

Método Discreto En Pilotes Parala Obtención De Los Desplazamientos Verticales Y Horizontales, Aplicando La Interacción Dinámica Suelo Estructura

Discrete Method For Obtaining Vertical And Horizontal Displacements By Applying Dynamic Soil Structure Interaction

Autores

Yosuany Almaguer Miranda¹, Giselle Álvarez Rey², Willian Cabelo Cristiá³

¹Ingeniero Civil, Especialista Superior de la Empresa de Proyectos de Obras de Transporte (EPOT), email: almagueryosuany@gmail.com

²Ingeniera Civil, Especialista de la Empresa de Proyectos de Obras de Transporte (EPOT).

³Doctor en Ciencias, Ingeniero Civil, Profesor Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae email: wcabelo@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN:

Este artículo se enfoca en evaluar el comportamiento geotécnico de un grupo de pilotes empleados para sustentar una instalación portuaria. Dada la importancia de la obra y complejidad del sistema de cargas actuantes es necesario evaluar el efecto de la interacción dinámica suelo estructura, para obtener las solicitaciones sobre los elementos estructurales y los desplazamientos de los pilotes. Se implementa la interacción dinámica suelo estructura para el diseño geotécnico de los pilotes, utilizando los criterios de desplazamientos y asentamientos permisibles, metodología que tiene en cuenta la deformabilidad del terreno ante las cargas estáticas y dinámicas. La modelación computacional consideró la interacción suelo-estructura, se realizó en el *Autodesk Robot Analysis Professional*. Para la determinación de los coeficientes de rigidez del suelo, utilizados en los modelos que consideran la IDSE; se emplearon las metodologías propuestas por Bowles, el método de la norma rusa Snip 2.02.05-87 y el método de la norma mexicana NTCDS 2004. Obteniendo resultados favorables en la utilización de una metodología para la IDSE.

Palabras claves: Interacción dinámica suelo estructura, pilotes.

ABSTRACT

This article focuses on evaluating the geotechnical behavior of a group of piles used to support a port facility. Given the importance of the work and the complexity of the acting load system, it is necessary to evaluate the effect of the dynamic soil-structure interaction, in order to obtain the stresses on the structural elements and the displacements of the piles. The dynamic soil-structure interaction is implemented for the geotechnical design of the piles, using the criteria of permissible displacements and settlements, a methodology that takes into account the deformability of the ground before static and dynamic loads. The computational modeling considered the soil-structure interaction, it was carried out in the *Autodesk Robot Analysis Professional*. For the determination of the soil stiffness coefficients, used in the models that consider the IDSE; the methodologies proposed by Bowles were used, the method of the Russian standard Snip 2.02.05-87 and the method of the Mexican standard NTCDS 2004. Obtaining favorable results in the use of this methodology for the IDSE.

Keywords: Soil structure dynamic interaction, piles

1. INTRODUCCIÓN

El artículo aborda el comportamiento geotécnico de un grupo de pilotes empleados para sustentar una instalación portuaria. Dada la importancia de la obra y complejidad del sistema de cargas actuantes necesarias evaluar el efecto de la implementación de la interacción dinámica suelo estructura para obtener las solicitaciones sobre los elementos estructurales y los desplazamientos de los pilotes. Para ello se utiliza un modelo discreto (Winkler), para modelar el efecto de la interacción y diferentes propuestas de formulaciones para la obtención de las rigideces de los resortes que van a representar el comportamiento del suelo de soporte. Se termina las rigideces y se evalúa su influencia en la magnitud de los desplazamientos horizontales debido a las cargas laterales, y los asentamientos por la acción de cargas verticales. Se consideran las acciones dinámicas producidas por el sismo y el sistema de cargas de generar las operaciones que se realizan sobre la estructura.

El modelo discreto facilita su implementación en cualquier software profesional de modelación, por su simplicidad y bajo costo computacional, se emplea para modelar los efectos de interacción entre la solución de cimentación y la subestructura mediante la sustitución del suelo como medio continuo por resortes. Sus resultados permiten la obtención de los desplazamientos y la capacidad resistente de los pilotes a la profundidad deseada.

Las metodologías utilizadas actualmente en Cuba para el diseño geotécnico de obras hidrotécnicas se basan en métodos analíticos, las mismas definen factores que tienen en cuenta en sus formulaciones las incertidumbres del comportamiento del suelo, aun cuando las propiedades del suelo de soporte se determinen a través de ensayos de laboratorio

Los altos costos de construcción de un muelle con pilotes por la necesidad de utilizar equipamiento especializado en la colocación e hincas de los pilotes hace necesario el uso de metodologías que tomen en cuenta el comportamiento suelo-pilote para obtener diseños geotécnicos más económicos y seguros.

Diseñar 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 evaluarlos desplazamientos totales de las estructuras, particularmente por el importante efecto que se tiene por el cabeceo de cimentaciones no apoyadas en el estrato firme, sean en suelos muy blandos o profundos [1].

Los resultados al considerar la influencia de la IDSE en la respuesta estructural de edificaciones sometidas a carga sísmica. Se evidencia en el incremento que tiene lugar en los desplazamientos en el tope de la edificación y en las derivas por piso. Adicionalmente, alcanza para valores de cortante basal inferiores a aquellos en los que se consideró la base empotrada [2].

El comportamiento de los pilotes sometidos a cargas laterales involucra la deformación y la interacción suelo-estructura, por lo que se han generado múltiples métodos que estudian los pilotes en función de sus características elásticas, naturaleza de las cargas laterales y propiedades del suelo[3]. La modelación de la IDSE provoca una modificación en la distribución de fuerzas sísmicas por nivel, aumentando los desplazamientos en los puntos más altos. Al incluir la IDSE, el nivel de desempeño alcanzado entra en el rango de pre – colapso y colapso para los suelos D y E respectivamente, lo que justifica la necesidad de considerar este fenómeno en el análisis de edificios emplazados en los suelos D y E de la (NC – 46, 2017) para el sismo analizado. Influye además directamente en el comportamiento estructural y respuesta modal del muelle. Al comparar el modelo con base empotrada e incorporando la interacción suelo estructura se pudo observar que los periodos vibratorios del primer modo aumentan, así como su masa participativa.

