

Aplicaciones de estudios no lineales de pilotes para la evaluación de efectos de interacción suelo estructura teniendo en cuenta efectos cinemáticos.

Applications of non-linear studies of piles for the evaluation of soil-structure interaction effects taking into account the kinematic effects.

Patricio Donoso, Patricia Rodríguez & Oscar Taiba.

Ferrara, Santiago, Chile, patricio.donosoferrara.cl

Carlos Merino.

Arup, Madrid, España

RESUMEN: Para el diseño de fundaciones profundas como pilotes de fundación, la consideración de los efectos de las cargas sísmicas es una arista cada vez más importante en los diseños. Durante los terremotos, los pilotes están sometidos principalmente a dos tipos de cargas: cargas inerciales y cinemáticas. Las cargas inerciales son producidas por la vibración de la superestructura, mientras que las cargas cinemáticas se generan debido a la deformación sísmica del suelo a lo largo del pilote generando cargas adicionales en estos, siendo necesario un análisis complementario para su determinación. En el presente artículo se presenta un caso de estudio de la interacción suelo-estructura de una superestructura pilotada en un suelo chileno en el programa Plaxis 2D y como resultado se presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados que deben darse en la interfaz de los suelos para que los efectos cinemáticos sean relevantes. Además, se realiza una comparativa de la predicción de momentos máximos en pilotes debido a estos efectos con expresiones analíticas y lo obtenido con elementos finitos.

PALABRAS CLAVE: Pilotes, efectos cinemáticos, interacción suelo-estructura, respuesta no lineal, respuesta sísmica.

ABSTRACT: For the design of deep foundations such as foundation piles, considering the effects of seismic loads is an increasingly important aspect in designs. During earthquakes, piles are mainly subjected to two types of loads: inertial loads and kinematic loads. Inertial loads are produced by the vibration of the superstructure, while kinematic loads are generated due to the seismic deformation of the soil along the pile, generating additional loads on them, requiring a complementary analysis for their determination. This article presents a case study of the soil-structure interaction of a piled superstructure on Chilean soil in Plaxis 2D, and as a result, a sensitivity analysis of the parameters involved is presented, which must be given at the soil interface for the kinematic effects to be relevant. Additionally, a comparison of the prediction of maximum moments in piles due to these effects is made with analytical expressions and what is obtained with finite elements.

KEYWORDS: Piles, kinematic effects, soil-structure interaction, nonlinear response, seismic response.

1 INTRODUCCIÓN

Para el diseño de fundaciones profundas como pilotes de fundación, la consideración de los efectos de los terremotos y las cargas sísmicas es una arista cada vez más importante en los diseños sobre todo en países de una alta demanda sísmica como Chile. Poulos (2017) presentó una guía general de cómo abordar el diseño de pilotes bajo eventos sísmicos como terremotos durante los cuales el suelo puede experimentar un aumento de la presión de poros, movimientos horizontales dependientes del tiempo durante y después del terremoto, movimientos laterales dependientes del tiempo durante un terremoto, indicando respecto al análisis lateral que existen dos fuentes de carga lateral adicional que deben ser considerados en el diseño de pilotes:

- Solicitaciones Inerciales: Estas son solicitaciones que se producen en los pilotes debido a aceleraciones dentro de la estructura debido al terremoto. Su consideración se limita a fuerzas y momentos laterales que se aplican en la cabeza de los pilotes.
- Solicitaciones Cinemáticas: Estas son solicitaciones que se generan en los pilotes debido a los movimientos del

suelo producidos por el terremoto. Los movimientos del suelo interactúan con los pilotes dada la diferencia de rigideces entre los pilotes y el suelo en movimiento, desarrollando tensiones laterales entre el pilote y el suelo que tendrá como resultado final fuerzas cortantes y de momentos flectores en los pilotes. Estas solicitaciones son dependientes del tiempo.

Este trabajo se enfoca en los efectos cinemáticos en pilotes, los cuales, pueden evaluarse de forma simplificada mediante ecuaciones con una base sólida, mediante un enfoque pseudoestático (Tabash et al. 2001) y modelación numérica mediante elementos finitos, entre otros (Poulos 2017).

Para analizar la interacción suelo-estructura se realiza un modelo de una superestructura pilotada en un suelo chileno en el programa Plaxis 2D teniendo énfasis en el análisis de los efectos cinemáticos en los pilotes y como resultado se presentan los resultados de tres metodologías para las solicitaciones cinemáticas generadas sobre los pilotes.

Una metodología consiste en un modelo dinámico con un terremoto impuesto en la base del depósito considerándose dos casos: 1) un caso con las propiedades de velocidad de onda de corte

iniciales medidas in situ en terreno y otro caso 2) donde se degradan las propiedades dinámicas para generar un contraste en dos estratos donde se evalúan los efectos cinemáticos en cuanto a las solicitaciones generadas sobre pilotes de 18 [m] de largo que están empotrados en el estrato inmediatamente inferior al suelo degradado donde se mantienen las propiedades medidas in situ en el terreno.

La segunda metodología consiste en un modelo pseudoestático imponiendo la envolvente de desplazamiento máxima del suelo obtenida desde el modelo dinámico alrededor de los pilotes para los dos casos antes descritos y posteriormente, se realiza una comparativa de las solicitaciones cinemáticas sobre los pilotes mediante ambas metodologías.

La tercera metodología consiste en obtener los momentos debido a efectos cinemáticos en pilotes mediante expresiones propuestas en la literatura.

Para los distintos casos analizados y metodologías se realiza una comparativa de la predicción de momentos máximos debido a efectos cinemáticos en pilotes de tres diferentes tamaños con expresiones propuestas en la literatura (para el momento flector), y lo obtenido mediante el modelo dinámico y el enfoque pseudoestático.

2 MARCO TEÓRICO

Para estimar los efectos de las solicitaciones cinemáticas sobre pilotes existen diversas metodologías en la literatura. En esta sección se indican de forma resumida las recomendaciones, supuestos para la evaluación del cálculo de solicitaciones cinemáticas en pilotes de acuerdo con las tres metodologías consideradas.

2.1 Metodología 1: Modelo FEM Dinámico

Para esta metodología se considera un análisis directo mediante elementos finitos con el programa Plaxis 2D dinámico considerando recomendaciones generales de la literatura asociadas a efectos cinemáticos y comportamiento sísmico de pilotes (Barghouthi et al. 1984, Fan et al. 1991, Ashford et al. 2011, Cairo et al. 2011, NIST 2012, Gazetas 2013, Sica et al. 2013, Sluis et al. 2014, Di Laora et al. 2015, Hokmabadi et al. 2018, Sakellariadis et al. 2019, FEMA 2020, Gazetas 2022, Radhima et al. 2022).

