

APLICACIÓN DE MUROS DE PILOTES EN OBRAS VIALES EN LIMA

M. Saucedo Sulzer.¹

Palabras clave: Muros de pilotes, pilotes perforados, pilotes CFA, by-pass, pasos a desnivel, estacionamientos subterráneos, líneas de metro, anclajes.

RESUMEN

Como toda gran capital, durante los últimos años la ciudad de Lima ha notado la necesidad urgente de nuevas obras de infraestructura vial que ayuden a reducir el colapso vehicular en las principales vías que cruzan la ciudad. La solución lógica pasa por la eliminación de los cruces con semáforos en las vías de mayor tráfico para permitir el flujo continuo de los vehículos. El problema se presenta en los largos tiempos de ejecución de estas soluciones, que obligan a cortar el flujo del tráfico en las vías de alto tráfico, generando aún mayor malestar en la población.

El presente documento tiene por objetivo presentar una solución para la construcción rápida de pasos a desnivel (by-pases), líneas de metro, vías expresas en zanja y estacionamientos subterráneos, mediante la ejecución de muros conformados por pilotes que permitan realizar excavaciones masivas en tiempos record, maximizando el uso del espacio de trabajo y minimizando la interrupción del tráfico durante la construcción.

1. Introducción

Los métodos constructivos propuestos como solución para la ejecución de proyectos para el descongestionamiento vial, hacen uso de muros de pilotes y muros pantalla para la protección de las excavaciones, los que a su vez, en muchos casos pueden formar parte de la estructura al transmitir las cargas verticales al subsuelo. Ambos métodos son mundialmente aceptados por la gran seguridad que ofrecen a las excavaciones debido a su gran rigidez y sobre todo debido a que son elementos que se introducen al suelo antes del inicio de las excavaciones, por lo que se minimizan las deformaciones en el suelo circundante a la excavación y permiten a su vez colocar la superestructura con vigas pretensadas prefabricadas para restablecer el tráfico rápidamente y continuar los trabajos de excavación sin mayores interrupciones.

En este documento se da énfasis a la solución mediante muros de pilotes y se presentan algunos proyectos ejecutados con esta tecnología en la ciudad de Santiago de Chile, debido a la similitud que presenta el suelo de esta ciudad con el suelo de Lima.

Los tipos de obra en los que se pueden aplicar estos métodos constructivos son:

1) Pasos vehiculares a desnivel (by-pases)

Se requieren numerosas obras de este tipo en los cruces viales más congestionados de la ciudad y a la vez es importante minimizar el incremento de la congestión durante la construcción de las obras correspondientes.

2) Líneas y estaciones de metro subterráneo

Se requiere con suma urgencia construir una red de líneas de metro con tramos que necesariamente requieren que las estructuras sean subterráneas como en las zonas monumentales y/o con poco espacio disponible. Estas líneas y estaciones de metro

¹ Ing. M.Sc. Mariano Saucedo Sulzer
Gerente Técnico, Pilotes Terratest Perú
msaucedo@terratest.com.pe

subterráneo se pueden construir con los métodos propuestos, como una alternativa a la construcción tradicional de túneles, minimizando la interrupción del tráfico y reduciendo los tiempos y riesgos de ejecución.

3) Estacionamientos subterráneos

Se requiere en las zonas de alta densidad de oficinas y comercios, como en los centros de Lima, San Isidro, Miraflores y otros, pues de esta manera, también se libera más superficie para el flujo del tráfico.

2. Método constructivos

2.1 Tipos de muros de pilotes

Los muros de pilotes de concreto armado se ejecutan con una perforación previa en una gama de diámetros que van desde 0.60 a 1.50 m, y los mismos pueden ser secantes (sobrepuestos), tangentes o tener una separación entre ellos dependiendo del tipo de suelo y de la presencia de agua; alcanzando profundidades superiores a los 50m, incluso en terrenos muy accidentados y difíciles por la presencia de bloques, bolones, roca, etc.

