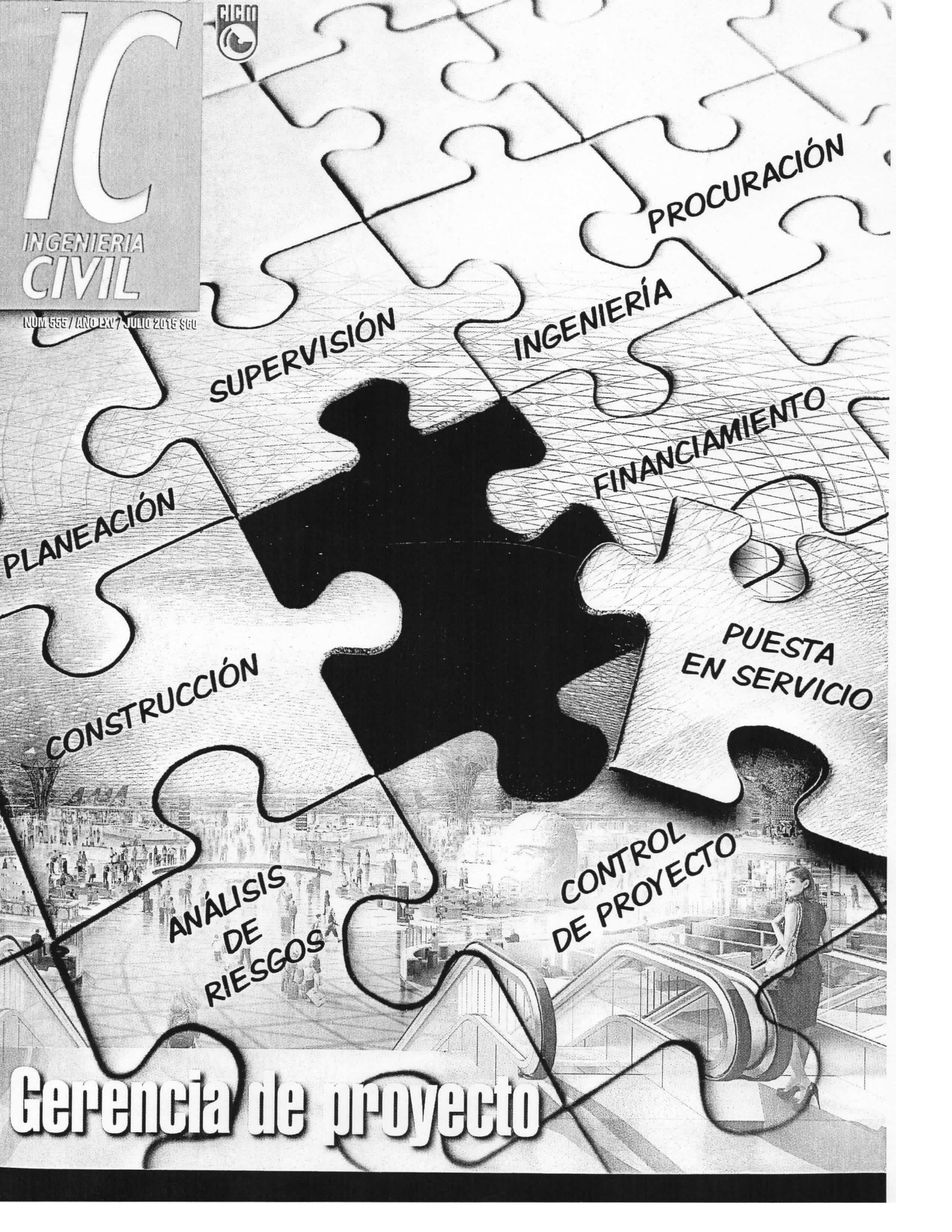


IC

INGENIERIA CIVIL

NOM 555 / AÑO LXV 7 JULIO 2015 \$60



PROCURACIÓN

SUPERVISIÓN

INGENIERÍA

FINANCIAMIENTO

PLANEACIÓN

PUESTA EN SERVICIO

CONSTRUCCIÓN

CONTROL DE PROYECTO

ANÁLISIS DE RIESGOS

Gerencia de proyecto

Innovar en excavación con TBM es unificar el control de procesos y la auscultación

Originalmente el control de procesos para la construcción de túneles con tuneladoras se efectuaba mediante evaluaciones manuales de los parámetros más importantes para la excavación. Con la digitalización de dichos procesos y la incorporación de sistemas de auscultación sofisticados fue posible su integración en un solo sistema que permite desarrollar análisis sistemáticos de todas las variables involucradas y ha impulsado la construcción de túneles en situaciones cada vez más complejas.

JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES
Ingeniero geofísico. Desde 2005 se ha desempeñado como responsable de las áreas de geofísica, geología e instrumentación en proyectos de empresas privadas e instituciones públicas. Gerente de Instrumentación y Control de Procesos en el consorcio COMISSA para el proyecto TEO.

Hasta hace poco, el control de procesos para la excavación de túneles con TBM (máquinas perforadoras de túneles o *tunnel boring machines*) se llevaba a cabo mediante registros y evaluaciones manuales de los procesos más importantes para la excavación. A partir de la parametrización y digitalización de un mayor número de procesos, y debido a la gran cantidad de datos que éstos aportan, se ha logrado implantar una serie de sistemas que no sólo velan por la evaluación de los parámetros más importantes, sino también permiten la identificación y el análisis en tiempo real de la interacción entre todos los procesos que incorpora la excavación. La instrumentación en túneles, por su parte, cubre parte de las necesidades de seguridad y calidad de la construcción; sin duda, la aplicación de sistemas de auscultación cada vez más sofisticados ha permitido complementar el sistema de con-

trol de procesos, particularmente en la relación que existe entre los parámetros de excavación y su interacción con el entorno. En conjunto, ambos aspectos de la ingeniería para túneles han logrado la reducción de los plazos de ejecución y cubierto ampliamente los más estrictos requisitos de seguridad y calidad, por lo que su aplicación, a la fecha, forma una parte esencial en la gestión de proyectos de estas características. Así, fue necesario el desarrollo de nuevos sistemas que permitieran simplificar el análisis y la evaluación de toda la información, lo que llevó a la implementación de *software* y métodos especializados para la integración de ambas tareas.

Sistema de auscultación automatizado en túneles

En la actualidad los sistemas de auscultación en tiempo real constituyen un requisito para las grandes obras

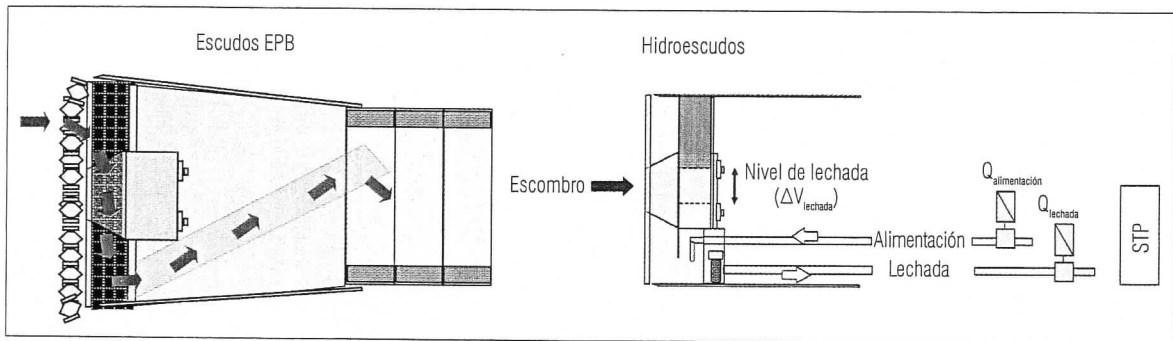


Figura 1. Esquema básico de operación de escudos de diferentes tecnologías (Maidl Tunnelconsultants).

