

Comparación técnica y económica de alternativas de sistemas de fundaciones para la estación central del tren metropolitano

Boris Camacho P.¹, Karen Vargas C., Marco Camacho P.

¹Laboratorio de Resistencia de Materiales y Estructuras, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

¹christianboriscamacho.p@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

El tren metropolitano de Cochabamba consiste en la construcción de tres nuevas líneas ferroviarias que confluyen en una nueva estación central que se ubica entre la Av. 6 de agosto y Av. Barrientos en los terrenos de la antigua estación central. Se proyecta una estructura con más de 5.000 metros cuadrados construidos que contemple: acceso a las tres líneas, escaleras metálicas, zona de locales comerciales, plaza de comidas, zona de gestión de operaciones del tren, zonas auxiliares, etc.

Se conoce que el terreno presenta un nivel freático entre los 8 y 11 m. de profundidad y está compuesto en su mayoría de bancos de arcilla intercalado con estratos delgados de limos, arenas y en algún caso grava.

Por la magnitud del proyecto y las condiciones del suelo, el proyecto original presentó un sistema de fundación que contiene 550 micropilotes autoperforantes inyectados que cumplen con la norma alemana DIN 4128 - pilotes inyectados de pequeño diámetro. El presente artículo es un análisis comparativo técnico y económico entre tres sistemas de fundaciones profundas para la estación central del tren metropolitano, estos sistemas son: el sistema de micropilotes autoperforantes inyectados ya construidos en predios de dicha estructura, y los sistemas alternativos de fundaciones profundas de pilotes hincados y pilotes perforados vaciados en sitio. Concluyendo que el costo estimado de pilotes hincados y perforados vaciados en sitio sería menor en un 16,77% y un 33,07%, respectivamente, sin embargo, estas alternativas tomarían entre un 23,91 a 28,26 % más de tiempo.

Palabras clave: Estación central tren metropolitano, Micropilotes autoperforantes inyectados, Pilotes hincados, Pilotes perforados vaciados en sitio.

1. Introducción

El uso de pilotes es una de las técnicas más antiguas del hombre para superar las dificultades de la fundación de estructuras en suelos blandos. En sus inicios, los pilotes eran todos de madera por su abundancia y su fácil maniobrabilidad, así que para dar seguridad a una estructura se hincaban pilotes en forma abundante, sin ninguna norma y a criterio del constructor. De esta manera, la capacidad de carga del pilote estaba limitada por el grosor de la madera y su capacidad de soportar el peso del martillo sin astillarse (Alva, 1993).

En la actualidad las fundaciones de pilotes tienen el mismo propósito: hacer posible las construcciones de casas y mantener industrias y comercios en lugares donde las condiciones del suelo no son favorables (Tschebotarioff, 1963).

En Cochabamba la construcción de fundaciones profundas se ha convertido en una solución a problemas en suelos arcillosos, es así que, distintas metodologías

han sido aplicadas en diferentes proyectos de gran envergadura. Tal es el caso del edificio de la Estación Central del Tren Metropolitano de Cochabamba, donde la Asociación Accidental Tunari determinó construir el sistema de fundaciones con 560 micropilotes autoperforantes inyectados.

Basados en la experiencia tradicional boliviana, el presente artículo compara técnica y económicamente el diseño de dos alternativas de sistemas de fundaciones profundas (i.e. pilotes hincados y pilotes perforados vaciados en sitio) con el usado en el edificio de la Estación Central del Tren Metropolitano (i.e. micropilotes autoperforantes inyectados).

2. Fundaciones

2.1. Definición

Se denomina fundación al conjunto de elementos estructurales de una edificación cuya misión es

transmitir sus cargas o elementos apoyados en ella al suelo, distribuyéndolas de forma que no superen su presión admisible ni produzcan cargas zonales. Debido a que la resistencia del suelo es, generalmente, menor que la de los pilares que soporta, el área de contacto

entre el suelo y la fundación debe ser proporcionalmente más grande que los elementos soportados.

La clasificación del tipo de fundación se muestra en la Figura 1.