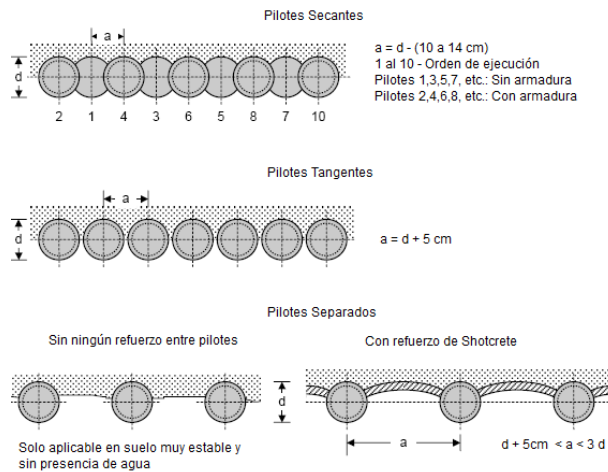


Fig. 1 Esquema de pilotes secantes, pilotes tangentes y pilotes separados

La elección de la configuración final depende del tipo de suelo existente, de los empujes de suelo actuantes, de la necesidad de una excavación seca, de la restricción de desplazamientos especificada, de los costos y de la disponibilidad de la respectiva maquinaria para la construcción. En el caso de necesitarse una excavación seca donde además los empujes de suelo sean de gran consideración se optará por un muro de pilotes superpuestos. Si no hubiera presencia de aguas o la excavación no tuviera que ser seca podría utilizarse un muro de pilotes tangentes. Si los empujes no fueran de gran consideración y no hubiera presencia de aguas podría optarse por un muro discontinuo de pilotes. Entre los pilotes se construirá una pantalla de hormigón lanzado (Shotcrete) si existen riesgos de desmoronamientos locales entre los pilotes.

Tanto las dimensiones de los pilotes (diámetro y largo) como su separación quedarán determinadas por el análisis estático del muro y por la disponibilidad de la maquinaria requerida para la construcción. Dado que un muro de pilotes no puede ser recuperado una vez finalizada la excavación, puede optarse por utilizarlo como parte de la futura construcción. En este caso deberán tomarse en cuenta estados de carga adicionales para el dimensionamiento final del muro.

Las características del suelo de Lima, muy cementado y con ángulos de fricción muy altos, junto con la ausencia de nivel freático, hacen posible plantear soluciones con pilotes separados recurriendo al efecto arco que se produce entre ellos para distribuir los empujes de suelo hacia los

pilotes y dejar el area entre pilotes con un refuerzo mínimo mediante una capa delgada de Shotcrete o, en casos de uso temporal, simplemente mediante un pañeteado de lechada de cemento para evitar el desmoronamiento local de piedras y la pérdida de cohesión del suelo.

Dependiendo de la profundidad de excavación se determinará la necesidad de usar anclajes postensados en niveles intermedios de la excavación con la finalidad de reducir los esfuerzos sobre los pilotes.

2.2 Ejecución de los pilotes

Dependiendo del tipo de suelo y de la presencia de agua, el método constructivo consiste en ejecutar la perforación sin entibación gracias a la utilización de lodos bentoníticos para poder estabilizar las paredes, o bien, mediante un encamisado metálico que evite desmoronamientos del terreno circundante. Una vez finalizada la perforación del pilote, se coloca la armadura previamente montada. Luego, mediante un conducto de alimentación (Tubería tremie) se va llenando de concreto, a medida que va desplazando al lodo hacia la superficie o se va retirando el encamisado.

El tipo de maquinaria a emplear, ya existente en el Perú, es mediante perforadoras rotativas hidráulicas equipadas con barras Kelly para suelos duros o roca, o perforadoras de hélice continua (CFA) para suelos blandos, generando grandes rendimientos de trabajo.

El esquema de ejecución de un muro de pilotes con perforación previa se muestra en la Figura 2:

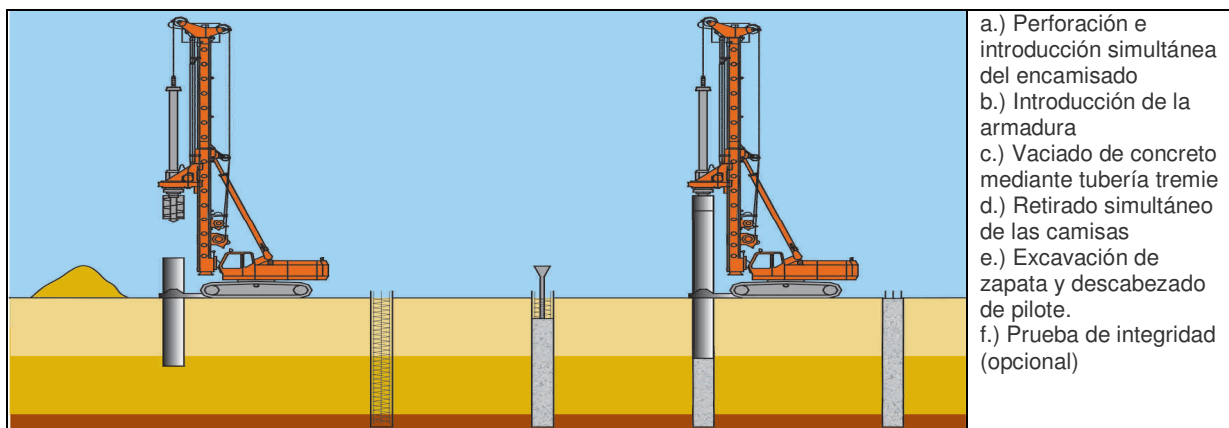


Fig. 2 Proceso de ejecución de pilotes con perforación previa en suelos duros o roca.

