OA P13, Un pozo de lanzamiento de tuneladora en la Línea 15, en el centro del sitio protegido de la Isla de Monsieur

Mohamed SABBAH
Responsable De Obra (Moe)
INGEROP

Martin CAHN
Ingeniero Geotécnico
Geos Ingenieurs Conseils

Benjamin GIACOMETTI
Ingeniero de Estudio
Soletanche Bachy

Maxime FONTY
Ingeniero de Estudio
Soletanche Bachy

Pierre-BENOIT PASSOT
Ingeniero de Obra
Soletanche Bachy

En el sitio protegido de la Isla de Monsieur, cerca del Puente de Sèvres, el Consorcio Horizon (Bouygues TP, Soletanche Bachy Francia, Bessac, Soletanche Bachy Túneles) está preparando el lanzamiento de la tuneladora de la Línea 15 Sur, que deberá llegar a la estación de Fort-d'Issy – Vanves-Clamart, y que actualmente excava el pozo de arranque OA P13 hasta una profundidad de 30 m. La construcción de los muros pantalla de esta obra de forma trilóbica, de 55 m de profundidad, requirió una atención particular, especialmente para la integración de la obra en su entorno, para el control de la verticalidad y la construcción de paneles de conexión de dimensiones poco habituales.

El tramo T3A de la Línea 15 Sur del Gran París Exprés (GPE) cruza el Sena dos veces, aguas arriba y aguas abajo de la Isla Seguin. Este tramo subterráneo de 4 km entre la estación de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart y la obra anexa del pozo de la Isla de Monsieur (OA P13), incluye las estaciones de Issy RER (ISS) y Pont-de-Sèvres (PDS), 4 obras anexas y una pasarela que une a la Isla Seguin con la estación PDS.

La proximidad del Sena constituye una ventaja para el suministro y la eliminación de escombros, pero también implica limitaciones con respecto a las protecciones contra inundaciones (ver Figura 1).

El OA P13 está situado entre la estación Pont-de-Sèvres y la futura estación Saint-Cloud, que forma parte del tramo T4 de la Línea 15 Oeste. Esta obra es el punto límite entre los mercados del tramo T3 (Línea 15 Sur al oeste, entre Villejuif-Louis-Aragon y la Isla de Monsieur) y el tramo T4 (Línea 15 Oeste, entre la Isla de Monsieur y el Estadio de Francia). Sirve de punto de partida para la tuneladora, que construye el sector Oeste

▲ Figura 1. Cuerpo A y B TBM de 2.44 m de diámetro.

del tramo T3 hasta la estación de Fort-d'Issy – Vanves-Clamart, es decir, una longitud de túnel de 4,146 m (incluyendo el cruce de las estaciones Pont-de-Sèvres e Issy RER).

La obra está compuesta por un pozo con muros pantalla, de forma trilóbica (tres partes circulares que se cruzan y que constituyen el cuerpo principal de la obra anexa). El pozo está centrado en el túnel. Las dimensiones del pozo en el plano son las siguientes: longitud de 50 m entre vacíos de los muros pantalla (incluida la tolerancia de verticalidad del muro pantalla), anchura máxima de 24 m entre vacíos de los muros pantalla y que corresponde al diámetro de las partes circulares del pozo. La anchura mínima del pozo es de 18.4 m al nivel de las uniones de las partes circulares del pozo.

El lóbulo Oeste debe permitir integrar la tolva, de dimensiones 20 m x 8 m necesaria para el suministro de las secciones de vías.

El pozo tiene una profundidad de 29.8 m (diferencia entre el nivel medio del suelo a 30.2 m de la NGF (Nivelación General de Francia) y el nivel del carril a 0.4 m de la NGF).

Contexto Geológico

La Obra Anexa 13 de la Isla de Monsieur (OA P13) está situada en la orilla izquierda del Sena, en el municipio de Sèvres.