Gazetas (2022) dio recomendaciones generales a tener en consideración para la modelación y análisis de los efectos cinemáticos asociados a la interacción suelo-estructura para pilotes donde se tienen que cumplir dichas condiciones para obtener resultados que representen los efectos modelados. Dichas condiciones son indicadas más adelante, las cuales, son consideradas en la modelación realizada para esta metodología.

De acuerdo con Gazetas (2022) los efectos cinemáticos son: “efectos que modifican la excitación sísmica en la base de la estructura con respecto al campo libre y producen cargas en los elementos de fundación”. Con respecto a recomendaciones asociadas al análisis y modelación de pilotes o estructuras enterradas indica lo siguiente:

- La modificación cinemática del movimiento en la fundación debe ser considerada en fundaciones como pilotes, fundaciones embebidas una profundidad de al menos dos pisos.
- Para pilotes flexibles, la modificación del movimiento de campo libre puede ser obviada y el movimiento de

campo libre puede ser usado como movimiento de entrada de la fundación.

- Un pilote puede ser considerado flexible si cumple con la siguiente condición:

$$\frac{E_p}{E_s} \leq \left(\frac{L_p}{1.5d}\right)^4 \text{ para } L_p \geq L_c \approx 1.5d \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.25} \quad (1)$$

Donde:

L_p : Largo del pilote.

d : Diámetro del pilote.

E_p , E_s : Módulo de elasticidad del suelo y pilote.

El largo L_c definido en la ecuación (1) se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

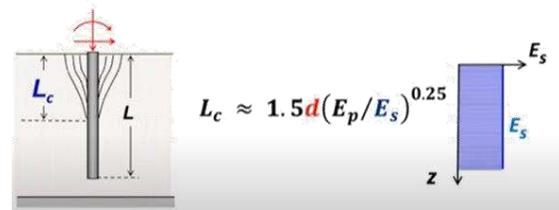


Figura 1. Definición de largo L_c (Gazetas 2022)

- La interacción cinemática debe ser obviada para la componente vertical de la acción sísmica.
- Los efectos cinemáticos pueden ser calculados como parte del sistema completo de estructura-fundación-suelo o mediante un análisis separado en el cual únicamente la fundación en contacto con la masa y el suelo son incluidos.
- El análisis separado puede ser realizado mediante elementos finitos (FE) o diferencias finitas (FD). Para pilotes pueden ser usados modelos de Winkler con resortes laterales de suelo y amortiguadores que representan la acción del suelo en contacto con los elementos de fundación.
- En el modelo de elementos finitos (FE) o diferencias finitas (FD) del sistema suelo-pilote, la excitación sísmica debe ser impuesta en la base del estrato de suelo y las condiciones laterales deben ser capaces de deformarse como el campo libre.
- Para el modelo de Winkler, el suelo debe ser discretizado en capas horizontales. Un análisis unidimensional de respuesta del suelo debe ser llevado a cabo para obtener el desplazamiento de cada capa en cada instante de tiempo. Ese desplazamiento debe ser impuesto en los apoyos de los resortes laterales y amortiguadores.

2.2 Metodología 2: Modelo FEM Pseudoestático

Para esta metodología se considera un análisis directo mediante elementos finitos con el programa Plaxis 2D estático con las consideraciones indicadas en la literatura asociadas a efectos cinemáticos en pilotes.

Tabesh et al. (2001) propusieron un enfoque pseudoestático para estimar la respuesta máxima de un pilote durante un

terremoto. Este enfoque se resume en las siguientes etapas o pasos (Poulos 2017):

- 1) Se realiza un análisis de respuesta de campo libre para obtener el movimiento en la superficie y el máximo desplazamiento del suelo a lo largo del pilote. En general, se utiliza un análisis unidimensional, usando códigos como “SHAKE”, “DEEPSOIL”, “PLAXIS” o códigos personalizados.
- 2) El movimiento en superficie obtenido en el paso 1 se usa en un análisis espectral de un sistema de un grado de libertad cuyo período natural es igual al de la estructura soportada. La aceleración espectral “ a_{spec} ” se obtiene de esta forma.
- 3) Se realiza un análisis estático del pilote donde se somete simultáneamente a la aplicación de las siguientes solicitaciones:
 - i. Fuerza lateral en la cabeza del pilote con un valor igual a $a_{spec} \cdot P$, donde “ P ” es la carga vertical que actúa sobre la cabeza del pilote.
 - ii. Se aplican los movimientos máximos del suelo a lo largo del pilote de acuerdo con el paso 1 descrito anteriormente.

El análisis anteriormente descrito permitirá obtener el momento flector máximo y fuerza cortante desarrollada por los pilotes por la aplicación de solicitaciones inerciales y cinemáticas simultáneamente. En el presente trabajo el enfoque principal está asociado a los efectos cinemáticos producido en pilotes por lo que para efectos de los análisis se aplica el subíndice (ii) de la etapa 3 despreciando los efectos inerciales.

Poulos (2001) presenta resultados para la respuesta de pilotes en un análisis pseudoestático en diversos casos de suelos licuables (suelos con densidad relativa uniforme, dos estratos: un licuable y otro no, etc.). En la Figura 2 se presenta el análisis de Poulos (2001) respecto a los momentos flectores, desplazamientos laterales considerando un depósito de dos estratos donde un estrato era licuable y el otro no. En las figuras se comparan las respuestas de los pilotes en un análisis dinámico y otro pseudoestático.

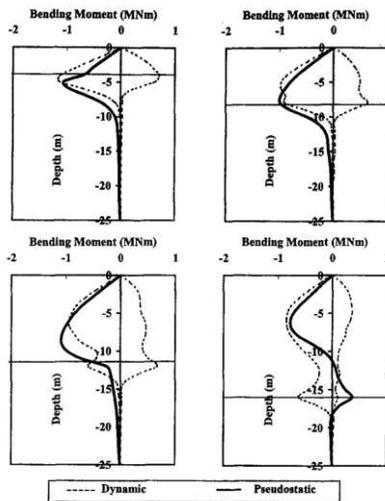


Figura 2. Variación del momento flector en función de la profundidad de un pilote de 25 [m] con un diámetro de 0,6 [m] en un depósito de suelo de dos estratos (Poulos 2001).

2.3 Metodología 3: Métodos simplificados para obtención de momentos debido efectos cinemáticos en pilotes

Para esta metodología se considera un análisis directo con ecuaciones de la literatura asociadas a momentos solicitantes debido a efectos cinemáticos de pilotes (Mylonakis 2001, Nikolaou et al. 2001).

