ISSN 2954-3452

OBRAS **SUBTERRÁNEAS**

AÑO 13 / NÚMERO 47 / JULIO - SEPTIEMBRE 2025 / ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS, A.C. / XIX CONSEJO DE DIRECTORES

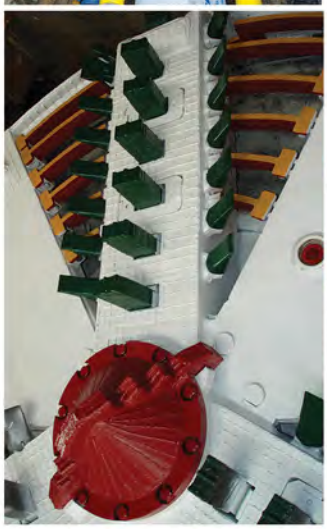
AMITOS

MÉXICO
Digitalización y BIM
en obras geotécnicas.
Más que un lujo, una necesidad
en los proyectos actuales.

MÉXICO
Modelación numérica
para la optimización
del revestimiento de túneles.

47

Experiencia de más de 25 años en suelos muy blandos en el Valle de México



ZINZANJA S.A. DE C.V.

www.zinzanja.com

Ingeniería Avanzada en Obras Subterráneas

Zinzanja S.A. de C.V.
Ceres No. 10 Col. Crédito Constructor
Del. Benito Juárez CDMX, México 03940
Tel. 0155) 53903900 / 56870541 / 56870149
www.zinzanja.com
ingenieria@zinzanja.com

Servicios integrales para su proyecto

- -Microtuneleo
- -Rehabilitación de tubería
- -Construcción de túnel con dovelas
- -Introdeslizamiento de tubería de GRP
- -Microtuneleo en roca
- -Hincado de tablaestacado
- -Proyectos "llave en mano"
- -Rehabilitación de tuneles
- -Tuneliner
- -Construcción de lumbreras
- -Emisores Submarinos

OBRAS **SUBTERRÁNEAS**

AMITOS

EDITORIAL

En AMITOS, seguimos avanzando con la firme convicción de que el aprovechamiento del espacio subterráneo es una de las claves para el desarrollo sostenible de nuestras ciudades y territorios.

En esta edición de *Obras Subterráneas* reunimos aportaciones que reflejan tanto la evolución técnica de nuestra disciplina como la creciente necesidad de innovar en los procesos y en la visión estratégica de las obras subterráneas. La digitalización y el uso de BIM en proyectos geotécnicos, presentados en uno de los artículos principales, nos recuerdan que la tecnología no es un lujo, sino una herramienta indispensable para mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad de nuestras obras.

Asimismo, compartimos los avances de investigaciones académicas de alto nivel, como la modelación numérica para optimizar el revestimiento de túneles y la reciente tesis doctoral de José Francisco Suárez Fino. Estos trabajos fortalecen el vínculo entre la academia y la práctica profesional, que nutren y transforman nuestra comunidad.

La perspectiva internacional también se hace presente con la cobertura del *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* realizado en Cambridge, y con reflexiones urbanas de *La Fabrique de la Cité*, que invitan a pensar cómo las metrópolis pueden convertirse en motores de innovación y bienestar.

Dentro de AMITOS, continuamos consolidando nuestras actividades: los grupos de trabajo, la formación de especialistas mediante la Maestría en Túneles, la organización de webinars, así como la conmemoración de los 50 años del Drenaje Profundo de la Ciudad de México, una obra emblemática que nos recuerda el impacto positivo que tienen las infraestructuras subterráneas en la vida cotidiana.

Aprovecho este espacio para dar la bienvenida a los nuevos socios que se integran a nuestra asociación. Su participación fortalece nuestra misión y multiplica las posibilidades de colaboración.

Los invito a que disfruten esta edición, a que encuentren inspiración en cada artículo y, sobre todo, a que sigamos construyendo juntos un futuro donde el subsuelo se aproveche con visión, responsabilidad y creatividad.

ING. ROBERTO GONZÁLEZ RAMÍREZ
Presidente del Consejo Directivo AMITOS

NUESTRA PORTADA

Pozo de perforación y rampa de acceso del proyecto Gasoducto Extensión Sureste (GES), para la expansión del sistema de Transportadora de Gas Natural de la Huasteca (TGNH), en Coatzacoalcos, Veracruz. Modelo tridimensional en metodología BIM por Claudia Gutiérrez.

Acervo CIMESA.

ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS, A. C.

Camino a Santa Teresa 187, Colonia Parques del Pedregal, México, CDMX, 14010.

www.amitos.org • amitos@amitos.org

Facebook: @Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas A.C.

Instagram: @amitos.mx

Facebook: @Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas A.C.

La redacción y el contenido de los artículos son responsabilidad de los autores.

TÚNELES Y MICROTÚNELES

Microtuneleo con TBM
Hincado de tubería (pipe jacking)
Construcción de túneles con dovelas
Rehabilitación de tuberías
Tablestacado metálico
Muros colados en sitio (Milán)

Presencia en América Latina

ARGENTINA, BOLIVIA, CHILE, COLOMBIA, COSTA RICA, ECUADOR, EL SALVADOR, GUATEMALA, HONDURAS, MÉXICO, NICARAGUA, PANAMÁ, PARAGUAY, PERÚ Y URUGUAY

Contamos con un Centro de Capacitación en Toulouse, Francia.

5 YEARS 1975 | 2025 BESSAC

Tel : (+52) 55 5207 3068 / 55 4499 6838
www.bessac.com / www.bessac.com.mx

OBRAS **SUBTERRÁNEAS**

47

TABLA DE CONTENIDO

ARTÍCULOS TÉCNICOS

4. **Digitalización y BIM en obras geotécnicas.**
   Más que un lujo, una necesidad en los proyectos actuales.
9. **Modelación numérica para la optimización del revestimiento de túneles.**

GREMIAL

24. Actividades del XIX Consejo Directivo
30. Maestría en Túneles y Obras Subterráneas
32. ITA
36. Grupo de Ingenieros Jóvenes

NOTICIAS Y AGENDA

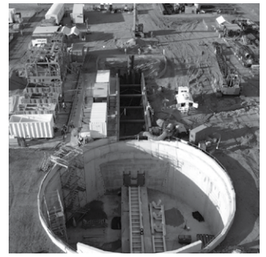
22. Agenda

APROVECHAMIENTO DE LOS ESPACIOS SUBTERRÁNEOS

23. Seminario Internacional de Lyon: más allá de límites y fronteras.

LA TÉCNICA PASA FRONTERAS

38. WTC 2025: TUNNELLING INTO A SUSTAINABLE FUTURE – Methods and Technologies. Congreso Mundial de Túneles ITA-AITES 2025, Estocolmo, Suecia.



ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA DE TÚNELES Y OBRA SUBTERRÁNEAS, A. C.

XIX Consejo Directivo

M.A. Roberto GONZÁLEZ RAMÍREZ Presidente
M.C. Esteban Arturo TIZNADO VÁZQUEZ Secretario
Ing. Raymundo Gerardo GONZÁLEZ REYES Tesorero
M.I. Carlos A. RAMÍREZ DE ARELLANO DE LA PEÑA Vicepresidente de Comités Técnicos
Dr. Juan Manuel MAYORAL VILLA Vicepresidente de Cursos y Congresos
M.I. Mario Arturo AGUILAR TELLEZ Vicepresidente de Conferencias y Publicaciones
Ing. Iván ZACARIAS HERNANDEZ Vicepresidente de Banco de Datos, Biblioteca y Revista
M.I. Itzel Aketzalli SIMBRÓN JUÁREZ Vicepresidente de Grupo de Ingenieros Jóvenes
M.I. Rogelio MONROY SALGADO Vicepresidente de Microtúneles (Microtuneleo)

Consejo Editorial
M. I. Mario Arturo Aguilar Téllez
Ing. Francisco Javier Bay Ortúzar
Ing. Enrique Farjeat Páramo
Ing. Raymundo Gerardo González Reyes
M. A. Roberto González Ramírez
Ing. Marlon Alfonso Jiménez Jiménez
Ing. Raúl López Roldán
M. I. Juan Paulín Aguirre
Ing. Jonathan Enrique Ramírez Sánchez
Lic. Manuel Saez Prieto
M.I. Rocío Salcedo Campos
Ing. Juan Jacobo Schmitter Martín del Campo
Dr. José Francisco Suárez Fino
Ing. Iván Zacarías Hernández

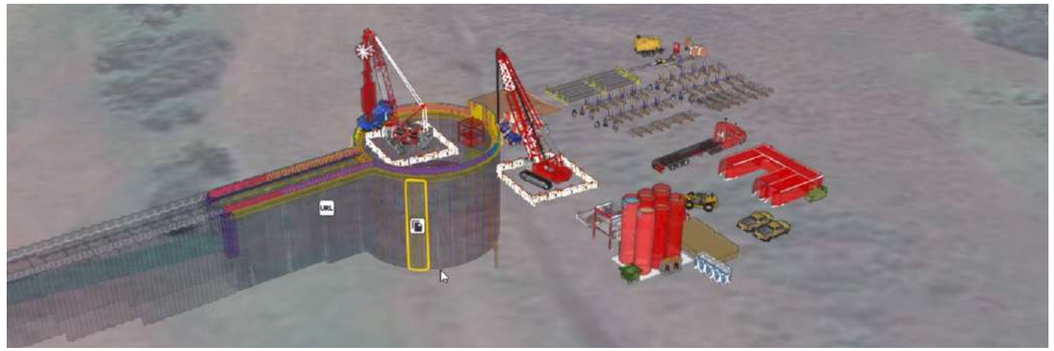
OBRAS SUBTERRÁNEAS, Año 13, No. 47, JULIO - SEPTIEMBRE de 2025, es una publicación trimestral, editada y distribuida por la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C., Camino a Santa Teresa 187, Col. Parques del Pedregal, Delegación Tlalpan, C.P. 14010, Tel. 52 (55) 5528 3611, AMITOS • amitos@amitos.org

Editor responsable: M. A. Roberto González Ramírez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2014-110510341700-102; ISSN 2954-3452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Certificado de Licitud de Título y Contenido No. 16174, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

Este número se terminó el 30 de septiembre de 2025. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización fehaciente de los autores.

EDICIÓN, DISEÑO E INTERACTIVO • XANTUS • **www.xantus.com.mx**

ARTÍCULO TÉCNICO



Digitalización y BIM en obras geotécnicas

Más que un lujo, una necesidad en los proyectos actuales

Guillermo CLAVELLINA
CIMESA
Soletanche Bachy México

Rogelio MONROY
CIMESA
Soletanche Bachy México

Claudia GUTIÉRREZ
CIMESA
Soletanche Bachy México

Karen BARRERA
GEOFUNDACIONES
Soletanche Bachy Colombia

Resumen

Las metodologías BIM (*Building Information Modeling*) en los proyectos de infraestructura se han convertido en una práctica estándar. En consecuencia, las obras y trabajos de construcción geotécnica han debido alinearse con las nuevas directrices que esto implica. Lo anterior no solo considera la modelación tridimensional de los elementos del proyecto y la representación del proceso constructivo, sino que también facilita la comunicación y el trabajo en equipo; el dimensionar las maniobras del equipo en obra y así generar una mayor eficiencia en los tiempos y costos del proyecto; y finalmente la centralización de la información como datos de campo y avances en tiempo real, facilitando el acceso, la gestión y la actualización para los constructores y otras partes interesadas. La digitalización de registros de construcción debe realizarse de forma simultánea a la ejecución de los trabajos en el modelo digital, reduciendo progresivamente el uso de papel y facilitando el acceso a la información desde bases de datos en la nube, así como el aprovechamiento de la metadata generada. Las ventajas del enfoque BIM no solo reducen el impacto ambiental al prescindir del papel, sino que también permiten cuantificaciones y programaciones precisas de insumos y avances, reducir errores detectando interferencias en el modelo BIM con otras disciplinas y el seguimiento en tiempo real de rendimientos por equipo o maquinaria. Este documento presenta los avances obtenidos en proyectos recientes en México, así como las tendencias tecnológicas que marcarán el rumbo de la construcción geotécnica-digital en los próximos años.

1. Metodología BIM

Building Information Modeling (BIM) es una metodología de trabajo colaborativa aplicada a la concepción, desarrollo y gestión de proyectos de edificación, industriales e infraestructura. Su mayor fortaleza es la centralización de toda la información del proyecto en un modelo digital integrado, construido de manera colaborativa por todos los actores involucrados.

Las distintas etapas del diseño, ejecución y gestión de un proyecto bajo esta metodología conforman el ciclo de vida BIM, que abarca desde la concepción inicial hasta su abandono o demolición. Dicho ciclo se estructura en distintas dimensiones BIM, cada una enfocada en una fase específica del proyecto:

- 1D – Idea: representa el origen del proyecto, a partir de una idea conceptual y estimaciones preliminares.

- 2D – Boceto: desarrollo de los primeros planos o esquemas básicos.
- 3D – Coordinación: modelado del diseño conceptual tridimensional que permite detectar interferencias entre disciplinas, anticipando posibles conflictos en obra.
- 4D – Planificación: análisis e integración del tiempo en el modelo para simular y planificar la ejecución de las actividades del proyecto.
- 5D – Costos y presupuesto: asociación del modelo con datos de costos para controlar presupuestos en cada fase: construcción, operación o mantenimiento.
- 6D – Eficiencia energética: evaluación del comportamiento energético mediante simulaciones y análisis en el modelo digital.
- 7D – Gestión de activos: incorporación de datos físicos y funcionales de los elementos del proyecto, incluyendo manuales de operación, mantenimiento programado y análisis financiero de modificaciones futuras, de tal manera que lo podamos visualizar y gestionar desde el modelo IFC.

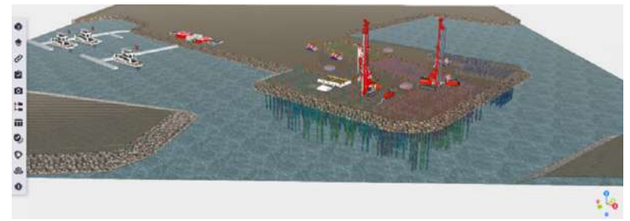
La metodología BIM permite la creación y gestión de datos durante todas las etapas del ciclo de vida del proyecto. Integra información multidisciplinaria en una plataforma digital abierta y alojada en la nube, lo que facilita la colaboración en tiempo real. Su implementación mejora la visibilidad global del proyecto, optimiza la toma de decisiones, favorece soluciones sostenibles y permite una gestión más eficiente de los recursos y costos.

2. Plan de ejecución BIM (BEP)

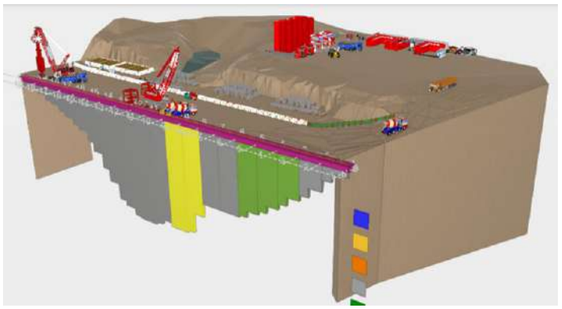
Un documento clave para la correcta implementación de la metodología es el BEP (*BIM Execution Plan* o Plan de Ejecución BIM). Este documento define los objetivos BIM del proyecto, roles y responsabilidades de los participantes, flujos de información, estándares a aplicar y protocolos de coordinación. El BEP funciona como una hoja de ruta que asegura que todos los agentes involucrados trabajen bajo lineamientos comunes, reduciendo riesgos y mejorando la coordinación multidisciplinaria. Además, facilita la trazabilidad de la información, garantiza la calidad de los entregables y promueve la eficiencia en cada etapa del ciclo de vida del proyecto.

3. Modelado 3D

Para quienes no están familiarizados con la metodología BIM, es común confundir un modelo tridimensional (por ejemplo, un modelo en AutoCAD 3D) con un modelo BIM. Por ello, resulta fundamental aclarar sus diferencias. Aunque ambos representan visualmente edificios o infraestructuras, BIM va más allá de la geometría



▲ Figura 1. Vista desde CDE – Proyecto: cimentación Casa Blake.



▲ Figura 2. Vista desde CDE – Proyecto: pantalla de presa Santa María.

al incorporar relaciones entre elementos, metadatos (datos que describen información que facilita la búsqueda, interpretación y gestión de la información) y comportamientos propios de los componentes reales de construcción, aspectos que no contempla el modelado 3D tradicional.

Mientras que un modelo 3D es solo una representación gráfica que ayuda a visualizar qué y cómo se construirá, BIM es un proceso integral que gestiona información y coordina disciplinas durante todo el ciclo de vida del proyecto. La metodología BIM integra datos de distintas disciplinas en un entorno común, permitiendo consultar la información en múltiples formatos (2D, 3D, tablas, entre otros), con mayor conectividad y accesibilidad respecto a los métodos tradicionales basados en documentos aislados.

Existen múltiples herramientas de modelado 3D desarrolladas específicamente para soportar BIM, como Revit, ArchiCAD, Allplan, SketchUp, Infraworks, Tekla, Civil 3D, entre otras. Estas herramientas de modelado permiten crear modelos inteligentes que almacenan no solo información geométrica (forma y dimensiones), sino también datos paramétricos sobre materiales, costos, cronogramas y mantenimiento. La elección de la herramienta depende del tipo de proyecto, su complejidad y el nivel de desarrollo BIM que se desea alcanzar teniendo en cuenta el "nivel de detalle" (LOD) requerido en cada etapa del proyecto.

En este contexto, es importante considerar el concepto de "*Level of Development*" (LOD), o nivel de desarrollo del modelo. El LOD establece el grado de detalle, precisión y confiabilidad de la información contenida en el modelo en cada etapa del proyecto. Va desde representaciones conceptuales iniciales (LOD 100), pasando por fases de diseño y coordinación (LOD 200–300), hasta modelos con información suficiente para construcción, operación y mantenimiento (LOD 400–500). Esta clasificación se define en el BEP de cada obra, y permite definir expectativas claras entre los distintos actores, estandarizar la calidad de los entregables y garantizar que el modelo proporcione la información adecuada según la fase del ciclo de vida en la que se encuentre el proyecto.

En resumen, mientras que el modelado 3D es una representación visual, BIM es una metodología integral que permite crear, administrar y analizar

▲ Figura 3. Instrumentación de anclajes con celdas de carga.

▲ Figura 4. Concepto de "gemelo digital".

▲ Figura 5. Captura digital de registros en sitio.

información a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto, con una base de datos centralizada y estructurada para la toma de decisiones informadas.

4. BIM en construcción geotécnica

La implementación de metodologías BIM está transformando la forma en que se diseñan, gestionan y ejecutan las obras de construcción geotécnica y de cimentaciones profundas. Permite integrar modelos 3D con información técnica y de campo, centralizando datos geotécnicos, topográficos y constructivos en un entorno digital colaborativo.

Durante la fase de diseño, BIM facilita la visualización precisa del subsuelo y su interacción con elementos estructurales como pilotes, pantallas, anclajes, entre otros elementos. Esto permite detectar interferencias, optimizar soluciones y reducir errores en el proyecto ejecutivo. La simulación del comportamiento del terreno, mediante modelos analíticos o numéricos enlazados al modelo BIM, por otra parte, permite evaluar alternativas técnicas antes de construir.

