

# Comparación Del Modelo Discreto Y El Modelo Continuo Para Obtención De Los Desplazamientos Verticales Y Horizontales En Pilotes, Aplicando La Interacción Dinámica Suelo Estructura

## Comparison Of The Discrete Model And The Continuous Model To Obtain The Vertical And Horizontal Displacements In Piles, Applying The Dynamic Soil-Structure Interaction

### Autores

**Yosuany Almaguer Miranda<sup>1</sup>, Willian Cobelo Cristiá<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ing. Especialista Principal en Proyecto de la Empresa de Proyectos de Obras de Transporte

<sup>2</sup> Doctor, Profesor Titular Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"

### RESUMEN

*Este artículo se presenta la comparación de los resultados del modelo discreto y el modelo continuo calibrado con la prueba de carga, aplicado a un grupo de pilotes empleados para sustentar una instalación portuaria. Dada la importancia de la obra y complejidad del sistema de cargas actuante es necesario evaluar el comportamiento geotécnico utilizando la interacción dinámica suelo estructura (IDSE). Se obtiene los desplazamientos verticales y horizontales con metodologías que tienen en cuenta la deformabilidad del terreno ante las cargas estáticas y dinámicas. Para considerar la interacción suelo-estructura, se requirió un modelo computacional en el software Autodesk Robot Analysis Professional para el modelo discreto determinando los coeficientes de rigidez del suelo con las fórmulas de Bowles. Se empleó el software Plaxis 3D foundation para el modelo continuo, utilizando el modelo constitutivo del suelo de Mohr Coulomb. El resultado confirma la necesidad de la calibración del modelo continuo a partir de la prueba de carga. Se ajusta el modelo discreto, debido a que este modelo es el más utilizado en las modelaciones de las estructuras introduciendo la deformabilidad del terreno por medio de la IDSE.*

**Palabras claves:** Modelo discreto, modelo continuo, Interacción suelo estructura, pilotes.

### ABSTRACT

*This article presents the comparison of the results of the discrete model and the continuous model calibrated with the load test, applied to a group of piles used to support a port facility. Given the importance of the work and complexity of the acting load system, it is necessary to evaluate the geotechnical behavior using the dynamic soil-structure interaction (IDSE). Vertical and horizontal displacements are obtained with methodologies that take into account the deformability of the terrain under static and dynamic loads. To consider the soil-structure interaction, a computational model was required in Autodesk Robot Analysis Professional software for the discrete model by determining the soil stiffness coefficients with the Bowles formulas. The Plaxis 3D foundation software was used for the continuous model, using the Mohr Coulomb soil constitutive model. The result confirms the need for calibration of the continuous model from the load test. The discrete model is adjusted, because this model is the most used in the modeling of structures, introducing the deformability of the terrain through the IDSE.*

**Keywords:** Discrete model, continuous model, Soil-structure interaction, piles

Nota Editorial: Recibido: Noviembre 2023 Aceptado: Diciembre 2023

# 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos discretos por su simplicidad y bajo costo computacional se emplean para modelar los efectos de interacción suelo estructura entre la solución de cimentación y la subestructura mediante la sustitución del suelo como medio continuo por resortes implementando el modelo de Winkler [1].

Varios autores y reglamentos que utilizan el módulo de elasticidad del suelo para generar fórmulas que permitan calcular el coeficiente de balasto a la vez que introducen factores de corrección para tomar en consideración el tamaño y la geometría de la cimentación, a continuación, se mencionan algunos de ellos [1]:

- Método dinámico NTCDs 2004 (Reglamento)
- Método dinámico norma rusa Snip 2.02.05-87 (Reglamento)
- Método dinámico A.E. Sargsian
- Método Bowles (1997)

El método Bowles (1997), permite obtener los asentamientos para todo tipo de cimentaciones, ya sea superficial como profunda, contiene entre sus factores la variación de la capacidad del suelo en dependencia de la profundidad que se desee analizar, para suelos arcillosos puros, brinda resultados confiables en función de la densidad y la cohesión no drenada [2].

El modelo discreto tiene la desventaja que no considera el suelo como un continuo, requiriendo una aproximación de los valores de rigidez de los estratos, por lo que la utilización del modelo continuo permite obtener resultados que logran un mejor ajuste a los resultados que se obtienen de las pruebas de carga realizadas *in situ*.

Se conoce que el material suelo posee un comportamiento no lineal, dicha afirmación está fundamentada en la teoría de Winkler, definiéndose como la división entre la tensión de contacto "p" y el desplazamiento "y" que produce la tensión en determinado punto [3-5].

Los métodos numéricos constituyen técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos, de tal forma que puedan resolverse utilizando operaciones aritméticas. Se encargan de adaptar métodos matemáticos en variable continua a un sistema de representación de información discreto. El Método de los Elementos Finitos (M.E.F) se ha empleado en numerosas investigaciones para representar el dominio del suelo y la modelación del efecto de interacción suelo estructura [6].

En el presente trabajo se utiliza el software *Plaxis 3D foundation* que tiene base en el M.E.F y emplea para el suelo un modelo constitutivo Mohr-Coulomb (MC) que es la aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo para estimar las deformaciones producidas bajo las cargas aplicadas. Es un modelo elástico, lineal y de plasticidad perfecta no asociada. Se trata de un modelo elasto-plástico perfecto (isotrópico) desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de rotura tipo Mohr-Coulomb.

El diseño de las estructuras considerando la interacción suelo-estructura, se refleja en la modificación de sus propiedades dinámicas y en las fuerzas sísmicas de diseño de los elementos portantes, permitiendo evaluar los desplazamientos totales de las estructuras, particularmente por el efecto de cabeceo de las cimentaciones no apoyadas en un estrato firme [7].

El caso de estudio es una instalación portuaria, que posee un equipamiento que generan altas cargas cuya solución de cimentación utilizada para apoyar toda la estructura del muelle es profunda sobre pilotes. La instalación portuaria propuesta se encuentra en una zona sísmica de intensidad 9.00 MSK, posee una grúa de 3400kN y dos tolvas ecológicas sobre rieles de 1500 kN cada una, dos cintas transportadoras, dos torres de transferencia, y capacidad para que circule un camión sobre el muelle entre las dos vías carrileras.

