

Diseño de caverna en el centro de Los Ángeles



Carlos Herranz Calvo
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
PMP, Senior Tunnel Engineer.
Mott MacDonald



Zsolt Horvath
Tunnel Engineer. Mott MacDonald



Justin Lianides
PE, Tunnel Engineer. Mott MacDonald



Derek Penrice
PE, Principal Project Manager.
Mott MacDonald

Resumen

La estructura de mayor complejidad técnica incluida en el proyecto de metro Regional Connector Transit Corridor (RCTC) en el centro de Los Ángeles es una caverna para cruce de vías excavada en mina. La caverna, que se ejecutará con el método de excavación secuencial o SEM (*Sequential Excavation Method*), será la mayor excavación en mina realizada en la ciudad de Los Ángeles. El artículo describe el planteamiento integrado de diseño y construcción llevado a cabo para optimizar plazos y necesidades de sostenimiento asegurando la integridad de las estructuras existentes. Además, se presenta el diseño del revestimiento final incluyendo su análisis sísmico, y la descripción de la impermeabilización, condicionada por la presencia de gases en el terreno.

Palabras clave

SEM, NATM, Metro, caverna, asientos, análisis sísmico, FLAC, FLAC3D

Abstract

The most technically complex aspect of the Regional Connector Transit Corridor (RCTC) metro project in Downtown Los Angeles is the mined crossover cavern, the largest tunneled excavation contemplated in Los Angeles, to be constructed using Sequential Excavation Methods (SEM). This paper describes the integrated geotechnical design and construction approach developed to maximize construction productivity while ensuring the stability and performance of existing infrastructure. Additionally, the final lining design is presented, including the seismic analysis performed, and the waterproofing system defined in gassy ground conditions.

Keywords

SEM, NATM, Metro, cavern, settlement assessment, seismic analysis, FLAC, FLAC3D, waterproofing

1. Descripción del proyecto

El proyecto Regional Connector Transit Corridor es una ampliación de la actual red de Metro de Los Ángeles en su distrito financiero, promovido por Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority (LACMTA). El nuevo tramo conectará las líneas existentes Gold, Blue y Expo, permitiendo a los usuarios viajar desde Pasadena a Culver City o Long Beach, y desde Santa Mónica a la zona este de Los Ángeles.

El contrato de diseño y construcción fue adjudicado en 2014 por 927 millones de dólares a Regional Connector Construc-

tors (RCC), UTE formada por Skanska y Traylor Brothers, que cuenta con Mott MacDonald (MM) como responsable principal del diseño. Los trabajos de desvío de servicios afectados se iniciaron a comienzos de 2015 y se espera que la nueva línea esté en funcionamiento en 2020.

El nuevo trazado tiene una longitud total de 3,06 km e incluye 1,6 km de túneles gemelos ejecutados con tuneladora (TBM), 1,1 km de túnel ejecutado en *cut-and-cover*, tres nuevas estaciones (1st St/Central Avenue, 2nd St/Broadway Avenue and 2nd Place/Hope Street) y 0,3 km de trazado en superficie. Por

último, una de las estructuras de mayor complejidad técnica es la caverna para cruce de vías que se ejecutará por métodos tradicionales al este de la estación de 2nd/Broadway.

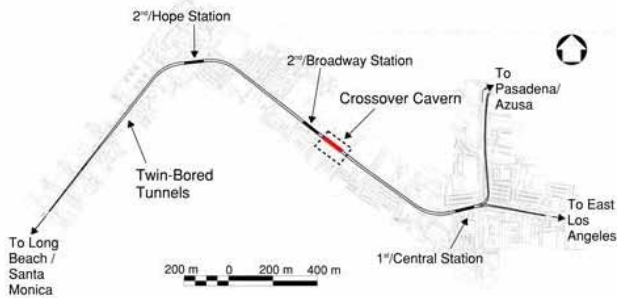


Fig. 1. Planta general del proyecto

La caverna tendrá 87,5 m de longitud, 11,0 m de altura y 17,7 m de ancho, y será excavada íntegramente en la formación geológica Fernando, con una cobertura de aproximadamente 15 m.

2. Estructuras existentes

El diseño de la caverna está fuertemente condicionado por su ubicación en entorno urbano, específicamente por la afectación potencial a un colector ejecutado en mina de 3 m x 3 m situado 6,7 m sobre la clave de la caverna y a tres edificios, incluyendo el edificio Higgins, de valor histórico, y la sede de la policía de Los Ángeles.

3. Otros condicionantes

La ejecución del cruce de vías en caverna, la geometría de la misma y sus fases de construcción se derivan de los siguientes condicionantes:

- Ancho de plataforma en la estación de 2nd/Broadway: determina el interje de vías y, por tanto, el ancho de la caverna.

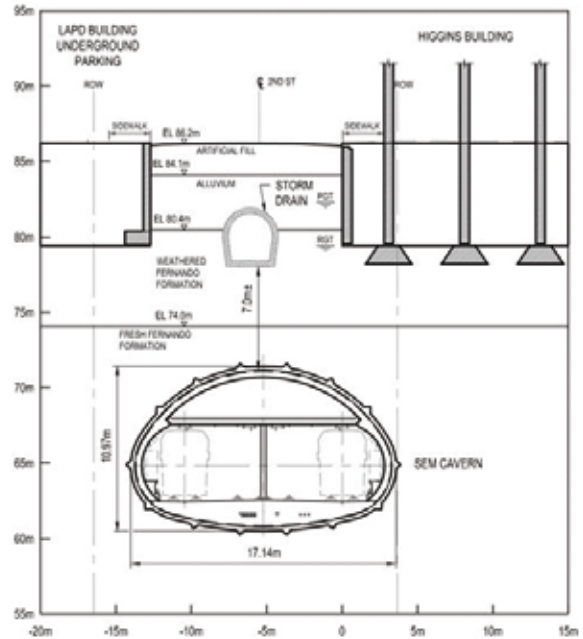


Fig. 3. Sección transversal (al este) y vista 3D (al oeste)



Fig. 2. Planta

- Los tres edificios en el entorno de la caverna tienen un nivel de sótano que se extiende bajo la fachada hasta alcanzar el límite de la acera (ver figura 3), lo que imposibilita la ejecución de la caverna en *cut-and-cover* como prolongación de la estación.

- Fases de ejecución del proyecto: RCC contemplaba en su oferta el vaciado de la estación y la ejecución del túnel de línea norte desde la estación de 1st/Central de forma previa a la ejecución de la caverna. A continuación, se excavaría en mina la caverna desde 2nd/Broadway, incluyendo la demolición de las dovelas del túnel de línea norte, y se procedería a la construcción del túnel de línea sur en el mismo sentido que el norte, calando en el extremo oriental de la caverna y arrasando la tuneladora a través de la caverna hasta la estación.

- Cimentación de las oficinas del LA Times: la estación de 2nd/Broadway se ejecutará en *cut-and-cover*, y como se puede ver en la figura 2, su geometría sigue la típica configuración con ensanches en sus extremos para recibir a las tuneladoras. Durante la fase de diseño, se comprobó que la cimentación del LA Times imposibilitaba el ensanche necesario para albergar la longitud total de la tuneladora, lo que obligaría a la desviación de su trazado hacia el sur al aproximarse a la estación. Esta situación dificultaba el planteamiento de galerías laterales para la ejecución de la caverna al limitar excesivamente el espacio para la galería central.

- Límites de expropiación: en el lado sur, el límite de expropiación (ROW en la figura 3) se encuentra a aproximadamente 5 cm del límite teórico de excavación de la caverna.

- Ventilación: la caverna debe albergar un plenum con sección aproximada de 23 m² (250 sf) y un muro central donde sea compatible con el cruce de vías para independizar la circulación de aire en ambas vías.

