado mediante Abaqus.

Es por ello que se propone el siguiente modelo para la interfaz no lineal, donde las fuerzas de contacto se modelan en función del vector de desplazamientos relativos o salto de desplazamientos $[[u]]$.

El campo de desplazamientos en el eje de la viga está caracterizado por 6 componentes (ver Figura 10), los 3 desplazamientos y los 3 giros, que se pueden agrupar en el vector u , sin embargo para la definición del modelo constitutivo se usan solo 4 componentes, el desplazamiento relativo axial, el desplazamiento relativo en el plano de flexión, el giro relativo de torsión y el giro relativo asociado a la flexión. En este sentido, el salto en desplazamientos se verifica entre la cinemática de viga y la cinemática de sólido en los elementos embebidos. Entonces, definimos el salto en u como $[[u]]$ y su expresión es:

$$[[u]] = u_v - u_s^i \quad (3)$$

Donde u_v es el campo de desplazamientos en la viga y u_s^i es el campo de desplazamiento

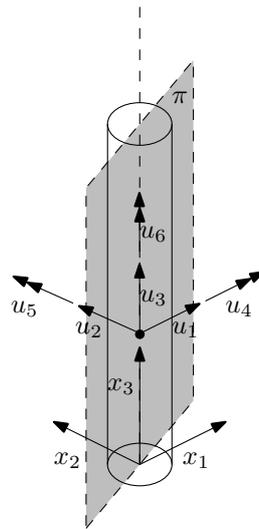


Figura 10: Detalle de la terna de ejes y las componentes del vector u .

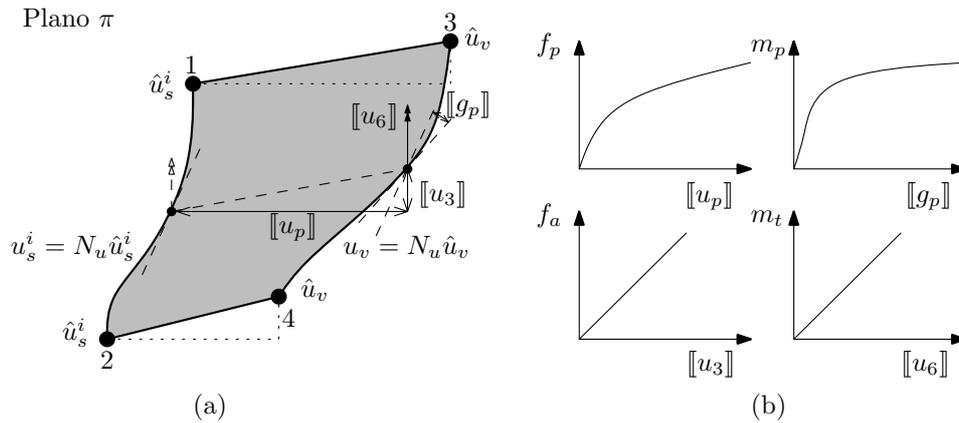


Figura 11: (a) Esquema del modelo de interfaz. (b) Curvas adoptadas para el modelo constitutivo $f(\llbracket u^* \rrbracket)$.

del sólido en la superficie de interacción Γ_i expresado en cinemática de viga, el que se puede escribir como:

$$u_s^i = \mathcal{B} u_s|_{\Gamma_i} \tag{4}$$

Donde \mathcal{B} es un operador que mapea la cinemática 3D de sólido en la superficie de interacción Γ_i en una cinemática 3D de viga en el eje de la misma. Luego definimos los desplazamientos en el plano π como:

$$\begin{aligned} \llbracket u_p \rrbracket &= \sqrt{\llbracket u_1 \rrbracket^2 + \llbracket u_2 \rrbracket^2} \\ \llbracket g_p \rrbracket &= \sqrt{\llbracket u_4 \rrbracket^2 + \llbracket u_5 \rrbracket^2} \end{aligned} \tag{5}$$

Luego definimos la relación constitutiva como:

$$f = f(\llbracket u^* \rrbracket) = f(g(u)) \tag{6}$$

Donde,

$$\begin{aligned} f &= [fp \ fa \ mp \ mt]^T \\ \llbracket u^* \rrbracket &= \llbracket [u_p] \ [u_3] \ [g_p] \ [u_6] \rrbracket^T \\ \llbracket u^* \rrbracket &= \left[\sqrt{\llbracket u_1 \rrbracket^2 + \llbracket u_2 \rrbracket^2} \ [u_3] \ \sqrt{\llbracket u_4 \rrbracket^2 + \llbracket u_5 \rrbracket^2} \ [u_6] \right]^T = \mathcal{A}(\llbracket u \rrbracket) \end{aligned} \quad (7)$$

Donde \mathcal{A} es un funcional no lineal.