El cálculo sísmico con ayuda de los modelos dinámicos de interacción suelo-estructura, se muestra que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en las solicitaciones y sus periodos vibratorios de los elementos estructurales que conforman la estructura [4-6].

El método que considera la interacción suelo-estructura (ISE), no solamente permite analizar cimentaciones profundas sino también aisladas, dando como resultado en este último que los esfuerzos de cortante, momento inferior y superior son mayores, debido a que en la ISE se toma en consideración las características del suelo circundante. Conforme aumenta la capacidad admisible del suelo, los porcentajes de diferencia de los esfuerzos de cortante y momento inferior de las cimentaciones convergen a cero, sin embargo, sucede lo contrario a medida que disminuye la capacidad admisible del suelo [5].

Los coeficientes de rigidez que considera la interacción suelo-estructura, están ligados a las propiedades del suelo, las características de la cimentación y las definiciones de los elementos que conforman la superestructura; lo que unifica esta relación haciendo la participación entre ellos, unitaria, es decir que actúan como un solo elemento. Los efectos de la Interacción Suelo – Estructura en consideración con el tipo de suelo D, son visibles notoriamente en cuanto a la conexión que con este tipo de modelo matemático; se puede brindar entre el suelo, el cimiento y la superestructura. Permitiendo desplazarse en periodo prolongado, que las deformaciones sean mínimas y alcanzando resultados que indican el comportamiento real aproximado de la edificación frente a eventos sísmicos sea en consideración con los del diseño convencional [4].

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.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS PARA OBTENER LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES QUE SIMULAN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.

Existen diferentes autores que han desarrollado sus investigaciones en obtener a partir del modelo discreto las rigideces del suelo, que permite el diseño geotécnico de los pilotes por medio de los resultados de los desplazamientos y asentamientos ante las cargas externas.

Un correcto diseño geotécnico de pilotes es cuando se tienen en cuenta cuatro aspectos importantes:

- Capacidad vertical del pilote.
- Asentamiento.
- Capacidad horizontal del pilote.
- Desplazamiento horizontal.

Estos cuatro aspectos determinan la longitud teórica de pilotes, donde la capacidad del terreno es igual a las solicitaciones transmitidas a través de pilote, a partir de dicha longitud se obtiene una longitud de empotramiento con un factor de seguridad global entre 2,50 a 3,00 según factores que se utilizan en las formulaciones de Caquot-Kerisel y de Terzaghi.

En el análisis bajo cargas horizontales y verticales en el sistema suelo-pilote se suele modelar por el método propuesto por Winkler en 1867. De esta manera el suelo se representa como una serie de resortes horizontales desconectados unos de otros. Este modelo se ha usado ampliamente en la práctica de ingeniería de cimentaciones tanto para el análisis de carga estática como dinámica. Es el modelo más utilizado en la actualidad debido a su fácil implementación, aunque la falta de acoplamiento 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 k_h como constante en toda la profundidad, obteniendo así soluciones analíticas, mientras, considerando k_h variable con la profundidad, la solución es por medio de aproximaciones numéricas.

Para seleccionar los métodos que se utilizarán para determinar los desplazamientos de los pilotes, se deben tener en cuenta los resultados de las investigaciones geotécnicas realizadas en el lugar de emplazamiento, prestando especial atención a los ensayos utilizados para obtener los parámetros del terreno; ya que estos proporcionan mayor o menor grado de incertidumbre que influyen en la sobrevaloración o subvaloración del terreno analizado.

La simulación de la interacción suelo-estructura se realizó basándose en los principios propuestos por Winkler, que supone el suelo como resortes elásticos; la rigidez de dichos resortes se determinó mediante los métodos analíticos anteriormente expuestos. Para la determinación de los coeficientes de rigidez del suelo, tanto horizontales como verticales; 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; el método de la norma rusa Snip 2.02.05-87 que mediante correlaciones permite determinar la variación de la rigidez con la profundidad; y el método de la norma mexicana NTCDS 2004 que tiene en cuenta las dimensiones de los pilotes y relaciona la elasticidad del suelo y la de los pilotes.

Método de Bowles 1997.

Este método propone estimar en forma aproximada el módulo de reacción horizontal del suelo, ver ecuación (1) [7].

Es un método muy flexible para todo tipo de cimentaciones. Considera entre sus factores la variación de la rigidez en dependencia de la profundidad, para suelos arcillosos puros, brinda resultados confiables porque las variables dependientes son la densidad y la cohesión no drenada.

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

Donde:

- A_S Constante para los miembros horizontales o verticales.
 B_S Coeficiente de variación de profundidad.
 Z Profundidad de evaluación. (m)

$$n = 0,40 - 0,60$$

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/m²)
 B Ancho o diámetro del pilote. (m)
 γ Peso específico natural del suelo. (kN/m³)
 $C = 40$
 N_c, N_γ, N_q Factores de capacidad de carga.
 C_m Factor de tamaño y forma.

- $B = D \leq 0,457 \text{ m} \rightarrow C_m = 1,0 + 2 * 0,5$
- $B = D > 0,457 \text{ m} \rightarrow C_m = 1,0 + \left(\frac{457}{D} \right)^{0,75} \geq 1,5$
- $B = D > 1200 \text{ mm} \rightarrow C_m = 1,0 + 0,25$

Método dinámico A.E. Sargsian.

En las investigaciones de A.E. Sargsian y A.A. Najapetian elaboró otro modelo dinámico de interacción suelo-estructura, en su análisis se ingresan parámetros cuasi estáticos de rigidez de la base de fundación K_x : ecuación (4), K_ϕ : ecuación (5), K_z : ecuación (6).