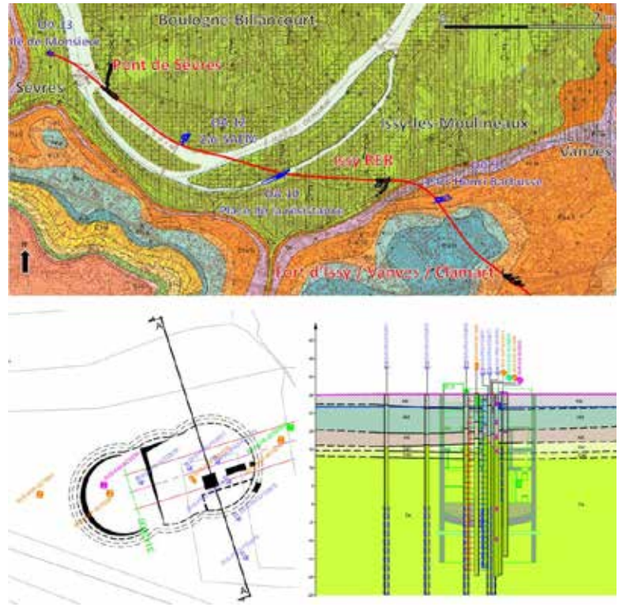
Al igual que la mayoría de las otras obras del tramo T3A de la Línea 15 Sur, el pozo y sus muros atraviesan principalmente la roca caliza campaniense. Así, tras una cubierta cuaternaria de aproximadamente 14 m, formada por terraplenes (Rb), aluviones modernos (AM) y aluviones antiguos (AA), 23 m de roca caliza se encuentran hasta el fondo de la excavación (Figura 2).

En comparación con la orilla derecha en Boulogne, la alteración de la roca caliza en la Isla de Monsieur es reducida, con alrededor de 2.5 m de roca caliza pastosa (Ca1) y 1 m de roca caliza fracturada (Ca2).

Dado que la roca caliza es un material particularmente difícil de muestrear, sensible al agua y a las heladas, que presenta características tixotrópicas y una ruptura frágil, resultó casi imposible distinguir visualmente las facies de alteración a través de las descripciones de los testigos.

Los diferentes estados de alteración se identificaron a partir de un análisis de las pruebas in situ (sobre el terreno), principalmente presiométricas, realizadas a escala del tramo. La roca caliza sana (Cs) de la Isla de Monsieur, cuya permeabilidad, inferior a 5.10-6 m/s fue confirmada tanto en la fase de estudio mediante una prueba de bombeo como por pruebas de agua en la perforación realizadas durante la campaña G3, constituye el tapón de la obra, que permite limitar los flujos de aguas ácidas de las minas y la capa de anclaje de los muros pantalla.

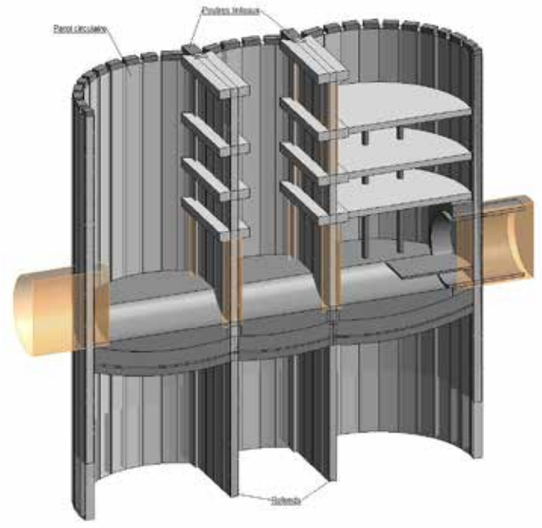
En la zona del pozo se encuentran dos capas freáticas: la capa aluvial del Sena y la de la roca caliza. Ambas están en comunicación a través de la red de fracturación de la roca caliza, de modo que se mantiene un único nivel piezométrico a 26.7 NGF para el nivel corriente. De esta manera, la carga o presión hidrostática alcanza los 33 m al nivel del fondo de la excavación.



▲ Figura 2. Contexto geológico.