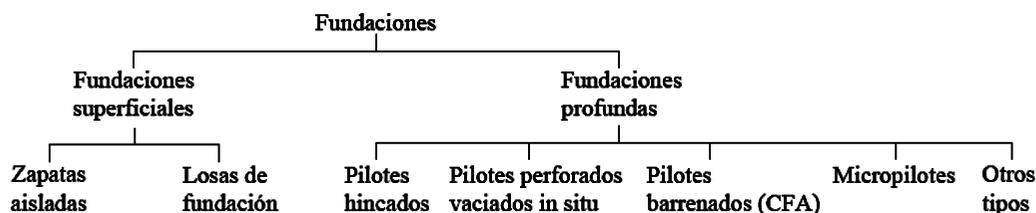


Figura 1. Clasificación de fundaciones (Coduto et al., 2016).

Una fundación profunda o pilote es un elemento de fundación en el que predomina la longitud sobre cualquier otra dimensión, cuya función es transmitir las cargas de la superestructura y peso propio a través de suelos estructuralmente inestables, como arcillas expansivas o suelos colapsables hasta suelos más profundos o a estratos de rocas que posean la resistencia requerida, esta transferencia de carga al terreno se lo realiza por rozamiento del fuste con el terreno, apoyando la base en capas con mayor resistencia (Placencia, 2014).

2.2. Tipos de fundaciones profundas

2.2.1. Pilotes hincados

Consisten en unidades prefabricadas, usualmente de madera, concreto o acero, hincados hacia el suelo mediante martillos a vapor, neumáticos, diesel, o vibratorios. Los pilotes se instalan normalmente en grupos utilizando un martillo de hinca de impacto. Múltiples tipos de pilotes con varias propiedades de sección están disponibles para resistir casi cualquier demanda de carga. Las longitudes para algunos tipos de pilote pueden ser fácilmente ajustadas y empalmadas en el campo para adaptarse a las variaciones de las condiciones del subsuelo (Hannigan et al., 2016).

Ventajas

- El material del pilote puede ser inspeccionado antes de introducirlo en el suelo.
- No se daña con el levantamiento del terreno ocasionado por el hincado de pilotes adyacentes.
- El procedimiento de construcción no se ve afectado por el agua subterránea.
- Pueden ser llevados fácilmente por encima del

nivel del terreno, especialmente en estructuras marítimas.

- Pueden ser hincados en longitudes muy largas.

Desventajas

- La longitud del pilote no puede variar puesto que se construye antes de hincarlo.
- Se pueden romper durante el hincado, o peor aún pueden sufrir daños mayores no visibles en condiciones difíciles de hincado.
- El ruido y la vibración durante el hincado pueden causar molestias o daños.
- El desplazamiento de suelo durante el hincado de pilotes en grupo puede dañar estructuras adyacentes o causar levantamiento de pilotes adyacentes al levantar el suelo.
- No pueden ser hincados en diámetros muy grandes (usualmente entre 30 a 60 cm).
- Se requiere de maquinaria pesada y por ende un lugar de trabajo debe ser espacioso.

2.2.2. Pilotes perforados vaciados en sitio

Los pilotes perforados se utilizan con frecuencia para proyectos de transporte con grandes cargas axiales, compresión o demanda de carga lateral. Se instalan de forma mecánica o percusión perforando un agujero a la profundidad requerida y rellenando el agujero con hormigón. Algunas veces, se forma mecánicamente una base o campana agrandada para aumentar el dedo del pie y el área de rodamiento.

La lechada de perforación y/o las cubiertas temporales se pueden utilizar cuando los lados del agujero son inestables. El acero de refuerzo se instala como una

jaula que se inserta antes de colocación del hormigón (Brown *et al.*, 2018).

Ventajas

- La longitud puede ser variada fácilmente para adaptarse a las diversas condiciones del suelo.
- El suelo removido durante la perforación puede ser inspeccionado, de ser necesario, se puede muestrear o realizar pruebas in situ.
- Se pueden instalar en diámetros muy grandes (mayores a 60 cm).
- Se pueden instalar en grandes longitudes.
- Se pueden colocar sin ruido, ni vibraciones apreciables.
- Se pueden instalar en condiciones de poca altura libre.
- No existe el riesgo de levantamiento del suelo.