2.3.1. Nikolaou et al, 2001

Nikolaou (1995), Nikolaou et al (2001) entrega una metodología de diseño para obtener el momento máximo inducido en un pilote debido a la flexión cinemática. En el estudio que realizaron descubrieron que los momentos inducidos eran máximos en las interfaces entre capas de diferentes rigideces y en base a eso propusieron expresiones para calcular el momento flector entre dos capas como se ilustra en la Figura 3. Por otra parte, hicieron una distinción entre el momento flector máximo debido a un movimiento armónico en estado estacionario y bajo una excitación transitoria como un terremoto. Bajo una sollicitación de tipo transitoria indicaron que sería de menor valor que del estado estacionario dado que requeriría una gran cantidad de ciclos para desarrollarse.

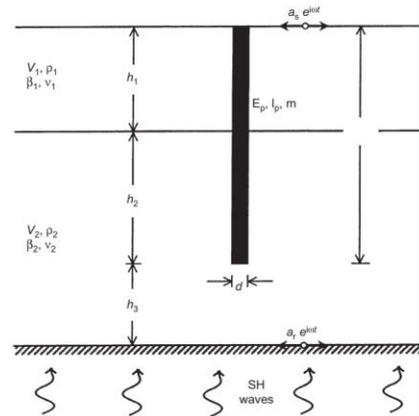


Figura 3. Método adoptado para determinar momentos cinemáticos (Nikolaou et al 2001).

La relación aproximada para determinar el momento flector máximo (M_{pk}) dada por Nikolaou et al (2001) es la siguiente:

$$M_{pk} = \eta M_{res} \quad (2)$$

Donde:

- M_{res} : Momento flector desarrollado en condiciones resonantes.
- η : Factor de reducción para permitir condiciones no resonantes.

A partir de un análisis en el dominio de las frecuencias, Nikolaou et al (2001) propuso la siguiente fórmula ajustada para M_{res} :

$$M_{res} = 0.042 \tau_c d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^{0.30} \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \left(\frac{V_{s2}}{V_{s1}}\right)^{0.5} \quad (3)$$

Donde:

τ_c : Esfuerzo de corte máximo dado por la siguiente relación:

$$\tau_c = a_s \rho_1 h_1 \quad (4)$$

- d : Diámetro del pilote.
- L : Largo del pilote.
- E_p : Módulo de Young del pilote.
- E_1 : Módulo de Young del suelo de la capa superior.
- V_{s1} : Velocidad de onda de corte promedio del estrato superior.
- V_{s1} : Velocidad de onda de corte promedio del estrato inferior.
- a_s : Aceleración máxima en superficie del suelo.
- ρ_1 : Densidad del estrato superior.
- h_1 : Espesor del estrato superior.

Para la determinación del factor η , Nikolaou et al (2001) en su artículo original propuso las siguientes expresiones para dos casos particulares:

Caso 1: Para una condición de resonancia en que el período fundamental del suelo se encuentra en un rango de períodos de la excitación, el factor η se determina como:

$$\eta = 0.04 N_c + 0.23 \quad (5)$$

Caso 2: Para condiciones de no resonancia donde el período fundamental del suelo se encuentra fuera del rango del período de la excitación, el valor de η se calcula como:

$$\eta = 0.015 N_c + 0.17 \approx 0.2 \quad (6)$$

Sica et al (2011) hizo énfasis en la relación del momento flector y la relación entre frecuencias predominante del terremoto y la natural del suelo como se muestra en la Figura 4 y en base a eso propuso posteriormente una expresión alternativa para η en base a análisis paramétricos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.68 \left(\frac{f_{input}}{f_1} \right)^{-1,5} \quad (7)$$

- Donde:
- f_{input} : Frecuencia predominante del terremoto.
- f_1 : Frecuencia natural del suelo.

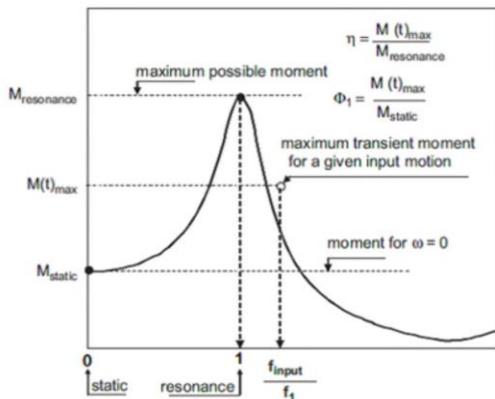


Figura 4. Relación entre momento de flexión del pilote y la relación de frecuencias f_{input}/f_1 (Sica et al 2011).

La ecuación (7) se cumple para $f_{input}/f_1 \geq 1.5$, y para relaciones que no satisfacen la relación anterior el valor de η es de 0.37.

Para obtener el valor de f_{input} se puede determinar como el recíproco del período predominante del terremoto. El valor de la frecuencia natural del depósito del suelo puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$f_1 = \frac{V_{s30}}{4 H} \quad (8)$$

Donde:

- H : Es el espesor de suelo del depósito de suelo.
- V_{s30} : Velocidad de onda de corte promedio en treinta metros.

2.3.2. Mylonakis, 2001

Mylonakis (2001) propuso para el cálculo del momento máximo debido a efectos cinemáticos la siguiente expresión:

$$M = \frac{E_p I_p \left(\frac{\epsilon_p}{\gamma_1} \right) \Phi \gamma_1}{r} \quad (9)$$

Donde:

- r : Radio del pilote.
- I_p : Momento de inercia del pilote.
- E_p : Módulo de Young del pilote.
- γ_1 : Deformación de corte del suelo obtenida en la interfaz entre capas.
- Φ : Coeficiente adimensional dado por la siguiente expresión:

$$\Phi = \frac{\left(\frac{\epsilon_p}{\gamma_1} \right)}{\left(\frac{\epsilon_p}{\gamma_1} \right)_{w=0}} \quad (10)$$

Las expresiones indicadas en la ecuación (10) se determinan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{\epsilon_p}{\gamma_1} \right) = 1.5 \left(\frac{k_1}{E_p} \right)^{\frac{1}{4}} F \quad (11)$$

$$\left(\frac{\epsilon_p}{\gamma_1} \right)_{w=0} = \frac{c^2 - c + 1}{2 c^4} \left(\frac{H_1}{d} \right)^{-1} \left\{ \left[3 \left(\frac{k_1}{E_p} \right)^{\frac{1}{4}} (h_1/d) - 1 \right] c (c - 1) - 1 \right\} \quad (12)$$

Donde:

$$\left(\frac{\epsilon_p}{\gamma_1} \right) = 1.5 \left(\frac{k_1}{E_p} \right)^{\frac{1}{4}} F \quad (13)$$

$$c = G_2/G_1 \quad (14)$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{k_1}{4 E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (15)$$

El valor de h_1 es el valor del espesor del primer estrato.