Concepción

La obra OA P13, al igual que las demás obras del lote, fue objeto de una modelización 3D



▲ Figura 3. Modelo 3D de la estructura.

con el programa Revit (Figura 3), a partir de la cual se elaboraron los planos de ejecución de la obra (panelado, elevaciones, etcétera). Esta modelización también proporciona una herramienta para ayudar a definir métodos, en particular aquellos relativos a las disposiciones necesarias para la entrada y el funcionamiento de la tuneladora.

Durante los estudios de ejecución de los muros pantalla, se adoptó el siguiente esquema estructural para la reabsorción de las presiones de tierra y de agua:

- Los muros pantalla circulares de los lóbulos son autoestables y se apoyan únicamente en la solera;

- La unión de dos lóbulos es tratada como una viga cargada por la presión cilíndrica resultante proveniente de los lóbulos adyacentes, apoyada en los elementos de separación, los codales centrales y la solera. La demolición del elemento de separación central a la altura del túnel se realiza en dos etapas, de manera a construir la solera antes de alcanzar el rango máximo de la viga dintel.

De este modo, los muros pantalla de los lóbulos pudieron dimensionarse mediante un modelo con coeficientes de reacción, considerando una rigidez cilíndrica sobre la altura del muro igual a E.e/ R 2 (siendo E, e y R respectivamente el módulo de Young del hormigón del muro, el grosor del muro y el radio de los lóbulos).

La verificación de la compresión en el anillo de hormigón se realizó en el ELS con base en el grosor registrado y el ELU, tomando en cuenta las desviaciones conforme al EC2.

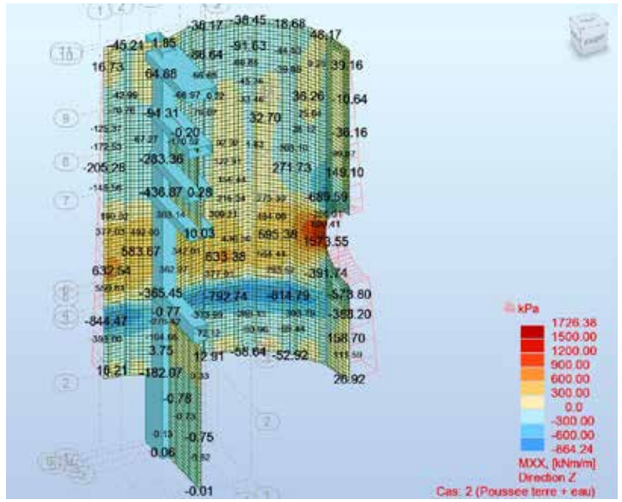
La consideración de las perforaciones de las tuneladoras del T3A y del T4 se modela anulando la rigidez cilíndrica a la altura de la abertura, pero tomando en cuenta no obstante un efecto "*gousset*" (anulación progresiva de la rigidez, en la parte superior e inferior de la apertura).

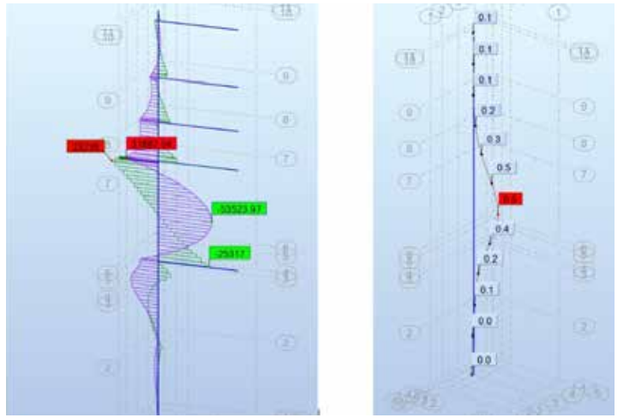
Las vigas de conexión de los lóbulos se sometieron a un doble cálculo:

- Modelo de coeficientes de reacción, por fases, utilizando el software "París", desarrollado por Soletanche Bachy;

- Modelo estructural de elementos finitos en 3D, sin fases, utilizando el software "Robot" (Figura 4). Se elaboró un modelo de coeficiente de reacción monofásico, con la finalidad de realizar una comparación independiente del cronograma de fases.

