

Análisis y diseño de plateas de cimentación con pilotes

Analysis and design of foundation slabs with piles

Marcos Mendoza Linares^{1*}, Ever Rodriguez Guevara¹, Gerardo Mercedes Trigoso Torres², Segundo Linares Estrada¹, José Alejandro Alcántara Tucto³, Yvette Amparo Jimenez Maza¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa 1070, C.P. 06003, Cajamarca, Perú

²Oficina General de Proyectos de Infraestructura y Saneamiento, Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa 1070, C.P. 06003, Cajamarca, Perú

³Oficina de Servicios Generales, Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa 1070, C.P. 06003, Cajamarca, Perú

* Autor de correspondencia: mmendoza@unc.edu.pe

Resumen

En el contexto actual, la construcción de edificaciones de gran altura se ha vuelto una necesidad imperante, motivada, en primer lugar, por el crecimiento de la población mundial y la consiguiente demanda de espacios habitables en las crecientes ciudades. En segundo término, el avance científico y técnico, que ha propiciado el descubrimiento de nuevos materiales, la implementación de maquinaria especializada y la innovación en procesos constructivos, ha influido significativamente en la capacidad para erigir estructuras más elevadas. Además, factores como la competencia entre naciones por liderar en la construcción de edificaciones imponentes, por razones tanto de moda como de orgullo nacional, también contribuyen a esta tendencia. Este estudio de investigación se centra en el análisis detallado y la aplicación práctica de cimentaciones que combinan plateas y pilotes en la construcción de edificaciones de gran envergadura, puentes, estructuras industriales y marinas, entre otras. Se examinan casos emblemáticos, como la Torre Burj Khalifa, que, al estar ubicada en suelos difíciles de cimentar, utiliza esta combinación para gestionar asentamientos y optimizar consideraciones económicas. Las referencias proporcionan información adicional y detallada sobre diversas edificaciones que emplean esta técnica de cimentación.

Palabras clave: cimentaciones combinadas, edificaciones de gran altura, pilotes estructurales, plateas de cimentación, suelos difíciles

Abstract

In the current context, the construction of tall buildings has become an imperative necessity driven, firstly, by the global population growth and the consequent demand for habitable spaces in expanding cities. Secondly, scientific and technical advancements, leading to the discovery of new materials, the implementation of specialized machinery, and innovation in construction processes, have significantly influenced the ability to erect taller structures. Additionally, factors such as competition among nations to lead in the construction of impressive buildings, driven by both fashion and national pride, also contribute to this trend. This research study focuses on the detailed analysis and practical application of foundations that combine slabs and piles in the construction of large-scale buildings, bridges, industrial, and marine structures, among others. Emblematic cases are examined, such as the Burj Khalifa Tower, which, situated on challenging soil, employs this combination to manage settlements and optimize economic considerations. The references provide additional and detailed information about various buildings that employ this foundation technique.

Key words: combined foundations, challenging soils, foundation slabs, structural piles, tall buildings

Introducción

Este trabajo se enfoca en el análisis detallado de las cimentaciones que combinan plateas con pilotes, conocidas como Piled Raft en inglés. El estudio de estas cimentaciones surge debido a su creciente popularidad, motivada por su costo más económico en comparación con las cimentaciones basadas exclusivamente en pilotes. La investigación aborda la formulación matemática de los elementos platea-pilotes y su aplicación en diversos sistemas estructurales, especialmente en suelos difíciles de cimentar y en condiciones económicas exigentes.