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 Caracterización geotécnicas del sitio en estudio

Para el sitio en estudio ubicado en la comuna de Concepción, región del Biobío, Chile, se realiza una campaña de exploración

completa consistente en: sondajes rotatorios con extracción de muestra continua y medición de SPT (longitud máxima 47 [m]), ensayos SCPTu (longitud máxima de 32 [m]) con medición de V_s (ensayo downhole), ensayos geofísicos para medición de V_s , V_p y medición de periodo predominante del sitio (T_g). Por otra parte, se realizan ensayos de laboratorio de clasificación completa y se cuenta con información de ensayos triaxiales cíclicos. La ubicación de las prospecciones se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Ubicación en planta de exploraciones geotécnicas del sitio de estudio.

En la Figura 6 se presenta el resultado de la medición de onda de corte en el ensayo downhole realizado en el ensayo SCPTu1.

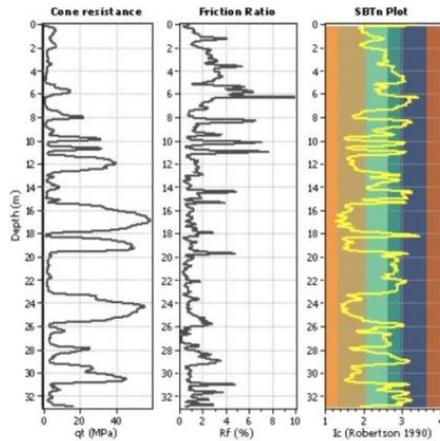


Figura 6. Resultados de ensayo SCPTu1 del sitio en estudio.

Considerando la exploración directa realizada en el sitio y los resultados de los ensayos geofísicos para medición de V_s se tiene el modelo estratigráfico presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelo estratigráfico del terreno en estudio.

Estrato	Profundidad [m]	Descripción	V_s [m/s]
E1	0.0 – 5.0	Arcilla	180
E2a	5.0 – 15.0	Limo arenoso	225
E2b	15.0 – 25.0	Limo arenoso	225

Estrato	Profundidad [m]	Descripción	V_s [m/s]
E3	25.0 – 37.0	Arena	240
E4	37.0 – 47.0	Roca metamórfica	1800
			$V_{s30}=220$

De acuerdo con las mediciones de Nakamura realizadas la frecuencia predominante del suelo es igual a 2.0 ± 0.1 [Hz] con una amplitud superior a 4. Teniéndose lo anterior, el período predominante del suelo es 0.5 ± 0.1 [s]. Por otra parte, considerando los resultados de los ensayos triaxiales ($\varepsilon_a < 2.5$ [%]) por lo que no se considera licuación para el análisis.

4 MODELACIÓN FEM

La modelación numérica se realiza en una malla con deformación plana con elementos triangulares de 15 nodos en el programa Plaxis 2D, teniendo en cuenta la estratigrafía presentada en el inciso 3.1. La malla tiene un ancho de 80 [m] y una profundidad de 45 [m]. Se ha considerado un edificio de 5 pisos con subterráneo y bajo el sistema de fundación se consideran pilotes de 18 [m], espaciados a 5 [m]. Se ha considerado el nivel freático a 3 [m] bajo el nivel de terreno natural. En la Figura 7 se presenta el modelo y la nomenclatura de los pilotes para el análisis.

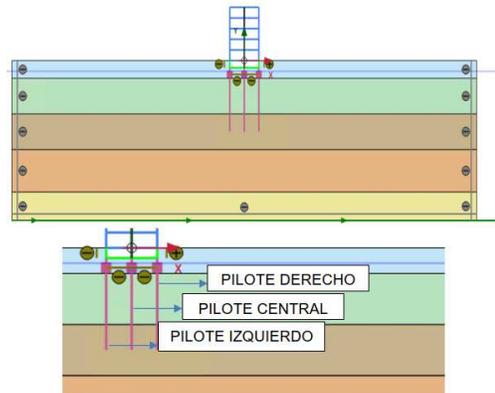


Figura 7. Modelo en deformación plana desarrollado en Plaxis 2D y nomenclatura de pilotes.

Los elementos estructurales para las fundaciones, pisos y muros se modelan como tipo “plate”, las columnas por su parte se modelan como tipo “node to node anchor” y finalmente los pilotes como tipo “embedded beam row”.

Para la modelación se consideran dos casos: caso 1 (propiedades del terreno con V_{s30} de 220 [m/s]) y caso 2 donde se degradan las propiedades de los estratos E1 y E2b a un V_s de 80 [m/s], teniéndose un V_{s30} de 120 [m/s].

En el análisis se consideran tres distintos diámetros de pilotes: 30 [cm], 60 [cm] y 120 [cm].

En cuanto al terremoto ingresado, se utiliza el terremoto “El Centro” (1940) en su componente sureste, con una duración de 53.4 [s] y un PGA de 0.348 [g], ya que posee datos procesados y poco ruido; este fue obtenido desde “The center for engineering Strong Motion Data”.

Para los suelos presentes en el sitio se usa un modelo constitutivo tipo “Hardening Soil Small” (HSS). En la Tabla 2 se presentan los parámetros geotécnicos utilizados para el caso 1 y el

caso 2 (entre paréntesis los parámetros que sufren modificación).

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de los suelos y roca utilizados en la modelación en Plaxis 2D para el caso 1 y 2

Parámetro	E1	E2a	E2b	E3	E4
Modelo	HS Small	HS Small	HS Small	HS Small	Elástico
γ_{sat} [kN/m ³]	15	17	17	19	27.5
γ_{unsat} [kN/m ³]	17	19	19	20	27.5
c' [kPa]	10	10	10	5	-
ϕ' [°]	18	22	22	30	-
ψ [°]	-	-	-	-	-
E_{50}^{ref} [MPa]	15 (3)	20 (2.5)	40	40	-
E_{oed}^{ref} [MPa]	12 (2.4)	16 (2.0)	32	40	-
E_{ur}^{ref} [MPa]	36 (7.1)	48 (6.1)	96	120	-
G_0^{ref} [kPa]	56000 (11000)	98000 (11000)	110000	120000	-
$\gamma_{0.7}$ [-]	$2.4 \cdot 10^{-4}$ ($1.2 \cdot 10^{-3}$)	$1.2 \cdot 10^{-4}$ ($9.5 \cdot 10^{-4}$)	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	-
E [MPa]	-	-	-	-	20000
ν [-]	-	-	-	-	0.25

El nivel de deformación cortante $\gamma_{0.7}$ en la cual el módulo de deformación de corte secante G_s es reducido al 70 [%] de G_0 . En este estudio se toman como referencia las curvas de degradación para arenas de (Menq 2003) y para suelos finos de (Vucetic & Dobry 1991).