- Instalaciones y losa de transición: En el interfaz con la estación y con los túneles de línea se prevé la instalación de una losa de transición que minimice los asentamientos diferenciales que pudieran ocurrir entre estructuras con distinta rigidez; esto, unido al gran número de instalaciones que deben canalizarse en estas secciones, lleva a una reducción local del espesor de la contrabóveda en el interfaz con la estación.

- Arrastre de la TBM a través de galería derecha: para albergar los macizos de hormigón que soportarán la máquina es necesario un ensanche de la sección tipo en el extremo oriental de la caverna.

- Corredores de emergencia: las escaleras necesarias para permitir a los pasajeros ascender desde cota de vía a los corredores de emergencia elevados en el extremo oriental de la caverna condiciona también el ensanche de la sección en esa zona.

4. Secciones tipo

Los condicionantes anteriormente descritos llevaron a la definición de distintas secciones de excavación tipo, con dos geometrías principales, sección típica y sección de ensanche, con arranque de muros inclinados definida para el extremo oriental de la caverna. A su vez, para la estructura permanente, estas secciones se subdividen según presencia y espesor del muro central, espesor de la losa de ventilación y espesor de la contrabóveda (fig. 4).

5. Sostenimiento y revestimiento

El sostenimiento inicial de la caverna incluye los siguientes elementos:

- 30,5 cm (12 in) de hormigón proyectado reforzado con fibras de 34.5 MPa (5.000 psi) de resistencia a compresión simple.

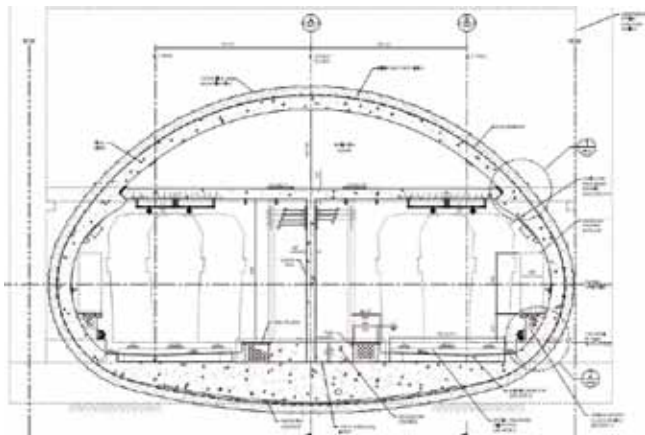
- Cerchas reticulares 130/6/10 (ver DSI-2015) en el perímetro y contrabóveda definitiva y 220/12/10 en el muro central provisional con acero tipo Grado 70 ($f_y = 483$ MPa).

- Paraguas pesado de micropilotes de 18,2 m (60 ft) de longitud ejecutado desde la estación. Se trata de una doble corona de micropilotes de 140 mm (5.5 in) de diámetro exterior y 13 mm (0.5 in) de espesor y acero tipo ASTM A53 Grado B ($f_y = 240$ MPa).

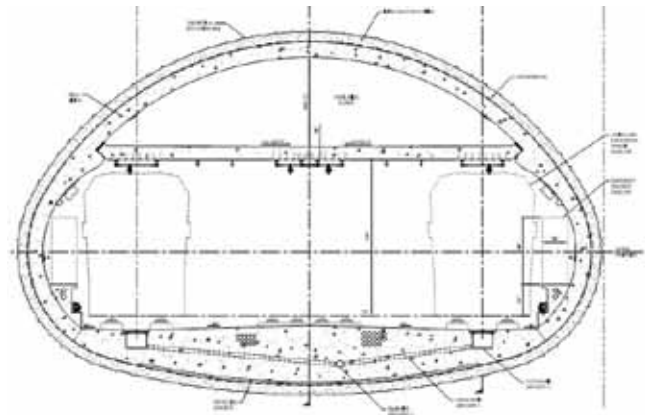
Además del sostenimiento tipo, diseñado para las condiciones del terreno esperables de acuerdo con la información geotécnica disponible, se incluyen también una serie de medidas (“*tool box items*”) a emplear en caso de ser necesario durante la ejecución del túnel si las condiciones del terreno lo requirieran.

El revestimiento final se ejecutará con hormigón in situ de 28 MPa (4.000 psi) y tendrá un espesor de 45,7 cm en clave y hombros y variable en contrabóveda, con un máximo de 1,75 m.

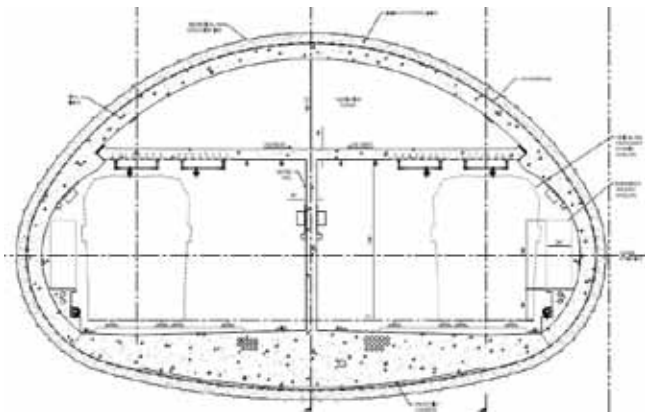
La estructura final incluye una losa para ventilación de la caverna en caso de incendio, con accesos desde el nivel de vía en su extremo oriental para mantenimiento de las rejillas de ventilación, y un muro central de separación en los tramos donde es posible su ubicación, fuera del cruce de vías.



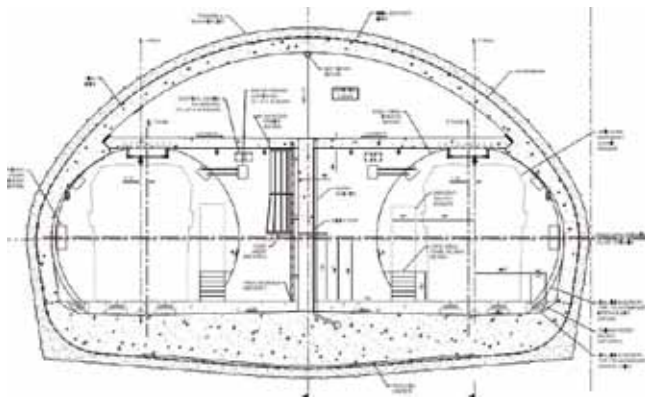
Revestimiento Final Tipo 1B.Transición a estación



