

Condicionantes y singularidades en el diseño de la línea 5 del metro de Riad



Pedro Ramírez Rodríguez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director del Departamento de Geotecnia de Tyspa



Alberto Gómez-Elvira López
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe de Sección del Departamento de Geotecnia de Tyspa



Xavier Torelló Ciriano
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director del Departamento de Estructuras Barcelona de Tyspa

Resumen

El proyecto de las seis líneas que forman el metro de Riad incluye un ambicioso conjunto de obras subterráneas tanto por su magnitud como por los ajustados plazos comprometidos para su puesta en marcha. La línea 5 discurre enterrada bajo el corazón de la ciudad a lo largo de la calle King Abdulaziz y comprende trece kilómetros de túnel, once estaciones subterráneas y numerosos pozos y galerías auxiliares.

El diseño de las obras subterráneas ha estado marcado por las condiciones geotécnicas impuestas por un macizo calizo altamente fracturado, con desarrollo cárstico y con presencia de paleocauces, un medio agresivo para los hormigones, la compleja hidrogeología derivada del acuífero superficial alimentado por las pérdidas de conducciones y el riego, y por un entorno urbano especialmente sensible en el que el espacio disponible para las excavaciones a cielo abierto es mínimo.

Por un lado, el diseño ha aportado soluciones singulares que permiten hacer frente a la subpresión en estaciones profundas mediante la interacción de las estructuras con el macizo rocoso y, por otro, se ha centrado en la aplicación de procedimientos constructivos que compatibilizan la gestión del riesgo en túneles y excavaciones profundas con el cumplimiento de los estrictos plazos de construcción.

Palabras clave

Túnel de metro, tuneladora, interacción suelo-estructura, subpresión, hidrogeología, carst, agresividad, durabilidad

Abstract

World class Riyadh Metro Project comprises a major group of underground infrastructures with significant magnitude and linked to the tight schedule committed for the metro operation start. Underground Line 5 runs downtown below King Abdulaziz Road and includes thirteen kilometres of tunnel, eleven deep underground stations and several shafts and ancillary galleries.

The tunnel design has been determined by the geotechnical conditions associated to the fractured and karstified limestone rock and the existing paleostreams; the aggressivity of the environment to concrete; a complex hydrogeological scheme due to the shallow man made aquifer; and to the surrounding sensitive urban environment where space availability for open cut excavations is minimum.

On one hand the design has provided singular solutions to overcome the issue of unbalanced uplift pressures in deep underground stations, based on rock mass – structure interaction, and on the other hand engineering has focused on construction methodologies that make compatible the risk management on tunnelling and temporary works with the strict construction milestones.

Keywords

Metro tunnel, tunnel boring machine, soil-structure interaction, uplift pressure, hydrogeology, karst, aggressivity, durability

1. Introducción

La capital del reino de Arabia Saudí ha experimentado desde mediados del siglo XX un crecimiento poblacional significativo que ha favorecido el desarrollo de una gran urbe, alcanzando en la actualidad los 1.800 km² de ocupación en superficie. La planificación urbanística a la que ha ido ligado a este proceso ha tenido como eje principal el uso

del vehículo privado como medio de transporte básico. La consecuencia directa es que los niveles de congestión y el consumo de combustible se han disparado de manera alarmante a lo largo de los últimos quince años. Para mejorar esta situación y reducir la dependencia del vehículo privado, la autoridad encargada del desarrollo de Riad, ADA (Arriyadh Development Authority), está promoviendo



Fotografía 1. Túnel principal de línea 5 excavado con TBM

la creación de una red de transporte público que, además, impulse el desarrollo económico y social de la ciudad. La red prevista incluye como inversión clave un sistema de 6 líneas de metro para conectar los principales polos de actividad. El metro de Riad, con 180 kilómetros de desarrollo, 42 de los cuales son túneles, 85 estaciones, 7 cocheras y una inversión total que asciende a los 26.000 millones de dólares, es uno de los mayores proyectos de obra civil promovidos en los últimos años en todo el mundo. El plazo previsto para el diseño y la construcción de la red de metro es tan solo de 5 años y supone un compromiso primordial para el gobierno saudí. Este condicionante, unido a la magnitud del proyecto, convierte a la obra en todo un reto ingenieril, tratándose además de las primeras líneas de metro que se construyen en el país.

Son numerosos los aspectos de interés que han sido estudiados durante la etapa de diseño. El presente artículo pretende recoger solamente las cuestiones técnicas más singulares asociadas a la ingeniería de detalle de las obras subterráneas, centrándose en la experiencia particular adquirida en la línea 5 como elemento más representativo del diseño llevado a cabo por Tyspa.

Esta línea comprende 13 kilómetros de túnel que recorren uno de los ejes prioritarios de comunicación en el centro de Riad, la calle King Abdulaziz donde se concentran gran parte de los edificios oficiales e instituciones saudíes. El principal reto del diseño de los túneles y las estaciones enterradas ha sido aportar soluciones técnicas óptimas orientadas al cumplimiento del programa de construcción y de los estrictos requerimientos y estándares de calidad exigidos por el cliente, y a la vez, gestionar los riesgos intrínsecos de las obras subterráneas y las excavaciones desarrolladas en un entorno urbano, geológico e hidrogeológico singular.

2. El diseño de la línea 5 del metro de Riad

2.1. Descripción de la línea

La línea 5 o también llamada línea verde pertenece al Paquete 3 del metro de Riad, que incluye diseño, construcción y puesta en servicio de las líneas 4, 5 y 6 adjudicadas al consorcio multinacional FAST. La línea 5 tiene un desarrollo norte-sur de 13.017 m de túnel en total. Incluye 12 estaciones subterráneas y unas cochertas también enterradas situadas en el extremo norte. Conectará con la línea 1 del metro en la estación 5A1 cerca del centro histórico en King Faisal Road

y con la línea 2 en King Abdullah Road en el extremo norte. Comprende un túnel único de vía doble con un diámetro interior de 8,70 m, excavado en su mayor parte mediante tuneladora. El túnel se divide en tres tramos principales en función de los procedimientos constructivos empleados y de la estrategia prevista para su ejecución:

- El túnel central supone 7.286 m de línea ejecutados con una TBM que recorre el tramo de norte a sur. Esta sección incluye el cruce con 7 estaciones profundas bajo la calle King Abdulaziz: 5B2, 5B1, 5A3, 5A5, 5A2, 5A6 y 5A1, 6 pozos auxiliares de emergencia / bombeo y un fondo de saco en el extremo sur desde el cruce con la línea 1. El pozo de montaje de la tuneladora está situado en la estación 5B3 (*Central Launching Shaft - CLS*) y el desmontaje y extracción de la máquina se realiza en un pozo localizado en el extremo final del fondo de saco para estacionamiento de trenes (*South Access Shaft - SAS*).

- El túnel norte se perfora con otra TBM similar a la del Túnel Central, también de norte a sur, y posee un desarrollo de 4.881 m; comienza a perforar en un pozo específico para el montaje de la TBM (*North Launching Shaft - NLS*) y cruza 3 estaciones profundas intermedias, 5C2, 5C1 y 5B4, y los terrenos de la base aérea militar hasta enlazar con King Abdulaziz y finalizar en la estación 5B3, donde se extrae esta tuneladora. Existen 4 pozos de emergencia y bombeo, y dos de ventilación en todo el tramo.

- La conexión del túnel norte con las cocheras de la línea se produce mediante un falso túnel o *cut and cover* (C&C) de 850 m de longitud en el que se integran la estación 5C4, con conexión con línea 2 y otro pozo de ventilación. Las cocheras en el extremo norte de la línea ocupan un recinto enterrado de aproximadamente 140 m de ancho por 400 m de largo.

El diseño de la infraestructura se ha dividido en varios paquetes independientes: el túnel de línea TBM junto con los pozos auxiliares y galerías de conexión, el túnel de línea en C&C, las estaciones profundas y sus accesos, y las cocheras. La ingeniería de detalle de estas unidades ha tenido un tratamiento diferente en función de los condicionantes técnicos y constructivos, especialmente en el caso de los elementos críticos en el programa del proyecto.

