

Un sistema pionero para el control de riesgos en el túnel de alta velocidad Sants-Sagrera de Barcelona

SENER ha sido la empresa responsable de la puesta en marcha de este sistema

Autor: José Gómez Cabrera de SENER



ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) contrató a SENER Ingeniería y Sistemas para realizar el control de riesgos de operación de la tuneladora de presión de tierras en el túnel de alta velocidad Sants-Sagrera en la ciudad de Barcelona, así como en los túneles de Montcada y Gerona.

El túnel *Sants-Sagrera*, en concreto, une la actual estación de alta velocidad de Sants con la futura nueva estación de La Sagrera. Con 5,1 km de longitud, este túnel excavado en arcillas, arenas y gravas con alto nivel freático en gran parte del trazado y coberturas de entre 8 y 25 m, ha generado gran expectación social y mediática como consecuencia de que discurre junto a *La Sagrada Familia* y *La Pedrera*, obras del arquitecto **Gaudí** catalogadas como *Patrimonio de la Humanidad*. Debido a esto, los trabajos han sido vigilados tanto judicialmente como por técnicos de la UNESCO.

La supervisión en tiempo real del control de riesgos se realizó mediante la monitorización de los parámetros de excavación de la tuneladora que actuó en 4.849 m de los 5,1 km del túnel mediante el control de las deformaciones en superficie, en profundidad y en los edificios. El equipo de SENER visualizó las 24 horas del día, gracias al acceso remoto al software de la tuneladora, los parámetros de operación que afectaban a la seguridad y, por tanto, a los bienes en superficie.

Esta información fue procesada con los datos de instrumentación para la identificación de posibles anomalías y, en caso de su detección, las medidas correctivas fueron tomadas con rapidez de manera que, cualquier incidencia detectada, fue comunicada al

ingeniero responsable del túnel para su actuación correctiva inmediata.

De este modo, los parámetros de operación no permanecían estáticos, sino que eran adaptados en tiempo real a las características reales del terreno excavado. Los parámetros de control, fueron los siguientes: pesos excavados, presiones de confinamiento del frente, densidad aparente del material en cámara de presión, ocupación efectiva del espacio entre el escudo y el terreno con bentonita presurizada, el control de presión y el volumen del mortero, así como la fuerza de empuje, el par y la temperatura de la cámara.

Pero, probablemente, la preocupación mayor de este trabajo se centraba en que el nivel de asientos en superficie pudiera afectar a los monumentos patrimonio de la Humanidad. Así, gracias al control de parámetros de operación de la tuneladora en tiempo real, se logró disminuir la probabilidad de incidentes de forma importante y la reducción significativa de los riesgos relativos a errores humanos. El túnel registró niveles de asientos menores de 2 mm, no sólo en el paso junto al templo de La Sagrada Familia, sino a lo largo de prácticamente todo el trazado de más de 5 km.

Esta metodología de seguimiento en tiempo real de parámetros de operación de la tuneladora y las deformaciones en superficie, en profundidad y en edificios, ha sido pionera en España y, es por ello, que ha suscitado gran interés nacional e internacional obteniendo además, de manera reciente, el premio Potencia en la categoría de túneles.



Salida de control TBM

El premio Potencia recibido en la categoría de túneles, ha reconocido la gran complejidad técnica del proyecto y los resultados obtenidos, ya que los asientos han sido cinco veces menores de los proyectados y ha quedado reconocido que el túnel Sant Sagrera no afectó a ningún edificio, incluidos los de La Sagrada Familia y La Pedrera.

RETOS Y DIFICULTADES DE LA EXCAVACIÓN

En cuanto a los riesgos durante la excavación, estos podían venir producidos por inestabilidades del terreno que derivaran en sobre excavaciones o anomalías posteriores. Para evitar estos problemas en la seguridad de la excavación, el control de riesgos de SENER realizó un seguimiento exhaustivo en tres zonas específicas.