En esta metodología, la rigidez está relacionada con la obtención empírica de las velocidades de ondas longitudinales y verticales a partir de factores adimensionales que afectan el módulo de elasticidad y la densidad del suelo analizado. Tiene como desventaja el no contener en sus expresiones la variación de la rigidez con la profundidad.

$$K_x = \frac{28,8 * (1 - \mu^2) * \gamma * C_2^2 * \sqrt{A}}{\pi * (7 - 8\mu)} \quad (4)$$

$$K_\phi = \frac{8,52 * \gamma * C_2^2 * I}{\sqrt{\pi}(1 - \mu) * \sqrt{A}} \quad (5)$$

$$K_z = \frac{\gamma * C_1^2 * \sqrt{A}}{\phi * (1 - \mu^2)} \quad (6)$$

Donde:

- γ Densidad del suelo de cimentación. (kN/m³)
 A Área de la base de la cimentación. (m²)
 I Momento de inercia del área de la base de la cimentación respecto al eje horizontal, que pasa por el centro de gravedad perpendicular al plano de vibración. (m⁴)
 μ Coeficiente de Poisson del suelo.
 $\phi = 0,833$ Coeficiente propio del método
 C_1 Velocidad de propagación de ondas longitudinales en el suelo de fundación. (m/s)
 C_2 Velocidad de propagación de las ondas transversales. (m/s)

Siendo:

$$C_1^2 = \frac{(1 - \mu) * E}{(1 + \mu) * (1 - 2\mu) * \gamma} \quad (7)$$

$$C_2^2 = \frac{E}{2(1 + \mu) * \gamma} \quad (8)$$

Donde:

- E Módulo de elasticidad de la base de fundación. (kN/m²)

Método dinámico norma rusa Snip 2.02.05-87.

Este método facilita la obtención de los coeficientes de rigidez de compresión elástica K_Z : ecuación (9); desplazamiento elástico uniforme K_X : ecuación (10); compresión elástica no uniforme K_ϕ : ecuación (11); y desplazamiento elástico no uniforme K_ψ : ecuación (12).

Al igual que la metodología anterior obtiene de manera empírica los factores que dependen del tipo de suelo, su módulo deformacional del suelo y tiene la misma desventaja de no contener en sus expresiones la variación de dicha rigidez con la profundidad[8].

$$K_Z = C_Z * A \quad (9)$$

$$K_X = C_X * A \quad (10)$$

$$K_\phi = C_\phi * I_\phi \quad (11)$$

$$K_\psi = C_\psi * I_\psi \quad (12)$$

Donde:

- A Área de la base de la cimentación. (m^2)
 I_ϕ Momento de inercia del área de la base de la cimentación respecto al eje horizontal, que pasa por el centro de gravedad perpendicular al plano de vibración. (m^4)
 I_ψ Momento de inercia del área de la base de la cimentación respecto al eje vertical, que pasa por el centro de gravedad de la cimentación. (m^4)
 C_Z Coeficiente de compresión elástica uniforme. (kN/m^3)
 C_X Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme. (kN/m^3)
 C_ϕ Coeficiente de compresión elástica no uniforme. (kN/m^3)
 C_ψ Coeficiente de desplazamiento elástico no uniforme. (kN/m^3)

Siendo:

$$C_Z = b_0 * E \left(1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right) \quad (13)$$

$$C_X = 0,7 C_Z \quad (14)$$

$$C_\phi = 2 C_Z \quad (15)$$

$$C_\psi = C_Z \quad (16)$$

Donde:

- b_0 Coeficiente. (m^{-1})
- 1,0 para suelos arenosos
 - 1,2 para arenas arcillosas
 - 1,5 para arcillas, cascajos, gravas, cantos rodados, arenas densas

E Módulo de deformación del suelo en la base de la cimentación. (kN/m^2)

$A_{10} = 10 m^2$

Método dinámico NTCDS 2004.

Las normas técnicas complementarias para diseño por sismo permiten la obtención de las rigideces y amortiguamientos en cimentaciones, ver ecuaciones (17) y (18) [9].

En esta metodología la rigidez está relacionada, con la elasticidad del pilote y del terreno, factor positivo dado que busca obtener una rigidez de la interface pilote-suelo. Tiene como desventaja que se debe asumir una longitud del pilote para obtener los resultados [10].

$$K_X^0 = D * E_s * \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{0,21} \quad (17)$$

$$K_v^0 = 1,9 * D * E_s * \left(\frac{L}{D} \right)^{0,67} \quad (18)$$

Donde:

- D Diámetro del pilote. (m)
 E_s Módulo de deformación del suelo en la base de la cimentación. (kN/m^2)
 E_p Módulo de elasticidad del pilote. (kN/m^2)
 L Longitud del pilote. (m)

Método dinámico D.D. Barkan – O.A. Savinov.

Es un modelo teórico-experimental, que está basado en la forma con la que interactúa la cimentación con la base de fundación en forma de un proceso establecido en vibraciones forzadas. Propone unos coeficientes de rigidez que estén en función de los coeficientes de compresión y desplazamiento elástico que afectan la inercia y el área, ver ecuaciones (19), (20) y (21). Este modelo restringe el giro alrededor del eje z, por tanto, solamente se calculan cinco de los seis grados de libertad.

$$K_z = C_z * A \quad (19)$$

$$K_x = C_x * A \quad (20)$$

$$K_\phi = C_\phi * I \quad (21)$$

Donde:

C_z, C_ϕ Coeficientes de compresión elástica uniforme y no uniforme.

C_x Coeficiente de desplazamiento elástico uniforme.

A Área de la base de la cimentación. (m²)

I Momento de inercia de la base de la cimentación respecto al eje perpendicular al plano de cimentación. (m⁴)

Siendo los coeficientes de desplazamiento y compresión:

$$C_z = C_0 \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{r}{r_0}} \quad (22)$$

$$C_x = D_0 \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{r}{r_0}} \quad (23)$$

$$C_\phi = C_0 \left[1 + \frac{2(a+3b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{r}{r_0}} \quad (24)$$

Donde:

$$C_0 = 1,7 * \frac{E_0}{1 - \mu^2} \quad (25)$$

$$D_0 = 1,7 * \frac{E_0}{(1 + \mu)(1 - 0,5\mu)} \quad (26)$$

a, b Dimensiones del cimient. (m)

$\Delta = 1m^{-1}$

E_0 Módulo de elasticidad, calculado para presión estática del suelo. (kN/m²)

μ Coeficiente de Poisson del suelo.