En el caso de los túneles de línea ejecutados con tuneladora, el diseño ha estado marcado por el ajustado programa para la gestión y el progreso de las tuneladoras y la prefabricación

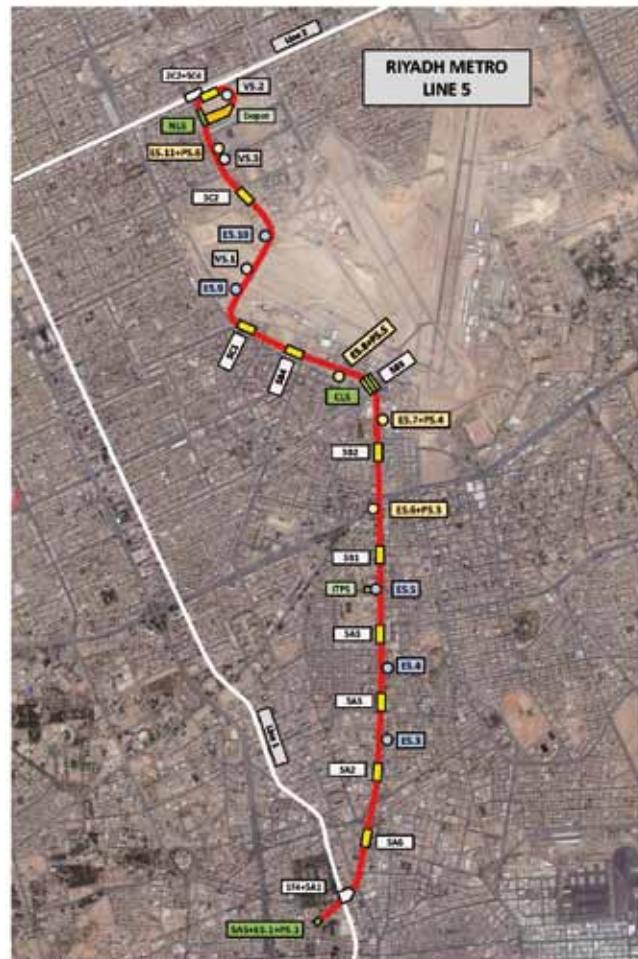


Fig. 1. Planta de la línea 5 del metro de Riad y sus principales elementos

de las dovelas. En los primeros estadios de la ingeniería de detalle, la definición y diseño de la sección tipo del túnel, el revestimiento de dovelas con su estudio particular de durabilidad y la excavación, y el sostenimiento de los pozos de ataque han requerido un plan de trabajos acelerado complementado con un intenso trabajo de campo y por el conocimiento y experiencia en la geología local. Por otro lado, el proyecto de la excavación del túnel y las galerías se ha centrado en limitar los riesgos derivados de la carstificación y el control preciso de movimientos potenciales en el entorno.

En lo que se refiere a la obra civil de las estaciones profundas, los puntos clave del diseño han sido la adecuación del sistema constructivo al espacio disponible y al ajustado plazo para los trabajos temporales, y la solución estructural

para contrarrestar el efecto de la subpresión. El procedimiento previsto permite cumplir ambos objetivos aprovechando las condiciones del macizo rocoso y su interacción con la estructura. Como se explicará más adelante, las condiciones hidrogeológicas del entorno son complejas pues dependen directamente de las pérdidas en conducciones de agua y la fracturación y permeabilidad secundaria de la roca.

Por último, en el proyecto del gran recinto enterrado de las cocheras, ha sido necesario resolver el problema que plantean las presiones localizadas del agua freática mediante una solución estructural eficiente. Las condiciones geológicas locales se han aprovechado para proyectar un sistema de reducción de presión hidrostática mediante una losa drenada y una pantalla de cierre parcial perimetral.

2.2. Bases de diseño y normativa

Los estándares de calidad requeridos por el cliente en la infraestructura son muy exigentes. Las especificaciones del proyecto en lo relativo a las obras subterráneas y a los túneles imponen el uso de los Eurocódigos como normativa principal de referencia, por lo que tanto la caracterización de materiales como el diseño geotécnico se realizan mediante el Eurocódigo 7 EN 1997 (anejo nacional británico). En cambio,

para las estructuras permanentes en estaciones la normativa de referencia es la norteamericana (ACI - AASTHO) complementada por el código saudí de la edificación (Saudi Building Code), mientras que los elementos temporales de contención se diseñan según el Eurocódigo 7.

Los elementos permanentes de la obra civil se han proyectado para alcanzar una vida útil de, al menos, 100 años según las prescripciones de proyecto, lo que determina, entre otras cosas, la durabilidad de los hormigones y de los sistemas de protección e impermeabilización de elementos enterrados. A su vez, el pliego establece que se debe realizar un estudio hidrogeológico para analizar la evolución del nivel freático a 100 años y con ello determinar el nivel de agua de diseño.

3. Entorno geológico e hidrogeológico

3.1. Geología de Riad en el entorno de la línea 5

Riad se sitúa en el centro de la meseta de Najd, en el interior de la península arábiga, a una altitud de 600 m sobre el nivel del mar y con un ligero descenso hacia el este. Esta plataforma está formada por rocas sedimentarias de edad mesozoica a cenozoica depositadas en los flancos del escudo arábigo o el complejo basal. Las rocas del Mesozoico que

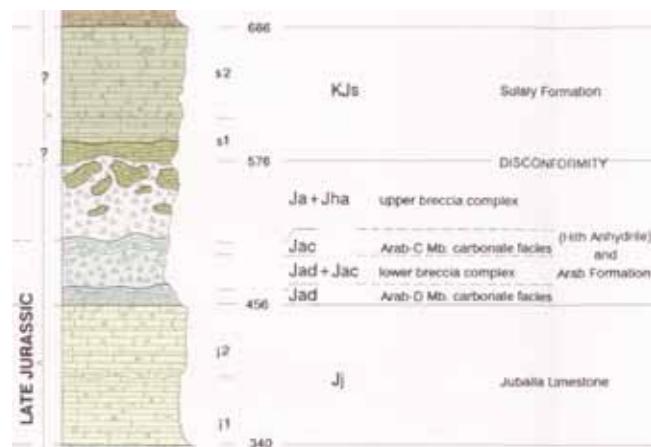


Fig. 2. Mapa geológico de Riad 1:250000 con superposición de las líneas de metro (Servicio Geológico Saudí)

se localizan en la ciudad son calizas marinas intercaladas con lutitas y areniscas, mientras que las rocas cenozoicas tienen origen continental. El buzamiento regional en Riad es del orden del 1° a 3° hacia el este.

En esta zona existe una red hidrográfica de valles aluviales encajados (en árabe, *wadis*) donde se establecieron los primeros asentamientos en la región fértil de al-Yamamah: los aluviales del Wadi Al-Batha, tributario del Wadi Hanifa. Con el tiempo, la expansión urbana ha cubierto parcialmente otras cuencas de drenaje como Wadi Hanifah y el Wadi Sulaiy.

Las unidades geológicas locales se dividen en tres grupos dependiendo de su edad. Las unidades jurásicas (formaciones Jubaila y Arab), que son los materiales de mayor edad, están formados por depósitos carbonatados con presencia errática de brechas que pueden intercalarse con evaporitas en profundidad. Parte de estas evaporitas se disolvieron, produciendo el colapso de los materiales suprayacentes y dando como resultado una intensa brechificación. Los depósitos jurásicos constituyen el sustrato de la zona oeste de la ciudad. Sobre estos materiales se localizan, de manera discordante, los depósitos cretácicos compuestos por calizas y brechas que conforman el sustrato del sector oriental.

Los suelos cuaternarios están mayoritariamente asociados a los sistemas aluviales de los wadis existentes, depósitos de terrazas como el Wadi Hanifah o bien paleocauces rellenos. Suelen ser suelos granulares medianamente densos a muy densos formados por gravas, arenas y arenas con grava. El aluvial asociado al Wadi Sulaiy, situado al este, rellena una depresión formada por el colapso de la formación Arab tras la disolución de la anhidrita Hinth y, por tanto, su espesor supera los 20 m.

Algunos paleocauces se han desarrollado sobre zonas calcáreas relativamente planas, lo que ha favorecido la formación de cavidades cársticas en el sustrato subyacente. Este es el caso de la zona sur de la línea 5 donde se dan las condiciones geotécnicas más complejas de la obra y se alcanzan los 13 m de espesor aluvial. En el resto del tramo los depósitos superficiales poseen pocos metros de potencia (2 a 3 m, en general, con zonas de hasta 5 m).

