

Optimización de una cimentación en suelo altamente compresible mediante Pilas de Agregado Compactado

Optimization of a traditional foundation using Rammed Aggregated Piers

Luis Ricardo SAUCEDO¹, Gilberto MONTIEL¹ y Adrián CERINO¹

¹ Soilsolution

RESUMEN

En el marco del desarrollo de un nuevo edificio habitacional, se detectó que el suelo de desplante presentaba una baja capacidad de carga y alta compresibilidad, lo que, en principio, limitaba las opciones de cimentación, haciendo que la cimentación profunda fuera la única alternativa convencional viable.

El diseño inicial contemplaba el uso de pilas de concreto armado, sin embargo, tras realizar un análisis técnico-económico, se decidió optar por un sistema de mejoramiento de suelos mediante Pilas de Agregado Compactado (PAC). Esta solución no solo permitió una reducción significativa en los costos y tiempos de ejecución, sino que también aseguró el desempeño geotécnico necesario para garantizar la estabilidad y funcionalidad de la estructura.

En este artículo, se presentan los criterios de diseño, el proceso constructivo, los tiempos de ejecución, las comparativas de volumetría y las ventajas que posicionan a las PAC como una alternativa eficaz y sostenible frente a las pilas de concreto tradicional.

ABSTRACT

In the context of the development of a new residential building, it was identified that the foundation soil had low bearing capacity and high compressibility conditions, which initially limited the foundation options, making deep foundation the only viable conventional alternative.

The initial design considered the use of reinforced concrete piles; however, after conducting a technical-economic analysis, it was decided to opt for a soil improvement system using Rammed Aggregate Piers (RAP). This solution not only allowed for a significant reduction in costs and execution time but also ensured the necessary geotechnical performance to guarantee the stability and functionality of the structure.

This article presents the design criteria, the construction process, execution times, volumetric comparisons, and the advantages that position RAP as an effective and sustainable alternative to traditional concrete piles.

INFORMACIÓN

Palabras clave:

- Suelos blandos, optimización, asentamientos, cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas, capacidad de carga

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del proyecto

El proyecto consiste en la construcción de un edificio de cuatro niveles, de uso habitacional, ubicado en una ciudad del sur del país. La estructura está diseñada para soportar cargas verticales significativas, con descargas máximas del orden de 500 toneladas por columna. El criterio de diseño considera un límite de asentamientos permisibles de 2.5 cm (1 pulgada), a fin de garantizar la funcionalidad y seguridad de la edificación. El área total del proyecto es de aproximadamente 2,150 m².

1.2 Descripción del problema

El proyecto se enfrenta a condiciones geotécnicas desfavorables, caracterizadas por la presencia de una capa de arcilla blanda de aproximadamente 10 m de espesor. Bajo este escenario, las cimentaciones superficiales convencionales resultan inviables, ya que no garantizan el cumplimiento de los criterios de capacidad de carga ni de los límites de asentamiento permisibles para la estructura.

Ante esta situación, la única solución convencional identificada fue el empleo de pilas de concreto armado

coladas in situ, capaces de transmitir las cargas de la edificación a estratos profundos más competentes.

Sin embargo, esta alternativa presenta dos inconvenientes principales:

- Alto costo de construcción, debido al volumen de concreto y acero requerido.
- Tiempo de ejecución prolongado, asociado a la maquinaria especializada, al proceso de perforación y colado, así como a la logística de obra.

Tomando en cuenta estos inconvenientes, se hace necesario analizar alternativas de cimentación que aseguren la capacidad de carga y el control de asentamientos, y que al mismo tiempo permitan optimizar los costos y reducir los plazos de construcción.

2 INFORME GEOTÉCNICO

2.1 Exploración realizada

El informe geotécnico del sitio incluyó la ejecución de dos sondeos de penetración estándar (SPT), a partir de los cuales se obtuvieron muestras inalteradas. Estas fueron empleadas para la determinación de propiedades índice del suelo, así como para la evaluación de sus parámetros de compresibilidad.

2.2 Condiciones estratigráficas

Las condiciones estratigráficas por debajo del Nivel de Terreno Natural (N.T.N.) se componen de manera general de arcilla de consistencia blanda hasta los 10.0 m de profundidad, seguida de arcilla de consistencia muy firme hasta los 15.0 m de profundidad. Debajo de esto, se localizó arena arcillosa compacta hasta la máxima profundidad de exploración, que fue de 23.0 m.

