

DESCRIPCIÓN DE UN MODELO 2D DE ESTRUCTURA PORTUARIA EN OPENSEES Y CÁLCULO DE RÓTULAS PLÁSTICAS

DESCRIPTION OF A 2D MODEL OF PORT STRUCTURE IN OPENSEES AND PLASTIC HINGES CALCULATION

Abel Zambrano

Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
Av. Circunvalación – Vía a San Mateo, Manta
Correo electrónico: *abelzame@gmail.com*

Pablo Caiza

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos

RESUMEN

En este artículo se describe un modelo 2D sintético desarrollado en OpenSees, de un muelle apoyado sobre pilotes, capaz de representar el comportamiento no lineal de la estructura ante cargas cíclicas. Se explica los nudos y elementos del pilote, así como la sección transversal que es modelada con fibras. La interacción suelo-estructura es considerada a través de resortes discretos no lineales horizontales y verticales. Se propone un procedimiento para obtener la curvatura a lo largo del pilote, a partir de las curvas esfuerzo-deformación del hormigón en las fibras extremas opuestas. La rotación plástica se obtiene mediante integración numérica de una región plástica definida en cada instante de carga, cuando se alcanza la curvatura de fluencia. Finalmente se calcula la longitud plástica en el cuerpo y la cabeza del pilote, donde esta última se obtiene por la contribución independiente de la flexión y la adherencia.

PALABRAS CLAVE: Daño, curvatura de fluencia, longitud plástica, resortes no lineales, método de fibras.

ABSTRACT

In this article a simplified 2D model developed in OpenSees of a wharf supported on piles is described. This model is capable to represent the nonlinear behavior of the structure under cyclic loads. Nodes and elements of the pile are explained, and the cross section is modeled following the fiber method. Soil-structure interaction is considered by nonlinear discrete horizontal and vertical springs. A method is proposed for the curvature along the pile from stress-strain curves of the concrete at the opposite end fibers. Plastic rotation is obtained by numerical integration of a plastic region defined at each instant of loading, when the yield curvature is reached. Finally the plastic length in both body and head of the pile is calculated. In

the head of the pile, the total plastic length is obtained as a product of the independent contribution of bending and adherence.

KEYWORDS: Damage, yield curvature, plastic length, nonlinear springs, fiber method.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador cuenta con cuatro autoridades portuarias: Manta, Guayaquil, Puerto Bolívar y Esmeraldas. Así como tres puertos petroleros que son: Balao, El Salitral y La Libertad; además de once puertos privados (Cámara Marítima del Ecuador, 2015). Estas terminales portuarias permiten el comercio nacional e internacional del país. Sin embargo sus actividades podrían ser interrumpidas por los daños ocasionados durante un terremoto, debido a que éstas se localizan en zonas de alto peligro sísmico según (NEC, 2015). En el caso de Esmeraldas, la ocurrencia de un evento sísmico provocaría graves pérdidas económicas para el Ecuador por su afectación directa a la refinería y al puerto de embarque de petróleo en Balao (Calderón, 2009).

En la actualidad se están construyendo veintisiete puertos y facilidades pesqueras artesanales en las provincias de El Oro, Santa Elena, Esmeraldas y Manabí. El Telégrafo (2014), MAGAP (2015); así mismo se proyecta el puerto de aguas profundas de Manta (APM, 2015). Por lo tanto es necesario un análisis y diseño apropiado de los elementos estructurales que conforman el puerto, para asegurar un adecuado comportamiento ante un sismo.

La estructura típica de estos puertos es una losa maciza soportada por pilotes. Por experiencia en otras zonas de alto peligro sísmico, tales como la costa oeste de los Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Italia (Borg, 2007), se conoce que los elementos más susceptibles a daño, y que requieren más atención, son los pilotes. En ellos, el daño puede localizarse en la cabeza junto a la conexión pilote-loza, y/o en el cuerpo del pilote (Goel, 2010).

Existe ya la acumulación de resultados experimentales sobre el comportamiento de los pilotes y la conexión pilote-loza a partir del año 1988 (Joen, Park y Priestley, 1988), y en trabajos posteriores: Jellin (2008), Silva, Seible y Priestley (1997), Sritharan y Priestley (1998) hasta la fecha (Foltz, 2011). Además se han realizado modelos relativamente sofisticados usando elementos finitos (Shafieezadeh, 2011), y otros modelos simplificados como el propuesto en (Goel, 2010). Este último tipo de modelo tiene como ventaja su relativa precisión y sencillez, lo que permite su difusión en el día a día del análisis y diseño de estos puertos. Sin embargo, es muy sensible a la variación de la longitud de las rótulas plásticas, por lo que actualmente se están buscando nuevas alternativas para la descripción del daño en estructuras portuarias.

En este trabajo se describe un modelo 2D de estructura portuaria que usa el método de las fibras, y que considera la interacción no lineal suelo-estructura, para representar el comportamiento real de la estructura. Con este modelo se busca describir correctamente el daño en los pilotes expresado por una longitud plástica, que se obtiene por integración numérica de una región de curvatura plástica, definida según los límites de fluencia de los materiales para cada zona del pilote (cuerpo y cabeza). Además en la cabeza del pilote se calcula la longitud

plástica producto de la contribución independiente de la flexión y la adherencia, debido a que el estudio de Jellin (2008), muestra el aporte de la adherencia en la conexión pilote-losa.

El modelo 2D se desarrolla en OpenSees, un programa estructural de código abierto, que en comparación a otros paquetes comerciales tiene como ventajas principales su versatilidad y estrecho contacto con el mundo académico, lo que entre otras cosas permite su continua actualización con técnicas avanzadas, modificables por los usuarios para adaptarlas a sus propias exigencias. El lenguaje de programación de OpenSees se denomina Tcl (Tool command language, que usualmente se combina con el grupo de herramientas GUI (graphical user interface) Tk, por lo que se denomina Tcl/Tk.

2. DESCRIPCIÓN

El modelo 2D consiste en una subestructura formada por tres pilotes unidos a una losa de cubierta, sometido a una carga cíclica lateral y una carga axial constante en cada pilote. Este modelo se basa en estudios realizados por Shafieezadeh y DesRoches (2010), que hacen una simplificación del modelo 3D del muelle tipo, constituido por una losa maciza soportada por pilotes, a un modelo 2D. A su vez en Caiza (2013), el modelo 2D con todos los pilotes de un eje del muelle, se simplifica a un modelo 2D con los tres pilotes más cercanos a la costa. Debido a que Kawamata (2009) y Yang et al. (2012), demuestran que en un muelle el daño mayor ocurre en los dos primeros pilotes.