3.2. Caracterización geológico geotécnica de las rocas

Las obras de la línea 5 afectan principalmente a las formaciones Arab y Sulaiy. La formación cretácica Sulaiy aflora sobre la formación Arab y está compuesta por caliza compacta

(KJs1) con paquetes de calcarenita y caliza dislocada (KJs2). Los estratos inferiores en contacto con la formación Arab han sufrido procesos de hundimiento, mientras que los superiores no afectados han dado lugar a calizas moderadamente duras. Por lo tanto, los paquetes inferiores son más tendentes a presentar cavidades cársticas y también zonas brechificadas de características similares a la formación Arab.

La formación jurásica Arab ha sufrido procesos de fracturación y hundimiento por la disolución de las capas profundas de evaporitas, que en la ciudad de Riad han sido completamente eliminadas por efecto del agua freática. Como resultado, la textura y la estructura de la caliza refleja la influencia de esta deformación y hace que sean rocas muy susceptibles al desarrollo de cavidades. Se distinguen las siguientes subformaciones en función de la presencia de brechas o evaporitas:

- El complejo de brecha superior (Ja+Jha) en el que se mezclan facies carbonatadas con bloques colapsados de la formación Sulaiy. Se muestra en forma de caliza micrítica crema a gris claro y brechas heterométricas con cementación carbónica. Se dan numerosas cavidades métricas con desarrollo paralelo a la estratificación.
- El complejo brecha inferior (Jac+Jad) está formado por fragmentos centimétricos a decimétricos de los miembros de la formación Arab en matriz cálcica. Puede ser calcarenita beige a gris laminada y dolomía recristalizada (Jac) o bien caliza laminada gris, beige o azulada y argilita yesífera (Jad).

La alteración afecta las superficies expuestas en todas las formaciones y también al macizo rocoso profundo en las zonas carstificadas. En las rocas detectadas de la traza la alteración está gobernada por las fracturas y la estratificación que dan lugar a alteración dentro de la masa de roca a cualquier profundidad. Las brechas alteradas aparecen como gravas medianamente densas a densas en matriz limosa.

En resumen, las rocas en el entorno de las obras son básicamente calizas, brechas y calcarenitas muy fracturadas y con alteración variable. Independientemente de la formación a la que pertenezcan (Arab o Sulaiy) para la caracterización se han agrupado según el grado de alteración y el RMR, puesto que se ha comprobado que la roca matriz presenta un comportamiento bastante similar en todos los casos tanto por sus propiedades tenso-deformacionales como por su naturaleza y composición mineralógica.

	Litología	Clasificación	Grado de Alteración (EN ISO 14689-1:2003)
HWR	Roca altamente meteorizada (<i>highly weathered rock</i>)	RQD < 50 $25 \leq \text{RMR} < 40$	3 - 4
MWR	Roca moderadamente meteorizada (<i>moderately weathered rock</i>)	$50 \leq \text{RQD} < 75$ $40 \leq \text{RMR} < 55$	2
SR	Roca sana (<i>sound rock</i>)	$\text{RQD} \geq 75$ $\text{RMR} \geq 55$	0 - 1

La resistencia a compresión simple de la roca matriz medida sobre muestras no fracturadas o alteradas está en el rango de 10 a 50 MPa con un promedio de 22 MPa y valores máximos cerca de los 80 MPa. Se trata de rocas blandas con un módulo de deformación medio de 2,8 GPa en el caso de mayor grado de fracturación (estimado mediante ensayos dilatómétricos). Las rocas no resultan abrasivas dado que el índice Cerchar medio es de 1, con máximos puntuales de 2,4 y el coeficiente Schimazek es 0,05 con picos de 0,24.

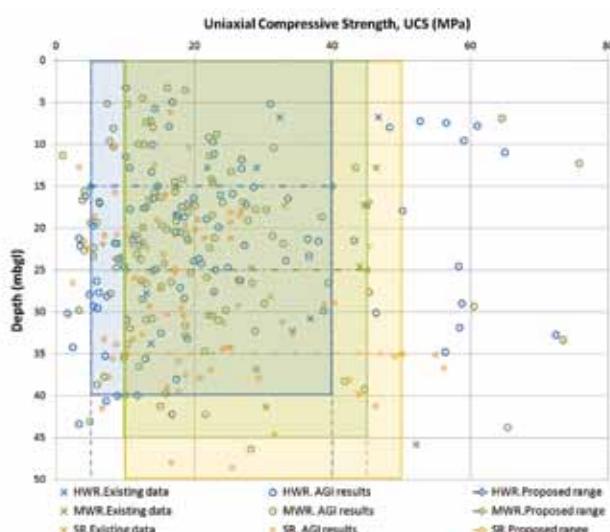


Fig. 3. Resultados de resistencia a compresión simple.
Formaciones Arab y Sulaiy

Además son fácilmente excavables presentando un DRI medio de 70.

Las excavaciones observadas en campo resultan estables aún con taludes subverticales, si bien presentan signos locales de caída de bloques y alteración en las zonas afectadas por carstificación. Su estructura está marcada por la estratificación predominantemente subhorizontal, aunque dependiendo de la formación se han observado zonas claramente tableadas, algunas plegadas y otras altamente fracturadas sin un patrón definido de juntas. Las fracturas suelen presentar un espaciado centímetrlico, estando en general por debajo del medio metro.

Los tipos de formaciones cársticas detectadas en el área de proyecto van desde poros y oquedades centímetricas, a cavidades decímetricas a métricas, de hasta 6 metros de máximo desarrollo horizontal (según estratificación), en general parcialmente llenas de suelos arcillosos con clastos y agua.

3.3. Condiciones hidrogeológicas

La presencia del nivel freático, su continuidad y evolución en el tiempo son condicionantes fundamentales para el diseño de las excavaciones y estructuras enterradas. La hipótesis de partida según las especificaciones del contrato es considerar el nivel de agua en superficie si no se dispone de un estudio hidrogeológico que defina los niveles de diseño previstos a 100 años. Dado el impacto económico de esta cláusula, se realizó un estudio conjunto para las tres líneas del Paquete 3 para estimar la evolución, basado en los datos disponibles.

En las rocas sedimentarias sobre las que se sitúa la ciudad se desarrollan diferentes acuíferos. El principal es el denominado acuífero Arriyadh, formado por las calizas altamente fracturadas y brechificadas, con una conductividad hidráulica elevada, de la formación Arab (Jc) que buza hacia el este según la secuencia mesozoica. El extremo sur de la línea 5 se extiende sobre este acuífero.

Por encima del acuífero Arriyadh existe un conjunto de baja conductividad hidráulica asociado a las formaciones Arab Superior (JA) y Sulaiy (KS), que son las unidades mayoritariamente afectadas por las obras subterráneas de la línea 5. Allí donde las unidades subyacentes sufrieron procesos de colapso más intensos estas unidades pueden ser más permeables.

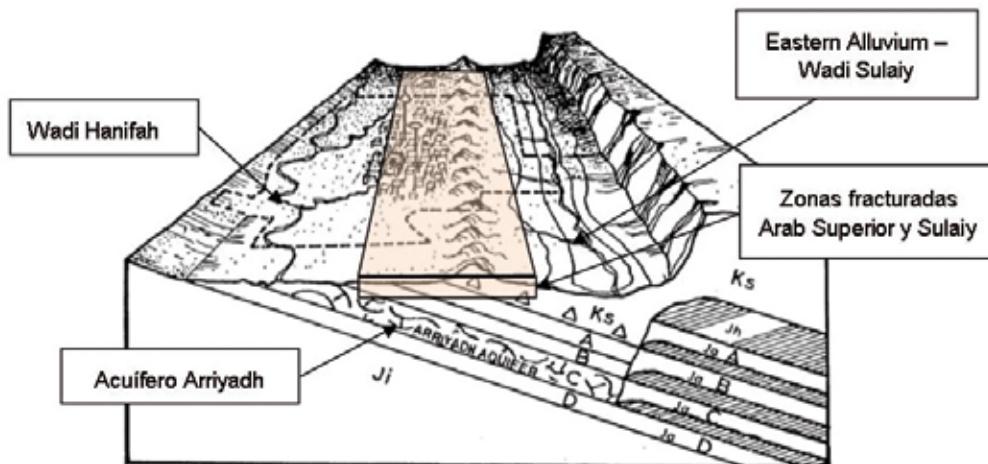


Fig. 4. Esquema de los acuífero de Arriyadh y zonas fracturadas Arab Superior y Sulaiy (Fuente: ADA Rising Groundwater Management Program. 1990)

Finalmente, por encima de estas formaciones calcáreas se encuentra el acuífero superficial aluvial cuaternario, que comprende depósitos recientes asociados a los cauces hidrológicos de los wadis Hanifah y Sulaiy. El Wadi Hanifah se sitúa al extremo oeste de Riad, mientras que a la unidad que forma el Wadi Sulaiy se le denomina el Eastern Alluvium, donde se ubican parte de la líneas 4 y 6 del metro.