A partir de la información obtenida en los sondeos y ensayos de laboratorio, se elaboró un modelo geotécnico del sitio, en el cual se resumen las principales propiedades del suelo. En la Tabla 1 se presentan los estratos identificados, sus espesores, la clasificación SUCS y los valores de resistencia a la penetración estándar (N-SPT), así relaciones de compresión y recompresión, y módulo elástico del suelo, lo cual se obtuvo de pruebas de laboratorio y correlaciones con base en el contenido de agua.

Tabla 1. Modelo geotécnico del sitio

UG	Espesor m	SUCS	N- SPT	Cec	Cer	OCP kPa	E kPa
1	10.0	CH	5	0.160	0.020	83.9	3,352
2	5.0	CL	22	0.133	0.017	490.4	14,747
3	8.0	SC	35	---	---	795.4	33,784

2.3 Solución convencional

La solución convencional considerada para el proyecto consistía en la ejecución de un sistema de cimentación profunda mediante cincuenta y dos pilas de concreto armado colado in situ, de las cuales treinta y cuatro tenían un diámetro de 1.0 m y una longitud de 17 m, y dieciocho un diámetro de 0.6 m y la misma longitud de 17 m. En conjunto, esta alternativa representaba un volumen total aproximado de 540 m³ de concreto a colocar in situ.

Con las pilas de concreto se cumplía el criterio de asentamiento permisible y capacidad de carga, al transferir las descargas a un estrato profundo resistente.

Debido a lo prolongado del proceso constructivo de las pilas de concreto, el cual incluye la perforación, estabilización con lodos, colocación de jaulas de refuerzo y colado con tremie, el tiempo estimado de construcción de esta solución se encontraba en un rango de 20 a 25 días hábiles, sin considerar posibles retrasos asociados a las condiciones climáticas de la región.

Para la ejecución de las pilas se requería como maquinaria básica un equipo de perforación rotaria, una grúa para el izado de jaulas, una planta de lodos (tanques de mezcla y almacenamiento, bombas y desarenador), bomba de concreto y tubería tremie.

En cuanto al personal, como mínimo se requeriría una cuadrilla de entre 12 y 15 personas para garantizar la continuidad de las actividades de perforación, armado y colado. Entre los puestos necesarios se contarían, por ejemplo, un operador del equipo de perforación y un operador de grúa, además de ayudantes, cuadrilla de acero, personal de colado, técnico de lodos, residente de obra, etc.

2.4 Opción de cimentación superficial

Desde las etapas iniciales del proyecto, la opción de utilizar una cimentación superficial fue descartada. Los análisis indicaban que los asentamientos esperados serían excesivos, del orden de 50 cm, lo cual comprometía la funcionalidad de la estructura. Además, para transmitir las cargas al terreno dentro de límites de presión admisibles y evitar fallas por capacidad de carga, hubiera sido necesario recurrir a zapatas de dimensiones considerables o incluso a una losa de cimentación, soluciones poco viables desde el punto de vista técnico y económico.

3 PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

Las Pilas de Agregado Compactado (PAC) se construyen introduciendo en el terreno capas sucesivas de grava triturada, las cuales se compactan mediante impactos de alta energía vertical, alta frecuencia y baja amplitud. Este proceso no solo densifica la grava, sino que también induce un

aumento de las presiones laterales en la matriz del suelo adyacente, generando un incremento radial del esfuerzo horizontal y, en consecuencia, una modificación del coeficiente de empuje pasivo de la masa de suelo.

3.1 Reducción de asentamientos

Las Pilas de Agregado Compactado se diseñan para controlar los asentamientos de las cimentaciones superficiales con base en el criterio de asentamiento permisible.

El comportamiento del suelo mejorado se evalúa diferenciando la zona superior reforzada con PAC y la zona inferior ubicada bajo el fondo de dichos elementos.

En la zona superior, el comportamiento se representa mediante la analogía de resortes, en la cual las Pilas de Agregado Compactado actúan como resortes rígidos y el suelo matriz como resortes blandos. De esta manera, los elementos atraen una mayor proporción de los esfuerzos transmitidos por la cimentación.