Caiza (2013) indica que los dos pilotes más cercanos a la costa tienen una luz libre más corta, mayor rigidez y absorben más fuerza sísmica, con lo cual son más susceptibles a sufrir daños, por ello se los denomina pilotes "sísmicos". Caiza (2013), Kawamata (2009) y Yang et al. (2012). Los pilotes más alejados de la costa, son más flexibles y absorben menos carga sísmica, por lo tanto sufren daños menores y se les denomina pilotes "no sísmicos" (figura. 1).

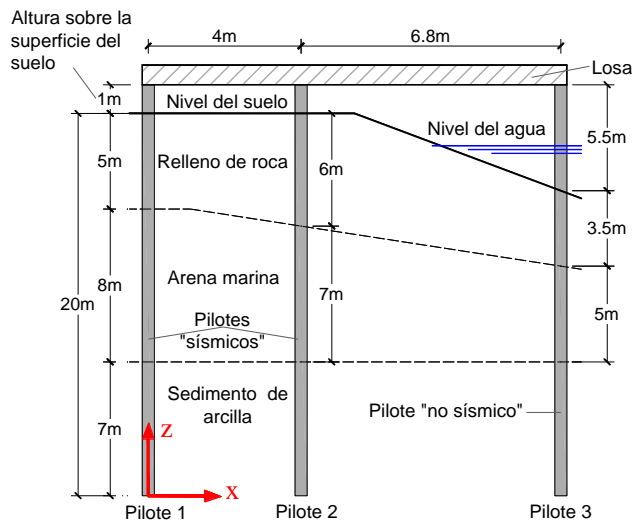


Figura 1. Esquema de la estructura portuaria para el modelo 2D.

En la figura 2 se presenta una vista en planta de una parte de la estructura portuaria, donde se aprecia la losa de cubierta apoyada sobre los pilotes. Se observa el eje 2 de la estructura, en el cual se indica el espesor y el ancho colaborante de losa para cada vano. En los primeros modelos, la losa se discretiza en elementos tipo viga con propiedades geométricas según los diferentes anchos de losa entre los ejes A y B, y B y C (línea azul), pero en la modelación final se considera un ancho de losa constante de 3m entre los ejes A y B, y de 6m entre los ejes B y C (línea verde), porque debido a la gran rigidez de los elementos de la losa, los resultados fueron similares.

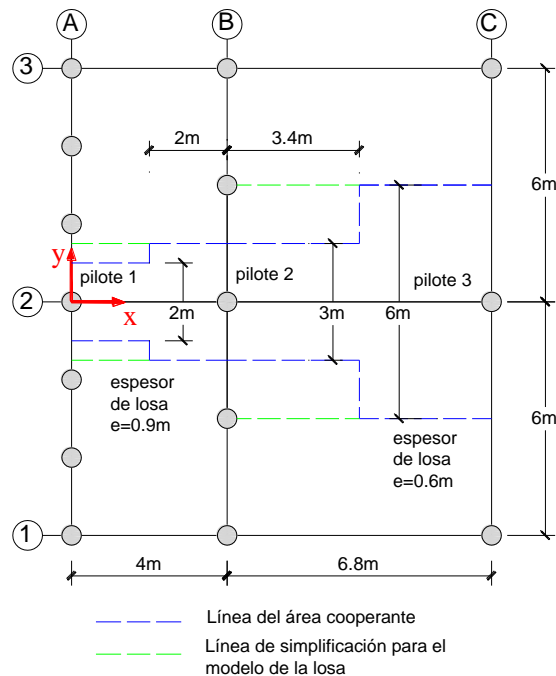


Figura 2. Vista en planta de la losa apoyada sobre los pilotes.

3. GEOMETRÍA Y MALLA DE LOS PILOTES

El modelo 2D de estructura portuaria desarrollado en OpenSees, consiste en un archivo principal llamado "NLcontrol.tcl" compuesto por seis rutinas adicionales que serán descritas más adelante. En este numeral se explica los datos iniciales que requiere el archivo "NLcontrol.tcl" para generar la geometría y malla de los pilotes.

En la figura 1 se aprecia que los pilotes poseen una altura o longitud libre sobre el nivel del suelo de 1m para los pilotes 1 y 2, y de 5.5m para el pilote 3, a la cual se denomina L_1 . Además los pilotes poseen una longitud embebida bajo la superficie del suelo denominada L_2 . Esta longitud está dividida en varias capas (figura 1) y los espesores se los identifica de la siguiente manera: L_3 es el espesor del relleno de roca, L_4 es el de arena marina, y L_5 es el de sedimento arcilloso.

El sistema de referencia x-z de la estructura está situado en el pie del pilote 1 de acuerdo a la figura 1, de tal manera que la coordenada en x del pilote 1 está en $x=0$, la del pilote 2 en $x=4.0m$ y la del pilote 3 en $x=10.8m$. El diámetro del

pilote es $D=0.63\text{m}$ y el pilote se divide en 84 elementos de 0.25m de longitud. La numeración de los elementos empieza de abajo hacia arriba, es decir desde el pie del pilote hasta la cabeza.

4. PROPIEDADES DEL SUELO

Cada pilote posee una longitud embebida bajo la superficie del suelo $L_2=20\text{m}$ para los pilotes 1 y 2, y de $L_2=15.5\text{m}$ para el pilote 3. Esta longitud L_2 está formada por tres capas de suelo mostradas en la figura 1. Las propiedades de la capa de relleno de roca y de arena marina, corresponden a materiales reales del Puerto de Los Ángeles (Caiza, 2013), y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales granulares.

| Material | Peso específico γ (kN/m^3) | Ángulo de fricción interna ϕ (grados) |
|-----------------|--|--|
| Relleno de roca | 18.5 | 37 |
| Arena marina | 10 | 38 |

Con los datos de los materiales (Tabla 1), se utiliza la rutina "get_pyParam.tcl" desarrollada por McGann (2010) para determinar la resistencia última del suelo p_{ult} y el desplazamiento y_{50} (cuando p es 50% de p_{ult}), que son parámetros que definen las denominadas curvas p - y . En API (1987), Reese y Van Impe (2001), se encuentra información detallada acerca de las curvas p - y , y de los parámetros del suelo p_{ult} , y_{50} . La rutina "get_pyParam.tcl" requiere los siguientes datos:

- *puSwitch*. Especifica la forma de cálculo de p_{ult} y y_{50} . Puede ser según las recomendaciones de API (1987) o de Brinch Hansen (1961). Se utilizó la primera.
- *kSwitch*. Define la variación con la profundidad del módulo de reacción del suelo. La opción 1 considera una variación lineal (API, 1987), y la opción 2 considera una variación parabólica modificada de API (Boulanger et al., 2003). Se escogió la opción 1.
- *gwtSwitch*. Considera la presencia del nivel freático para el cálculo del módulo de reacción del suelo (opción 2), y si no existe nivel freático (opción 1). Se utilizó la opción 2.

