Metro de Quito:

Preservación del patrimonio histórico

Jorge Yañez Rocha. Gerente General EPMMQ (Metro de Quito)
Raul Talavera Manso. Director Técnico GMQ
Joan Pau Fontrodona. Gerente producción ACCIONA
Jose Luis Guijarro Irene. Coordinador Obra Civil Estaciones. ACCIONA
Juan Antonio García Gonzalez. Director Colombia y Ecuador. GRUPO TERRATEST

Fotos: Cortesía de Equipos y Terratest

La Estación San Francisco empleó técnicas de cimentación y tunelación de alta seguridad para las excavaciones subterráneas.

noticreto LA REVISTA DE LA TECNOLOGÍA Y LA CONSTRUCCIÓN

El Consorcio Línea 1 de Metro de Quito se ha encargado de rehabilitar el acceso a la Plaza de San Francisco, cuyas obras implican la reintegración de los elementos de piedra originales que recubrían la superficie de la plaza.
Para la construcción de la Estación San Francisco se emplearon las técnicas especiales de cimentación y tunelación más seguras para excavaciones subterráneas, buscando minimizar la afección al patrimonio cultural del centro histórico de Quito.

La estación denominada San Francisco

en el Metro de Quito ha supuesto uno de los mayores retos para los diseñadores y constructores de la obra por estar situada en el corazón de uno de los centros históricos mejor conservados de América Latina, declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO desde 1978.

La obra ha sido un éxito gracias a todas las áreas comprometidas, cuyo objetivo siempre fue la preservación de uno de los espacios públicos más representativos de la ciudad.

En un primer momento, la ingeniería concibió el Metro de Quito como una obra subterránea en que la ejecución del túnel en el Centro Histórico se planteaba con métodos convencionales. Sin embargo, con el objetivo de reducir las afectaciones a la ciudad y a un entorno tan emblemático, se modificó y pasó a ejecutarse en su totalidad con tuneladoras.

Este sistema constructivo reduce significativamente las afectaciones, restituyendo las actividades en superficie en mucho menos tiempo. Por otro lado, para construir la Estación San Francisco se utilizaron técnicas y equipos altamente especializados que permitieron cumplir los estándares internacionales de calidad y seguridad. Todo esto ha convertido al Metro de Quito en una obra subterránea de referencia en cuanto a la preservación del patrimonio.

UNIDAD	γ [t/m³]	C' [KPa]	φ[°]	Ecarga [MPa]	K [cm/s]
Cangahua limo-arcillosa	1,8	50	32	60x(1+0,02xZ)	10^{-5}
Cangahua areno-limosa	1,8	35	34	80x(1+0,02xZ)	10^{-5}
Cangahua tobácea	1,8	50	37	270	10^{-5}

γ: Peso específico del suelo - **C'**: Cohesión efectiva - **φ**: Ángulo de fricción - **Ecarga:** Modulo de elasticidad en carga - **K:** Permeabilidad

Tabla 1. Características geotécnicas de las formaciones geológicas.