El esquema de ejecución de un muro de pilotes con perforación paralela a la ejecución del pilote mediante hélice continua (CFA) se muestra en la Figura 3:

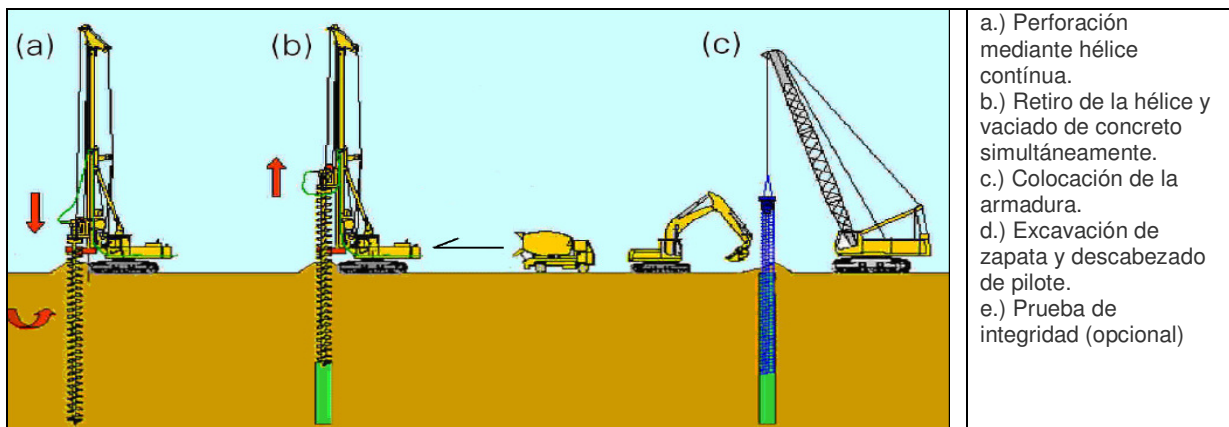


Fig. 3 Proceso de ejecución de pilotes mediante hélice continua (CFA) en suelos blandos o arenas.

2.3 Excavación

Una vez concluidos los trabajos de pilotaje, se procede con la excavación masiva. Si las profundidades son muy grandes, por lo general se refuerzan los pilotes con anclajes de alto tonelaje a profundidades intermedias y se emplean sistemas de monitoreo permanente en obra para determinar los movimientos del suelo. La excavación masiva se realiza en estos casos hasta los niveles de anclaje para permitir el trabajo de perforación de anclajes. Una vez ejecutada toda la fila de anclajes, se continúa con la excavación masiva hasta la siguiente línea de anclajes o bien hasta el fondo de cimentación del proyecto.

Como se verá más adelante, en las zonas de pasos de puentes o en estacionamientos subterráneos es posible la construcción de la losa superior para restablecer el tráfico rápidamente y continuar los trabajos de excavación por debajo sin interrumpir el tráfico.

3 Métodos de análisis

Para el dimensionamiento de un muro de pilotes se puede iniciar el diseño mediante un análisis de equilibrio límite. Los métodos de equilibrio límite asumen un estado de equilibrio para el que se presenta la falla, a partir del cual se aplican coeficientes de seguridad que garantizan la estabilidad del conjunto. Un dato importante que se puede obtener en este pre-dimensionamiento es la definición del empotramiento mínimo necesario en el terreno, las solicitaciones sobre los pilotes, las deformaciones y las cargas requeridas en los anclajes.

Finalmente, para el diseño final y para poder determinar con mayor precisión las deformaciones y solicitaciones finales en los pilotes, se tiene que recurrir a un análisis de elementos finitos, por supuesto con una previa determinación realista de las propiedades geomecánicas del suelo. Mediante este diseño final se verifica con gran precisión la magnitud de los posibles efectos de la excavación en las edificaciones vecinas. Los movimientos del suelo durante el proceso constructivo deberán ser en todo momento debidamente monitoreados por un sistema de control preestablecido, que además del control topográfico, puede requerir el uso de inclinómetros, extensómetros, celdas de carga, piezómetros, etc.