La rutina "get_pyParam.tcl" se usa para calcular los parámetros p_{ult} y y_{50} en las dos primeras capas de suelo del modelo 2D, por tratarse de materiales granulares; mientras que para la tercera capa (sedimento de arcilla) se trabaja directamente con los siguientes datos: $p_{ult} = 2270\text{kN/m}^3$ y $y_{50} = 0.01\text{m}$.

4.1 Resortes para representar el suelo

La interacción suelo-estructura es uno de los aspectos más importantes del modelo, para lo cual se considera que los elementos del pilote, discretos

verticalmente, están apoyados sobre una cimentación no lineal tipo Winkler. Para representar el comportamiento no lineal, el suelo se modela con un resorte horizontal p - y y un resorte vertical t - z a lo largo de la longitud embebida del pilote, excepto en el pie del pilote donde se utiliza un resorte q - z en reemplazo del resorte t - z .

En la figura 3 se aprecia el modelamiento de resortes empleado en el modelo 2D de estructura portuaria, implementado por McGann (2010) para la librería de ejemplos de OpenSees. McGann desarrolló tres rutinas para calcular los parámetros del suelo y utilizar los elementos de OpenSees "PySimple1", "TzSimple1" y "QzSimple1" (Boulanger, 2003), con la finalidad de modelar el resorte p - y , t - z y Q - z , respectivamente. Un dato importante para el resorte Q - z es el módulo de corte en el pie del pilote, que tiene un valor de $G=150000\text{kPa}$.

Los parámetros del suelo para los resortes t - z y q - z se calculan con las rutinas "get_tzParam.tcl" y "get_qzParam.tcl", siguiendo un procedimiento similar al descrito para la rutina "get_pyParam.tcl".

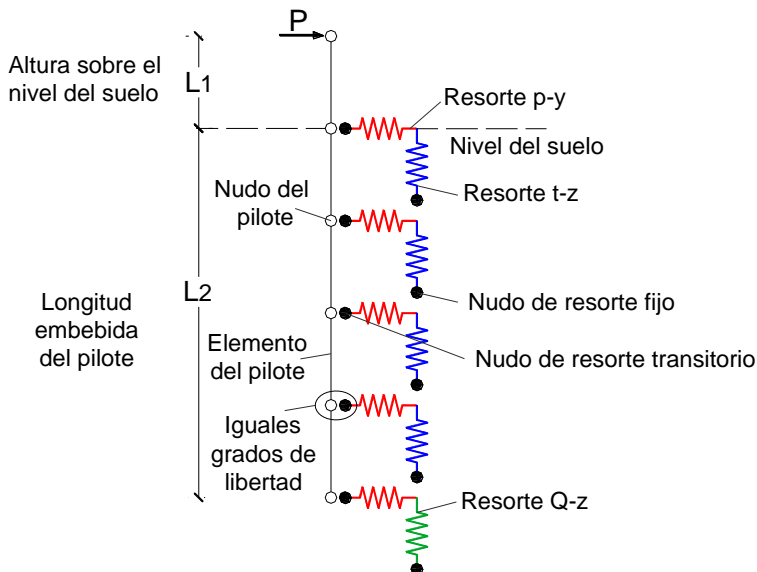


Figura 3. Resortes usados en el modelo para representar el suelo. Fuente: (McGann, 2010)

4.2 Elementos de longitud cero para los resortes

En la figura 3 se aprecia que en cada nudo del pilote existe un resorte horizontal y uno vertical, donde el resorte horizontal se ubica en el nudo de resorte transitorio y el resorte vertical en el nudo de resorte fijo. Tanto el resorte horizontal como el resorte vertical incorporan diferentes comportamientos en un mismo nudo, razón por la cual se utiliza el elemento denominado de "longitud cero" para representar los dos tipos de comportamiento (horizontal y vertical) de una zona del pilote, al mismo tiempo que es independiente de la longitud. Entonces el elemento de longitud cero está definido por dos nudos que tienen la misma posición pero con diferentes materiales, donde en este caso el material es un tipo de resorte. En

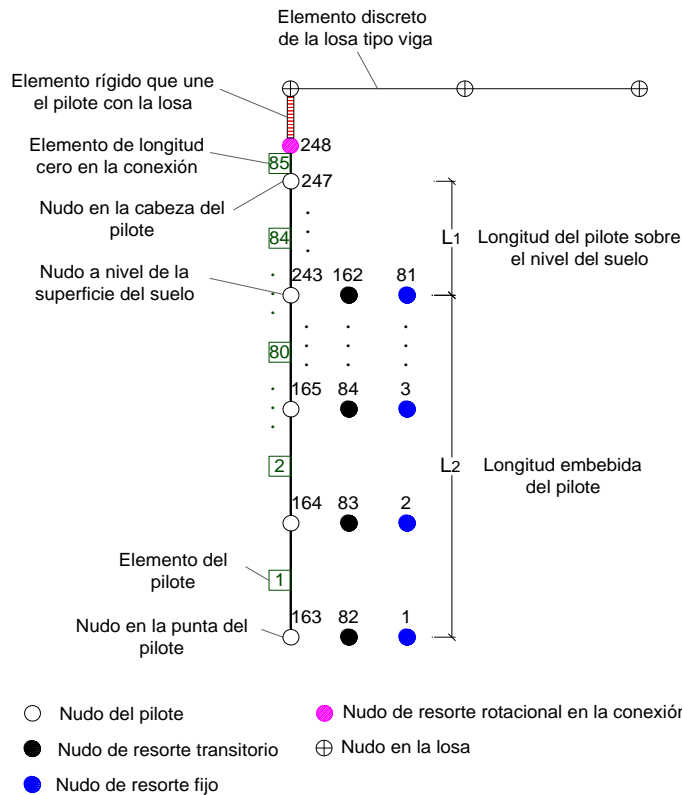
el pie del pilote el elemento de longitud cero creado está formado por los resortes “PySimple1” y “QzSimple1”, y en el resto de la longitud embebida del pilote está formado por los resortes “PySimple1” y “TzSimple1”.