noticreto
LA REVISTA DE LA TÉCNICA Y LA CONSTRUCCIÓN

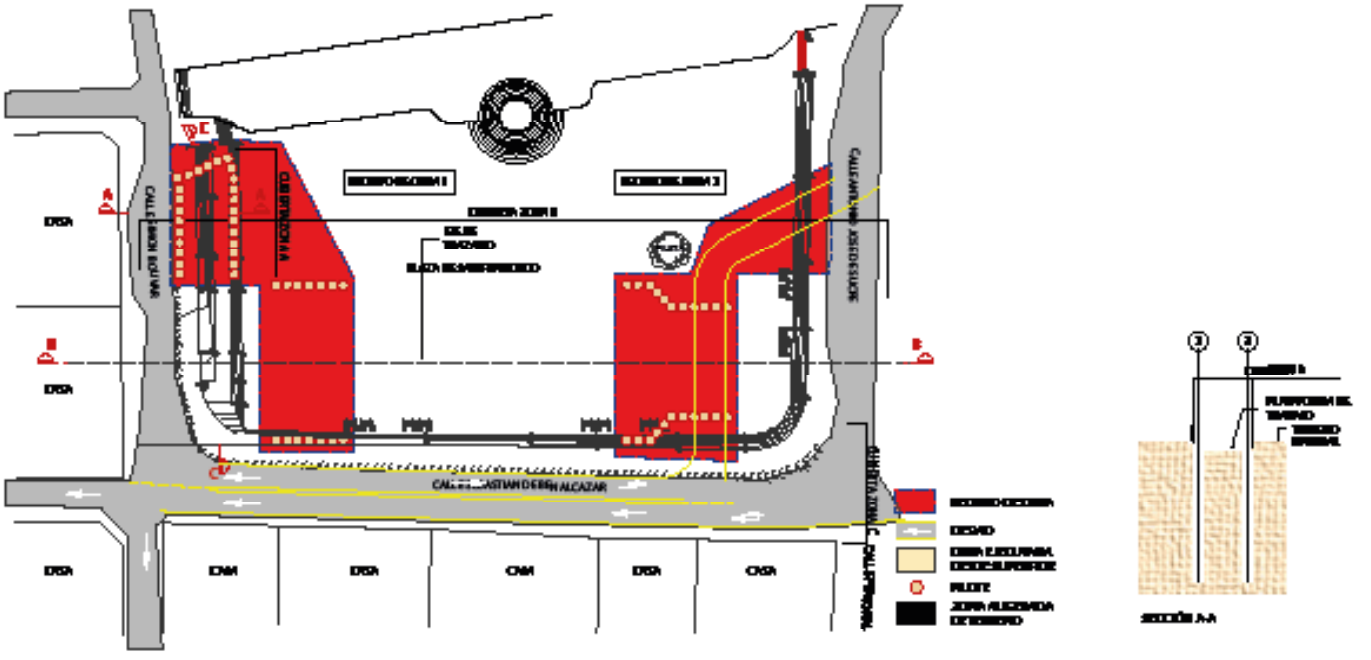
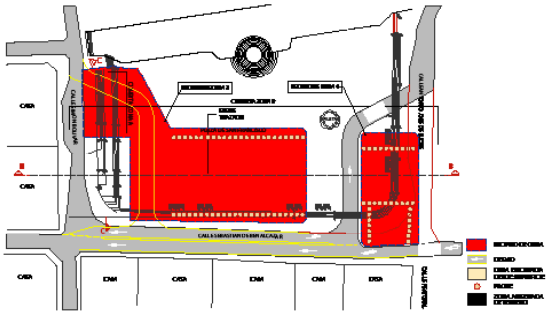


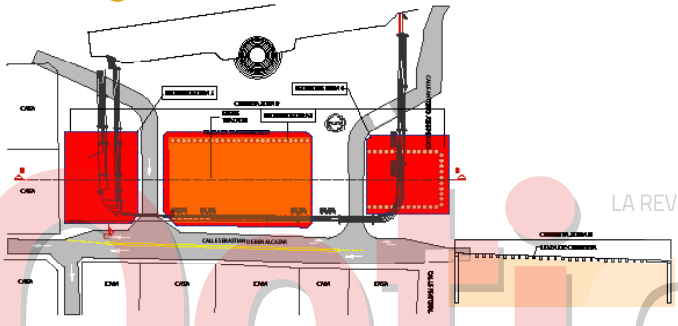
Figura 1. Área de la excavación.

Proceso de excavación y construcción de la estación.