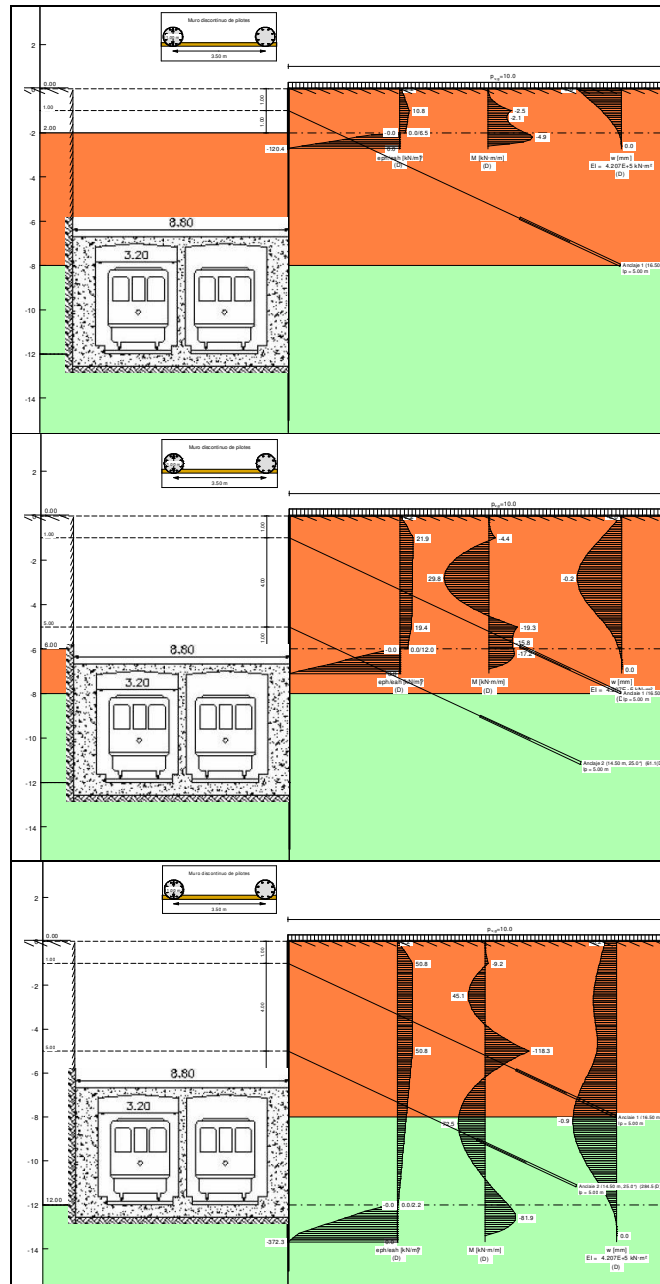


Fig. 4 Consideración de las fases de ejecución en el diseño del muro mediante métodos de equilibrio límite (Programa GGU-RETAIN)

Los análisis a ser realizados deben tener en cuenta las diferentes etapas del proceso constructivo y las deformaciones de los pilotes en cada una de estas etapas, sobre todo antes y después del

ensado de los anclajes. Cada uno de los estados constructivos genera una deformación en el suelo y en el pilote, que debe ser considerada como pre-deformación en el siguiente estado constructivo (Figura 4).

4. Características del suelo de Lima

El estrato predominante en la Metropoli de Lima es un depósito de suelo fluvial que caracteriza al cono de deyección del río Rimac y que está conformado fundamentalmente por bolones, cantos rodados y gravas con una matriz de arenas y algo de finos (GP-GW), con un espesor que probablemente sea mayor a 400m y que se le conoce localmente como “Conglomerado de Lima”. Diversos estudios para obtener los parámetros de corte del conglomerado de Lima, como los estudios de *Alva* (1981) y *Martinez* (1996), dan como resultado ángulos de fricción interna que varían entre 35 y 45° y valores de cohesión que varían entre 20 y 40 kN/m². Este estrato tiene una cobertura o estrato superficial generalmente conformado por un suelo de relleno limo-arcilloso (ML-CL) de espesor variable; de 0.30 a 1.50m en la zona central del cono de deyección, desde Pueblo Libre a La Victoria, desde el Cercado a Miraflores, etc.; de 1.50 a 15m en los bordes del cono de deyección, tales como los distritos de Callao, Chorrillos, Barranco, etc. En el Callao, esta cobertura se complica por la presencia de zonas turbosas y a veces pantanosas, siendo más bien un suelo errático. Las zonas de mayor tráfico y movimiento económico están en la zona central del cono de deyección.

5. Proyectos de Aplicación

5.1 Pasos a desnivel (By-pass)

Un paso a desnivel es el proceso de la adaptación de un cruce de dos o más ejes de transporte a diferentes alturas para no interrumpir el flujo de tráfico entre otras rutas de tránsito cuando se cruzan entre sí. La figura 5 muestra de forma esquemática un paso a desnivel típico de 8m de altura resuelto con pilotes dispuestos cada 3.50m en la zona libre y cada 3m en la zona de cruce con la vía principal. La viga cabezal se apoya directamente sobre los pilotes en la zona de cruce.

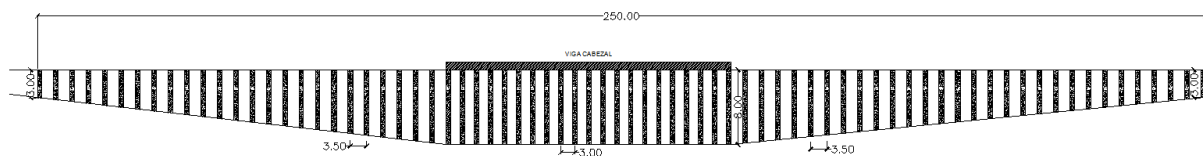


Fig. 5 Esquema de procedimiento constructivo de by-pass mediante muros de pilotes

La solución constructiva en la zona de cruce con muros de pilotes de concreto armado se puede apreciar en la Fig. 6. que muestra la construcción en 2 fases de la zona de los puentes para minimizar la interrupción del tráfico en la vía principal durante el proceso constructivo.