La relación constitutiva $f(\llbracket u^* \rrbracket)$ 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 (ver Figura 11).

Introduciendo una discretización del campo de desplazamientos y adoptando las funciones de interpolación estándar para el mismo, se llega a expresar el vector de fuerzas internas en función de las variables nodales del elemento de interfaz.

$$\begin{aligned} u_v &= N_u \hat{u}_v \\ u_s^i &= N_u \hat{u}_s^i \end{aligned} \quad (8)$$

Entonces

$$\begin{aligned} \llbracket u \rrbracket &= u_v - u_s^i = N_u (\hat{u}_v - \hat{u}_s^i) \\ \llbracket u \rrbracket &= N_u \mathbf{A} \begin{pmatrix} \hat{u}_v \\ \hat{u}_s^i \end{pmatrix} = N_u \mathbf{A} \hat{u} ; \mathbf{A} = [\mathbb{1} \ -\mathbb{1}] \end{aligned} \quad (9)$$

$$F_{int} = \int_L \mathbf{A}' N_u' f(\llbracket u^* \rrbracket) dL \quad (10)$$

Luego la matriz de rigidez tangente del elemento de interfaz se halla como:

$$\begin{aligned} K_T &= \frac{\partial F_{int}}{\partial \hat{u}} = \int_L \mathbf{A}' N_u' \frac{\partial f(\llbracket u^* \rrbracket)}{\partial \hat{u}} dL \\ K_T &= \int_L \mathbf{A}' N_u' \frac{\partial f(\llbracket u^* \rrbracket)}{\partial \llbracket u^* \rrbracket} \frac{\partial \llbracket u^* \rrbracket}{\partial \hat{u}} dL \end{aligned} \quad (11)$$

Donde

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\llbracket u^* \rrbracket)}{\partial \llbracket u^* \rrbracket} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_p}{\partial \llbracket u^* \rrbracket} & & & & & \\ & k_a & & & & \\ & & \frac{\partial f_m}{\partial \llbracket u^* \rrbracket} & & & \\ & & & & & \\ & & & & & k_t \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \llbracket u^* \rrbracket}{\partial \hat{u}} &= \frac{\partial \mathcal{A}(\llbracket u \rrbracket)}{\partial \hat{u}} = \frac{\partial \mathcal{A}(\llbracket u \rrbracket)}{\partial \llbracket u \rrbracket} \frac{\partial \llbracket u \rrbracket}{\partial \hat{u}} = \frac{\partial \mathcal{A}(\llbracket u \rrbracket)}{\partial \llbracket u \rrbracket} N_u \mathbf{A} \\ \frac{\partial \llbracket u^* \rrbracket}{\partial \hat{u}} &= \begin{bmatrix} \frac{2\llbracket u_1 \rrbracket}{\llbracket u_p \rrbracket} & \frac{2\llbracket u_2 \rrbracket}{\llbracket u_p \rrbracket} & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & \frac{2\llbracket u_4 \rrbracket}{\llbracket g_p \rrbracket} & \frac{2\llbracket u_5 \rrbracket}{\llbracket g_p \rrbracket} & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} N_u \mathbf{A} \end{aligned} \quad (13)$$

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Pilote sometido a carga horizontal en suelo homogéneo.

Se presentan a continuación, los resultados obtenidos al modelar un pilote vertical dispuesto en un suelo arenoso, con un incremento de rigidez lineal en el suelo, como se muestra en el esquema de la Figura 12, cuando se acopla un elemento de viga embebido y el elemento de interfaz no-lineal propuesto.

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 y las propuestas por Reese.

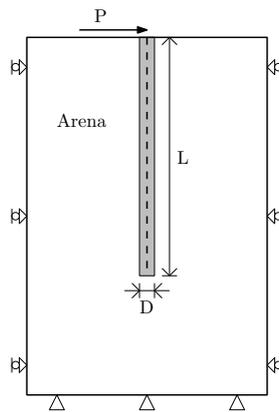


Figura 12: Esquema de pilote sometido a carga horizontal en suelo homogéneo.