Método analítico para obtener el asentamiento elástico del pilote.

El asentamiento total de un pilote ante una carga vertical de trabajo Q_w está dado por la sumatoria de asentamientos elástico del pilote, causado por la carga en punta y en fuste [11].

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \quad (27)$$

Donde:

$S_{e(1)}$ Asentamiento elástico del pilote

$S_{e(2)}$ Asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote.

$S_{e(3)}$ Asentamiento del pilote causada por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote

En la figura 1, se muestran los valores de los asentamientos obtenidos analíticamente

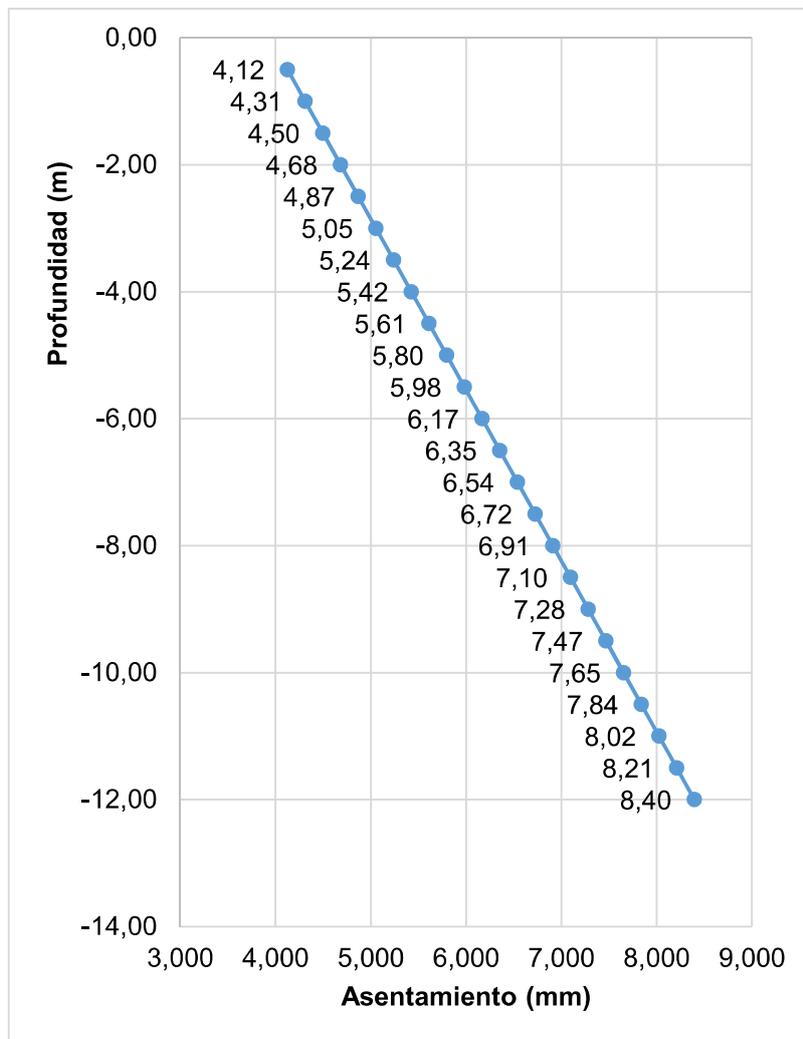


Figura 1: Asentamiento analítico

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

El método de Winkler brinda los desplazamientos y asentamientos que la carga externa produce en el pilote cuando interactúa en el suelo. Dichos valores se comparan con criterios de permisibilidad que han sido presentados por varios autores.

Desplazamientos laterales permisibles.

- En M. Tomlinson and J. Woodwardse 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 [12].
- En H. G. Poulos and E. H. Davis 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 [13].
- En J. O. Bowles se sugieren valores de desplazamiento del orden de 3 a 10 mm para una movilización del fuste en pilotes tubulares [7].

Asentamientos permisibles

- En A. S. Vesic se recogen varios criterios de asentamiento permisible las cuales se resumen a continuación [14]:

- Asentamiento límite total absoluto: 1" (25,4 mm)
- Asentamiento límite total relativo: 10% del diámetro del pilote.
- Criterio de Davison: El asentamiento permisible del pilote está definido por la ecuación 28

$$X = 3,80 + \frac{D}{120} \quad (28)$$

Modelación computacional

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

- La losa del muelle está compuesta por una pre-losa de 15 cm de espesor, que servirá de encofrado y a su vez de losa estructural al hormigonarse en una segunda etapa la losa de 25 cm de espesor; para un espesor total de la losa de 40cm.
- 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.
- Se dejarán conectores en las vigas para trabajen como viga T, al hormigonarse la parte in situ de la losa.
- 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 2 se muestra la disposición de los elementos que conforman el muelle objeto de estudio.

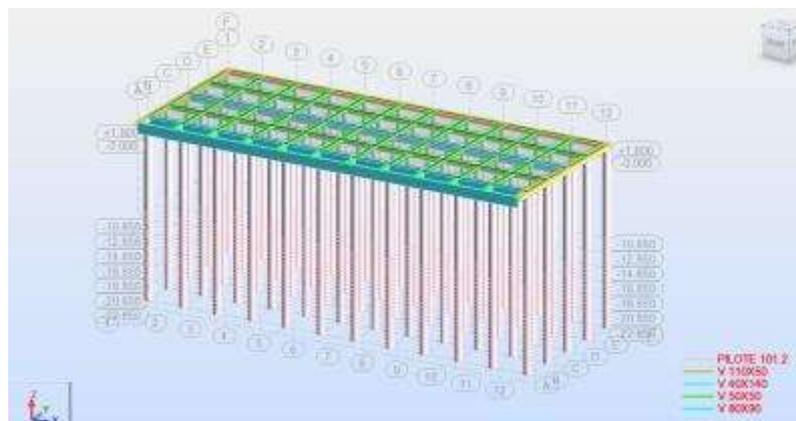


Figura 2: Modelo geométrico del muelle.

