

Mejoramiento del Suelo para la Construcción de un Centro Comercial con cierto nivel de esfuerzos de tensión en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, utilizando pilas de grava compactada.

Soil Improvement for the Construction of a Shopping Center with a tensile force certain level in Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, using rammed aggregate piers

Miguel BIMBRERA¹ y Erika BERNAL¹

¹ Soilsolution SAPI de CV

INFORMACIÓN

Palabras clave:

- Mejoramiento de suelo
- Columnas de
- Tensiones

RESUMEN

El presente artículo describe el proceso de mejoramiento del suelo para la construcción de un centro comercial en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, mediante el uso de pilas de grava compactada. Según la información geotécnica, se identificaron condiciones de arena limosa de compacidad media hasta una profundidad de 6 metros, sin presencia de nivel freático. El método de pilas de grava compactada fue seleccionado para incrementar la capacidad de carga del suelo y reducir los asentamientos. El artículo detalla el procedimiento de instalación de las pilas, la integración de anclajes y varillas para la transferencia de tensiones, y los beneficios del sistema en términos de eficiencia y estabilidad estructural.

ABSTRACT

This article describes the process of soil improvement for the construction of a shopping center in Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, using Aggregate Piers. According to geotechnical information, conditions of medium-density silty sand were identified up to a depth of 6 meters, with no presence of the water table. The Aggregate Piers method was selected to increase the soil's load-bearing capacity and reduce settlements. The article details the installation procedure of the piers, the integration of anchors and rods for stress transfer, and the benefits of the system in terms of efficiency and structural stability.

1 Introducción

Los edificios están sujetos a cargas laterales aplicadas durante fenómenos sísmicos y otras acciones importantes como el viento. Las cargas aplicadas generan un momento de vuelco que debe ser contrarrestado por la resistencia a la compresión y a la tensión del sistema de cimentación seleccionado. Si la fuerza de tensión aplicada supera la fuerza estática gravitacional, el cimiento puede levantarse del suelo, lo cual puede resultar en una inestabilidad estructural generalizada.

El método de pilas de grava compactada ofrece una variante que consiste en diseñar elementos que puedan resistir cierto nivel de tensiones, aprovechando la robustez de un sistema de anclaje y la reversión periódica de las direcciones de carga, lo cual reduce al mínimo la posibilidad de fallos. Los

elementos de tensión Geopier están diseñados para resistir estas cargas de tensión debido a la resistencia de los anclajes y porque las direcciones de carga se invierten en periodos cortos de tiempo, minimizando así la posibilidad de levantamiento.

1.1 Alcances

El presente artículo aborda el proceso de mejoramiento del suelo para la construcción de un centro comercial en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, y pretende mostrar cómo los sistemas de mejoramiento pueden aportar valor al poder contrarrestar el efecto de las tensiones aplicadas en la estructura.

1.2 Condiciones geotécnicas del sitio

Las características del suelo de cimentación son cruciales para determinar el tipo de mejoramiento del suelo necesario para soportar la estructura del centro comercial. En este caso, la presencia de arena limosa de compacidad media sugiere la necesidad de un método de mejoramiento que incremente la capacidad de carga del suelo y reduzca la posibilidad de asentamientos fuera de lo permisible.

Según el estudio geotécnico realizado, las condiciones estratigráficas por debajo del Nivel de Terreno Natural (NTN) consisten en la presencia de arena limosa de compacidad media hasta una profundidad máxima de 6.00 metros. Durante la exploración, no se registró la presencia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF), lo cual es favorable para las condiciones de construcción propuestas. Sin embargo, en el diseño se tomo como escenario mas desfavorable que en época de lluvias este podía alcanzar los 2 m de profundidad.

1.3 Problemática del proyecto

El estudio de mecánica de suelos realizado en el sitio del proyecto determinó que la capacidad de carga del suelo originalmente era de 10 t/m^2 . Este valor era insuficiente para soportar las cargas previstas para la estructura del centro comercial. Además, se identificaron tensiones con un valor máximo de 100 toneladas. en algunos nodos de la estructura. Estas tensiones deben ser manejadas adecuadamente para garantizar la estabilidad y seguridad del centro comercial.

En zonas sísmicas, como en Tlajomulco de Zúñiga, las cargas de tensión suelen resolverse mediante el uso de lastres o cimentaciones profundas. Las pilas de grava compactada, son especialmente efectivas para mejorar la capacidad de carga del suelo, minimizar los asentamientos y en algunos casos contrarrestar las tensiones (como lo es el caso expuesto), proporcionando una solución robusta frente a las condiciones geotécnicas desafiantes.