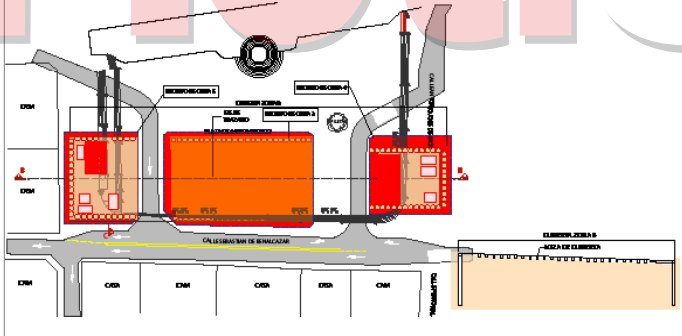
Fase 1



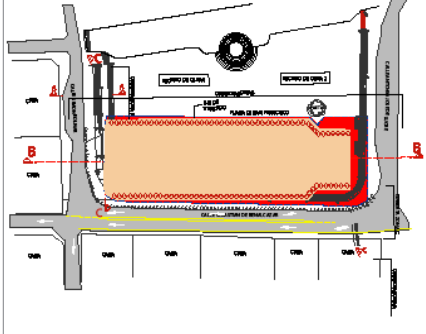
Fase 2



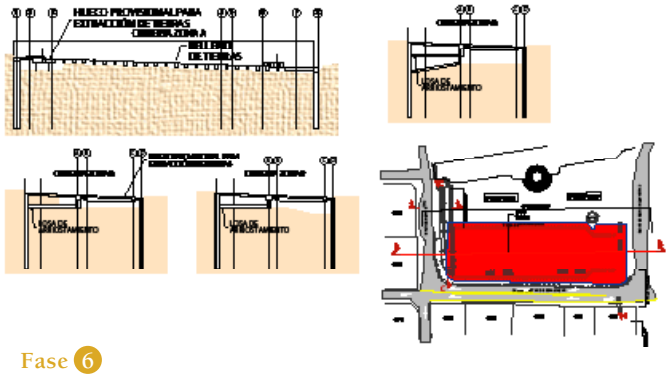
Fase 3



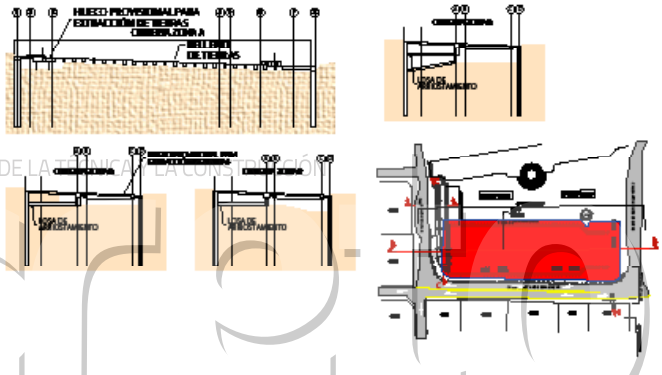
Fase 4

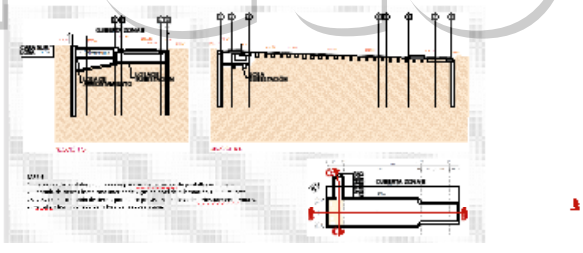


Fase 5



Fase 6





Fase 7

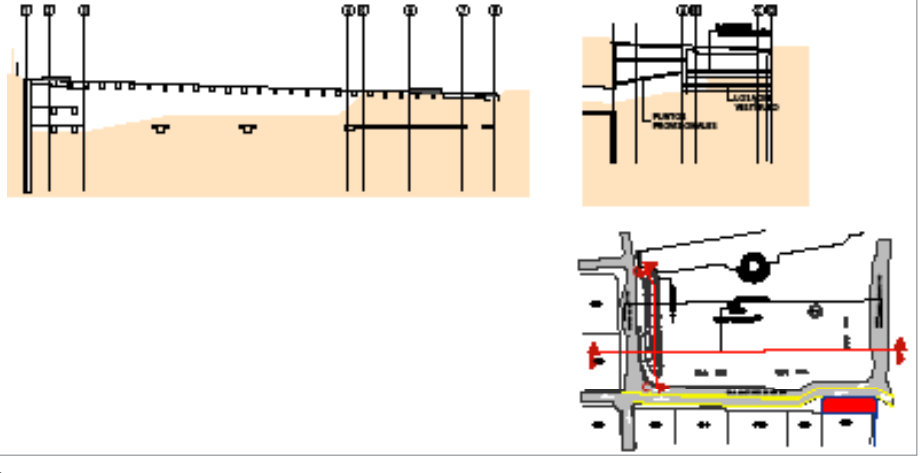


Figura 2.1. Proceso de excavación y construcción de la estación.

noticreto LA REVISTA DE LA TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Diseño de la estación

La estación del Metro se encuentra situada en el extremo suroeste de la Plaza de San Francisco, frente a la iglesia del mismo nombre; ocupa una superficie en planta de 117,24 m X 25 m y tiene unos 25 m de profundidad hasta la cota de contrabóveda.

La estación se distribuye en cuatro niveles: vestíbulo, entreplanta, mezzanina y andén. La contención lateral se ejecutó mediante pilotes de 1,50 m de diámetro, con separación de 0,33 m entre sí y profundidad de hasta 33 m. Las pantallas de pilotes se acodalan en 4 niveles (cubierta, vestíbulo, entreplanta y contrabóveda), convirtiéndose en 5, mediante una losa que alberga la subestación en el extremo sur de la estación, donde se presentan los pilotes de mayor profundidad.

Todas estas losas se ejecutaron *in situ* a medida que avanzaba la excavación.

La estación de San Francisco no debe considerarse como un ente aislado, pues además de constituir el único acceso al Metro en el Centro Histórico, se aprovechó su situación para establecer un intercambiador, en la Plaza del 24 de Mayo, con el sistema de autobuses de la ciudad.