El elemento de longitud cero conecta los nudos transitorios con los nudos fijos, donde los nudos transitorios están libres en desplazamiento horizontal y giro, mientras los nudos fijos están completamente restringidos. Después a los nudos transitorios se les da los mismos grados de libertad que a los nudos del pilote, es decir desplazamiento horizontal y vertical, y giro. Para los pilotes 1 y 2 se crean 80 elementos de longitud de cero que representan el suelo con resortes, y para el pilote 3 solo 62 elementos, porque la longitud embebida del pilote L_2 es 20m para los primeros pilotes y 15.5m para el último.

5. NUDOS Y ELEMENTOS DEL PILOTE

5.1 Nudos del pilote

Los nudos del pilote tienen libertad en desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y giro, y son 85 nudos en cada pilote, ya que existen 84 elementos. En la figura 4 se observa la numeración de los nudos y elementos del pilote, los nudos de los resortes, así como el elemento rígido que conecta el pilote con la losa y los elementos discretos de la misma.



Nota: Esta numeración corresponde al pilote 1. Para los demás pilotes la numeración continúa de manera similar.

Figura 4. Tipos de elementos y nudos que intervienen en el modelo de los pilotes.

5.2 Elementos del pilote

Se utiliza el modelo de fibras desarrollado por Caiza (2013), que incluye el elemento tipo viga-columna no lineal basado en fuerzas de OpenSees (“nonlinearBeamColumn”) para modelar el pilote, porque se ajusta al comportamiento real observado en los resultados experimentales. Este elemento es capaz de representar el comportamiento no lineal a flexión y carga axial. Los análisis estadísticos de resultados y errores de los modelos empleados se describen en Caiza, Andrawes y LaFave (2010) y Caiza, Andrawes y LaFave (2012).

La integración a lo largo del elemento no lineal de OpenSees se basa en la cuadratura de Gauss-Lobatto (Neuenhofer y Filippou, 1997), con un punto de integración en cada extremo del elemento. Puntos adicionales no son necesarios debido al carácter lineal de la gráfica de momentos.

5.3 Resorte rotacional

En la conexión pilote-losa se crea un resorte rotacional con un elemento de longitud cero que conecta el nudo en la cabeza del pilote con un nudo en la misma ubicación usando una sección tipo fibra que simule el deslizamiento de las varillas de acero con respecto al hormigón. Este resorte rotacional permite considerar la contribución de adherencia en la conexión pilote-losa. La conexión corresponde al elemento 85 en cada pilote de acuerdo a la figura 4.

La generación de los nudos y elementos del pilote, los elementos de longitud cero para los resortes y el resorte rotacional en la conexión para cada uno de los pilotes, se lo realiza con la rutina denominada “NL1.tcl”.

5.4 Sección tipo fibra para los elementos del pilote

La sección transversal del pilote se divide en varias fibras en el sentido radial y angular (figura 5), y en cada una se obtienen los esfuerzos y las deformaciones. Esta discretización permite además, modelar distintos materiales en una misma sección como son: el hormigón no confinado de recubrimiento, el hormigón confinado encerrado por los estribos, el acero de preesfuerzo y las barras de acero de refuerzo.

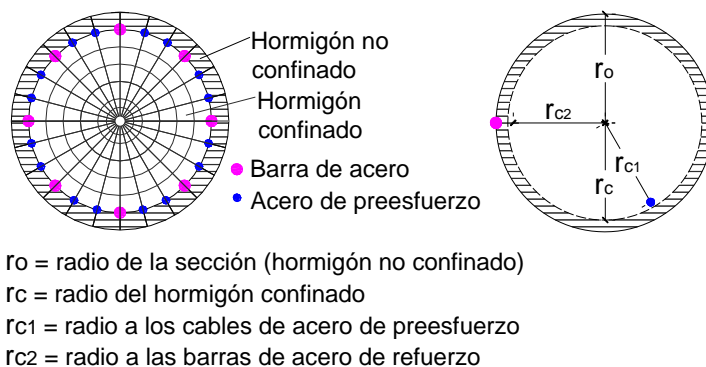


Figura 5. Sección tipo fibra del pilote

Cada modelo se crea utilizando la librería de materiales uniaxiales disponibles en OpenSees, los cuales proporcionan información detallada del comportamiento no lineal de los materiales en comparación con las normas de construcción (Caiza et al., 2012).

Se emplean diferentes secciones de fibras a lo largo de la longitud del pilote, para tener un mejor modelamiento del comportamiento "real". En el caso de la sección para la conexión pilote-losa, interviene las barras de acero de refuerzo, mientras que para el suelo no actúa y es necesario en cambio considerar el acero de preesfuerzo.

Las secciones tipo fibra del pilote se crean con la rutina "NLmaterial.tcl", donde se ingresa toda la información necesaria en cuanto a dimensiones, divisiones de la fibra, recubrimientos y propiedades de los materiales.

5.5 Propiedades de los materiales de la sección transversal

El pilote tiene un diámetro de 63cm y es de hormigón preesforzado con las siguientes características:

- Resistencia a la compresión del hormigón no confinado $f'_c=420\text{kg/cm}^2$.
- Resistencia a la compresión del hormigón confinado $f'_{cc}=620\text{kg/cm}^2$.
- Resistencia a la fluencia de las barras de acero de refuerzo $f_y=5000\text{kg/cm}^2$.
- Área de las barras de acero de refuerzo $A_s=8\text{cm}^2$, área total = 64cm^2 .
- Resistencia a la fluencia del acero de preesfuerzo $f_p=17000\text{kg/cm}^2$.
- Área de los cables de preesfuerzo $A_{sp}=1\text{cm}^2$, área total = 22cm^2 .

Los valores de resistencia de los materiales corresponden a la resistencia esperada, denominada "real". De esta manera para el hormigón la resistencia esperada es $f'_{ce}=1.3f'_c$, y para el acero $f_{ye}=1.1f_y$, (Priestley, Calvi y Kowalsky, 2007).

5.6 Elementos rígidos entre la cabeza del pilote y la losa

En la figura 4 se aprecia un elemento rígido que conecta la cabeza del pilote con el eje de la losa, el cual se modela usando un elemento elástico tipo viga-columna de OpenSees. El comportamiento elástico asumido para este elemento, se debe a su gran rigidez. Esta es de un orden de magnitud mayor a los elementos estructurales adyacentes. La losa de cubierta a la cual se unen los pilotes se discretiza en 43 elementos de 0.25m y se modela usando igualmente el elemento elástico tipo viga-columna. Se asume un comportamiento elástico basado en estudios analíticos y experimentales previos (Shafieezadeh y DesRoches, 2010).

La creación de los elementos rígidos que conectan la cabeza de cada pilote con la losa de cubierta y los elementos discretos de la losa, se realiza en el archivo principal "NLcontrol.tcl".