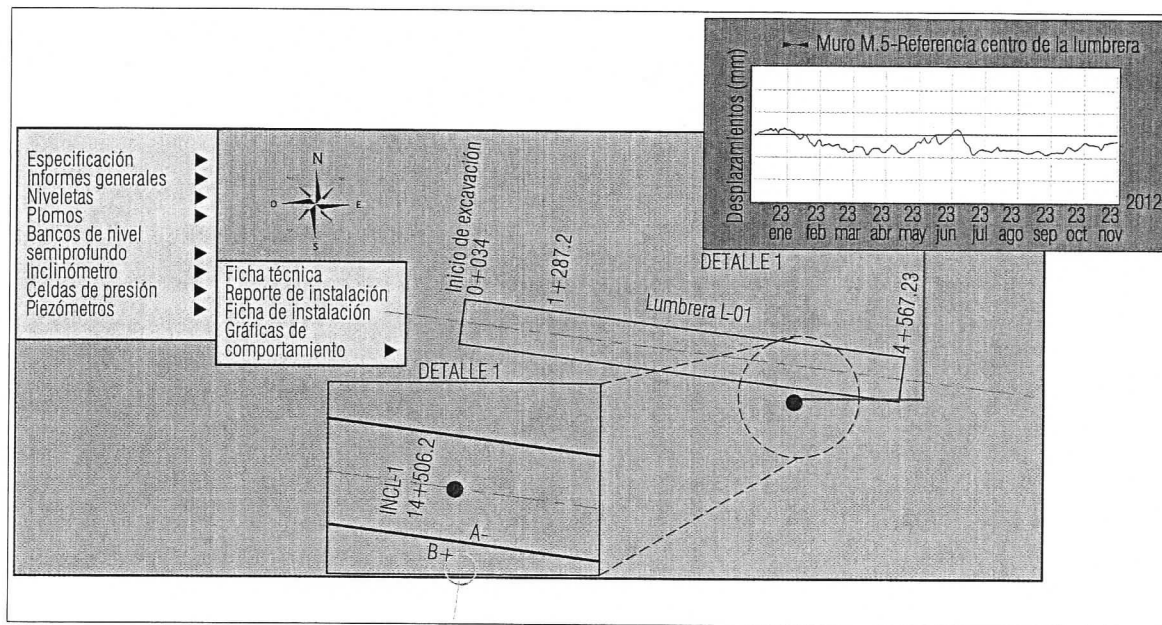


Figura 2. Ejemplo de sistema de auscultación automatizado.

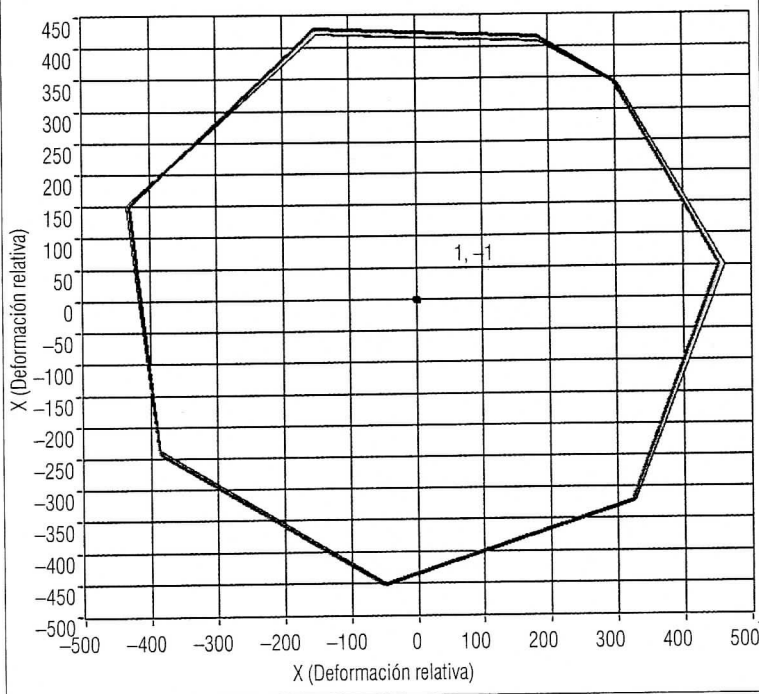
civiles subterráneas en todo el mundo, debido a las características de los emplazamientos urbanos, a las complejas situaciones geológicas y geotécnicas y a las normas actuales que derivan de la necesidad de garantizar la seguridad y la calidad en la excavación. El diseño de este tipo de sistemas está basado en su capacidad para definir paramétricamente y de manera automática el comportamiento del terreno excavado y las estructuras e instalaciones propias de la construcción y las del entorno –estas últimas, en gran medida, definen los procedimientos y parámetros de excavación–. Cabe señalar que antes del desarrollo de los sistemas digitales de auscultación, la instrumentación se desarrollaba en un contexto de toma de lectura y procesamiento manuales que determinaban tiempos de reacción lentos y no aportaban datos sustanciales durante el proceso de excavación. Un sistema de auscultación automatizado permite contar con una mejor percepción de la interacción entre el entorno y la tuneladora al proporcionar, de primera mano, los datos necesarios para una toma de decisiones oportuna. Toda la información recolectada en el sistema, con las condiciones y frecuencias de monitoreo definidas por el especialista, es transmitida a los responsables de la construcción mediante la integración de medios de notificación electrónicos –correo electrónico, mensajes de texto, GIS, etcétera.

