



Instrumentación y control de procesos de excavación a partir de un sistema telemétrico-híbrido, como parte de la evolución en la excavación de túneles con tuneladora.

Instrumentation and process controlling for excavation through a telemetry-hybrid system as a part of evolution in tunneling with TBM.

José Anselmo Pérez Reyes, Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea, COMISSA

RESUMEN: Hasta hace poco tiempo el control de procesos para la construcción de túneles con tuneladoras se efectuaba mediante evaluaciones manuales de los procesos más importantes para la excavación; mediante la digitalización de estos parámetros y la aplicación de sistemas de auscultación sofisticados fue posible su incorporación en un solo sistema que ha permitido desarrollar un análisis sistemático de esta información y ha impulsado la construcción de túneles bajo situaciones cada vez más complejas.

ABSTRACT: Recently the process controlling for tunneling with TBM was done by manual evaluation of the most important processes in the excavation; through digitizing these parameters and applying sophisticated auscultation systems, was possible the incorporation into a single system allowing the develop of a systematic analysis of this information and, therefore, promoting tunneling under increasingly complex situations..

1 INTRODUCCIÓN.

Originalmente el control de procesos para la excavación de túneles con tuneladoras se llevaba a cabo mediante registros y evaluaciones manuales de los procesos más importantes para la excavación; a su vez, el registro de cada parámetro operacional era almacenado con el único objetivo de llevar a cabo un retroanálisis para la identificación de fallos durante el proceso de excavación. A partir de la parametrización y digitalización de un mayor número de procesos y debido a la gran cantidad de datos que estos aportan, se ha logrado implantar toda una serie de sistemas que no sólo velan por la evaluación de los parámetros más importantes sino que 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 detallados y sofisticados nos ha permitido complementar al sistema de control de procesos, particularmente en la relación que existe entre los parámetros de excavación y su interacción con el suelo. En conjunto, ambos aspectos de la ingeniería para túneles han logrado la reducción de los plazos de ejecución, cubriendo 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.

Es importante mencionar que hasta hace poco era práctica común llevar a cabo un seguimiento manual para la comparación entre los diferentes recursos para el análisis de la interacción suelo-tuneladora. Esto, sin duda, aumentaba los tiempos de reacción incluso en aquellos

casos en donde ambos sistemas (instrumentación y control de procesos) aportaban datos en tiempo real. La razón es simple, ya que para poder llevar a cabo una comparación de valores objetivo con los reales la dependencia entre ambos sistemas es fundamental. Por lo tanto, fue necesario el desarrollo de nuevos sistemas que permitieran simplificar el análisis y la evaluación de toda la información, lo que llevó al desarrollo de software y de métodos especializados en la incorporación de ambas tareas, lo cual ha permitido una eficiente gestión de todos los datos, reflejada en la reducción de los tiempos de reacción y la consecuente mejora de los rendimientos de excavación. Actualmente, en la ejecución de obras subterráneas, es práctica común el uso de sistemas híbridos que facilitan el análisis de toda la información combinando la visualización de datos mecánicos, geológicos, hidrológicos y hasta los relacionados con costes de excavación.

2 SISTEMA DE AUSCULTACIÓN AUTOMATIZADO EN TÚNELES.

2.1. Definición del sistema de auscultación en tiempo real.

Los sistemas de auscultación en tiempo real actualmente representan un requisito operacional en las grandes obras civiles subterráneas a nivel mundial; esto debido a los emplazamientos urbanos, situaciones geológicas y geotécnicas complejas y las consecuentes normas actuales de seguridad y calidad en la excavación.

El diseño de este tipo de sistemas versa en su capacidad por definir, paramétrica y automáticamente, el comportamiento del terreno excavado, las estructuras e instalaciones propias de la construcción y también las del

entorno; estas últimas, en gran medida, definen los procedimientos y parámetros de excavación. Resulta imprescindible, por lo tanto, que el proyecto de instrumentación considere los parámetros de diseño que permitan la definición de la ubicación de los dispositivos, umbrales de riesgo y frecuencias de monitoreo. Sin duda las hipótesis, incertidumbres y los posibles errores introducidos en los métodos de análisis y diseño originan discrepancia entre la predicción obtenida del cálculo y el comportamiento real de las estructuras, lo cual bien puede determinarse mediante la instalación de la instrumentación adecuada, basada justamente en las predicciones del proyecto.