El incremento en la población y superficie urbanizada en Riad en los últimos años, acompañado de la expansión comercial y económica, ha llevado a un aumento desmesurado del consumo de recursos hídricos que, en su gran mayoría, son aportados a la ciudad desde desaladoras situadas en la costa. Una parte significativa de estos recursos se infiltran en el terreno por pérdidas en las redes de abastecimiento, riego y saneamiento. La capacidad del medio para eliminar el exceso de agua derivada hacia terreno por infiltración

profunda, drenaje o evaporación es muy limitada, lo que favorece la formación de flujos subterráneos que, en ciertos casos, dan como resultado elevaciones del nivel freático superficial apreciables.

ADA ha realizado varios estudios centrados en solucionar esta ascensión que ha llegado a provocar problemas de contaminación, acumulación localizada e incluso de filtraciones en sótanos y surgencias de agua freática en plena calle (*Enhancing the Management of Rising Groundwater in Arriyadh*, 2013). El balance hídrico resultante del estudio muestra un desequilibrio de 110.000 m³/día de agua que quedan almacenados en el subsuelo de la ciudad con la consiguiente elevación del nivel de agua según las zonas. El agua en el terreno, o de infiltración, proviene en su mayor parte de actividades humanas, pérdidas en los servicios enterrados y riego. Para poner en contexto la cifra hay que

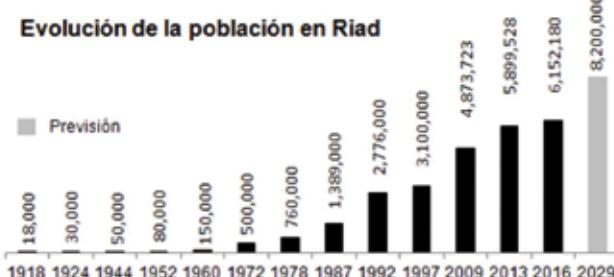


Fig. 5. Evolución de la población en Riad (ADA. Investment Climate in Arriyadh. 2015 y wikipedia.org)



Fig. 6. Aportación de agua al terreno en el balance hidrogeológico de Riad (Fuente: ADA Rising Groundwater Management Program. 1990)



Campus de Formación de Iberdrola
Project & Construction Management.
San Agustín de Guadalix, Madrid



Aeropuerto de Lahore, Pakistán
Proyecto de ampliación
del Edificio Terminal



Metro de Estocolmo
Planificación y diseño de
11 km de línea, con túnel en roca,
bajo el mar de Saltsjön



detrás de grandes obras
siempre hay una gran ingeniería

- Conocimiento, experiencia, capacidad técnica e independencia empresarial.
- 2.500 profesionales de la consultoría al servicio de la inversión en infraestructuras y equipamientos, tanto en España como en el mercado internacional.
- Desarrollo propio de tecnologías aplicadas y nuevos sistemas avanzados. Más de 30 proyectos de I+D+i en marcha.
- Exportación de ingeniería española a todos los continentes, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

pensar que el agua de abastecimiento total que llega a la ciudad proveniente de plantas desalinizadoras, de explotaciones subterráneas y de depósitos supone 1.745.000 m³/día, mientras que la lluvia supone una entrada uniformizada al sistema equivalente a 63.500 m³/día.

Como resultado de los estudios, ADA puso en marcha un programa de rebajamiento del freático superficial que incluye acciones de drenaje y canalización del agua en el terreno en los puntos más conflictivos. En todo caso, la previsión para el año 2021 es que el nivel de agua tienda a bajar en determinadas zonas por la mejora y reparación de las redes, pero en otras zonas continúe subiendo especialmente en áreas con grandes crecimientos esperados en las tasas de riego.

Los estudios previos han aportado datos importantes para el desarrollo de los modelos hidrogeológicos: el mapa de isopiezas general y el balance hídrico actual de la ciudad, además de los datos de transmisividad y almacenamiento del terreno a partir de ensayos de bombeo. La campaña geotécnica específica del proyecto ha permitido ajustar los niveles de agua actuales con mayor precisión y ha aportado datos de permeabilidad obtenida mediante ensayos locales *in situ*.

En una primera fase se realizaron modelos numéricos 3D simplificados e independientes para los principales tramos soterrados de cada línea. Se empleó el software Visual Modflow Flex 2012 para simular de manera simplificada el flujo subterráneo asociado al nivel más superficial del acuífero calcáreo o del acuífero aluvial, dependiendo del caso, así como su evolución suponiendo continuidad en el desequilibrio del balance hídrico a lo largo del tiempo. También se aplicaron incrementos en las tasas de recarga para simular hipótesis más desfavorables. Con estos modelos se obtuvo un primer ajuste de la piezometría a largo plazo para varias hipótesis de recarga.

El resultado de los modelos muestra una clara tendencia al ascenso del nivel freático si se mantiene el desequilibrio en el balance hídrico a largo plazo, con ascensos relativos de hasta 6 m en algunos casos. Sin embargo, para tener en cuenta el efecto de los sistemas de control del freático incorporados por ADA, las condiciones de contorno regionales y la geología de detalle, se realizó una segunda fase del estudio que consistió en un modelo complejo multicapa e integrado de las tres líneas del Paquete 3 estudiadas por Tyspa, desarrollado con el programa FeFlow.

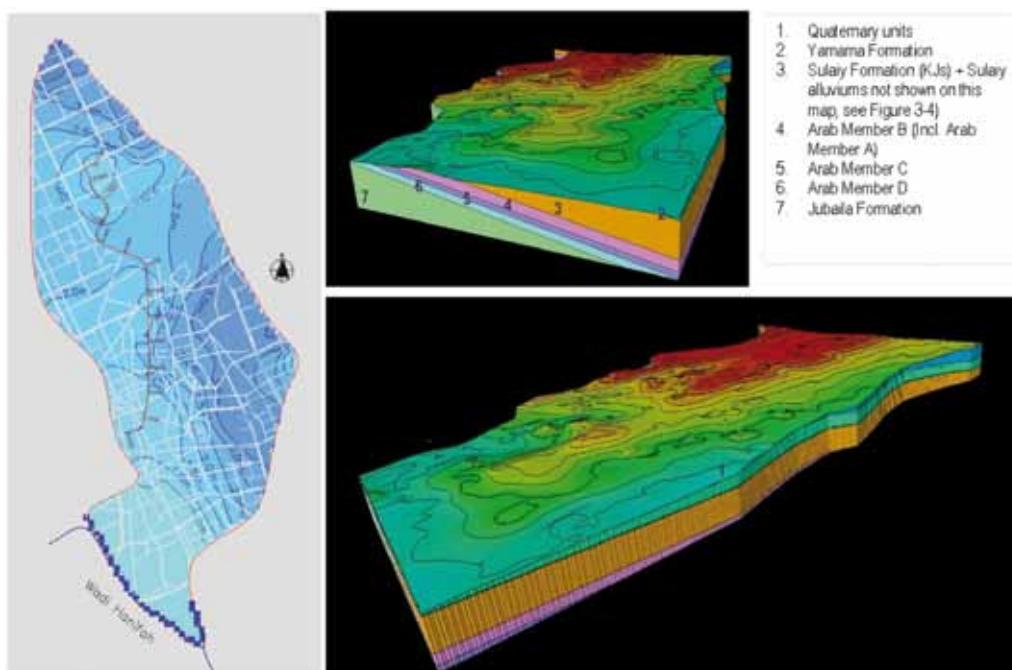


Fig. 7. Modelo hidrogeológico de Línea 5. Izquierda: distribución de ascensos relativos del nivel freático en una de las hipótesis de cálculo a 100 años. Derecha superior e inferior: vistas del modelo hidrogeológico integrado de las tres líneas

El resultado del modelo integrado es también un ascenso generalizado del nivel de agua, pero menor que el obtenido de los modelos simplificados. Con los incrementos alcanzados en este segundo modelo se han establecido los niveles de agua de diseño de cada elemento de la obra (máximo nivel de diseño a largo plazo), que es posiblemente uno de los datos de partida de más relevancia del proyecto por su implicación en el diseño de las estructuras enterradas. En la línea 5 el ascenso previsto según los modelos a 100 años varía entre 0,5 m y 2,5 m sobre el nivel actual, dejando el nivel de agua cercano a superficie en algunos tramos.