2 PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE SUELO CON ELEMENTOS PAC

2.1 Pilas de grava compactada

La Pila o Columna de grava compactada puede definirse como un elemento semirrígido vertical conformado por capas de grava triturada sin finos de tamaño máximo de $1/2"$ a $1 \frac{1}{2}"$, que se introducen en el suelo por reemplazo o por desplazamiento lateral y que se apisonan hasta compactarlas con la finalidad de que alcancen una alta rigidez

2.2 Procedimiento constructivo

El procedimiento de construcción de las pilas de grava compactada por reemplazo, implica varios pasos importantes:

- *Perforación y Preparación:* Se realiza una perforación en el suelo hasta la profundidad de diseño, en este caso la longitud efectiva fue de 4.00 m por debajo del desplante de las zapatas.
- *Colocación del Agregado:* Se introduce el agregado en la perforación, compactándolo en capas para asegurar la densidad y rigidez necesarias.
- *Colocación del Anclaje:* Para resolver las tensiones estructurales previstas en algunos nodos, se emplea un anclaje que funciona como interfaz entre las zapatas y las pilas de grava compactada. Este anclaje consiste en una placa de acero que se introduce en la pila, esta placa está unida a dos varillas de acero estructural que se extienden a lo largo del elemento. Estas varillas sobresaldrán una vez que la PAC esté terminada, permitiendo su conexión con las zapatas de la estructura.
- *Conexión con la Estructura:* El tramo de varilla que sobresale se liga a la construcción de las zapatas, asegurando una transmisión eficiente de las tensiones hacia las pilas de grava compactada.

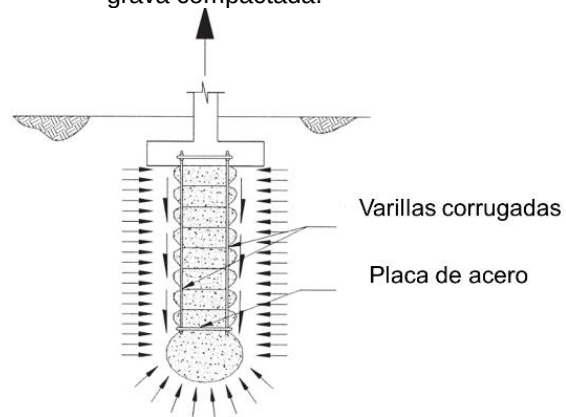


Figura 1. Esquema de un elemento PAC con anclaje para resistir la tensión.

2.3 Beneficios de la aplicación del sistema al proyecto.

El uso de las pilas de grava compactada en este proyecto presentó varios beneficios:

- *Incremento de la capacidad de carga:* La compactación del agregado y su integración con el suelo existente mejora significativamente la capacidad de carga del terreno en un valor del orden de 50 t/m^2 .

- *Eficiencia en la construcción:* La instalación de las pilas es rápida y puede realizarse con una brigada pequeña, lo que reduce los tiempos de construcción y los costos asociados.

3 DISEÑO A TENSIÓN DEL ELEMENTO PAC

3.1 Cálculo de la resistencia a la tensión

Cuando las pilas de grava compactada son sujetas a cargas extremas en tensión, se forma una superficie de falla cilíndrica alrededor de los elementos. La resistencia última a tensión (Q_{ult}) se calcula como la suma del peso de los elementos (W) y la resistencia en fricción. La resistencia última en fricción es calculada como el producto de la resistencia unitaria (f_s) y el área del cilindro de falla por cortante (A_s).

$$Q_{ult} = W + A_s f_s = W + f_s \pi d H_s \quad (1)$$

Donde: W es el peso del elemento, d = diámetro efectivo del elemento; y H_s = largo del fuste de la PAC. La resistencia admisible a la tensión se calcula utilizando un factor de seguridad de 2.0 que reduce la resistencia última.

El modo de falla de este tipo de elementos ha sido ampliamente estudiado, Kulhawy (1985) sugiere que a medida que se aplican fuerzas a tensión, se desarrollan esfuerzos cortantes a lo largo de planos inclinados que satisfacen el criterio de falla Mohr-Coulomb. Con la implementación de un movimiento adicional, se desarrollan superficies cortantes de desplazamiento vertical, resultando en un desplazamiento hacia arriba continuo.

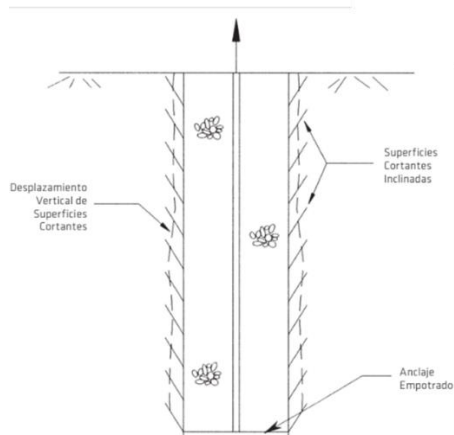


Figura 2. Esfuerzos Cortantes en Anclajes Empotrados (Kulhawy, 1985).