Esta conexión se materializó mediante una galería, denominada Santa Clara, que une el intercambiador de 24 de Mayo con la estación de San Francisco.

Descripción de la geotecnia

Geológicamente la estación de San Francisco se encuentra inmersa en la formación Cangahua con espesor de 30 metros. Por debajo de la formación Cangahua se encuentra la formación Machángara, constituida en esta área por la unidad volcano-sedimentaria Guanamí, en la cual empotran los pilotes.

Las unidades geotécnicas de la formación Cangahua, que aparecen en el centro de Quito son limos arcillosos, llamados Cl, y arenas limosas, llamadas Ca, La unidad geotécnica de la formación Machángara es la unidad de basamento volcánico (VB), constituida por andesitas y dacitas de resistencia media (RCS entorno de 60 – 70 MPa).

Las principales características geotécnicas de estas formaciones se pueden resumir en la tabla 1.

Trabajos previos (arqueológicos, desmontaje piedra a piedra)

El Centro Histórico de Quito fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en el año 1978 y actualmente es el mejor conservado y menos alterado de toda América Latina.

El monasterio de San Francisco, que da nombre a la plaza donde se sitúa la estación, presenta un interior ornamentado y su acabado es ejemplo del arte de la escuela barroca de Quito en el que se funden influencias estéticas españolas, italianas, mudéjares, flamencas e indígenas.

Según registros históricos, la Plaza de San Francisco siempre fue un espacio público, escenario de la interacción social cotidiana y característica de la vida urbana. Como tal, su superficie ha sufrido modificaciones durante el tiempo, lo cual le imprime gran fuerza en la memoria colectiva. Es un espacio abierto que se identifica como un conjunto armónico significativo junto con la iglesia de San Francisco.

Para la construcción de la Estación San Francisco se realizó una prospección arqueológica inicial en 2014 y una prospección geomagnética en 2016 con la técnica del Georadar. A partir de estos estudios, y para llevar adelante el proyecto arqueológico y las obras de construcción de la estación, se retiró el material de recubrimiento de la plaza que incluyó 51.350 elementos de piedra de la superficie. Las piezas fueron retiradas manualmente mediante un proceso sistemático de codificación, embalaje, traslado, bodegaje y custodia por parte del Instituto Metropolitano de Patrimonio (IMP) en el Parque Arqueológico Rumipamba.

A partir de entonces, comenzó el rescate arqueológico con un área de excavación de 466,77 m² que arrojó, en su mayoría, evidencias incompletas de ocupación de los diversos momentos de la época Republicana. Entre los hallazgos se encontraron objetos y utensilios de cerámica y losa, además de una escalinata y bóvedas de cangahua, entre otros. Con el fin de exhibir al público estos hallazgos y como parte de la conservación de los vestigios, está previsto disponer de un espacio en el propio vestíbulo de la estación.

Con el objetivo de devolver la plaza a la comunidad en el menor tiempo posible, en diciembre de 2017 se inició el proceso de reintegración de los elementos de piedra conforme a los protocolos aprobados por el Instituto Metropolitano de Patrimonio. El 23 de marzo, antes de la celebración del Domingo de Ramos, se entregaron 5.385 m² que constituyen el recubrimiento total de la Plaza San Francisco. La entrega a tiempo permitió la realización de procesiones y caminatas por las siete cruces, así como otras actividades culturales que tienen como escenario la Plaza de San Francisco en los ritos de Semana Santa.

La entrega de la Plaza San Francisco constituye un hito importante dentro de la construcción de la Línea 1 del Metro de Quito y demostró que es posible realizar una obra de gran envergadura respetando los espacios públicos y cumpliendo todos los requerimientos técnicos en beneficio de la comunidad y de un transporte moderno, rápido y sostenible.

noticreto LA REVISTA DE LA TÉCNICA DEL CONCRETO

Proceso de excavación y construcción de la estación.

Descripción de figuras 2.1, 2.2 y 2.3

FASE 1: Preliminares recintos 1 y 2 (acotado, desmontaje, plataforma, replanteo, pantallas, pilotes, pavimentos desvío de tráfico, etc.)

FASE 2: Preliminares recintos 3 y 4 (acotado, desmontaje, plataforma, replanteo, pantallas, pilotes, pavimentos desvío de tráfico, etc.)

FASE 3: Preliminares recintos 3 y 4 (acotado, desmontaje, plataforma, replanteo, pantallas, pilotes, pavimentos desvío de tráfico, etc.)