El artículo refleja los resultados del comportamiento geotécnico de un grupo de pilotes que conforman la cimentación de una instalación portuaria. La instalación posee importancia para el desarrollo económico y social de la zona oriental de Cuba, además de presentar una complejidad estructural por el sistema de cargas actuantes, lo que conduce a la evaluación más rigurosa del comportamiento de la solución de cimentación empleada, considerando el efecto de interacción dinámica suelo estructura para obtener la capacidad de carga y los desplazamientos de los pilotes. Para implementar el efecto de interacción suelo estructura se utilizan dos modelos: uno discreto (Winkler) y otro continuo basado en el M.E.F, simulando el comportamiento del sistema suelo, pilote y subestructura. Se determina la magnitud de los desplazamientos horizontales debido a las cargas laterales, y los asentamientos por la acción de cargas verticales, así como la influencia de las cargas horizontales en los asentamientos. Se consideran las acciones dinámicas producidas por el sismo y el sistema de cargas que generan las operaciones que se realizan sobre la estructura.

### Descripción de la geometría del muelle.

La geometría de los elementos que componen el muelle objeto de estudio se representa teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La losa del muelle tiene un espesor de 40 cm, está compuesta por una losa prefabricada de 15 cm de espesor que servirá de encofrado, dejando unos conectores para que al hormigonado *in situ* en una segunda etapa una losa de espesor 25 cm.
- Las vigas transversales y longitudinales son prefabricadas de sección 50x90 cm.
- Las vigas perimetrales, exceptuando el frente muelle, tienen una sección de 110x90 cm.
- La viga frente muelle tiene una sección de 45x150 cm, solamente se unirá a las vigas transversales en la zona del voladizo.
- Las vigas carrileras tienen una sección de 80x130 cm.
- Los pilotes son tubos metálicos que se unen al entramado de vigas por medio de las protecciones interiores de hormigón armado.

A continuación, en la figura 1 se muestra la disposición de los elementos que conforman el muelle objeto de estudio.

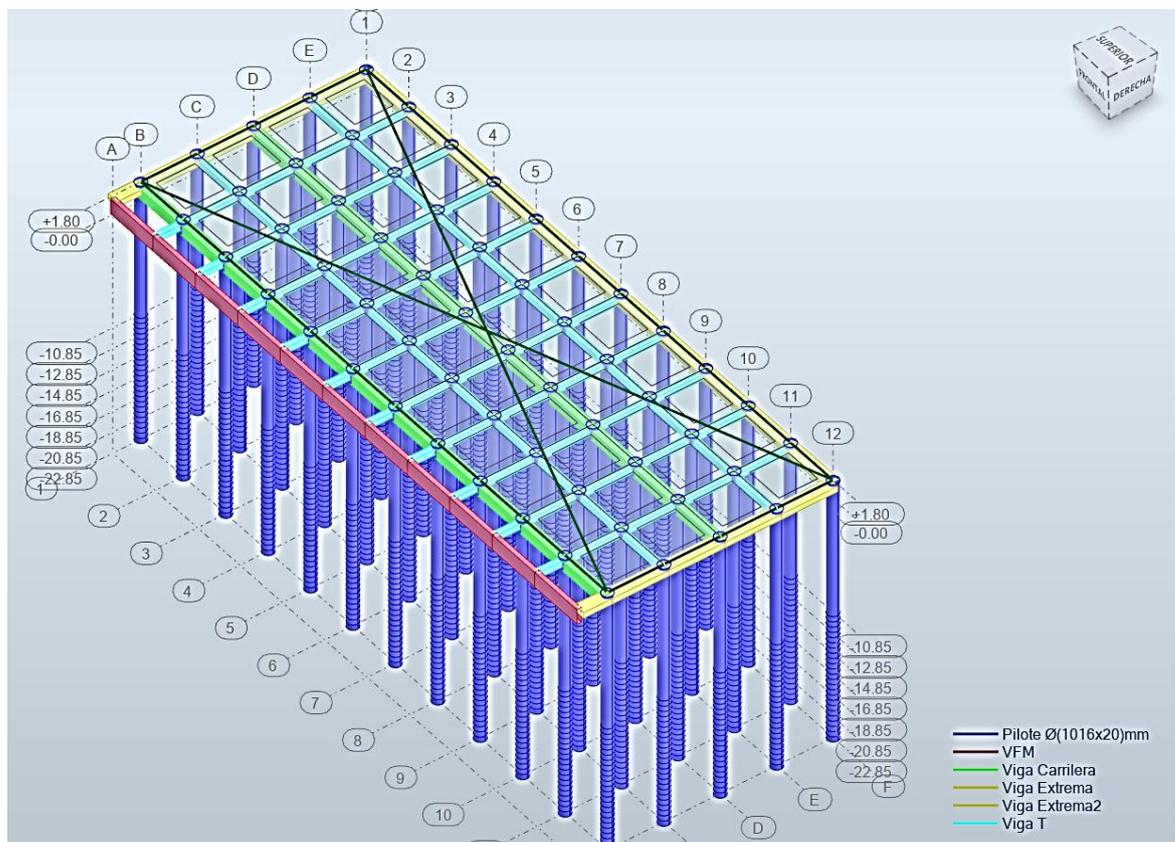


Figura 1. Modelo geométrico del muelle. (Fuente Robot)

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS QUE SIMULAN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.

En el análisis bajo cargas horizontales y verticales en el sistema suelo-pilote se suele calcular por el modelo propuesto por Winkler, el suelo se representa como una serie de resortes horizontales desconectados unos de otros. Este modelo es ampliamente utilizado en la práctica de ingeniería de cimentaciones tanto para el análisis de carga estática como dinámica. Es el modelo que, debido a su facilidad en su implementación, es el más utilizado, aunque la falta de continuidad entre resortes representa un pobre trabajo en el modelado del comportamiento del suelo. Varios investigadores, partiendo de lo propuesto por Winkler, han desarrollado metodologías para determinar el valor del coeficiente de balasto. Algunos asumen el valor de la rigidez horizontal ( $k_h$ ) como constante en toda la profundidad, obteniendo así soluciones analíticas, se considera el valor de  $k_h$  variable con la profundidad, la solución es por medio de aproximaciones numéricas [1].

La simulación del modelo discreto de la interacción suelo-estructura se realizó basándose en el modelo de Winkler. Para determinar la rigidez de los resortes que simulan el suelo, tanto en el sentido vertical como horizontal; se utilizó, el método de Bowles (1997), ya que tiene en cuenta la variación de la rigidez con la profundidad y utiliza los valores de densidad y cohesión no drenada que se obtuvieron del estudio geotécnico.

La simulación del modelo continuo se realizó utilizando el *Plaxis 3D foundation* dado que utiliza el M.E.F, para el cálculo de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos de distintas naturalezas.