3.4. Agresividad del medio y durabilidad de los hormigones
 La corrosión en estructuras de hormigón armado es un problema ampliamente extendido en el Medio Oriente puesto que las condiciones ambientales resultan extremadamente desfavorables: temperaturas máximas por encima de 40 °C con variación diaria de hasta 20 °C, humedad relativa con cambios bruscos estacionales y diarios, efectos de evaporación/condensación, sales y arenas depositadas por el viento y alta polución. Además, resulta determinante la presencia del freático superficial y la contaminación de estas aguas con sales y sulfatos provenientes de los residuos de aguas negras y del riego. Los resultados de los ensayos realizados sobre muestras de terreno y del agua freática muestran porcentajes apreciables de ambos componentes y un pH alcalino.

En las calizas carstificadas, la tasa de yeso en disolución o en inclusiones sólidas supone 2.100 mg/l en contacto con aguas no salinas, lo que genera también una fuente adicional de sulfatos (ver tabla inferior).

En el caso de los elementos enterrados de la obra el riesgo principal proviene del ataque por sulfatos y la exposición a cloruros por el agua y el terreno. Si el hormigón está completamente sumergido y sin aireación, la falta de oxígeno

limita el alcance de la corrosión, pero dado que el agua proviene de pérdidas de conducciones, es previsible que a lo largo del tiempo se produzcan variaciones del nivel. Las medidas empleadas en las obras subterráneas del proyecto para contrarrestar la agresividad son principalmente:

- Uso de hormigones de alta calidad con un control especial de hormigonado, dosificación y curado. El recubrimiento para estructuras enterradas aún con uso obligado de membranas de impermeabilización se ha fijado en 75 mm.
- Limitación en la apertura de fisura a 0,2 mm en estructuras enterradas y correcta disposición de juntas estructurales y de hormigonado.
- Empleo de medios de protección como membranas de impermeabilización con alta durabilidad, barreras de vapor, empleo de inhibidores de corrosión y protección catódica.
- Medidas de control de las corrientes parásitas.

En el caso de las dovelas del túnel la estrategia se ha centrado en la dosificación del hormigón, en el uso de inhibidores de corrosión y en los detalles estructurales para evitar la degradación del hormigón. Las especificaciones de mezcla del hormigón para las dovelas han sido las siguientes:

- Resistencia: C50/60
- Agua/cemento: 0,35
- Mínimo contenido de cemento: 430 kg/m³
- Tamaño máximo del árido: 12 mm
- Recubrimiento: 45 mm

Sulfatos Muestra agua/suelo o agua freática		Cloruros agua freática		Cloruros suelo / roca	
(SO ₄ mg/l)	Result. (%)	(Cl mg/l)	Result. (%)	(Cl mg/l)	Result. (%)
< 1400	94,20	< 500	18,92	< 500	85,33
1401 - 3000	5,43	500 - 2000	74,32	500 - 1000	8,83
3001 - 6000	0,25	2001 - 10000	6,76	1001 - 5000	5,84
> 6000	0,12				

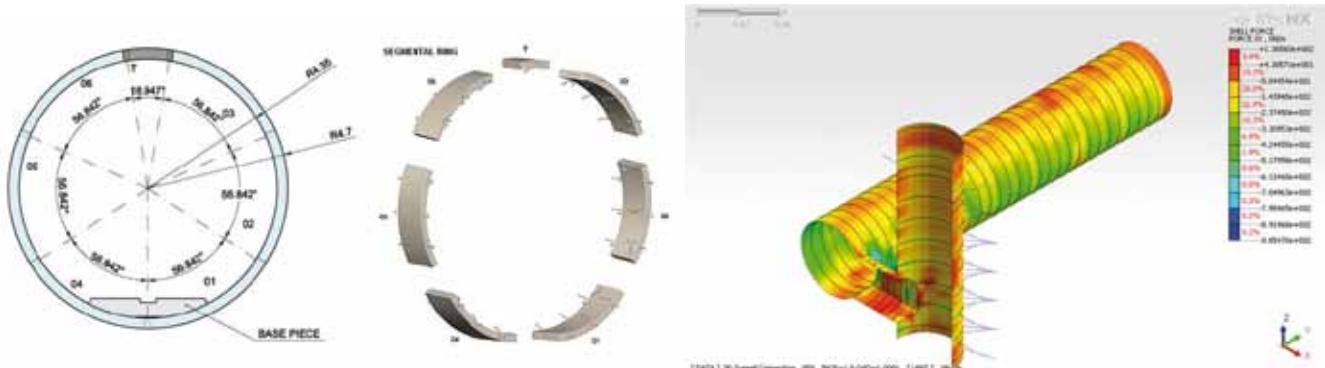


Fig. 8. Izda.: Sección túnel TBM y esquema de anillo de dovelas. Dcha.: modelo numérico 3D entronque galería - pozo - túnel (Midas GTS)

4. Proyecto del túnel de línea

La estrategia de tunelación de la línea 5 contempla el uso de dos tuneladoras que dividen el trazado en secciones norte (4.881 m) y central (7.286 m), divididas a su vez en varias sub-secciones de perforación por las diez estaciones subterráneas atravesadas y por los dos pozos de montaje. Las TBM seleccionadas son escudos simples para excavación de roca blanda y capacidad de presurización por presión de tierras (EPB). La sección transversal tiene las siguientes características:

- Diámetro excavación / interior: 9,77 m / 8,70 m
- Anillo universal (6 dovelas más la dovela clave)
- Espesor de la dovela: 0,35 m
- Longitud de la dovela: 1,60 m

El túnel discurre por el eje de la calle y en varios puntos pasa bajo edificios y estructuras singulares con un promedio de montera sobre clave de 1,8 veces el diámetro (15 m de cobertura mínima y 25 m máxima). La totalidad de la perforación se realiza en roca fracturada con presencia errática de cavidades cársticas de orden métrico y de áreas microcarstificadas con conductos conectados y alta permeabilidad local. Las condiciones de estabilidad del frente y del entorno del túnel son en general favorables, con inestabilidades puntuales asociadas al material de relleno de las cavidades. La zona sur del trazado es la más complicada desde el punto de vista geotécnico puesto que la carstificación es intensa por la presencia de un extenso paleocauce sobre la roca con nivel de agua elevado, quedando el recubrimiento en roca reducido sin llegar a darse frentes mixtos suelo/roca. Además el

túnel pasa muy cerca de varias cimentaciones de estructuras importantes como el viaducto Al Tijara.

El agua en el terreno se localiza en la capa más superficial y más fracturada de la roca y en el contacto con los suelos cuando están presentes. En la línea 5 el nivel freático actual se detecta entre 5 y 11 m por debajo del nivel del suelo en la zona sur, y en el resto de la línea se encuentra próximo a la superficie.

En el estudio de subsidencias y en los análisis de estabilidad del frente se ha tenido en cuenta el efecto potencial de las carstificaciones mediante una reducción de los parámetros resistentes medios de la roca en el frente y un aumento de la pérdida de sección considerada. Se ha zonificado el trazado en función del riesgo potencial de cavidades y del tamaño esperable, lo que unido al resto de condiciones geotécnicas previstas ha dado lugar al conjunto de recomendaciones de operación de la TBM:

- Modo de operación y presión recomendados: modo abierto en la mayor parte del trazado; modo en presión de aire para las zonas de mayor riesgo de desarrollo cárstico o cruce bajo edificios sin condiciones especialmente desfavorables; modo de presión de tierras (EPB) en los cruces más comprometidos de edificios o viaductos con condiciones desfavorables de baja montera de roca y desarrollo cárstico.