FASE 4: Continuación e impermeabilización losas de cubiertas recintos 3, 4 y 5 zona B. Inicio extracción tierras entre pantallas zona B.

FASE 5: Reposición pavimentos histórico zona A y tramex de calles Simón Bolivar y Sucre, retiradas recintos 4 y 5 y ampliación recinto 3. Excavación entre pantallas zonas A y B. Excavación bajo cubierta, encofrado, preparación y ferralla de losa de arriostramiento zona A.

FASE 6: Puntales pantallas y retiro tierras hasta cota inferior vigas subestación zona B. Ferralla y hormigonado losa de subestación.

FASE 7: Finalización, aligeramiento e impermeabilización losa subestación y losa cubierta zona B. Desvío de tráfico y reposición pavimento histórico. Excavación entre pantallas de estación hasta cota losa de vestíbulo.

FASE 8: Encofrado, preparación de superficie, ferralla y hormigonado de losa de vestíbulo.

FASE 9: Modificación rampa de entreplanta. Preparación, ferralla y hormigonado de losa de arriostramiento.

FASE 10: Retiro puntales pantallas y excavación hasta cota inferior losa de entreplanta zona A. Preparación, ferralla y hormigonado losa de entreplanta.

FASE 11: Rampa para acceso a contrabóveda y excavación hasta rampa de acceso desde la galería.

FASE 12: Excavación hasta contrabóveda. Modificación y hormigonado rampa acceso y ejecución muro de contención eje A hasta contrabóveda.

FASE 13: Encofrado, preparación, ferralla y hormigonado parcial de la contrabóveda.

FASE 14: Retirada ultima cuña de tierras rampa de acceso. Encofrado, preparación ferralla y hormigonado final resto de contrabóveda.

FASE 15: Ejecución túnel, mezzaninas, losas de escaleras y forjados de andenes.