Desventajas

- En algunos casos se deberán emplear lodos bentónicos para estabilizar el suelo. Es un procedimiento que requiere de mucho espacio.
- Se requiere elevado control de calidad del hormigón, antes, durante y después del hormigonado.
- El agua bajo presión artesiana puede empujar el cuerpo del pilote lavando el cemento.
- No se pueden extender fácilmente sobre el nivel del suelo, especialmente en estructuras de ríos y mares.
- Los métodos de perforación pueden remover suelos arenosos o gravosos.

2.2.3. Micropilotes

Los micropilotes se utilizan a menudo para proyectos de transporte en zonas cársticas, así como para apuntalamiento, retroadaptación sísmica y proyectos con condiciones de perforación difíciles. Los micropilotes son elementos de fundación de pequeño diámetro (menor a 30 cm), reforzados, perforados y grouteados. Existen muchas herramientas y métodos de instalación diferentes para construir micropilotes. A menudo se instalan rotando una carcasa con un borde de corte en el geomaterial o por métodos de percusión. Los esquejes se eliminan con un fluido de perforación en circulación. Luego se inserta el acero de refuerzo y se bombea una lechada de cemento y arena a través de un tremie. También se utilizan técnicas de inyección presurizadas de dos etapas. La carcasa puede retirarse parcial o totalmente (Hannigan *et al.*, 2016).

Ventajas

- Los equipos son de tamaño reducido y pueden trabajar incluso dentro de un sótano.
- Dada su esbeltez trabaja casi exclusivamente por fuste por lo que no es preciso que la punta se apoye en un estrato más compacto.
- Se pueden instalar en diámetros pequeños (menores de 30 cm).
- Se pueden colocar sin ruido, ni vibraciones apreciables.
- No existe el riesgo de levantamiento del suelo.

Desventajas

- Requiere control de calidad de la lechada.
- El método de perforación no permite la extracción de muestras puesto que se utiliza rotoperCUSión.
- El agua bajo presión artesiana puede empujar el cuerpo del pilote lavando la lechada.
- La norma recomienda realizar ensayos de carga de prueba para el control de calidad.

2.3. Sistemas de fundaciones profundas

La función básica de un sistema de fundaciones consiste en transmitir las cargas de la superestructura al suelo que le sirve de apoyo. Estas cargas o reacciones llegan a las fundaciones a través de las columnas, a su vez estas están conectadas a los cabezales que son unas estructuras intermedias y tienen como tarea distribuir la carga de la columna a los pilotes.

Un cabezal es un elemento estructural de fundación que permite recoger los esfuerzos de las columnas de una estructura y transmitirlos a las cabezas de un grupo de pilotes, consiguiendo que las cargas sean transmitidas adecuadamente al terreno. El material más utilizado para la construcción de cabezales es el hormigón armado. En general, la forma de un cabezal depende del número y disposición de los pilotes que recoge.

En el diseño de cabezales se recomienda que el espaciamiento para pilotes fundados en arena suelta o grava de arena suelta se incremente en un 10 por ciento por cada pilote interior hasta un máximo del 40 por ciento. En ese sentido, el espaciamiento entre pilotes óptimo “s” parece ser del orden de 2,5 a 3,5 veces el diámetro del pilote, los espaciamientos entre pilotes más grandes suelen ser más eficientes. Las normas de construcción no indican las distancias máximas entre los pilotes, pero en ocasiones se han utilizado distancias de hasta 8 a 10 veces el diámetro (Bowles, 1995).

3. Estación Central Tren Metropolitano

3.1. Ubicación

El edificio de la Estación Central se encuentra ubicado en predios de la antigua estación de trenes de la zona de San Antonio en la ciudad de Cochabamba, entre la Av. 6 de Agosto y Av. Barrientos.

3.2. Emplazamiento del proyecto

El edificio de la estación central tiene un área en planta baja de 4.820 m² (Vargas, 2020). La estructura del edificio se encuentra definida por pórticos, columnas y vigas de hormigón armado, y losas de hormigón aligerado con viguetas en dos direcciones. Las vigas de atado se conectan entre sí con los cabezales de fundación. La estructura ha sido dividida en tres bloques separados por juntas constructivas según se detalla en la Figura 2.