- Medidas recomendadas de control: relleno del trasdós de la dovela sistemático con mortero bicomponente y reinyección en zonas con cavidades, control de pesaje del material excavado, control de parámetros de perforación y guiado, entre otras.

5. Excavaciones profundas con grandes paramentos verticales

Las estaciones profundas son recintos de unos 140 m de largo, 26 m de ancho y 30 m de profundidad encajados en el espacio disponible en la calle. Poseen tres niveles principales: plataforma, vestíbulo y entreplanta, donde nacen los accesos fuera de la caja principal en diferentes localizaciones para cada estación.

El sistema constructivo seleccionado combina la mínima ocupación en planta para limitar la afección a edificios, servicios y desvíos de tráfico, con la rapidez y facilidad de ejecución. En el diseño se han priorizado los aspectos relativos al tiempo de construcción sobre la afección al tráfico y así se ha optado por soluciones a cielo abierto con desvíos completos del tráfico principal. Los plazos para reubicación temporal de los servicios clave y los tiempos de ejecución requeridos para soluciones tipo C&C *top-down* no resultan compatibles con el ajustado programa de obra. El sistema diseñado genera la necesidad de grandes excavaciones verticales no solo para limitar el espacio afectado, sino porque el proceso de ejecución incluye muros laterales hormigonados a una cara sin trasdosar con la impermeabilización aplicada contra el

hormigón proyectado del sostenimiento preliminar del talud. Las excavaciones se desarrollan en tres fases:

- Excavación y contención de la caja principal hasta los hastiales de los muros laterales (unos 28 m de excavación vertical).
- Excavación de la contrabóveda para paso de la tuneladora y perfilado.
- Excavación y sostenimiento de los accesos una vez que la estructura de la caja principal se ha completado total o parcialmente.

En varias estaciones se ha previsto una fase intermedia, ya que la tuneladora pasa previamente a la excavación de la caja. En esta fase se excava alrededor del túnel y se demuelen los anillos una vez finalizada la perforación. Esto incluye también una secuencia de construcción diferente en la estructura en las que los vanos laterales se ejecutan por fases previamente a la zona central. Se han realizado diversas comprobaciones de las situaciones temporales de estabilidad de la estructura parcialmente ejecutada.

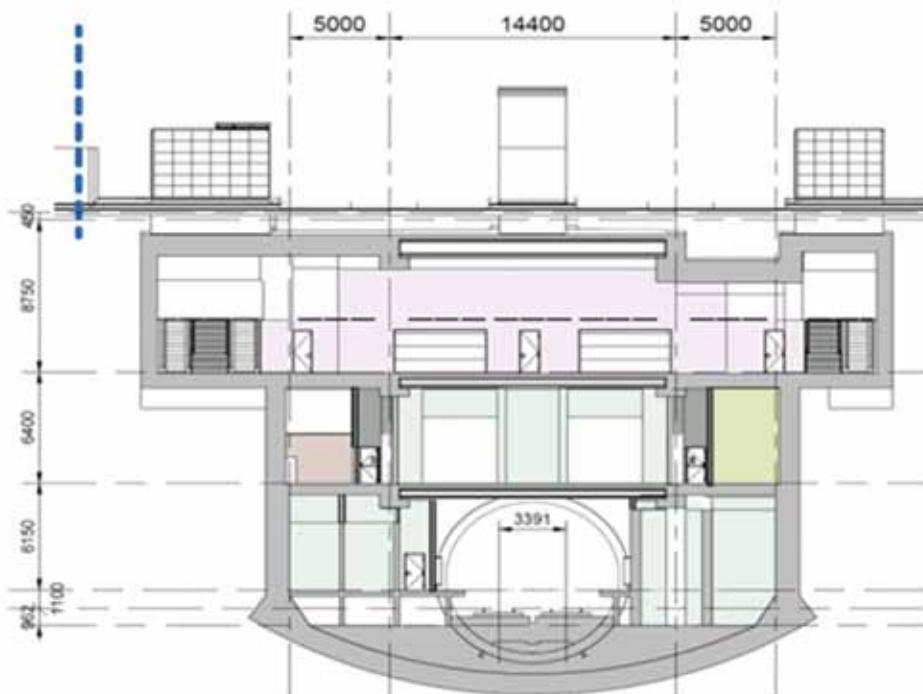


Fig. 9. Sección principal de una estación profunda tipo en línea 5

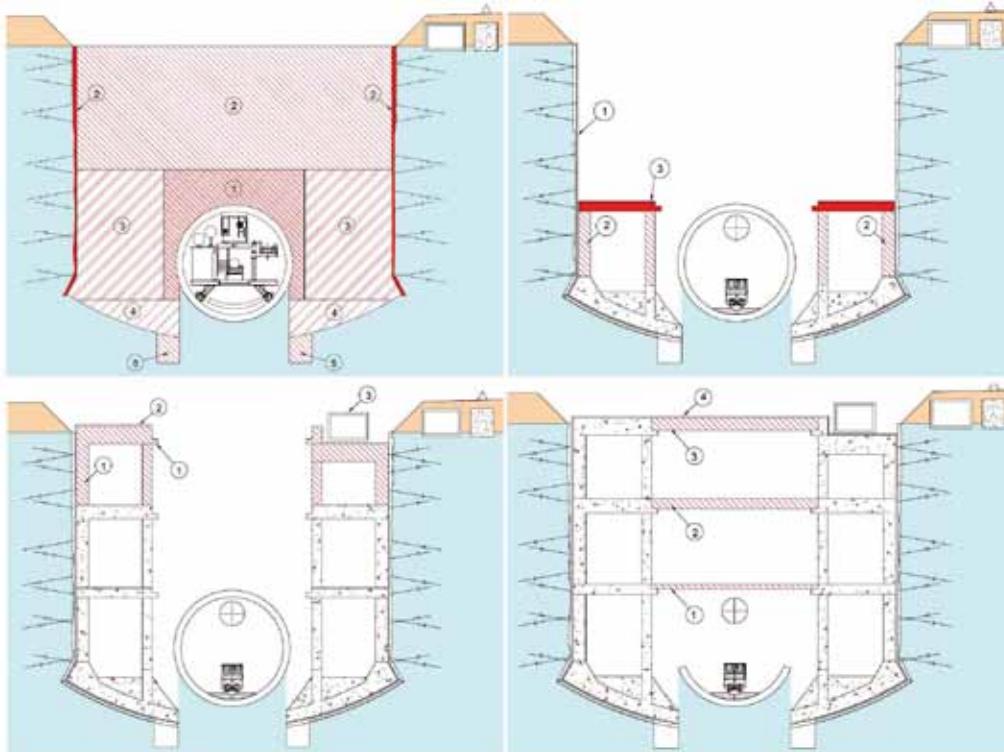


Fig. 10. Secuencia constructiva parcial en estaciones con paso previo de la TBM

Los paramentos resultantes son planos y verticales, y tienen más de 100 m de largo y hasta 30 m de alto. Además existen edificios situados a menos de 5 m del borde superior en algunos casos, y tráfico de obra y de desvío sistemáticamente en la plataforma de coronación. Asimismo, la excavación de la contrabóveda introduce una complejidad adicional al talud, ya que, como se explicará más adelante, requiere la formación de un tacón excavado en desplome hacia el terreno justo en la base del talud. Este tipo de excavaciones verticales tan profundas y con edificios próximos solo se dan en línea 5 puesto que la calle King Abdulaziz es más estrecha en comparación con otras vías de la ciudad. Por otro lado, son las primeras estaciones de todo el metro en tener que ser excavadas y las primeras de esta magnitud y profundidad en la ciudad. La mayor parte de excavaciones en Riad se llevan a cabo usualmente sin contención, pero no suelen profundizar más de 15 o 20 m en paramentos planos. En conclusión, ha sido necesario evaluar correctamente las deformaciones inducidas por la excavación y evitar cualquier riesgo de inestabilidad global o local en taludes, máxime cuando el acceso al paramento excavado es complejo una vez ejecutado y al pie de la excavación deben permanecer trabajadores y maquinaria de forma continua.