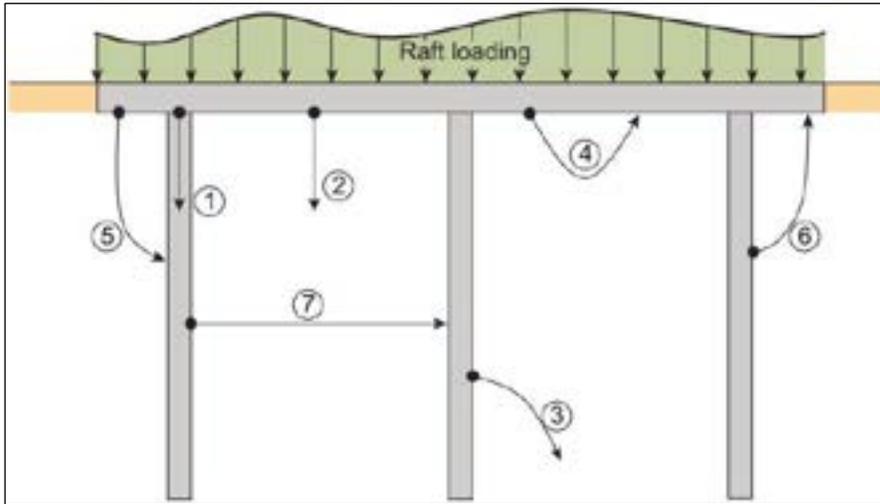
El interés en este tipo de cimentaciones se ha intensificado debido a diversos factores, como el aumento de la población mundial, la escasez de espacios habitables disponibles y los avances científicos y técnicos que han conducido al descubrimiento de nuevos materiales y procesos constructivos. Además, la competencia global por liderar la construcción de estructuras más altas ha contribuido a la adopción de cimentaciones combinadas. El trabajo también introduce un enfoque práctico utilizando el Método de Diseño Simplificado Poulos-Davis-Randolph, presentando su desarrollo teórico y ejemplos de aplicación para una comprensión más clara y efectiva.

Materiales y métodos

La triple interacción entre el suelo, el pilote y la platea (Figura 1), hace que un análisis riguroso del problema sea muy complejo. El diseño requiere de un modelo matemático más sofisticado, como un análisis de elementos

finitos. Existen algunos métodos simplificados que son adecuados para los diseños preliminares; uno de estos consideraremos y que lo exponemos a continuación. En efecto, dado que los asentamientos juegan un papel más importante que la capacidad portante en el diseño de placas con pilotes, nos centraremos más en la rigidez (K) definida como:

$$\text{Rigidez}(K) = \frac{\text{Carga (P)}}{\text{Asentamiento}(S)} \quad (1)$$



(1) Interacción pilote-placa, (2) Interacción suelo-placa, (3) Interacción suelo-pilote, (4) Interacción placa-suelo-placa, (5) Interacción placa-suelo-pilote, (6) Interacción pilote-suelo-placa, (7) Interacción pilote-suelo-pilote.

Figura 1. Interacción Suelo-Pilote-Placa

Fuente: O'Brien et al., 2012

Las interacciones indicadas en la Figura 1, se definen a continuación:

- (1) INTERACCIÓN PILOTE-PLACA. Las cargas se transmiten a los pilotes directamente por la placa.
- (2) INTERACCIÓN PLATEA-SUELO. Las tensiones de contacto entre la placa y el suelo se transmiten al suelo y se produce el asentamiento de la placa.
- (3) INTERACCIÓN PILOTE-SUELO. Las cargas de los pilotes se dispersan en el suelo que rodea los pilotes.
- (4) INTERACCIÓN PLATEA-SUELO-PLATEA. La interacción tiene lugar a través del suelo con otras partes de la placa.
- (5) INTERACCIÓN PLATEA-SUELO-PILOTE. Las tensiones de contacto de la placa también se transmiten a través del suelo e interactúan con los pilotes.

- (6) INTERACCIÓN PILOTE-SUELO-PLATEA. La interacción también tiene lugar entre cada pilote a través del suelo hasta la parte inferior de la platea.
- (7) INTERACCIÓN PILOTE-SUELO-PILOTE. La interacción tiene lugar entre cada pilote a través del suelo a otros pilotes.

En efecto, los subíndices p y r para refieren a pilote (pile) platea (raft), respectivamente. Los métodos aproximados no tienen en cuenta los asentamientos diferenciales.

El método de Poulos-Davis-Randolph (PDR) sugiere que la capacidad de carga vertical de la platea piloteada (platea combinada con pilotes) puede tomarse como la menor de las siguientes:

- La suma de las capacidades últimas de la platea y todos los pilotes.
- La capacidad última del bloque que contiene los pilotes y la platea, más la parte de la platea fuera del perímetro de los pilotes.