Revestimiento Final Tipo 1, sin muro central



Revestimiento Final Tipo 1, con muro central



Revestimiento Final Tipo 2, muro testero

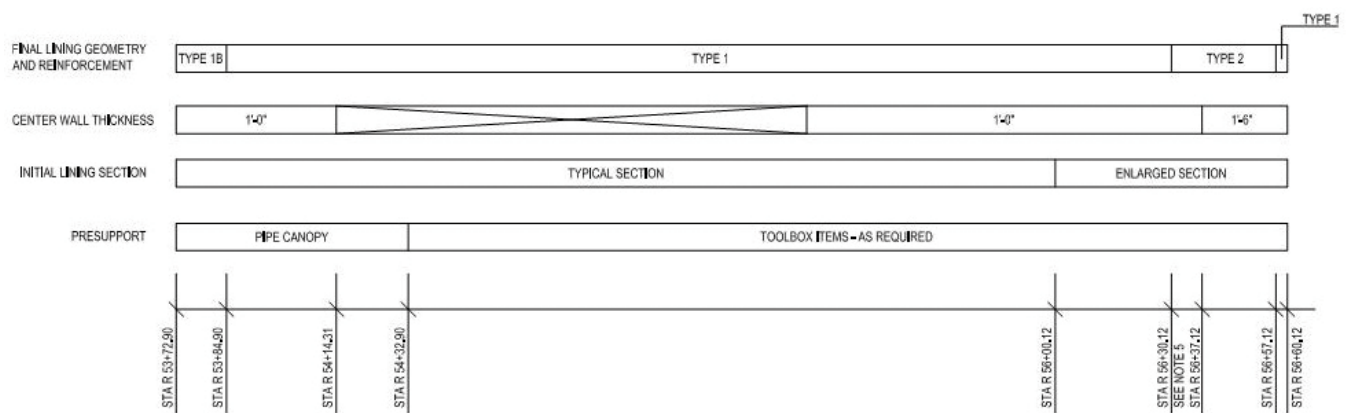
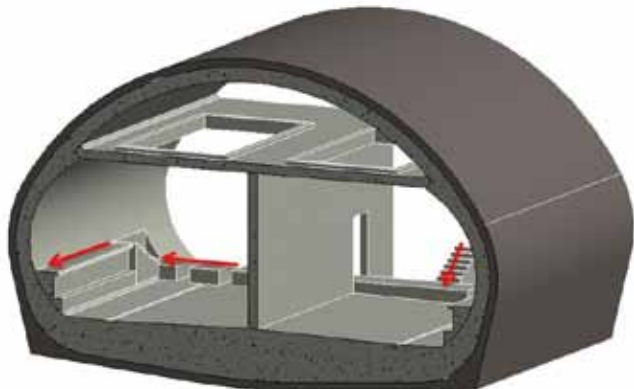


Fig. 4. Secciones tipo. Definición y distribución

a) Vista del lado este



b) Vista desde la estación

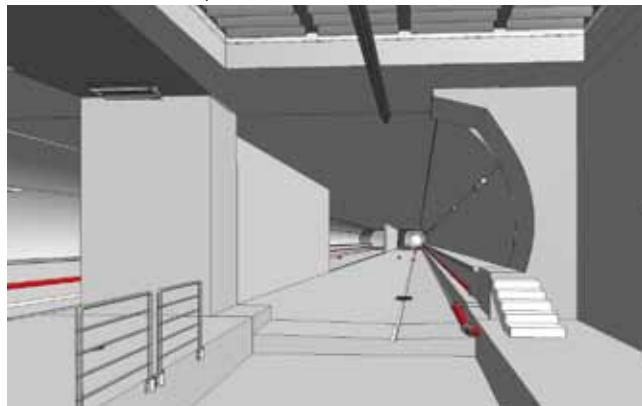


Fig. 5. Vistas de la caverna en 3D. Modelos con Revit

Por último, para permitir la evacuación de pasajeros en caso de emergencia, la sección tipo de la caverna incluye pasarelas de evacuación a ambos lados con escaleras a cota de carril en el extremo oriental de la caverna y en la estación (figuras 5a y 5b).

6. Geología y parámetros geotécnicos

La caverna se excavará íntegramente en la formación Fernando. Se trata de una limolita arcillosa masiva con un grado de alteración sano a ligeramente meteorizado a cotas de frente de excavación.

La litología en el entorno de la caverna puede considerarse homogénea de estratos subhorizontales, con un espesor de relleno artificial de 2 a 3 m bajo el que subyace un nivel aluvial de aproximadamente 3 a 5 m de potencia. La formación Fernando aparece bajo este horizonte con un nivel superior alterado, por encima siempre de la clave del túnel.

La relativamente baja permeabilidad de la formación Fernando condiciona la hidrogeología de la zona, con un acuífero superficial a cota 82 m situado sobre el techo de la misma, y un acuífero regional a cota 79 m. La clave de la caverna se sitúa aproximadamente a cota 71,6 m.

El flujo de agua durante la excavación de la caverna se espera que sea muy reducido, con aportaciones, si las hubiera, asociadas a discontinuidades de la formación Fernando y niveles granulares aislados. Por este motivo, el diseño del sostenimiento se realiza en condiciones no drenadas sin carga de agua mientras que el cálculo del revestimiento a largo plazo se lleva a cabo con parámetros drenados y carga hidrostática.

A continuación se resumen los parámetros geotécnicos empleados en el diseño:

| Unidad | Descripción | E [MPa] | K0 | Densidad Unitario [KN/m ³] |
|------------------|----------------------------------|---|------|--|
| Af | Relleno antrópico | 28,7 | 0,5 | 18,9 |
| Qal ₂ | Aluvión (de grano grueso) | 57,5 | 0,5 | 18,5 |
| Tf-1 | Formación Fernando (meteorizado) | 120 (techo) 191 (muro) | 0,6 | 18,9 |
| Tf-2 | Fernando Formation (sano) | 191 (techo) 287 (a profundidad de 30m) | 0,65 | 19,3 |

Tabla 1. Parámetros de diseño (I)

| Ud. | Parámetros Drenados | | | Parámetros Sin Drenar | | |
|------------------|---------------------|----------|------|-----------------------|---------|------|
| | c' [kPa] | φ' [deg] | v' | c (Su) [kPa] | φ [deg] | v |
| Af | 0 | 34 | 0,35 | 0 | 34 | 0,35 |
| Qal ₂ | 9,6 | 38 | 0,35 | 9,6 | 38 | 0,35 |
| Tf-1 | 71,8 | 27 | 0,4 | 383,0 | 0 | 0,49 |
| Tf-2 | 143,6 | 27 | 0,4 | 478,8 | 0 | 0,49 |

Tabla 2. Parámetros de diseño (II)

El módulo de elasticidad de la formación Fernando se ha considerado variable en profundidad, con valores basados en resultados de presiómetros, ensayos triaxiales sin drenaje, correlaciones con las velocidades de ondas de corte obtenidas de ensayos dinámicos, y experiencia local en proyectos anteriores.

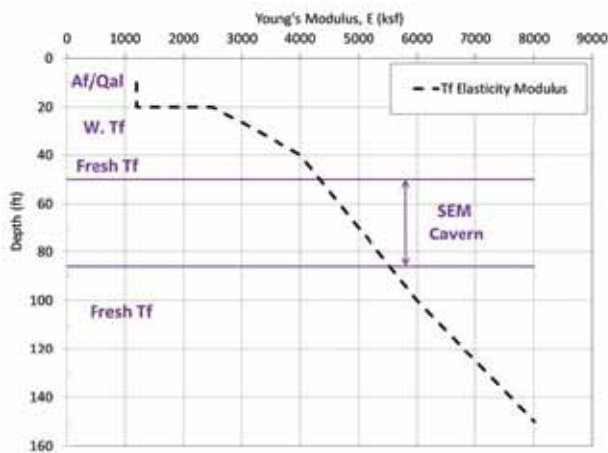


Fig. 6. Módulo de elasticidad variable en la Formación Fernando

A diferencia de las estructuras superficiales, que basan el análisis sísmico en fuerzas de inercia originadas por movimientos en su cimentación, en estructuras subterráneas el efecto del terremoto se evalúa en términos de deformaciones impuestas a la estructura por el movimiento del terreno circundante, cuyo efecto depende a su vez de la rigidez relativa terreno-estructura y su interacción.

El diseño frente a sismo del revestimiento se ha realizado de acuerdo con las especificaciones de metro de Los Ángeles (MRDC-2013), que contempla dos escenarios: terremoto de diseño máximo (MDE en sus siglas en inglés) y terremoto de diseño operativo (ODE en sus siglas en inglés), definidos como sigue:

- MDE: con un periodo de retorno de 2.500 años, la estructura debe garantizar su estabilidad estructural para esta sollicitación máxima. El objetivo es evitar las consecuencias catastróficas que tendría el colapso del túnel para las estructuras de su entorno.
- ODE: este segundo nivel de acción sísmica corresponde a un periodo de retorno de 150 años, su objetivo es garantizar que el servicio de la línea pueda ser restaurado con reparaciones

mínimas en el caso de que se dé un terremoto de intensidad esperable durante la vida útil de la obra.