El modelo estructural de elementos finitos se elaboró para comprender más detalladamente la redistribución de fuerzas en los codales centrales. Y, en efecto, si las dos modelizaciones convergen al añadir las reacciones de apoyo, los esfuerzos se distribuyen de forma diferente en





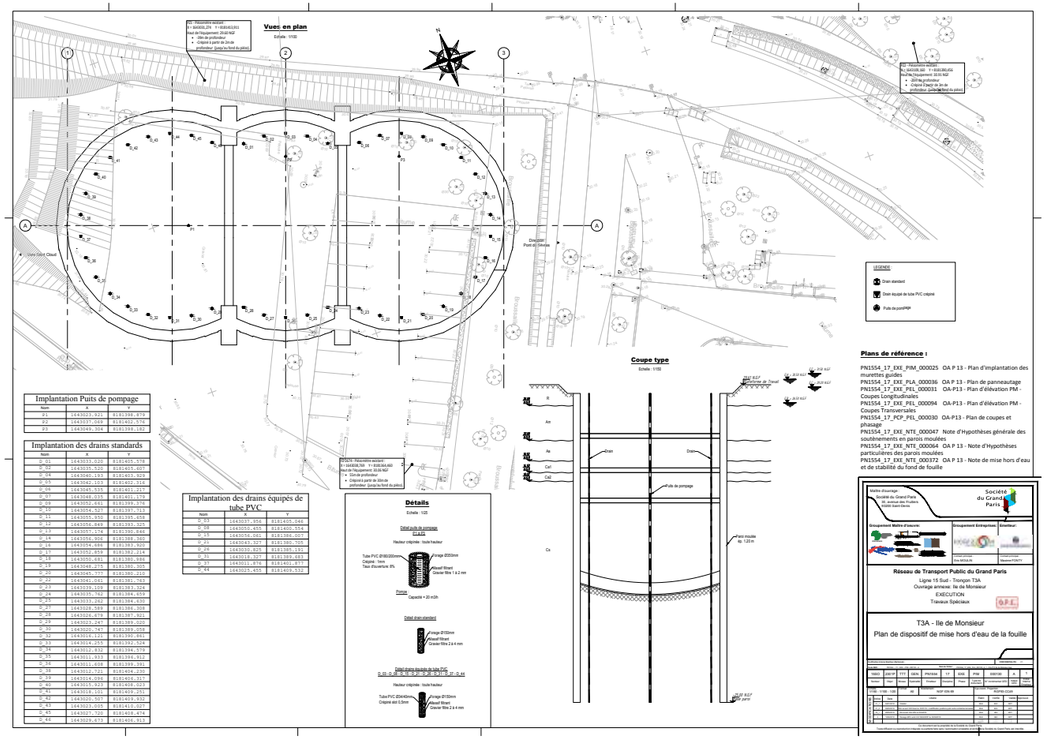
▲ Figura 4a, 4b y 4c. Modelo de cálculo con elementos finitos.

los codales: los codales superiores están más cargados en el modelo de elementos finitos (+70%) mientras que el codal situado inmediatamente por encima de la abertura realizada en el elemento de separación está más cargado en el modelo de coeficientes de reacción. Además, el modelo de elementos finitos muestra momentos de flexión y fuerzas de corte menores (alrededor del 20%) que en el tratamiento de los coeficientes de reacción. La modelización 3D permite una redistribución de la carga aguas arriba de la viga dintel y suaviza la carga en la viga dintel, dando lugar a una distribución de los esfuerzos que puede ser dimensional para los codales superiores.

La envolvente de los dos modelos fue finalmente retenida para el dimensionamiento de las estructuras.

La solera, en forma de cúpula invertida, es resistente a las subpresiones. Las transmite a los muros pantalla periféricos y a las articulaciones de los muros pantalla transversales.