Este patrón se propaga cerca de la interfaz con el suelo, esencialmente definiendo el perímetro del anclaje a tensión. La superficie de falla se representa entonces por una superficie cilíndrica a profundidad, que hace una transición a una superficie cónica

proyectada a cierta distancia del perímetro del elemento. A pesar de que Kulhawy ha desarrollado soluciones para la superficie cónica de falla, las soluciones para un cilindro continuo proporcionan aproximadamente la misma resistencia a tensión.

3.2 Pilas de grava compactada en suelos granulares

Para elementos instalados en suelos granulares, la razón de drenaje es típicamente más rápida que el incremento neto a tensión durante ciclos acumulativos de carga. La resistencia de carga a tensión de elementos es, por tanto, calculada usando procedimientos de análisis geotécnicos drenados. La fricción unitaria (f_s) es calculada como la suma del intercepto en cohesión drenada (c) y el producto de la presión lateral en el suelo rodeando los elementos (σ_h') y la tangente del ángulo de fricción interna del suelo matriz ϕ'_m .

$$f_s = \sigma_h' \tan \phi'_m \quad (2)$$

La presión lateral post-mejoramiento en el suelo se limita a un valor de 12 t/m², para considerar la máxima energía aplicada por el martillo a los suelos de la periferia (Handy, 2001).

3.3 Pilas de grava compactada en suelos cohesivos

La razón de carga a tensión puede o no ser más rápida que la razón de drenaje cuando se instalan elementos Geopier en suelos cohesivos. Por tanto, la fricción unitaria (f_s) es calculada como la menor de la resistencia al cortante no-drenada s_u (Ec. 3) o del suelo matriz y la fricción unitaria drenada del suelo matriz (Ec. 4).

$$Q_{ult} = (c + \sigma_h' \tan \phi'_m) \pi d H_s + W \quad (3)$$

$$Q_{ult} = s_u \pi d H_s + W \quad (4)$$

3.4 Diseño de las varillas de anclaje y armado de las pilas de grava compactada

En el anclaje se usan varillas de acero con rosca de alta resistencia. La carga a tensión permisible de cada varilla (Q_{rod}) se calcula como el producto del esfuerzo permisible en tensión del acero (F_{all}) y el área de sección transversal (A_{rod}):

$$Q_{rod} = F_{all} A_{rod} \quad (5)$$

Donde: d_{rod} es el diámetro de la varilla a tensión.

Muchos códigos sugieren que el esfuerzo permisible a tensión no exceda el 60% del límite plástico del acero. El diseño de las varillas a tensión debe considerar la corrosión, pudiendo ser galvanizadas, cubiertas por epoxy, o diseñadas con

suficiente acero en exceso para considerar la pérdida por corrosión.

4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

4.1 Diseño del mejoramiento

La propuesta de mejoramiento consistió en la instalación de 134 pilas de grava compactada con 4.00 metros de longitud efectiva por debajo del desplante de las zapatas (0.70 m). Seis de estos elementos se aditaron con anclajes para resistir las tensiones. El diseño de los elementos a tensión se enfocó en determinar la resistencia a la fricción del elemento. Para ello, se contemplaron los siguientes datos.

Empotramiento de la zapata: 0.75 m

- Peso del suelo circundante al elemento: 1.76 t/m³
- Ángulo de fricción drenado: 25 grados
- Nivel de Aguas Freáticas (NAF): 2.00 m de profundidad. (Condición más desfavorable)
- Diámetro de la PAC: 0.60 m
- Longitud de la PAC: 4.00 m

Utilizando estos datos y las fórmulas mencionadas anteriormente, se determinó la resistencia última a fricción drenada (Ultimate Drained Frictional Resistance) de las pilas de grava compactada con un valor de 33.70 toneladas por lo que, al considerar un factor de seguridad de 2, la resistencia permisible es de 16.85 toneladas por elemento.

4.2 Diseño del anclaje para los elementos PAC a tensión

Como se mencionó en la sección 3.4 para el armado del anclaje se usan varillas de acero con rosca de alta resistencia para este proyecto se empleó el arreglo con dos varillas, por lo que cada una de ellas debe ser capaz de soportar 8.40 toneladas.

Para garantizar la integridad estructural, es fundamental revisar el acero a tensión y diseñar adecuadamente la placa a la cual estarán unidas las varillas. A continuación, se describen los pasos y consideraciones necesarios para este proceso.

Para las varillas, se debe verificar que su fluencia sea capaz de resistir una carga de 8.4 toneladas. Dado que estas varillas son de grado 60 (G60), primero se estima el área requerida por varilla utilizando la siguiente expresión:

$$Ft = 0.6F_y A_y \quad (6)$$

Despejando y sustituyendo los valores, se obtiene que el área requerida es de 6.45 cm². Además, de acuerdo con la recomendación de la FHWA-SA-96-072, que considera un período de vida útil de 75 años y factores de corrosión, recomienda

agregar 0.31 cm extra al diámetro de las varillas. Con esta consideración, el área requerida se incrementa a 4.13 cm².