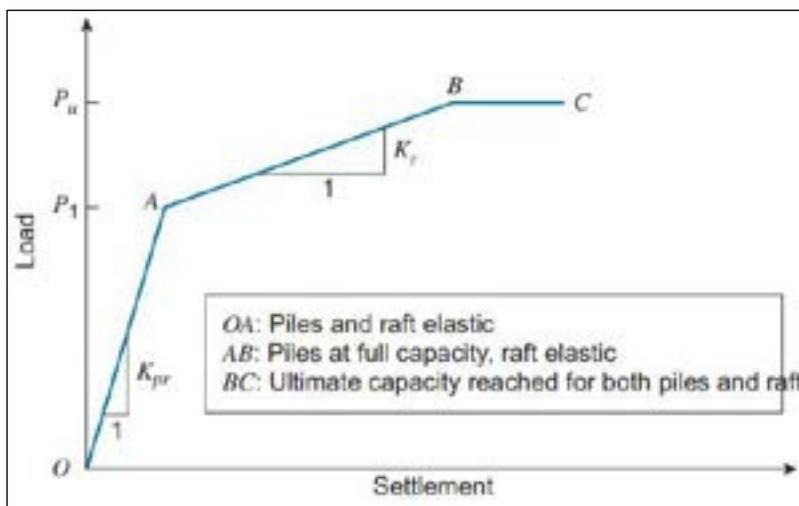


Figura 2. Asentamiento de carga trilineal simplificado para análisis preliminar

Fuente: Poulos, 2001

La Figura 2 muestra un gráfico de asentamiento de carga trilineal simplificado OABC, representado por tres segmentos de línea recta. A lo largo de OA, tanto los pilotes como la platea permanecen elásticos y los pilotes alcanzan su máxima capacidad en A, donde la carga total aplicada sobre la platea piloteada es P_t . La pendiente de la línea OA es la rigidez de la platea piloteada K_{pr} . En cualquier punto de OA, la carga total (P_t) es compartida por la platea (P_r) y los pilotes (P_p). (Los subíndices p y r se refieren a pila y platea, respectivamente). La proporción relativa transportada por la platea (X) se define como:

$$X = \frac{P_r}{P_t} = \frac{P_r}{P_r + P_p} \quad (2)$$

$$1 - X = \frac{P_p}{P_t} = \frac{P_p}{P_r + P_p} \quad (3)$$

Donde

$$P_t = P_r + P_p \quad (4)$$

Si la capacidad la carga última de un solo pilote es P_{up} la carga P_1 (vea la Figura 4) se puede determinar como

$$P_1 = \frac{P_{up}}{1-X} \quad (5)$$

En base a un análisis elástico, Clancy y Randolph (1996) definen X como:

$$X = \frac{K_r(1-\alpha_{rp})}{K_p + K_r(1-2\alpha_{rp})} \quad (6)$$

Donde K_p es la rigidez del grupo de pilotes solamente, K_r es la rigidez de la platea solamente, y α_{rp} es el factor de interacción pilote-platea. Tanto K_r como K_p se puede determinar a partir de teorías elásticas (Fleming et al. 2008; Poulos and Davis, 1974). La rigidez de la platea piloteada K_{pr} se define como (Poulos H. G., 2001):

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r(1-2\alpha_{rp})}{1 - \alpha_{rp}^2 \frac{K_r}{K_p}} \quad (7)$$

El factor de interacción pilote-platea α_{rp} se ubica dentro del rango de 0 - 1, con 0 cuando la estructura está actuando como una platea y 1 cuando está actuando como una cimentación totalmente pilotada con ningún contacto entre la platea y el pilote (por ejemplo, las cimentaciones marinas). Para el mismo tamaño de platea y condiciones de suelo, α_{rp} depende del número de pilotes, sus longitudes y el nivel de esfuerzo. La Figura 3 muestra la posible reducción del asentamiento con el incremento del valor de α_{rp} .

