

Artículo Científico

Diseño de fundaciones del paso a desnivel de las avenidas 6 de Agosto y Panamericana mediante el uso de micropilotes

Design of foundations of the overpass of the 6 de Agosto avenue and Panamericana avenue using micropiles

1. Natalie Le Noir Rivas
2. Victor Hugo Álvarez Iriarte

RESUMEN

Con el propósito de descongestionar el tránsito del sur de la ciudad de Cochabamba (Bolivia) se planteó la construcción del paso a desnivel en la intersección de las avenidas 6 de Agosto y Panamericana, por lo que se optó por una solución de puente tipo arco. Tomando en cuenta la magnitud de la estructura, las solicitaciones de carga que ésta impondrá sobre las fundaciones y las características del subsuelo, fue necesario un diseño empleando fundaciones profundas. Las fundaciones originalmente propuestas fueron diseñadas empleando pilotes convencionales; sin embargo, las condiciones reales de campo impedían la libre construcción de los pilotes propuestos. Por consiguiente, se elaboró un diseño alternativo empleando micropilotes que permitió la construcción de la fundación del puente, considerando las condiciones reales de campo, sin afectar la estabilidad estructural, lo que además permitió un ahorro económico significativo en el proyecto.

De forma complementaria, se realizó una optimización del diseño final propuesto. Se determinó un ángulo de inclinación óptimo que favoreció el comportamiento de los micropilotes frente a las cargas laterales, el cual permitió reducir el número de éstos y la geometría de los cabezales, logrando así determinar una solución técnica satisfactoria, y además económicamente factible en el medio.

Palabras clave: Paso a desnivel. Fundación. Micropilotes. Pruebas de Carga.

ABSTRACT

In order to improve the traffic flow of the south of the city of Cochabamba (Bolivia), the construction of the overpass in the intersection of Av. 6 de Agosto and Av. Panamericana was necessary, the chosen solution is an arch-type bridge.

Given the magnitude of the structure, the load stresses imposed on the foundations and the characteristics of the subsurface, was necessary a design using deep foundations. The foundations were designed originally with conventional piles, however, the actual field conditions did not allow the construction of the proposed piles. Therefore, an alternative design using micropiles was proposed, which has allowed the construction of the foundation of the bridge, considering the actual field conditions without affecting the structural stability, and has also allowed a significant saving in the budget.

In addition, an optimization of the proposed final design, with an optimum tilt angle that favored the behavior of the micropiles against lateral loads, which reduced the number of micropiles and the geometry of the cap, thereby achieving a satisfactory and economically feasible technical solution.

Keywords: Overpass, Foundation, Micropiles, Load Testing

1. Ingeniero Civil. Universidad del Valle Cochabamba.

naty_lenoir@hotmail.com

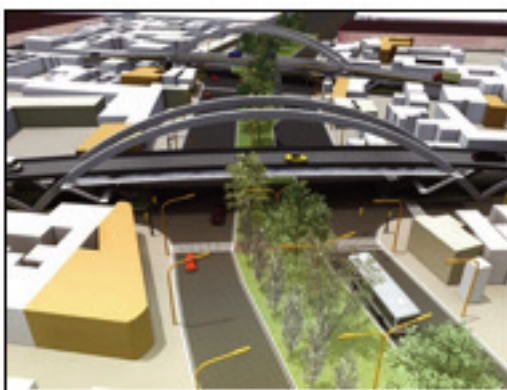
2. Ingeniero Civil, Universidad Mayor de San Simón. Master of Engineering, University of Florida. Gerente Técnico Constructora Álvarez Ltda.

victor-alvarez@alvarezltda.com

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de descongestionar el tránsito de la zona sur de la ciudad de Cochabamba, se planteó la construcción de cuatro pasos a desnivel en puntos de congestión vial. Uno de estos puntos es la intersección de las avenidas 6 de Agosto y Panamericana, en la cual se realizó el análisis de diversas alternativas, optando por una solución de puente tipo arco (figura N°1). La solución adoptada permite el acceso de la Av. Panamericana por encima de la plataforma y el flujo de la Av. 6 de Agosto por debajo de la misma, logrando así descongestionar el tráfico vial.