En la etapa de ejecución, el uso de BIM combinado con sensores IoT ("*Internet of Things*" o "Internet de las cosas") como son: inclinómetros, piezómetros y celdas de carga (Figura 3), dan lugar a gemelos digitales que reflejan en tiempo real el desempeño de la obra (Figura 4). Esto permite ajustar en tiempo real los procedimientos de excavación, hincado o perforación, basándose en datos medidos y no únicamente en supuestos teóricos. La programación de actividades, seguimiento de avances, control de calidad y trazabilidad documental también se ven altamente beneficiados.

Además, BIM mejora la coordinación entre las diferentes disciplinas (estructura, instalaciones, geotecnia) y reduce significativamente el uso de papel, favoreciendo prácticas sostenibles mediante la interoperabilidad entre las distintas herramientas a través de un modelo estándar IFC, que no solo permite el flujo de información dentro de un entorno común de datos (CDE), sino que también facilita el intercambio de datos de forma organizada.

La interoperabilidad en entornos BIM se sustenta principalmente en el uso del formato IFC (*Industry Foundation Classes*), un estándar abierto que permite el intercambio de información entre diferentes plataformas y software. Este formato asegura que los modelos puedan compartirse y actualizarse sin depender de un único proveedor tecnológico, manteniendo la coherencia y trazabilidad de los datos. En el caso de las obras geotécnicas, el uso de modelos IFC facilita la integración de información estructural, topográfica y de instrumentación en un mismo entorno común de datos (CDE), garantizando que todos los actores trabajen sobre un modelo unificado y confiable.

En resumen, BIM no solo optimiza el diseño geotécnico, sino que fortalece el control y la eficiencia durante la construcción de obras subterráneas y de cimentación.

5. Digitalización de registros de construcción

BIM utiliza modelos 3D "inteligentes" para representar el proyecto, integrando tanto información geométrica como no geométrica relevante. Dicha información se puede obtener a partir de la captura digital de registros de construcción en sitio por personal técnico (Figura 5 y Figura 6). La información se centraliza en un "entorno común de datos" (CDE, por sus siglas en inglés) para facilitar su acceso, gestión y actualización. De esta forma, es posible consultar en tiempo real las características constructivas de cada componente, mejorando trazabilidad, control de calidad y la toma de decisiones durante la ejecución del proyecto, proporcionando además los datos necesarios para la generación del modelo "*as-built*" con mayor precisión.

La facilidad del intercambio de datos dentro de un entorno BIM permite optimizar significativamente el tiempo de recuperación, procesamiento y análisis de información obtenida de los modelos IFC para su uso en otras herramientas.

Por ejemplo, en proyectos de cimentaciones profundas con pilotes y muros pantalla, el uso de modelos en formato IFC permite integrar en un

mismo entorno digital la geometría de los elementos estructurales, la información geotécnica del subsuelo y los datos de instrumentación obtenidos en campo (como inclinómetros o celdas de carga). Esto facilita la coordinación con las disciplinas de estructura y arquitectura, permite detectar interferencias de manera anticipada y asegura que los registros de obra queden vinculados directamente al modelo digital, mejorando la trazabilidad y el control de calidad durante toda la ejecución.

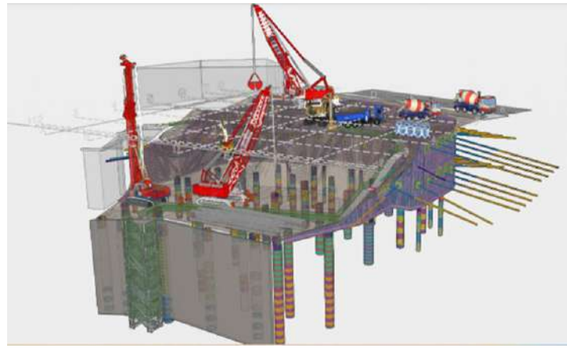
6. Beneficios

La adopción de un BEP (*BIM Execution Plan*) en cada proyecto permite estandarizar procesos, optimizar la comunicación entre equipos y asegurar que la información generada sea consistente, confiable y trazable durante todo el ciclo de vida de la obra.

Las ventajas de trabajar bajo metodologías BIM van más allá del beneficio medioambiental asociado a la reducción del uso de papel. Su adopción ofrece múltiples beneficios con alto potencial de impacto en todo el ciclo de vida del proyecto, entre los que destacan:

- Mayor eficiencia: la documentación digital facilita la gestión de la información, reduce errores y agiliza los procesos de diseño, construcción y operación.
- Reducción de costos: la detección temprana de interferencias y la optimización de recursos mediante BIM contribuyen a disminuir significativamente los costos de ejecución.
- Mejora en la colaboración: BIM promueve la coordinación y comunicación efectiva entre los distintos actores del proyecto, minimizando errores y retrabajos.
- Alta precisión: los modelos BIM permiten obtener datos confiables sobre cantidades, costos y tiempos, favoreciendo una mejor planificación y control del proyecto.
- Extracción automatizada de cantidades y presupuestos: BIM permite generar listas de materiales, mediciones y presupuestos de forma automática y precisa.
- Planificación de la construcción: facilita la definición de secuencias constructivas, identificación de conflictos y optimización del flujo de trabajo (Figura 7).
- Gestión eficiente de cambios: permite registrar y administrar modificaciones del proyecto de forma estructurada y trazable, reduciendo retrasos y omisiones.
- Operación y mantenimiento: el modelo BIM puede emplearse para la gestión de instalaciones, programación de mantenimiento preventivo y administración de activos del edificio.

▲ Figura 6. Ejemplo de registros digitales.



▲ Figura 7. Logística de obra sobre modelo IFC (Vista CDE).

▲ Figura 8. CDE - Tabla de datos.

7. Avances próximos

Es de esperar que BIM continúe evolucionando mediante la incorporación de nuevas tecnologías y tendencias como la inteligencia artificial, la colaboración en la nube, los gemelos digitales para el monitoreo de activos, así como la integración con herramientas de realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR), entre otras.

Las herramientas BIM también avanzan continuamente mejorando la eficiencia, interoperabilidad y colaboración entre equipos. La centralización de la información en la nube se consolida como práctica habitual,

permitiendo la colaboración en tiempo real entre equipos distribuidos geográficamente.

La creación de gemelos digitales, es decir, réplicas virtuales de edificios y activos físicos, se ha vuelto cada vez más común para el monitoreo en tiempo real, la evaluación del desempeño y la optimización operativa. Por su parte, las tecnologías de realidad aumentada y virtual mejoran la visualización inmersiva, facilitan la comprensión del diseño y permiten detectar conflictos en entornos simulados antes de la ejecución.

La integración de sensores IoT (*Internet of Things*) o "Internet de las cosas" con modelos BIM posibilita el monitoreo en tiempo real de sistemas, equipos e instalaciones, mejorando tanto la eficiencia operativa como el mantenimiento. Este enfoque también puede aplicarse a la instrumentación de obras subterráneas.

El desarrollo de soluciones basadas en diseño generativo (*Generative Design*) permite realizar análisis iterativos automatizados a partir de datos del modelo BIM, generando alternativas optimizadas en cuanto a materiales, costos y recursos, con retroalimentación directa al modelo.

El uso de la inteligencia artificial (IA) comienza a desempeñar un papel clave en la predicción de riesgos, la gestión de datos y la optimización de decisiones durante las fases de diseño y construcción.

Finalmente, BIM se posiciona como una herramienta estratégica para diseñar y construir edificaciones más eficientes desde el punto de vista energético y ambiental, al tiempo que facilita el cumplimiento normativo y la adopción de estándares de construcción sostenibles.

8. Conclusiones

El uso de metodologías BIM (*Building Information Modeling*) en los proyectos de infraestructura es una práctica ampliamente adoptada en el sector.

El proceso BIM permite crear, gestionar y actualizar información a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, integrando documentos de diseño y construcción de múltiples disciplinas dentro de un entorno común de datos (CDE). A diferencia de los métodos tradicionales basados en fuentes de información dispersas, BIM ofrece una base de datos centralizada, accesible y conectada, lo que mejora significativamente la toma de decisiones.

La inclusión de registros de construcción en el modelo facilita el acceso, en tiempo real, a las características constructivas de cada elemento. Por ello, la digitalización y estructuración de estos registros dentro del entorno BIM resulta fundamental para garantizar trazabilidad, control de calidad y eficiencia operativa.

Entre las principales ventajas de implementar metodologías BIM se encuentran: mayor eficiencia, reducción de costos, mejora en la colaboración multidisciplinaria, mayor precisión en cantidades y presupuestos, planificación detallada de la construcción, y gestión eficiente de cambios, entre otros beneficios. Además del impacto ambiental positivo por la disminución del uso de papel.

BIM continúa su evolución con la incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la colaboración en la nube, los gemelos digitales para el monitoreo de activos, y la integración con soluciones de realidad aumentada y realidad virtual. En este escenario de transformación e innovación digital, mantenerse actualizado frente a las tendencias tecnológicas no es solo una ventaja competitiva, sino una condición necesaria para concebir, construir y operar proyectos de infraestructura más eficientes y sostenibles.

SANDVIK

Sistemas de sostenimiento subterráneo para túneles

Sistema de anclaje autoperforante
- Sistema de una sola etapa donde se perfora e instala a la vez
- Se puede extender la longitud del anclaje mediante coples
- Su barra hueca permite la inyección de lechada o resina

Perno Omega Bolt®
- Rapidez en la instalación obteniendo ciclos de fortificación más cortos y condiciones de trabajo más seguras
- Se ajusta a perforaciones irregulares

Sistemas de tubos paraguas
- Avances en terreno blando o fracturado
- Instalación mecanizada y segura
- Tecnología eficiente de instalación autoperforante

Resinas inyectables
- Inyección de Anclajes
- Sellado de Flujos de Agua y Gases
- Consolidación de Terrenos
- Relleno de Cavidades

Marcos metálicos
- Marcos Viga (HEB, HN y TH)
- Marcos Reticulares
- Marcos tipo Pantex

Sistema de anclaje autoperforante

Perno Omega Bolt®

Sistemas de tubos paraguas

Resinas Inyectables

Marcos metálicos

InformacionDSIMexico@sandvik.com / rocktechnology.sandvik/groundsupport

ARTÍCULO TÉCNICO

Modelación numérica para la optimización del revestimiento de túneles

José Francisco SUÁREZ FINO
Director General, Consultec
Ingeniería, Arquitectura y Supervisión, S.A. de C.V.

Juan Manuel MAYORAL VILLA
Departamento de Geotecnia, Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

La construcción de túneles excavados mediante el método convencional en entornos urbanos densamente poblados requiere de una caracterización adecuada de las cargas que actúan sobre el sostenimiento o revestimiento primario durante el proceso de excavación. Esto es esencial para asegurar que el terreno se deforme y que los esfuerzos alrededor del túnel se alivien, cumpliendo simultáneamente con los límites de falla y de servicio establecidos en normas internacionales, y minimizando el daño a las estructuras cercanas.

En este trabajo, se revisan los criterios comunes de diseño de revestimientos, a través de la simulación numérica de una sección de túnel instrumentada que forma parte de una línea de metro de 4.5 km actualmente en construcción en la Ciudad de México. Se identifican las principales necesidades de mejora en los enfoques de diseño actuales.

El túnel fue instrumentado con celdas de carga, extensómetros y referencias topográficas para medición de convergencias y divergencias. Se desarrolló un modelo tridimensional de diferencias finitas de la sección instrumentada, analizando los mecanismos de transferencia de carga entre el suelo excavado y el revestimiento primario. Posteriormente, se simuló numéricamente la contribución del revestimiento secundario a la estabilidad global bajo carga sostenida, junto con los asentamientos del terreno esperados, los cuales pueden afectar significativamente a las estructuras cercanas.

Los resultados obtenidos constituyen información clave para la actualización de los criterios de diseño de revestimientos en túneles urbanos construidos en suelos rígidos y frágiles.

1. Introducción

Como establecieron Mayoral (2014) y Mayoral *et al.* (2015), el diseño moderno de túneles en áreas densamente pobladas, como la Ciudad de México, requiere revisar simultáneamente tanto los estados límite últimos (es decir, factores de seguridad para el frente de excavación y la estabilidad general) como los estados límite de servicio (es decir, deformaciones del terreno en las proximidades del túnel, tanto en superficie como dentro del mismo), con el fin de evitar posibles colapsos catastróficos (de Ágreda, 2019; Oliver, 1994; Oliver, 1995; Sousa y Einstein, 2021) o daños en estructuras cercanas relacionados con asentamientos diferenciales (Dong *et al.*, 2022; Lim *et al.*, 2023; Mayoral *et al.*, 2015; Son, 2015; Son, 2016). Esto es particularmente importante al excavar con el método de excavación convencional, o CT (ITA, 2009) en áreas urbanas densamente pobladas.

Un aspecto clave del diseño que controla de manera significativa ambos estados límite es la interacción entre el suelo y el revestimiento del túnel, la cual depende en gran medida de la geometría de la sección transversal del túnel, el espesor del revestimiento, la configuración estructural (un solo revestimiento o doble revestimiento compuesto, por ejemplo, por concreto lanzado, concreto reforzado o marcos metálicos) y la longitud de avance recomendada.

Ante esto, existen varios enfoques derivados analíticamente disponibles en la literatura técnica para estudiar la interacción suelo-revestimiento del túnel: desde metodologías convencionales, basadas en la presión del terreno suelto (Bierbaumer, 1913; Szechy, 1970; Terzaghi, 1964); soluciones de rigidez relativa; curvas características del terreno (Ghorbani y Hasanzadehshooiili, 2019; Oreste, 2009, Panet, 2001); curvas de reacción del soporte (Oreste, 2003; Verman *et al.*, 1995; Wang y Luo, 2020); y curvas de desplazamiento longitudinal (LDP) (Sadeghiyan *et al.*, 2016; Vlachopoulos y Diederichs, 2009).

Recientemente, también se han empleado enfoques más sofisticados mediante la modelación numérica de la interacción acoplada entre el suelo y el revestimiento del túnel (Argyroudis *et al.*, 2017; Mayoral, 2014; Mayoral *et al.*, 2020; Mayoral y Mosqueda, 2021; Pitilakis *et al.*, 2014). Si bien diversos investigadores han intentado estudiar la interacción suelo-revestimiento de túneles mediante la instrumentación en túneles reales (He *et al.*, 2019; Karakus y Fowell, 2005; Zhang *et al.*, 2013) y modelos en ensayo de centrifuga (Ng *et al.*, 2013; Nomoto *et al.*, 1999; Song y Arshall, 2020), aún persiste la falta de información sobre la interacción suelo-revestimiento durante la construcción de túneles excavados con método convencional en suelos rígidos cementados. Esta información es necesaria para evaluar la validez y las áreas de mejora de las metodologías de diseño actuales.

En este artículo se presenta un estudio detallado, para lo cual se utilizan la modelización numérica y la instrumentación de la interacción entre el suelo y el revestimiento en un túnel durante la CT, con el objetivo de evaluar el desempeño del revestimiento y buscar la optimización potencial del espesor del mismo. El túnel forma parte de una ampliación del metro que se está construyendo actualmente en Ciudad de México. Al respecto, los resultados obtenidos se compararon con los estimados obtenidos mediante algunos de los métodos analíticos de diseño convencionales más utilizados, para identificar sus principales limitaciones. Finalmente, una vez validada la metodología propuesta, se revisó la eficiencia de diferentes alternativas de revestimiento según el comportamiento global del túnel, al considerar

tanto el revestimiento compuesto: es decir, el revestimiento primario y secundario, *Primary Lining*, (PL) y *Secondary Lining*, (SL), como el revestimiento simple, para establecer un diseño óptimo del revestimiento del túnel para el caso estudiado.

2. Caso de estudio

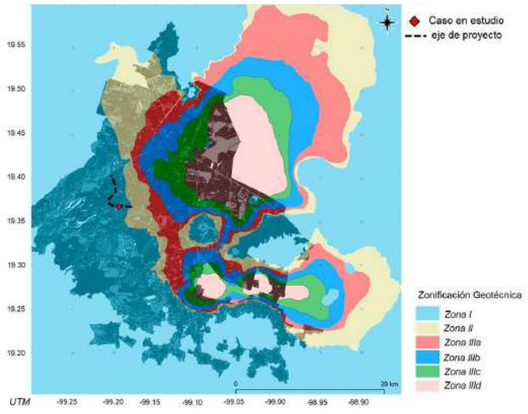
El caso estudiado consiste en un túnel urbano poco profundo de 10 m de ancho y 4.5 km de longitud, actualmente en construcción en la zona poniente de la Ciudad de México. La Figura 2.1 muestra la ubicación del proyecto junto con el mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Aunque la línea del metro instrumentada cruza todas las zonas geotécnicas de la ciudad, los resultados presentados en esta investigación corresponden únicamente a la porción del túnel localizada en la Zona I, principalmente dentro de la denominada formación Tarango, compuesta predominantemente por arenas limosas altamente cementadas y limos arenosos densos a muy densos, con grados variables de cementación. Por lo tanto, los parámetros de resistencia al corte y compresibilidad varían ampliamente. Además, en esta zona es común la presencia de cavidades, cavernas y túneles antiguos excavados para la minería, así como rellenos antrópicos. Estos factores impactan directamente el proceso de excavación del túnel.

2.1 Condiciones geotécnicas

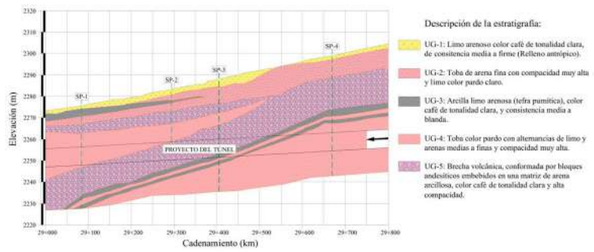
Se realizaron cuatro SPT denominadas SP-1, SP-2, SP-3 y SP-4 en el sitio para caracterizar las condiciones del subsuelo. La profundidad promedio de exploración fue de aproximadamente 40 m. Además, se obtuvieron propiedades índice a partir de muestras alteradas recolectadas a varias profundidades, las cuales se utilizaron para establecer las unidades geotécnicas. Los parámetros de resistencia y deformabilidad se determinaron a partir de ensayos de compresión no confinada y ensayos triaxiales UU realizados en muestras inalteradas, así como mediante pruebas in situ con ficonómetro y presiómetro. La Figura 2.2 muestra la caracterización del perfil del suelo.

De igual forma, se emplearon correlaciones empíricas (Hettiarachchi y Brown, 2009) basadas en el número de golpes del *SPT* (N_{SPT}) para determinar los parámetros de resistencia y deformabilidad (cohesión c, ángulo de fricción interna φ y módulo de Young al 50% de deformación E_{50}). En los casos donde los valores de *SPT* superaron los 50, los valores utilizados en la correlación se extrapolaron de acuerdo con las especificaciones de diseño LRFD para puentes (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales [AASHTO], 2012), ver Ecuación 1.

$$N_{SPT} = \frac{(50+N_2) * 30}{15+N_3} \quad (1)$$



▲ Figura 2.1. Ubicación del túnel en la zonificación geotécnica del Valle de la Ciudad de México.



▲ Figura 2.2. Perfil estratigráfico del terreno y ubicación del túnel.