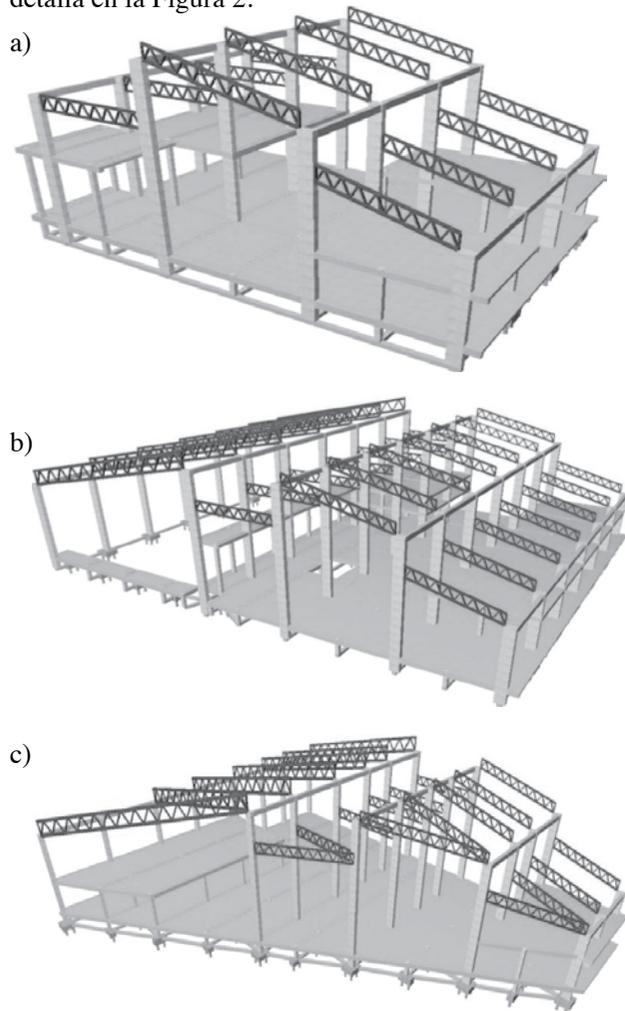


Figura 2. Esquema estructural (a) bloque 1; (b) bloque 2 y (c) bloque 3.

3.3. Caracterización estructural

La estructura es un sistema de pórtico compuesto por techos, vigas y losas soportados por 146 columnas. En la Tabla 1 se presenta el resumen de las máximas cargas de diseño de las columnas de la estructura clasificada por rangos de carga. Se hace notar que el 70% de las columnas presenta una máxima carga de diseño menor a 1.000 kN mientras el restante 30% presenta cargas entre 1.000 a 2.000 kN.

Tabla 1

Distribución de cargas de diseño (Vargas, 2020)

Carga de diseño, kN	Cantidad de columnas	Porcentaje, %
0-500	47	32,2
500-1.000	52	35,7
1.000-1.500	36	24,7
1.500-2.000	11	7,4
Total	146	100,0

3.4. Caracterización geotécnica

Acorde a los 3 sondeos de SPT realizados para el proyecto disponible hasta una profundidad de 21 m, en la Figura 6 se presenta el número de golpes SPT con respecto a la profundidad.

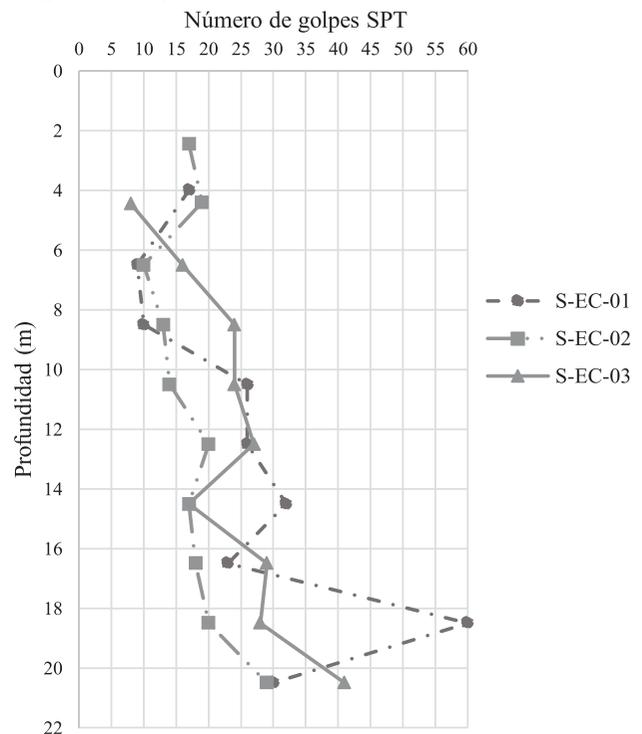


Figura 3. Gráfica de número de golpes SPT vs profundidad (Vargas, 2020)