### Método de Bowles (1997)

Bowles propone estimar el módulo de reacción horizontal del suelo considerando la variación de la rigidez con dependencia de la profundidad. Para suelos arcillosos puros, brinda resultados confiables empleando la densidad y la cohesión no drenada del suelo. Los valores de rigideces determinados por (1) son asignados a los resortes en el modelo discreto, [2].

$$K_S = A_S + B_S * z^n \quad (1)$$

Donde:

- $A_S$  Constante para los miembros horizontales o verticales.
- $B_S$  Coeficiente de variación de profundidad.
- $Z$  Profundidad de evaluación. (m)
- $n = 0,40 - 0,60$  Exponente para ajuste

Siendo:

$$A_S = C_m * C * \left( c_u * N_c + \frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma \right) \quad (2)$$

$$B_S Z^n = C_m * C * (\gamma * N_q * Z^n) \quad (3)$$

Donde:

- $c_u$  Cohesión no drenada del suelo. (kN/m<sup>2</sup>)
- $B$  Ancho o diámetro del pilote. (m)
- $\gamma$  Peso específico natural del suelo. (kN/m<sup>3</sup>)
- $C = 40$  Coeficiente que depende del sistema de unidades, para SI C=40
- $N_c, N_\gamma, N_q$  Factores de capacidad de carga.

## 3. CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS LATERALES Y VERTICALES PERMISIBLES.

El método de Winkler brinda los desplazamientos horizontales y asentamientos verticales que la carga externa produce en el pilote cuando interactúa con el suelo. Dichos valores se comparan con criterios de permisibilidad que han sido presentados por varios autores para el nivel de servicio requerido. Algunos de los criterios utilizados para definir los desplazamiento y asentamientos permisibles se presentan a continuación:[8]

### Desplazamientos laterales permisibles.

- En M. Tomlinson and J. Woodward (2015) se resalta que en general, la movilización de la resistencia lateral unitaria depende levemente del tipo del pilote y del tipo de suelo y se asume que la misma es movilizada para desplazamientos entre 5 y 25 mm [9].
- En H. G. Poulos and E. H. Davis (1971) se sugiere que, para pilotes excavados sobre suelos cohesivos, la movilización del fuste es directamente proporcional a su diámetro y se encuentra en el rango de 0,5 al 2% del diámetro del pilote [10].
- En J. O. Bowles (1997) se sugieren valores de desplazamiento del orden de 3 a 10 mm para una movilización del fuste en pilotes tubulares [2].

A partir de la bibliografía consultada, en la presente investigación teniendo en cuenta que la obra se encuentra está en una zona de alto riesgo sísmico, se asume utilizar un desplazamiento horizontal permisible de 10.0 mm según Bowles (1997).

## Asentamientos permisibles

En A. S. Vesic (1975) se recogen varios criterios de asentamiento permisible las cuales se resumen a continuación[11]:

- Limita el asentamiento total:
  - a) Asentamiento absoluto: (25,4 mm) (Holanda, código de Nueva York).
  - b) Asentamiento relativo: 10% del diámetro del pilote (Inglaterra)
- Método de Davisson. - La carga límite propuesta es definida como la carga que corresponde a un asentamiento que excede la compresión elástica del pilote por un valor X definido en la ecuación 4:

$$X = 3,80 + \frac{D}{120} \quad (4)$$

Ante diversos criterios resumidos por A. S. Vesic (1975), teniendo en cuenta que la zona es de alto riesgo sísmico, se emplea utilizar un asentamiento permisible total según Holanda, código de Nueva York, de 25,40 mm.

## Materiales.

Las características de los materiales utilizados para el análisis de la estructura del modelo se recogen en la tabla 1:

**Tabla 1:** Características de los materiales.

Material	E (kN/cm <sup>2</sup> )	G (kN/cm <sup>2</sup> )	μ (Poisson)	γ (kN/m <sup>3</sup> )
Acero	20 000,00	7 692,31	0,30	78,50
Hormigón	2 780,56	1 158,57	0,20	24,00

La modelación por el M.E.F implementado en el software *Plaxis 3D foundation* parte de establecer un dominio del suelo, dimensiones que se recomiendan en los videos tutoriales del aprendizaje de dicho programa. Recomendando que en sentido horizontal estableciendo 5 veces el ancho de la losa y el sentido vertical 2 veces la longitud del pilote, de esta manera la influencia de las tensiones y deformaciones quedan contenidas en esa área del suelo analizada [12].

## Cargas sísmicas.

En el caso de las cargas horizontales se colocarán los valores de cortante basal en el nivel de la losa del muelle obtenido en la modelación en el software Robot, como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2:** Cargas horizontales

Carga horizontal en X (kN)	Carga horizontal en Y (kN)
8802,83	2834,80



**Figura 2:** Gráfico de cargas axiales máximas (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 2, se muestra que el pilote del eje 9 D es el más esforzado del muelle, dicho pilote se encuentra ubicado en el eje longitudinal D, donde está la vía férrea. Debido a que las cargas mayores están en las vías de ferrocarril, se seleccionó un largo del modelo igual al ancho del muelle, es decir un área de (20 x 20 m). Para ello, se tiene en cuenta solamente el espaciamiento de los pilotes y tomando de punto central el pilote más esforzado. El volumen de suelo es (100 x 100 x 24 m) en el modelo de elementos finitos.

Se emplean la combinación de G1+0.50 Ms-32(2) para las cargas verticales, para las cargas horizontales  $S_x+0.30S_y$  y para analizar la influencia de las cargas horizontales con las cargas verticales se utiliza la combinación  $1.34G1+0.50 Ms-32(2)+S_x+0.30S_y+S_z$ . Donde G1 son las cargas gravitacionales, con carga de cargador sobre rieles y tolva ecológica en la posición 1, MS-32 (2) la carga del vehículo rodante en la posición 2 y  $S_x, S_y$  y  $S_z$  son las cargas sísmicas que actúan en los sentidos ortogonales x,y,z respectivamente [13].

- **Suelo.**

El área de estudio se ubica en la zona marítima cercana a la costa occidental del lóbulo norte de la bahía de Santiago de Cuba. En total se perforaron 10 calas, alcanzando entre 25,80 m y 30,0 m de profundidad, los resultados del estudio de suelo se recogen en la tabla 3 [14].