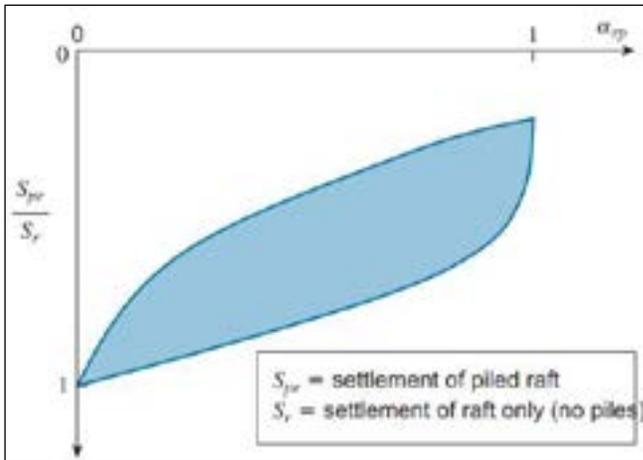


Figura 3. Ilustración cualitativa de la posible reducción del asentamiento y el valor de α_{rp}

De A a B en la Figura 2, la plataforma piloteada se basa únicamente en la rigidez de la plataforma (K_r), ya que los pilotes han alcanzado su capacidad total en A. La plataforma se comporta elásticamente a lo largo de AB, donde la pendiente está definida por la rigidez de la plataforma K_r , y alcanza su capacidad en B. Más allá de esto, el gráfico de carga-asentamiento es horizontal sin capacidad adicional para cualquier carga adicional. Hasta que la capacidad del pilote se movilice por completo en A (Figura 2), la rigidez de la plataforma piloteada (K_{pr}) se puede utilizar para determinar el asentamiento a lo largo de OA.

Determinación de α_{rp}

Para determinar la rigidez de la plataforma piloteada K_{pr} es necesario determinar el factor de interacción del pilote con la plataforma α_{rp} .

Randolph (1994) propuso un modelo simple de plataforma piloteada que se muestra en la Figura.4, donde un solo pilote se muestra junto con una plataforma equivalente o cabezal. El área del cabezal del pilote se define como el área de la plataforma dividido por el número de pilotes.

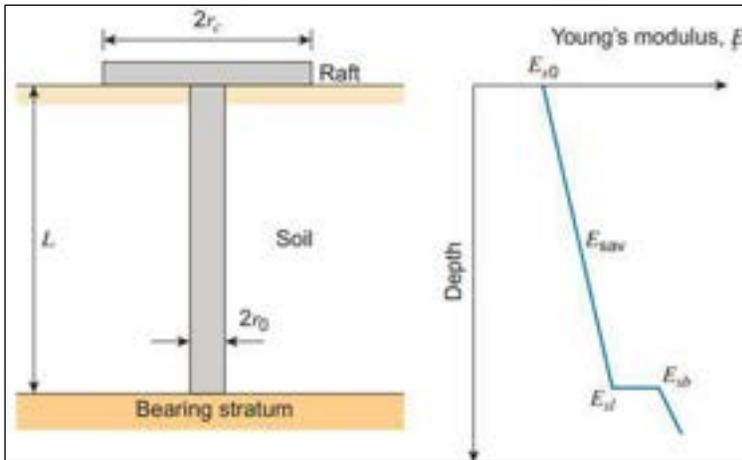


Figura 4. Modelo simplificado simple de un pilote-platea propuesto por Randolph (1994)

En esta figura las notaciones son como sigue:

r_c = radio del cabezal del pilote (basado en el área dividida por el número de pilotes)

r_0 = radio del pilote

L = Longitud del pilote

E_{s0} = Módulo de Young del suelo en el cabezal del pilote

E_{sl} = Módulo de Young del suelo en la punta del pilote

E_{sb} = Módulo de Young del estrato de apoyo debajo de la punta del pilote

E_{sav} = Módulo de Young promedio del suelo a lo largo del eje del pilote

El factor de interacción pilote-platea α_{rp} se puede determinar como

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right)}{\zeta} \quad (8)$$

Donde

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (9)$$

El radio de influencia del pilote r_m se define como

$$r_m = \{0.25 + \xi[2.5\rho(1 - \mu_s) - 0.25]\}L \quad (10)$$

Donde

$$\xi = \frac{E_{sl}}{E_{sb}} \quad (11)$$

ρ es el factor no homogéneo definido como

$$\rho = \frac{E_{sav}}{E_{sl}} \quad (12)$$

y μ_s es la relación de Poisson del suelo

Algunos valores típicos usados en los diseños de edificios altos sobre plateas piloteadas son como sigue:

Espesor de la platea	= 2-4 m
Espaciamiento de pilotes	= 2,5-8,0 x diámetro del pilote
Relación de esbeltez(longitud/diámetro)	= 10-100
Carga de pilote	= 2-15 MN
Carga total del edificio	= hasta 5 000 MN
Asentamiento máximo observado	= 50-150 mm

Cargado por piso

Edificios Residenciales	= 10 kN/m ²
Edificios de oficinas	= 12 kN/m ²
Edificios industriales	= 16 kN/m ²
Presión de contacto promedio sobre el suelo debajo de la platea	= 1-3 MN/m ²
Módulo de Young del concreto	= 30 GN/m ²
Módulo de reacción de la subrasante	= 10-100 kN/m ² /mm

El trabajo se inicia eligiendo con la búsqueda de las referencias bibliográficas publicadas en revistas científicas

(papers), libros, tesis de maestrías y doctorados en países como EEUU, Canadá, China, India, entre otros.

Después se eligió el tema investigación para su desarrollo consistente en cimentaciones con Plateas Pilotadas de uso actual en el análisis, diseño y construcción de edificios altos en sitios donde los suelos son de mala calidad; resultando antieconómico para uso de otros tipos de cimentaciones.

Resultados y discusión

Se presentan dos ejemplos de aplicación resueltos considerando el Método Simplificado debido a *POULOS-DAVIS-RANDOLPH (PDR)*.

Ejemplo 1. Se propone construir un edificio de 40 pisos con una superficie de 1 350 m² sobre una platea piloteada, con pilotes perforados de 1,0 m de diámetro colocados a 3,0 m de centro a centro. La carga media por piso es de unos 12 kN/m². Para el diseño preliminar, se puede suponer que los pilotes perforados se distribuyen uniformemente.

- a. ¿Cuántas pilas perforadas se necesitarán? ¿Cuál es la carga por pilote perforado? De manera conservadora, desprecie la contribución de la platea y suponga que toda la carga del edificio se transfiere a los pilotes.
- b. Suponiendo condiciones de suelo uniformes, con un módulo de Young y una relación de Poisson constantes de 0,25, estime el factor de interacción de la platea piloteada α_{rp} , suponiendo que los pilotes perforados tienen una longitud de 25 m.

Solución

La solución se llevará a cabo en dos partes

Parte A

$$\text{Peso de edificio} = 40 \times 1\,350 \text{ m}^2 \times 12 \text{ kN/m}^2 = 648 \text{ MN}$$

$$\text{Número de pilotes} = 1\,350 / (3 \times 3) = 150$$

$$\text{Carga por pilote} = 648 / 150 \quad \dots = 4,32 \text{ MN}$$

Parte B

En condiciones uniformes, $\xi = 1$ y $\rho = 1$. De la ec.(10)

$$r_m = \{0,25 + 1[2,5 \times 1(1 - 0,25) - 0,25]\} \times 25 = 46,9 \text{ m}$$

De la ec.(9),

$$\xi = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) = \ln\left(\frac{46,9}{0,5}\right) = 4,54$$

El radio del cabezal del pilote equivalente, r_c se puede determinar como

$$\pi x r_c^2 = \frac{1350}{150}; r_c = 1,69 \text{ m}$$

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right)}{\xi} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{1,69}{0,5}\right)}{4,54} = 0,73$$

Ejemplo 2. En una platea piloteada $K_p = 2500 \text{ MN/m}$, $K_r = 800 \text{ MN/m}$, y $\alpha_{rp} = 0,75$. Encuentre la proporción relativa de la carga transportada por la platea X y la rigidez de la platea piloteada K_{pr}

Solución

De la ec.(6),

$$\chi = \frac{K_r(1 - \alpha_{rp})}{K_p + K_r(1 - 2\alpha_{rp})} = \frac{800(1 - 0,75)}{2500 + 800(1 - 2 \times 0,75)} = 0,095$$

De la ec.(7)

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r(1 - 2\alpha_{rp})}{1 - \alpha_{rp}^2 \frac{K_r}{K_p}} = \frac{2500 + 800(1 - 2 \times 0,75)}{1 - 0,75^2 \frac{800}{2500}} = 2561 \text{ MN/m}$$

Ejemplo 3. En la Figura 5 se muestra el gráfico trilineal simplificado de carga vs asentamiento de una platea piloteada. Los pilotes están diseñados para ser utilizados a su máxima capacidad.