Los datos sísmicos para el diseño del revestimiento se obtuvieron con el programa comercial Shake2000 para la columna de cálculo tipo de la caverna.

7. Método constructivo y referencias recientes

La caverna se ejecutará según los principios del Nuevo Método Austriaco (NATM en sus siglas en inglés), que en Estados Unidos recibe el nombre de SEM (*Sequential Excavation Method*). La Federal Highway Administration describe el SEM en su manual de túneles de carretera (FHWA-2009) como un concepto basado en el entendimiento del comportamiento del terreno y su reacción a la ejecución de una apertura subterránea: el sistema moviliza la capacidad de autosostenimiento del terreno optimizando las necesidades de soporte.

La aplicación del SEM o Nuevo Método Austriaco en suelos y rocas blandas en entorno urbano implica riesgos específicos que deben ser considerados de forma adecuada. Como se indica en HSE (1996), el Nuevo Método Austriaco no es un método inseguro per se, siempre y cuando se tomen las precauciones necesarias en el diseño y construcción de la obra.

Ejemplos de éxito en su aplicación reciente en entornos urbanos son la estación de Beacon Hill en Seattle (Murray et al.-2006) o la caverna de Stepney Green en Londres (Tucker-2014), con Mott MacDonald como diseñador principal en ambos proyectos.

8. Fases de ejecución

Como se ha indicado con anterioridad, el esquema global del proyecto contempla el vaciado de la estación y la ejecución del túnel norte de forma previa a la excavación y sostenimiento de la caverna.

La configuración geométrica de la sección y sus fases de construcción son el resultado de una estrecha colaboración entre RCC y MM con el objetivo de compatibilizar los condicionantes contractuales que limitan los desplazamientos inducidos en las estructuras adyacentes con la optimización de plazos de ejecución y necesidades de sostenimiento. El trabajo conjunto de diseñadores y contratistas es esencial para el éxito del SEM, y un esquema de diseño y construcción es perfecto para favorecer la cooperación entre ambos.

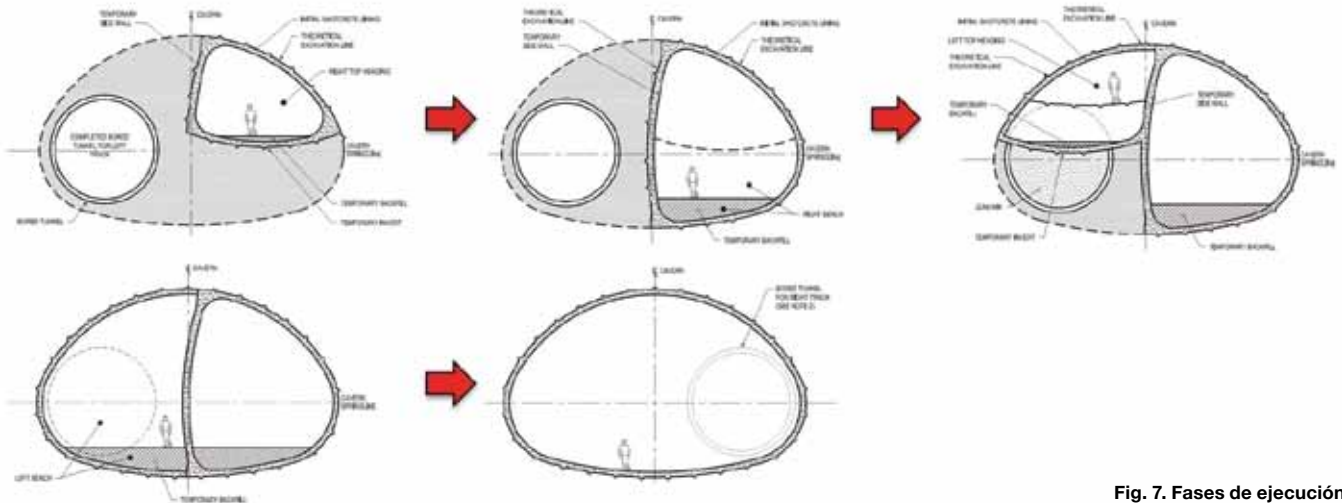


Fig. 7. Fases de ejecución

La excavación de los primeros 18,2 m (60 ft) de la caverna se realizarán al abrigo de un paraguas pesado de micropilotes. Los micropilotes se dispondrán en doble corona con espaciamentos entre ejes de 30,5 cm (1 ft) en direcciones radial y circunferencial, cubriendo un arco de 90°.

La figura 8 muestra la división de la sección en dos galerías principales que serán a su vez ejecutadas en avance y destroza, el muro provisional que las separa tendrá 40,6 cm (16 in) de espesor y las fases de avance en cada galería se cerrarán con una contrabóveda provisional de 30,5 cm (12 in) de espesor. Las galerías de avance se ejecutarán con una longitud de pase de 0,9 m (3 ft) mientras que las destrozadas se excavarán con pases de 1,8 m (6 ft). Se prevé la ejecución de cada subdivisión en toda la longitud de la caverna de forma previa al inicio de la siguiente fase.

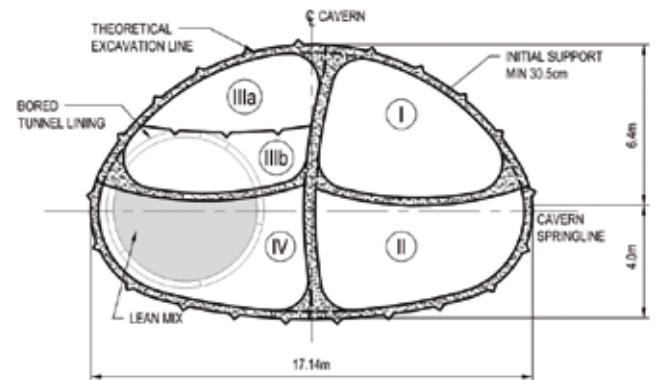


Fig. 8. División de la sección

La excavación de la galería izquierda incluye la demolición de las dovelas del túnel Norte, que previamente se habrá rellenado con un mortero de densidad controlada de al menos 1 MPa (150 psi). La longitud de las dovelas es de 1,52 m (5 ft), por lo que el avance de la galería izquierda se dividió en un nivel superior que será excavado y soportado en dos pases de 0,9 m (3 ft) (IIIa en la figura 8) y un nivel inferior (IIIb) que contempla la demolición de las dovelas.

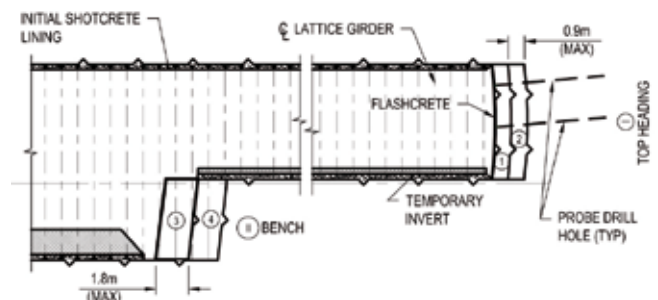


Fig. 9. Perfil longitudinal. Galería derecha

El ancho total de la caverna llevó durante las fases iniciales del diseño a la consideración de una configuración con galerías laterales y una central, pero la cimentación del LA Times condicionaba el trazado de la tuneladora en las proximidades de la estación, lo que reduciría excesivamente el pilar central entre

las galerías laterales. Esto, unido al tamaño de la maquinaria que RCC, planteó como preferencia y a la calidad del terreno, llevó finalmente al esquema de dos galerías principales divididas en avance y destroza descrito.