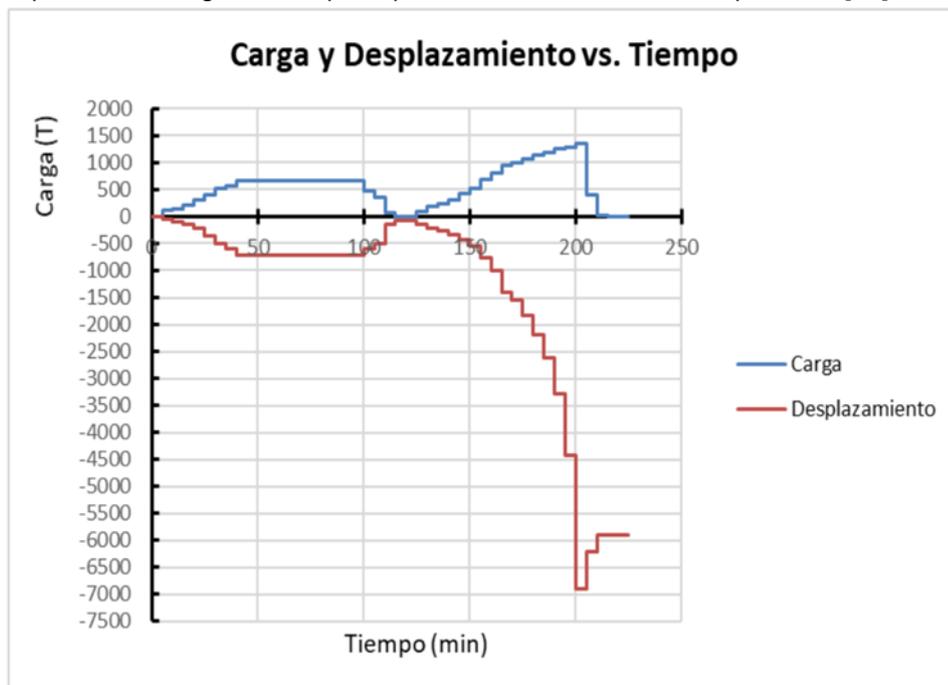
**Tabla 3:** Parámetros resistentes del suelo.

Z (m)	Cu (kPa)	E (kPa)	Z (m)	Cu (kPa)	E (kPa)
0,50	124,60	32 397,86	6,50	258,50	67 219,29
1,00	135,80	35 299,64	7,00	269,70	70 121,07
1,50	146,90	38 201,43	7,50	280,90	73 022,86
2,00	158,10	41 103,21	8,00	292,00	75 924,64
2,50	169,30	44 005,00	8,50	303,20	78 826,43
3,00	180,40	46 906,79	9,00	314,30	81 728,21
3,50	191,60	49 808,57	9,50	325,50	84 630,00
4,00	202,70	52 710,36	10,00	336,70	87 531,79
4,50	213,90	55 612,14	10,50	347,80	90 433,57
5,00	225,10	58 513,93	11,00	359,00	93 335,36
5,50	236,20	61 415,71	11,50	370,10	96 237,14
6,00	247,40	64 317,50	12,00	381,30	99 138,93

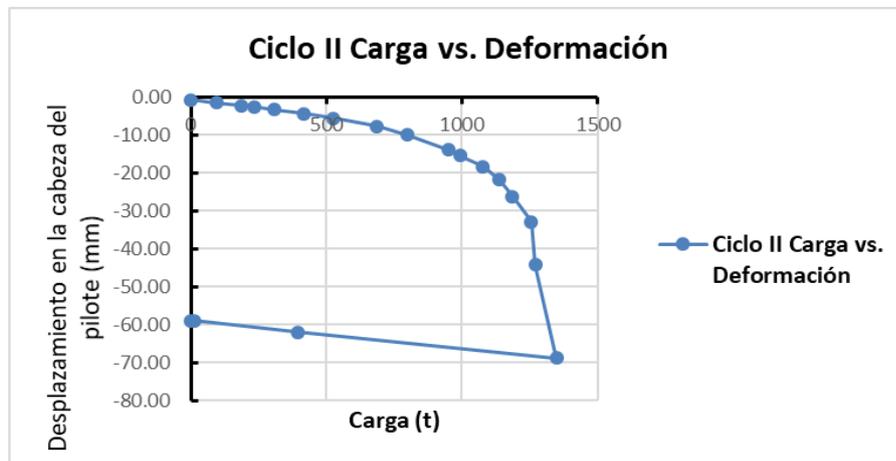
- **Calibración.**

En este artículo se emplea los resultados de la prueba de carga estática realizada en la obra, los que permiten calibrar el modelo discreto y continuo, obteniéndose parámetros del suelo ajustados con vistas a determinar el asentamiento y los desplazamientos horizontales, así como la capacidad última del pilote que se obtiene de la curva carga deformación en el modelo continuo.

En la figura 3 se muestra una gráfica que combina el comportamiento de la carga y el asentamiento del pilote en el tiempo. En el primer ciclo, para una carga aplicada de 655 ton, el desplazamiento máximo obtenido fue de 7,09 mm, recuperándose 6,40 mm al finalizar la descarga de este ciclo, existiendo deformación residual de 0,65 mm como aparece en la figura 4, lo que representa un 90,20 % de recuperación [15].

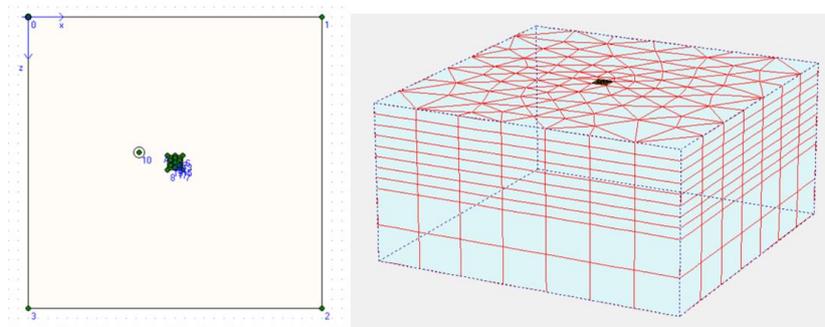


**Figura 3:** Gráfica resumen de prueba de carga estática que relaciona las variables carga (t) y deformación (mm x 100), [15]



**Figura 4:** Gráfica del desplazamiento del cabezal del pilote en función de la carga,[15]

La prueba de carga se simula en un área de estudio de (30x30 m), y una profundidad de estrato de 15,00m, el diámetro exterior del pilote de 1,016 m y 0,02 m de espesor del tubo, la longitud de análisis es 8,0 m, con carga puntual de 7800 kN en dirección Z hacia abajo, tal como se muestra en la figura 5.