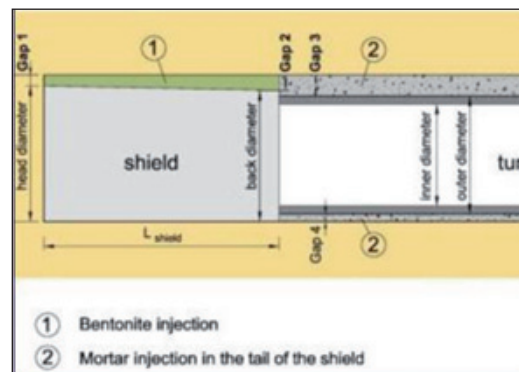
- Por un lado, delante de la máquina, para evitar que, debido a presiones incorrectas de soporte de tierras y/o falta de densidad en la cámara de excavación, se produjeran sobre-excavaciones por un exceso de peso excavado superior a lo establecido en los trabajos técnicos previos.

- En segundo lugar, por encima de la máquina, compensando, en caso necesario, con inyección de bentonita por coraza el hueco o *gap* dejado por el sobrecorte de diseño (corte teórico de la rueda de corte) y la conicidad del propio escudo.

- Por último, tras el paso de la máquina, rellenando de mortero con una presión y volumen adecuados para compensar el gap comprendido entre el diámetro del escudo y el anillo de revestimiento.

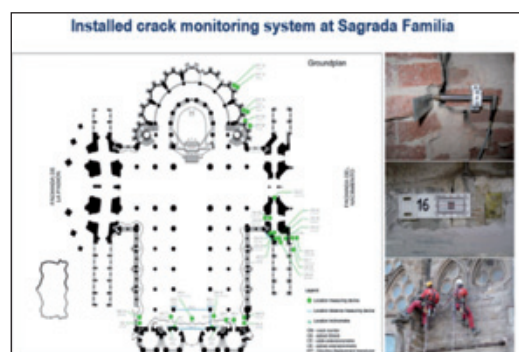
SUPERVISIÓN DE LAS OBRAS

El seguimiento de todos los parámetros en estas tres zonas descritas, SENER lo llevó a cabo mediante un análisis exhaustivo de los datos pro-



porcionados, en primer lugar, por una terminal espejo situada dentro de la cabina del piloto de la tuneladora que, en tiempo real, transmitía esos parámetros de operación a las oficinas locales. Además, SENER recibía un flujo continuo de información proveniente de la instrumentación geotécnica robotizada instalada y, por último, fue posible el análisis de la información periódica de la instrumentación no robotizada.

El objetivo de este profundo seguimiento no era otro que el control, por una parte, de las sobre excavaciones, como riesgo más importante de las excavaciones; por otra parte, el control de las deformaciones y por último el control de funcionamiento de la máquina.



PARÁMETROS DE CONTROL

Para controlar el funcionamiento de la máquina, las sobre-excavaciones y las deformaciones descritas, se vigilaban parámetros como la presión de tierras y la densidad de estas en la cámara de excavación; el peso excavado; la presión y el volumen de inyección de bentonita por coraza; y la presión y volumen de inyección de mortero por cola.

Presiones de tierra

En el proceso de excavación del *túnel Sants-Sagrera* se verificó la presión en reposo que cargaban los sensores de tierra instalados en la cámara, durante las cortas paradas en el avance o en el transcurso del montaje del revestimiento de la tuneladora. En caso de subida de la presión, esta se corregía en el siguiente avance elevando el valor de referencia. Además, si los instrumentos de control geotécnico en profundidad registraban levantamientos del terreno al paso de la rueda de corte, la presión de tierras en el frente se modificaba disminuyéndola.

De manera adicional, en cada tramo geotécnico en que fue dividido el túnel, la presión de frente se comprobó mediante extensómetros, que medían las deformaciones en profundidad, y que permitían saber si la presión de frente era la adecuada (con fluctuaciones menores de $\pm 0,2$ bar de la presión de referencia).