La capacidad resistente del muro pantalla toma en cuenta en el ELS QP una reducción conforme a la NF P EN 94-262, en la medida en que no se



▲ Figura 5. Dispositivo de protección contra inundaciones.

realiza ninguna prueba de capacidad portante en el muro pantalla (Ft;d < 0.15 Rs). Esta reducción lleva, para justificar las articulaciones de los muros pantalla transversales, a suspender el esfuerzo de tracción resultante hasta su base para transmitir los esfuerzos a las vigas dintel mediante un esquema de tracción por biela.

Para las fases provisionales, la protección contra inundaciones se asegura mediante una red de drenajes pasivos que descienden hasta la base del muro, para amortiguar las presiones por debajo del nivel del fondo de la excavación a medida que avanza el movimiento de tierras (Figura 5).

Este sistema de drenajes pasivos se mantuvo en el diseño y la ejecución, a fin de considerar la baja permeabilidad de la caliza sana y los radios de acción insuficientes de los pozos de captación. El pozo de ensayo de Boulogne (Pozo OA P12, de 9.8 m de diámetro) había demostrado que sólo la construcción de drenajes pasivos a proximidad del muro permitía reducir la presión a nivel del pie del muro, bajo el cual se habían podido instalar 3 celdas de presión intersticial.

Por su parte, la eficacia del pozo central resultó ser insuficiente.

Ejecución de las obras

Las obras de los muros pantalla comenzaron en abril de 2018, después del desbrozado de la zona de vía, de la protección pirotécnica y del montaje de las instalaciones de la obra. Se realizaron trabajos para la integración en el paisaje la obra, en particular mediante la instalación de vallas de madera y el pintar todas las instalaciones visibles desde el exterior (central de lodos, zonas de acantonamiento, cintas transportadoras de túneles) de color verde oliva. La excavación se realizó con dos talleres equipados con cucharas bivalvas hidráulicas instrumentadas "KS" (Figura 6). Se utilizaron tres espesores de volquete: 1.2 m para el muro perimetral, 1 m para los elementos de separación transversales y 1.8 m para los cuatro paneles de unión.

La excavación, que se llevó a cabo a una profundidad de 55 m, requirió un control de la verticalidad relativamente para una obra perforada con una cuchara. En efecto, al ser necesarias las bandas de retención de agua entre paneles en toda la altura del muro, considerando la importante carga hidráulica, fue necesario bajar los encofrados de soporte de las juntas hasta la base de la excavación. Para hacer posible el desencofrado de estas juntas a gran profundidad, utilizando una cuchara, se tuvo especial cuidado en controlar las desviaciones (0.12% en promedio en la obra, lo que representa 7 cm sobre 55 m). En la parte circular de la obra, las juntas se colocaron con engranajes cónicos en cuñas de poliestireno, espaciados en la parte posterior del encofrado. Fueron guiados durante toda su instalación con la ayuda de un marco construido a medida, para garantizar su correcta colocación en toda su altura. Estas disposiciones particulares permitieron un buen desencofrado de todas las juntas, sin dañarlas.

Otro punto particular se refiere a la excavación de los paneles de unión entre lóbulos. Estos paneles híbridos están compuestos por un muro adintelado de 4.5 m de longitud y 1.8 m de grosor y por dos arranques de los muros de lóbulos de 1.2 m de grosor (Figura 7). Por lo tanto, su perforación requirió el uso de varios tamaños de herramientas. La armadura central del panel de unión, que concentra los esfuerzos, está significativamente más reforzada que las armaduras contiguas (alrededor de 190 kg/m³). Cortada en 3 elementos prefabricados en talleres y entregados por convoyes excepcionales, fue montada in situ y representa un peso total de 80 t. La manipulación de estas jaulas de 4.3 m por 1.65 m constituye, junto con la extracción de las juntas, los casos de cargas de dimensionamiento de la grúa de manipulación de 300 t movilizada en la obra. El hormigonado de estos paneles representa más de 1,100 m³. Se llevó a cabo por la noche, utilizando 4 tubos de inmersión, para un mejor control de los ritmos y para garantizar una rápida subida del hormigón. Otro impedimento era el limitado espacio disponible en la zona de vía, considerando la intensidad de los flujos de circulación. Dado que la entrada a la obra estaba situada en la RD7, la cual estaba sometida a una fuerte circulación, era necesario controlar la entrada y salida de camiones para evitar perturbaciones. Para ello, la obra se organizó en tres turnos, con suministro de armaduras y evacuación de escombros por la noche.