**Figura 5:** Modelo de prueba de hinca en el Plaxis.

En el modelo continuo implementado en software *Plaxis 3D foundation* se reproducen los asentamientos obtenidos por la prueba de carga para diferentes densidades de mallas de elementos finitos, y a partir de la curva carga deformación aplicando el método de Davisson se determina la carga capacidad de carga [16].

$$S_u(mm) = 0.012 \times D_r + 0.10 \times \left(\frac{D}{D_r}\right) + \frac{Q_u \times L}{A_p \times E_p} \quad (5)$$

Se despeja  $Q_u$  para obtener la capacidad última en la ecuación 5

$$Q_u = \frac{[S_u(mm) - 0.012 \times D_r - 0.10 \times \left(\frac{D}{D_r}\right)] \times A_p \times E_p}{L} \quad (6)$$

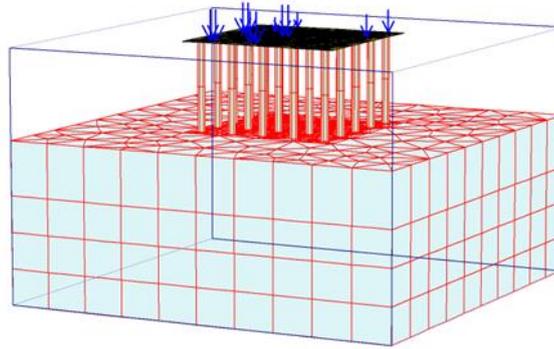
Donde:

- $Q_u$  Carga última en kN
- $D$  Diámetro del pilote en mm
- $D_r$  Diámetro relativo (300 mm)
- $L$  Longitud del pilote en mm
- $A_p$  Área de la sección transversal del pilote en mm<sup>2</sup>
- $E_p$  Módulo de Young del material pilote en kN/mm<sup>2</sup>

Siguiendo el método de Davisson y partiendo del gráfico del desplazamiento del cabezal del pilote en función de la carga de la figura 4 se determinó la resistencia última a compresión (RUC), siendo igual a 12000 kN, con una carga admisible de 11390 kN, utilizando el criterio de asentamiento permisible de Holanda, código de Nueva York, restringiendo que el asentamiento no exceda los 25,40 mm. La calibración se obtuvo igualando los resultados en el modelo de elementos finitos y los obtenidos en la prueba de carga[16]

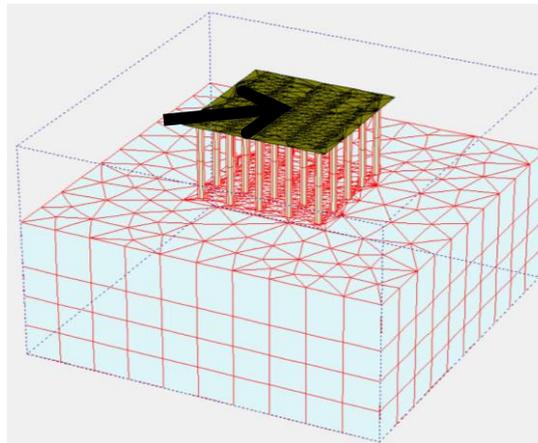
### Aplicando el modelo continuo (*Plaxis 3D foundation*)

Luego, se representan las modelaciones utilizando el M.E.F, donde se aplican las cargas verticales (Figura 6), las cargas horizontales (Figura 7) y la acción de ambas cargas (Figura 8), para determinar los desplazamientos y asentamientos que generan estas acciones.



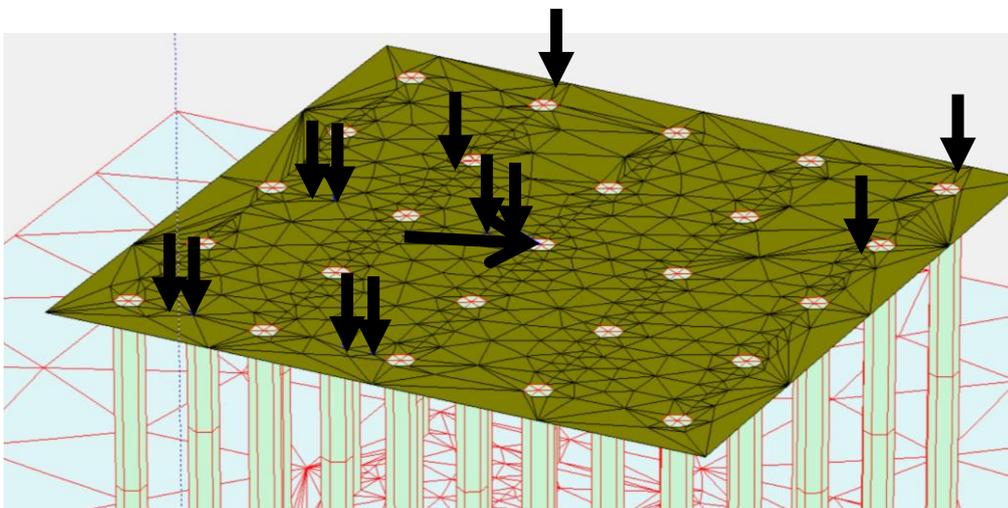
**Figura 6:** Modelo continuo del muelle bajo la acción de las cargas verticales (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 7 se muestra el modelo numérico de la zona más cargada del muelle, donde se representa la posición de las cargas sísmicas introducidas con los valores de cortante basal determinado utilizando el método estático.



**Figura 7:** Modelo continuo del muelle acción de la carga horizontal (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 8 se muestra la posición de las cargas sísmicas introducidas con los valores de cortante basal y las cargas gravitacionales.



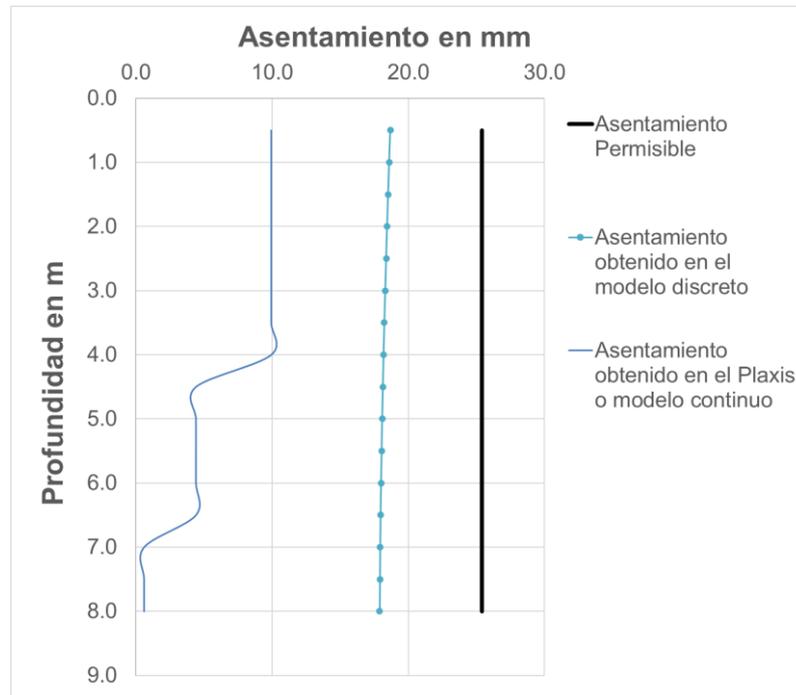
**Figura 8:** Modelo continuo del muelle bajo la influencia de las cargas vertical y horizontal (Fuente: Elaboración propia)