Los resultados de los laboratorios muestran que los suelos que predominan en la Estación Central son las arcillas magras arenosas (CL), intercalado con suelo limo arenoso (ML) y en pequeños porcentajes gravas arcillosas (GC) y arcilla arenosa limosa (ML-CL).

Para comprender la disposición de los distintos estratos identificados en el sondeo se presenta el perfil litológico en la Figura 4. Este perfil también muestra el resultado del ensayo SPT en campo (en los extremos) y el nivel freático determinado durante el sondeo.

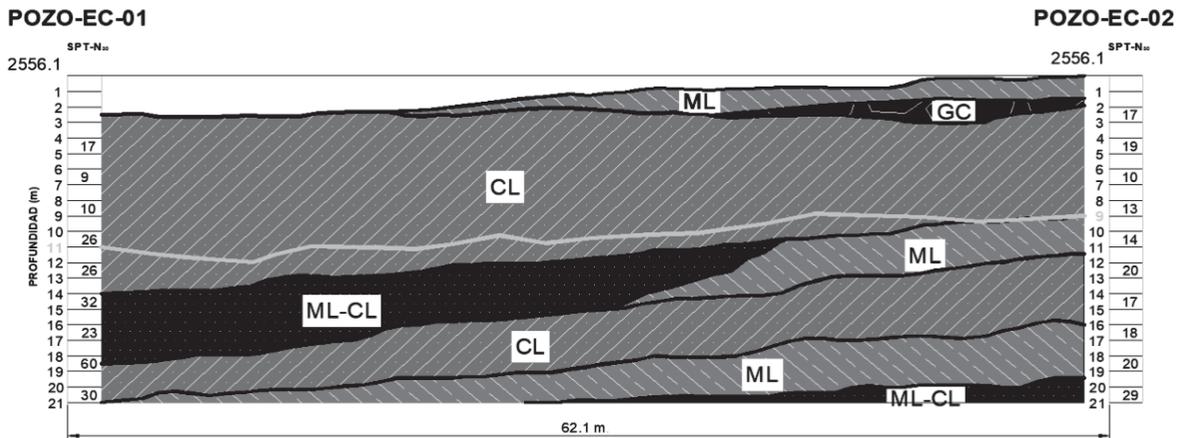


Figura 4. Perfil geotécnico del proyecto (Vargas, 2020)

3.5. Cálculo de la cantidad de fundaciones profundas

Para el presente proyecto se estudió dos alternativas de fundaciones profundas adicionales al proyecto original. En la Figura 5 se esquematiza las alternativas planteadas.

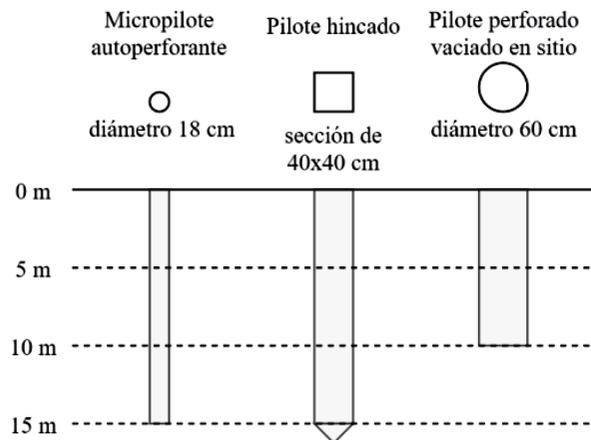


Figura 5. Esquemas de alternativas de diseño (Vargas, 2020).