Los parámetros materiales y geométricos para el suelo y el pilote son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 E_s &= 0,00 \text{ Mpa (en superficie)} \\
 \frac{\partial E_s}{\partial h} &= 14,42 \text{ Mpa/m} \\
 \nu_s &= 0,25 \\
 \gamma_s &= 16,00 \text{ kN/m}^3 \\
 \phi_s &= 32 \\
 n &= 40,00 \text{ Mpa} \\
 E_p &= 30000,00 \text{ Mpa} \\
 \nu_p &= 0,30 \\
 L &= 15,00 \text{ m} \\
 D &= 0,50 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{14}$$

En la Figura 13 (a) se muestra la deformada del pilote, la que evidencia el buen acuerdo entre la respuesta del modelo numérico propuesto y la respuesta hallada con las curvas $P - y$.

En la Figura 13 (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.

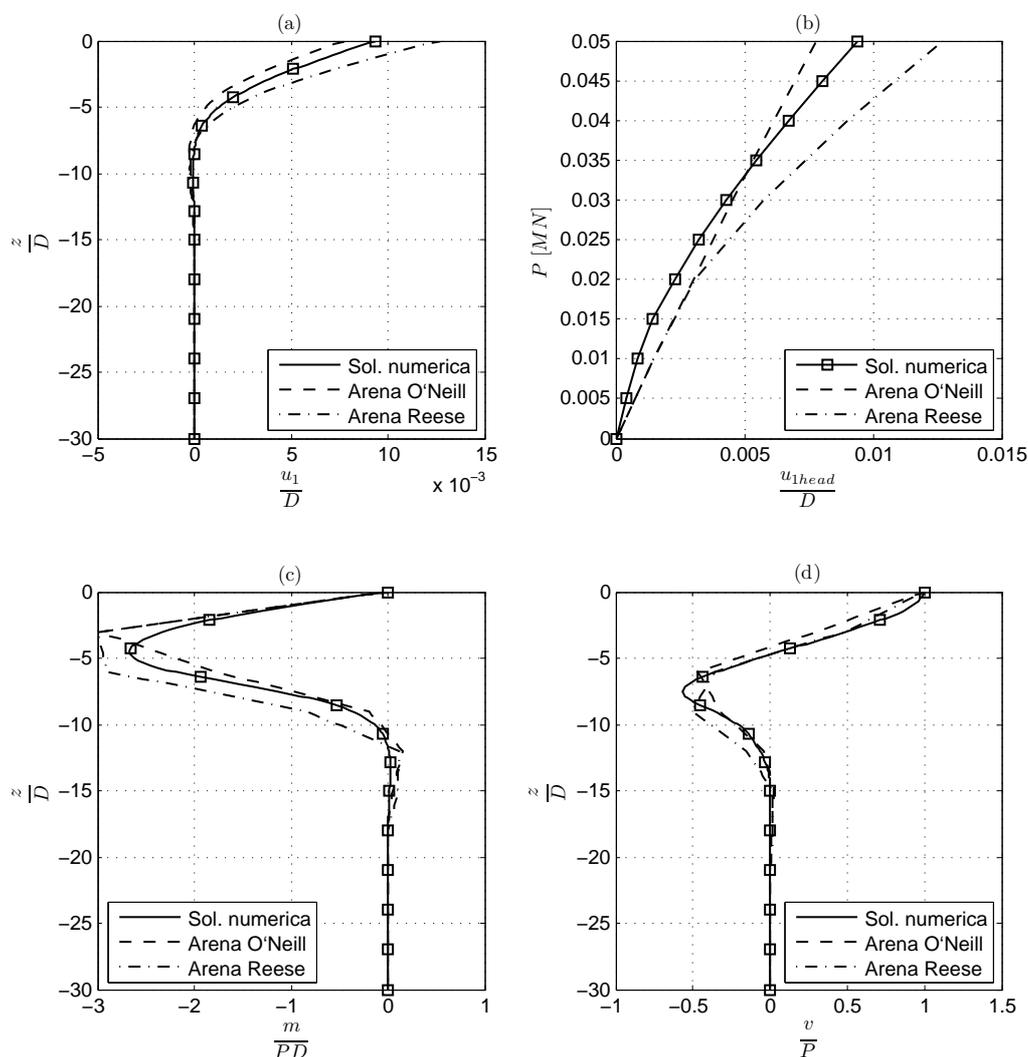


Figura 13: (a) Deformada. (b) Desplazamiento en la cabeza del pilote vs. carga externa aplicada. (c) Diagrama de momentos flectores. (d) Diagrama de corte.