## Resultados y discusión

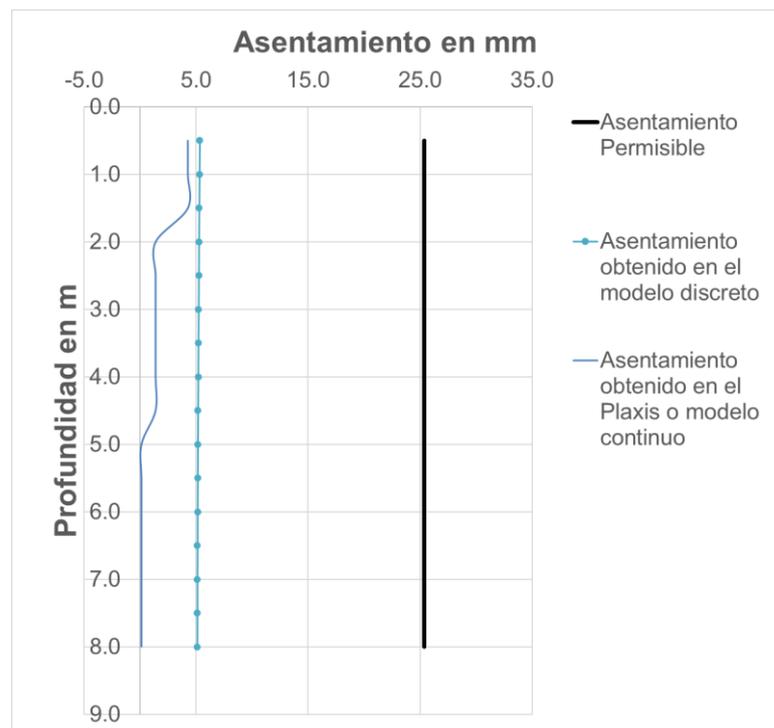
Los resultados de los asentamientos de los modelos discreto y continuo se muestran en las figuras del 9 al 11, siendo menores sus valores al criterio de asentamiento total (25.4 mm) para el caso de las cargas verticales y siguiendo el criterio de J. O. Bowles con valores inferiores a 10mm para el caso de las cargas horizontales [2].

En la figura 9 se presentan los asentamientos a lo largo del pilote sometido a cargas verticales, tanto para modelo discreto como para el continuo, siendo menores los que se determinan aplicando este último modelo. En ambos modelos los asentamientos calculados son menores que el valor de asentamiento permisible.

Los asentamientos producidos por las fuerzas horizontales en el modelo continuo son pequeños y prácticamente nulos a partir de los 5 m de penetración del pilote, mientras que en el modelo discreto su distribución en la profundidad es constante y se relaciona fundamentalmente con el asentamiento elástico del pilote, estos resultados se representan en la figura 10.

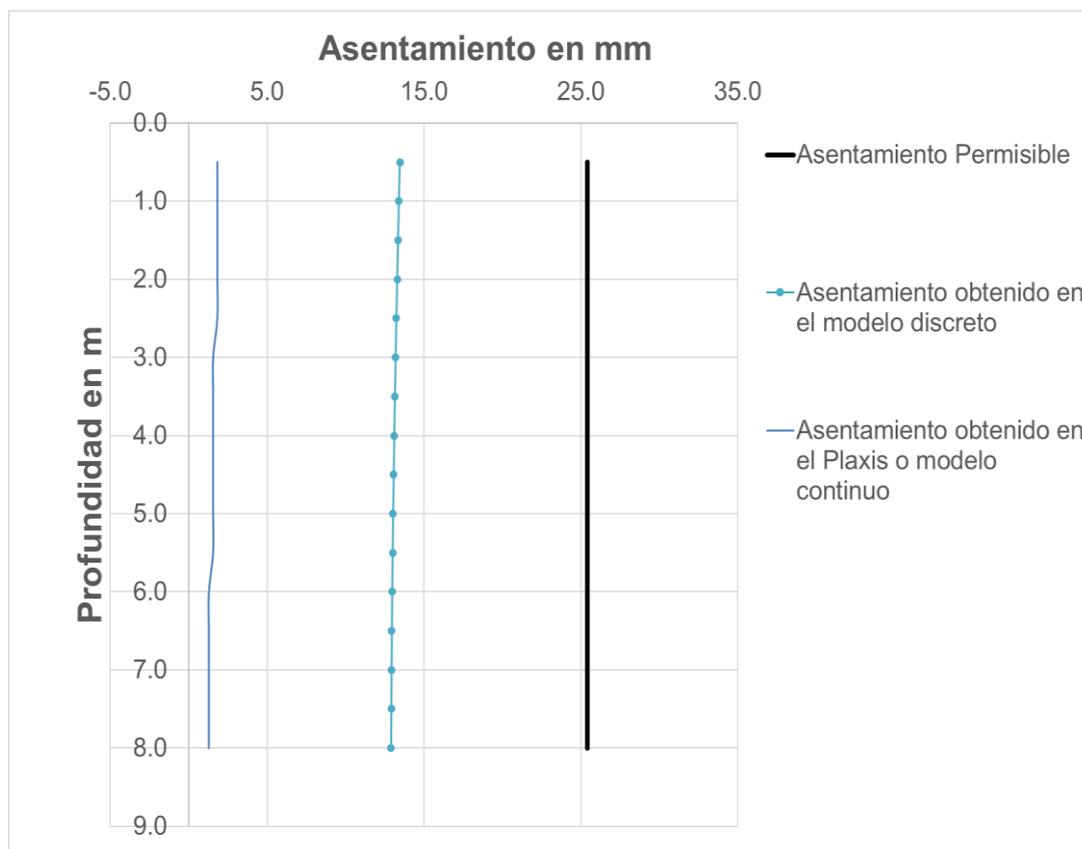


**Figura 9:** Asentamientos de un pilote de 8.0 m debido a las cargas verticales. (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 10:** Asentamientos de un pilote de 8.0 m debido a las cargas horizontales. (Fuente: Elaboración propia)