Previo al desarrollo de sistemas digitales para el seguimiento del comportamiento en las estructuras y el entorno, la instrumentación se desarrollaba bajo un contexto de toma de lectura y procesamiento de carácter manual que determinaban tiempos de reacción lentos y sólo permitían el retroanálisis de la información recolectada, sin aportar datos sustanciales para el día a día del procedimiento de excavación. Sin embargo, las actuales tecnologías permiten la gestión automatizada y en tiempo real para el control de este tipo de obras, lo que ha permitido la reducción de los tiempos de reacción y, por consiguiente, la mitigación de riesgos inherentes al proceso de excavación. Un sistema de auscultación automatizado, por lo tanto, 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, bajo 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, etc.--. Es importante mencionar que la eficiente evaluación de estos parámetros requiere de especialistas en las áreas participantes capaces de llevar a cabo la interpretación de los parámetros registrados y, por consiguiente, optar por su validación, el análisis inmediato de la información y, como última etapa, un retroanálisis que permita mejorar las hipótesis de diseño adoptadas a partir del proyecto ejecutivo.

2.2. Instrumentación típica en túneles como parte del sistema de auscultación.

La definición de la instrumentación que compone al sistema de auscultación de un túnel parte, en primera instancia, del tipo de proyecto y de las condiciones geológicas, topográficas e hidrológicas del entorno, considerando también las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de construcción. A su vez, deben tomarse en cuenta otros factores como lo son las zonas urbanas, los parámetros ambientales y las normas vigentes

de construcción. Esto obviamente implica que es imposible la estandarización del diseño del sistema de auscultación; sin embargo, sí es posible la tipificación de instrumentos empleados en túneles partiendo de los objetivos de auscultación y considerando las variables o parámetros distintivos de este tipo de obras. A continuación se indican las principales variables y los instrumentos empleados para el monitoreo de túneles: a) deformaciones en el endovelado --sistemas automatizados de medición de convergencias--, b) deformaciones intrínsecas en los revestimientos --deformímetros para acero y para concreto--, c) esfuerzos --celdas de presión--, d) instrumentación en edificios aledaños --prismas automáticos, geófonos, micrófonos, fisurómetros--, y e) presiones de poro --piezómetros y pozos de observación--.

Cabe señalar que el diseño de un sistema de auscultación no se refiere únicamente a la selección de los instrumentos que lo conforman sino que requiere un proceso de ingeniería que parte de la definición de los objetivos y culmina con la ejecución de prácticas que determinan las variables que serán medidas y las hipótesis del comportamiento esperado. Debido a lo anterior, es muy importante que el diseño considere la flexibilidad del sistema para cualquier modificación en el emplazamiento de los instrumentos que contiene. Sin duda, en relación con el costo del túnel, los instrumentos son baratos y, por lo tanto, el diseño del sistema de auscultación debe desarrollarse en función de la complejidad geotécnica y estructural de la obra y nunca bajo criterios monetarios.

2.3. Automatización del sistema de auscultación.

La automatización del sistema de auscultación en túneles considera, en primera instancia, la cantidad y tipo de instrumentos, lo cual permitirá definir los sistemas y equipos para la transmisión de los datos recolectados. Esto facilitará la integración de dicha información en software especializado para el procesamiento de los datos, la emisión de reportes y gráficos de acuerdo a las necesidades de auscultación y a los parámetros preestablecidos por el intérprete. Las longitudes del túnel, considerando sus portales y/o medios de comunicación al exterior --lumbreras, caños, troneras, etc.-- determinarán en gran medida la topología de comunicaciones para la transmisión de los datos. 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, en donde los más comunes se refieren a radiocomunicación al interior del túnel, fibra óptica, cables multiconductores y topologías de redes de telecomunicaciones, entre otros. Esto tiene como objetivo final la creación de una red de vigilancia que permita determinar: frecuencias de monitoreo, parámetros registrados y su procesamiento y umbrales de riesgo.

A su vez, existe software especializado que permite la gestión de estos registros, integrando en una única base de datos el total de información recolectada, de tal forma que al intérprete se le permita consultar y discretizar toda la información que requiera, en los formatos preestablecidos y en tiempo real; los datos de parámetros de interés y de umbrales de riesgo pueden ser enviados a través de mensajes de texto y/o correos electrónicos a los responsables de cada proceso o de la construcción del túnel. Las interfaces gráficas que maneja este tipo de software permiten al usuario la consulta ágil de cada parámetro, quedando abierto el sistema para cualquier modificación en los parámetros de registro y consintiendo, además, la generación de reportes en los formatos que posteriormente se integrarán a la base de datos de los parámetros de excavación, como se abordará en el último capítulo.