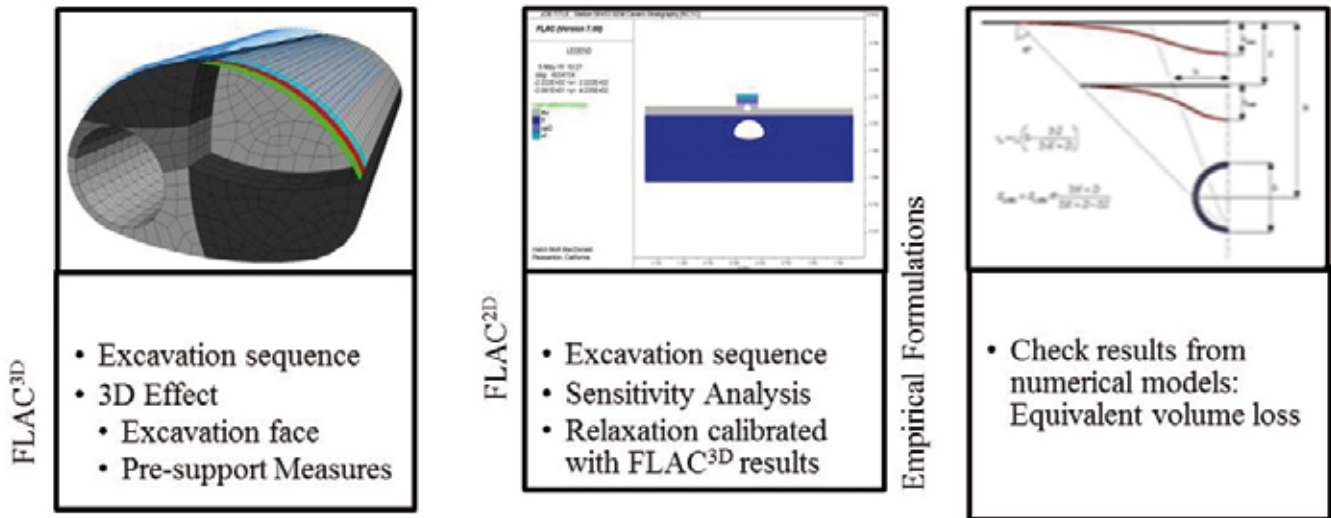


Fig. 10. Optimización del empleo de modelos numéricos

9. Diseño del sostenimiento

El análisis de una excavación en SEM requiere la simulación detallada de la geometría de la sección y estructuras existentes, características del terreno, sostenimiento y fases de ejecución.

La modelización numérica de la ejecución de la caverna se realizó con los programas comerciales FLAC y FLAC3D (Itasca). El modelo tridimensional con FLAC3D permite un análisis más preciso de la contribución del frente de excavación en la estabilidad del sistema, así como la valoración de sistemas de presostenimiento, mientras que los modelos bidimensionales con FLAC, calibrados con los resultados del 3D, permiten realizar análisis de sensibilidad y estudiar distintas alternativas con mayor rapidez. Los resultados obtenidos con los modelos numéricos deben compararse con formulaciones empíricas a modo de chequeo.

El empleo de modelos tridimensionales lleva tiempo en su preparación y proceso, pero es fundamental en este caso por las razones mencionadas. Los modelos bidimensionales tienen como limitación la necesidad de definir la relajación del terreno que ocurre antes de la colocación del sostenimiento, y que suele expresarse como un porcentaje de la tensión natural a cota de túnel, al ser el resultado de la redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación. La relajación puede estimarse aplicando el método de convergencia-confinamiento (Aftis 2001), que se basa en soluciones analíticas cerradas para túneles de sección circular excavados a sección completa en

terrenos con tensiones uniformes y comportamiento elástico o elastoplástico (Bernaud et al., 1991; Bernaud y Rousset, 1992, Nguyen et al., 1993 o Carranza y Fairhurst, 2000), lo que difiere claramente de este caso, con una geometría ovalada excavada en fases, terreno variable y excavación relativamente superficial.

El diseño del sostenimiento se llevó a cabo con el modelo bidimensional calibrado, simulando el mismo con dos tipos de elementos estructurales (elástico o elastoplástico), para reproducir el comportamiento dúctil del hormigón proyectado reforzado con fibras y para identificar zonas que requieran armado local en un proceso iterativo. El endurecimiento del hormigón proyectado se introdujo en el modelo considerando los estudios del Dr. Chang reproducidos por Thomas (2008).

La capacidad estructural de las secciones definidas se realizó de acuerdo con ACI 318 (2014) y con los requerimientos técnicos de la administración, MRDC (2013); se realizó también un chequeo adicional con TR 63 (2007).

Dada la geometría de la caverna, la intersección del muro provisional con la clave y contrabóveda requiere un armado local pasante entre la galería derecha e izquierda.

En general, la contribución de las cerchas no se considera en el cálculo de la capacidad de las secciones de hormigón proyectado, con la excepción del muro provisional, en el que las cerchas reticulares de cuatro barras (220/12/10, DSI-2015)

espaciadas 0,9 m (3 ft) entre ejes son necesarias para resistir la flexión que se produce al excavar el avance y la destroza de la galería izquierda, con momentos superiores a la capacidad del hormigón proyectado sin refuerzo.

La estabilidad del frente de excavación se analiza con formulaciones empíricas (Vermeer et al. 2002; Kavvas et al. 2009) y con el método *Strength Reduction Factor* con FLAC3D, llegando a la conclusión de que el frente es estable sin la necesidad de medidas sistemáticas de presostenimiento, lo que se atribuye a la alta resistencia al corte sin drenaje de la formación Fernando.

10. Medidas adicionales de sostenimiento

El diseño de túneles en SEM debe contemplar la posibilidad de encontrar condiciones del terreno distintas a las previstas de acuerdo con la investigación geotécnica realizada. En caso de darse esta circunstancia o registrarse deformaciones por encima de los límites esperados, se incluyen una serie de medidas (*'tool box items'*) cuya aplicación y distribución se discutirá y decidirá en obra con el acuerdo de contratista y diseñador. En este caso estas medidas incluyen:

- Presostenimiento mediante bulones autoperforantes de 32 mm de diámetro y 4,57 m (15 ft) de longitud.
- Machón central.
- Bulonado del frente de excavación con bulones de fibra de vidrio de 25 mm de diámetro y 12,19 m (40 ft) de longitud.
- Subdivisión de la excavación y sostenimiento (*pocket excavation*).
- Drenaje provisional.

11. Diseño del revestimiento

Existen referencias en la actualidad sobre la colaboración del sostenimiento a largo plazo para resistir las cargas que habitualmente se consideran exclusivamente absorbidas por el revestimiento. Este planteamiento ha sido empleado en el Crossrail en Londres (Picket, 2014), con la particularidad en ese caso de que la impermeabilización entre sostenimiento y revestimiento se ha realizado mediante la proyección del material impermeabilizante en lugar del clásico geotextil y membrana de PVC. Esta configuración permite considerar una cierta adherencia en el contacto entre sostenimiento y revestimiento que facilita el comportamiento conjunto de ambas

estructuras. Sun (2014) analiza las distintas configuraciones posibles dependiendo de la existencia y características de la impermeabilización entre sostenimiento y revestimiento, señalando que en sistemas con lámina de impermeabilización la adherencia en el contacto es prácticamente nula, lo que imposibilita la consideración de un espesor conjunto.

En el caso de la caverna del Regional Connector, la impermeabilización se realiza con una lámina de HCR (*hydrocarbon-resistant*), indicada por Metro para impedir la entrada de gases, presentes en el terreno de acuerdo con la información geotécnica disponible. Además, las especificaciones de Metro de Los Ángeles (MRDC 2013) impiden considerar la colaboración del sostenimiento a largo plazo.