Figura N° 1. Modelo 3D paso a desnivel



Fuente: Álvarez Ltda, 2014

El paso a desnivel tiene fundaciones profundas debido a la magnitud de la estructura, las solicitaciones de carga que ésta impone sobre las fundaciones y las características del subsuelo. Las fundaciones originalmente propuestas fueron diseñadas empleando pilotes convencionales. Al realizar los estudios de suelos correspondientes para verificar el diseño propuesto, se encontró un gran número de tuberías pertenecientes a la red de servicios básicos, sin registro alguno. Muchas de estas tuberías interferían con la ubicación inicialmente proyectada para los pilotes propuestos, impidiendo así su libre construcción. Por consiguiente, se elaboró un diseño alternativo que permitió la construcción de la fundación del puente evadiendo las tuberías de la red de servicios básicos sin afectar la estabilidad estructural de la superestructura.

Cuando las condiciones del suelo son tales que es necesario el uso de fundaciones profundas, la elección más adecuada del tipo de fundación profunda involucra tomar en consideración diversos factores como: características del subsuelo, profundidad necesaria, magnitud de las cargas impuestas por la estructura, existencia de cargas laterales y métodos de ejecución, entre otros [1]. Dentro de las fundaciones profundas, el empleo de micropilotes postinyectados o postgrouteados es una opción estruc-

tural útil que permite dar soluciones óptimas a diversos problemas geotécnicos, especialmente cuando no es factible la ejecución de pilotaje convencional. Los micropilotes tienen la ventaja de poder resistir elevadas cargas de compresión y tracción e incluso cargas laterales, puesto que estos pueden ser inclinados. Otra cualidad de los micropilotes es su dimensión reducida, lo que permite el uso de equipos de menor tamaño para su construcción.

La presente investigación permitió determinar un diseño de fundaciones profundas para el Paso a Desnivel Panamericana empleando micropilotes, considerando la magnitud de la estructura, las solicitaciones de carga impuestas por estructura, el emplazamiento del proyecto, las condiciones reales de campo y las características del subsuelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto desarrollado constituye una investigación cuantitativa; cuyo enfoque es descriptivo para un caso específico de diseño, lo cual implica en primera instancia una revisión bibliográfica del área de estudio y su alcance tecnológico. La metodología que se empleó para el diseño de las fundaciones fue la siguiente:

Para comenzar el diseño se requirió como datos preliminares las reacciones en las fundaciones, determinadas a partir de un modelo estructural que contemple la totalidad de cargas actuantes en la etapa final, el perfil estratigráfico y los parámetros de resistencia del subsuelo.

1. Reacciones en las fundaciones: Para determinar las reacciones para el diseño de las fundaciones del paso a desnivel se realizó el análisis estructural de la superestructura empleando las especificaciones de la normativa American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el Diseño de Puentes por el Método LRFD edición 2012. Para realizar el modelo de análisis se empleó el simulador estructural SAP 2000 v.14.2.4 que permite introducir variedad de condiciones de geometrías y cargas en un entorno gráfico. El programa permite calcular las solicitaciones en la estructura y las reacciones en los apoyos, pudiendo ser estos apoyos de tipo elástico para simular de mejor manera las reacciones del suelo. Para determinar las reacciones en el modelo analítico de superestructura se consideró inicialmente a las fundaciones como apoyos empotrados; sin embargo, es más apropiado utilizar apoyos elásticos, obteniendo así una calibración de la rigidez del suelo que contemplando así la interacción suelo-estructura.