Para definir la instrumentación que compone al sistema de auscultación de un túnel se consideran, entre otros elementos, el tipo de proyecto y sus condiciones geológicas, topográficas e hidrológicas, además de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales a excavar; se toman en cuenta también otros factores como las zonas urbanas, los parámetros ambientales y las normas vigentes de construcción. Lo anterior implica que

no es factible la estandarización del diseño del sistema de auscultación; sin embargo, sí es posible la tipificación de los instrumentos empleados en túneles partiendo de los objetivos de auscultación y considerando las variables o parámetros distintivos de este tipo de proyectos. Cabe señalar que el diseño de un sistema de auscultación no se refiere únicamente a la selección de los instrumentos que lo conforman; requiere adicionalmente un proceso de ingeniería que parte de la definición de los objetivos y culmina con la ejecución de prácticas que determinan las variables a medir y las hipótesis del comportamiento esperado. Debido a lo anterior, es muy importante que el diseño tome en cuenta la flexibilidad del sistema para cualquier modificación que se requiera.

La automatización del sistema de auscultación en túneles considera, en primera instancia, la cantidad y tipo de instrumentos, lo cual permite definir los sistemas y equipos para la transmisión de los datos recolectados. A partir de ello, se determinará la integración de dicha información en software especializado para el procesamiento de los datos, la emisión de reportes y gráficos de acuerdo con las necesidades de auscultación y con los parámetros preestablecidos por el intérprete. Las longitudes del túnel, considerando sus portales y los medios de comunicación al exterior –lumbra, caños, troneras, etc.–, determinarán en gran medida la topología de comunicaciones para la transmisión de la información. A su vez, la conducción de las señales al exterior del túnel puede darse a través de diferentes medios; las características del túnel, y sobre todo su objetivo operacional, definirán los sistemas de transmisión: los más comunes se refieren a radiocomunicación al interior del túnel, fibra óptica, cables multiconductores y topologías de redes de telecomunicaciones. Las alertas definidas a partir de

Gráfica 1. Registro histórico de deformación de un sistema automatizado de medición de convergencias



umbrales de riesgo pueden ser enviadas a través de mensajes de texto o correos electrónicos a los responsables de cada proceso o de la construcción del túnel. Las interfaces gráficas que maneja este tipo de sistema permiten la generación de reportes que posteriormente se integrarán a la base de datos de los parámetros de excavación –control de procesos de excavación–, como más adelante se explicará.

Control de procesos de excavación

Actualmente las tuneladoras TBM incorporan un sistema de gestión que contiene todos los parámetros o variables registrados durante los avances en la excavación. El registro se lleva a cabo mediante un sistema de control denominado PLC, el cual está permanentemente en contacto con la computadora de la TBM aportando la información de todos sus parámetros operacionales; la conexión de tipo bidireccional ofrece también la posibilidad de enviar información al PLC y así modificar los parámetros de avance. El análisis de dichas variables establece los criterios fundamentales para el proceso de excavación, promueve su optimización en beneficio de la calidad de la obra y minimiza los riesgos y afectaciones inherentes a este tipo de proyectos. Sin duda es preciso conocer y dominar los procesos clave del método constructivo para conseguir que los factores de éxito del proyecto sean óptimos (Comulada *et al.*, 2009).