3 REGISTRO DE LOS PARÁMETROS DE EXCAVACIÓN EN TUNELADORAS DE ÚLTIMA GENERACIÓN.

Actualmente las tuneladoras (TBM) incorporan un sistema de gestión, automático y en tiempo real, de información que contiene todos los parámetros o variables que se registran 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 PC 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 modificando así los parámetros de avance. A su vez, los datos almacenados pueden ser enviados, a través de un modem, a superficie permitiendo la asistencia técnica inmediata y a distancia ante cualquier contingencia. Cabe mencionar que el programa de registro de datos de medición se inicia automáticamente con cada avance, cargando en la memoria todos los componentes necesarios del programa; posteriormente el sistema determina el estado actual del funcionamiento de la tuneladora y los datos de medición que deben ser activados de acuerdo al estado de avance. El sistema incluso permite la visualización gráfica de algunos de los datos registrados. En base a los datos almacenados, se documenta el desarrollo completo de los trabajos ejecutados durante el proceso de excavación, permitiendo diferenciar entre cada proceso y anillo colocado. Parámetros mecánicos --par de torsión, fuerzas de empuje, etc.-- y geotécnicos --presiones del frente-- concentran al sistema y determinan las condiciones de operación de la TBM. El análisis a dichas variables establece los criterios fundamentales para el proceso constructivo de excavación y promueve su optimización fomentando la calidad de la obra y minimizando 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 --escudos de presión balanceada-- e hidroescudos (figura 1), en donde a pesar de sus diferencias tecnológicas, los procesos fundamentales de excavación son los mismos: empuje, aplicaciones de 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.

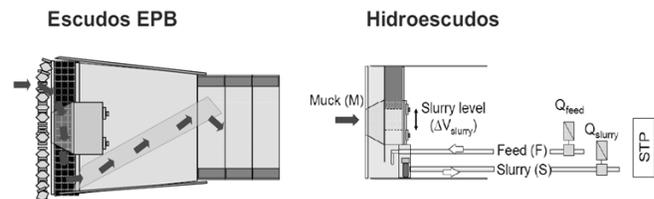


Figura 1. Esquema básico de operación entre escudos de diferentes tecnologías (Maidl Tunnelconsultants).

Mientras mayor sea el número de parámetros que la tuneladora registre, el análisis a dicha información será más completo y, por consiguiente, la operación del escudo más eficiente, permitiendo además que los especialistas comparen los valores obtenidos con los pronosticados a partir de los análisis en el diseño del túnel. Esto, aunado al sistema de auscultación, fomenta el correcto desempeño de la excavación y, de ser necesario, la adaptación de sus parámetros de acuerdo a las condiciones geotécnicas reales.

Sin duda la aplicación de software especializado optimiza y simplifica el análisis de la información y los tiempos de reacción, considerando también que la cantidad de datos que se generan en las TBM de última generación requiere de herramientas que permitan el correcto análisis de la interacción entre el entorno y la tuneladora. Cabe señalar que es práctica común el desarrollo de simulaciones y modelos matemáticos que permiten la obtención de valores objetivo y, aunado al sistema de registro de los procesos, consienten el retroanálisis y la validación de los parámetros preestablecidos.

Por lo tanto, el conocimiento de la relación que existe entre los parámetros de excavación y su relación con el terreno es fundamental para llevar a cabo una eficiente operación del escudo, reflejada en la minimización de los efectos al entorno y el aumento de los rendimientos de excavación. Importante es mencionar que un eficaz control de los parámetros requiere de su adecuada representación y su disponibilidad en cualquier momento.

4 INCORPORACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AUSCULTACIÓN Y PARÁMETROS DE EXCAVACIÓN DE LA TUNELADORA.

La incorporación de los sistemas de auscultación y de los parámetros de excavación, denominado comúnmente "Control de Procesos", permite al usuario la comparación, en tiempo real y post-proceso, de los valores reales y objetivo que definen al proyecto, facilitando con extrema precisión el análisis de los distintos parámetros a través de su correlación y los efectos inducidos por los procedimientos constructivos del túnel. Una vez habilitado este tipo de sistema, es posible la evaluación inmediata del comportamiento del túnel y, a su vez, el análisis del funcionamiento de la tuneladora, permitiendo al usuario determinar hipótesis de diseño y posibles deficiencias en la operación del escudo.