3.5.1. Micropilotes autoporforantes inyectados

En el proyecto se optó por utilizar micropilotes contruidos con barras de tipo TITAN de 40/16 de 18 cm de diámetro y 15 metros de profundidad. Según el

diseño, la capacidad de micropilotes autoporforantes inyectados 40/16 tienen una carga admisible de 470 kN. De acuerdo a las solicitaciones de la estructura, se ha distribuido los micropilotes en cabezales de 2 a 7 micropilotes, haciendo un total de 550 micropilotes.

Tabla 2

Cantidad de micropilotes (Vargas, 2020)

Número de pilotes	Tipo de cabezal						Total
	2	3	4	5	6	7	
Cantidad de cabezales	49	18	19	40	18	2	146
Cantidad de micropilotes por tipo de cabezal	98	54	76	200	108	14	550

3.5.2. Alternativa 1 - Pilotes hincados

Como alternativa 1 se optó por utilizar pilotes cuadrados hincados de 40 cm x 40 cm de 16 metros de profundidad. Acorde al diseño se tiene una capacidad del pilote de 680 kN. De acuerdo a las solicitaciones de la estructura, se ha distribuido los pilotes hincados en dos categorías: la primera, pilotes conectados directamente, y la segunda, pilotes conectados con la columna a través de cabezales de 2 a 3 pilotes, haciendo un total de 226 pilotes hincados (ver Tabla 3).

Tabla 3

Cantidad de pilotes hincados (Vargas, 2020)

	Tipo de cabezal			Total
	1	2	3	
Número de pilotes				
Cantidad de cabezales	75	62	9	146
Cantidad de pilotes por tipo de cabezal	75	124	27	226

3.5.3. Alternativa 2 - Pilotes perforados vaciados en sitio

Como alternativa 2 se optó por utilizar pilotes perforados vaciados en sitio de 60 cm de diámetro con 10 metros de profundidad. Acorde al diseño se tiene una capacidad del pilote de 660 kN. De acuerdo a las solicitaciones de la estructura, se ha distribuido los pilotes perforados en dos categorías, la primera, pilotes conectados directamente, y la segunda, pilotes conectados con la columna a través de cabezales de 2 a 4 pilotes, haciendo un total de 235 pilotes perforados vaciados en sitio (ver Tabla 4).

Tabla 4

Cantidad de pilotes perforados vaciados en sitio (Vargas, 2020)

	Tipo de cabezal				Total
	1	2	3	4	
Número de pilotes					
Cantidad de cabezales	71	62	12	1	146
Cantidad de pilotes por tipo de cabezal	71	124	36	4	235

4. Comparación técnica y económica

4.1. Análisis de precios unitarios

Para el cálculo del precio unitario por metro lineal de cada sistema de fundaciones se consideró los ítems que comprenden materiales (componentes de hormigón armado), mano de obra (operador maquinaria, maestros y ayudantes), cargas sociales (71,18%), IVA (14,94%), maquinaria (perforadora, hincadora, inyectora y compresora, dependiendo la alternativa), herramientas (5%), gastos generales (10%), utilidad (10%) y

finalmente impuestos (3,09%). En la Tabla 5 se indican los precios unitarios calculados expresado en bolivianos (Bs).

Tabla 5

Precios unitarios estimados

	Unidad	Precio unitario,
		Bs/ml
Micropilote	ml	857,31
Alternativa 1 - pilote hincado	ml	1.627,89
Alternativa 2 - pilote perforado	ml	2.014,52

El ítem de micropilotes incluye la perforación e inyección de micropilotes 40/16, con carga admisible menor de 470 kN, con toda la provisión de materiales, incluidas placa y tuerca para unión con el cabezal. Incluye el equipamiento, mano de obra y materiales para la inyección de lechada de cemento para consumos normales para esta técnica, la cual se ha considerado 50 kg de cemento por metro lineal de perno instalado.

El ítem de la alternativa 1 incluye la instalación de un pilote prefabricado hincado en campo de hormigón H25 con acero de 500 MPa, y de sección cuadrada de 40 cm de lado. Hincado por golpeo de la cabeza del pilote mediante maza o martillo. El pilote tiene una armadura longitudinal y transversal de 4Ø25 y Ø12 c/10 cm con recubrimiento de 5 cm.