2. Características del subsuelo: Se evaluaron los estudios geotécnicos realizados, se infirió el perfil estratigráfico y se estimaron los parámetros de resistencia del suelo uti-

lizando las especificaciones propuestas en la normativa de American Society for Testing and Materials (ASTM). Los estratos superiores corresponden a suelos arcillosos y los inferiores a suelos limo-arcillosos. Puesto que el suelo de fundación es principalmente arcilloso, se elaboró el diseño a partir de micropilotes postgrouteados, dado que su procedimiento constructivo mejora considerablemente las propiedades geotécnicas del suelo.

Se determinó la capacidad de carga empleando métodos empíricos, se empleó la metodología propuesta en la normativa de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el Diseño de Puentes por el Método LRFD [2] y se comparó el resultado obtenido con la Metodología Francesa propuesta por Michel Bustamante [3].

Mediante el FB MultiPier se realizó el modelo analítico de la fundación, programa de elementos finitos desarrollado para realizar el análisis estructural de la interacción suelo-estructura. Mediante este programa se verificó la capacidad estructural de los micropilotes de la fundación, asimismo, se obtuvieron resultados de solicitaciones en el cabezal, deformaciones y relación demanda/capacidad del hormigón-acero para los micropilotes.

El modelo analítico permitió simular la interacción suelo-estructura. A través de un proceso iterativo se determinaron las características geométricas y el número de micropilotes, su distribución necesaria y las dimensiones del cabezal que soportan las cargas de la superestructura y cargas laterales. El modelo fue validando mediante pruebas de carga verticales y laterales, las cuales fueron ejecutadas siguiendo las recomendaciones de la norma propuesta por Federal Highway Administration (FHWA) "Diseño y Construcción de Micropilotes" [4]. Finalmente, con base a los resultados obtenidos en las pruebas de carga, se optimizó el diseño, logrando así determinar la incidencia del ángulo de inclinación en micropilotes, reducir el número de micropilotes y la geometría del cabezal. Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo económico para determinar si las soluciones propuestas son económicamente viables.

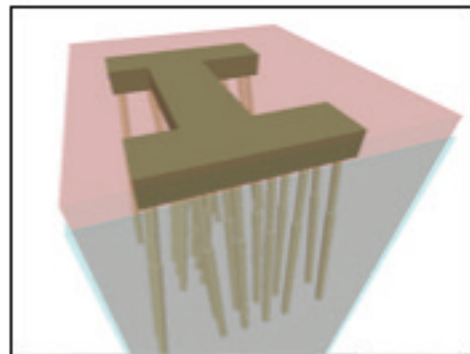
RESULTADOS

Se emplearon dos metodologías empíricas para determinar la capacidad de carga del micropilote de diseño: la metodología propuesta en la normativa AASHTO-LRFD [3] (950.02 [kN]) y se comparó el resultado obtenido con la Metodología Francesa propuesta por Michel Bustamante (1125.53 [kN]) [3].

Para realizar el diseño de la fundación se empleó un modelo analítico, que permitió simular la interacción

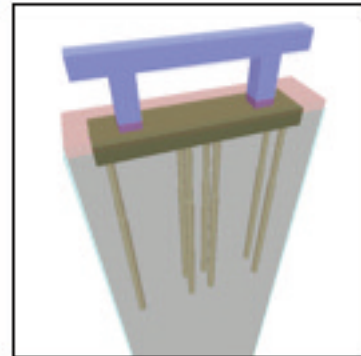
suelo-estructura, utilizando el FB Multiplier (ver figura N° 2 y 3). En este diseño en específico, el arco central de la estructura tendrá una tendencia a abrirse hacia los extremos generando fuerzas laterales en la fundación, por lo cual la utilización de micropilotes inclinados es favorable para este diseño. Para obtener los modelos finales de fundación se probó diferentes configuraciones, variando: el diámetro, la longitud postgrouteada, el ángulo de inclinación y posición del micropilote y geometría del cabezal. La selección del diámetro y longitud del micropilote dependió de optimizar el número de micropilotes en el grupo y también facilitar el proceso constructivo. El diámetro de 0.30 [m] y la longitud de 11 [m] (postgrouteado entre los 3 y 11[m] de profundidad) redujo notablemente el número de micropilote.