El análisis del revestimiento se ha realizado con FLAC empleando el modelo bidimensional desarrollado para el diseño del sostenimiento. El modelo parte de la última fase de ejecución de la caverna, que corresponde a la demolición del muro provisional, activando el revestimiento y realizando la transferencia de carga del sostenimiento al revestimiento. Hay que destacar que para que esta transferencia de carga sea efectiva en el modelo, no basta con eliminar el sostenimiento para simular su degradación, sino que debe implementarse mediante un ciclo de cálculo llevando a cero los esfuerzos internos y rigidez del sostenimiento (Sun et al., 2013).

Las cargas consideradas incluyen, además de las cargas del terreno, la presión hidrostática y la carga sísmica. Otras solicitaciones de menor entidad incluyen las cargas transmitidas por la losa del conducto de ventilación y el peso propio de sus ménsulas de apoyo y las cargas del material rodante sobre la contrabóveda.

Adicionalmente, se analizó con el programa estructural SAP2000 el caso en el que el sostenimiento aun absorbe las cargas transmitidas por el terreno pero debido a filtraciones a través del mismo el revestimiento comienza a soportar la presión hidrostática y su peso propio. Dependiendo de la geometría de la excavación y de la magnitud de las cargas, este caso puede llegar a condicionar el diseño del revestimiento en determinadas áreas.

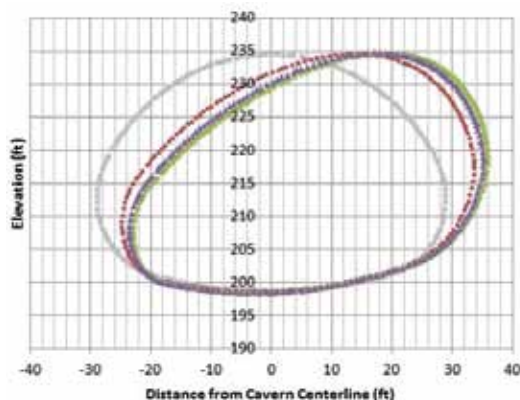
En un análisis de interacción terreno-estructura como el realizado con FLAC, las cargas no pueden considerarse de forma independiente de la misma forma que en un modelo puramente estructural. Por este motivo, el cálculo del revestimiento con el modelo FLAC se realizó con cargas características,

empleando un factor de seguridad global de 1,35 para estados límite último de agotamiento por solicitaciones normales y cortantes y de 1,0 para el análisis sísmico y comprobaciones en servicio.

El análisis sísmico se realizó mediante un cálculo pseudo-estático en FLAC, siguiendo la siguiente metodología, de acuerdo con FHWA (2009):

1. Modelo equivalente lineal con el programa comercial Shake, que considera un sistema de estratos homogéneos, viscoelásticos y de extensión horizontal infinita sometidos a ondas de corte transmitidas en dirección vertical. La no-linealidad del módulo de corte y del amortiguamiento se introduce mediante el uso de propiedades lineales equivalentes (p. ej. Stokoe y Darendeli, 2004 y Seed e Idris, 1970) en un proceso iterativo.
2. Modelo numérico bidimensional con FLAC para considerar la interacción terreno-estructura. Las condiciones de contorno de los bordes laterales deben permitir los desplazamientos horizontales.
3. En el modelo numérico el módulo de corte de los distintos estratos debe ser el compatible con las deformaciones esperadas de acuerdo con el modelo equivalente lineal.
4. Las deformaciones horizontales correspondientes al mayor desplazamiento relativo a cota de caverna obtenidas con SHAKE se introducen en los bordes laterales del modelo numérico, de forma que son transmitidas a través del terreno al entorno de la excavación.

Resultados FLAC (Interacción terreno-estructura) con escala exagerada



Debido a las diferentes rigideces de estación, caverna y túneles de línea, el diseño incorpora juntas flexibles en las interfaces correspondientes, de forma que no se restrinjan los desplazamientos diferenciales ante un evento sísmico.

La estructura permanente incluye un muro testero de 0,61 m (2 ft) de espesor en el extremo oriental de la caverna, es el interfaz con los túneles de línea. El diseño considera el muro central de apoyo de la losa de ventilación colaborando como contrafuerte frente a las acciones horizontales en el muro. Debido a las cargas que debe absorber en su plano, el muro central tiene un espesor de 0,46 m (18 in) en esta zona. El análisis se ha realizado con SAP2000 para considerar el efecto tridimensional de la estructura frente a cargas estáticas y frente a sismo.

12. Impermeabilización

El trazado del proyecto se encuentra dentro de una zona con riesgo de contener gas metano y sulfuro de hidrógeno. Por este motivo, como medida de prevención a largo plazo, se empleará una membrana resistente a hidrocarburos (HCR) de polietileno de alta densidad (HDPE) entre el sostenimiento y

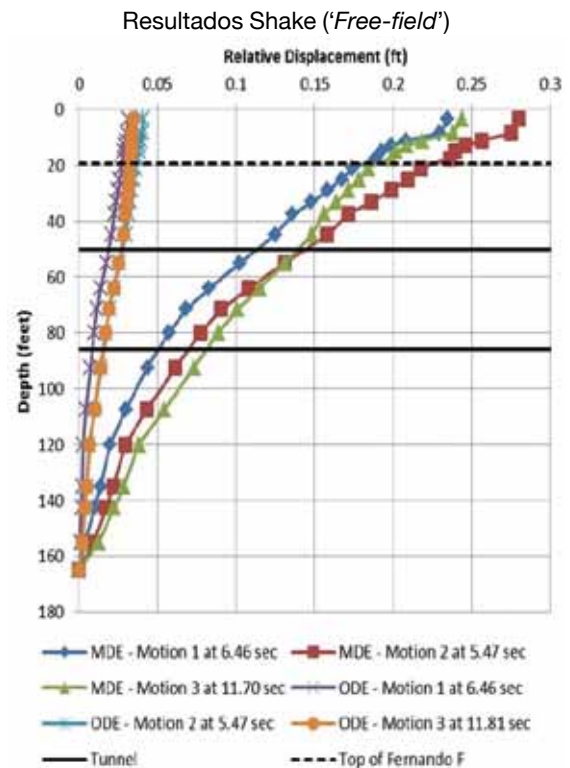


Fig. 11. Análisis sísmico

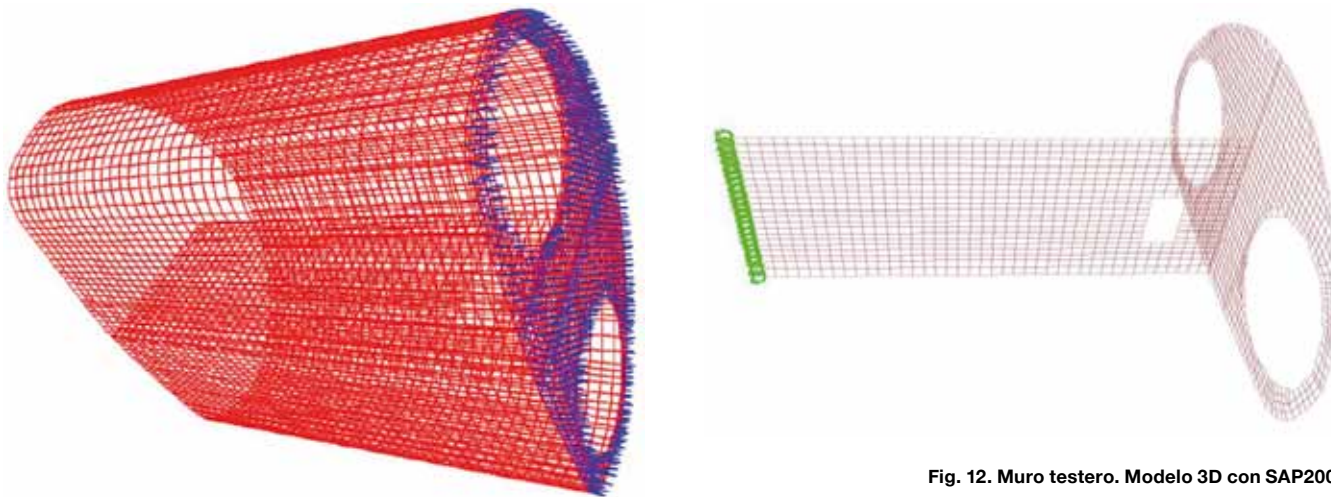


Fig. 12. Muro testero. Modelo 3D con SAP2000

el revestimiento. El sistema de impermeabilización incluye un sistema de compartimentalización con juntas estancas y un sistema de inyección integrado con mangueras flexibles para reparar posibles filtraciones, así como tuberías de inyección en clave para garantizar el contacto entre sostenimiento y revestimiento.