Control de densidad de material en la cámara

Mantener la cámara llena de terreno correctamente acondicionado es fundamental para el correcto trabajo del escudo. Así, es necesario garantizar que la presión que marcan los sensores corresponde a presión de tierras y no a la presión de los acondicionadores de tierras en la zona superior de la cámara (burbuja de aire inyectado con las espumas), es decir, verificar que no tenemos la parte superior de la cámara vacía de tierras. Esta densidad aparente fue controlada, en tiempo real, teniendo en cuenta las diferencias de presiones entre aquellos sensores de presión de tierras situados en la zona superior de la cámara y los situados en la parte inmediatamente inferior.

Estas diferencias son muy relevantes, pues permiten conocer si la presión es la correcta y corresponde al escombros acondicionado en la cámara o si, por el contrario, corresponden a la presión generada por la burbuja de aire generado en la parte superior de la cámara de presión, consecuencia del exceso de aire que aporta la inyección

de espumas para el acondicionamiento del material en la cámara.

Control de peso excavado

SENER, en el control del peso llevado a cabo, vigiló que el avance mantuviera una pendiente constante y coherente con el peso final teórico del anillo excavado. Los resultados obtenidos, a pesar de las limitaciones propias de las balanzas, fueron muy satisfactorios y fiables y, gracias al continuo control de riesgos en tiempo real, se permitió detectar anomalías en el calibrado y se pudieron efectuar reinicios de balanzas y ajustes de medida por la comparación del peso verificado en la balanza exterior.

Control de volumen e inyección de mortero

Una vez calculado el volumen teórico de mortero, se establecieron los límites de alerta y alarma superior e inferior para el relleno del espacio anular entre el extradós de la dovela y el corte teórico de excavación. La verificación en tiempo real tanto del volumen como de la presión de referencia se realizó en análisis parciales cada 20 cm de la excavación del anillo que aseguraron el avance según lo esperado.

OTROS PARÁMETROS DE CONTROL

Además del control de los parámetros más comunes anteriormente descritos, fueron analizados también el empuje, el par, la velocidad de excavación y la velocidad de penetración, como datos complementarios para la interpretación de anomalías en la excavación.

CONTROL DE ASIENTOS

De entre estos otros parámetros quizás destaque el control con instrumentación geotécnica realizado mediante hitos y extensómetros. Estos, al ser más sensibles en el corto tiempo a los parámetros de operación de la máquina, permitieron evaluar las presiones teóricas definidas en el plan de avance de la tuneladora gracias a un

control de asientos en el anclaje más profundo.

Pero el hito más importante de todo este proyecto desarrollado por SENER ha sido, sin duda, los bajos asientos en superficie conseguidos que han garantizado, por un lado, la seguridad de los edificios a lo largo de todo el túnel y de los monumentos Patrimonio de la Humanidad y, por otro, ha supuesto el interés y reconocimiento internacional.

Es digno de mención el paso a menos de ocho metros bajo los ferrocarriles de la Generalitat en el Paseo de Gracia o de las muy bajas coberturas (de cerca de 8m) en el entorno de Sants.

Además, la tuneladora pasó junto al templo de La Sagrada Familia y La Pedrera generando los asientos anteriormente mencionados de 2 mm, cinco veces menores de lo especificado en proyecto, unos datos excelentes si tenemos en cuenta que la tuneladora tenía 11,5 m de diámetro, y que esta excavó en arenas y arcillas bajo altas cargas freáticas.

Un reto adicional de la excavación fue, además, la supervisión continua de técnicos de la UNESCO que realizaron un exhaustivo seguimiento del modo de trabajo y del desarrollo diario en el control de riesgos realizado.

Así, los técnicos pudieron observar cómo todo indicio de anomalía en los parámetros de excavación era detectado por el equipo de SENER y esta información se transmitía en segundos al piloto e ingeniero jefe de túnel del contratista para su corrección.

De este modo, no llegaron nunca a concretarse situaciones de alarma. Este trabajo que tenía como una de sus premisas cumplir el proyecto u hoja de ruta de la excavación sirvió también para adaptar el proyecto a las condiciones del terreno realmente excavado, manteniendo los siempre unos altos niveles de seguridad.