El cálculo del asentamiento puede realizarse empleando tanto la analogía de resortes, a partir de la rigidez de los elementos, como el método del módulo elástico compuesto, que considera el área de reemplazo entre las PAC y el suelo matriz, Ecuación 1.

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m (1 - R_a) \quad (1)$$

donde: E_{comp} = módulo elástico compuesto; E_g = módulo elástico de la PAC; R_a = área de reemplazo; E_m = módulo elástico del suelo matriz.

En la zona inferior, los asentamientos se determinan con métodos geotécnicos convencionales, considerando la profundidad de influencia de los esfuerzos bajo la cimentación. En suelos granulares, se utilizan métodos de asentamiento elástico, mientras que en suelos cohesivos se recurre a la teoría de consolidación o a modelos de elasticidad.

El asentamiento total se obtiene como la suma del asentamiento de la zona superior y el de la zona inferior, proporcionando una estimación integral del desempeño de la cimentación apoyada en Pilas de Agregado Compactado.

3.2 Proceso de instalación

El procedimiento constructivo se detalla a continuación:

- Se realiza una pre-barrenación para facilitar el ingreso del mandril.
- El mandril se introducirá en el suelo hasta la profundidad de diseño con fuerza de empuje

impuesta por el mástil y la energía de vibración por el vibro-hincador.

- Se depositará agregado pétreo con bajo contenido de finos de tamaño nominal de entre $\frac{1}{2}$ " y $1 \frac{1}{2}$ " (12.7 a 38.1 mm) se depositará a través de la tolva y el mandril hasta la cámara de compactación.
- El equipo se elevará de 0.6 a 1.5 m a un ritmo constante.
- El equipo se hincará nuevamente con un empuje vertical y una alta energía de impacto proporcionada por el mástil y el martillo vibro-hincador, produciendo una capa de agregado compactado.
- Los procedimientos mencionados anteriormente se repetirán hasta llegar a la superficie, dando como resultado un elemento (diámetro construido de 0.6 m) de alta densidad, y en el proceso, se densificará al suelo circundante por el desplazamiento lateral que produce la grava durante su compactación, Figura 1.

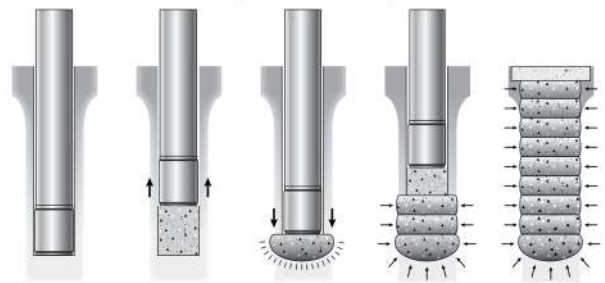


Figura 1. Método constructivo de Pilas de Agregado Compactado

4 SOLUCIÓN UTILIZANDO PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

Como alternativa a las pilas de concreto, se implementó una solución de mejoramiento de suelo mediante Pilas de Agregado Compactado. Gracias a esta intervención, fue posible emplear zapatas aisladas como sistema de cimentación, ya que las Pilas de Agregado Compactado proporcionan soporte y controlan asentamientos a límites permisibles.

El diseño consideró la construcción de 279 pilas, cada una con una longitud de 10 m, alcanzando un total de 2,790 metros lineales de mejoramiento.

Es importante destacar que las Pilas de Agregado Compactado fueron instaladas únicamente en la huella de las zapatas aisladas, las cuales transmiten las cargas estructurales hacia el terreno mejorado.

De esta manera, las Pilas de Agregado Compactado no actúan como elementos de cimentación profunda independientes, sino como un sistema de refuerzo del suelo, que incrementa su capacidad de carga y reduce la deformabilidad, permitiendo cumplir con los criterios de asentamientos permisibles para el proyecto.

4.1 Optimización de cimentación superficial

El mejoramiento de suelos mediante Pilas de Agregado Compactado permitió incrementar la capacidad de carga admisible del suelo hasta valores del orden de 240 kPa en la zona mejorada. Gracias a este aumento en la resistencia del suelo, fue posible diseñar una cimentación superficial con dimensiones más reducidas respecto a las que hubieran sido necesarias sin el mejoramiento.