Para contener los suelos superficiales se ha generado un talud si el espesor es menor de 4 m y el espacio lo permite, o se han empleado pantallas de pilotes anclados y arrastrados en varios niveles para el resto de casos. En la roca se ha diseñado un sistema flexible de contención-protección mediante bulones pasivos y hormigón proyectado armado con mallazo o bien fibras, con las siguientes funciones:

- Generar una superficie suficientemente uniforme para poder disponer la membrana de impermeabilización, evitando el contacto de esta con el terreno.
- Aportar resistencia cortante y adhesión para evitar la caída de bloques, roca fracturada o suelos de rellenos cársticos entre los bulones, a la vez que se redistribuyen las tensiones en la superficie.
- Proteger las zonas muy alteradas o carstificadas de la erosión y del arrastre de materiales por el agua.
- Los bulones pasivos generan puntos de anclaje del hormigón proyectado al terreno cuando la masa rocosa tiende a desplazarse.

En relación al efecto del agua freática y a la estrategia para su gestión, en general se ha optado por la recogida del agua procedente de los niveles superficiales interceptada por la excavación en pozos situados en el fondo, sin necesidad de un bombeo previo. Este sistema ampliamente utilizado en la región es la forma más sencilla de gestión del agua siempre que no se intercepten zonas carstificadas o paleocauces con aportaciones mayores de caudal.

Se han analizado las condiciones de estabilidad y tensodeformacionales por varios procedimientos teniendo en cuenta el RMR de la roca, su estructura, la presencia de agua freática superficial y el riesgo local de cavidades. En primer lugar, se han realizado análisis de estabilidad mediante el método de equilibrio límite. Dado que se trata de un macizo altamente fracturado, sin una clara orientación preferencial de las fracturas, puede asumirse un comportamiento de medio continuo, asignando unos parámetros resistentes equivalentes, sin necesidad de hacer un estudio específico de estabilidad de cuñas. Así pues se ha comprobado la estabilidad general del talud por equilibrio límite según las aproximaciones del EC-7 (anexo británico) en el que la combinación más desfavorable es la Design Approach 1.2.

En segundo lugar, se ha llevado a cabo un estudio tenso deformacional de las diferentes fases de excavación para determinar las deflexiones del paramento y los movimientos inducidos en el entorno. Se han empleado tanto el modelo simplificado de Mohr Coulomb como el hiperbólico de Duncan y Chang (1970) suponiendo un comportamiento de la roca no afectado por su estructura. En general, los mayores

desplazamientos se concentran en una cuña de unos 5 m de ancho en coronación y el pie del talud presenta plastificaciones locales en todos los casos por lo que se ha previsto un refuerzo local en la zona del tacón.

La rotura a favor de las discontinuidades estructurales es de difícil evaluación dado que no fue posible obtener estaciones geomecánicas fiables en fase de diseño por falta de afloramientos y por imposibilidad de acceder a frentes representativos de roca. Además, tal y como se ha comentado anteriormente, la fracturación del macizo es muy intensa, sin un patrón claro en la mayoría de los casos. Por tanto, se ha comprobado el hormigón proyectado suponiendo la masa de roca fracturada o la cuña más desfavorable que se podría dar para cada malla de bulones prevista. Se han comprobado los modos de fallo más probables en este caso (Barrett y McCreath, 1995): rotura por adhesión, flexión y cortante, para el caso más desfavorable de masa de material suelto potencialmente movilizada.

6. Soluciones de diseño para la subpresión

6.1. Contrabóveda curva con reacción a la roca

Si bien los modelos teóricos hidrogeológicos desarrollados simplifican el terreno como homogéneo, la realidad es que el agua en la roca tiende a acumularse y circular a favor de las zonas más fracturadas o permeables. El aporte de agua, además, no se distribuye de una manera uniforme al tratarse en su mayor parte de agua procedente de pérdidas puntuales de conducciones, de riego, drenaje o de abastecimiento. Por lo tanto, las incertidumbres sobre el desarrollo

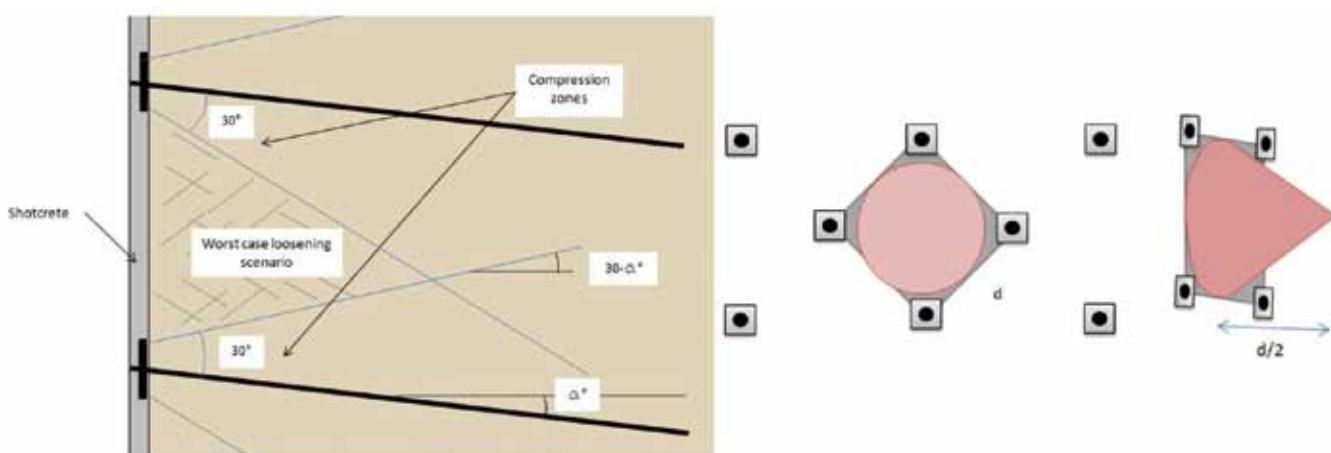


Fig. 11. Izda.: estimación de volúmenes inestables por intersección de conos de compresión. Dcha.: ídem según el método del cono de Pakalnis (2002)



Fotografía 2. Excavación con fluencia de agua

en el tiempo de la presión de agua sobre las estructuras es un aspecto a considerar cuidadosamente. Se podrían dar diferentes escenarios, desde que en algunas zonas no llegue a desarrollarse presión de agua a largo plazo, a que en otras se desarrollen empujes hasta cierta profundidad con magnitud menor o igual que la presión hidrostática, o que, si que las condiciones de permeabilidad y fracturación de la roca son más desfavorables, la ley de presiones a largo plazo se pueda asimilar a la hidrostática. La problemática es similar en el caso de la subpresión.

Ante este escenario, las medidas adoptadas en el diseño aconsejan ser prudentes y situarse en un entorno conservador en la evolución de las presiones debidas al agua, por lo que se ha considerado como hipótesis envolvente a largo plazo (100 años de vida del proyecto), aplicar el empuje como hidrostático desde el nivel freático de diseño a largo plazo tanto para empujes como subpresiones.

Como solución para la subpresión en las estaciones profundas, se ha buscado y diseñado un sistema compatible con la geometría circular del túnel y que permita potenciar la resistencia estructural de la losa inferior mediante su forma, encajando una contrabóveda curva que apoye contra la roca en sus extremos. Esto permite diseñar una estructura eficiente, minimizando el espesor y volumen de hormigón y la cuantía de armadura, al encauzar los efectos de la subpresión mediante compresiones en la losa, que se transmiten a la roca. El terreno aporta la reacción suficiente para contrarrestar la carga no compensada por el peso de la estructura. La curva de la losa se acomoda a la sección de la estación sin pérdida de espacio o inversión en hormigón adicional significativa y favorece el sistema de carga por forma. La reacción de la contrabóveda sigue la directriz

curva de la losa y el tacón final es perpendicular a ésta para evitar la transmisión de rasante a la membrana externa de impermeabilización. Es necesario comprobar en obra que no existen zonas de debilidad en el tacón por lo que en el proyecto se detallan medidas de refuerzo localizado y tratamientos a llevar a cabo para detectar y remediar el efecto de posibles carstificaciones.