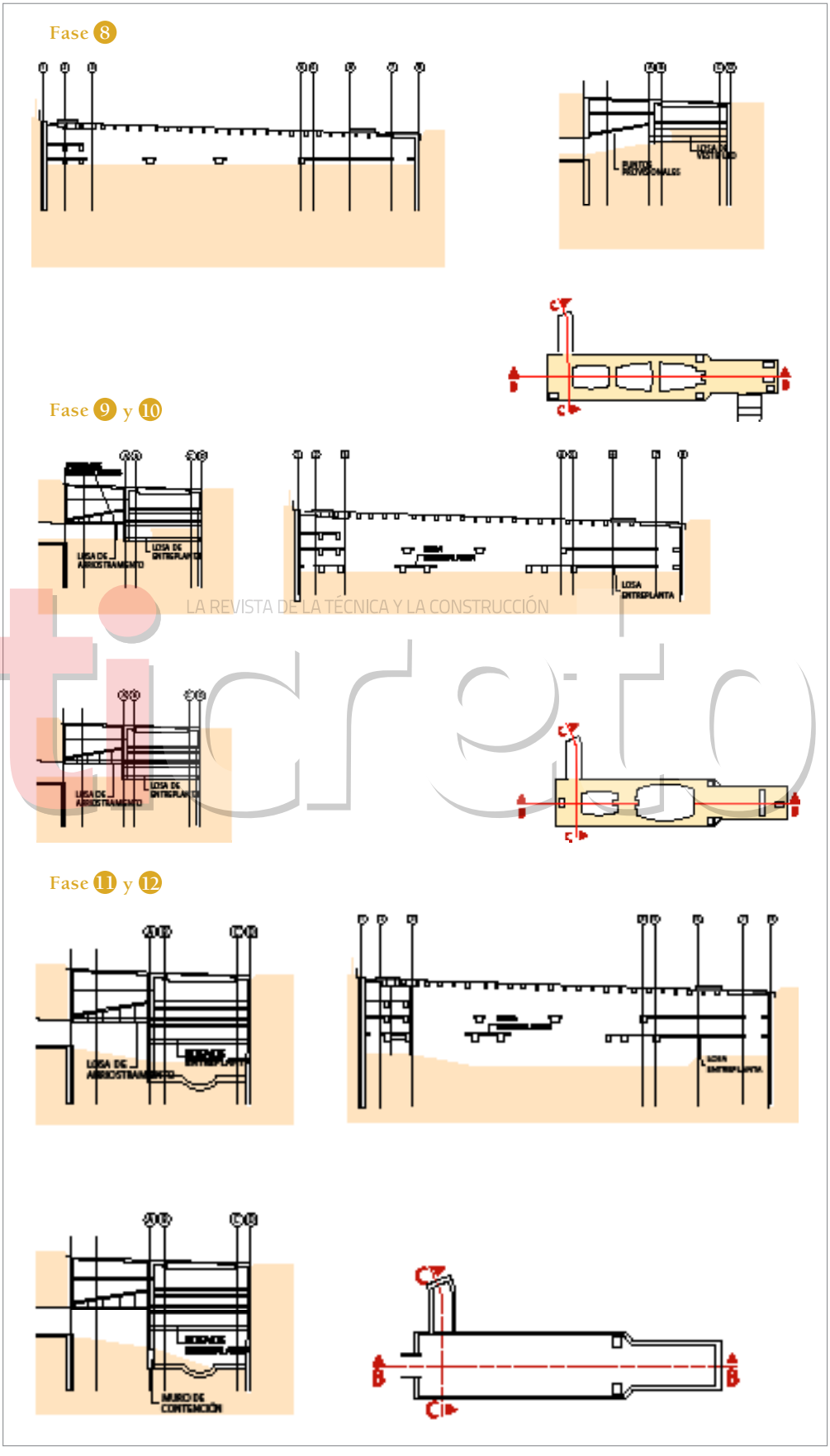


Figura 2.2. Proceso de excavación y construcción de la estación.

noticreto LA REVISTA DE LA TÉCNICA Y LA CONSTRUCCIÓN

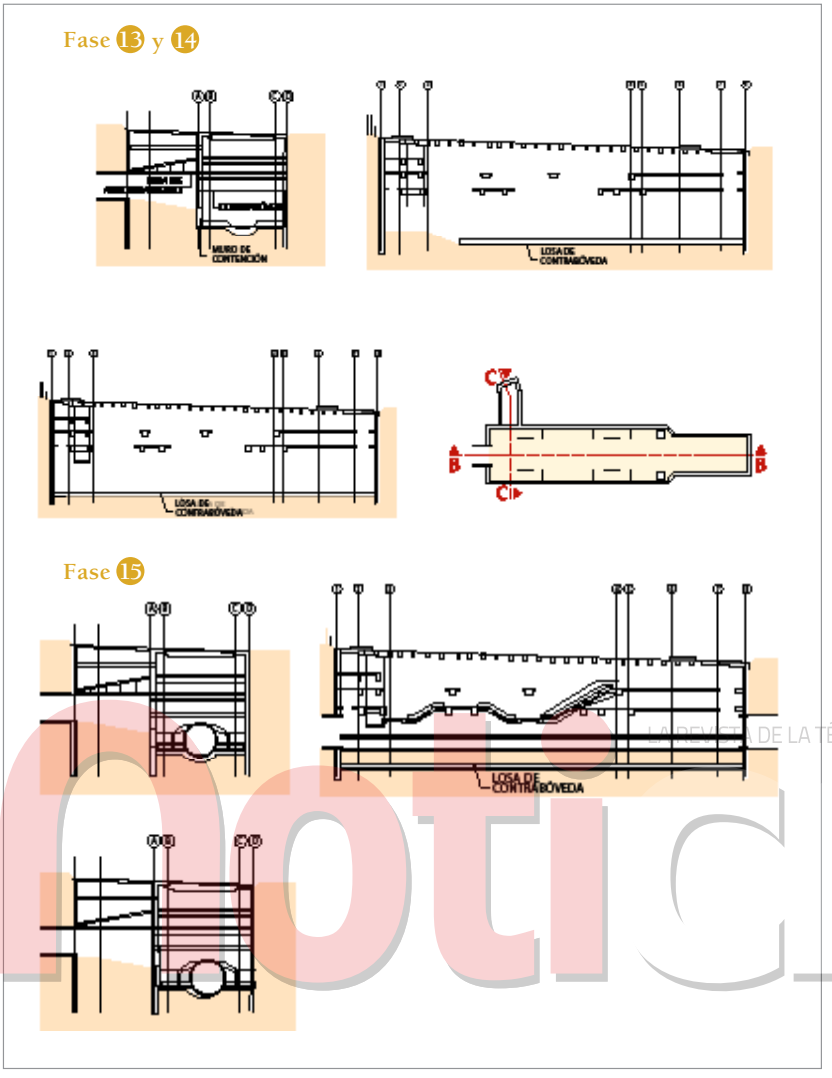


Figura 2.3. Proceso de excavación y construcción de la estación.

Monitoreo y auscultación

Por encontrarse inmersa dentro del casco histórico de la ciudad, el nivel de auscultación de la estación ha sido muy intenso desde las primeras fases de trabajo, siendo otro factor destacable que constituyen los niveles de alerta, que son más estrictos que en otras áreas de la ciudad (nivel de alerta 3 = 5 mm).