Capa	USCS	N_{SPT} (Número de Golpes)	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)	E_{50} (MPa)	ν (-)
UG - 1	ML	42	15.8	18	28	120.8	0.32
UG - 2	SM	167	18.2	45	29	900.4	0.28
UG - 3	CL - ML	40	17	13	27	97.5	0.34
UG - 4	ML	126	18.2	40	28	470.5	0.28
UG - 5	SC	80	19.2	33	31	303.2	0.27

Donde: N_{SPT} = número extrapolado de golpes de prueba de penetración estándar; γ = peso unitario; c = cohesión; φ = ángulo de fricción; E_{50} = módulo de Young al 50% de deformación; ν = coeficiente de Poisson.

▲ Tabla 2.1. Propiedades geotécnicas iniciales en el emplazamiento estudiado estimadas con correlaciones.

Donde N_{SPT} es el número extrapolado de golpes de la prueba de penetración estándar y N_2 y N_3 son los avances segundo y tercero de la *SPT*.

Las propiedades geotécnicas del perfil del suelo estimadas inicialmente se resumen en la Tabla 2.1. En esta, el coeficiente de Poisson (ν) se definió a partir de valores típicos para materiales similares. Además, el nivel freático no fue detectado hasta la profundidad máxima explorada.

2.2 Geometría del túnel y procedimiento de excavación

La geometría del túnel se muestra en la Figura 2.3. Se proyectó con un ancho exterior de 10.6 m y una altura exterior de 8.5 m. El procedimiento de construcción consideró tres fases de excavación: una media sección superior, un banqueo central y banqueos laterales alternados. El sostenimiento o revestimiento primario (PL) consistió en una capa de 20 cm de espesor de concreto lanzado reforzado con fibras de acero (SFRS), f'c = 25 MPa. El revestimiento secundario (SL) consiste en concreto armado colado en sitio de 40 cm de espesor, con una resistencia de diseño f'c = 30 MPa a los 28 días.

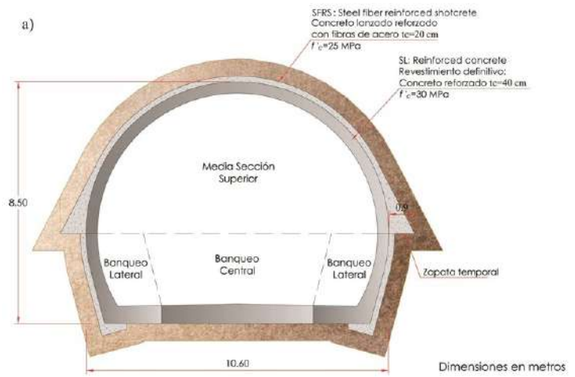
Igualmente, en la Figura 2.4 se muestra esquemáticamente el procedimiento de excavación del túnel, que consta de cuatro fases principales: a) excavación de la media sección superior con avances de 1. m, donde se estabiliza el terreno mediante el revestimiento primario (PL) y se deja un machón central sin excavar para reducir el riesgo de falla del frente del túnel; b) excavación del banco central (etapa 2), que inicia una vez alcanzada una longitud de excavación de 35 m en la media sección superior, por lo que se construye una rampa de trabajo de 9 m de longitud y luego se completa el banco central; c) excavación alternada de los banqueos laterales con avances de 3.0 m (que se estabilizan con una capa de concreto lanzado reforzado con fibras de acero de 20 cm de espesor), que inicia cuando se alcanza una distancia de 35 m de excavación del banco central medida desde el inicio de la rampa; d) refuerzo y colado de las zapatas y paredes laterales del SL del túnel, con un avance de 20 m, para lo cual se implementa el revestimiento (SL) de concreto armado en la bóveda. Simultáneamente, se llevan a cabo el refuerzo y el colado de la losa de fondo para cerrar el anillo del túnel.

Finalmente, se observa que la Figura 2.5 muestra la excavación de la media sección superior completa con el núcleo central (machón), donde se destacan las condiciones adversas del terreno y se observan tanto la mala calidad del suelo como la presencia de filtraciones de agua.

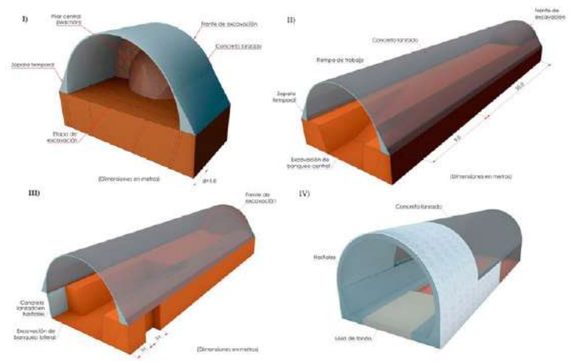
3. Instrumentación del túnel

Se instalaron seis estaciones de medición de convergencias (EM-7, EM-6, EM-5, EM-4, EM-3, EM-2 y EM-1), cada una con tres líneas de medición (L1, L2 y L3) y referencias topográficas. Además, la estación de medición EM-4 se consideró como de control, pues se instrumentó con 1 extensómetro de barra, 3 celdas de presión radial y 2 celdas de presión tangencial, como se muestra en la Figura 2.6 y la Tabla 2.2. Por otro lado, las estaciones EM-5, EM-6 y EM-7 se ubicaron a 5 m, 10 m y 20 m hacia atrás de la sección de control (EM-4) respectivamente, y las estaciones EM-3, EM-2 y EM-1 se ubicaron a 5 m, 10 m y 20 m después de la sección de control (EM-4) respectivamente.

Estas mediciones se complementaron con puntos de control en superficie para monitorear los asentamientos a lo largo del eje del túnel. Además, se instrumentó una sección del túnel (29+300) con un extensómetro de barra y celdas de presión radial y tangencial para determinar las cargas actuantes sobre el revestimiento primero (PL); y se instaló un extensómetro de barra antes de que el frente de excavación alcanzara la sección instrumentada. Posteriormente, se instalaron celdas de presión radial (RPC) entre el suelo y el concreto lanzado reforzado con fibras (SFRC) del revestimiento primario para medir el esfuerzo radial, al igual que celdas de presión tangencial (TPC) embebidas en el concreto lanzado para medir los esfuerzos axiales.



▲ Figura 2.3. Sección transversal del túnel y tipo de sostenimiento o PL utilizado.



▲ Figura 2.4. Esquema del procedimiento de excavación del túnel.

▲ Figura 2.5. Excavación de la media sección superior completa con un núcleo central (machón); se muestran la mala calidad del suelo y la presencia de filtraciones de agua.

La Figura 2.6b muestra la configuración de los puntos de referencia en superficie instalados para monitorear los asentamientos a lo largo del eje del túnel. Para ello, se realizó un levantamiento topográfico tanto del revestimiento primario como del secundario, a fin de establecer convergencias y divergencias. La Tabla 2.2 presenta un resumen de los instrumentos instalados.

Para garantizar un contacto adecuado entre el suelo y las celdas de carga radiales y tangenciales, antes de la colocación del concreto lanzado reforzado con fibras, se alisó la superficie del suelo con una capa delgada de mortero en la interfaz entre los instrumentos y el suelo.

Las Figura 2.7 a Figura 2.11 muestran fotografías de la instalación y la medición de los instrumentos.

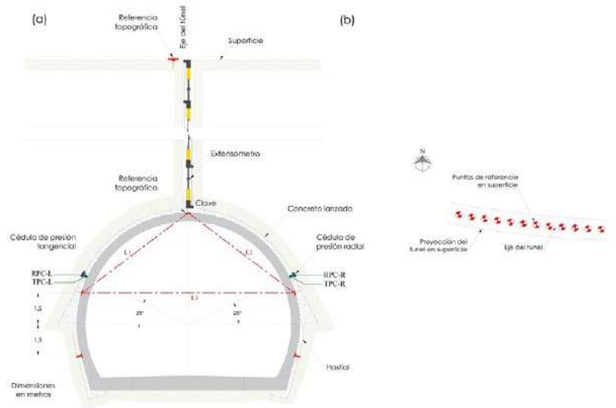
Los transductores de presión no estaban protegidos con conductos de acero, sino con un poliducto de plástico flexible y una cinta especial para evitar roturas, a fin de garantizar la precisión de las mediciones. Finalmente, la Figura 2.12 muestra la instalación de los instrumentos en el data-logger y la primera lectura de cada uno de los instrumentos instalados en el revestimiento primario (PL).

Adicionalmente, la Figura 2.13 muestra los movimientos verticales del terreno medidos con el extensómetro en la clave del túnel (bóveda) en la sección de control. Se observó que, cuando el frente de excavación se encontraba a 70 m de la sección de control, el asentamiento en la clave del túnel tendía a estabilizarse. Cabe anotar que, al iniciar la excavación del banqueo a una distancia de 35 m, según el procedimiento constructivo descrito, los desplazamientos aumentaron hasta 14 mm.

Las Figuras 2.14 a 2.16 presentan los valores medidos en cada estación de convergencia instaladas antes de la sección de control; mientras que en la Figura 2.17 se muestran las mediciones de convergencias en la estación de control, y las Figuras 2.18 a 2.20 los valores medidos en las estaciones de convergencia ubicadas después de la sección de control.

En general, se observa que las paredes o hastiales del túnel tienden a cerrarse, como lo indica la línea L3. Se puede observar cómo, a medida que el frente de excavación se aleja, las deformaciones tienden a estabilizarse hasta que comienza el proceso de excavación de los banqueos, lo que provoca un cambio en la tendencia de las deformaciones.

Del mismo modo, el efecto de la excavación en el asentamiento del suelo en la superficie en la sección de control fue bastante bajo cuando la distancia al frente de excavación alcanzó los 65 m (Figura 2.21). En la misma figura, se observa que 30 m antes de que la excavación llegara a la sección de control, no se produjo ningún asentamiento. Este último inició una vez que comenzó la excavación, alcanzó un máximo de 10 mm, y se estabilizó a los 65 m del frente de excavación. Una respuesta muy similar fue registrada por la referencia instalada en la clave del túnel, cuyos resultados se muestran en la Figura 2.13.



▲ Figura 2.6. Esquema de la instrumentación del túnel: convergencias y divergencias en el interior del túnel.

ID del sensor	Instrumentación	Variables medidas
L1, L2 y L3	Convergencias y divergencias	Distorsión del túnel
TSR-01	Referencias topográficas en superficie	Asentamientos en superficie
Ext-01	Extensómetro	Asentamientos de la clave del túnel
RPC-L, RPC-R y RPC-C	Celdas de presión radial	Esfuerzo radial en el revestimiento primario
TPC-L y TPC-R	Celdas de presión tangencial	Esfuerzo axial en el revestimiento primario

▲ Tabla 2.2. Sensores de instrumentación y variables medidas.

▲ Figura 2.7. Perforación para la instalación del extensómetro y la medición del instrumento.

▲ Figura 2.8. Medición de convergencias durante la excavación de la media sección superior del túnel.

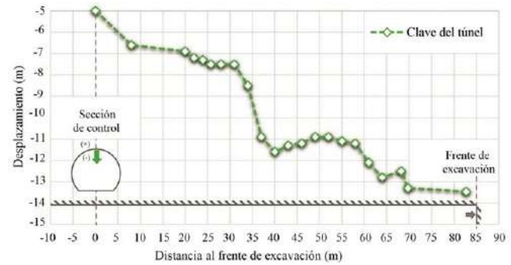
Asimismo, la Figura 2.22 muestra los resultados de las mediciones del extensómetro. Se observa que, 25 m antes de que el frente de excavación alcance la sección de control, no se registran asentamientos. Sin embargo, a 5 m del frente de excavación, estos comienzan a aparecer en el terreno. Para cuando el frente de excavación pasa por la sección de control, ya se ha acumulado un asentamiento de 5 mm, lo que representa el 35% del asentamiento total de 14 mm. Este comportamiento indica que el terreno comienza a ceder

▲ Figura 2.9. Maniobras durante la instrumentación de las celdas radiales.

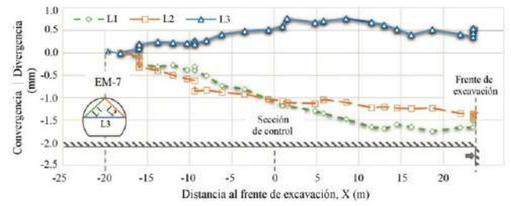
▲ Figura 2.10. Los transductores de presión se protegieron con ductos de acero y se canalizaron hacia el *data-logger*, donde se conectaron.

▲ Figura 2.11. Colocación de la primera capa de concreto lanzado reforzado con fibras, con un espesor de 10 cm, el cual cubre la periferia de la bóveda del túnel y las celdas de presión radiales instrumentadas.

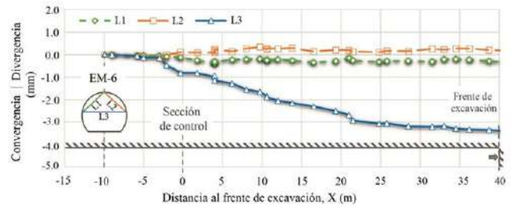
▲ Figura 2.12. Fotografía que muestra la conexión de los instrumentos al *data-logger*. Una vez conectado, las primeras lecturas se realizaron en una computadora portátil con el software Logger Net.



▲ Figura 2.13. Movimientos verticales del terreno medidos en la clave del túnel en la sección de control.



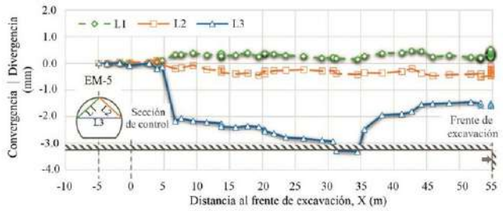
▲ Figura 2.14. Convergencias y divergencias, EM-7, ubicada 20 m antes de la sección de control.



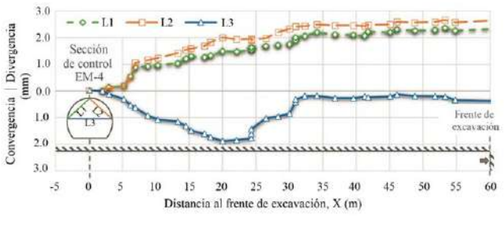
▲ Figura 2.15. Convergencias y divergencias, EM-6, ubicada 10 m antes de la sección de control.

significativamente poco antes de que el frente de excavación lo alcance, y continúa deformándose hasta estabilizarse cuando el frente de excavación se encuentra a 65 m de distancia de la sección de control.

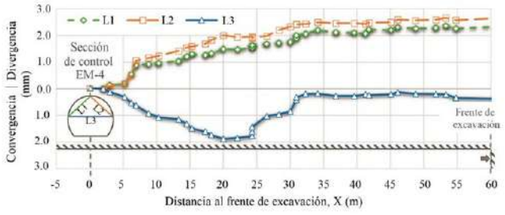
La instrumentación con celdas de presión radiales y tangenciales fue embebida en el soporte en direcciones radial y tangencial para medir los esfuerzos reales que actúan sobre el revestimiento primario (PL). Ante esto, la Figura 2.23 muestra el historial de las presiones radiales registradas en la clave y las



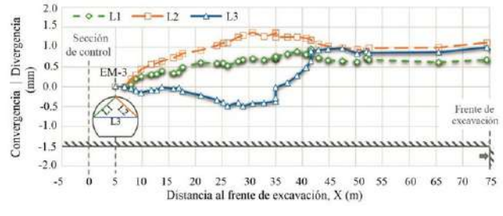
▲ Figura 2.15. Convergencias y divergencias, EM-6, ubicada 10 m antes de la sección de control.



▲ Figura 2.16. Convergencias y divergencias, EM-5, ubicada 5 m antes de la sección de control.



▲ Figura 2.17. Convergencias y divergencias, EM-4, ubicada en la sección de control.



▲ Figura 2.18. Convergencias y divergencias, EM-3, ubicada 5 m después de la sección de control.

paredes del túnel. Al inicio de la excavación, las celdas situadas en los hastiales registraron un aumento repentino de esfuerzos de corte, con lo que alcanzaron hasta 60 kPa cuando el frente de excavación estaba a 25 m de la sección de control. Posteriormente, ambas celdas continuaron registrando un aumento de los esfuerzos, y alcanzaron 80 y 90 kPa cuando el frente de excavación se encontraba a 45 m de distancia. Finalmente, la celda ubicada en la clave registró un máximo de 45 kPa a 25 m, y se estabilizó en ese valor. Este comportamiento se atribuye a la redistribución de esfuerzos en el suelo.

Por otra parte, la Figura 2.24 muestra el historial de los esfuerzos tangenciales registrados en las paredes del túnel. Al inicio de la excavación, ambas celdas registraron un aumento repentino de esfuerzos, al alcanzar los 2.5 MPa cuando el frente de excavación se encontraba a 5 m de la sección de control. Luego, ambas celdas continuaron registrando un aumento de esfuerzos, y alcanzaron 4 MPa cuando el frente de excavación estaba a 12 m, y permanecieron casi constantes a partir de ese punto.

En resumen, las celdas de presión radiales mostraron un aumento significativo (hasta el 50%) de los esfuerzos durante las primeras fases de la excavación, lo que indica una redistribución de esfuerzos en el terreno. No obstante, después de la construcción del sostenimiento (PL) del túnel, los esfuerzos registrados por las celdas radiales y tangenciales se estabilizaron, lo que sugiere una mejora de la estabilidad del túnel antes de la construcción del revestimiento (SL).

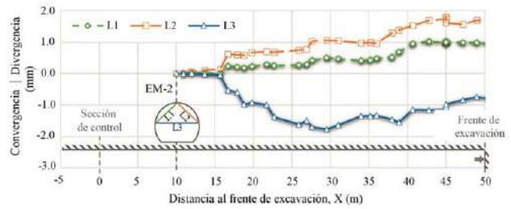
4. Modelación numérica

Se desarrollaron modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas por medio del programa FLAC3D (Itasca Consulting Group, Inc., 2009), como se muestra en la Figura 2.25, para evaluar el mecanismo de transferencia de carga en el sostenimiento (PL) y el revestimiento (SL). Para simular el comportamiento del suelo, se consideró apropiado considerar un modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb, debido a los bajos niveles de no-linealidad del suelo esperados durante el proceso constructivo, así como al comportamiento frágil esfuerzo-deformación exhibido por estos suelos cementados.

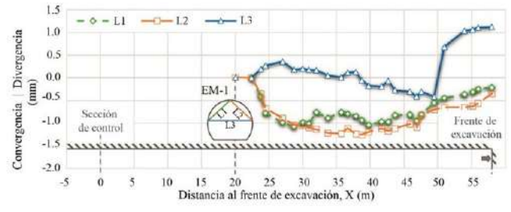
Los parámetros iniciales considerados son los que se muestran en la Tabla 2.1, y el perfil del suelo se idealizó horizontalmente de acuerdo con la estratificación geotécnica prevaleciente en la sección instrumentada del túnel (cadenamientos 29+350 y 29+250). El modelo consta de 319,000 elementos sólidos tridimensionales que representan la masa de suelo a través de la cual se excava el túnel. Además, dentro del dominio del modelo, se adoptó un mayor refinamiento de la malla en la periferia del túnel y en la sección de control establecida, donde los elementos tienen una dimensión promedio de 0.25 m a cada lado. La Figura 2.25a muestra el dominio global del modelo.