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

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. El replanteo de las calas perforadas se realizó con GPS autónomo. En total se perforaron 10 calas, alcanzando entre 25,80 m y 30,00 m de profundidad[15].

Los valores promedios de las propiedades físico-mecánicas, estimados a partir de ensayos de laboratorio se resumen de la siguiente manera:

Peso específico húmedo (natural), kN/m^3 ----- 18,5

Peso específico seco, kN/m^3 ----- 15,0

Humedad natural, % ----- 26,1

Peso específico de los sólidos ----- 2,73

Para arcilla dura:

Cohesión no drenada, kPa-----110

Para arcilla muy dura:

Cohesión no drenada, kPa----- 200

Para arcilla extremadamente dura (semiroca)

Cohesión no drenada, kPa----- 350

Para todos los tipos de arcilla:

Ángulo de fricción interna, grados ----- 0

El suelo de cimentación tiene un peso específico $\gamma = 19,8 kN/m^3$. Los valores de la cohesión no drenada determinada por los ensayos triaxiales rápidos y por el penetrómetro de bolsillo muestran una tendencia al aumento con la profundidad[16].

La cohesión no drenada (C_u), obtenida de los estudios de suelo, y el módulo de elasticidad del suelo de cimentación (E) varían con la profundidad (Z), y se recogen en la tabla 2:

Tabla 2: Parámetros resistentes del suelo.

Z (m)	C_u (kPa)	E (kPa)	Z (m)	C_u (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

En las figuras 3 y 4 se muestran las variaciones de las profundidades de los tipos de suelos obtenidos por las calas realizadas en la zona, así como la localización de la arcilla dura a muy dura, estrato donde se cimenta el muelle.

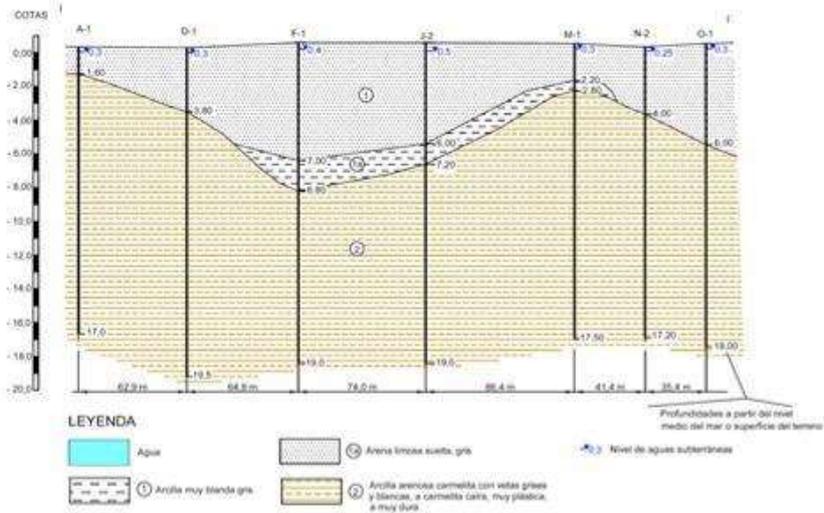


Figura 3: Perfil litológico I-I

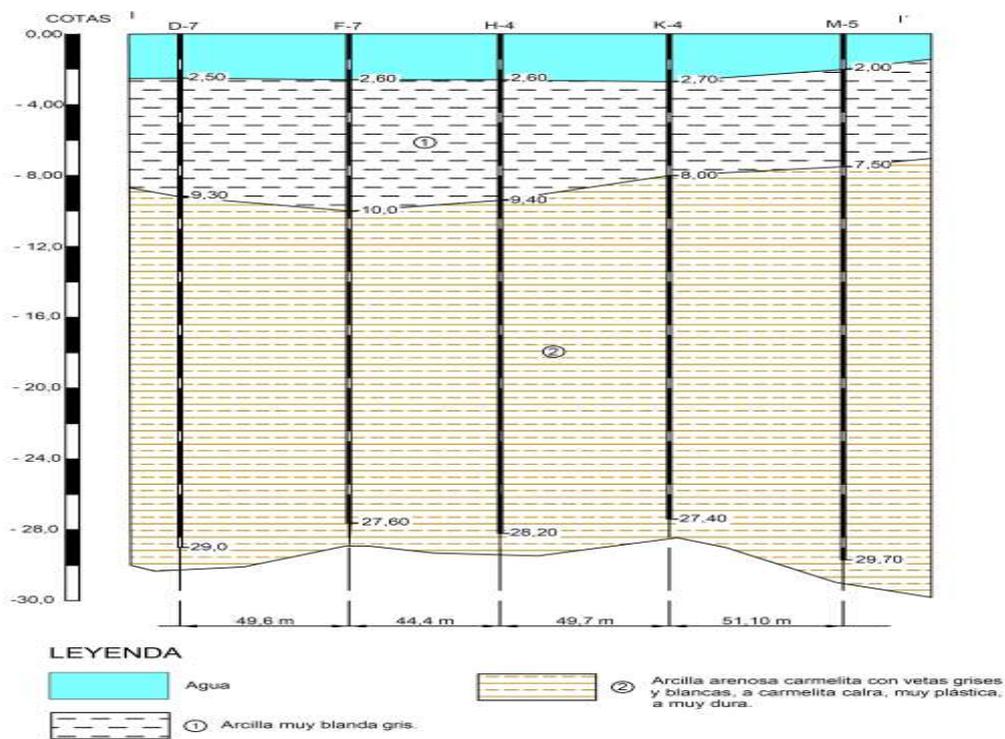


Figura 4: Perfil litológico II-II

Combinaciones de carga.