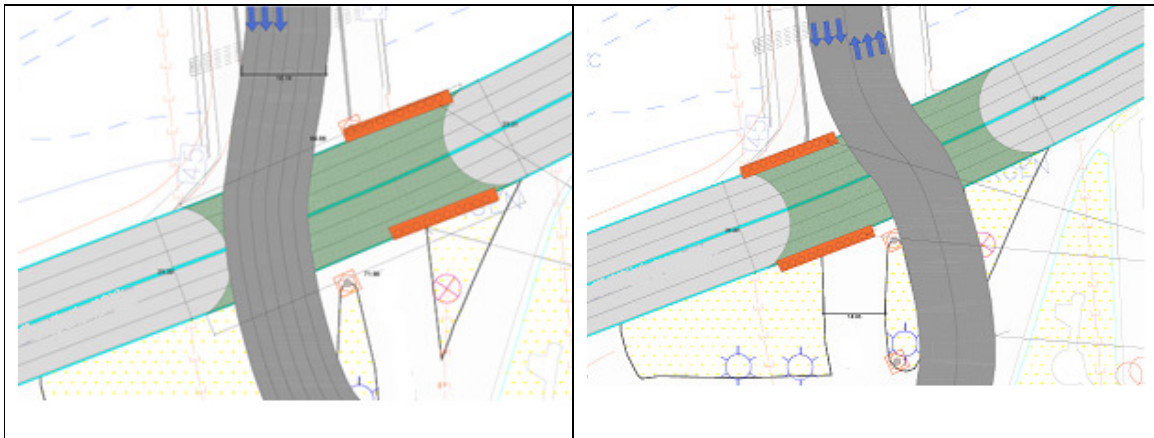


Fig. 6 Esquema de procedimiento constructivo de By-pass mediante muros de pilotes en las zonas de puentes

Debido a su gran rigidez, los muros de pilotes cumplen a la vez las funciones de contención del terreno y de sustentación de las cargas. Las fases de ejecución en las zonas de puentes se pueden resumir de la siguiente forma:

- 1) Desviación del tráfico en la vía principal
- 2) Ejecución de los pilotes con equipo de construcción estacionado en el nivel de la calle existente, en ambos lados de la zona de puentes en el cruce de las vías.
- 3) De forma paralela a la perforación del resto de pilotes del by-pass se procede con la excavación de zanjas para el descabezado de los pilotes en el cruce y vaciado de las vigas cabezal.
- 4) Colocación de las vigas pretensadas prefabricadas de la superestructura.
- 5) Vaciado del concreto de la losa de la superestructura.
- 6) Colocación de obras accesorias (barandas, señalizaciones, etc.) en el tramo ejecutado, de ser pertinente.
- 7) Apertura del tráfico en la vía principal del tramo ya ejecutado.
- 8) Se ejecuta la obra por tramos, a fin de interrumpir el tráfico solo en el tramo que se está ejecutando; así es que, se repite los pasos 1 a 6 para el segundo tramo para permitir que el tráfico quede totalmente restablecido.
- 9) Construcción de las rampas de acceso. Pueden irse ejecutando, paralelo a la ejecución de los pasos 1 a 7 para los diversos tramos.
- 10) Excavación del terreno como túnel por debajo de la zona de puentes, para ir dando espacio al pase subterráneo. El material excavado es retirado por las rampas.
- 11) Vaciado de la solera de fondo y ejecución del pavimento.
- 12) Trabajos de acabado y revestimiento de las obras.

El proceso constructivo permite igualmente habilitar el tráfico de la vía secundaria en uno de los lados cuando los puentes ya han sido ejecutados. Esta metodología de construcción es igualmente aplicable en vías expresas tipo "zanja". Se ejecutan los pilotes desde la superficie en toda la longitud del paso a desnivel y una vez conformados los puentes se inicia la excavación masiva para habilitar el tráfico en uno de los lados de la nueva vía (Véase la Fig. 7).

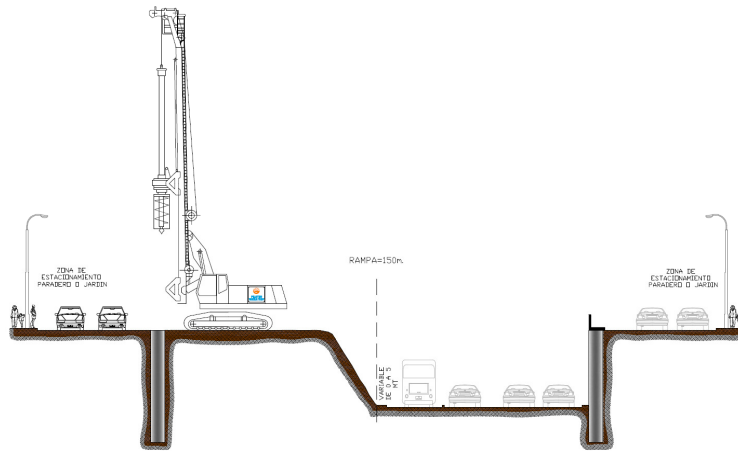


Fig. 7 Habilitación de una de las vías secundarias en la construcción de vías expresas o en zonas de by-pass donde ya se han completado los puentes.