Figura N° 2. Modelo Fundación Pilas



Fuente: Elaboración propia, enero 2015

Figura N°3. Modelo Fundación Estribos



Fuente: Elaboración propia, enero 2015

Los modelos finales de fundación para las pilas constan de 30 micropilotes, inclinados a 5° y 10° respecto a la vertical. Sobre estos 30 micropilotes se apoya un cabezal de 1.00 [m] de espesor de donde nacen los arcos de la superestructura. Los estribos constan de 8 micropilotes verticales, sobre los cuales se apoya un cabezal de 0.75 [m] de espesor, de donde nacen dos columnas sobre las que a su vez se encuentra la viga de apoyo de la superestructura.

Si bien el diseño alternativo por el cual se optó cumplía con las solicitaciones de carga impuestas por la super-

estructura y cargas laterales, una limitante para este diseño fue la maquinaria disponible para realizar la perforación por parte de la constructora. No obstante, existen maquinarias que realizan la perforación a mayor ángulo de inclinación, teniendo en cuenta que a mayor ángulo se tendrá una mayor resistencia ante las cargas laterales. Es por ello que de forma complementaria se realizó una optimización del diseño final, incrementando el ángulo de inclinación, logrando así reducir el número de micropilotes y geometría del cabezal. Si bien una mayor inclinación permite un mejor comportamiento ante estas fuerzas horizontales, la existencia de fuerzas verticales grandes es la que limita dicha inclinación. La inclinación óptima para cierta combinación de fuerzas corresponde a la inclinación de la fuerza total existente en la fundación.

Después de analizar los resultados obtenidos para los diferentes ángulos de inclinación, se optó por 26 micropilotes a 20° de inclinación con respecto a la vertical para el diseño optimizado, ya que al incrementar el ángulo de inclinación las deformaciones laterales disminuyen. Por el contrario, las deformaciones verticales incrementan a mayor ángulo, pero aún así se encuentran dentro los rangos aceptables. En este caso, la carga muerta de los arcos tiene mayor ponderación y la resultante de estos se encuentra a 22° , por ello los modelos de 20° y 25° presentan resultados más óptimos, aun así se optó por el modelo de 20° , ya que presenta menores deformaciones y valores de la relación demanda/capacidad superiores que el de 25° .

DISCUSIÓN

La metodología de diseño propuesta por la AASHTO-LRFD utiliza coeficientes que dependen del tipo de suelo y tipo de sistema de inyección, los cuales varían en rangos amplios, por ello la capacidad de carga variará de igual manera. Al igual, la metodología francesa utiliza coeficientes similares, pero los rangos propuestos varían en menor proporción[3], por lo cual se comparó ambos métodos para así encontrar un valor de capacidad de carga similar. Si bien se realizaron cálculos a partir de dos diferentes metodologías, estos manejan coeficientes dependientes del tipo de suelo, determinados a partir de pruebas empíricas en diversos, los cuales probablemente no se aplican en su totalidad a la realidad del suelo de fundación. Por este motivo, se realizaron pruebas de carga para contrastar los resultados determinados. Se realizó una prueba de carga a compresión a 1032.01 [kN], sin llegar a la falla, para verificar los resultados obtenidos. Por lo tanto, su capacidad es mayor a la determinada, confirmando así al diseño un margen de seguridad adicional.

Adicionalmente, se realizó un análisis económico comparativo de los tres diseños (Inicial con Pilotes, Diseño Final con Micropilotes y Diseño Optimizado con Micropilotes (ver figuras N° 4, 5 y 6) presentados para el paso a desnivel. El diseño final por el cual optó la empresa constructora empleó micropilotes, lo que permitió un ahorro económico de 15% comparado con el diseño inicialmente propuesto en la licitación, el cual tenía previsto emplear pilotes convencionales. El diseño optimizado presentado en este proyecto, donde se ha empleado micropilotes, permite un ahorro económico de 11% comparado con el diseño final empleando micropilotes. Comparado con el diseño inicial, se obtuvo un ahorro económico de 24%; por lo tanto, el empleo de micropilotes postgrouteados permitió una solución técnico - económico satisfactoria para este diseño.