En las Figura 13 (c) y Figura 13(d) se muestran los esfuerzos internos, momentos flectores y corte, los que muestran un buen acuerdo entre la solución numérica propuesta y la hallada con las curvas $P - y$.

3.2. Pilote sometido a carga horizontal en 2 etapas

Se muestra a continuación el resultado de aplicar la carga $P\sqrt{2}/2$ en una primera etapa en la dirección x_1 y en la segunda etapa en dirección x_2 .

Como puede verse en la Figura 14, en la segunda etapa de carga se desarrollan incrementos de desplazamientos tanto en la dirección x_1 como en la x_2 , lo que está de acuerdo con lo observado en modelos completos 3D del problema. Al final de esta segunda etapa, la carga externa total aplicada es P , inclinada $\pi/4$ con el eje x_1 , y el desplazamiento total en la cabeza del pilote es $u_{1-2} = 9,113 \times 10^{-3}D$. Este desplazamiento total es muy similar a lo observado en el ejemplo anterior donde la carga P se aplicaba en una sola etapa en dirección x_1 , donde se obtuvo un

desplazamiento $u_1 = 9,375 \times 10^{-3} D$.

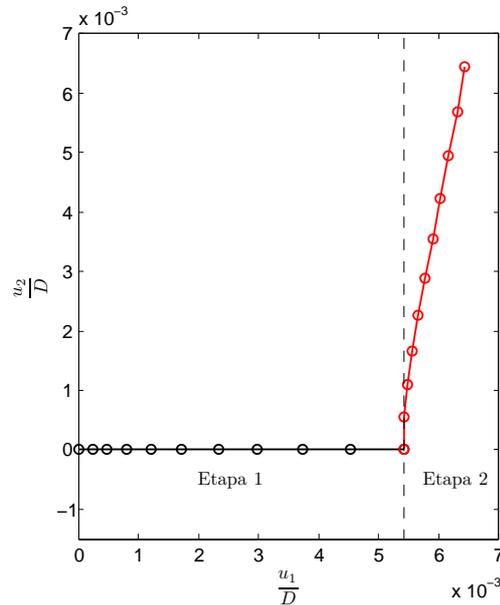


Figura 14: Desplazamiento en el plano $x_1 - x_2$ para el esquema de carga de la Figura 3 y el pilote de la Figura 12.

4. CONCLUSIONES

Se generó en Abaqus un modelo completo 3D de un pilote vertical de sección circular, dispuesto en un medio homogéneo elasto-plástico, con un comportamiento material tipo Mohr-Coulomb.

Con los resultados obtenidos, se generaron las curvas de respuesta fuerzas-desplazamientos y momentos-giros, integrando las tensiones en la superficie de interacción suelo-pilote en el perímetro del pilote y promediando los desplazamientos en el perímetro del pilote, lo que nos permitió comprender la fenomenología del proceso y establecer los requerimientos para un futuro elemento de interfaz no-lineal.

De los resultados de estos modelos, también se pudo ver que las deformaciones plásticas se concentran en un anillo de suelo en contacto con el pilote en un espesor aproximado de $D/10$, lo que indica que es apropiado plantear un elemento de interfaz no-lineal que capture esta parte del campo de desplazamientos.

Se desarrolló un elemento de interfaz no-lineal, que es capaz de modelar la plasticidad concentrada que se desarrolla en la porción de suelo inmediatamente adyacente al pilote.

Este elemento de interfaz no-lineal captura de forma satisfactoria el campo de desplazamientos que se genera cuando se carga al pilote en un plano horizontal.

El acuerdo entre los resultados obtenidos, acoplado un elemento de vigas embebido y el elemento de interfaz no-lineal propuesto y la solución obtenida mediante el método de las curvas $P - y$ es satisfactorio.

REFERENCIAS

- 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.
- 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.
- Reese L.C. C.W. y Koop F. *Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*. Proceedings. Sixth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1974.
- Sadek M. y Shahrour I. A three dimensional embedded beam element for reinforced geomaterials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28:931–946, 2004.
- 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.