El acabado típico en la zona de puentes consiste en la aplicación de una capa de shotcrete de espesor variable en función de las características del suelo. Por lo general los pilotes en la zona de cruce llevan una separación menor que el resto de pilotes del by-pass debido a la sobrecarga adicional que reciben y al empuje adicional del suelo debido al tráfico de vehículos.

La siguiente figura muestra de forma esquemática el acabado típico de la zona de puentes en un paso a desnivel.

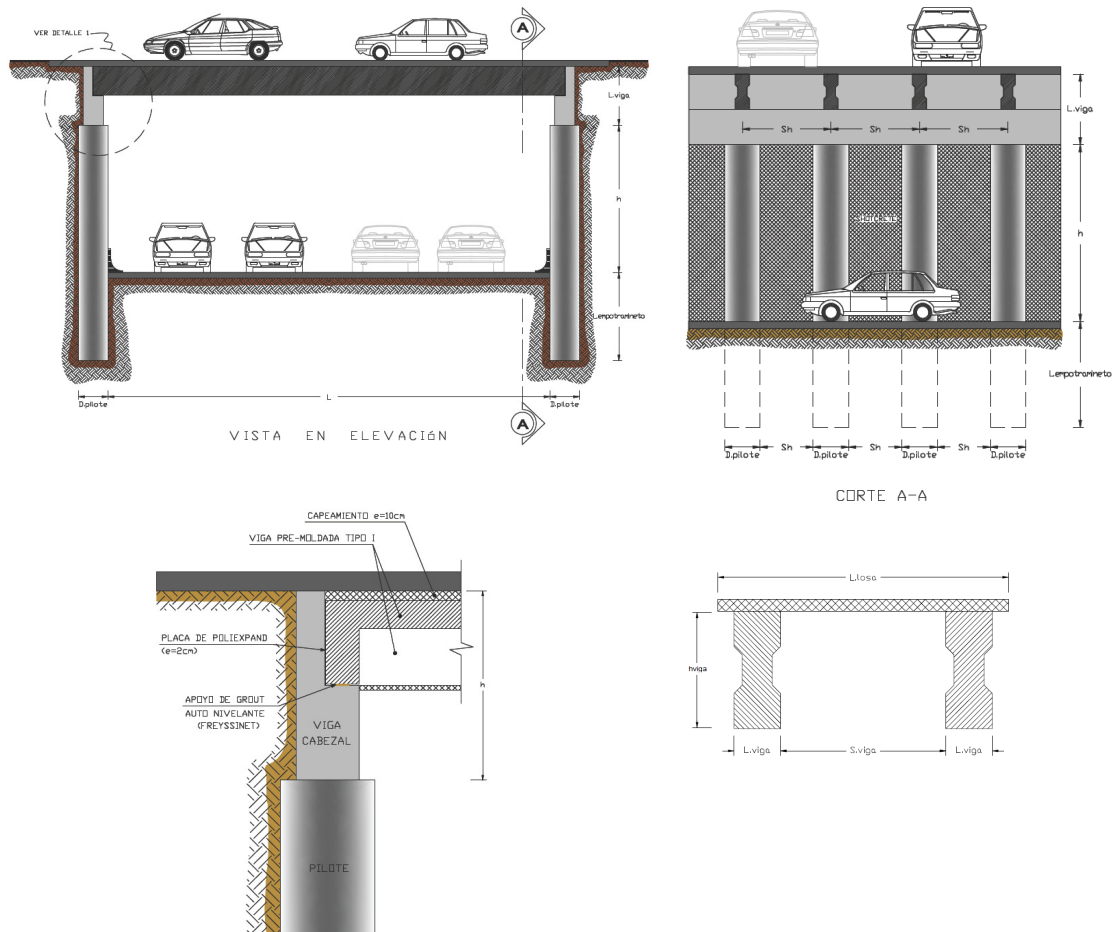


Fig. 8 Detalles de acabado de un paso a desnivel con un muro de pilotes

El tiempo de ejecución de un pilote acabado de 1m de diámetro y de 12m de longitud en el conglomerado de Lima es de aproximadamente 4.5 hrs. Tomando en cuenta que esta es la longitud promedio de los pilotes en la zona de los puentes de un paso a desnivel, para la ejecución de los dos lados de un puente de 30m de ancho con pilotes dispuestos cada 3.00m, el tiempo total de ejecución sería de aprox. 90 hrs.

Por tanto, si se considera que solamente trabajará una máquina pilotera, en aprox. 11 días hábiles se termina la ejecución de los pilotes de la zona de cruce de un by-pass, aunque los tiempos se pueden reducir aún más si se trabaja como es común, con 2 o más piloteras o a doble turno. Si consideramos que para el tiempo de acabado final de la superestructura se requieren aprox. 15 días adicionales, es posible volver a habilitar el tráfico de la vía principal en menos de 1 mes de trabajo para continuar con la ejecución del by-pass por debajo de la vía principal en funcionamiento.