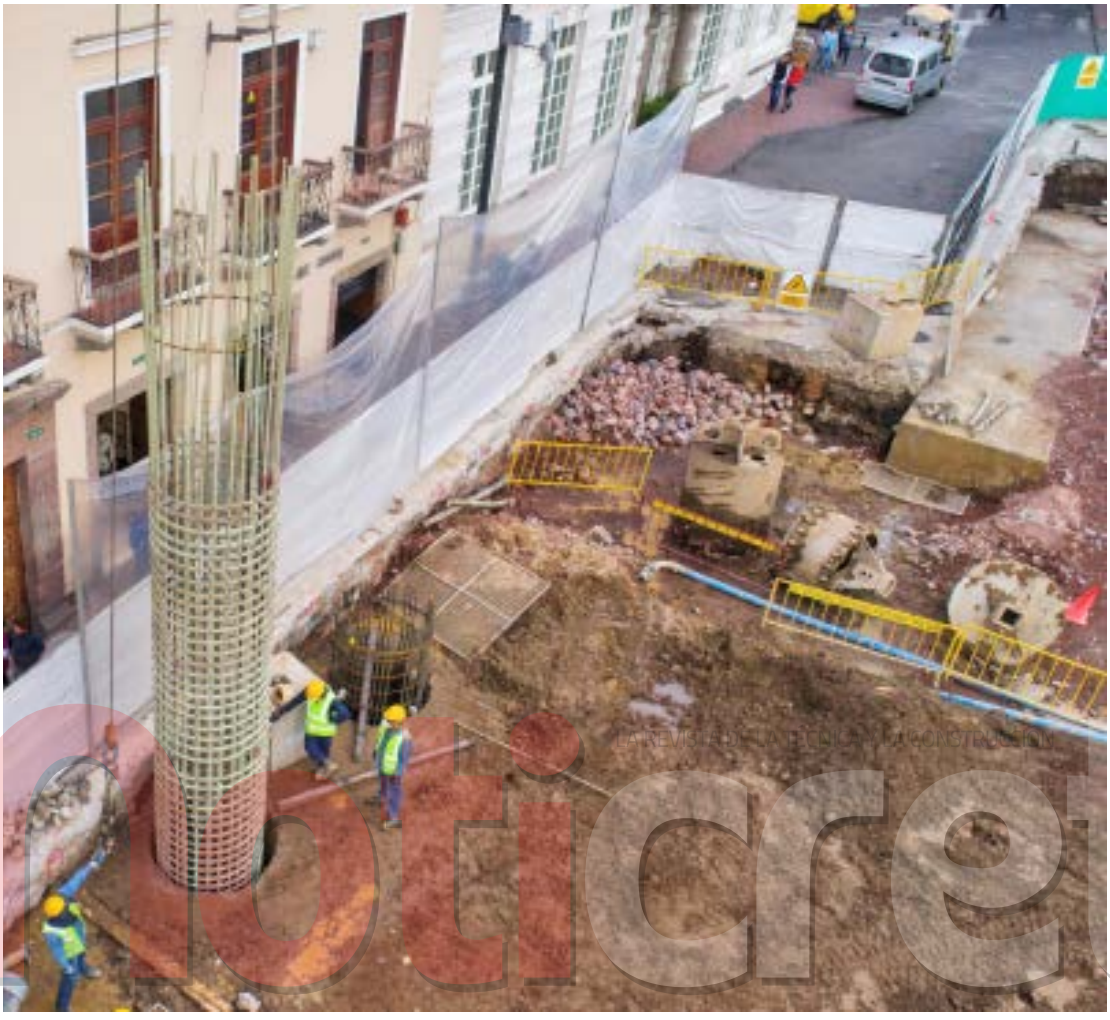
Para el control de movimientos se dispuso, como elemento diferenciador, el monitoreo continuo durante todo el período de ejecución de la estación y del paso de la tuneladora, mediante 2 estaciones automatizadas que controlaban la iglesia de San Francisco. Ambas se colocaron en septiembre de 2016; una de ellas estuvo en funcionamiento hasta marzo del 2019.

Asimismo, durante las fases de ejecución de la estación y del túnel se dispusieron un total de 85 sensores, que durante la realización de los trabajos, han realizado casi 1.300.000 lecturas.

Los pilotes fueron ejecutados con una piloteadora de 28Mtn de par de rotación.