Una de las características fundamentales de este tipo de sistemas es que permite el resguardo y análisis de todos los procesos y parámetros de instrumentación del registro histórico, lo cual concede la evaluación de eventos ya ocurridos y que por consiguiente optimizan los procesos en futuros avances o incluso en diferentes túneles bajo situaciones morfológicas y geológicas similares. Para el fin descrito, se han desarrollado diferentes tipos de herramientas informáticas que permiten la incorporación de ambos sistemas bajo formatos y topologías de comunicación definidas. Esto da lugar a una visualización clara de los diferentes procesos y sus posibles afectaciones, permitiendo al usuario determinar acciones preventivas y/o correctivas en los procedimientos de excavación y construcción del túnel. Así mismo, el sistema de auscultación automatizado, para aquellos instrumentos que no indican parámetros operacionales sino el comportamiento de los materiales --deformímetros embebidos en acero y concreto-- o estructuras aledañas al túnel --geófonos, micrófonos, niveles, etc.--, otorga información en tiempo real que, aunado a los parámetros de excavación, permiten al intérprete la generación de criterios de validación y/o remediación de acuerdo a las condiciones del túnel y su entorno (figura 2).

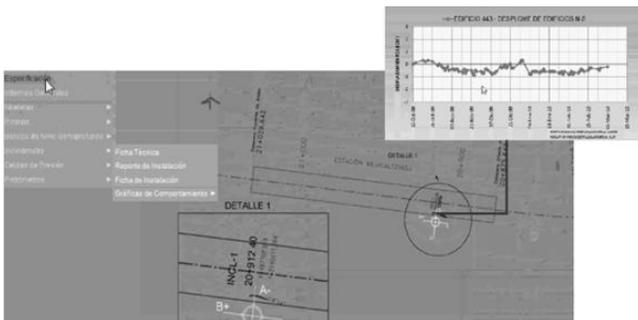


Figura 2 Ejemplo de sistema de auscultación automatizado en tiempo real.

Por lo tanto, la centralización de la base de datos y su distribución por los medios electrónicos y de telecomunicaciones, ha permitido que todos los participantes en la construcción del túnel conozcan, de primera mano, las condiciones del proyecto otorgándoles la posibilidad de una oportuna toma de decisiones que mitiguen posibles riesgos y optimicen los procedimientos constructivos y de remediación. Por supuesto que este tipo de sistemas precisa el conocimiento experto y la interacción continua entre ambos para la optimización de los recursos del software y la del proceso constructivo.

5 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL SISTEMA TELEMÉTRICO-HÍBRIDO DE CONTROL DE PROCESOS EN ESCUDOS DE TIPO EPB.

Las tuneladoras de tipo 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 establecidos en el diseño del túnel, permiten construir la estructura sin incidencias en la infraestructura presente en superficie. Por lo tanto, el proceso de excavación es totalmente dependiente de las condiciones geológicas en el frente. En túneles excavados en suelos blandos altamente deformables, el control de las deformaciones del endovelado es crucial para garantizar la seguridad de 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 y las interferencias que representa el back up de la tuneladora para el monitoreo topográfico convencional mediante distanciómetros láser y extensómetros de cinta, 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 y continuando con el registro histórico de deformaciones, hasta su desinstalación (figura 3).

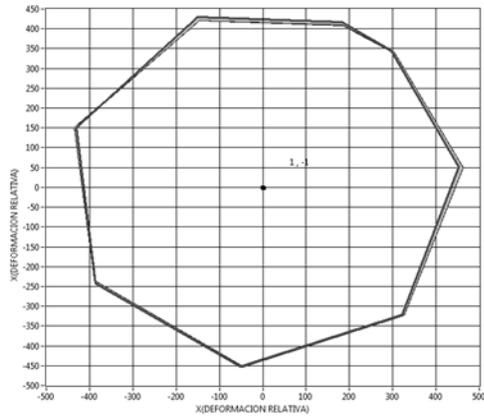


Figura 3. Ejemplo de registro histórico de deformación con el sistema automatizado de medición de convergencias.

Una vez que se conoce el comportamiento inicial del anillo de dovelas y dependiendo de los objetivos del proyecto y 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. El ajuste a los parámetros de excavación puede ocasionar una respuesta radical en el entorno pero también en los rendimientos y en el consecuente comportamiento de la estructura.