Las cargas que actúan sobre la estructura son:

- CG II Cargas gravitacionales, con carga de cargador sobre rieles y tolva ecológica en la posición 2.
- MS-32 II Carga del vehículo rodante en la posición 2.
- Sx Carga sísmica que actúa en el sentido del eje X.
- Sy Carga sísmica que actúa en el sentido del eje Y.
- Sz Carga sísmica que actúa en el sentido del eje Z.

La combinación de carga de trabajo según la NC 207:2019, acápite 12.2.1:

- $1,34 \cdot CG \text{ II} + 0,50 \cdot (MS-32 \text{ II}) + S_x + 0,30 \cdot S_y + S_z$

Condiciones de contorno.

En la modelación se considera que las uniones entre las vigas son continuas; además, las uniones entre los pilotes y las vigas también se consideran continuas y se unen al entramado de vigas por medio de las protecciones interiores de hormigón armado.

La unión entre los pilotes de cimentación y el suelo se considera elástica. Utilizando al módulo de Winkler se presenta el modelo para el método de Bowles 1997, el método dinámico norma rusa Snip 2.02.05-87 [8], y el método dinámico de la norma mexicana NTCDS 2004 [10]. Las rigideces obtenidas para cada método se muestran las figuras 5 y 6.

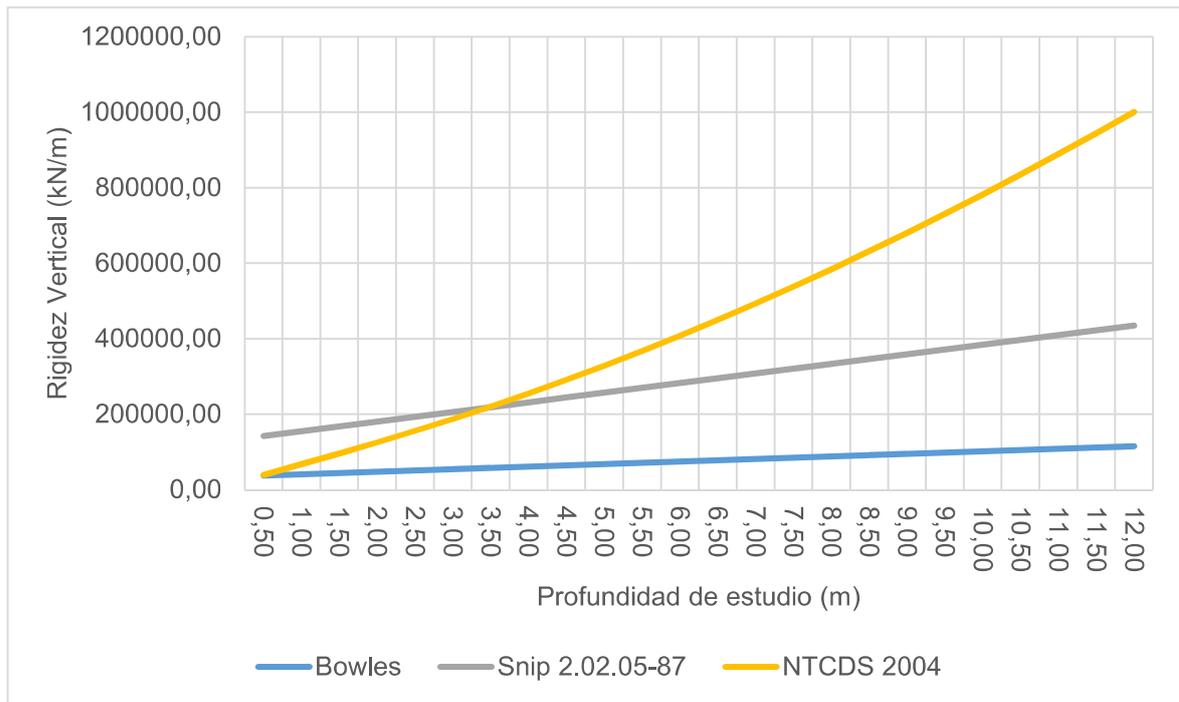


Figura 5: Comparación de las rigideces verticales para cada método

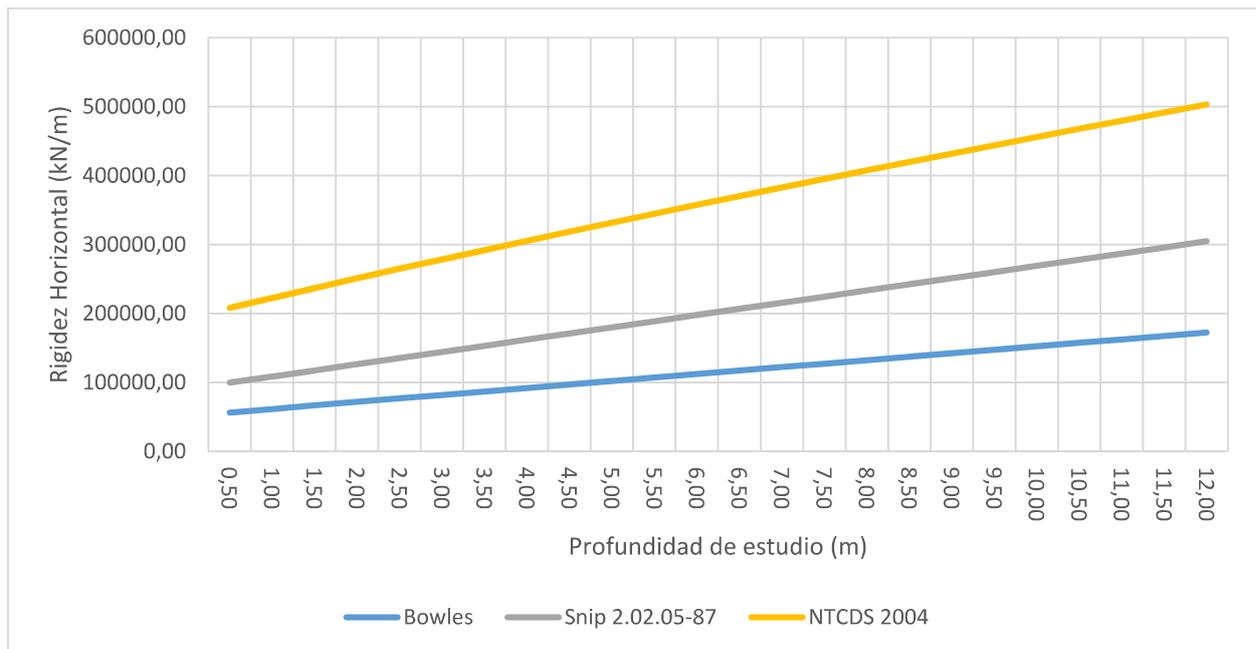


Figura 6: Comparación de las rigideces horizontales obtenidos para cada método

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este punto se mostraron los resultados de la modelación discreta de los diferentes autores que se mencionaron con anterioridad, en la figura 7 se grafican los desplazamientos horizontales de los pilotes del muelle, a partir del nivel del terreno. Además, se representa el desplazamiento lateral admisible; que se asume como 3 mm, tomando el criterio de J. O. Bowles.

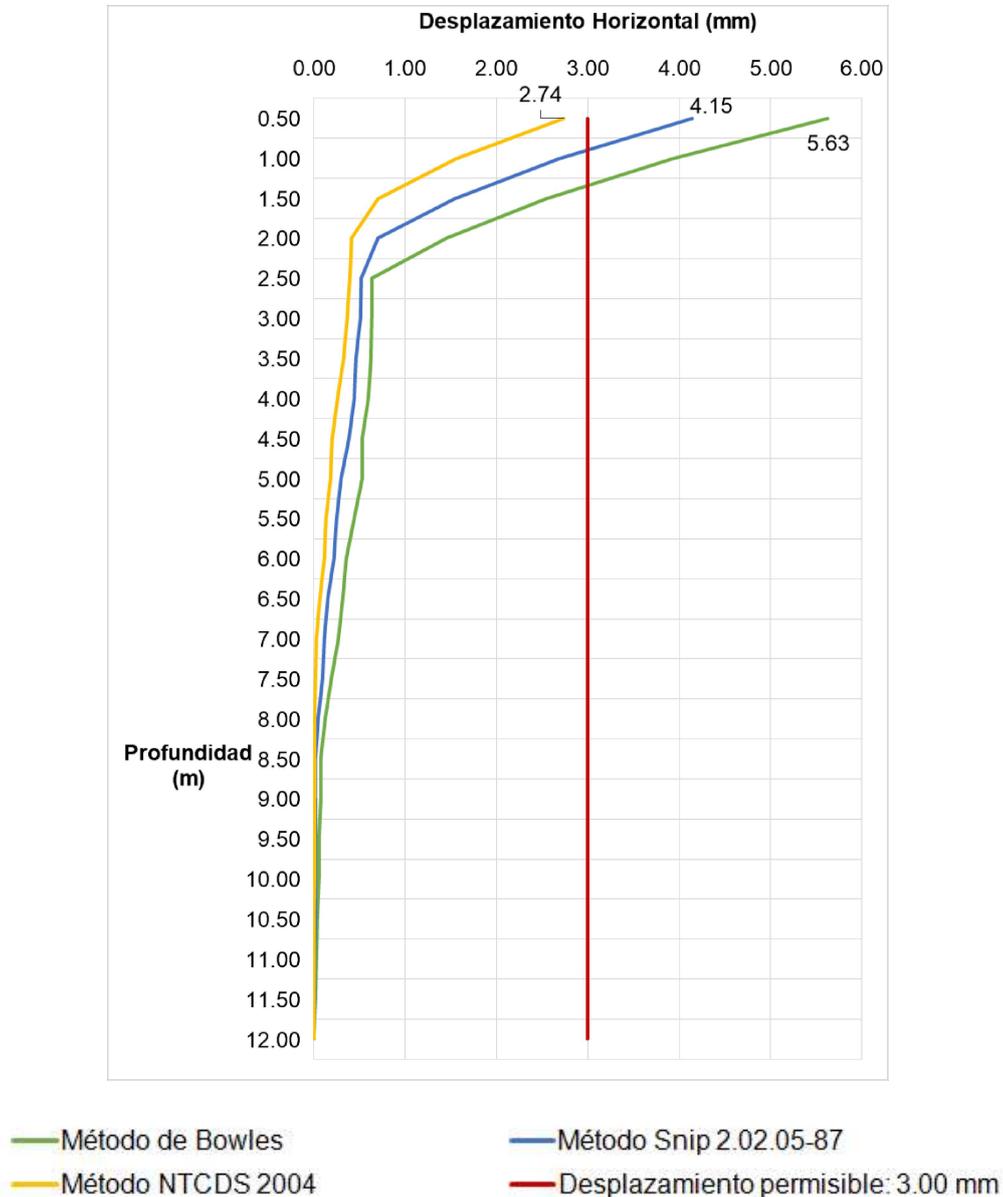
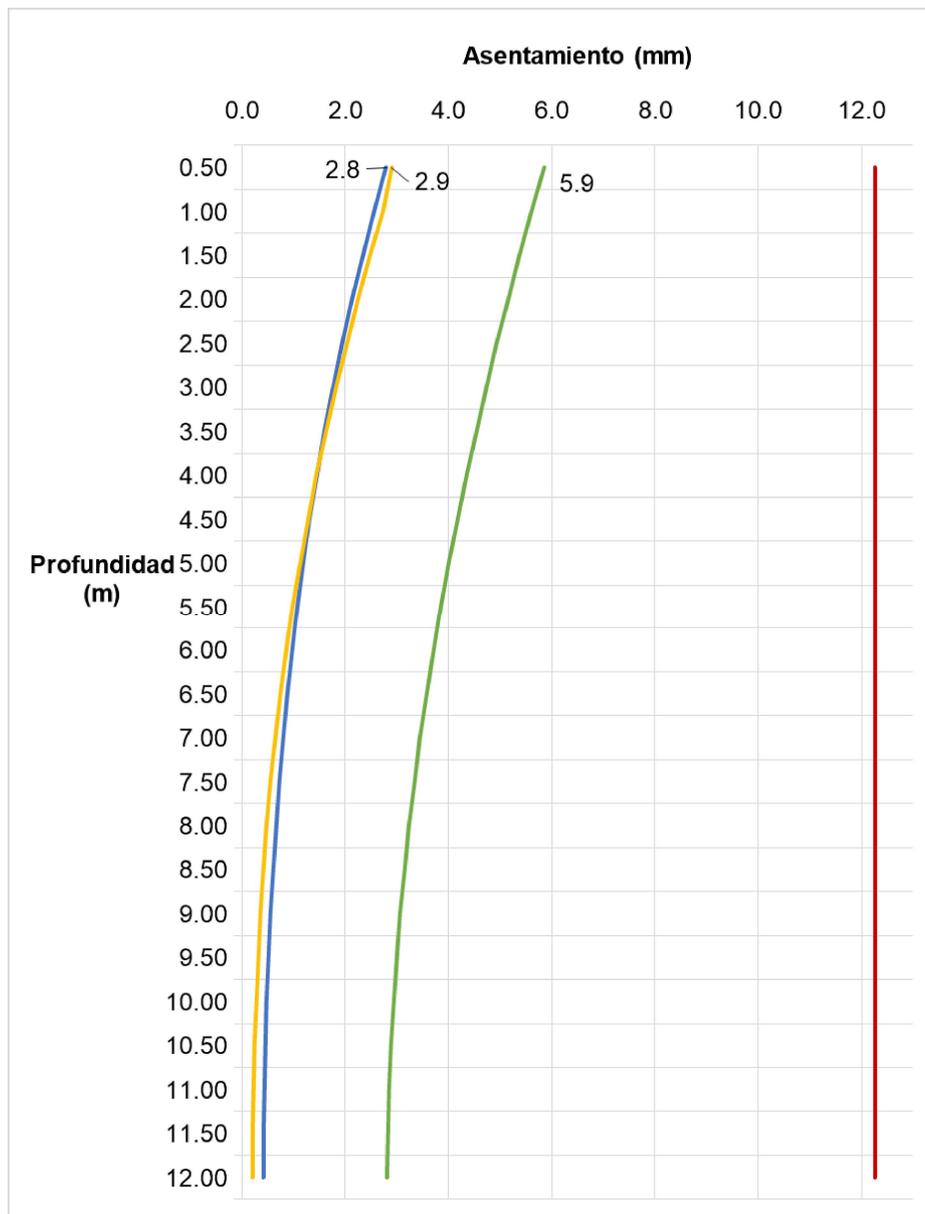