6. CARGA

El archivo "NL2.txt" corresponde a la rutina utilizada por el programa principal "NLcontrol.tcl" para generar la carga axial y la carga cíclica que se aplica a los pilotes. Esta última consiste en pequeños pasos de desplazamientos de carga y descarga con incrementos de 0.001m en unos ciclos y con 0.0001m en otros ciclos, hasta completar desplazamientos picos de 0.013m (ciclo 1) y 0.195m (ciclo 8). Véase tabla 2.

Tabla 2. Desplazamiento pico de cada ciclo de carga

| Ciclo | Desplazamiento pico (m) |
|-------|-------------------------|
| 1 | 0.013 |
| 2 | 0.026 |
| 3 | 0.039 |
| 4 | 0.052 |
| 5 | 0.065 |
| 6 | 0.098 |
| 7 | 0.130 |
| 8 | 0.195 |

Para la resolución del sistema de ecuaciones se usa el método iterativo de Newton clásico (OpenSees, 2013). Sin embargo, si éste no converge, se prueba en primer lugar Newton con tangente inicial (Newton with initial tangent) y, finalmente, Newton con búsqueda lineal (Newton with line search).

7. SECCIÓN CRÍTICA EN EL PILOTE

En los pilotes denominados "sísmicos" se podrían formar rótulas plásticas en la cabeza y en el cuerpo del pilote (Goel, 2010), por ello se determina la sección crítica del pilote, para verificar la posible formación de la rótula plástica en esta zona. La sección crítica se localiza a una profundidad de -2.5m (elemento 70), de acuerdo al diagrama de momentos en el pilote para cada ciclo de carga (figura 6).

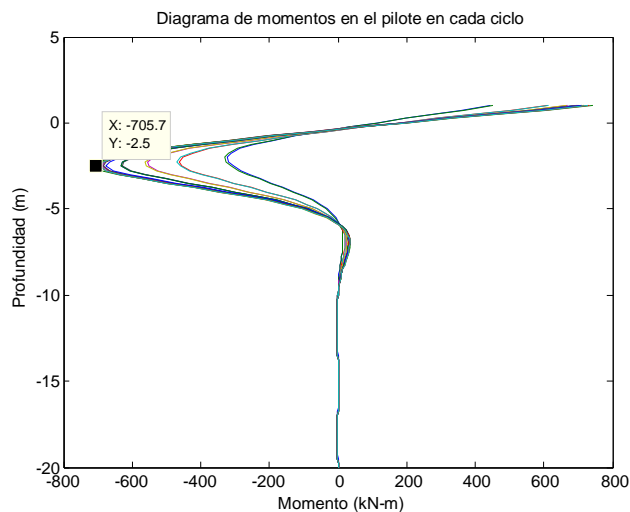


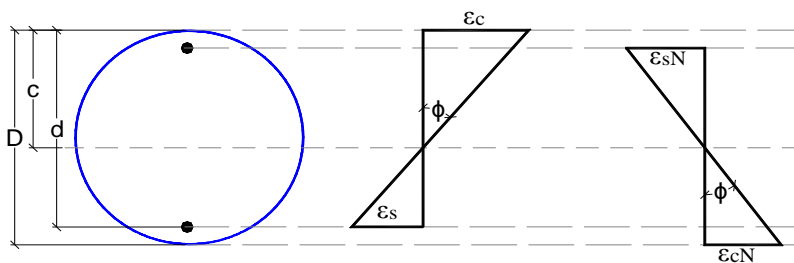
Figura 6. Diagrama de momento máximo a lo largo del pilote en cada ciclo

8. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA RÓTULA PLÁSTICA

En este numeral se explica el cálculo de la longitud plástica del pilote basado en la determinación de una zona del pilote donde la curvatura sea mayor a la curvatura de fluencia. La curvatura se la obtiene mediante las curvas esfuerzo-deformación en la cabeza y en el cuerpo del pilote.

8.1 Curvatura

La curvatura es la relación entre la deformación unitaria del material en la fibra extrema y su distancia al eje neutro. En la figura 7 se muestra la distribución de deformaciones en la fibra positiva y negativa de la sección del pilote.



a) Sección del pilote b) Deformaciones unitarias de la fibra positiva c) Deformaciones unitarias de la fibra negativa

- ε_c = deformación unitaria del hormigón en la fibra positiva
- ε_s = deformación unitaria del acero en la fibra positiva
- ε_{cN} = deformación unitaria del hormigón en la fibra negativa
- ε_{sN} = deformación unitaria del acero en la fibra negativa

Figura 7. Distribución de deformaciones en la fibra positiva y negativa de la sección del pilote

A partir de la figura 7b se obtiene la ecuación de la curvatura:

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_s}{d - c} \tag{1}$$

La ecuación (1) requiere conocer la profundidad del eje neutro *c*, así como la deformación del hormigón ϵ_c y del acero ϵ_s . Sin embargo en este trabajo la curvatura se obtiene únicamente a través de las deformaciones del hormigón en la fibra positiva y negativa, ya que el OpenSees proporciona información de las curvas esfuerzo-deformación en cualquier sitio.

$$\phi = \frac{\epsilon_c - \epsilon_{cN}}{D} \tag{2}$$

Donde: ϵ_c es la deformación unitaria del hormigón en la fibra positiva; ϵ_{cN} es la deformación unitaria del hormigón en la fibra negativa; *D* es el diámetro del pilote.

Usando la ecuación (2), se determina la curvatura a lo largo del pilote, en la cual se analiza dos secciones en particular: la sección en la cabeza del pilote y la sección crítica en el cuerpo del pilote.

8.2 Fluencia en la cabeza del pilote

Se determina el instante en el que se produce la fluencia de la sección en la cabeza del pilote, que puede darse cuando la deformación unitaria del hormigón alcanza una deformación de 0.002 o cuando el esfuerzo de las barras de acero alcanza el esfuerzo de fluencia f_y , lo que ocurra primero. Una vez determinado ese instante, se obtiene la curvatura de fluencia en la cabeza del pilote para la fibra positiva $\phi_{y,CP}$ y negativa $\phi_{y,CN}$. En los términos $\phi_{y,CP}$ y $\phi_{y,CN}$, la letra "C" se utiliza para indicar que la fluencia es en la cabeza del pilote; la denominación "P" o "N" indica el sentido de la fibra, positiva o negativa.