No fue necesario ejecutar los pilotes secantes ni mejora alguna del terreno.

noticreto LA REVISTA DE LA TÉCNICA DEL CONCRETO



Los pilotes alcanzaron una profundidad máxima de 35 metros.

Los accesos a la Estación San Francisco fueron ejecutados mediante un sistema de contención formado por una cortina de micropilotes.

Procedimiento constructivo de estación y accesos

El procedimiento constructivo de la estación San Francisco se llevó a cabo usando la técnica *top-down*. Este sistema implicó la construcción de los elementos que formarán parte de la contención de tierras desde superficie, como también de la losa de cubierta de la estación sobre la que se restablecieron todos los elementos originales que conformaban la Plaza San Francisco de Quito.

La ventaja del sistema *top-down* es que permite restituir el espacio público en superficie mientras se continúa construyendo el resto de la estación, excavando los niveles inferiores y ejecutando los niveles de apuntalamiento que empatan con las diferentes losas que conforman la estación.

Los sistemas de *top-down* y tuneladora resultan eficientes en la ejecución de obras urbanas.

La estación de San Francisco presenta una consideración especial debido a lo emblemático de la zona afectada. Con el objetivo de minimizar aún más el impacto en superficie y favorecer la entrega de la plaza en el menor plazo posible, se construyó al mismo tiempo la galería de Santa Clara, habilitando la salida de tierra y el ingreso de materiales desde la 24 de Mayo liberando, en consecuencia, de afecciones a la plaza.

El proceso constructivo completo queda reflejado en la figura 2.

A diferencia de otras estaciones de la Línea 1, donde se han usado muros pantallas de espesor de entre 1 m y 1,20 m, el sistema de contención utilizado en la Estación de San Francisco ha sido a través pilotes de 1,50 metros de diámetro, que aportan la rigidez necesaria a la contención y que han conseguido reducir los desplazamientos de la pantalla al excavar la estación.

En este caso, y debido a que el nivel freático se encontraba por debajo del nivel de contrabóveda, no fue necesario ejecutar los pilotes secantes ni ejecutar mejora alguna del terreno para reducir la permeabilidad del suelo comprendido entre ellos. Por otro lado, el diseño de la contención con pilotes garantizaba la excavación en terrenos duros sin necesidad de emplear trépano, que hubiera generado vibraciones importantes en las estructuras históricas.

Los pilotes de 1,5 metros de diámetro fueron ejecutados con una piloteadora de 28Mtn de par de rotación y alcanzaron profundidad máxima de 35 metros. En dos meses y medio se ejecutaron 185 pilotes, completando una medición total de 5.535 metros. Cuando fue necesario, se emplearon herramientas de widia (carburo cementado) para perforar los terrenos duros.

En los dos testeros de la estación, y debido a que la tuneladora no puede perforar elementos armados con acero, se empleó armadura de fibra de vidrio para facilitar el corte sin afectar los discos y picas de la rueda de corte de la máquina.

Una vez excavada la estación según el proceso ya descrito, y haciendo uso de la Galería de Santa Clara para evacuar las tierras antes de la entrada de la tuneladora, se ejecutaron desde el interior de estos, paraguas de micropilotes en ambos portales.

Los paraguas de micropilotes son sistemas formados por perforaciones que van armados con tubos de acero y que se inyectan en toda su longitud. Su objetivo es formar una bóveda previa que envuelva la parte superior de la zona a excavar por la tuneladora para sostener el terreno y reducir los asentamientos evitando daños en superficie. Los paraguas de micropilotes en la Estación San Francisco tienen 200 mm de diámetro y están armados con tubería de acero N80 de 139 mm de diámetro y 8 mm de espesor. Los accesos a la Estación San Francisco también fueron ejecutados mediante un sistema de contención formado por una cortina de micropilotes.

La primera línea de Metro de Quito, al cierre de esta edición de Noticreto se encuentra en avanzado estado de ejecución. La obra civil de las estaciones está totalmente concluida, y ya se están llevando a cabo las primeras pruebas con pasajeros, estimándose su inauguración para finales del año 2019. La construcción está cumpliendo todos los hitos previstos en la ejecución gracias a la coordinación y el compromiso de todos los actores: entes estatales, banca multilateral y firmas que intervienen en el proyecto, desde el diseño a la ejecución, y por ello es un ejemplo a seguir por otros proyectos similares a escala internacional. A nivel técnico, se confirma la eficacia de las técnicas empleadas de *top-down* y tuneladora para obras urbanas, mostrando que gracias a ello es posible acceder directamente a los espacios públicos de interés histórico, turístico y social sin afectarlos.