Inicialmente, se determinó el estado geostático de esfuerzos en la masa del suelo al aplicar una fuerza de cuerpo equivalente a la aceleración de la gravedad. Como condiciones de frontera, solo se permitieron desplazamientos verticales en las caras laterales y la base del modelo se fijó en todas las direcciones. En cuanto al proceso de modelado, este consistió en la simulación de cada fase de excavación, donde se utilizó un material de tipo nulo (Itasca Consulting Group, Inc., 2009) para representar los elementos que se eliminan del modelo.

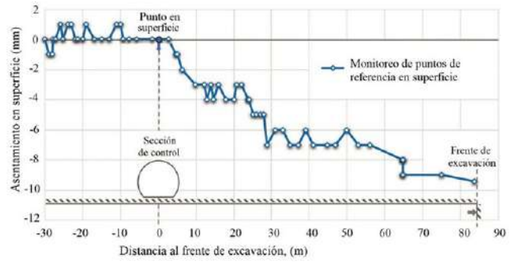
De igual forma, se incluyó la colocación de los revestimientos según el procedimiento constructivo descrito, para lo cual se utilizaron elementos tipo "*shell*" para simular el revestimiento primario, PL y elementos sólidos para el revestimiento secundario, SL. Es importante mencionar que se permitió una relajación del suelo alrededor del túnel antes de colocar el "*shell*", al resolver el sistema de equilibrio en cada fase de excavación para simular de manera efectiva el avance del procedimiento constructivo. Para simular el comportamiento del PL, se utilizó una relación no lineal de esfuerzo-deformación que considera la evolución de las propiedades del concreto lanzado con el tiempo (Figura 2.26). Tal consideración permite la relajación más realista del suelo (elementos sólidos), lo que hace que el PL sea flexible en las primeras etapas y se vuelva más rígido a medida que avanza la excavación, por lo que alcanza su resistencia de diseño a los siete días. Esto evita tanto la generación de concentraciones de esfuerzos de tensión en el revestimiento como la subestimación de los desplazamientos. En el caso del SL, su comportamiento se simuló con un modelo elástico lineal. En suma, la Figura 2.25b muestra la discretización de la malla según las fases de excavación (media sección superior, banco central y banqueos laterales).



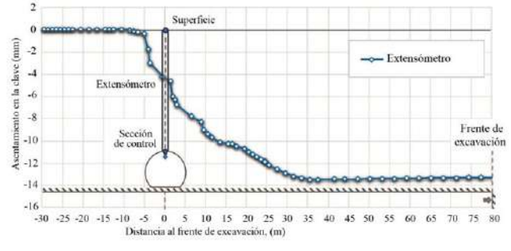
▲ Figura 2.19. Convergencias y divergencias, EM-2, ubicada 10 m después de la sección de control.



▲ Figura 2.20. Convergencias y divergencias, EM-1, ubicada 20 m después de la sección de control.



▲ Figura 2.21. Puntos en la superficie para monitorear los asentamientos en la sección de control.

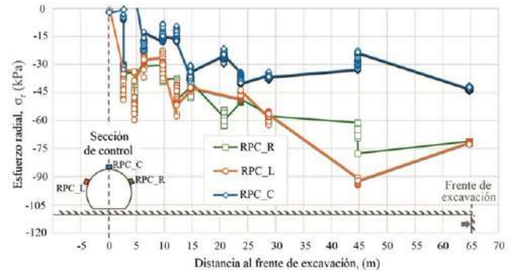


▲ Figura 2.22. Mediciones del extensómetro.

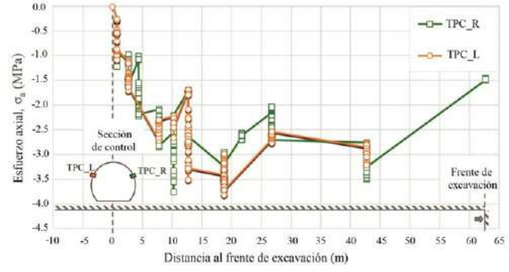
Predicción del modelo y retroanálisis

Se realizó una predicción inicial del modelo a ciegas y análisis retrospectivos para calibrar los modelos numéricos de la sección analizada. Inicialmente, se utilizaron las propiedades mostradas en la Tabla 2.1 para evaluar la capacidad potencial prevista del modelo, para lo cual se compararon los datos recopilados de la instrumentación (referencias topográficas, convergencias y divergencias de la sección transversal del túnel y celdas de presión radial y tangencial) con los obtenidos en los puntos de control colocados en el modelo numérico, cuya ubicación corresponde a cada instrumento (Figura 2.25a).

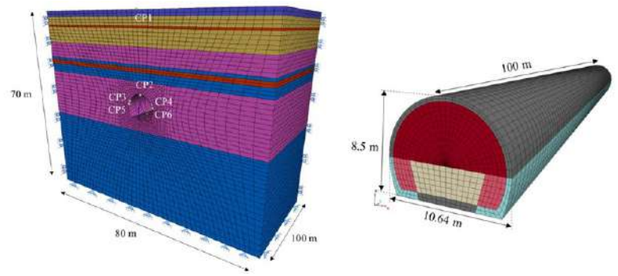
En una segunda etapa, se ajustaron ligeramente las propiedades del suelo para lograr una mejor correspondencia con la respuesta medida. En caso de existir discrepancias, se ajustaron el módulo de Young, la cohesión y el ángulo de fricción para considerar los cambios asociados al proceso de excavación en el suelo adyacente a la excavación, a fin de minimizar el error relativo. Este paso se repitió hasta que el error relativo entre los valores calculados y medidos (asentamientos



▲ Figura 2.23. Presiones radiales registradas.

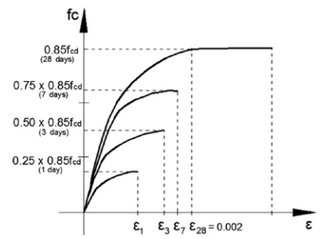


▲ Figura 2.24. Presiones axiales registradas.



(a) (b)

▲ Figura 2.25. Malla tridimensional de diferencias finitas: a) dominio global del modelo; y b) discretización de las etapas de construcción.

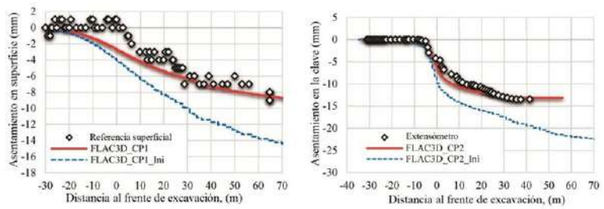


▲ Figura 2.26. Evolución de la relación esfuerzo-resistencia del SFRC a lo largo del tiempo.

Capa	USCS	N_{SPT} (Número de Golpes)	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)	E_{50} (MPa)	ν (-)
UG - 1	ML	51	15.8	20.5	28	160	0.32
UG - 2	SM	167	18.2	51.2	30	970	0.28
UG - 3	CL - ML	40	17	15.6	27	123	0.34
UG - 4	ML	126	18.2	47.5	28	590	0.28
UG - 5	SC	80	19.2	36.3	32	445	0.27

Donde: N_{SPT} = número extrapolado de golpes de prueba de penetración estándar; γ = peso unitario; c = cohesión; φ = ángulo de fricción; E_{50} = módulo de Young al 50% de deformación; ν = coeficiente de Poisson.

▲ Tabla 2.3. Propiedades geotécnicas calculadas mediante el retroanálisis en el sitio estudiado.



▲ Figura 2.27. Asentamientos registrados y previstos en la superficie sobre el eje del túnel y en la clave del túnel.

en la superficie y la clave del túnel, esfuerzos radiales y axiales) se minimizó. Las propiedades finales (obtenidas a través del retroanálisis) se presentan en la Tabla 2.3.

En ese sentido, la Figura 2.27 muestra los desplazamientos obtenidos del modelo numérico y aquellos medidos en la superficie mediante levantamientos topográficos, junto con las lecturas del extensómetro instalado desde la superficie hasta la clave del túnel. Cabe destacar que la deformación del terreno en la superficie es de aproximadamente 1 mm en la sección instrumentada cuando la excavación alcanza esta ubicación, mientras que en la clave del túnel alcanza los 6 mm. Para mayor detalle, las predicciones iniciales del modelo a ciegas, identificadas como FLAC_ini, también se incluyeron en todas las comparaciones.

De ese modo, después de que el frente de excavación pasa por la sección instrumentada, se observa una deformación abrupta tanto en la superficie del terreno como en la clave del túnel. Esto está asociado con la relación esfuerzo-deformación frágil observada en las arenas limosas cementadas y los limos arenosos, como se muestra en la Figura 2.28, que resume las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de ensayos de compresión no confinada (UCT) de los geomateriales presentes en el sitio estudiado.

Los movimientos verticales y horizontales en la clave del túnel y las paredes laterales, respectivamente, se presentan en la Figura 2.29. Como se puede observar, los resultados obtenidos con el modelo numérico coinciden adecuadamente con los datos recopilados mediante la instrumentación. Como era de esperarse, se registró un desplazamiento mayor en la clave del túnel en comparación con el desplazamiento horizontal medido en las paredes laterales o hastiales.

De manera similar, la Figura 2.30 muestra las presiones medidas en las celdas de carga TPC (tangenciales) y RPC (radiales) ubicadas en las paredes laterales o hastiales y en la clave del túnel, junto con las calculadas mediante el modelo numérico. Como se puede observar, las predicciones del modelo coinciden con la respuesta medida.

Por otra parte, las convergencias medidas y calculadas en el SL después de su construcción se muestran en la Figura 2.31. Como se puede observar, existe una buena concordancia entre la respuesta calculada y la medida; por lo tanto, el modelo numérico es capaz de prever con gran precisión el comportamiento del SL en todos los casos analizados.

5. Comparación con métodos analíticos

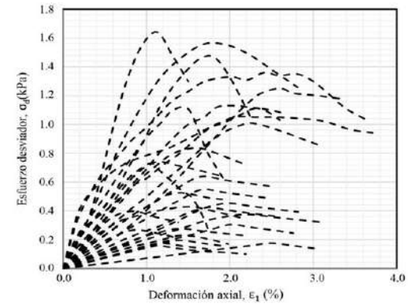
Con frecuencia, los métodos simplificados, como aquellos basados en el desarrollo de la presión de reblandecimiento del terreno en la bóveda del túnel (Bierbaumer, 1913; Terzaghi, 1964), pueden llevar a diseños costosos y escenarios inseguros durante la ejecución del túnel. Estos enfoques de diseño ignoran el mecanismo real de interacción suelo-revestimiento del túnel y, por lo tanto, solo deberían utilizarse en el diseño preliminar del túnel.

Otro enfoque de diseño comúnmente empleado para estimar las presiones sobre el revestimiento, que intentan considerar la interacción suelo-revestimiento del túnel y las deformaciones, es el llamado MCC (Panet, 1995). Esta metodología se basa en el desarrollo de la curva de reacción del suelo (GRC) y la curva de reacción del soporte o sostenimiento (SRC), que permiten calcular el alivio de esfuerzos debido al desconfinamiento del suelo durante la excavación, así como estimar las deformaciones alrededor del túnel en la secuencia de implementación del revestimiento conforme la excavación avanza gradualmente (Alonso *et al.*, 2003; Oreste, 2009).

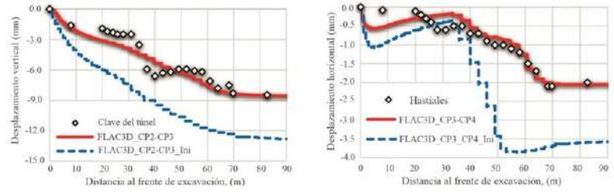
El MCC permite calcular la presión radial que actúa sobre el PL, definida como la intersección entre las curvas GRC y SRC. De esta manera, solo se considera como presión activa sobre el revestimiento aquella que aún no ha sido redistribuida en el suelo. Para obtener el desplazamiento correspondiente a esa redistribución de esfuerzos, es necesario calcular otra curva, convencionalmente llamada LDP, que proporciona el desplazamiento esperado alrededor del túnel conforme el frente de excavación se acerca a la sección de control y a medida que el frente de excavación se aleja de esta. Aunque esta metodología ofrece una forma más razonable de obtener las presiones en el revestimiento, la mayoría de las ecuaciones existentes han sido derivadas para condiciones altamente idealizadas (campo de tensiones isotrópico con K_o = 1, secciones transversales circulares, etapa de excavación, condiciones de deformación plana).

Adicionalmente, la Figura 2.32b muestra las curvas GRC y SRC, calculadas con las ecuaciones propuestas por varios autores, así como las obtenidas con el modelo calibrados en FLAC^{3D} al considerar la instalación del soporte tanto en la clave como en las paredes laterales. De esa manera, la GRC incluye las curvas calculadas por Stille *et al*. (1989)], Tamez *et al*. (1997), Alonso *et al*. (2003) y Oreste (2009), que arrojaron resultados similares al considerar propiedades iniciales. Por otro lado, la curva de Fairhurst (1991) predijo valores de desplazamiento mayores, dado que considera parámetros de resistencia residual en la región plástica alrededor del túnel. Finalmente, la Figura 2.32b muestra la LDP, así como el desplazamiento previo a la convergencia (u_0 / u_{max}).

Como puede observarse, todos los modelos analíticos considerados subestiman tanto los desplazamientos del terreno como la distribución de presiones que actúan sobre el revestimiento primario (PL). Esto constituye una fuente importante de asentamientos del terreno durante la construcción del túnel, que fácilmente puede superar los estados límite de servicio de las estructuras cercanas en zonas urbanas. Además, los asentamientos diferenciales asociados a este hecho pueden provocar daños estructurales en edificaciones adyacentes.

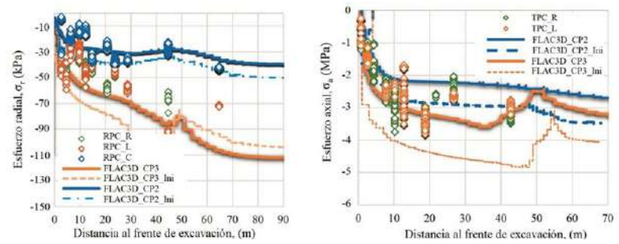


▲ Figura 2.28. Relación esfuerzo-deformación de los suelos de toba obtenida en ensayos de compresión no confinada.



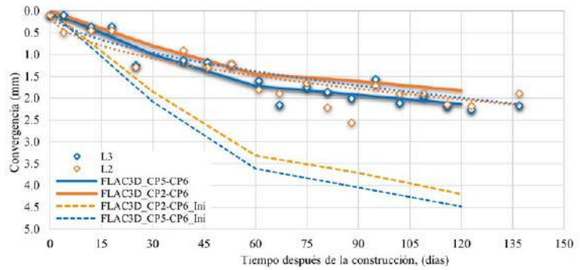
(a) (b)

▲ Figura 2.29. Movimientos del suelo medidos y previstos en a) la clave del túnel y b) las paredes laterales.



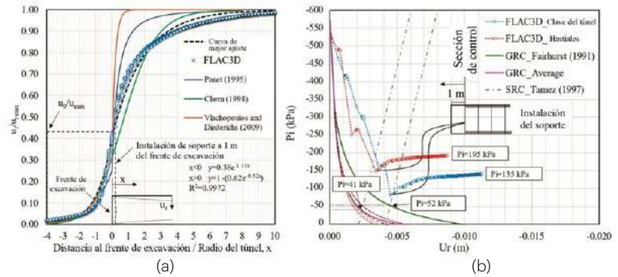
(a) (b)

▲ Figura 2.30. Presiones medidas y previstas en el PL: a) radial; y b) axial.

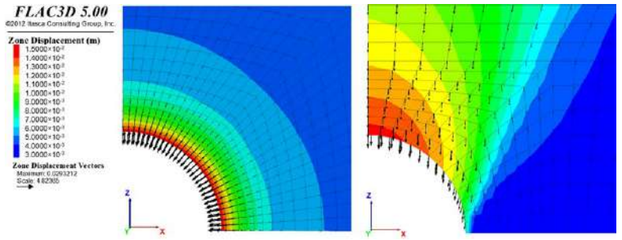


▲ Figura 2.31. Convergencias medidas y previstas en la sección de control del SL.

Asimismo, en la Figura 2.32a, la curva ajustada a partir del modelo numérico calibrado exhibe un comportamiento diferente al de otras ecuaciones propuestas por otros autores, derivadas de datos medidos (Chern *et al.*, 1998), análisis elásticos (Panet, 1995) y modelos numéricos (Vlachopoulos y Diederichs, 2009). Este comportamiento puede atribuirse a las condiciones idealizadas consideradas para derivar las ecuaciones de la GRC y la LDP, tales como la suposición de una sección transversal circular del túnel o un estado de esfuerzos inicial isotrópico (K_o = 1).



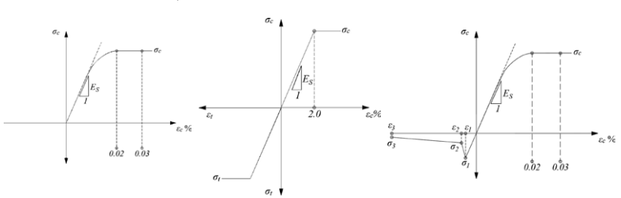
▲ Figura 2.32. a) Curvas de reacción del suelo y reacción del sostenimiento, calculadas mediante métodos analíticos y con el modelo numérico calibrado; y b) LDP, calculado mediante métodos analíticos y con el modelo numérico.



▲ Figura 2.33. Contornos de desplazamientos alrededor del túnel calculados con a) las condiciones idealizadas de los métodos analíticos y b) las condiciones reales del modelo numérico calibrado.

Caso	Espesor del revestimiento primario (m)	Espesor del revestimiento secundario (m)
1	0.2	0.4
2	0.3	0.3
3	0.4	0.2
4	0.6	--

▲ Tabla 2.4. Casos de espesor de PL analizados.



▲ Figura 2.34. Leyes constitutivas utilizadas en la definición de los diagramas de interacción: a) concreto; b) barras de acero; y c) SFRS.

Por otra parte, la Figura 2.33 muestra los contornos de desplazamiento alrededor del túnel, para lo cual se consideran las condiciones idealizadas del MCC (Figura 2.33a) y las condiciones reales del modelo numérico calibrado (Figura 2.33b). La principal diferencia radica en que la distribución de los desplazamientos está fuertemente influenciada por la componente vertical y no por las deformaciones radiales, como lo asumen las curvas del MCC.

6. Optimización del desempeño del revestimiento del túnel

Para estudiar la sensibilidad del espesor del revestimiento primario (PL) y del revestimiento secundario (SL) en el desempeño del túnel, se realizó un análisis paramétrico. Se consideraron cuatro casos diferentes, resumidos en la Tabla 2.4. El desempeño del revestimiento se evaluó utilizando diagramas de interacción M-N (Kaiser, 1985; Mayoral *et al.*, 2020; Sauer *et al.*, 1994), al comparar la combinación de momentos flexionantes y fuerzas normales calculadas con el límite definido por la frontera en el diagrama de interacción. Estos diagramas representan gráficamente y de forma simplificada la superficie de falla crítica, pues separan las combinaciones de carga aceptables y las que exceden los límites permitidos.