8.3 Fluencia en el cuerpo del pilote

Se determina el instante en el que se produce la fluencia de la sección crítica en el cuerpo del pilote (elemento 70), que puede darse cuando la deformación unitaria del hormigón alcanza una deformación de 0.002 o cuando el esfuerzo del acero de preesfuerzo alcanza el esfuerzo de fluencia f_p , lo que ocurra primero. Una vez determinado ese instante, se calcula la curvatura de fluencia en el cuerpo del pilote para la fibra positiva $\phi_{y,BP}$ y negativa $\phi_{y,BN}$. La denominación "B" viene del término inglés "body" que significa cuerpo, porque la letra "C" ya fue utilizada para la cabeza del pilote; la denominación "P" o "N" indica el sentido de la fibra, positiva o negativa.

8.4 Longitud plástica en el cuerpo del pilote

La longitud plástica L_p se calcula con la ecuación (3):

$$L_p = \frac{\theta_p}{\phi_p} \quad (3)$$

La ecuación (3), tiene implícita la idealización de la curvatura propuesta por Park y Paulay (1983), quienes consideran que la curvatura plástica ϕ_p es constante en una zona plástica de longitud L_p . Además en la ecuación (3), ϕ_p es la curvatura máxima de la región plástica y θ_p es la rotación plástica obtenida por integración numérica de la curvatura.

Para cada instante donde la curvatura en la sección crítica del cuerpo del pilote (elemento 70) sea mayor a la curvatura de fluencia, se debe conocer cuántos elementos hacia abajo y hacia arriba del elemento 70 superan la curvatura de fluencia. Es decir se delimita una región de la curvatura del pilote que supere la curvatura de fluencia, luego con esa región plástica a través de un proceso de integración numérica se determina el área bajo la curva que viene a ser la rotación plástica.

En este artículo se utiliza el método del trapecio para el cálculo de la rotación plástica y se plantea la siguiente ecuación:

$$\theta_p = \text{Área} = \left[\frac{\phi_{p(i)}}{2} + \phi_{p(i+1)} + \phi_{p(i+2)} + \dots + \phi_{p(n-1)} + \frac{\phi_{p(n)}}{2} \right] * dE \quad (4)$$

$$\phi_{p(i)} = \phi_{(i)} - \phi_y$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Donde: ϕ_y es la curvatura de fluencia en el cuerpo del pilote; $\phi_{(i)}$ es la curvatura total en el cuerpo del pilote que alcanza la curvatura de fluencia; $\phi_{p(i)}$ es la curvatura plástica en el cuerpo del pilote; dE es el diferencial de integración, que viene a ser el tamaño de los elementos del pilote

En la figura 8 se muestra un esquema del cálculo de la rotación plástica a partir de la curvatura, en la que intervienen las variables descritas en la ecuación (4). Se aprecia un área sombreada desde la sección i hasta la sección n que corresponde a la rótula plástica. Además se observa que la longitud plástica del pilote L_p , es la altura del rectángulo equivalente que tiene la misma área que la distribución real de la curvatura (Park y Paulay, 1983).

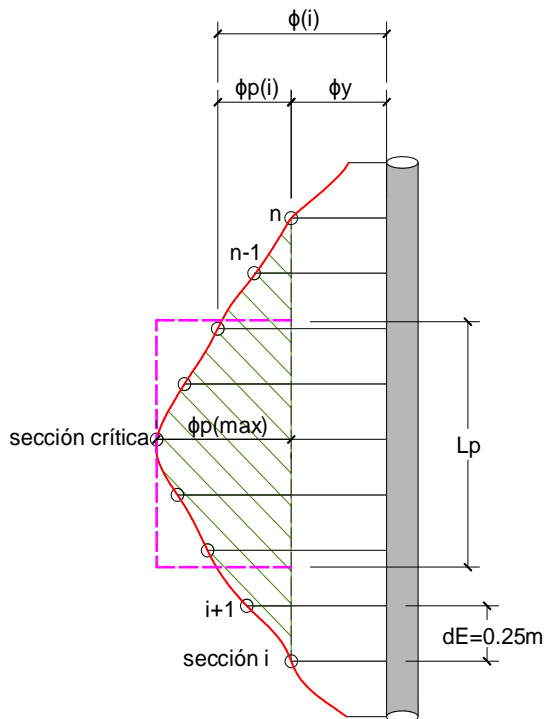


Figura 8. Esquema del cálculo de la rotación plástica en el cuerpo del pilote

En la figura 9 se resume en un cuadro de barras la longitud plástica en el cuerpo del pilote para cada ciclo, donde se aprecia que la longitud plástica máxima es de 0.87m y se presenta en el ciclo 6 para un desplazamiento de 0.098m (Ver tabla 2). La primera rótula plástica se desarrolla en el ciclo 4 para un desplazamiento de 0.052m.

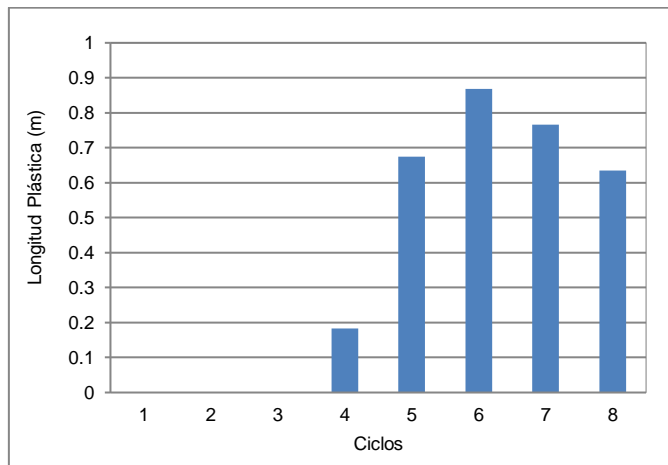


Figura 9. Longitud plástica en el cuerpo del pilote para cada ciclo

8.5 Longitud plástica por flexión en la cabeza del pilote

La longitud plástica por flexión en la cabeza del pilote se determina usando la ecuación (3), que requiere como datos: la rotación plástica θ_p y la curvatura plástica ϕ_p . Utilizando la ecuación (4), se obtiene la rotación plástica, mediante integración numérica de la región de curvatura plástica. Esta región plástica es definida para cada instante en el cual, la curvatura $\phi_{(i)}$ en la cabeza del pilote es mayor a la curvatura de fluencia ϕ_y (figura 10). Por lo tanto esta región empieza en la cabeza del pilote (sección 84) hasta una sección debajo de la cabeza (sección 84-n) que cumpla la condición de que $\phi_{(i)} > \phi_y$. Nótese que en la ecuación (4), la curvatura plástica es: $\phi_{p(i)} = \phi_{(i)} - \phi_y > 0$. El valor de ϕ_p requerido en la ecuación (3) es la curvatura plástica máxima, que siempre se localiza en la cabeza del pilote (sección 84).

Los resultados de la longitud plástica por flexión en la cabeza del pilote se muestran en la figura 11.