- ¿Cuáles son los valores de K_{pr} y K_r usados en este modelo simplificado?
- ¿Cuál es el asentamiento cuando los pilotes alcanzan su capacidad total?

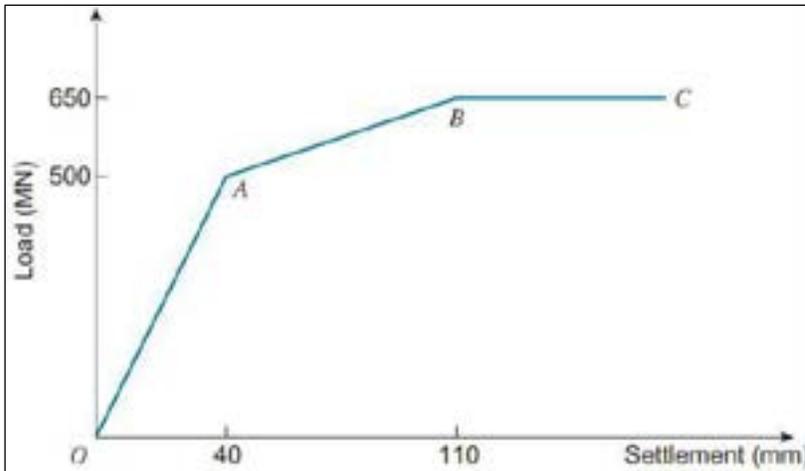


Figura 5. Gráfico del asentamiento de carga trilineal simplificado de la platea piloteada para el ejemplo 7.3

Solución

Parte A

K_{pr} y K_r son las pendientes de las líneas OA y AB, respectivamente. Están dadas por

$$K_{pr} = \frac{500}{40 \times 10^{-3}} = 12\,500 \text{ MN/m}$$

$$K_r = \frac{650 - 500}{(110 - 40) \times 10^{-3}} = 2\,143 \text{ MN/m}$$

Parte B

Los pilotes alcanzan su capacidad total en A cuando el asentamiento es de 40mm

Conclusiones

Las conclusiones extraídas de la investigación son las siguientes: en primer lugar, las cimentaciones combinadas con pilotes, conocidas como Piled Raft en inglés, emergen como una opción económica y segura en la ingeniería civil; en segundo término, el análisis para su diseño es intrincado y requiere el empleo de métodos numéricos avanzados como Elementos Finitos y Elementos de Borde; asimismo, estos análisis, que suelen ser tridimensionales, demandan el uso de computadoras de alta capacidad; finalmente, se destaca la utilidad del Método Simplificado como herramienta para evaluar la calidad de los resultados en los análisis numéricos, especialmente en aquellos de naturaleza tridimensional.

Referencias

- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2019). Principles of Foundation Engineering (9th ed., SI ed.).
- Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., & Elson, W. K. (2008). Piling Engineering (3rd ed.). Blackie.
- O'Brien, A. S., Burland, J. B., & Chapman, T. (2012). Rafts and Piled Rafts. In J. Burland, T. Chapman, H. Skinner, & M. Brown (Eds.), ICE Manual of Geotechnical Engineering (Chapter 56). Institution of Civil Engineers.
- Poulos, H. G. (2001). Pile Raft Foundations: Design and Applications. *Geotechnique*, 51(2), 95–113.
- Poulos, H. G. (2016). Tall building foundations: design methods and applications. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 1(10), DOI 10.1007/s41062-016-0010-2.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*. Wiley.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation Analysis and Design*. The University of Sydney.
- Yenginar, Y., & Olgun, M. (2019). *Designing Piled Raft Foundations Using Simplified Analysis Methods*. Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Selcuk University, Konya, TURKEY.