Para cumplir con estos requisitos, se eligen varillas del número 8, las cuales proporcionan una capacidad de 21.4 toneladas, calculada como:

$$F_{ALL} = 60A_y = 21.4 \text{ t} \quad (7)$$

Empleando un factor de seguridad de 1.5, la resistencia efectiva es de 12.36 toneladas, lo que satisface el requerimiento calculado de 8.40 toneladas.

La placa a la que estarán unidas las varillas debe garantizar la resistencia al punzonamiento. La carga permisible de punzonamiento por conexión se calcula como:

$$F_{push} = F_{ALL} \pi d t = 47.12 \text{ kip} \quad (7)$$

d es el diámetro de la rondana con la que se fijara la varilla y tiene un diámetro de 3.81 cm, t el espesor de la placa que para este proyecto es de 2.54 cm, obtenemos que la carga permisible de punzonamiento para la conexión es de 43.3 toneladas, lo cual es significativamente mayor que la carga requerida de 8.40 toneladas.

Con estos cálculos y consideraciones, se garantiza que tanto las varillas como la placa de unión cumplen con los requisitos estructurales necesarios para la aplicación.

5 CONCLUSIONES

Las pilas de grava compactada son una solución efectiva para mejorar las condiciones del suelo en el sitio del proyecto del centro comercial en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

Este método permitió incrementar significativamente la capacidad de carga del suelo de 10 ton/m² a 45 t/m².

La integración de anclajes en las pilas de grava compactada fue esencial para manejar las tensiones detectadas en algunos puntos críticos de la estructura. Estos anclajes, diseñados para recibir eficientemente las descargas de las zapatas, asegurando la estabilidad y seguridad estructural necesarias.

La rápida instalación de las pilas con una brigada pequeña contribuyó a reducir los tiempos de construcción a tan sólo 3 días de construcción, mejorando la eficiencia general del proyecto.

En resumen, la implementación de las pilas de grava compactada no solo cumplió con los requisitos técnicos y geotécnicos del proyecto, sino que también proporcionó una solución confiable para enfrentar las condiciones desafiantes del suelo y las tensiones estructurales esperadas en el centro comercial de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

REFERENCIAS

- Caskey, J.M. (2001). "Uplift Capacity of Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcing Elements." MS thesis in preparation. University of Memphis.
- Ghaly, A., Hanna, A., y Hanna, M. (1991). "Uplift Behavior of Screw Anchors in Sand. I: Dry Sand." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 5, May 1991, pp. 773-93.
- Hansen, J.B. (1970). "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity," *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, No. 28, Copenhagen, 28 pp.
- Hsu, C. L. (2000). "Uplift Capacity of Geopier Foundations." MS thesis. University of Utah.
- Hughes, J.M.O. y Withers, N.J. (1974). "Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns," *Ground Engineering*, May, 42-49.
- Kulhawy, F.H. (1985). "Uplift behavior of shallow soil anchors — an overview." *Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil*, Special Publication. Clemence (editor), American Society of Civil Engineers, 1-25.
- Kulhawy, F.H., Kozera, D.W., y Withiam, J.L. (1979). "Uplift Testing of Model Drilled Shafts in Sand." *Journal of Geotechnical Engineering Division*. ASCE, Vol. 105, GT1, Jan 1979, pp. 31-47.
- Lawton, E.C. (2000). "Performance of Geopier Foundations During Simulated Seismic Tests at South Temple Bridge on Interstate 15, Salt Lake City, Utah." Final Report, No. UUCVEEN 00-03, University of Utah, Salt Lake City, Utah.
- Lawton, E.C. y Fox, N. S. (1994). "Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers." *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, A.T. Yeung y G.Y. Fello (Editors), American Society of Civil Engineers, 2, 962-74.
- Lawton, E.C., Fox, N. S., y Handy, R. L. (1994). "Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers." *In-situ Deep Soil Improvement*, K.M. Rollins (Editor), American Society of Civil Engineers, 121-132.
- Meyerhof, G.G. y Adams, J.I. (1968). "The Ultimate Uplift Capacity of Foundations." *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 5, No. 4, Nov 1968, pp. 225-244.
- Mitchell, J.K. (1981). "Soil Improvement: State-of-the-Art Report," Session 12, Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, June 15-19.
- NAVFAC. (1982). *Foundations and Earth Structures — Design Manual 7.2*. Department of the Navy. 7.2-205 — 207.
- Naval Facilities Design Command (NAVFAC). (1983). *Design Manual DM 7.2*.