El método σ - ε se utilizó para derivar los diagramas de interacción M-N, es decir, el momento flexionante-fuerza normal (Sauer *et al.*, 1994; Vandewalle, 2000). Al respecto, las Figuras 2.34ª y 2.34b muestran el modelo constitutivo considerado para el revestimiento secundario (SL): concreto y barras de acero, respectivamente. La Figura 2.34c representa el modelo constitutivo para el revestimiento primario (PL), concreto lanzado reforzado con fibras de acero, donde se puede observar la contribución de las fibras de acero en la porción de tensión de la curva.

De igual modo, las Figuras 2.35 y 2.35b muestran los diagramas de interacción y fuerzas actuantes en los primeros tres casos, para el revestimiento primario (PL) y el revestimiento secundario (SL) respectivamente. En todos los casos, las fuerzas que actúan sobre el SL son mínimas y se concentran en el centro del diagrama. Por otro lado, las fuerzas actuantes sobre el PL son más significativas, sin embargo, siguen presentando un buen margen de seguridad, lo cual es más evidente en el caso de un espesor del PL de 60 cm (ver Figura 2.36).

Adicionalmente, la Figura 2.37 presenta los perfiles de desplazamiento vertical en superficie en una sección transversal perpendicular al eje del túnel para todos los casos estudiados. Como era de esperarse, con un espesor del revestimiento primario (PL) de 60 cm, la magnitud de los asentamientos es menor, incluso sin el revestimiento secundario (SL), el cual en este caso tiene una contribución despreciable.

Estos resultados sugieren que la mejor alternativa para la construcción de túneles en este tipo de materiales es el uso de un solo revestimiento robusto, dado que puede soportar las fuerzas derivadas de la redistribución de esfuerzos del terreno durante la excavación del túnel, al mismo tiempo que disminuye el impacto de la excavación en la superficie. Esta alternativa ha sido utilizada en proyectos de túneles previos en zonas cercanas con condiciones geotécnicas similares (Tamez *et al.*, 1997) y en otras partes del mundo, al destacarse por su rápida construcción y su instalación práctica en comparación con un revestimiento compuesto.

Aunque se han identificado varios problemas en el uso de revestimientos únicos, como altas temperaturas durante el proceso de ganancia de resistencia, grandes deformaciones y la contracción, se ha observado que estas limitaciones pueden superarse si estos revestimientos se aplican en 2 o 3 capas de espesores variables.

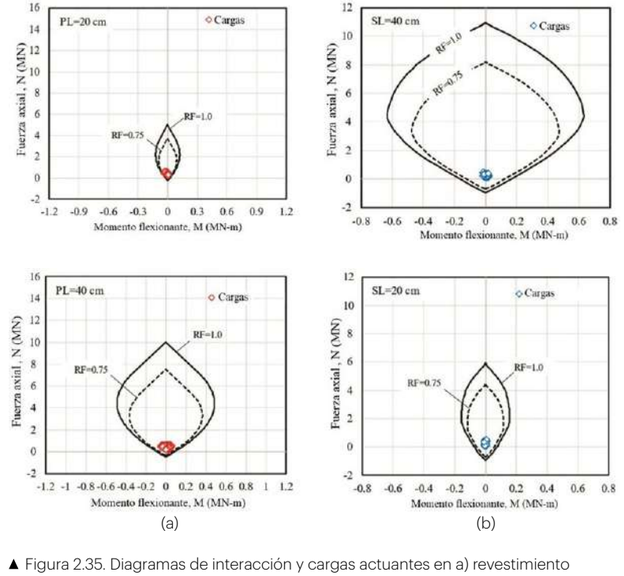
7. Conclusiones

El diseño moderno de revestimientos para túneles debe contemplar la revisión simultánea de los Estados Límite de Falla (SLF) y los Estados Límite de Servicio (SLS), integrando un enfoque de diseño basado en el desempeño (*Performance-Based Design*). En entornos urbanos densamente poblados, esta práctica es esencial para controlar de forma efectiva los desplazamientos del terreno circundante al túnel, minimizando así el riesgo de asentamientos diferenciales que puedan comprometer la integridad estructural de edificaciones cercanas.

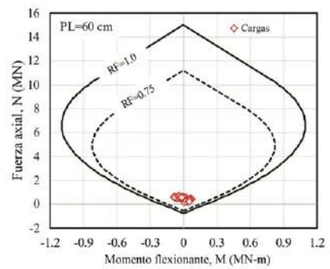
En este contexto, el presente artículo busca contribuir a cerrar la brecha existente en la información de campo sobre la distribución real de las cargas que actúan sobre el revestimiento primario (*Primary Lining*, PL) durante la construcción de túneles excavados con el método convencional. El análisis se centra en obras emplazadas en zonas urbanas densamente pobladas, donde las interacciones suelo–revestimiento adquieren un papel determinante para la seguridad, el servicio y la durabilidad de la infraestructura.

Para esto, se llevó a cabo una extensa instrumentación en una sección de un túnel de metro de 4.5 km de longitud, actualmente en construcción en la zona noroeste de la Ciudad de México. La instrumentación incluyó celdas de carga para medir las presiones radiales y axiales en el revestimiento primario (PL), un extensómetro de barra, puntos de control de levantamiento topográfico en la superficie del terreno y mediciones de convergencias y divergencias en la sección transversal en el interior del túnel. Los resultados presentados se analizaron posteriormente con modelos numéricos tridimensionales por diferencias finitas. De ese modo, tanto los datos experimentales como los numéricos recopilados muestran claramente que los modelos analíticos tradicionales subestiman considerablemente las deformaciones del terreno y las cargas de diseño en el revestimiento primario (PL), también llamado sostenimiento. Esto se debe probablemente a las hipótesis empleadas para derivar estas soluciones analíticas, como las suposiciones de secciones transversales circulares del túnel y los campos de esfuerzos isotrópicos uniformes.

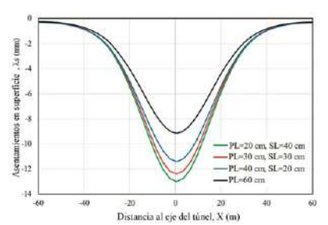
En este sentido, es importante destacar que para la geometría de túnel en herradura analizada, la distribución de los desplazamientos está fuertemente condicionada por la componente vertical, mientras que las deformaciones



▲ Figura 2.35. Diagramas de interacción y cargas actuantes en a) revestimiento primario (PL) y b) revestimiento secundario (SL).



▲ Figura 2.36. Diagrama de interacción y cargas actuantes en el PL.



▲ Figura 2.37. Desplazamientos verticales en la superficie, perpendiculares al eje del túnel, para cada caso analizado.

radiales tienen una influencia secundaria, contrariamente a lo que se asume en los enfoques basados en el Método Convergencia-Confinamiento (MCC). Esta diferencia de comportamiento implica que el diseño del revestimiento bajo criterios estrictamente derivados del MCC puede no ser el más eficiente, lo que podría conducir a soluciones sobredimensionadas o, por el contrario, inseguras. En casos extremos, esta limitación metodológica podría traducirse en daños estructurales a edificaciones circundantes, especialmente en entornos urbanos densamente poblados.

De igual manera, se debe prestar especial atención a suelos frágiles, como los limos arenosos cementados y las arenas limosas cementadas, los cuales presentan un comportamiento de reblandecimiento por deformación y alcanzan su superficie de falla con deformaciones relativamente pequeñas, pudiendo derivar en colapsos catastróficos. En el presente caso, se observó que la deformación vertical en equilibrio de la clave del túnel fue subestimada aproximadamente en un tercio con respecto a la deformación medida en campo.

Adicionalmente, las cargas inferidas en el revestimiento secundario (SL), obtenidas a partir del modelo numérico calibrado, representan apenas una décima parte de las cargas soportadas por el revestimiento primario (PL). Este comportamiento se explica por la fragilidad de los limos arenosos cementados, la cual provoca que entre el 70% y el 90% de la carga del terreno sea absorbida por el PL durante el avance inicial de la excavación, antes de la construcción del SL.

Los resultados del estudio numérico permiten concluir que, en entornos urbanos densamente poblados y con suelos cementados rígidos, resulta más eficiente emplear un revestimiento robusto que permita un control más efectivo de las deformaciones del terreno, reduzca el riesgo de asentamientos diferenciales que afecten a las estructuras adyacentes y acelere el proceso constructivo, en comparación con un sistema de soporte compuesto por PL y SL convencionales.

En síntesis, un revestimiento robusto no solo puede asumir las cargas del terreno circundante, sino también redistribuir los esfuerzos durante la excavación y minimizar los impactos en la superficie. Por ello, tanto los Estados Límite de Falla (SLF) como los Estados Límite de Servicio (SLS) deben verificarse de forma integral en la fase de diseño, limitando el uso de enfoques empíricos y analíticos únicamente a estimaciones preliminares.

Referencias

Alonso, E.; Alejano, L.R.; Varas, F.; Fdez-Manin, G.; Carranza-Torres, C. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 2003, 27, 1153-1185.

de Ágreda, E.A.P. Los fracasos inspiran el progreso: La protección de edificios sensibles frente a la tunelización. GeoStrata Mag. Arch. 2019, 23, 34- 39.

Argyroudis, S.; Tsinidis, G.; Gatti, F.; Pitilakis, K. Effects of SSI and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels. Soil Dyn. Earthq. Eng. 2017, 98, 244-256.

Behnen, G.; Nevrly, T.; Fischer, O. Soil-structure interaction in tunnel lining analyses. Geotechnik 2015, 38, 96-106. https://doi.org/10.1002/gete.201400010.

Bierbaumer, A.H. Die Dimensionierung Des Tunnel Manerwerks; W. Engelmann: Liepzig, Alemania, 1913.

Bin, L.; Liu, X.; Xu, M. Reliability Analysis of Primary Supports in Deep and Soft-rock Tunnel Based on Probabilistic Design Numerical Method. Electron. J. Geotech. Eng. 2016, 21, 5013-5028.

Chern, J.C.; Shiao, F.Y.; Yu, C.W. An Empirical Safety Criterion for Tunnel Construction: Actas del Simposio Regional sobre Ingeniería de Rocas Sedimentarias; Comisión de Construcción Pública: Taipei, Taiwan, 1998; pp. 222-227.

Dong, Z.; Zhang, X.; Tong, C.; Chen, X.; Feng, H.; Zhang, S. Grouting-induced ground heave and building damage in tunnel construction: Un estudio de caso del metro de Shenzhen. Undergr. Space 2022, 7, 1175-1191.

Einstein, H.H.; Schwartz, C.W. Análisis simplificado para el sostenimiento de túneles. J. Geotech. Eng. Div. 1979, 105, 499-518.

Fairhurst, C. Filosofía general del diseño de soportes para estructuras subterráneas en roca dura. Undergr. Struct. Des. Constr. 1991, 59, 1-55.

Ghorbani, A.; Hasanzadehshooiili, H. A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic-plastic-EDZ rock mass considering strain softening. Tunn. Undergr. Space Technol. 2019, 84, 413-431. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.045.

Guo, X.; Du, D.; Dias, D. Reliability analysis of tunnel lining considering soil spatial variability. Eng. Struct. 2019, 196, 11. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109332.

Hamrouni, A.; Dias, D.; Sbartai, B. Reliability analysis of shallow tunnels using the response surface methodology. Undergr. Sp. 2017, 2, 246-258. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2017.11.003.

He, B.M.; Zhang, X.W.; Li, H.P. Ground load on tunnels built using new Austrian tunneling method: Study of a tunnel passing through highly weathered sandstone. Bull. Eng. Geol. Environ. 2019, 78, 6221-6234.

Hettiarachchi, H.; Brown, T. Use of SPT Blow Counts to Estimate Shear Strength Properties of Soils: Energy Balance Approach. J. Goetechnical Geoenviromental Eng. 2009, 135, 830-834.

ITA. General Report on Conventional Tunnelling Method; Asociación Internacional de Túneles y Espacios Subterráneos: Chatelaine-Geneve, Suiza, 2009; 27.

Itasca Consulting Group. FLAC, Análisis Lagragiano Rápido de Continuos. Guía del usuario; Itasca Consulting Group, Inc: Minneapolis, MN, EE.UU., 2009.

Kaiser, P. Evaluación racional de la capacidad del revestimiento del túnel. En Proceedings of the 5th Canadian Tunneling Conference, Montreal, QC, Canadá, 1985.

Karakus, M.; Fowell, R.J. Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution. Tunn. Undergr. Space Technol. 2005, 20, 514-524.

Lim, C.X.; Jusoh, S.N.; Lim, C.B.; Abdullah, R.A.; Yunus, N.Z.M. Tunnel depth effect to pile in Tunnel's influence zone. Phys. Chem. Earth 2023, 129, 103298.

Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales (AASHTO). Especificaciones de diseño de puentes LRFD; AASHTO: Washington, DC, EE.UU., 2012.

Mayoral, J.M. Evaluación del comportamiento de túneles construidos en suelos rígidos. Tunn. Undergr. Space Technol. 2014, 43, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.03.013.

Mayoral, J.M.; Melis-Maynar, M.J.I.; de la Sancha, A.R. Enfoque integral del diseño basado en prestaciones para túneles. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 2015, 2522, 121-130. https://doi.org/10.3141/2522-12.

Mayoral, J.M.; Mosqueda, G.; De La Rosa, D.; Alcaraz, M. Comportamiento de túneles durante el sismo Puebla-México 19 de septiembre de 2017. Earthq. Spectra 2020, 36, 288-313. https://doi.org/10.1177/8755293020976140.

Mayoral, J.M.; Mosqueda, G. Mejora de la cimentación para reducir la interacción sísmica túnel-edificio sobre arcilla blanda. Tunn. Undergr. Space Technol. 2021, 115, 104016. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104016.

Mayoral, J.M.; Alcaraz, M.; Tepalcapa, S. Comportamiento sísmico de sistemas suelo-túnel-edificación en suelos rígidos. Earthq. Spectra 2023, 39, 1214-1239. https://doi.org/10.1177/87552930231168165.

Ng, C.W.W.; Lu, H.; Peng, S.Y. Modelización centrífuga tridimensional de los efectos de la tunelización gemela en un pilote existente. Tunn. Undergr. Space Technol. 2013, 35, 189-199.

Nomoto, T.; Imamur, S.; Hagiwara, T.; Kusakabe, O.; Fujii, N. Shield Tunnel Construction in Centrifuge. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 1999, 125, 237-345.

Oliver, A. Se cuestionan las pruebas de Heathrow. New Civil Engineer. 1994, 4-5.

Oliver, A. Rush to stabilise Heathrow chasm. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1995, 4, 189A.

Oreste, P.P. A Procedure for Determining the Reaction Curve of Shotcrete Lining Considering Transient Conditions. Rock Mech. Rock Eng. 2003, 36, 209-236. https://doi.org/10.1007/s00603-002-0043-z.

Oreste, P. El método de convergencia-confinamiento: Funciones y límites en el diseño geomecánico moderno de túneles. Am. J. Appl. Sci. 2009, 6, 757-771. https://doi.org/10.3844/ajas.2009.757.771.

Panet, M. Calcul des Tunnels par la Me'thode de Convergence-Confinement; Presses del'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: París, Francia, 1995; p. 178.

Panet, M.; Bouvard, A.; Dardard, B.; Dubois, P.; Givet, O.; Guilloux, A.; Launay, J.; Duc, N.M.; Piraud, J.; Tournery, H.; ***et al.*** The Convergence-Confinement Method AFTES-Recommendations des Groupes Travait; Asociación Francesa de Túneles y Espacio Subterráneo (AFTES): París, Francia, 2001.

Panet, M.; Guenot, A. Análisis de la convergencia tras el paramento de un túnel: Tunnelling 82. En Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton, Reino Unido, 7-11 de junio de 1982; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts; IMM: Londres, Reino Unido, 1982; pp. 197-204, 20.

Pitilakis, K.; Tsinidis, G.; Leanza, A.; Maugeri, M. Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects. Soil Dyn. Earthq. Eng. 2014, 67, 1-15.

Sadeghiyan, R.; Hashemi, M.; Moloudi, E. Determinación del perfil de convergencia longitudinal considerando el efecto de los parámetros de resistencia del suelo. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2016, 82, 10-21. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.10.011.

Sauer, G.; Gall, V.; Bauer, E.; Dietmaier, P. Design of tunnel concrete linings using limit capacity curves. En Proceedings of the 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, WV, USA, 22-28 de mayo de 1994; pp. 2621-2626.

Son, M. Response analysis of nearby structures to tunneling-induced ground movements in sandy soils. Tunn. Undergr. Space Technol. 2015, 48, 156-169.

Son, M. Response analysis of nearby structures to tunneling-induced ground movements in clay soils. Tunn. Undergr. Space Technol. 2016, 56, 90-104.

Song, G.; Arshall A.M. Centrifuge modelling of tunnelling induced ground displacements: Túneles de control de presión y desplazamiento. Tunn. Undergr. Space Technol. 2020, 103, 103461.

Sousa, R.L.; Einstein, H.H. Lecciones de los accidentes durante la construcción de túneles. Tunn. Undergr. Space Technol. 2021, 113, 103916. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103916.

Stille, H.; Holmberg, M.; Nord, G. Support of weak rock with grouted bolts and shtocrete. Internatinal J. Rock Mech. Min. Sci. 1989, 26, 99-113.

Szechy, K. El arte de construir túneles; Akademiai Kaido: Budapest, Hungría, 1970.

Tamez, E.; Rangel, J.L.; Y Holguin, E. Diseño Geotécnico de Túneles; TGC Geotecnia: Ciudad de México, México, 1997. (En español)

Terzaghi, K. Introducción a la geología de túneles en la excavación de túneles en roca con soportes de acero: Youngstown, OH, EE.UU., 1964.

Vandewalle, L. Recomendaciones del RILEM TC 162-TDF: Métodos de ensayo y diseño para hormigón reforzado con fibras de acero. Mater. Struct. Mater. Et Constr. 2000, 33, 3-5.

Verman, M.; Singh, B.; Jethwa, J.L.; Viladkar, M.N. Determination of Support Reaction Curve for Steel-Supported Tunnels. Tunn. Undergr. Space Technol. 1995, 10, 217-224.

Vlachopoulos, N.; Diederichs, M.S. Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. Rock Mech. Rock Eng. 2009, 42, 131-146. https://doi.org/10.1007/s00603-009-0176-4.

Wang, Y.Q.; Luo, M.R. Analysis of Support Reaction Curves considering Time-Varying Effect of Shotcrete. Adv. Civ. Eng. 2020, 2020, 6069432. https://doi.org/10.1155/2020/6069432.

Wood, D.M. Geotechnical Modelling; Taylor y Francis; CRC Press: Boca Ratón, NW, EE.UU., 2004.

Zhang, D.; Fang, Q.; Li, P.; Wong, L.N.Y. Structural Responses of Secondary Lining of High-Speed Railway Tunnel Excavated in Loess Ground. Adv. Struct. Eng. 2013, 16, 1371-1379. https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.8.1371.