13. Análisis de asientos inducidos

Durante la fase de diseño se realizó un análisis exhaustivo de los efectos inducidos por la excavación de la caverna en las estructuras adyacentes. El estudio incluye un análisis de sensibilidad con FLAC y FLAC3D para evaluar el impacto de distintos parámetros, configuraciones de ejecución y elementos de sostenimiento en los resultados obtenidos, incluyendo

la potencia del aluvial, el módulo de elasticidad de la formación Fernando, el modelo constitutivo del terreno, la relación entre las presiones horizontales y verticales (K_0), la secuencia constructiva, la rigidez del sostenimiento, la rigidez de los edificios y las medidas de presostenimiento.

Uno de los modelos realizados en FLAC3D incluyó el empleo de paraguas de micropilotes a lo largo de toda la longitud de la caverna, modelizando cada uno de los tubos metálicos con elementos estructurales tipo 'pile'. Los resultados mostraron que, en este caso, el empleo de un presostenimiento sistemático de este tipo no reducía los desplazamientos finales de forma significativa. Esto se atribuye a la rigidez del terreno y a la forma de la caverna, relativamente plana: los paraguas de

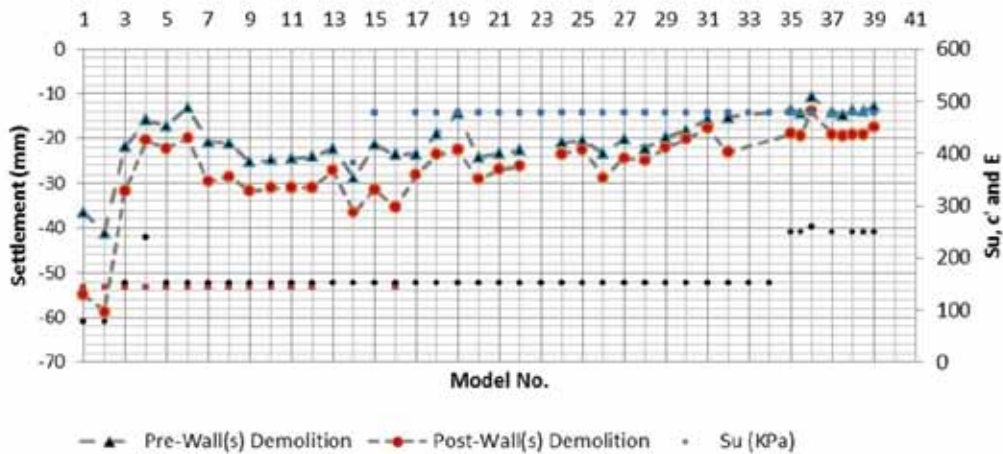
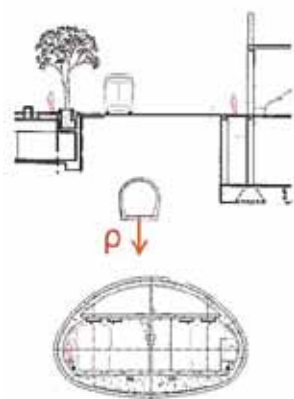


Fig. 13. Análisis de sensibilidad. Asientos en el colector

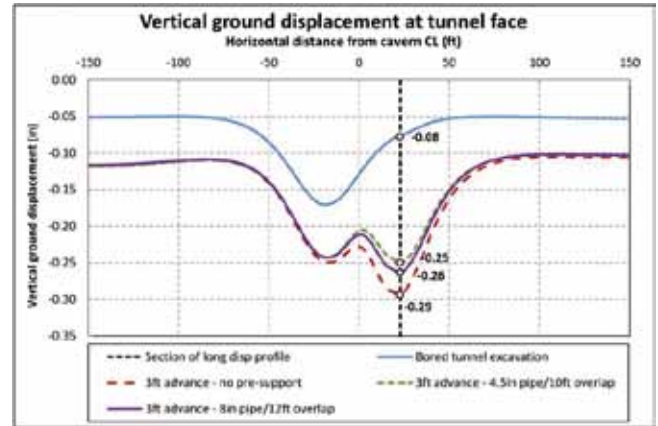
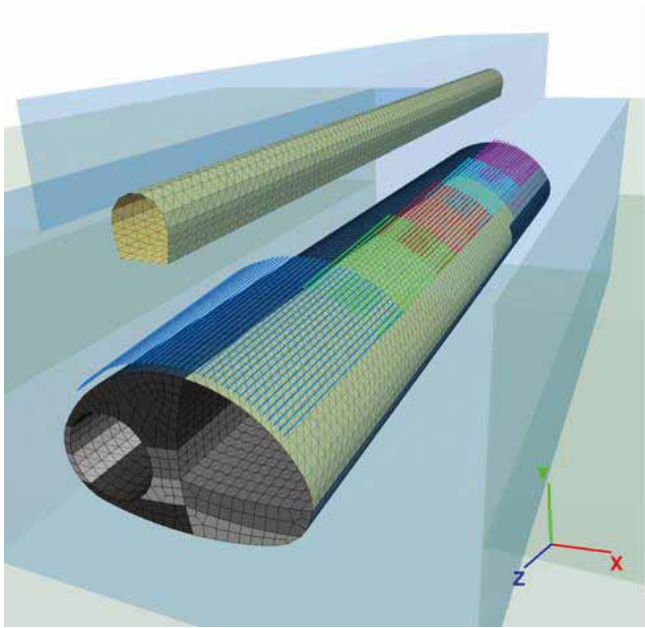


Fig. 14. Modelo FLAC3D. Estudio de presostenimiento

micropilotes son efectivos reduciendo los desplazamientos del terreno que ocurren en las proximidades del frente de excavación y mejorando la estabilidad del frente al puentear el pase de excavación sin sostenimiento, pero no son tan efectivos al continuar la excavación y alejarse el frente de la sección de control, ya que en sección transversal se trata de elementos discretos que no permiten la formación de un efecto arco a modo de corona de terreno mejorado, como indican Volkmann y Schubert (2007).

La pérdida de terreno (*volume loss*) con la secuencia constructiva descrita y los parámetros del terreno esperados está en el entorno del 0,3 %, con desplazamientos máximos en superficie de aproximadamente 16 mm y asentamientos a cota de cimentación de edificios por debajo de los 12,7 mm (0.5 in) indicados como límite máximo en las especificaciones de Metro. La estimación de daños esperables en los edificios adyacentes se ha realizado de acuerdo con las clasificaciones de Boscardin y Cording (1989) y Burland et al. (2001), resultando en daños despreciables a ligeros, ambas categorías admisibles según la práctica habitual en obras subterráneas en entorno urbano.