Figura 7: Comparación de los desplazamientos horizontales obtenidos para cada método.

Para el análisis de los asentamientos de los pilotes se realiza una comparación de los resultados obtenidos de la modelación computacional utilizando los coeficientes de rigidez del suelo, determinados por las expresiones propuestas por el método de Bowles, el método de la norma rusa Snip 2.02.05-87 y el método de la norma mexicana NTCDS 2004. A continuación, en la figura 8, se presentan los asentamientos para la combinación que resulta la más desfavorable ($1,34 \cdot CG I + 0,50 \cdot (MS-32 II) + Sx + 0,30 \cdot Sy + Sz$). También se representa el asentamiento permisible; con valor 12,27 mm, según los criterios de Davison.



- Método de Bowles
- Método Snip 2.02.0587
- Método NTCDS 2004
- Asentamiento permisible; 12.27 mm

Figura 8: Comparación de los asentamientos máximos obtenidos para cada método.

5. CONCLUSIONES

La consideración de los efectos de interacción dinámica suelo-estructura en el análisis de pilotes cargados axial y lateralmente permite acercarse al comportamiento de los pilotes en su interacción con el suelo para establecer criterios económicos en el diseño, mediante la implementación de un modelo discreto de bajo costo computacional. La formulación de Bowles 1997 brinda los valores de desplazamientos y asentamientos mayores entre los métodos analizados. La longitud teórica de los pilotes se obtiene del chequeo de los criterios de desplazamientos permisibles, siendo necesario completar el análisis con los criterios de resistencia para obtener la longitud definitiva de los pilotes.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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, pp. 141-165, 2019.
2. Z. C. Yzaguirre, J. O. M. Cid, and W. C. J. H. y. A. Cristiá, "Influencia de la interacción dinámica suelo-estructura en el mecanismo de colapso y nivel de desempeño de edificaciones de hormigón armado," 2021.
3. E. Cisneros, "Investigación pilotes cargados lateralmente," 2021.
4. L. S. Peñafiel Berbello, "Análisis sísmico comparativo de un edificio de mediana altura considerando el sistema de base fija versus la interacción suelo-estructura," *Jipijapa-UNESUM*, 2019.
5. D. A. Turcios-Medina, "Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos," 2020.
6. J. E. Bowles. (1997). *Foundation Analysis and Design*. Fifth Edition.
7. J. O. Bowles, *Foundation Analysis and Design*. Fifth Edition. Illinois: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
8. G. J. R. I. d. I. d. E. Villarreal, "Interacción suelo estructura en edificaciones con zapatas aisladas," vol. 25, pp. 311-332, 2020.
9. "Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. Tomo II," in *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, ed. Ciudad de Mexico, Mexico, 2004.
10. Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones., 2004.
11. M. Das. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentación [Libro]*. 7ma Edición.
12. M. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*. Sixth Edition. Florida: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2015.
13. H. G. Poulos and E. H. Davis, "Behavior of Laterally Loaded Piles," 1971.
14. S. Vesic, *Bearing Capacity of Shallow Foundations*. Carolina del Norte: Duke University, 1975.
15. G. E. Marinos, "Estudio geotécnico para terminal portuaria mineralera "Buena Vista"," ed, 2019.
16. "Estudio Geotecnico para Terminal Portuaria Mineralera "Buenavista"," ed. La Habana, Cuba, 2019.