AGENDA

Octubre de 2025

1 – 2

SIMPOSIO DE MICROTÚNELES Y TECNOLOGÍAS SIN ZANJA
Ciudad de México, México
https://www.amitos.org/cursos/registro-simposio-microtuneles-tecnologias-2025.php

1 – 3

SOUTHEASTERN EUROPE TUNNELLING CONFERENCE
Belgrado, Serbia
https://setc-2025.rs/

2 – 3

MICROTÚNELES Y TECNOLOGÍAS SIN ZANJA
Simposio
CDMX, México
https://www.amitos.org/cursos/registro-ciclo-jornadas-tecnicas-2025.php

15 – 16

AVANCES Y RETOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS EN COSTA RICA Y MÉXICO
Webinar
Evento en línea organizado por GIJ AMITOS y GIJ ACROS
https://us06web.zoom.us/webinar/register/WN_4wOLSXgnSnaP52kcBVLT0Q

Noviembre de 2025

10 – 14

ATC 2025
Perth, Australia
https://atc2025.com.au/

25 – 27

STUVA - CONFERENCE 2025
Hamburgo, Alemania
https://www.stuva-conference.com/en.html

16 – 18

TAC 2025 WORKSHOP
Vancouver, Canadá
https://www.tunnelcanada.ca/tac_2025_workshop.php

19 – 21

15TH INTERNATIONAL TUNNELING AND UNDERGROUND STRUCTURES CONFERENCE
Liubliana, Eslovenia
https://conference.ita-slovenia.si/en/

Mayo de 2026

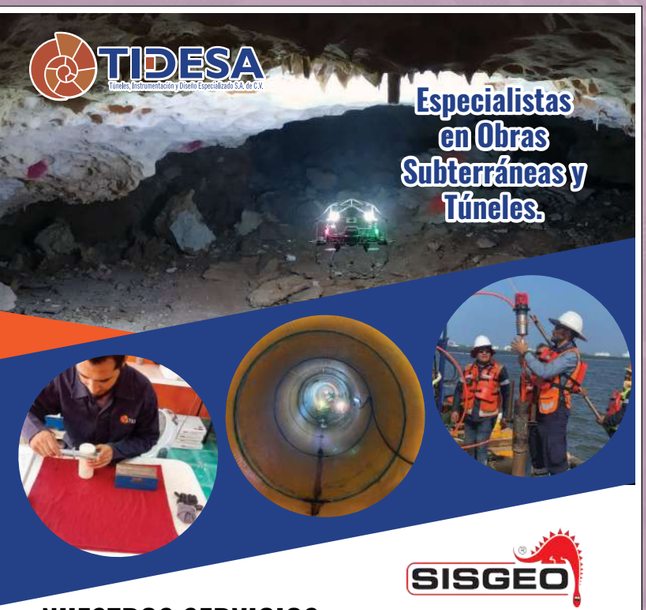
15 – 21

WORLD TUNNEL CONGRESS - WTC 2026
Montreal, Canadá
https://www.tunnelcanada.ca/wtc2026.php

Nuevos socios AMITOS 2025 ¡Bienvenidos!

SOCIOS INDIVIDUALES
Camila Guerrero Ramírez

SOCIOS GIJ
Osiris Octavio Ortega Aguilar
Janet Álvarez
Nishdally Pastor Santos
Ángel de Jesús López



NUESTROS SERVICIOS

- Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas.
- Suministro e Instalación de Instrumentación Geotécnica.
- Análisis y Diseño Geotécnico; Modelado Numérico.
- Servicios de Ingeniería Geotécnica Aplicada a Minería.
- Laboratorio de Mecánica de Suelos, Terracerías y Rocas.
- Inspección y Exploración de Drones.
- Perito Profesional Certificado en Túneles y Obras Subterráneas por el CICM.

SISGEO
Representantes técnicos comerciales exclusivos para México.

MÁS INFORMACIÓN:
@tidesa_tuneles
@tidesa0
contacto@tidesa.com.mx
www.tidesa.com.mx
Sucursal: TIDESA COLOMBIA S.A.S

APROVECHAMIENTO DE LOS ESPACIOS SUBTERRÁNEOS

Seminario Internacional de Lyon: más allá de límites y fronteras

Hace unos años, la Fabrique de la Cité publicó un informe, a raíz de un seminario que organizó en Lyon (2017).

"La metropolización del mundo está en marcha, se está construyendo ante nuestros ojos. Lo que está en juego es claro: hacer de las metrópolis lugares donde se infundan pero también se difundan crecimiento e innovación. Para ello, las metrópolis buscan nuevos enfoques, nuevas formas de hacer las cosas que impliquen ir más allá de los límites y fronteras tradicionales, como los territoriales, económicos, financieros y, finalmente, culturales. Para arrojar luz sobre la cuestión metropolitana, en 2017 La Fabrique de la Cité invitó a representantes de más de treinta ciudades de catorce países a pensar más allá de los límites y las fronteras".

https://www.lafabriquedelacite.com/projets/seminaire-international-de-lyon-au-dela-des-limites-et-des-frontieres/

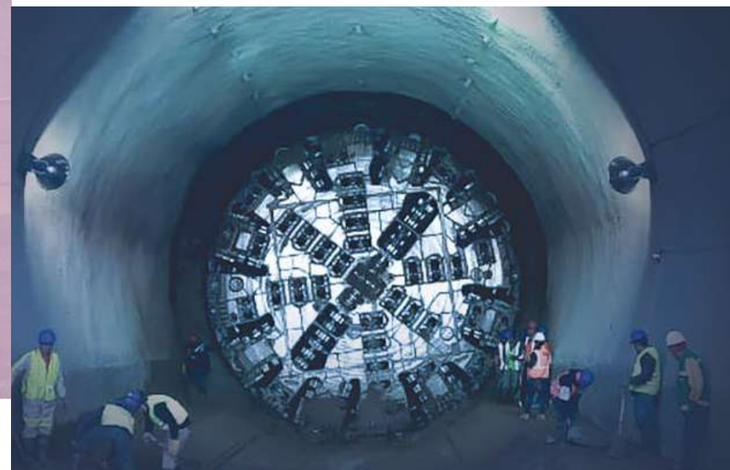
Aunque ha pasado tiempo de su publicación, sigue siendo un documento interesante para nuestra reflexión en torno al aprovechamiento de espacios subterráneos, al servicio de ciudades más sostenibles e inclusivas.

Las reflexiones que nos quedan son:

- ¿Cómo podemos abordar la creciente urbanización sin aumentar la presión ya excesiva sobre las tierras agrícolas o las necesidades de movilidad, que generan un alto consumo de energía y diversas molestias? Hay dos caminos posibles: construir la ciudad sobre la ciudad y construir debajo de la ciudad.
- ¿Cómo podemos invertir en el metro y repensar la relación con la ciudad?
- ¿Cómo podemos aprovechar al máximo el potencial de densificación de estos espacios vulnerables?

El capítulo dedicado a este tema está de las páginas 65 a 77. El documento completo puede consultarse en la versión digital de la revista, en nuestro site: www.amitos.org.mx

- La ciudad bajo la ciudad
- El subsuelo como nueva frontera
- Conectar la ciudad subterránea con la ciudad de la superficie



www.dirac.mx

Dirac®
Ingenieros Consultores

68 AÑOS DE COMPROMISO:
INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD PARA UN FUTURO BRILLANTE

Somos la **firma mexicana líder en el diseño y supervisión de proyectos de infraestructura.** Utilizamos la **tecnología más avanzada** para optimizar procesos, reducir costos y asegurar resultados para nuestros clientes.

La calidad de nuestro trabajo nos ha permitido expandirnos al mercado latinoamericano, participando en proyectos en Colombia y Panamá, con una sólida presencia que nos impulsa a mirar hacia el resto del mundo.

ISO 9001 ISO 14001 ISO 45001

ACTIVIDADES DEL XIX CONSEJO DIRECTIVO

Asamblea ordinaria

El pasado 20 de agosto, a las 17:00 horas, se llevó a cabo la Asamblea Ordinaria de AMITOS en las instalaciones del Colegio de Ingenieros Civiles de México. Durante la sesión, el actual presidente de la Asociación, el Ing. Roberto González Ramírez, presentó el informe de actividades correspondiente a su primer año de gestión.

Los socios asistentes manifestaron gran interés en la exposición, expresando su conformidad y respaldo al contenido del informe.

Al concluir la presentación, se ofreció un brindis que permitió a los asistentes compartir un grato momento de convivencia profesional, en un ambiente de unidad y compromiso institucional.

▲ M.I. Juan Paulín, Presidente del Consejo Consultivo, Ing. Raymundo González, Tesorero, MAC. Sonia Gabriela Olvera, Contadora externa e Ing. Roberto González, Presidente.

▲ M.I. Rogelio Monroy, durante la presentación de las actividades de la Vicepresidencia de Microtúneles.

Simposio de Microtúneles y Tecnología sin Zanja

El actual Consejo Directivo ha asumido el compromiso de organizar el Simposio de Microtúneles y Tecnología sin Zanja, que se llevará a cabo los próximos 2 y 3 de octubre, en las instalaciones del Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Este evento reunirá contenidos tanto técnicos como comerciales, con un programa de conferencias de alto nivel, impartidas por expertos de talla nacional e internacional que compartirán experiencias, casos de estudio y avances tecnológicos en la materia.

¡No te lo pierdas!

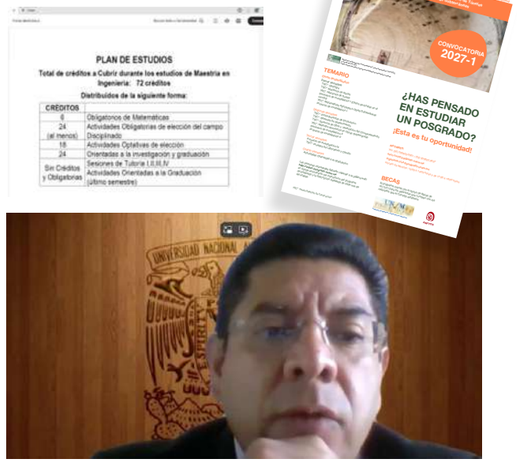
Reserva tu lugar a través del siguiente enlace: https://www.amitos.org/cursos/registro-simposio-microtuneles-tecnologias-2025.php

AMITOS presenta su programa de Maestría en la reunión mensual del CICM

AMITOS participó en una de las reuniones mensuales del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), realizada a través de la plataforma Zoom para presentar su programa de Maestría en Túneles y Obras Subterráneas.

La exposición fue realizada por el Dr. Francisco Suárez Fino y el Mtro. Marco Tulio Mendoza, y contó con el valioso testimonio de la Mtra. Rocío Salcedo, egresada del programa, quien compartió su experiencia como alumna y los beneficios profesionales obtenidos a través de esta formación especializada.

La participación fue bien recibida por los asistentes, quienes mostraron un notable interés en el programa académico. Esta intervención también contribuyó a fortalecer la alianza entre AMITOS y el CICM, lo que llevó al actual presidente del Colegio, Ing. Mauricio Jessurun, a ofrecer nuevos espacios para la difusión y promoción de las actividades de AMITOS dentro de la institución. http://ingen.posgrado.unam.mx



▲ Mtro. Marco Tulio Mendoza, durante su presentación.

ACTIVIDADES DEL XIX CONSEJO DIRECTIVO

Presentación de la revista conmemorativa por el 50 aniversario del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) y la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (AMITOS) tuvieron el honor de presentar la revista conmemorativa por el 50 aniversario del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, una edición especial que rinde homenaje a la dimensión técnica, histórica y humana de una de las obras más emblemáticas de la ingeniería nacional.

La presentación se llevó a cabo el jueves 28 de agosto de 2025 a las 18:00 horas en las instalaciones del Colegio de Ingenieros Civiles de México, y contó con la participación de destacadas personalidades del gremio, muchas de las cuales estuvieron directamente involucradas en el desarrollo de esta magna infraestructura, considerada un acontecimiento trascendental en la historia de la ingeniería mexicana.

El evento fue encabezado por el Ing. Guillermo Guerrero Villalobos, quien, en virtud de su reconocida trayectoria, liderazgo en el ámbito de la ingeniería civil y su valiosa contribución al sistema de drenaje metropolitano, ofreció las palabras de bienvenida.

▲ Ing. Héctor Canseco Aragón, Maestro de Ceremonias.

▲ Ing. Roberto González Ramírez, Presidente de AMITOS.

▲ Ing. Mauricio Jessurun Salomou, Presidente del CICM.

▲ Ing. Guillermo Guerrero Villalobos.

▲ Dr. Miguel Mánica Malcom, Presidente de la SMIG.

◄ Ing. Luis Salazar Zúñiga
Ing. Margarita Cruz Almanza
Dr. Humberto Marengo Mogollón
Dr. Miguel Mánica Malcom
Ing. Mauricio Jessurun Solomou
Ing. Roberto González Ramírez
Ing. Guillermo Guerrero Villalobos
Ing. Ricardo Alberto Munguía Alfaro
Ing. Juan Jacobo Schmitter Martín del Campo.

Su participación al frente de esta ceremonia no solo realzó la importancia del acto, sino que también representó un justo reconocimiento a su legado profesional y al compromiso que ha demostrado a lo largo de su carrera con el desarrollo sustentable y el bienestar de la Ciudad de México.

▲ Dr. Miguel Mánica Malcom, Ing. Raúl López Roldán e Ing. Roberto González Ramírez.

▲ Dr. Miguel Mánica Malcom, Ing. Luis Bernardo Rodríguez e Ing. Roberto González Ramírez.

ACTIVIDADES DEL XIX CONSEJO DIRECTIVO

▲ Destacados Ingenieros que participaron en la obra.

▲ Ing. Daniel Farjeat Páramo e Ing. Héctor Canseco Aragón.

Webinars mensuales

Webinar 30 de julio

Con gran éxito se llevó a cabo el pasado 30 de julio nuestro segundo webinar, organizado por AMITOS y Patrocinado, por las empresas GRUPO HYCSA y RST Instruments Ltd., parte de la empresa Orica Digital Solutions, en el que se presentaron dos temas de gran relevancia para nuestra comunidad, expuestos por los ingenieros Jorge Pereyra y Daniela Garroux:

- Construcción del Túnel México – Toluca
- Acondicionamiento de suelos para excavación

Más de 100 participantes se unieron al evento y mostraron un notable interés en los temas abordados, lo que generó una valiosa interacción y enriqueció la sesión con preguntas y comentarios.

La grabación del webinar está disponible en nuestro canal de YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=yw3PHaKGXO8

Webinar 30 de agosto

El pasado viernes 30 de agosto de 2025, AMITOS llevó a cabo un exitoso webinar patrocinado por TEMOCSA, que contó con la participación del Ing. Pedro Ramírez Rodríguez.

Durante la sesión, el ponente compartió su experiencia con un tema de gran relevancia para el sector:

- Los túneles de Madrid Calle 30: un proyecto icónico de transformación urbana

El evento atrajo la atención de numerosos participantes, quienes demostraron un alto nivel de interés y enriquecieron la jornada con sus preguntas y comentarios.

La grabación del webinar se encuentra disponible en el canal oficial de AMITOS en YouTube: https://youtu.be/DSx4CffPVJI

Webinar 25 de septiembre 2025

El pasado jueves 25 de agosto se llevó a cabo un webinar organizado por AMITOS, con el valioso patrocinio de SYSTRA SUBTERRA, en el que participaron los ingenieros Otto Chavarría, Alejandro Barrera y Daniel Hermosillo, quienes compartieron su experiencia y conocimientos en torno a dos temas de gran relevancia para el sector:

1. Asesoría técnica en obra y aprendizajes clave de proyectos subterráneos en México
2. Tecnología InSAR para detección y monitoreo de desplazamientos en obras subterráneas

El evento contó con una destacada participación, y los asistentes mostraron gran interés en las presentaciones de los temas abordados en infraestructura subterránea.

La grabación del webinar está disponible en nuestro canal de YouTube a través del siguiente enlace: https://www.youtube.com/watch?v=NI6EitVdcjQ

Asesoría y aprendizajes en obras subterráneas / Monitoreo de desplazamientos con tecnología InSAR

MAESTRÍA EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

Programa de Maestría en Ingeniería (construcción)
Orientación: Análisis y diseño de túneles y obras subterráneas

Bienvenida semestre 2026-1

M.I. Marco Tulio MENDOZA ROSAS
Representante de construcción de la FI
SACC de Ingeniería Civil.
Facultad de Ingeniería, UNAM.

Los grandes desafíos que enfrenta el mundo y en particular México en temas como el desabasto de agua, la movilidad, la insuficiencia de energía, la contaminación ambiental, la inseguridad, el rezago en el uso y el desarrollo tecnológico, entre otros, son sin duda consecuencia en gran medida de la falta de infraestructura y por ende la baja competitividad de nuestra nación.

Tal y como se ha expresado en ocasiones anteriores, el avance en el conocimiento de los materiales, el uso y aplicación de herramientas como la Inteligencia Artificial, el Big data y en general el desarrollo tecnológico, así como la implementación de nuevos procedimientos tanto administrativos como técnicos, entre otros factores que hacen posible la creación de la infraestructura, no son suficientes para hacer frente a estos desafíos si no se ofrecen nuevas propuestas de solución a los grandes problemas que padece la humanidad.

Como respuesta a lo anterior, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (AMITOS) y la Alianza para Formación e Investigación en Infraestructura para el Desarrollo de México (Alianza FIIDEM), continúan trabajando en equipo en la formación de cuadros jóvenes de recursos humanos que hagan frente a estos grandes retos.

A partir del próximo mes de agosto, se integrarán 5 jóvenes más al Programa de Maestría en Ingeniería (Construcción) con Orientación al Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas, quienes después del proceso de selección correspondiente iniciarán el ciclo escolar 2026-1. Los nombres de los nuevos estudiantes son: Guerrero Díaz Víctor Hugo, De Jesús López Ángel, Chavarría Pérez José Luis, Álvarez Rodríguez Janet Estefanía y Pastor Santos Nishdally y a quienes damos la más cordial bienvenida y deseamos éxito en su nueva aventura.

Las mujeres ingenieras representan una gran fuerza para la ingeniería. En nuestro programa de posgrado, es evidente el interés que manifiestan por prepararse lo mejor posible e incorporarse al sector productivo como grandes profesionales.

Cabe precisar que este nuevo grupo ha realizado sus estudios previos de licenciatura en diferentes instituciones educativas del país, lo cual demuestra el reconocimiento del Programa de Maestría en Ingeniería (Construcción) con Orientación al Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas, impartido por nuestra máxima casa de estudios.

Al igual que el estudiantado de nuevo ingreso, el 11 de agosto próximo también retomarán sus estudios los jóvenes de reingreso, es decir, el grupo que ya ha vivido la experiencia a lo largo de un año de cursar el Programa de Maestría en Ingeniería (Construcción) con Orientación al Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas.

Ambos grupos podrán interactuar en las diversas actividades académicas y de investigación propias del programa. Por ejemplo, se vincularán en las aulas, laboratorios, visitas técnicas, talleres de software y especialmente en el Tercer Encuentro de Estudiantes del Programa de Maestría en Ingeniería (Construcción) con Orientación al Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas.

Es de destacar el enfoque profesionalizante que tiene nuestro programa de posgrado, ya que sin descuidar los aspectos teóricos de la disciplina, aporta al alumnado un alto valor práctico, esto gracias a que el 90% del claustro académico se desempeña directamente en el sector productivo, y el resto en el ámbito de la investigación y la docencia.

Este trabajo colaborativo entre profesionales del sector, investigadores, docentes y alumnado, ha logrado un trabajo excepcional, ya que gran parte de sus egresados y egresadas se están desempeñando con éxito en su vida profesional.

Hoy en día, son 36 las Maestras y Maestros en Ingeniería que este Programa ha formado.

Por último, reconocemos y agradecemos el trabajo y profesionalismo de toda comunidad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y de sus aliados, Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (AMITOS) y la Alianza para Formación e Investigación en Infraestructura para el Desarrollo de México (Alianza FIIDEM).