Es posible englobar la excavación de túneles con tuneladoras en dos grandes tecnologías: EPB o escudos de presión balanceada e hidroescudos (véase

figura 1). A pesar de sus diferentes tecnologías, los procesos fundamentales de excavación son los mismos: empuje, presiones en la cámara de excavación, corte y acondicionamiento del terreno, aplicación del mortero en el espacio anular entre el endovelado y el terreno, y rezagado del material excavado.

Mientras mayor sea el número de parámetros que la tuneladora registre, el análisis de dicha información será más completo y, en consecuencia, la operación del escudo más eficiente. Esto, aunado al sistema de auscultación, permite el correcto desempeño de la excavación y, de ser necesario, la adaptación de sus parámetros de acuerdo con las condiciones geotécnicas reales, lo cual se refleja en la minimización de los efectos inducidos al entorno y el aumento de los rendimientos de excavación.

Integración de los sistemas de auscultación y control de procesos

Como se ha planteado, la incorporación de los sistemas de auscultación –instrumentación– y control de procesos –parámetros operacionales de la TBM– permite al usuario la comparación, en tiempo real y posproceso, de los valores reales y el objetivo que definen al proyecto, lo que facilita con extrema precisión el análisis de los distintos parámetros mediante de su correlación y los efectos inducidos por los procedimientos constructivos en el túnel. Una vez habilitado este tipo de sistemas, es posible la evaluación inmediata del comportamiento del túnel y su entorno y, a su vez, el análisis del funcionamiento de la tuneladora, lo que permite al usuario determinar hipótesis de diseño y posibles deficiencias en la operación del escudo. Para el fin descrito, se han desarrollado diferentes tipos de herramientas informáticas que hacen posible la incorporación de ambos sistemas en formatos y topologías de comunicación definidas; esto da lugar a una visualización clara de los diferentes procesos y sus posibles afectaciones, lo que permite al usuario determinar acciones preventivas y correctivas en los procedimientos de excavación y construcción del túnel (véase figura 2).

Aplicación del sistema integrado de instrumentación y control de procesos en escudos EPB

Las tuneladoras EPB (*earth pressure balance*) utilizan el material producto de la excavación para mantener la presión sobre el frente, con el fin de evitar asentamientos en la superficie. La rezaga es extraída de la cámara de excavación a través del tornillo sinfín; mediante el control de la velocidad de extracción del material y de la fuerza aplicada por los cilindros de empuje, es posible mantener una presión constante sobre el frente que, a partir de los parámetros preestablecidos en el diseño del túnel, permiten construir la estructura sin incidencias en la infraestructura presente en superficie. En túneles excavados en suelos blandos altamente deformables, el control de las deformaciones del endovelado es crucial para garantizar la seguridad de

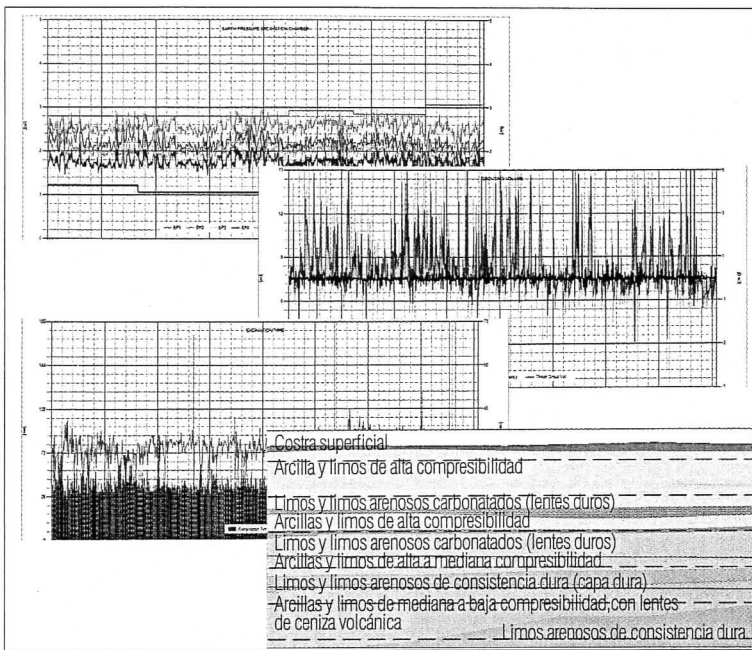


Figura 3. Revisión de los parámetros de excavación.