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 (figura 4).

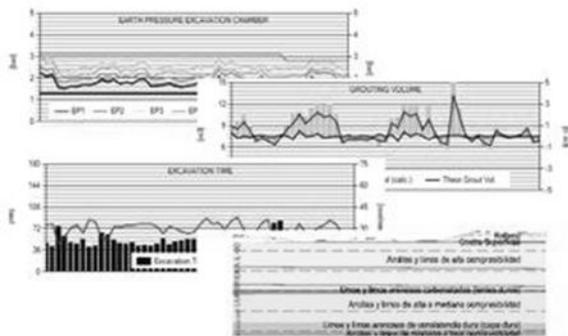


Figura 4. Revisión de los parámetros de excavación.

Así mismo, es necesaria la verificación de las condiciones de la infraestructura en superficie --prismas de control, referencias topográficas, geófonos, medidores de grietas, etc.-- ya que pueden ser susceptibles a daños por cambios en las condiciones originales del terreno que las contiene y después del paso de la tuneladora en la zona de influencia.

Deficiencias en la inyección de mortero pueden ocasionar deformaciones excesivas en este tipo de túneles debido a la pérdida de confinamiento de la estructura. A su vez, una inadecuada definición de las presiones del frente podría ocasionar asentamientos y/o bufamientos en superficie que originen indirectamente daños estructurales en las edificaciones aledañas. Incluso la aplicación de altas velocidades de excavación podría incurrir en el deficiente abastecimiento de los medios de acondicionamiento del terreno, ocasionando deficiencias en el rezagado del material producto de la excavación, desgaste innecesario de las herramientas de corte y la consecuente disminución en los rendimientos, elevando sustancialmente el costo del proyecto

Por lo tanto, factores como la geología que define al trazo del túnel, la infraestructura en la superficie y la asignación de los parámetros de excavación, inciden directamente en el comportamiento de la estructura, por lo que el control de procesos resulta una herramienta fundamental para el análisis de su comportamiento y las modificaciones necesarias en la operación del escudo que permitan asegurar la construcción y la optimización de los rendimientos (figura 5).

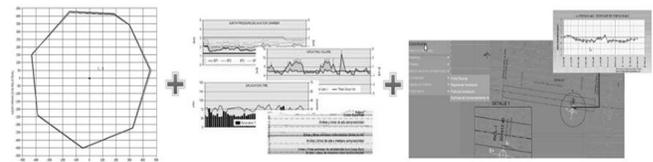


Figura 5. Sistema telemétrico híbrido de control de procesos.

6 CONCLUSIONES.

El desarrollo de sistemas informáticos cada vez más sofisticados, a la par con el progreso de las telecomunicaciones y su relación con las nuevas tecnologías para la excavación de túneles con tuneladora, ha permitido la implantación de sistemas telemétricos que promueven la optimización de los procesos constructivos y facilitan el análisis en tiempo real y predictivo del comportamiento de los túneles. Hoy en día es tal la cantidad de datos que se generan en los procesos de excavación y en los sistemas de auscultación que, sin la ayuda de un software que permita la gestión de toda esa información, la revisión manual de la interacción entre todas las variables conduciría a largos tiempos de procesamiento que dificultan la atención oportuna del procedimiento constructivo. Debido al perfil industrial de la excavación de túneles con tuneladora, los tiempos de reacción ante cualquier evento 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, se precisa de la interacción entre el sistema y el perfil experto de los responsables, lo cual asegura la correcta interpretación de los parámetros e incluso permite al sistema comprender e interactuar con los procesos y variables más importantes que el usuario final necesite conocer.

Sin duda, la inversión en los sistemas de auscultación automatizados representa un ínfimo porcentaje de la inversión total del proyecto de excavación, por lo que su incorporación al proyecto y su relación con el sistema de adquisición de datos de las TBM de última generación, representa un enorme beneficio técnico y económico, permitiendo la reducción de los tiempos de reacción ante cualquier eventualidad y la optimización de los plazos y costos en la ejecución de la obra.

7 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, Germany.
- Dunicliff, J. (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley, pp. 33-92.
- Kavvadas, M. (2003). Monitoring ground deformation in tunneling: Current practice in transportation tunnels. Civil Engineering Faculty, National Technical University of Athens, Greece.