Programa de Maestría (Construcción)		
Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas		
Generación	Semestre de ingreso	Alumnos graduados
2014	2014-1	7
2015	2015-1	3
2016	2016-1	5
2017	2017-1	3
2018	2018-1	4
2019	2019-1	5
2020	2020-1	3
2021	2021-1	4
2022	2022-1	sin ingreso
2023	2023-1	1
2024	2024-1	inscritos
2025	2025-1	inscritos
Fuente: Subcomité Académico por Campo de Conocimiento (Construcción).		
Facultad de Ingeniería, UNAM		

MAESTRÍA EN INGENIERÍA (Construcción)

con orientación en
Análisis y Diseño de Túneles y Obras Subterráneas

La UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO convoca a aspirantes mexicanos y extranjeros con interés en participar en su proceso de selección para ingresar al semestre 2027-1.

ITACET Foundation
Maestría certificada por la International Tunnel Association ITA-AITES, a través de ITA-CET.
https://about.ita-aites.org/wg-committees/ita-cet/master-courses

TEMARIO

Curso Propedéutico

Primer semestre
- TSC*: Geología
- TSC*: Mecánica de Rocas
- TSC*: Mecánica de Suelos
- Seminario de Investigación I (Casos de túneles en el mundo)
- TSC*: Matemáticas Aplicadas a Obras Subterráneas
- Proyecto de Investigación I

Segundo semestre
- TSC*: Procedimientos de Excavación
- TSC*: Sistemas de Sostenimiento
- TSC*: Gerencia de Obra y Verificación del Comportamiento
- TSC*: Métodos Numéricos en Obras Subterráneas
- Seminario de Investigación II
- Proyecto de Investigación II

Tercer semestre
- Proyecto de Investigación III
- TSC*: Pruebas de Laboratorio y Campo

Cuarto semestre
- Actividades Orientadas a la Graduación

Las personas interesadas deberán ingresar a la página web:
http://ingen.posgrado.unam.mx
en donde encontrarán los instructivos del programa de posgrado y la descripción detallada de cada una de las etapas.

TSC*: Temas Selectos de Construcción

¿HAS PENSADO EN ESTUDIAR UN POSGRADO?

¡Esta es tu oportunidad!

INFORMES:
Tel: (52) 555622-3021 / (52) 555622-3027
sacc.civil@posgrado.unam.mx
ingenieria.civil@posgrado.unam.mx
Horario de atención: 10:00 a 14:00 horas y de 17:00 a 18:00 horas.

BECAS

El programa cuenta con el apoyo de Becas de SECIHTI para los aspirantes que cumplan con los requisitos que el Consejo establece.

UNAM POSGRADO
Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

AMITOS

WORKING GROUP 14: TÚNELES MECANIZADOS

El GT14 tiene como objetivo promover los túneles mecanizados e informar sobre el estado actual de desarrollo de esta tecnología flexible. Apoya a clientes públicos y privados, planificadores y contratistas con información general y técnica durante la preparación de proyectos de túneles.

Animador: Laurence Delplace
Amberg Engineering
E-mail: ldelplace@amberg.ch

Vice-Animador: Martino Scialpi
Pini Group USA Inc.
E-mail: martino.scialpi@arx.ing

Tutor: Rick Lovat

OBJETIVOS DEL WG14

Con la "Lista de Proyectos Desafiantes", que se actualiza periódicamente, el lector recibe una visión general de los proyectos de mayor relevancia en la actualidad.

De acuerdo con los "Criterios para Proyectos Desafiantes", una selección de proyectos demuestra la capacidad de las tuneladoras en diversos aspectos, como las características geológicas del terreno, ciertas características del trazado del túnel y nuevas tecnologías con un impacto concreto en la industria de la excavación con tuneladoras.

Se incluyen los datos de contacto del cliente para obtener más información individualizada. Esta lista se actualiza con frecuencia y el Grupo de Trabajo 14 espera convertir este documento en una recopilación informativa de proyectos interesantes. Además, el "Formulario de Presentación de Proyectos Desafiantes" permite enviar proyectos adicionales al Grupo de Trabajo para su inclusión. Se basa en un formato PDF que facilita la gestión de los datos a enviar.

Por otra parte, el GT 14 pretende proporcionar información sobre las regulaciones y normas técnicas que puedan afectar a los proyectos de tuneladoras. Al ser una organización internacional, pretende desarrollar una colección de documentos que abarque el mercado mundial de túneles. Se prevé ampliar esta recopilación y actualizarla a medida que el GT tenga conocimiento de los cambios en la normativa.

Adicional a estos dos temas en curso, se está elaborando una guía general para la selección de métodos de excavación de túneles. Esta guía debe orientar al cliente sobre las capacidades y los riesgos de las principales técnicas de excavación disponibles. Este trabajo se está llevando a cabo en estrecha colaboración con otros grupos de trabajo.

PUBLICACIONES

OPCIONES DE MANEJO, TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE DESECHOS DE TÚNELES DESDE UNA PERSPECTIVA GLOBAL

Publicado en 2022
Autor: ITA Work Group 14

RESEÑA DE LA PUBLICACIÓN

El informe, junto con las referencias citadas, las listas de lectura y los apéndices, pretende ofrecer una perspectiva global de la cada vez más difícil tarea de manejar, tratar y eliminar todos los materiales de detritos de túneles, en zonas donde los controles ambientales y de seguridad dominan los aspectos de diseño y construcción de la obra.

De hecho, algunos elementos cruciales de la planificación del proyecto incluyen el muestreo, las pruebas y las recomendaciones para las medidas de mitigación propuestas relacionadas con los materiales de detritos de túneles, mucho antes de que comience cualquier excavación. Además, se requieren muestreos y pruebas esenciales de materiales relacionados con la salud y la seguridad para evaluar completamente el contenido de gases, minerales y sustancias químicas de los materiales de detritos de excavación del túnel previstos.

Las aprobaciones para algunos proyectos de construcción de túneles dependen en gran medida de la aprobación de las pruebas químicas y de materiales previas a la construcción, con criterios adicionales de informes de progreso y pruebas, establecidos por la ley y requeridos por los permisos.

Las actividades y las correspondientes aprobaciones formales de las agencias reguladoras pueden ser necesarias para lo siguiente, por ejemplo (aunque no en todos los casos).

https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:4cd5906a-e6e5-468b-b65d-4d7b4c609a15

MANIPULACIÓN, TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE MATERIALES DE DESECHO DE TÚNELES

Publicado en 2019
Autor: ITA Work Group 14

RESEÑA DE LA PUBLICACIÓN

Para recopilar información relevante sobre el manejo, tratamiento y eliminación de lodos de túneles, se distribuyó un cuestionario a los países miembros. En total, se recibió información de 59 proyectos diferentes, que abarcan EE. UU., Europa, Asia y Australia.

Por otra parte, programas de investigación como el Proyecto DRAGON (Referencia 1, una cooperación conjunta entre Austria, Francia, Alemania, Suiza y el Reino Unido) y el programa "Re-Muck" en Italia (Referencia 2), sobre el aprovechamiento de materiales excavados en túneles, presentan métodos innovadores para el reciclaje ecocompatible y sostenible de los lodos de túnel. Ambos programas permiten una evaluación inmediata de la calidad de la roca en el frente de excavación para encontrar las técnicas y estrategias de tratamiento más adecuadas para la excavación con tuneladoras.

Además, se han seleccionado casos de Taiwán (áridos, movimiento de tierras, protección de costas y recuperación de tierras), Australia (Proyecto del Túnel de Almacenamiento de Northside), Inglaterra (Proyecto Crossrail), Suiza (Proyecto Hidroeléctrico Farettes y Túnel de Base del San Gotardo) e Italia (tunelización mecanizada con tuneladoras EPB) como ejemplos de oportunidades y desafíos relacionados con los lodos de túnel.

https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:b9160eba-5185-46ec-9031-a638f0a0e05f

RECOMENDACIONES SOBRE EL PROCESO DE DESARROLLO DE TÚNELES MINADOS

Publicado en 2016
Autor: ITA Work Group 14

RESEÑA DE LA PUBLICACIÓN

La creciente demanda de proyectos de infraestructura exige hoy en día más construcción subterránea en condiciones de terreno cada vez más adversas. Se ha observado que, en los últimos años, los túneles se ubican en condiciones más desafiantes, condiciones adversas de túneles y ubicaciones remotas. Al mismo tiempo, los métodos de tuneleo deben considerarse cuidadosamente teniendo en cuenta las condiciones del sitio, el entorno geológico y los objetivos de uso final. La selección e implementación de los métodos de tuneleo es uno de los factores clave que compiten y se contraponen para lograr los objetivos de uso final.

El proceso de selección no solo consiste en la elección final del equipo por parte del contratista, sino que también es un proceso que comienza durante los estudios de viabilidad iniciales. Si bien en esta etapa inicial la tarea puede parecer simplista, los estudios de viabilidad iniciales limitan o amplían la variedad y las opciones de medios y métodos de tuneleo durante la construcción. Dado que los grandes proyectos de infraestructura suelen tener largas fases de preparación (a veces de décadas), es aconsejable revisar los estudios iniciales y cuestionar las decisiones iniciales del proyecto a la luz de los avances tecnológicos y los cambios en las condiciones del proyecto.

En este proceso, es necesario observar desde el principio los diferentes intereses y la asignación de tareas de todas las partes involucradas. Es de interés general para todas las partes en este proceso rotatorio seleccionar el método de tuneleo que mejor se adapte al propósito final de la estructura, permite una construcción segura, utilice métodos de vanguardia y, al mismo tiempo, logre la solución más robusta, económica y sostenible.

https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:d67f7af8-86c7-4492-98e8-fa6bbc840c20

ITA

NORMAS: MANUALES DE TÚNELES MECANIZADOS

Publicado en 2007
Autor: ITA Work Group 14

RESEÑA DE LA PUBLICACIÓN

Normas y manuales de tunelación mecanizada. El grupo de trabajo ITA WG-14 publicó en 2000 las "Recomendaciones y directrices para tuneladoras". Estas recomendaciones consisten en cuatro informes que abarcan la amplia variedad de tuneladoras mecanizadas, desde máquinas para terrenos blandos hasta máquinas para roca dura. Creemos que este informe proporciona una base común para la comprensión de la tunelación mecanizada en la sociedad internacional. Desde entonces, hemos debatido la recomendación universal de la tunelación mecanizada y concluido que no es viable, ya que las condiciones sociales varían considerablemente entre países. Por ejemplo, el grado de desarrollo de la infraestructura varía y los límites tolerables de perturbación ambiental, tanto durante la construcción como después de su finalización, son muy diferentes. A la hora de seleccionar la maquinaria, se deben considerar cuidadosamente tanto las condiciones técnicas como las sociales, ya que tienen un gran impacto en el coste total del proyecto. En lugar de una recomendación universal, decidimos elaborar el informe para introducir normas y manuales de tunelación mecanizada en los países miembros. Esperamos que este informe sirva de guía de referencia para los futuros propietarios de proyectos de túneles. WG14 Túneles Mecanizados.

País	Título	Editora	Orden de copia
Australia	Código de prácticas 2006: Túneles en construcción	Works Cover, NSW	http://www.workcover.n
Europa	Especificaciones y directrices para el uso de productos especializados para la tunelización mecanizada (TBM) en terrenos blandos y roca dura.	EFNARC (Federación Europea de Productores y Contratistas de Productos Especializados para Estructuras)	http://www.efnarc.org/publications.htmlSpecification and Guidelines for the use of specialist products f
Europa	En 12336: 2005	Comité Europeo de Normalización	https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12336/tunneliers-boucliers-machines-de-foncage-materiel-de-mise-en-place-de-revet/fa042753/50991
Francia	Recomendaciones de AFTES sobre tuneladoras, escudos y revestimientos segmentales.	AFTES Sociedad Francesa de Túneles	https://www.ita-aites.org/redirection/?url=www.aftes.asso.fr/
Alemania	Recomendaciones para el diseño y funcionamiento de máquinas de escudo.	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB)	https://www.ita-aites.org/redirection/?url=www.daub-ita.de/
Alemania	Recomendaciones para la selección y evaluación de tuneladoras.	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB)	https://www.ita-aites.org/redirection/?url=www.daub-ita.de/
Japón	Norma japonesa para túneles de escudo.	Comité de ingeniería de túneles Edición en inglés de la Norma japonesa para túneles Subcomité Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles	https://www.ita-aites.org/redirection/?url=www.jsce.or.jp/publication/e/book/p274.html

https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:5c904372-acb7-4fdd-b951-1ae07328e66d

GLOSARIO DE TBM 2006.

Publicado en 2006
Autor: ITA Work Group 14

https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:39ccfa0d-8e15-4322-a81c-23e0a4e953a4

EL FUTURO DE LOS TÚNELES MECANIZADOS

Publicado en 1991
Autor: ITA Work Group 14

RESEÑA DE LA PUBLICACIÓN

En Berlín, Alemania, se perforó recientemente un tramo de metro con un escudo hidráulico, es decir, un escudo de lodo. Tres años antes, el mismo escudo, con la misma cuadrilla, había perforado otro tramo de metro con gran éxito a tan solo unos kilómetros de distancia.

Esta vez, sin embargo, la perforación no se realizó en estratos de arena cuaternarios, sino en depósitos glaciares de la edad de hielo, como arcilla de cantos rodados con lentes de arena cerradas y numerosos cantos rodados. La misma tuneladora, que había sido una auténtica experta en arena, ahora, en arcilla de cantos rodados, se había convertido repentinamente en una vieja mula obstinada. Solo se podían lograr velocidades de avance satisfactorias con un nuevo diseño, construido especialmente para las condiciones particulares del terreno.

Este ejemplo confirma una vez más que no existe una tuneladora universal para terrenos blandos. La máquina y sus componentes deben adaptarse a las condiciones geológicas específicas. Por otro lado, ahora disponemos de avances técnicos que permiten el accionamiento mecánico de tambores incluso en terrenos muy difíciles.

Por "terreno difícil" nos referimos a condiciones geológicas en las que, durante la excavación del túnel, el frente es solo parcialmente estable o nada estable, el túnel se encuentra en el agua subterránea, las condiciones del terreno cambian con frecuencia o la resistencia del material excavado es extremadamente variable.

Como suele ocurrir en los terrenos de tierra, el objetivo principal es preservar las tensiones iniciales y, en particular, evitar la sobreexcavación intencional. Por lo tanto, la masa de terreno que rodea la excavación del túnel no debe resultar dañada por sobreexcavación ni por aflojamiento y relajación. Los asentamientos que aparecen en la superficie indican un método de excavación inadecuado. Muestran hasta qué punto el revestimiento del túnel está incrustado en el suelo. Un revestimiento con un asentamiento inadecuado se deforma, se sobrecarga localmente y se daña. Las reparaciones de dicho revestimiento resultan en altos costos de mantenimiento.

Al excavar un túnel con una máquina en terreno blando, el frente debe contar con un soporte fiable durante la excavación y el terreno circundante tras la cola del escudo debe mantenerse en equilibrio mediante inyección de lechada durante la construcción del revestimiento.

Este artículo explica cómo se logran estos dos objetivos con los sistemas técnicos actuales.

https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:0870d3d8-761b-47ab-966d-9168e48f37cd

Puede revisar estos documentos en la siguiente liga:

https://about.ita-aites.org/wg-committees/working-groups/198-ita-active-working-groups/211-working-group-14-mechanization-of-excavation

LYTSA

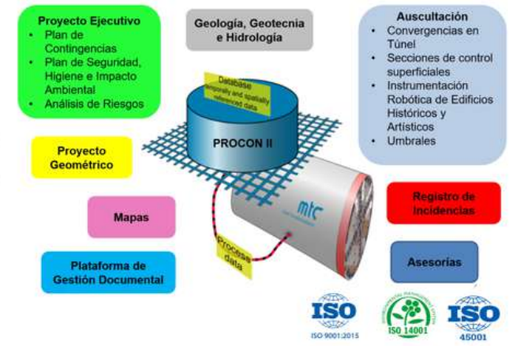
Empresa mexicana con 43 años de experiencia realizando proyectos ejecutivos integrales de ingeniería, tanto en el ámbito público como privado, cumpliendo en tiempo, costo y calidad dentro de un marco de seguridad y estricto respeto al entorno social y medio ambiente.

SERVICIOS

- Supervisión Técnica y Administrativa de Obras Subterráneas como lumbreras, túneles convencionales y mecanizados
- Supervisión y Control de Calidad de obras electromecánicas como Termoeléctricas y Refinerias
- Monitoreo de la instrumentación de las obras.
- Supervisión de la reparación de Edificios Históricos
- Consultoría en temas de túneles, lumbreras, obras subterráneas

LYTSA
lumbreras y túneles

Metodología certificada para manejo de túneles mecanizados



GRUPO DE INGENIEROS JÓVENES

Diseño del espesor del balasto y subbalasto de vías férreas, implementando modelización numérica y discretización de la capa granular

Como parte de las actividades del GIJ, el pasado 30 de junio el maestro Juan Carlos Valenzuela Meza impartió la conferencia titulada "Diseño del espesor del balasto y subbalasto de vías férreas, implementando modelización numérica y discretización de la capa granular", en el marco del ciclo de conferencias mensuales organizadas por el grupo. Durante su presentación, se abordaron conceptos básicos sobre los componentes de una vía férrea, sus funciones y los problemas asociados a cada una de las capas que la conforman. Asimismo, se destacó la revisión de los métodos más utilizados para el cálculo de la capa granular, con especial énfasis en la metodología propuesta por Li y Selig, sobre la cual el ponente ha desarrollado análisis numéricos tridimensionales complementarios.

Si deseas conocer más, la conferencia ya está disponible en: https://www.youtube.com/@GIJAmitosym

El GIJ en el Congreso Virtual TUNNEL MINING 2025 de Perú

El ingeniero César Osvaldo Ladino Munguía, integrante del GIJ, compartió su experiencia al participar en el XIV Congreso Latinoamericano de Túneles y Obras Subterráneas, Tunnel Mining 2025. Según sus palabras, el evento dejó un excelente sabor de boca entre todos los asistentes presenciales, vía remota y moderadores, reuniendo a expertos de 13 países con la finalidad de difundir la innovación en minería e infraestructura subterránea.

Se expusieron obras de gran envergadura, como los túneles Koralm y Semmering en Europa, además del megapuerto de Chancay, También se presentaron proyectos de grandes inversiones como el de "El Algarrobo" y la mina "San Miguel", mostrando la relevancia e impacto social y comercial.

Por último, el evento mostró un compromiso con la formación y divulgación técnica, al permitir divulgar el conocimiento tanto de manera presencial como virtual, mediante una plataforma digital.

Excavaciones en el Valle de México: del lago a la zona de lomas, criterios de análisis y diseño según la zonificación geotécnica

El pasado 4 de agosto del presente año, el ingeniero Cristian Rubén Medina Guzmán ofreció una conferencia en la que habló sobre la compleja zonificación geotécnica del Valle de México, región compuesta por suelos altamente compresibles en la zona lacustre, materiales de transición en zonas intermedias y depósitos más competentes en la zona de lomas. Tales condiciones generan contrastes significativos en el comportamiento del terreno frente a procesos de excavación, lo que obliga a adoptar distintos criterios de análisis y diseño geotécnico según la zona.