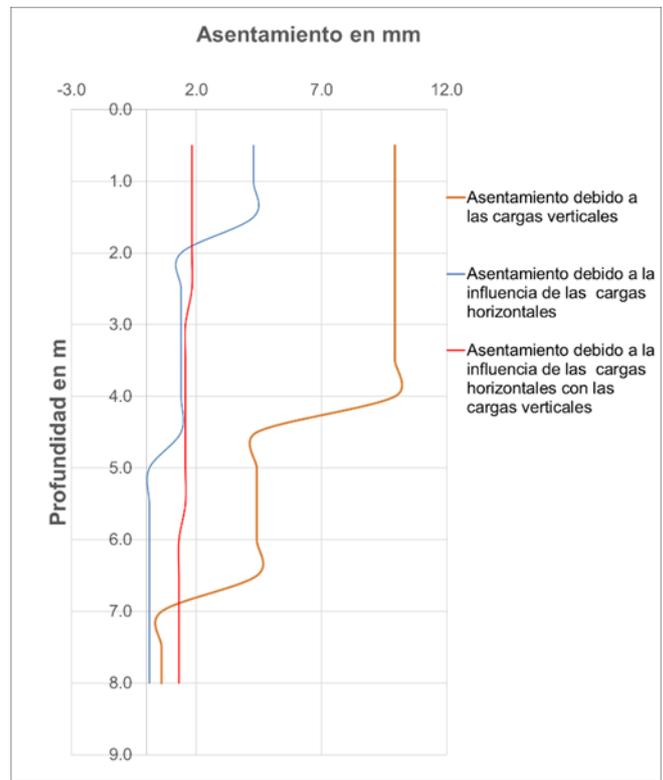
La acción conjunta de cargas verticales y horizontales producen asentamientos en los pilotes como aparecen en la figura 11. Los asentamientos que se tienen lugar no son la suma de los efectos que producen la actuación de cada una de estas cargas por separado. Quedando demostrado que el modelo continuo es capaz de representar las deformaciones que tienen lugar en el pilote y el suelo en función de la interacción que tiene lugar entre los materiales que conforman ambos elementos.



**Figura 11:** Asentamientos debido a la influencia de las cargas horizontales sobre las cargas verticales. (Fuente: Elaboración propia)

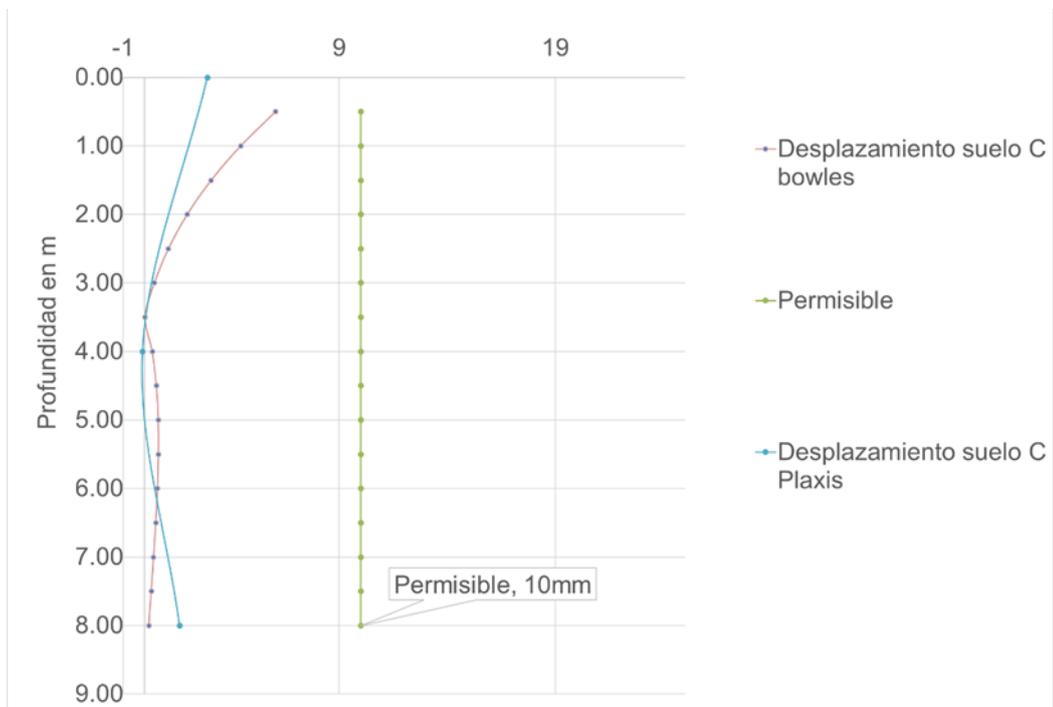
De los resultados antes expuesto en las figuras del 9 al 11 se destaca que los asentamientos determinados en el modelo continuo son menores que los alcanzados mediante el modelo discreto, lo que indica la necesidad de hacer análisis de interacción suelo estructura mediante este tipo de modelos que refleja con mayor precisión el comportamiento geotécnico de la solución de cimentación y la interacción que se produce entre los elementos que la componen.

La figura 12 refleja los resultados obtenidos mediante la aplicación del M.E.F, bajo los tres estados de carga, mostrando que las cargas horizontales influyen sobre los asentamientos que se produce en la punta de pilote, incrementando el valor del asentamiento. El análisis del comportamiento deformacional de la solución de cimentación propuesta para el muelle objeto de estudio, considerando los efectos de interacción suelo estructura permite definir la profundidad de penetración de los pilotes en el lecho marino garantizando cumplir con las exigencias de diseño adecuadamente. El análisis de la interacción suelo estructura implementando modelos continuos redundan en diseños seguros y económicos.



**Figura 12:** Comparación entre asentamientos en el modelo continuo. (Fuente: Elaboración propia)

El comportamiento de los desplazamientos horizontales en pilote también presenta la misma tendencia que los verticales, siendo menores en el modelo continuo de interacción suelo estructura con relación a los que se determinan con el modelo discreto como se muestra en la figura 13.



**Figura 13:** Desplazamientos horizontales (Fuente: Elaboración propia)

En la tabla 5, se refleja la relación de asentamientos obtenidos para ambos modelos. La mayor diferencia entre los modelos se obtiene cuando se aplican las cargas horizontales a partir de la profundidad de 5,0 m. Para las cargas verticales a partir de los 7,0 m, no siendo así en el caso de la influencia de la carga horizontal con las cargas verticales, con una diferencia promedio de 8 veces en toda la profundidad.

Esta última relación indica que, si se emplea la modelación discreta para la evaluación del comportamiento deformacional de la solución de cimentación con pilotes, se tiene que realizar la determinación de las rigideces de los resortes a partir de calcular los desplazamientos que tienen lugar en el modelo continuo o implementar un modelo acoplado de la estructura, la subestructura y el suelo. Los softwares utilizados presentan limitaciones para realizar este tipo de análisis, pero son ampliamente utilizados en la práctica profesional para el diseño de estructuras donde se encuentran sus mejores prestaciones. Existen en el mercado otros softwares que combinan diferentes módulos que permiten la creación de modelos integrados de superestructura, subestructura y suelo, pero requieren de equipamiento de cómputo de altas prestaciones para disminuir el costo computacional y mayor nivel de especialización para la conformación de los modelos y la integración de los módulos de trabajo. Ejemplos de estos softwares son el MIDAS Gen, MIDAS GTS, ABAQUS.