Figura N°4. Diseño Inicial

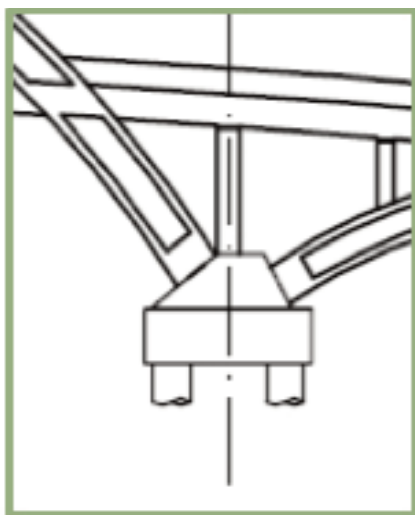


Figura 5 Diseño Final Micropilotes

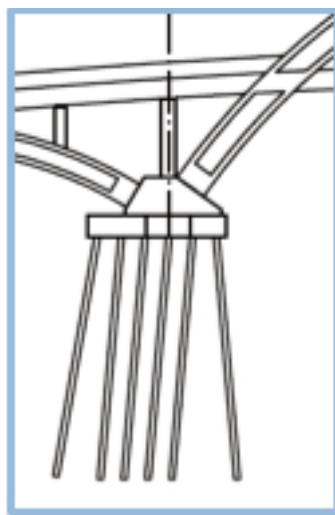
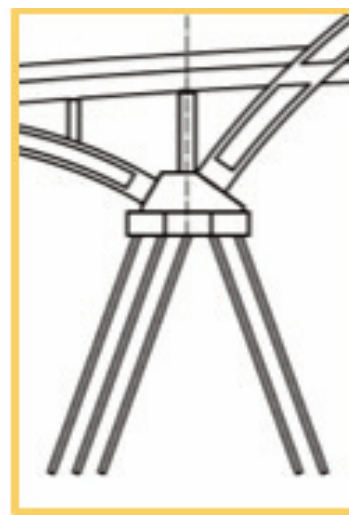


Figura 6 Diseño Optimizado Micropilotes



Fuente: Elaboración propia, enero 2015

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el proyecto, se concluye que -considerando la estratigrafía y la magnitud de la estructura- el diseño elaborado empleando micropilotaje es una solución técnica satisfactoria, debido a que el post-grouting de los micropilotes mejora considerablemente las propiedades geotécnicas del suelo de fundación. El ajuste de los parámetros de resistencia y el comportamiento mismo del micropilote en el modelo analítico, requieren necesariamente de una validación mediante pruebas de carga (verticales y horizontales). Finalmente, si bien un mayor ángulo de inclinación del micropilote permite un mejor comportamiento ante estas fuerzas horizontales, la existencia de fuerzas verticales de gran magnitud es la que limita dicha inclinación. La inclinación óptima para cierta combinación de fuerzas corresponde a la inclinación de la fuerza total existente en la fundación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Álvarez Ltda. (2014). Informes Diseño de Fundaciones Paso a Desnivel Av. 6 de Agosto y Av. Panamericana. Cochabamba-Bolivia: Constructora Álvarez Ltda.
- [2] Frattelli, M. G. (1993). Suelos, Fundaciones y Muros. Caracas-Venezuela: Bonalde Editores.
- [3] Steudle, K., Lewis, M., & Bracer, C. (2012). AASHTO- LRFD Bridge Design Specifications: Washington DC. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [4] Leoni, A. J. (2005). Apuntes sobre Micropilotes Inyectados. La Plata-Argentina: Universidad Nacional La Plata.
- [5] Sabatini, P., Tanyu, B., Armour, T., Groneck, P., & Keely, J. (2005). FHWA- Micropile Design and Construction (Reference Manual for NHI Course 132078). Estados Unidos: National Highway Institute.