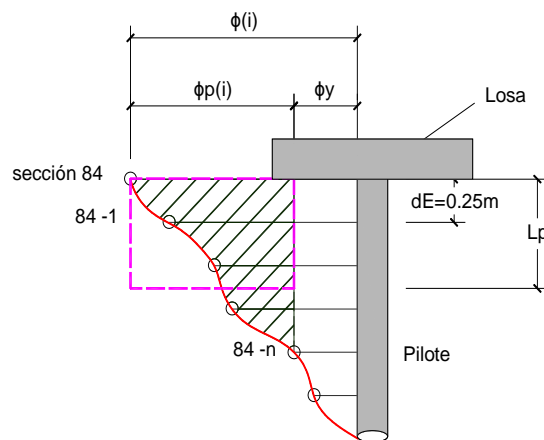


Figura 10. Esquema del cálculo de la rotación plástica en la cabeza del pilote

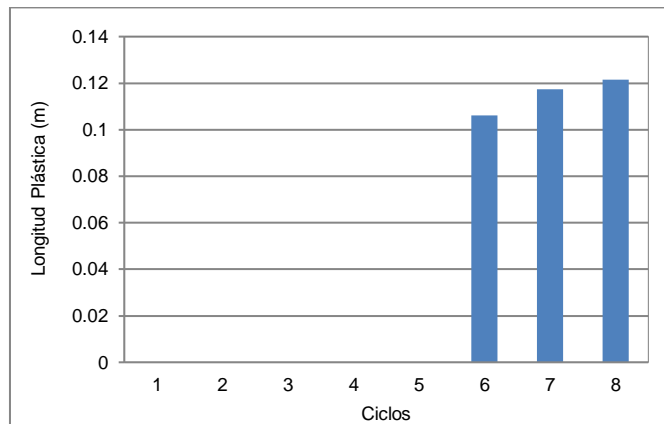


Figura 11. Longitud plástica en la cabeza del pilote para cada ciclo

8.6 Longitud plástica por adherencia en la cabeza del pilote

La longitud plástica por adherencia se determina usando la ecuación (3), al igual que para la flexión. Pero en este caso la rotación plástica θ_p , se obtiene directamente de los archivos de salida de OpenSees en el nudo 247 mostrado en la figura 12.

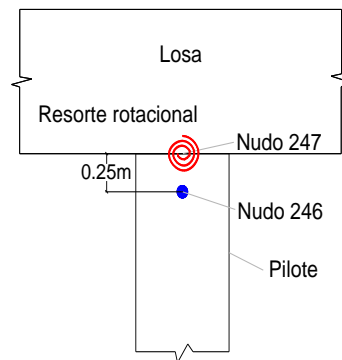


Figura 12. Nudos en la cabeza del pilote 1

La rotación por adherencia θ_a en la cabeza del pilote viene dada por la rotación del resorte rotacional θ_{247} , es decir $\theta_a = \theta_{247}$. Obtenida la rotación θ_a , se define la rotación de fluencia en la cabeza del pilote θ_y de acuerdo al numeral 8.2. La longitud plástica por adherencia se calcula usando la ecuación (5).

$$L_{p,a} = \frac{\theta_a - \theta_y}{\phi_p} \tag{5}$$

En la figura 13 se muestran los resultados obtenidos de la longitud plástica por flexión y por adherencia en la cabeza del pilote, donde se aprecia que la contribución por adherencia es mayor a la flexión.

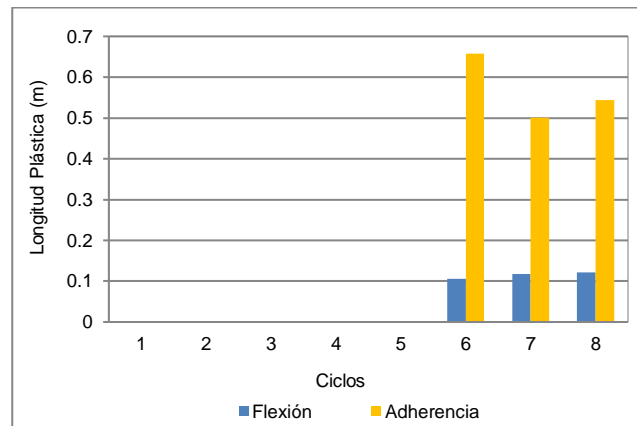


Figura 13. Longitud plástica por flexión y por adherencia en la cabeza del pilote

8.7 Longitud plástica propuesta por Priestley et al. 1996

La ecuación (6), propuesta por Priestley et al. (1996), permite determinar la longitud de la rótula plástica en la cabeza del pilote.

$$L_p = 0.08L_i + 0.022f_y d_{bl} \quad (6)$$

Donde: L_i es la distancia desde la rótula plástica al punto de inflexión; f_y es el esfuerzo de fluencia de las barras de acero en MPa; d_{bl} es el diámetro de las barras de acero (refuerzo longitudinal) en metros.

El primer término de la ecuación (6), representa la propagación de la plasticidad debido a la longitud del miembro (flexión), y el segundo término corresponde a la longitud adicional asociada a la penetración de deformación en la losa (adherencia).

La longitud L_i es aproximadamente igual a 1.32m. Esta longitud se obtiene localizando el punto de inflexión en el diagrama de momentos a lo largo del pilote (figura 6).

El esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo es $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$ y el diámetro del acero de refuerzo es de $d_{bl} = 0.032 \text{ m}$, de acuerdo a las propiedades descritas en el numeral 5.5.

Reemplazando los datos en la ecuación (6), se obtiene que el primer término correspondiente a la flexión es igual a 0.11m, y el segundo término correspondiente a la adherencia es igual a 0.34m. Estos valores se resumen en la Tabla 3 y se comparan con los resultados obtenidos en el modelo 2D.

Tabla 3. Longitud plástica en la cabeza del pilote

| Longitud plástica | Ecuación de Priestley (m) | Modelo 2D (m) |
|-------------------|---------------------------|---------------|
| Por flexión | 0.11 | 0.12 |
| Por adherencia | 0.35 | 0.66 |
| Total | 0.46 | 0.78 |

9. CONCLUSIONES

El modelo 2D de estructura portuaria descrito en este artículo, es una alternativa novedosa para la modelación de un muelle, porque trata de representar de una manera más cercana a la realidad su comportamiento estructural considerando el efecto de la interacción suelo-estructura y las propiedades de los materiales de la sección transversal a través del método de fibras. Así mismo este modelo reduce el tiempo de computación porque analiza únicamente los tres primeros pilotes cercanos a la costa, puesto que son los más propensos a sufrir daño.