Se ha llevado a cabo un estudio detallado de la interacción suelo estructura y del funcionamiento estructural del sistema para el diseño de los muros y contrabóveda y para el dimen-

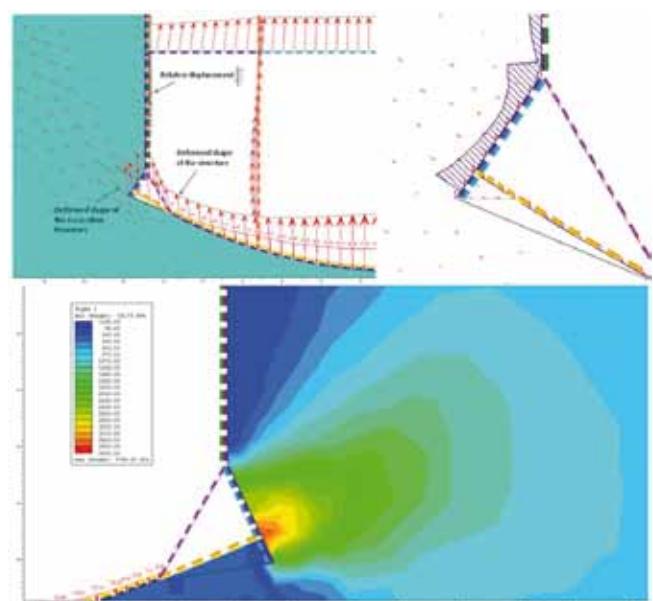


Fig. 12. Modelo numérico (Phase²) para el estudio de interacción terreno-estructura en el tacón de la contrabóveda

Rango de tensión máxima en tacón (ELU)		Desplazamiento máximo del tacón. Modelo completo	
Min.	Máx.	Flotación	Rotura*
2.100 kN/m ²	3.000 kN/m ²	2,5 mm	10 mm

* Pérdida de linealidad en el comportamiento (plastificación)

Tabla 1. Resultados comprobación del tacón de contrabóveda ELU flotación



Fotografía 3. Contrabóveda en fase de construcción

sionamiento de los nudos muro/contrabóveda/hastial. Con un modelo simplificado se ha estudiado la rotura de la zona del tacón mediante la introducción de escalones de carga hasta alcanzar el valor del coeficiente de seguridad mínimo marcado por los factores de minoración de resistencias del terreno, a través de la reducción de los parámetros resistentes (*Strength Reduction Factor - SRF*).

Por la singularidad del sistema se ha realizado una segunda comprobación mediante modelos numéricos de interacción suelo-estructura para verificar la reacción esperable en situación de servicio y la sensibilidad del comportamiento del sistema a la reacción transmitida. Mediante una serie de hipótesis de carga se estudia el nivel de desplazamientos y la extensión de la zona plastificada en el tacón para verificar el correcto funcionamiento del modelo estructural frente a la máxima solicitud esperable. Se verifica que para las hipótesis de carga consideradas los desplazamientos obtenidos en el tacón son lineales (régimen elástico) con movimientos mínimos de orden milimétrico. Asimismo se comprueba que

la presión de contacto estructura-terreno en el tacón no supera los límites considerados admisibles.

6.2. Losa drenada en las cocheras de línea 5

Las cocheras están ubicadas en un gran recinto enterrado de 400 m de largo por 140 m de ancho y 15 m de profundidad de excavación, por lo que el efecto de la presencia de agua en la estructura debe ser considerado tanto para los empujes laterales como para el diseño de la losa de fondo. Teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura, contrarrestar la subpresión localizada requeriría una gran inversión si se emplearan soluciones convencionales por gravedad o mediante anclajes en la losa de fondo. Por lo tanto, de cara a buscar una solución más adecuada, se ha realizado un estudio hidrogeológico específico del área cercana al recinto que ha permitido desarrollar una solución del tipo losa drenada.

Las condiciones del área de las cocheras resultan favorables por lo siguiente:

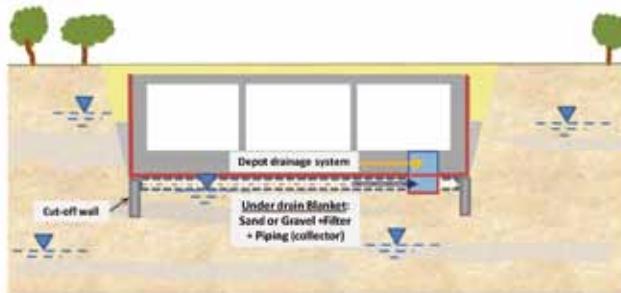


Fig. 13. Esquema del sistema de losa drenada y control de presiones

- Se da una baja conductividad hidráulica media en el macizo rocoso ($<1E-6$ m/s), contrastada con ensayos de permeabilidad Lefranc y un ensayo de bombeo.
- El nivel freático existente no es tan superficial como en otras zonas y genera caudales con aportaciones limitadas según las observaciones de campo.
- Se dispone una pantalla de baja permeabilidad perimetral a modo de barrera de corte de flujo para aumentar el gradiente del agua del trasdós del muro.

En estas condiciones, el resultado de los modelos indica unos flujos a captar por el sistema de drenaje casi despreciables, del orden de 1 l/s para toda la estructura. Se ha contado con mediciones de caudales de infiltración en la propia excavación que corroboran los bajos caudales esperables. Este sistema introduce unos costes de mantenimiento bajos teniendo en cuenta que en las cocheras se prevén caudales por exigencias de la explotación y mantenimiento comparativamente muy superiores. Las sobrepresiones inducidas bajo la losa con el sistema son compatibles con el diseño estructural, incluso considerando fallo parcial por colmatación.

7. Conclusiones

El diseño del Paquete 3 y en particular de la línea 5 del metro de Riad se ha desarrollado en un marco complejo condicionado por la magnitud del proyecto, por el ajustado programa de construcción y por los estrictos requerimientos del pliego. Las soluciones constructivas se han estudiado para proporcionar flexibilidad y capacidad de respuesta durante la ejecución de la obra sin merma de los detalles que determinan la calidad final de la infraestructura. Las condiciones geotécnicas y del entorno urbano representan una parte apreciable de los muchos condicionantes de diseño, y como en toda obra subterránea, determinan el

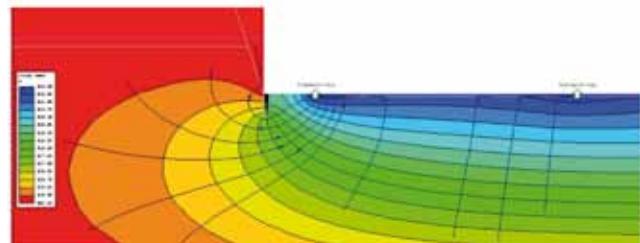


Fig. 14. Detalle del modelo de infiltración en el sistema de drenaje de las cocheras de línea 5

tipo de procedimientos constructivos a aplicar para limitar el riesgo asociado. Las cavidades cársticas y el comportamiento de la roca, la agresividad del medio y la durabilidad de los hormigones, y la difícil evaluación del efecto del agua a corto plazo y su evolución a largo plazo, han sido condicionantes fundamentales en el diseño.

Agradecimientos

Los autores reconocen al consorcio FAST y a todas las entidades involucradas en el diseño y construcción del Paquete 3 del metro de Riad, especialmente al equipo de FCC Construcción S.A., su contribución al éxito de la que es posiblemente la mayor obra del mundo en la actualidad. Asimismo, también reconocen el esfuerzo y la dedicación a todo el equipo de diseño y gestión de Tyspa, constituido por más de 300 profesionales al servicio de un proyecto tan singular, representados por su Project Manager Rafael Morán y especialmente a Eduardo Salvador, Hortensia Blanco-Argibay, Fernando Canales, José María Lorenzo, Abel Guerra y Gabriel Guisández. **ROP**

Referencias

- Arriyadh Development Authority (2013). *Enhancing the Management of Rising Groundwater in Arriyadh*. General Report.
- Arriyadh Development Authority (1990). *The Rising Groundwater Management Program. General Report and Volume 1: Natural Setting*.
- Arriyadh Development Authority (2015). *Investment Climate in Arriyadh*
- Barret, S.V.L. and McCreath, D.R. (1995). *Tunnelling and Underground Space Technology Vol 10. No 1. Shotcrete support design in blocky ground: towards a deterministic approach*.
- Gómez-Elvira, A., Plaza, A. (2016). Aspectos hidrogeológicos en el proyecto del Metro de Riad. Ingeopres nº250. ISSN: 1136-4785.