Tras las obras de los muros pantalla, se perforaron 46 desagües de descarga a 55 m, con el método Hi'Drill, en el perímetro de la estructura. Se cubrieron con gravilla para protegerlos de las tuberías y algunos se equiparon con tubos piezométricos. El sistema hidráulico se completa con 3 pozos (uno en cada lóbulo) de 350 mm de diámetro, equipados con bombas sumergidas. El agua ácida de las minas es entonces bombeada y tratada en una planta específica (separada del agua de lluvia y del agua de proceso) antes de ser vertida al Sena. Más tarde, se llevó a cabo el movimiento de tierras, limitando la disimetría entre los lóbulos. Los terrenos parcialmente contaminados fueron mallados y pre-caracterizados mediante muestreo de núcleos a fin de dirigir la evacuación de las tierras hacia los desahogos adecuados. Una parte de la ingeniería civil de la obra se llevó a cabo de bajada. Se trata de las vigas codales, que refuerzan los muros divisorios y algunos niveles de piso. Los trabajos también incluyen el recorte de una parte de los elementos de separación para permitir el montaje de la tuneladora y la construcción de la solera de hormigón "*en coupelles*" (en cuencos, copelas).

La obra también soporta el puente grúa que permitirá transportar las dovelas al fondo del pozo.

Los escombros excavados por la tuneladora a presión de tierra, por su parte, serán evacuados con la ayuda de un transportador vertical y, más

▲ Figura 6. Construcción de los muros pantalla.

tarde, con un transportador secundario que atraviesa el tranvía T2 para permitir la carga de las barcazas que serán amarradas al borde del río Sena.

Auscultaciones

El pozo del OA P13, primera obra del lote T3A, situado cerca de obras sensibles (tranvía T2 y RD7) fue objeto de una inspección importante. Se pusieron en marcha controles reforzados de la calidad y de la continuidad del hormigón, con un panel de cada seis inspeccionado por transparencia sónica. Aunque se espera poca flexión de los muros, el sensible contexto urbano requiere de un seguimiento preciso de las deformaciones, por lo que se equiparon seis jaulas con tubos inclinométricos. El seguimiento de las deformaciones se completa también con perfiles de convergencia instalados de manera adicional a los perfiles inclinométricos (Figura 8).

Se colocaron tres células de medición de la presión de poros a 50 cm por debajo de la ficha de los paneles n° P01, P08 y P10. Estas medidas se utilizarán durante la construcción para verificar la eficacia del dispositivo de abatimiento y garantizar la estabilidad del tapón de roca caliza sana.

Con la finalidad de estudiar el desconfinamiento del terreno durante la construcción de la zanja de los muros pantalla y el eventual reconfinamiento durante el hormigonado, se instaló un extensómetro con cuatro puntos de medición en un pozo de 35 m a unos 2.5 m de la superficie descubierta de la obra.

Este no reveló ningún movimiento significativo durante la perforación de los muros pantalla y se utilizará durante los movimientos de tierras para evaluar los asentamientos en profundidad.

El impacto de la excavación en la superficie también se mide con la ayuda de un teodolito automatizado con objetivos establecidos en el pavimento y más de 350 prismas instalados en las vías del tranvía. El pozo del OA P13, por cierto, también fue objeto de una auscultación especial, con la implementación, en el marco de un proyecto de investigación, de fibras ópticas en los paneles A17, C06, A19 y B04.