Se confirma que en un pilote cercano a la costa, denominado en este trabajo como pilote "sísmico", el daño puede suceder en la cabeza y/o en el cuerpo del pilote. De hecho en el pilote 1 del modelo 2D, la fluencia en el cuerpo del pilote ocurre en el ciclo 4, mientras que la fluencia en la cabeza del pilote tuvo lugar en el ciclo 6. Por lo tanto la primera rótula plástica se forma en el cuerpo del pilote, alcanzando una longitud de 0.87m.

En este trabajo, en la cabeza del pilote se considera no solo el daño causado por la flexión, sino por la adherencia, la cual es modelada con un resorte rotacional que representa el deslizamiento de las varillas con respecto al hormigón en la conexión pilote-losa. La longitud plástica en la cabeza del pilote se obtuvo mediante la contribución independiente de la flexión (0.12m) y la adherencia (0.66m), llegando a un valor total de 0.78m.

La Tabla 3 muestra que la longitud plástica por adherencia es mayor que la de flexión, ya sea utilizando la ecuación (6), (Priestley et al., 1996) o con el modelo 2D. La contribución de adherencia en la longitud plástica total es de 76% para la ecuación (6), y de 85% para el modelo 2D. Esto indica que la contribución por flexión y por adherencia en ambos casos, guardan similitudes en proporción. Sin embargo los valores obtenidos con la ecuación de Priestley et al. (1996) son menores que los del modelo 2D, principalmente la longitud plástica por adherencia. Esto demuestra que los métodos simplificados pueden subestimar la longitud de la rótula plástica obtenida con el modelo 2D.

REFERENCIAS

American Petroleum Institute, API (1987), Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API Recommended Practice 2A (RP-2A), Washington D.C, 17th edition.

APM (2015). Autoridad Portuaria de Manta. Disponible:
<http://www.puertodemanta.gob.ec/quienes-somos/puerto-de-aguas-profundas>

Borg R.C., (2007), "Seismic Performance, Analysis and Design of Wharf Structures: A Comparison of Worldwide Typologies," Ph.D. dissertation, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk (Rose School), Pavia, Italy.

Boulanger R. W., Kutter B. L., Brandenberg S. J., Singh P., Chang. D., (2003), "Pile Foundations in liquefied and laterally spreading ground during earthquakes: Centrifuge experiments and analyses". (UCD/CGM-03/01), Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, Davis, CA.

Boulanger R.W., (2003). The PySimple1 Material, Disponible:
<http://opensees.berkeley.edu>.

Brinch Hansen J., (1961), "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces." Bulletin No. 12, Geoteknisk Institute, Copenhagen.

Calderón J., (2009), "Estudio del impacto macroeconómico potencial de un terremoto catastrófico en la zona de subducción frente a Esmeraldas". Revista Politécnica, Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.

Cámara Marítima del Ecuador (2015): Disponible:
<http://www.camae.org/Puertos.html>

Caiza P., Andrawes B. and LaFave J., (2010), "Structural concrete pile-wharf connection under seismic loading", Proceeding 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake engineering.

Caiza P., Andrawes B. and LaFave J., (2012), "Analytical Modeling and Damage Assessment of Shallow Embedment Pile-Deck Connections", Advances in Structural Engineering.

Caiza P., (2013), "Seismic Modeling, Analysis and Design of Structural Concrete Pile-Deck Connections", Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA.

El Telégrafo (2014). "La red de los puertos artesanales en Ecuador estará concluida en 2017 (Infografía)", 2014, ago. 22. Disponible:
<http://www.telegrafo.com.ec/noticias/informacion-general/item/la-red-de-los-puertos-artesanales-en-ecuador-estara-concluida-en-2017-infografia.html>.

Foltz R. , (2011), "Structural Behavior and Modeling of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Earthquake-Resistant Design," Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA.

Goel R.K., (2010), "Simplified procedure for seismic evaluation of piles with partial-moment connection to the deck in marine oil terminals", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 5, pp. 521-531.

Jellin A., (2008). "Improved Seismic Connections for Pile-Wharf Construction", Master Thesis, University of Washington, Washington, USA.

Joen P. H., Park R., Priestley M. J. N., (1988). "Seismic Performance of Prestressed Concrete Piles and Pile-Pile Cap Connections", Research Report 88-3, University of Canterbury, New Zealand.

Kawamata Y., (2009), "Seismic Performance of Pile-supported Container Wharf Structures in Rockfill", Ph.D. dissertation, Oregon State University, Oregon, USA.

MAGAP (2015). Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Subsecretaría de Recursos Pesqueros. Disponible: <http://puertos.viceministerioap.gob.ec/>

McGann C., (2010). Laterally-Loaded Pile Foundation. Disponible:http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Laterally-Loaded_Pile_Foundation

Neuenhofer A. and Filippou F. C., (1997). Evaluation of nonlinear frame finite-element models. *Journal of Structural Engineering*, 123(7):958–966, July 1997.

Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC (2015). Capítulo 2: Peligro Sísmico y Diseño Sismo Resistente. Quito.

Open System for Earthquake Engineering Simulation, OpenSees (2013). Disponible: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Algorithm_Command

Park R. and Paulay T., (1983), "Estructuras de Concreto Reforzado", Editorial Limusa, México, 796p.

Priestley M.J.N., Seible F. and Calvi G.M., (1996). "Seismic Design and Retrofit of Bridges", Wiley, New York, 686 pp.

Priestley M.J.N., Calvi G.M. and Kowalsky M.J., (2007). "Displacement-Based Seismic Design of Structures", IUSS Press, Pavia, Italy, 720 pp.

Reese L.C. and Van Impe W.F., (2001). "Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading". A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 463p.

Shafieezadeh A., DesRoches R., (2010). Simplification of 3D Wharf Models for Nonlinear Dynamic Analysis. EERI 62nd annual meeting, San Francisco, California.

A. Shafieezadeh, (2011), "Seismic Vulnerability Assessment of Wharf Structures," Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA.

Silva P. F., Seible F., Priestley M. J. N., (1997). "Response of Standard Caltrans Pile-to-Pile Cap Connections Under Simulated Seismic Loads", Report No. SSRP-97/09. Caltrans, University of California at San Diego, California, USA.

Sriitharan S. and Priestley M. J. N., (1998). "Seismic Testing of a Full-Scale Pile-Deck Connection Utilizing Headed Reinforcement", Report TR98/14, Department of Structural Engineering, University of California at San Diego, California, USA.

Yang Ch., DesRoches R. and Rix G.. "Numerical fragility analysis of vertical-pile-supported wharves in the Western United States", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 579-594, 2012.