La solución adoptada se materializó en un sistema de zapatas aisladas, optimizadas para trabajar sobre el suelo reforzado. Como resultado de esta optimización, el volumen total de concreto requerido para las zapatas fue de aproximadamente 120 m³, lo que representa una solución más eficiente en términos de materiales, costos y tiempos de construcción.

4.2 Análisis de asentamientos

Se realizó un análisis tridimensional utilizando el software Settle 3D, con el fin de considerar la superposición de esfuerzos entre las zapatas y verificar que las deformaciones verticales máximas se encontraban dentro de los criterios permisibles. En el análisis se estiman los asentamientos elásticos y los asentamientos debidos a consolidación (llevados a los 10 años, donde se obtuvo un grado de consolidación mayor a 90%), por lo que se obtuvieron asentamientos totales. Los resultados fueron satisfactorios y se presentan en la Figura 2.

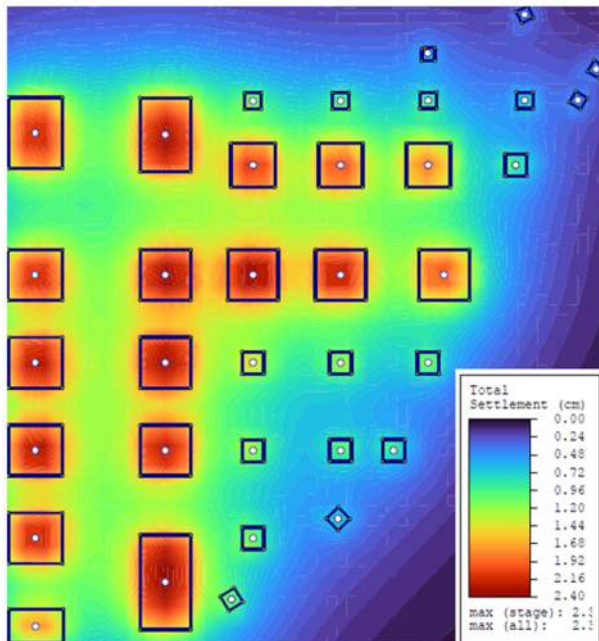


Figura 2. Asentamientos totales bajo las zapatas de la edificación menores a 2.5 cm (1 pulgada)

4.3 Tiempos y costos del mejoramiento de suelos

La solución con Pilas de Agregado Compactado presentó una clara ventaja en términos de economía y rapidez de ejecución. El costo unitario fue de \$1,950 por metro lineal, lo que representó un total de \$5,440,500 para la obra completa, incluyendo la grava.

En cuanto a la programación, con una cuadrilla de trabajo en turno sencillo y un rendimiento de 430 metros lineales por jornada, la ejecución del mejoramiento se realizó en únicamente 7 días hábiles. A este plazo se sumaron 5 días destinados al desplazamiento de maquinaria y personal, de manera que el proyecto completo se concluyó en un total de 12 días hábiles, lo que constituyó una alternativa sumamente competitiva frente a otras soluciones de cimentación profunda.

4.4 Limitaciones del estudio

El análisis tridimensional de asentamientos se desarrolló con un modelo elástico equivalente que permitió estimar la respuesta global del suelo mejorado. Futuras evaluaciones podrían incorporar la interacción completa suelo-estructura y el comportamiento no lineal del terreno reforzado, lo cual ofrecería una visión más detallada de la redistribución de esfuerzos y de la respuesta conjunta del sistema de cimentación.

Los parámetros geotécnicos utilizados se obtuvieron a partir de correlaciones empíricas y ensayos convencionales, suficientes para el nivel de detalle del proyecto. Sin embargo, la realización de pruebas triaxiales o edométricas sobre suelo mejorado permitiría afinar la calibración del modelo y enriquecer la caracterización de la rigidez del terreno.

Finalmente, aunque los resultados se validaron con criterios teóricos y experiencias previas, no se contó con instrumentación de campo para el seguimiento del comportamiento del suelo reforzado. La incorporación de monitoreo en proyectos futuros contribuiría a contrastar los resultados analíticos con mediciones reales, fortaleciendo la base experimental del sistema.