En cuanto al efecto combinado de la excavación de la estación y la caverna, el análisis se llevó a cabo con un modelo simplificado con FLAC3D para evaluar el efecto tridimensional que ocurre en las proximidades de la pantalla frontal de la estación, donde los desplazamientos son menores que los

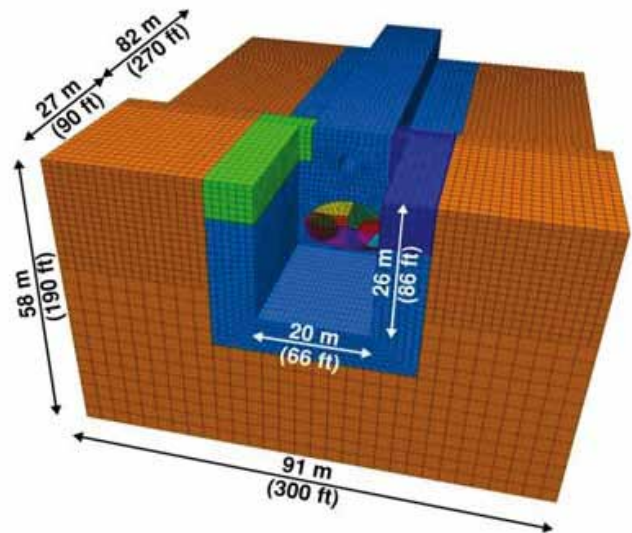


Fig. 15. Modelo FLAC3D con excavación de estación

que se obtendrían con la hipótesis de un muro de contención infinito, como se indica en Ciria PR30 (1996).

El desplazamiento vertical máximo inducido en el colector de acuerdo con los modelos numéricos es de 17,8 mm (0.7 in), superior al máximo admisible en las especificaciones de Metro (12,7 mm = 0.5 in). Sin embargo, Metro indica un valor de asiento máximo para todas las estructuras (edificios, servicios afectados, pasos superiores, túneles existentes,

etc.) sin atender a sus características específicas. La literatura técnica indica para colectores de hormigón valores admisibles entre 25 y 50 mm, el valor obtenido se encuentra por tanto dentro de un rango admisible (Ciria Project Report 30, 1996; Attewel et al. in *Soil Movements Induced by Tunneling and their Effects on Pipelines and Structures*, 1986). Además, la distorsión angular (o asiento diferencial longitudinal) generada por el avance de la excavación de la caverna, que podría ocasionar daños en el colector, presenta un valor en el entorno de 1/4.500, muy por debajo del límite máximo admisible por contrato (1/600).

14. Auscultación

La auscultación del terreno, estructuras adyacentes y medida de convergencias durante la excavación, es una parte esencial del SEM, ya que permite comparar los desplazamientos previstos en fase de diseño con los movimientos reales en construcción, actuando en consecuencia en caso de superarse los límites esperados en cada fase de acuerdo con la modelización numérica realizada.

La instrumentación de la caverna comprende:

- Secciones transversales de control de subsidencias en superficie.
- Dos alineaciones de extensómetros de varillas situados a ambos lados del colector para medir los desplazamientos en el terreno en las proximidades de la caverna.

- Dianas y clinómetros en edificios (incluyendo sótanos).
- Puntos de auscultación del colector desde superficie.
- Secciones de medida de convergencias en la caverna.

15. Conclusiones

La caverna para el cruce de vías que se ejecutará en SEM (*Sequential Excavation Method*) como parte del proyecto Regional Connector Transit Corridor es la mayor excavación en mina que se contempla en la ciudad de Los Ángeles.

Los contratos de diseño y construcción facilitan la colaboración de diseñadores y contratistas, lo que es clave para el éxito de este tipo de obra subterránea. Las fases de ejecución de la caverna y su sostenimiento son el resultado de un proceso iterativo con comunicación continua entre Mott MacDonald y Regional Connector Constructors. El diseño del sostenimiento se basa en la identificación y tratamiento de riesgos y optimización de plazos de ejecución y necesidades de soporte. La complejidad y tamaño de la obra requieren el empleo de modelos numéricos que permiten la simulación de las fases de excavación y configuración final de la estructura, de especial importancia en un entorno con alta actividad sísmica. El objetivo principal es conseguir un diseño seguro dentro de los límites marcados por el contrato, la normativa vigente y la práctica actual en entorno urbano, garantizando la integridad estructural de los edificios y servicios afectados por la excavación. **ROP**



Referencias

- ACI (American Concrete Institute) (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)". Farmington Hills, MI.
- AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) (2001). "Recommendations on the Convergence-Confinement Method".
- Attewell PB, Yeates J, and Selby AR (1986). Soil Movements Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures, Blackie and Son Ltd., London.
- Bernaud, D. and Rousset G. (1992). "La nouvelle "method implicite" pour l'étude du dimensionnement des tunnels". Revue Francaise de Geotechnique 60:5-26
- Bernaud, D., Corbetta, F. and Nguyen Minh Duc (1991). "Contribution a la methode de Convergence-Confinement par la methode de la Similitude". Revue Francaise de Geotechnique, 54, 1.
- Boscardin, M. D., and Cording, E. J. (1989), "Building Response to Excavation-Induced Settlement". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115:1-21.
- Burland, J. B., Standing, J. R., and Jardine, F. M. (2001). "Building response to tunneling. Case studies from construction of the Jubilee Line Extension, London". London, UK: Thomas Telford.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C. (2000), "Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion". Tunneling and Underground Space Technology. 15 (2), 187-213
- CIRIA PR30 (1996), "Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas".
- DSI (2015), "Mining and Tunneling Products Catalogue", Dywidag-Systems International, Agosto 2015 https://www.dsiunderground.com/uploads/media/DSI-Underground-Systems-Mining-and-Tunneling-Products-Catalogue-US_01.pdf [Consulta: 11 abr. 2016]
- FHWA (Federal Highway Administration) (2009). "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements". 6th Edition. Washington D.C.
- HSE (1996), "Safety of New Austrian Tunneling Method (NATM) Tunnels. A review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London Clay". Health and Safety Executive, 1996.
- Kawvadas, M., Proutzopoulos, G., and Tzivakos, K. (2009). "Prediction of Face Stability in Unsupported Tunnels using 3D Finite Element Analysis". 2nd International Conference of Computational Methods in Tunneling. Aedificatio Publishers.
- MRDC (2013). "Metro Rail Design Criteria Section 5 Appendix Metro Supplemental Seismic Design Criteria" Revision 5. Los Angeles Metropolitan Transit Authority.
- Murray, M., Redmond, S., Sage, R., Langer, F., Phelps, D. (2006) "SEM in Seattle - Design and Construction of the C710 Beacon Hill Station Tunnels". 2006 Tunnelling Association of Canada Proceedings.
- Nguyen-Minh, D. and Guo, C. (1993). "Sur un principe d'interaction massif-soulèvement des tunnels en avancement stationnaire". Eurock 93, Balkema, Rotterdam.
- Pickett, A. (2014), "Crossrail Sprayed Concrete Linings", ICE Publishing, 2014
- Seed, H.B. e Idris, I.M., (1970). "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis". Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley, December
- Sun, Y., McRae, M., Van Greunen, J. (2013), "Load Sharing in Two-pass Lining Systems for NATM Tunnels", Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings, 2013.
- Thomas, Alun (2008). Sprayed Concrete Tunnel Liners. New York, NY: Taylor & Francis.
- TR 63 (2007) "Technical Report No. 63 Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete". Camberley: The Concrete Society.
- Tucker, N. (2014). "Design and construction of Crossrail Stepney Green sprayed concrete lined caverns". ICE Publishing, 2014
- Vermeer, Ruse and Marcher (2002). "Tunnel Heading Stability in Drained Ground". FELLSBAU 20 NO.6: 8-18
- Volkmann, G.M., Schubert, W. (2007). "Geotechnical Model for Pipe Roof Supports in Tunneling". Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunneling Congress. Taylor & Francis Group, Volume 1, app. 755-760.