5 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las tres metodologías consideradas.

5.1 Fuerzas internas de Momento y Corte en pilotes según Metodología 1

En la Figura 8 a Figura 13 se muestran los resultados obtenidos de fuerzas internas de momento y corte para la metodología 1 en el caso 1 y 2.

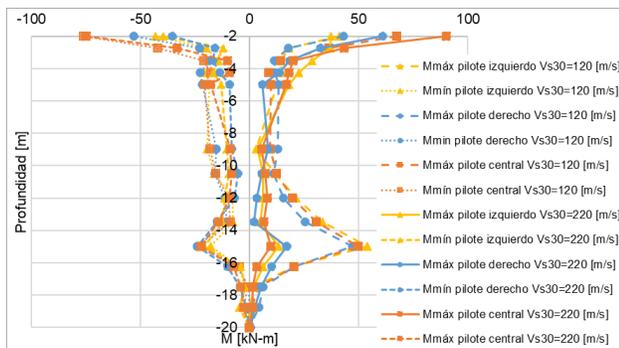


Figura 8. Envolvente de momentos obtenida del modelo dinámico para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 30 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{máx}$ es la envolvente máxima, $M_{mín}$ es la envolvente mínima.

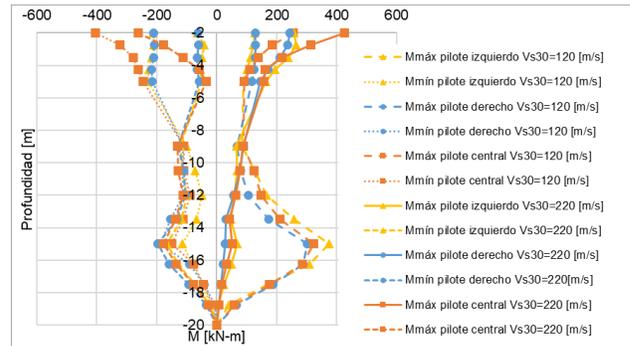


Figura 9. Envolvente de momentos obtenida del modelo dinámico para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 60 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{máx}$ es la envolvente máxima, $M_{mín}$ es la envolvente mínima.

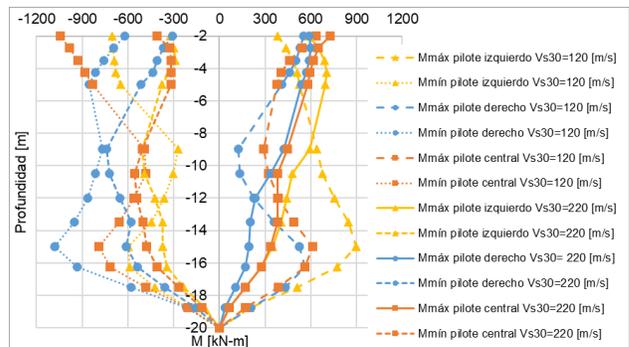


Figura 10. Envolvente de momentos obtenida del modelo dinámico para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 120 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{máx}$ es la envolvente máxima, $M_{mín}$ es la envolvente mínima.

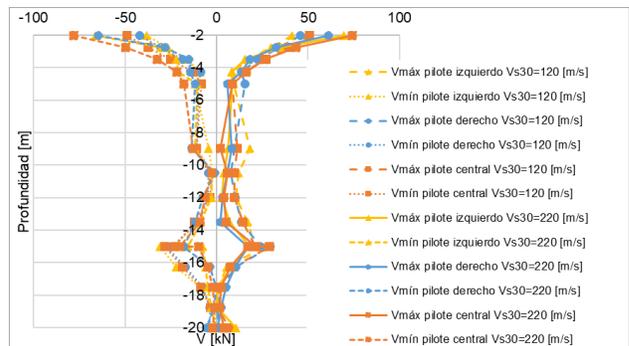


Figura 11. Envolvente de corte obtenida del modelo dinámico para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 30 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{máx}$ es la envolvente máxima, $V_{mín}$ es la envolvente mínima.

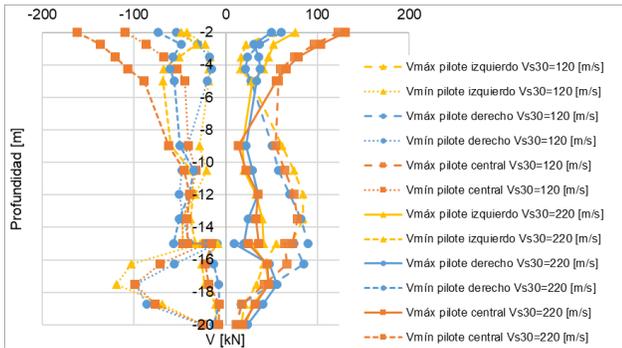


Figura 12. Envoltura de corte obtenida del modelo dinámico para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 60 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{m\acute{a}x}$ es la envoltente máxima, $V_{m\acute{i}n}$ es la envoltente mínima.

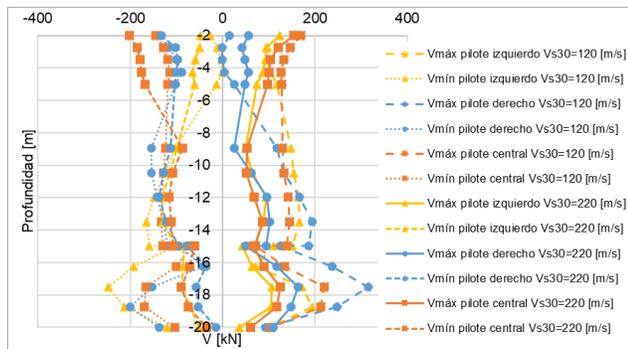


Figura 13. Envoltura de corte obtenida del modelo dinámico para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 120 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{m\acute{a}x}$ es la envoltente máxima, $V_{m\acute{i}n}$ es la envoltente mínima.

5.2 Fuerzas internas de Momento y Corte en pilotes según Metodología 2

En la Figura 14 a Figura 19 se muestran los resultados obtenidos de fuerzas internas de momento y corte para la metodología 2 en el caso 1 y 2.

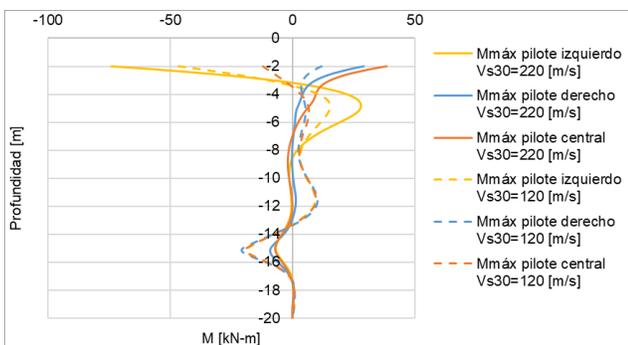


Figura 14. Momento obtenido del modelo pseudoestático para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 30 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{m\acute{a}x}$ es la envoltente máxima, $M_{m\acute{i}n}$ es la envoltente mínima.