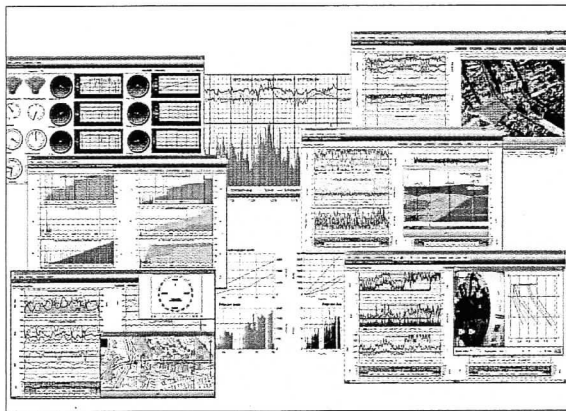


Figura 4. Integración de los sistemas de auscultación y control de procesos (Maidl Tunnelconsultants).

la construcción, por lo que el conocimiento temprano del comportamiento del revestimiento representa la verificación de las hipótesis de diseño y permite la optimización del proceso de excavación. Considerando lo anterior, se han desarrollado sistemas automatizados de medición de convergencias que permiten conocer la geometría temprana de los anillos de dovelas desde su instalación en el faldón, continuando con el registro histórico de deformaciones hasta su desinstalación (véase gráfica 1).

Una vez que se conoce el comportamiento inicial del anillo de dovelas y dependiendo de las hipótesis de diseño, es posible comparar el registro histórico de la instrumentación con los parámetros operacionales del escudo para un mismo punto o zona de interés. Suponiendo altas deformaciones en el endovelado y asentamientos en superficie, es imprescindible verificar dentro de los

parámetros de excavación: a) volúmenes de inyección de mortero en el espacio anular, b) presiones de frente, c) velocidades de avance y d) geología (véase figura 3).

Asimismo, es necesario verificar las condiciones de la infraestructura en superficie –prismas de control, referencias topográficas, geófonos, medidores de grietas, etc.–, ya que pueden ser susceptibles de daños por cambios en las condiciones originales del terreno y después del paso de la TBM en la zona de influencia. Las deficiencias en la inyección de mortero pueden ocasionar deformaciones excesivas en este tipo de túneles por la pérdida de confinamiento. A su vez, una inadecuada definición de las presiones del frente podría ocasionar asentamientos o bufamientos en la superficie que originen indirectamente daños estructurales en las edificaciones aledañas. Se puede observar que factores como la geología, la infraestructura en la superficie y la asignación de los parámetros de excavación influyen directamente en el comportamiento de la estructura (véase figura 4).

Conclusiones

El desarrollo de sistemas informáticos cada vez más sofisticados, a la par del progreso de las telecomunicaciones y su relación con las nuevas tecnologías para la excavación de túneles con TBM, ha permitido la implantación de sistemas integrados que promueven la optimización de los procesos constructivos y facilitan el análisis en tiempo real y predictivo del comportamiento de los túneles. Debido al perfil industrial de la excavación de túneles con TBM, los tiempos de reacción ante cualquier eventualidad y la optimización continua de los procedimientos sólo pueden llevarse a cabo mediante la interacción del usuario con los sistemas informáticos de gestión de datos en tiempo real. Considerando la complejidad e interdependencia de los procesos de excavación y el sistema de auscultación, se requiere la interacción entre el sistema y el perfil experto de los responsables.

Sin duda, la inversión en este tipo de sistemas representa un ínfimo porcentaje de la inversión total del proyecto de excavación, por lo que su incorporación resulta un enorme beneficio técnico y económico que permite la reducción de los tiempos de reacción ante cualquier eventualidad y la optimización de los plazos y costos en la ejecución de la obra [6].

Referencias

- Berkelaar, R., et al. (2007). Deformation monitoring of the underground metro station Rotterdam CS, a case study.
- Comulada, M., et al. (2009). Process controlling in mechanized tunnelling. 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, Alemania.
- Dunnicliff, J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. Wiley.
- Kavadas, M. (2003). Monitoring ground deformation in tunneling: Current practice in transportation tunnels. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional Técnica de Atenas.

¿Desea opinar o cuenta con mayor información sobre este tema? Escríbanos a ic@heliosmx.org