**Tabla 5:** Asentamientos en mm (Relación de asentamientos entre los modelos).

Prof.	Modelo continuo	Modelo Discreto	Relación	Modelo continuo	Modelo discreto	Relación	Modelo continuo	Modelo Discreto	Relación
m	Debido a las cargas verticales		Discreto/ Continuo	Debido a las cargas horizontales		Discreto/ Continuo	Debido a la influencia de las cargas horizontales con respecto a las verticales		
<b>0,50</b>	9,94	18,68	<b>1,88</b>	4,28	5,32	<b>1,24</b>	1,82	13,46	<b>7,40</b>
<b>1,00</b>	9,94	18,59	<b>1,87</b>	4,28	5,30	<b>1,24</b>	1,82	13,40	<b>7,36</b>
<b>1,50</b>	9,94	18,52	<b>1,86</b>	4,28	5,28	<b>1,23</b>	1,82	13,35	<b>7,33</b>
<b>2,00</b>	9,94	18,44	<b>1,85</b>	1,38	5,25	<b>3,81</b>	1,82	13,29	<b>7,30</b>
<b>2,50</b>	9,94	18,37	<b>1,85</b>	1,38	5,23	<b>3,79</b>	1,82	13,24	<b>7,28</b>
<b>3,00</b>	9,94	18,30	<b>1,84</b>	1,38	5,21	<b>3,78</b>	1,56	13,19	<b>8,46</b>
<b>3,50</b>	9,94	18,24	<b>1,83</b>	1,38	5,20	<b>3,76</b>	1,56	13,15	<b>8,43</b>
<b>4,00</b>	9,94	18,18	<b>1,83</b>	1,38	5,18	<b>3,75</b>	1,56	13,11	<b>8,40</b>
<b>4,50</b>	4,42	18,12	<b>4,10</b>	1,38	5,16	<b>3,74</b>	1,56	13,07	<b>8,38</b>
<b>5,00</b>	4,42	18,07	<b>4,09</b>	0,11	5,15	<b>46,80</b>	1,56	13,03	<b>8,35</b>
<b>5,50</b>	4,42	18,03	<b>4,08</b>	0,11	5,14	<b>46,68</b>	1,56	13,00	<b>8,33</b>
<b>6,00</b>	4,42	17,99	<b>4,07</b>	0,11	5,12	<b>46,58</b>	1,30	12,97	<b>9,98</b>
<b>6,50</b>	4,42	17,96	<b>4,07</b>	0,11	5,12	<b>46,50</b>	1,30	12,95	<b>9,96</b>
<b>7,00</b>	0,61	17,93	<b>29,44</b>	0,11	5,11	<b>46,43</b>	1,30	12,93	<b>9,95</b>
<b>7,50</b>	0,61	17,91	<b>29,41</b>	0,11	5,10	<b>46,37</b>	1,30	12,91	<b>9,93</b>
<b>8,00</b>	0,61	17,89	<b>29,38</b>	0,11	5,10	<b>46,34</b>	1,30	12,90	<b>9,93</b>

## 4. CONCLUSIONES

La modelación computacional de la interacción dinámica suelo estructura para la determinación de los desplazamientos y asentamiento de los elementos de cimentación permite considerar el trabajo conjunto de todas las partes que conforman la solución de cimentación y la estructura y las rigideces relativas de los materiales componentes (hormigón y suelo de soporte).

El empleo de modelos continuos permite abordar con mayor precisión que los discretos los efectos tridimensionales de la interacción suelo-pilote-estructura. Los asentamientos verticales y los desplazamientos horizontales que se obtienen con los modelos continuos son menores a los que se alcanzan aplicando un modelo discreto.

La implementación de modelos continuos exige su calibración a partir de resultados de pruebas de carga que permiten verificar la precisión y confiabilidad del modelo computacional para el estudio de soluciones de cimentación económicas y seguras.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Empresa de Proyectos de Obras de Transporte (EPOT) donde se realizó el proyecto del caso de estudio y la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) por los resultados de los parámetros del suelo para el diseño geotécnico de los pilotes de dicho proyecto.

1. G. Á. R. Yosuary Almaguer Miranda 1 , Willian Cobelo Cristiá "Método Discreto En Pilotes Para la Obtención De Los Desplazamientos Verticales Y Horizontales, Aplicando La Interacción Dinámica Suelo Estructura," vol. Vol.3 No.2 p. 14, Abril - Junio 2022.
2. J. O. Bowles, *Foundation Analysis and Design*. Fifth Edition. Illinois: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
3. S. L. Arevalo Borbor and P. A. Villegas Flores, "Análisis de suelos arcillosos para el diseño de cimentaciones piloteadas en Malecón San José, Laguna Yarinacocha, Ucayali-2020," *Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil*, 2021.
4. D. L. Arcentales Tutivén and A. A. Rodríguez Abad, "Tesis de grado: Análisis de interacción suelo-pilote Estructura en tramo central de paso elevado cimentado sobre suelos blandos ubicado en la ciudad de Guayaquil," *Universidad de Guayaquil-Facultad Ciencias Matemáticas y Físicas*, 2021.
5. A. F. Uribe Santa, "Análisis tridimensional de pilas considerando el comportamiento no lineal del suelo," *Magister en Ingeniería Geotécnica, Facultad de Minas Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia*, 2012.
6. C. Gómez de Santos, "Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas," *Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid*, 2019.
7. A. T. Colunga, "Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos," *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 24, no. 2, pp. 141-165, 2019.
8. Á. P. B. Maya, "Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga," *Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia*, 2011.
9. M. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*. Sixth Edition. Florida: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2015.
10. H. G. J. J. o. t. S. M. Poulos and F. Division, "Behavior of laterally loaded piles: I-single piles," vol. 97, no. 5, pp. 711-731, 1971.
11. W.-F. Chen and W. O. McCarron, "Bearing capacity of shallow foundations," in *Foundation engineering handbook*: Springer, 1991, pp. 144-165.
12. I. S. F. Sosa, "Análisis del comportamiento de Balsas de Cimentación combinadas con Pilotes por el Método de los Elementos Finitos en 3D," *Departamento de Ingeniería Civil, ISPJAE, La Habana*, 2010.
13. NC 46:2017 *Construcciones sismo resistentes — Requisitos básicos para el diseño y construcción*, 2017.
14. (2019). *Estudio geotécnico para terminal portuaria mineralera "Buena Vista"*.
15. (Septiembre de 2022). *Informe técnico. Grupo de diagnóstico y patología*.
16. D. I. J. E. A. Hurtado, "Diseño de cimentaciones," PT-35). *Instituto de la Construcción y Gerencia: PT-35*, 2010, p. pp. Pages