Si deseas conocer más, la conferencia ya está disponible en: https://www.youtube.com/@GIJAmitosym

Conoce a los nuevos socios del Grupo de Ingenieros Jóvenes

Ing. Leslie Barajas Coria

Soy Ingeniera Geóloga con Especialidad en Geotecnia, ambos grados académicos obtenidos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, los cuales me han permitido contribuir profesionalmente en áreas como la exploración geológica-geotécnica y el diseño en proyectos principalmente ferroviarios.

Me involucré brevemente en un proyecto de túnel en Australia, lo que incrementó mi interés en el área de mecánica de rocas y sostenimientos aplicados a las obras subterráneas. Esto me impulsó a unirme al Grupo de Ingenieros Jóvenes de la AMITOS (GIJ-AMITOS), donde me ha sido posible acceder a congresos, conferencias y cursos impartidos por especialistas en la materia, que sin duda han sido de beneficio para mi desarrollo profesional.

Ing. César Osvaldo Ladino Munguía

Soy Ingeniero Civil, egresado de la Universidad de Colima en el periodo 2013-2018, titulado con la tesis: "Análisis Comparativo de Accidentes Viales del Municipio de Colima 2015 – 2016". En la actualidad, he finalizado las materias del programa de estudios 2022 – 2024 en la Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres en la Universidad Autónoma de Chihuahua. Actualmente me encuentro realizando el protocolo de tesis denominado "Estabilización de taludes en zona de jales del kilómetro 18+640 al km 19+200, Carretera: Mineral del Monte – Entronque Huasca, en el estado de Hidalgo".

A lo largo de la carrera de Ingeniería Civil, he tenido la oportunidad de trabajar medio tiempo en temas relacionados con Laboratorio de Control de Calidad, Supervisión de Obra y Pavimentación. Es importante resaltar que he realizado estos trabajos con entusiasmo y orgullo. Además, me he enfocado en tomar diplomados, cursos y ponencias, con el objetivo de continuar ampliando mis conocimientos.

Actualmente, trabajo en la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes en el área de Carreteras, Alimentadoras y Caminos Rurales. De igual manera, me he desarrollado profesionalmente en la misma dependencia en el área de Conservación de

Carreteras y en la Unidad General de Servicios, poniendo mi granito de arena en el desarrollo de la infraestructura carretera mediante trabajos de conservación, reconstrucción y rehabilitación.

Finalmente, me gustaría expresar mi agradecimiento al Grupo de Ingenieros Jóvenes (AMITOS), por permitirme integrarme al gremio de los túneles y obras subterráneas, lo que me ha permitido fortalecer mis conocimientos en esta importante área de la Ingeniería Civil.

Ing. Osiris Octavio Ortega Aguilar

Ingeniero Civil egresado de la ESIA Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

Actualmente me desempeño como Superintendente de Obra en la empresa Mextunel Group, donde he participado en diversos proyectos relacionados con túneles, microtúneles, lumbreras y obras subterráneas. Cuento con casi nueve años de experiencia en el sector de la construcción, con un enfoque técnico en infraestructura subterránea.

Tengo un profundo interés en continuar mi formación con una maestría especializada en túneles y obras subterráneas. Considero que el Grupo de Ingenieros Jóvenes (GIJ) de AMITOS representa una puerta ideal para seguir creciendo profesionalmente y establecer vínculos con colegas, mentores y expertos del sector. Para mí, este grupo es un espacio clave para compartir experiencias, participar en talleres, congresos, visitas técnicas y mantenerme a la vanguardia en el desarrollo de la ingeniería subterránea en México.

WTC 2025 Tunnelling into a Sustainable Future – Methods and Technologies

Congreso Mundial de Túneles ITA-AITES

Estocolmo, Suecia

Del 9 al 15 de mayo de 2025

Design of urban tunnels in soils in high seismicity environments. The case of Américo Vespucio Oriente 2, in Santiago de Chile.

Autores:
J. Kuster & L. Uribe; Grupo Costanera, Santiago, Chile.
J.M. Galera & M. de Cabo; SYSTRA Subterra, Madrid, España.
T. Uriarte; Subterra Ingeniería Ltda, Santiago, Chile.

La Concesión AVO 2 "Américo Vespucio Oriente" promovida por el Ministerio de Obras Públicas de Chile cerrará la circunvalación exterior de Santiago de Chile a standard de autopista. AVO 2 considera la construcción de una concesión de autopista urbana de 5.2 km, compuesta por dos túneles gemelos, de tres carriles por sentido, bajo la Av. Américo Vespucio/Ossa existente y bajo la Línea 4 de Metro existente entre las estaciones Prince of Wales y Grecia. El proyecto incluye tres ramales de salida y tres entradas, totalizando aproximadamente 12.5 km de longitud del túnel. Los túneles se excavarán en tres escenarios geotécnicos diferentes. La Ciudad de Santiago se encuentra en una de las zonas más sísmicas de la tierra, por lo que la sismicidad ha sido un problema importante en el diseño de túneles. La construcción del túnel se inició en enero de 2024 y está previsto que finalice en 2028.

Numerical investigation on deformation behavior of circular corrugated steel pipes considering bedding factors

Autores:
D.H. Hwang, J. Park & G.C. Cho; Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Republic of Korea.
J.H. Seong; Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Jinju, Republic of Korea.

Las tuberías circulares de acero corrugado “Circular Corrugated Steel Pipes” (CSP) están surgiendo en la construcción de túneles de servicios públicos. A diferencia de otras secciones elípticas, de arco y cuadradas, la CSP circular no requiere el ensamblaje de segmentos en el sitio, lo que puede acortar el período de construcción. A pesar de esta ventaja, los CSP instalados por el método de corte y cobertura “cut-and-cover” pueden deformarse con el suelo circundante, con CSP circulares que resultan en una mayor deformación horizontal que otras secciones transversales. Las prácticas de instalación actuales muestran que las condiciones de lecho para los túneles de servicios públicos de acero corrugado “corrugated steel utility tunnels” (CSUT) no son uniformes, lo que afecta significativamente esta deformación. En este estudio, se realizó un análisis numérico tridimensional para investigar la influencia de los factores de lecho en el comportamiento de deformación de CSUT. El modelo se validó con datos de pruebas de laboratorio a gran escala. Se evaluó la deformación ovalada causada por la variación del diámetro de la CSP 1.2 m, 1.8 m y 3 m. A medida que aumentaba el diámetro, la deformación de la tubería aumentaba exponencialmente, apareciendo como un levantamiento en la superficie del suelo. Se requieren más estudios en el diseño del lecho.

Spectral seismic design of tunnels based on numerical modelling

Autores:
T. Kazerani; WSP, Lausana, Suiza.
M. Metral; EPFL. Laboratorio de mecánica de suelos, Lausana, Suiza.
E. Garin & H. Détraz; WSP, Lausana, Suiza.

El documento aborda las complejidades del diseño y la ejecución de túneles en regiones sísmicas, utilizando un proyecto reciente en los Alpes suizos como estudio de caso. El estudio presenta una metodología de diseño sísmico para túneles, utilizando modelos numéricos, enfatizando el papel de la interacción suelo-estructura y las respuestas dinámicas influenciadas por factores como el movimiento del suelo, la altura de la sobrecarga y los métodos de construcción de túneles. Los autores proponen un enfoque espectral basado en las normas del Eurocódigo, para evaluar las fuerzas sísmicas en los revestimientos de túneles. Un estudio de caso del Túnel de Euseigne, en los Alpes suizos demuestra la aplicación práctica del método, mostrando que las diferentes direcciones de las ondas sísmicas y las alturas de sobrecarga afectan significativamente la integridad estructural del túnel. El estudio concluye que el diseño adecuado, incluida la consideración cuidadosa de las técnicas de refuerzo y construcción, es crucial para mejorar la resiliencia sísmica en el diseño de túneles.

Performance evaluation of reinforced and unreinforced tunnel final linings under seismic conditions: Case study of Erkenek Tunnel, Malatya-Türkiye

Autores:
B. Koçak & I. Sáenz; TYLin Turquía
Ş. Altıok, G.D. Eryılmaz & M.S. Küçükaslan; Dirección General de Carreteras, División de Mecánica de Suelos y Túneles, Turquía

El 6 de febrero de 2023, terremotos con magnitudes de 7.7 y 7.6 sacudieron Kahramanmaraş y once provincias circundantes, causando importantes daños a edificios e infraestructuras. A pesar de esto, los túneles generalmente funcionaron bien durante la actividad sísmica, mostrando solo grietas locales, “desconchado” de concreto y daños menores en los portales, sin que se reportaran colapsos completos. Este artículo se centra en el revestimiento final del túnel de Türkiye, un túnel de carretera de doble tubo de 1,816 m de largo en Malatya. En Turquía, los túneles de roca en regiones montañosas con alta sobrecarga generalmente se construyen siguiendo los estándares austriacos, utilizando el Nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM). El concreto proyectado se considera una estructura permanente, sin transferencia de carga al revestimiento final. El diseño del revestimiento final no reforzado considera principalmente el peso propio de la estructura y las cargas de los equipos electromecánicos. Antes del terremoto, los revestimientos finales generalmente se construían sin refuerzo, excepto en áreas localizadas según fuera necesario. Este artículo examina la respuesta de las secciones no reforzadas y reforzadas del revestimiento final durante el terremoto. A diferencia de los túneles de carretera, los túneles de metro NATM en áreas urbanas, como cruces, túneles de plataforma y túneles de paso transversal, están completamente reforzados. El diseño de túneles de Metro, generalmente en áreas urbanas con condiciones de suelo y roca poco profundas y variadas, trata el revestimiento inicial como temporal y tiene en cuenta las cargas finales de las aguas subterráneas, el tráfico, los edificios y las fuerzas sísmicas. Siguiendo el comportamiento estructural observado de los túneles no reforzados durante los terremotos, los revestimientos finales de los túneles de carretera ahora se construyen con al menos un refuerzo mínimo, en línea con el terremoto turco de 2018.

Load transfer mechanisms in lattice girders embedded in sprayed concrete linings

Autores:
S. Sadeghian; Arcadis (Formerly AECOM), Brisbane, Australia.
D. Oliveira; Aurecon, Brisbane, Australia.

Las vigas de celosía se utilizan comúnmente como soporte temporal en la construcción de túneles, proporcionando control de forma y, cuando están revestidas de concreto proyectado, formando un elemento estructural compuesto. A pesar de su uso generalizado, el beneficio estructural de las vigas de celosía sigue siendo objeto de debate debido a su instalación discreta y su efecto de refuerzo localizado, que muchos argumentan que contribuye mínimamente a la rigidez general del revestimiento. Este artículo presenta un modelo 3D que simula el mecanismo de transferencia de carga de vigas de celosía en aplicaciones de túneles de suelo blando.

Performance of steel, synthetic and basalt fibres used in shotcrete for hard rock tunnels

Autores:
A. Sjölander, E. Nordström & A. Ansell; Instituto Real de Tecnología KTH, División de Estructuras de Concreto, Estocolmo, Suecia.

Para túneles en roca dura, el concreto proyectado reforzado con fibra (concreto proyectado) es una parte esencial del sistema de soporte de rocas. Debido a la complejidad de estimar la carga en el concreto proyectado, las filosofías y pautas de diseño varían entre países. Esto también se aplica al tipo de fibra, donde algunos países solo permiten fibras de un determinado material. Con estos antecedentes, se estudió la idoneidad del uso de fibras de acero, sintéticas y basalto en revestimientos de concreto proyectado en un proyecto recientemente finalizado. El objetivo era evaluar el desempeño estructural mediante pruebas experimentales, investigar el

LA TÉCNICA PASA FRONTERAS

impacto ambiental de las fibras y resumir el conocimiento sobre el desempeño a largo plazo de las fibras. El proyecto ha demostrado que las tres fibras son adecuadas para su uso en túneles desde una perspectiva estructural, pero aún existen algunas preguntas sobre el desempeño a largo plazo. Desde una perspectiva ambiental, la elección del tipo de fibra tiene, en comparación con el concreto proyectado, un efecto insignificante sobre las emisiones de gases de efecto invernadero.

The role of lattice girders and steel ribs in NATM tunnel support

Autores:
M. Uljarević; CRBC Serbia, Belgrado, Serbia.
A. Rašeta; Facultad de Ciencias Técnicas, Novi Sad, Serbia.
D. Bojović & Ž. Flajs; IMS, Belgrado, Serbia.

En la construcción de túneles convencionales, particularmente utilizando el Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM), las vigas de celosía y las nervaduras de acero se emplean comúnmente como elementos de soporte de revestimiento primario con carácter temporal. Las directrices oficiales estipulan el uso de una viga de celosía por etapa de excavación como medida de apoyo temporal. Sin embargo, se han observado desviaciones de este estándar, como la instalación de múltiples vigas de celosía por etapa, en numerosos proyectos globales de túneles. Este trabajo de investigación tiene como objetivo cuantificar el impacto de las vigas de celosía y las nervaduras de acero en la resistencia del soporte primario y validar la práctica recomendada de usar una viga de celosía por etapa de excavación. El estudio incluye análisis para determinar si las vigas de celosía mejoran significativamente la integridad estructural del soporte primario o simplemente sirven como ayudas temporales hasta que el concreto proyectado y los anclajes estén completamente establecidos. La investigación busca establecer si las vigas de celosía contribuyen a la resistencia y estabilidad del soporte primario como se recomienda actualmente.

ICA

Con más de 460 km perforados ICA es pionera en ingeniería de túneles.

Bitúnel Tren Interurbano México-Toluca
Longitud: 4.7 km
Diámetro: 7.5 m

Túnel Emisor Oriente
Longitud: 62.4 km
Diámetro: 7.5 m

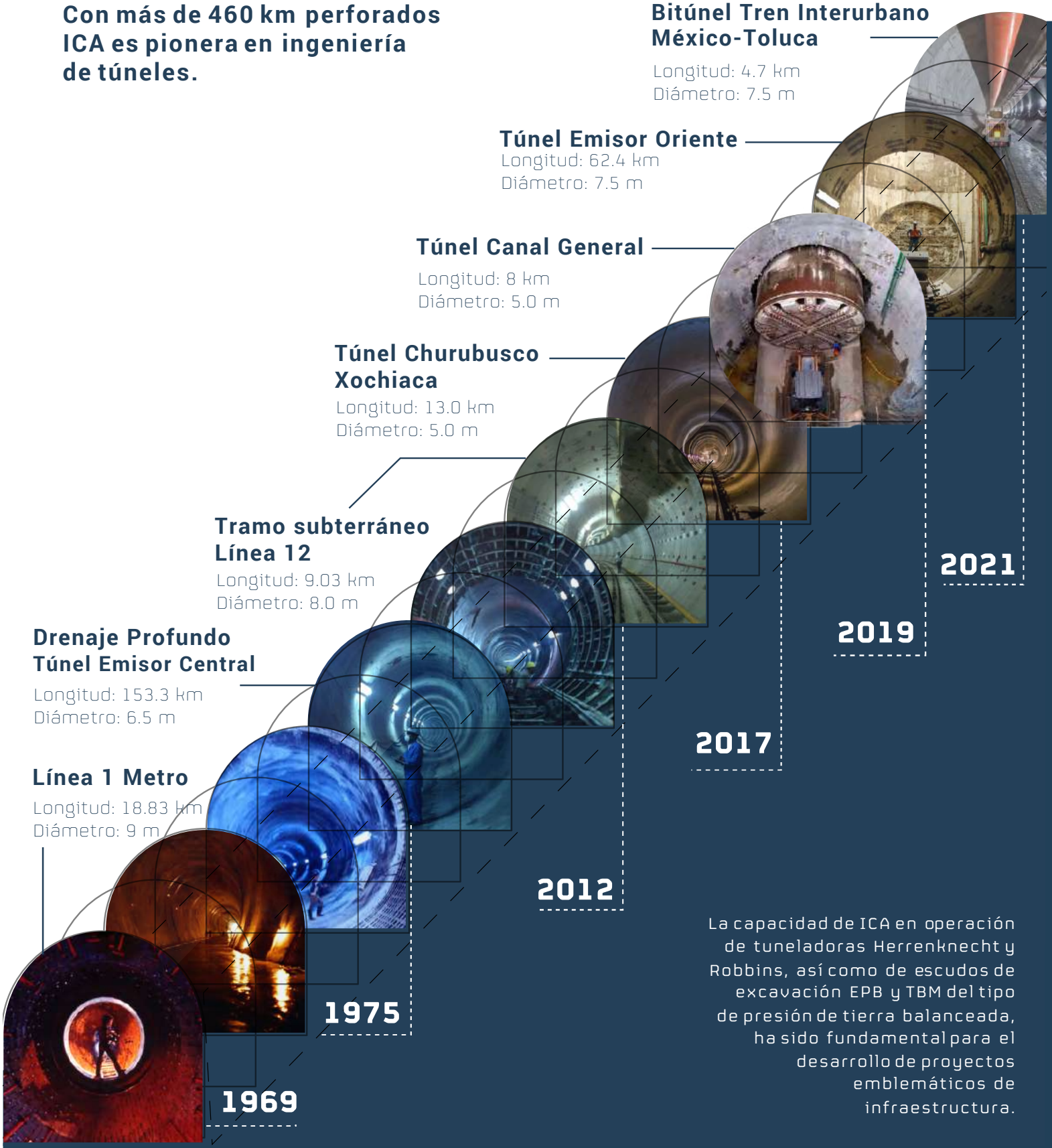
Túnel Canal General
Longitud: 8 km
Diámetro: 5.0 m

Túnel Churubusco Xochiaca
Longitud: 13.0 km
Diámetro: 5.0 m

Tramo subterráneo Línea 12
Longitud: 9.03 km
Diámetro: 8.0 m

Drenaje Profundo Túnel Emisor Central
Longitud: 153.3 km
Diámetro: 6.5 m

Línea 1 Metro
Longitud: 18.83 km
Diámetro: 9 m



2021
2019
2017
2012
1975
1969

La capacidad de ICA en operación de tuneladoras Herrenknecht y Robbins, así como de escudos de excavación EPB y TBM del tipo de presión de tierra balanceada, ha sido fundamental para el desarrollo de proyectos emblemáticos de infraestructura.

CONSTRUCTORA ESTRELLA, S.A. DE C.V.

TÚNEL EN ROCA SUAVE

EXCAVACIÓN CON MÁQUINA TUNELADORA

TÚNEL CONDUCCIÓN EN ROCA, PRESA EL GALLO

Constructora Estrella, S.A. de C.V., empresa 100% mexicana, con una trayectoria de más de 60 años contribuyendo al desarrollo del país, participa en la construcción de Proyectos de muchos tipos, tanto en las ciudades como en el campo, apoyando al crecimiento de la infraestructura.

Es la empresa con mayor antigüedad en la construcción de obra subterránea en la Ciudad de México, pionera al habilitar el primer escudo de frente de rejillas para excavar en arcillas blandas, colectores de 4 metros de diámetro a 15 metros de profundidad. Con visión para el desarrollo de nuevas tecnologías, empleadas en la construcción de obras subterráneas, que a la fecha se siguen empleando con un alto grado de efectividad, ha participado en muchos proyectos.

Actualmente, es integrante del grupo encargado de la construcción del Túnel Emisor Oriente.

MICROTUNELEO

REPARACIÓN DRENAJE PROFUNDO

REVESTIMIENTO DRENAJE PROFUNDO

LUMBRERAS FLOTADAS

RIO MIXCOAC No. 30, MEXICO D.F. TEL. 52-00-22-70 cesaw@prodigy.net.mx