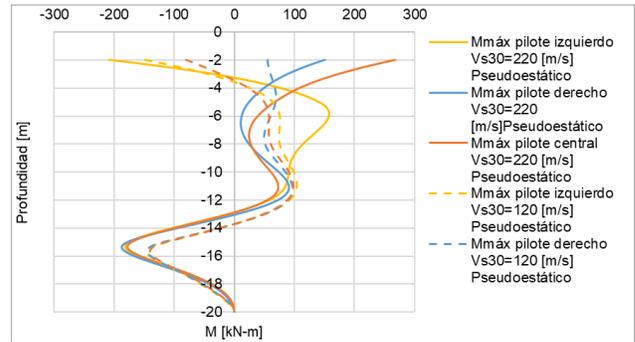


Figura 15. Momento obtenido del modelo pseudoestático para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 60 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{m\acute{a}x}$ es la envoltente máxima, $M_{m\acute{i}n}$ es la envoltente mínima.

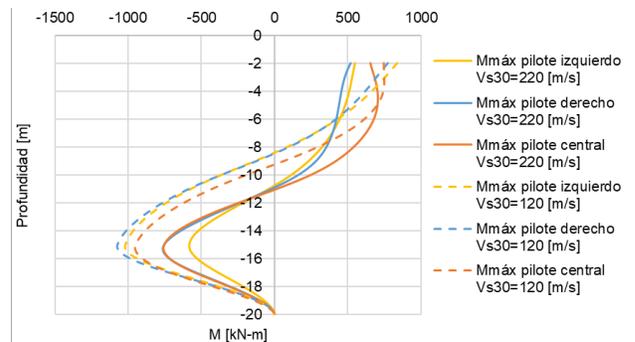


Figura 16. Momento obtenido del modelo pseudoestático para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 120 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{m\acute{a}x}$ es la envoltente máxima, $M_{m\acute{i}n}$ es la envoltente mínima.

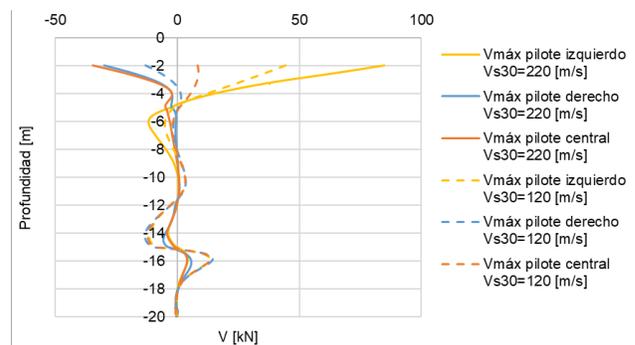


Figura 17. Corte obtenido del modelo pseudoestático para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 30 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{m\acute{a}x}$ es la envoltente máxima, $V_{m\acute{i}n}$ es la envoltente mínima.

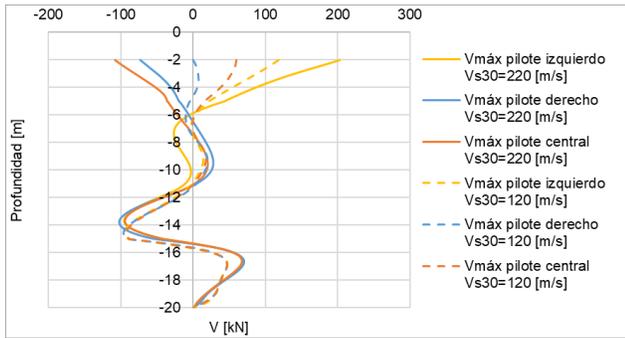


Figura 18. Corte obtenido del modelo pseudoestático para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 60 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{m\acute{a}x}$ es la envolvente máxima, $V_{m\acute{i}n}$ es la envolvente mínima.

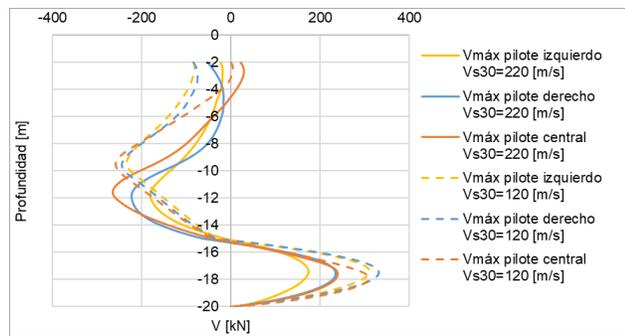


Figura 19. Corte obtenido del modelo pseudoestático para pilote izquierdo, central y derecho para diámetro de 120 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{m\acute{a}x}$ es la envolvente máxima, $V_{m\acute{i}n}$ es la envolvente mínima.

5.3 Fuerzas internas de momento en pilotes según Metodología 3

En la Tabla 3 muestran la estimación del momento debido a efectos cinemáticos en los pilotes de acuerdo con la metodología 3.

Tabla 3. Momentos máximos obtenidos mediante metodologías simplificadas

Metodología	Momento [kN-m]					
	$V_{s30}=220$ [m/s]			$V_{s30}=120$ [m/s]		
	Diámetro [m]					
	0.3	0.6	1.2	0.3	0.6	1.2
Nikolaou	9.12	59.24	384.97	47.96	311.64	2025.07
Mylonakis	8.09	51.12	500.76	26.13	314.35	2654.94

6 COMPARATIVA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 20 a Figura 25 se muestra una comparativa de las fuerzas internas de momento y corte obtenida mediante la metodología 1 y 2. Como puede observarse a partir de la Figura 20 a Figura 22 la distribución de momento del modelo pseudoestático tiende a estar dentro de las envolventes de momentos del modelo dinámico siendo esto similar el comportamiento observado por Poulos (2017) (Figura 2). En términos cualitativos se observa que las curvas tienden a los máximos a la profundidad de 15 [m] donde

se tiene el contraste de impedancia entre estratos, esto para el caso 1 y 2. Respecto a los valores de momentos obtenidos en la cabeza de los pilotes se observa mayor variabilidad teniéndose un rango más amplio de valores para los diámetros de 30 y 60 [cm] y menor variabilidad para el diámetro de 120 [cm].