Fig. 9 Proceso constructivo en pasos a desnivel de la autopista Américo Vespucio Sur en la ciudad de Santiago de Chile (Foto gentileza de Pilotes Terratest Chile)

En la imagen de la Figura 9 se aprecia el acabado de las obras de pilotaje y pasos a desnivel de la autopista Américo Vespucio Sur en la ciudad de Santiago de Chile. En esta obra, se ejecutó una pantalla discontinua de pilotes de 1200mm de diámetro en una longitud de 2457m.

5.2 Líneas y estaciones subterráneas de metro

Para la construcción de líneas de metro se debe diferenciar los tramos que pueden ser realizados a tajo abierto de los tramos que necesariamente deben ser ejecutados mediante tuneles debido a la densidad de construcciones en la superficie.

Los tramos a tajo abierto pueden ser ejecutados siguiendo el mismo proceso constructivo que el descrito en el punto 5.1 para obras de by-pass, ejecutando inicialmente los pilotes para el posterior techado de todo el tramo con elementos prefabricados. Los tramos de túnel requieren la realización de pozos de inspección en tramos intermedios para el ingreso y salida de las máquinas tuneladoras, o para el retiro del material de voladura y excavación. Estas zonas de ingreso de los tramos de túnel pueden ser ejecutadas mediante pilotes.

La aplicación más común y rápida de los pilotes anclados es en las estaciones de las líneas de metro, como la realizada en la estación Bellas Artes en la extensión de la línea 5 del metro de Santiago (Fig.10), ejecutada con pilotes de 1200mm de diámetro de 17 a 21m de longitud dispuestos cada 2m y 3 filas de refuerzo mediante anclajes postensados con cargas hasta 100 Tn. Esta obra específica es un ejemplo de solución rápida y segura en una zona

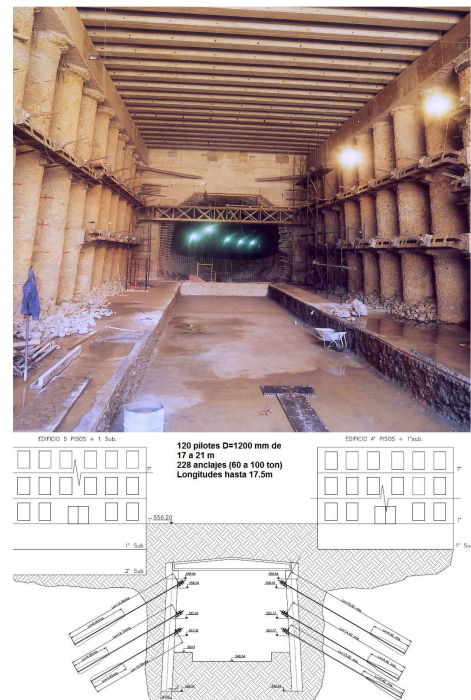


Fig. 10 Solución mediante pilotes anclados para la construcción de la estación Bellas Artes en la extensión de la línea 5 del metro de Santiago (Foto gentileza de Pilotes Terratest Chile)

densamente poblada que no puede permitir deformaciones en el terreno.

5.3 Estacionamientos Subterráneos

Hay varias zonas de Lima de alta densidad de oficinas, centros comerciales y viviendas, en donde se requiere concesionar el subsuelo para la construcción de estacionamientos subterráneos, tales como el centro de Lima, San Isidro y Miraflores, entre otros. Estas zonas se están amplificando más aun, con los cambios en los coeficientes de edificación que están densificando varias urbanizaciones. La construcción de estacionamientos subterráneos ayudaría a liberar más área superficial para la circulación de vehículos, sin embargo, como en toda obra vial, la construcción de estos estacionamientos mediante trincheras abiertas ocasiona la interrupción del tráfico, con el consiguiente trastorno que ello significa; por lo que para solucionar este problema, se propone el esquema constructivo mostrado en la Fig 11, consistente en muros de pilotes, vigas prefabricadas pretensadas en el tablero de la superestructura y anclajes provisionales hasta que la construcción de los techos de los sótanos inferiores sirva de arriostre final.