El ítem de la alternativa 2 incluye la instalación de un pilote perforado por el método húmedo de hormigón armado de 60 cm de diámetro. Ejecutado por remoción de suelo mediante sistema mecánico, con uso de lodo bentonítico como medio de sostenimiento de las paredes de perforación y posterior vaciado continuo del pilote. Realizado con hormigón H25, para un ambiente moderadamente severo, tamaño máximo del agregado 12,5 mm, consistencia fluida, premezclado en planta, y vaciado con bomba a través de tubo Tremie, y acero de 500 MPa. Tiene una armadura longitudinal y transversal de 9Ø20 y Ø12 c/15 cm con recubrimiento de 7,5 cm.

4.2. Costo total

Tomando en cuenta la cantidad de metros lineales instalados para cada alternativa, se presenta en la Tabla 6 el costo total expresado en bolivianos.

Tabla 6

Costo total estimado

	Cantidad	Longitud, m	metros lineales, ml	Precio unitario, Bs/ml	Costo total, Bs	Diferencia, %
Micropilotes	550	15	8.250	857,31	7.072.807,50	
Alternativa 1	226	16	3.616	1.627,89	5.88.6450,24	-16,77
Alternativa 2	235	10	2.350	2.014,52	4.734.122,00	-33,07

4.3. Tiempo de ejecución estimado

Para la estimación de un tiempo de ejecución de las alternativas se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones. Se consideró el rendimiento medido en campo de 12 micropilotes autoperforantes inyectados por día con dos maquinarias trabajando paralelamente.

Para la alternativa 1 se consideró que el método constructivo requiere que primero se construya los pilotes en la superficie hasta que adquieran la

Tabla 7

Tiempo estimado de ejecución

	Cantidad	Rendimiento por día	días de construcción	Días adicionales	Total días	Diferencia, %
Micropilotes	550	12	46	0	46	
Alternativa 1	226	8	29	28	57	23,91
Alternativa 2	235	4	59	0	59	28,26

5. Conclusiones

Se ha realizado una estimación de la cantidad de pilotes hincados y pilotes perforados vaciados en sitio acorde a las características de la estructura y la configuración del suelo presente y se ha estimado el costo de las alternativas propuestas comparadas con la ejecución de micropilotes autoperforantes inyectados. Concluyendo que el costo estimado de pilotes hincados y perforados vaciados en sitio es menor en un 16,77% y un 33,07%, respectivamente. Sin embargo, estas alternativas tomarían más tiempo de ejecución (entre un 23,91 a 28,26 % más de tiempo, respectivamente).

6. Referencias bibliográficas

Alva, J. (1993). *Cimentaciones Profundas*. Lima, Peru: Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de <https://www.jorgealvahurtado.com>.

Bowles, J. (1995). *Foundation analysis and design*. Illinois, EEUU: Pearson.

Brown, D., Turner, J., Castelli, R., & Loehr, E. (2018). *FHWA-NHI-18-024 Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*. Recuperado de https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/library_listing.cfm.

resistencia necesaria para recién ser hincados, es decir, 28 días. En Bolivia existen pocas maquinarias capaces de realizar pilotes hincados de 16 metros por lo que se consideró trabajar con una maquina con un rendimiento de instalación de 8 pilotes hincados por día.

Para la alternativa 2 se consideró el uso de 2 maquinarias trabajando paralelamente. Se consideró 4 pilotes perforados vaciados en sitio por el método húmedo por día. La Tabla 7 presenta el tiempo estimado por alternativa.

Coduto, D., Kitch, W., Yeung, R. (2016). *Foundation design, principles and practices*. New York, EEUU: Pearson.

Hannigan, P., Rausche, F., Likins, G., Robinson, B., & Becker, M. (2016). *FHWA-NHI-16-009 Design and Construction of Driven Pile Foundations - Volumen I*. Recuperado de https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/library_listing.cfm.

Placencia, K. P. (2014). *Cálculo y diseño de pilotes para el puente naranjal 1 (PNA1) que forma parte del proyecto control de inundaciones del río Naranjal* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Tschebotarioff, G. P. (1963). *Mecánica del suelo, fundaciones y estructura de tierra*. Moscú, Rusia: s.e.

Vargas, K. R. (2020). *Diseño y análisis de sistemas de fundaciones profundas en suelos cohesivos de acuerdo a las normas FHWA* (tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.