5 COMPARATIVA DE SOLUCIONES

5.1 Tiempos, costos y materiales

La solución con Pilas de Agregado Compactado representó una alternativa mucho más eficiente en términos de costo y tiempo frente a la cimentación con pilas de concreto. El costo total del mejoramiento con PAC fue de aproximadamente \$5.4 millones de pesos, mientras que la solución convencional con pilas de concreto alcanzaba los \$9.6 millones de pesos, es decir, casi el doble de inversión. En la Tabla 2 se

pueden apreciar los números generadores utilizados para calcular el costo de la solución convencional. Es importante mencionar que el costo relacionado a las PAC no incluye la ejecución de las zapatas.

Tabla 2. Números generadores de solución convencional

Concepto	Cantidad	Unidad	PU
Concreto	540.0	m ³	\$ 2,500.00
Acero de refuerzo	57,725.0	kg	\$ 30.00
Ejecución	884.0	ml	\$ 7,360.00

En cuanto al consumo de concreto, las PAC no requieren concreto en los elementos de mejoramiento, aunque sí trabajan en conjunto con las zapatas de cimentación, cuyo volumen se estimó en alrededor de 120 m³. Por el contrario, las pilas de concreto demandaban un volumen de 540 m³, lo que representó un ahorro de aproximadamente 78% en concreto al emplear la solución con PAC. Este aspecto reduce también los costos indirectos asociados a suministro, bombeo y control de calidad del material.

El tiempo de ejecución fue otro factor decisivo. El mejoramiento con PAC se ejecutó en un plazo total de 12 días hábiles (incluyendo movilización y obra), mientras que la construcción de las pilas de concreto habría requerido entre 20 y 25 días hábiles, con mayor exposición a retrasos por clima y logística.

Respecto a la logística de obra, las PAC se instalaron con maquinaria más ligera y específica para compactación de agregado y una cuadrilla reducida de 6 a 8 personas. En contraste, las pilas de concreto exigían un tren de obra más complejo, compuesto por equipo de perforación rotaria, grúa, planta de lodos, bomba y tubería tremie, además de un equipo humano mínimo de 12 a 15 personas, incluyendo operadores, cuadrillas de acero y colado, técnicos de lodos y personal de control de calidad.

6 CONCLUSIONES

La comparación entre las pilas de concreto y las Pilas de Agregado Compactado (PAC) evidenció que, si bien ambas cumplen con los criterios técnicos de diseño, las PAC resultaron más convenientes para este proyecto. La solución convencional requería alrededor de 540 m³ de concreto y un plazo de 25 a 30 días, mientras que las PAC redujeron el volumen a 120 m³ y el tiempo total a solo 12 días hábiles, logrando un ahorro de 44% en costo, 78% en concreto y hasta 60% en tiempo de ejecución.

La disminución en el consumo de concreto no solo redujo los costos de obra, sino que también representó un beneficio ambiental al disminuir la huella de carbono asociada a la producción y transporte de este material. Con maquinaria más ligera, cuadrillas más compactas y un proceso

constructivo más sencillo, las PAC se consolidaron como la alternativa más eficiente, económica y sustentable frente a las pilas de concreto para este proyecto.

REFERENCIAS

- Barron, R.A. (1948). "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells." Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 718-742.
- CMIC (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción). "Tarifas de renta de maquinaria y catálogo de costos". Disponible en cmic.org.mx/cmic/index.htm
- GEOPIER Foundation Company (2016). "Technical Bulletin No. 6 – Settlement Control for Embankments and Transportation Related Structures Using GEOPIER® Soil Reinforcement."
- GEOPIER Foundation Company (2016). "Technical Bulletin No. 13.1.1 – Construction Materials-General-Aggregates for Piers Construction."
- Greenpeace México. (2025). "Calcula tu huella de carbono". Recuperado el 7 de octubre de 2025, de <https://consumoresponsable.greenpeace.org.mx/calcula-tu-huella-de-carbono>
- Lawton, E.C., Fox, N. S., and Handy, R. L. (1994). "Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers." In-situ Deep Soil Improvement, Geotechnical Special Publication No. 45, American Society of Civil Engineers, 121-132.
- Roberto L. Peurifoy y Garold D. Oberlender. (2013). "Estimating Construction Costs", McGraw-Hill Companies, 6th edition.