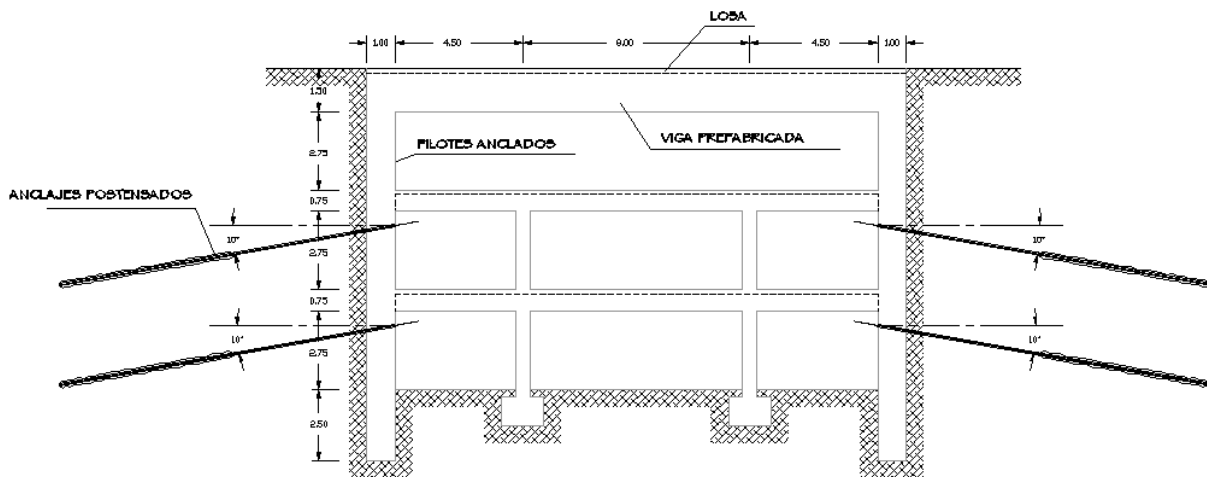


Figura 11 – Estacionamiento Subterráneo - Esquema de solución mediante muros de pilotes en el perímetro

Una vez colocadas la vigas y la losa superior, es posible o bien restituir el tráfico o habilitar nuevamente la zona para el tránsito normal de peatones, mientras se realizan los trabajos de excavación por debajo.

6 Conclusiones

- 1) El empleo de muros de pilotes de concreto armado para la construcción de pasos vehiculares subterráneos, estaciones y líneas de metro subterráneos, y estacionamientos vehiculares subterráneos, tienen varias ventajas respecto a las tradicionales construcciones a tajo abierto que se usan en Lima, como por ejemplo:
 - a. Permiten la excavación de profundidades mucho mayores, sin desestabilizar al terreno circundante y minimizan los asentamientos en estructuras vecinas.
 - b. Permiten la construcción del tablero de la superestructura, inmediatamente después de la construcción de los muros, lo cual permite la rápida reapertura del tráfico, más aun, si la mayoría de los elementos del tablero son prefabricados.
 - c. Se convierten en un método constructivo más económico cuando se usan a la vez como elementos de contención de tierras y de transmisor de cargas verticales al subsuelo.
- 2) Este método constructivo es adecuado para el caso de pasos vehiculares subterráneos a lo largo de vías secundarias que pasan por debajo de vías principales; de tal manera que

la interrupción del tráfico de la vía principal solo es parcial, en un tramo muy corto, y además por corto tiempo.

- 3) Este método constructivo es adecuado para el caso de líneas de metro que requieran ser subterráneas por razones de estética, como por ejemplo, en caso de que pase por la zona monumental del centro de Lima, o en zonas de alta densidad de edificios altos. Además, este método constructivo es más rápido y económico que la construcción de un túnel.
- 4) Este método constructivo también es adecuado para la construcción de estacionamientos subterráneos debajo de las calles de zonas de alta densidad de oficinas y comercios, pues la interrupción del tráfico es mínima durante el proceso constructivo

7 Referencias

- [1] Baugruben (Excavaciones). Weissenbach/Hettler. Ernst Sohn, 2. edición 2010.
- [2] Beitrag zur Stabilitätsuntersuchung mehrfach verankerter Baugrubenumschließungen
Una contribución al cálculo de estabilidad de muros de excavaciones sostenidos por anclajes (múltiples). Ranke / Ostermayer. Die Bautechnik 45 - Pags. 341 – 350, 1968.
- [3] Ein Beitrag zum Nachweis der Standsicherheit auf der tiefen Gleitfuge.
Una contribución para la verificación de la estabilidad en la línea de falla profunda.
Franke / Heibbaum. Bauingenieur 63 - Pags. 391 – 398, 1988.
- [4] Verpreßanker im Lockergestein. Anclajes inyectados en suelos.
Feddersen. Der Bauingenieur 49 - Pags. 302 – 310, 1974.
- [5] Overall Stability of Anchored Retaining Walls. Anderson / Hanna / Abdel-Malek. JGED - ASCE - Vol 109 - 1983
- [6] Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben" (EAB) Recomendaciones de la comisión de trabajo: Excavaciones - Sociedad alemana de suelos y fundaciones - Comisión de trabajo "Excavaciones". Ernst & Sohn cuarta edición, 2006.
- [7] EAP Recomendaciones de la comisión de trabajo para obras de pilotes. Ernst & Sohn 2007
- [8] Estructuras combinadas de losas y pilotes. J. Hanisch, R. Katzenbach. Ernst & Sohn 2002
- [9] Pilotes perforados. J.M. Seitz, H.G. Schmidt. Ernst & Sohn 2000