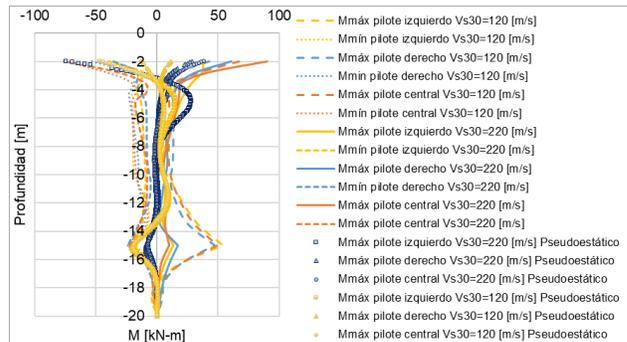


Figura 20. Comparativa envolvente de Momentos obtenida del modelo pseudoestático y dinámico para pilotes izquierdo, central y derecho para diámetro de 30 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{m\acute{a}x}$ es la envolvente máxima, $M_{m\acute{i}n}$ es la envolvente mínima.

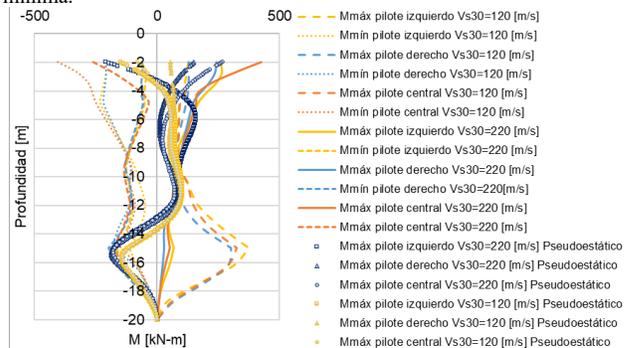


Figura 21. Comparativa envolvente de Momentos obtenida del modelo pseudoestático y dinámico para pilotes izquierdo, central y derecho para diámetro de 60 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{m\acute{a}x}$ es la envolvente máxima, $M_{m\acute{i}n}$ es la envolvente mínima.

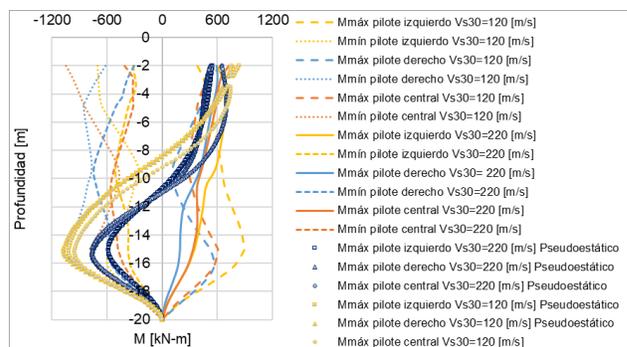


Figura 22. Comparativa envolvente de Momentos obtenida del modelo pseudoestático y dinámico para pilotes izquierdo, central y derecho para diámetro de 120 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $M_{m\acute{a}x}$ es la envolvente máxima, $M_{m\acute{i}n}$ es la envolvente mínima.

Como puede observarse a partir de la Figura 23 a Figura 25 la distribución de cortante del modelo pseudoestático tiende a estar dentro de las envolventes de cortante del modelo dinámico. Respecto a los valores de cortante obtenidos en la cabeza de los pilotes se observa mayor variabilidad.

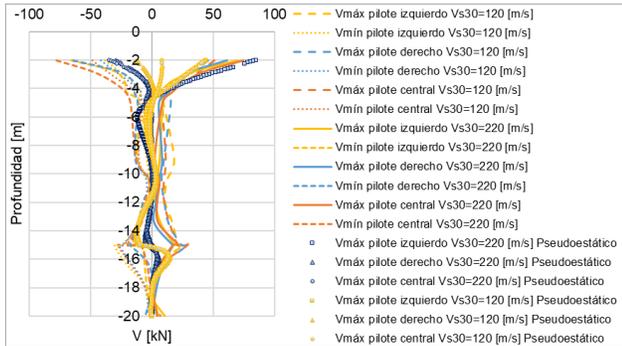


Figura 23. Comparativa envolvente de Corte obtenida del modelo pseudoestático y dinámico para pilotes izquierdo, central y derecho para diámetro de 30 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{máx}$ es la envolvente máxima, $V_{mín}$ es la envolvente mínima.

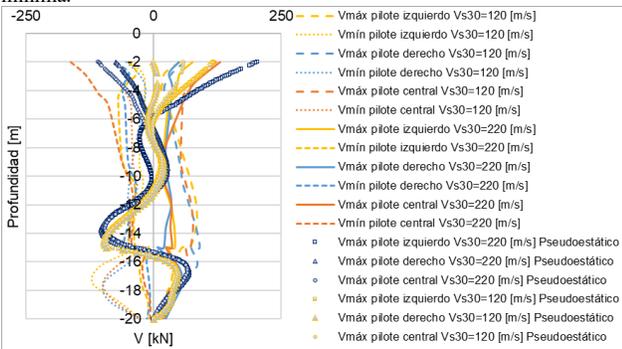


Figura 24. Comparativa envolvente de Corte obtenida del modelo pseudoestático y dinámico para pilotes izquierdo, central y derecho para diámetro de 60 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{máx}$ es la envolvente máxima, $V_{mín}$ es la envolvente mínima.

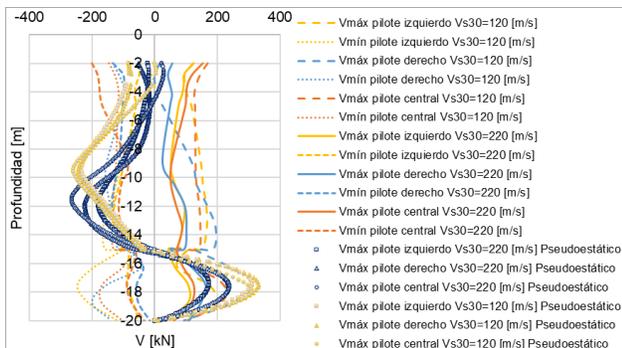


Figura 25. Comparativa envolvente de Corte obtenida del modelo pseudoestático y dinámico para pilotes izquierdo, central y derecho para diámetro de 120 [cm]. Modelo Caso 1: V_{s30} de 220 m/s y Caso 2: V_{s30} de 120 m/s. Donde: $V_{máx}$ es la envolvente máxima, $V_{mín}$ es la envolvente mínima.

En la Tabla 4 se presenta una comparativa del valor máximo de momento debido a efectos cinemáticos obtenido a través de las tres metodologías consideradas. Para efectos de comparación para la metodología 1 y 2 se considera el promedio del momento obtenido de los pilotes izquierdo, central y derecho de esas metodologías.