El objetivo de esta instrumentación es estudiar el comportamiento de la intersección entre la pared del pozo y el túnel con la tuneladora. La auscultación mediante fibras ópticas incrustadas en las estructuras permite medir los perfiles de deformación continuos en diferentes direcciones. Con la finalidad de evaluar la disminución de la rigidez cilíndrica y la transferencia de cargas alrededor del orificio, se instalaron fibras transversales para permitir la medición de la deformación ortorradial. En complemento a las mediciones del inclinómetro, se utilizaron fibras verticales para poder medir la flexión vertical.

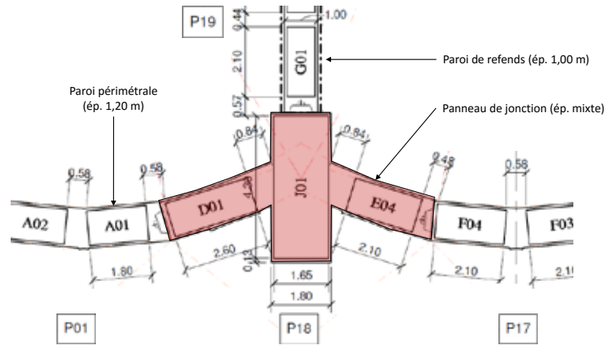
En el momento de redacción de este artículo, los movimientos de tierra del pozo OA P13 comienzan y las mediciones de los distintos dispositivos de auscultación aún no han podido compararse con los modelos.

Conclusión

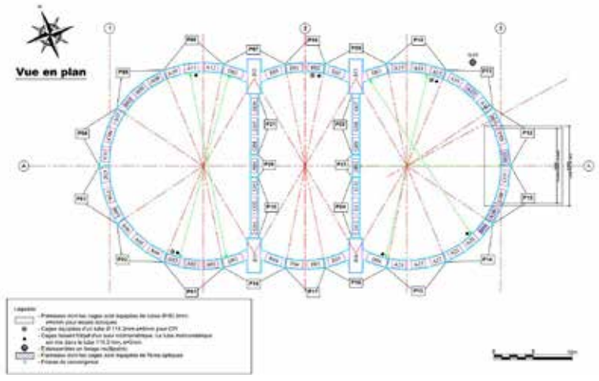
Tras unos seis meses de intenso trabajo, en particular la colocación nocturna de los paneles, las grúas de los muros pantalla han dado paso a las máquinas de movimiento de tierras. Serán necesarios varios meses más de excavación e ingeniería civil antes de que el pozo pueda estar disponible para la tuneladora. Por su geometría, dimensiones y contexto, el pozo OA P13 de la isla de Monsieur es una obra única. Esta característica es común a todas las obras del tramo T3A que, aunque es relativamente corto, presenta importantes desafíos técnicos. La estrecha colaboración entre el grupo de empresas, la dirección de la obra, el asistente del propietario del proyecto y la Sociedad del Gran París, que ya ha demostrado su eficacia en esta primera obra, continúa para todo el tramo T3A.

Agradecimiento: Agradecemos a la revista Travaux y a los autores, las facilidades para la republicación de este artículo.

Créditos de imágenes: Soletanche Bachy Francia.



▲ Figura 7. Vista detallada de los paneles de unión.



▲ Figura 8. Plan de auscultaciones.

La obra en cifras

Muro pantalla (Ancho 1 M, 1.2 M Y 1.8 M)
11,400 m³

Movimiento de tierras
38,100 m³

Hormigón de ingeniería civil y relleno
10,000 m³

Participantes principales

DUEÑO DE LA OBRA: **Sociedad del Gran París**
ASISTENTE DEL DUEÑO DE LA OBRA: **Artemis**
RESPONSABLE DEL PROYECTO: **TSA Ingérop/Geos – Setec tpl (representante del T3)**
COORDINACIÓN SPS: **Grupos presentes - Veritas**
OCTA: **Grupo Veritas – Apave**
GRUPO DE EMPRESAS: **Horizon (Bouygues TP, Soletanche)**