Tabla 4. Comparativa de los momentos máximos obtenidos mediante las metodologías 1 a 3

Método	Momento [kN-m]					
	$V_{s30}=220$ [m/s]			$V_{s30}=120$ [m/s]		
	Diámetro [m]					
	0.3	0.6	1.2	0.3	0.6	1.2
Dinámico (promedio)	22.22	180.29	487.99	50.38	333.21	921.76
Pseudoestático (promedio)	7.56	175.24	697.25	19.09	117.15	1013.38
Nikolaou	9.12	59.24	384.97	47.96	311.64	2025.07
Mylonakis	8.09	51.12	500.76	26.13	314.35	2654.94

Como puede observarse a partir de la Tabla 4 los momentos obtenidos son cualitativamente similares, siendo más conservadores para los diámetros mayores y para el caso 2 en el caso de los métodos simplificados. En el caso 1 los métodos simplificados pueden ser no conservadores para el diámetro de 30 y 60 [cm].

7 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de momentos flectores y fuerzas cortantes para los distintos diámetros analizados, se concluye que los efectos cinemáticos se van volviendo más importantes a medida que aumenta el diámetro del pilote, teniéndose solicitaciones muy altas en el pilote de diámetro de 120 [cm] que deben ser consideradas en los diseños si se cumplen con las condiciones de análisis del presente estudio respecto a la interfaz de dos suelos que tengan rigideces muy distintas entre ellos y generen los contrastes de impedancia observados.

Para las condiciones expuestas del presente caso de estudio, se consigue observar las solicitaciones generadas debido a efectos cinemáticos en pilotes para distintos diámetros (30 a 120 [cm]) con un contraste de impedancia en cuanto a velocidades de $V_{s2}/V_{s1} = 3$, teniéndose que la ubicación de dichas solicitaciones particularmente de momentos flectores de acuerdo con la teoría se ubican en la interfaz de suelos con una alta diferencia de rigideces y considerando el análisis realizado la ubicación de esos momentos es coincidente con lo teórico.

De acuerdo con los análisis realizados para pilotes ubicados a cinco metros entre sí, se encuentra que las solicitaciones pueden ser distintas debido a que estas son dependientes de la solicitación sísmica impuesta.

Las distribuciones de las solicitaciones de momentos flectores y fuerzas de corte del análisis pseudoestático realizado concuerda con lo indica en el marco teórico del presente estudio (sección 2), de forma que la solicitación pseudoestática obtenida para el pilote está dentro de la envolvente de la solicitación dinámica como pudo observarse en la sección 6.

Al comparar los resultados de los momentos máximos obtenidos de las tres metodologías realizadas, se tiene que cualitativamente son similares. Los métodos simplificados

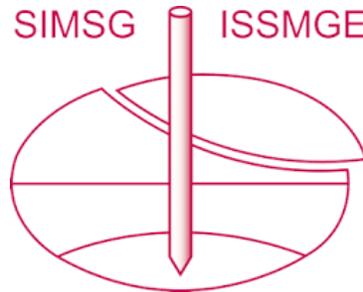
utilizados tienden a ser más conservadores para el caso 2 donde se tiene una mayor diferencia de rigideces entre los estratos. Para el caso 1, pueden no ser conservadores dependiendo el diámetro del pilote.

8 REFERENCIAS

- Ashford, S. A., Boulanger, R. W., & Brandenberg, S. J. (2011). Recommended design practice for pile foundations in laterally spreading ground. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Barghouthi, A. F. (1984). Pile response to seismic waves. The University of Wisconsin-Madison.
- Cairo, R., Dente, G., Sica, S., & Simonelli, A. L. (2011). Multi-variable relations for simplified evaluation of soil-pile kinematic effects. *Italian Geotechnical Journal*, 11(1), 33-46.
- Di Laora, R., & Rovithis, E. (2015). Kinematic bending of fixed-head piles in nonhomogeneous soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014126.
- Fan, K., Gazetas, G., Kaynia, A., Kausel, E., & Ahmad, S. (1991). Kinematic seismic response of single piles and pile groups. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(12), 1860-1879.
- FEMA (2020). A practical Guide to Soil-Structure Interaction. Washington, FEMA P-2091. DC: FEMA.
- Gazetas, G. (2013, September). Soil-foundation-structure systems beyond conventional seismic failure thresholds. In Proc., 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics (pp. 55-70). French Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (CFMS), Rueil Malmaison, France.
- Gazetas, G. (2022). Webinar 5.3: Soil structure interaction, 10:30 – 11:05 CET July 8th 2022, link: <https://www.youtube.com/watch?v=3ZwjL8sPHMQ&t=552s>.
- Hokmabadi, A. S., Leung, E. H., Yiu, J., & Pappin, J. W. (2018). Seismic design of pile foundations: Kinematic interaction in layered soils. In Proc., 16th European Conf. on Earthquake Engineering. Thessaloniki, Greece: European Association of Earthquake Engineering.
- Meng, F. Y. (2003). Dynamic properties of sandy and gravelly soils. The University of Texas at Austin.
- Mylonakis, G. (2001). Simplified model for seismic pile bending at soil layer interfaces. *Soils and foundations*, 41(4), 47-58.
- Nikolaou, A. (1995). Kinematic Bending Moments (Doctoral dissertation, State University of New York at Buffalo).
- Nikolaou, S., Mylonakis, G., Gazetas, G., & Tazoh, T. (2001). Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements. *Geotechnique*, 51(5), 425-440.
- NIST GCR 12-917-21. (2012). Soil-structure interaction for building structures. Prepared by NEHRP consultants joint venture (a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering).
- Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*, 51(2), 95-113.
- Poulos, H. G. (2017). Designing piles for seismic events. In DFI-PFSF 2017 Conference. Melbourne p (Vol. 28).
- Radhima, J., Kanellopoulos, K., & Gazetas, G. (2022). Static and dynamic lateral non-linear pile-soil-pile interaction. *Géotechnique*, 72(7), 642-657.
- Sakellariadis, L., Marin, A., & Anastopoulos, I. (2019). Widening of existing motorway bridges: pile group retrofit versus nonlinear pile-soil response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(12), 04019107.
- Sica, S., Mylonakis, G., & Simonelli, A. L. (2013). Strain effects on kinematic pile bending in layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, 231-242.
- Sluis, J., Besseling, F., & Stuurwold, P. (2014). Modelling of a pile row in a 2D plane strain FE-analysis. Hicks, MA, 277-282.

- Tabesh, A., & Poulos, H. G. (2001). Pseudostatic approach for seismic analysis of single piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(9), 757-765.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89-107.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.