

# El túnel del Regajal. Procedimientos constructivos aplicados

## The tunnel of Regajal. Construction procedures applied

Revista de Obras Públicas  
nº 3.522. Año 158  
Junio 2011  
ISSN: 0034-8619  
ISSN electrónico: 1695-4408

**Violeta González Aleñar.** Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.  
Directora de las Obras. Jefa de Infraestructura L.A.V. Centro. Madrid (España). rop@ciccp.es

**Resumen:** La particularidad del Túnel de El Regajal reside en el marco geológico-geotécnico en el cual se engloba. Por un lado, la mayor parte del túnel se excavó en materiales salinos que conforman un ambiente extraordinariamente agresivo para el hormigón y con problemas de disolución y riesgo de fuertes hinchamientos. Por otro lado, el resto del túnel se excavó en materiales arcillosos de mala calidad. Todas estas circunstancias obligaron a diseñar complejos procesos constructivos durante la ejecución del túnel con unos revestimientos estructurales de gran rigidez que, en muchos casos, debían quedar finalizados muy cerca del frente de excavación.

**Palabras Clave:** Túnel; Materiales salinos; Arcillas; Disolución; Hinchamiento

**Abstract:** The peculiarity of the Regajal tunnel resides with the geological and geotechnical context in which it is included. On the one hand, most of the tunnel was excavated in saline materials representing an extremely aggressive environment in the concrete and with problems of dissolution and a high risk of swelling. On the other hand, the rest of the tunnel was excavated in clayey materials of poor quality. All these circumstances forced us to design a complex construction process during the execution of the tunnel with a very rigid structural lining and in many cases to be completed near the excavation face.

**Keywords:** Tunnel; Saline materials; Clay; Dissolution; Swelling

### 1. Introducción

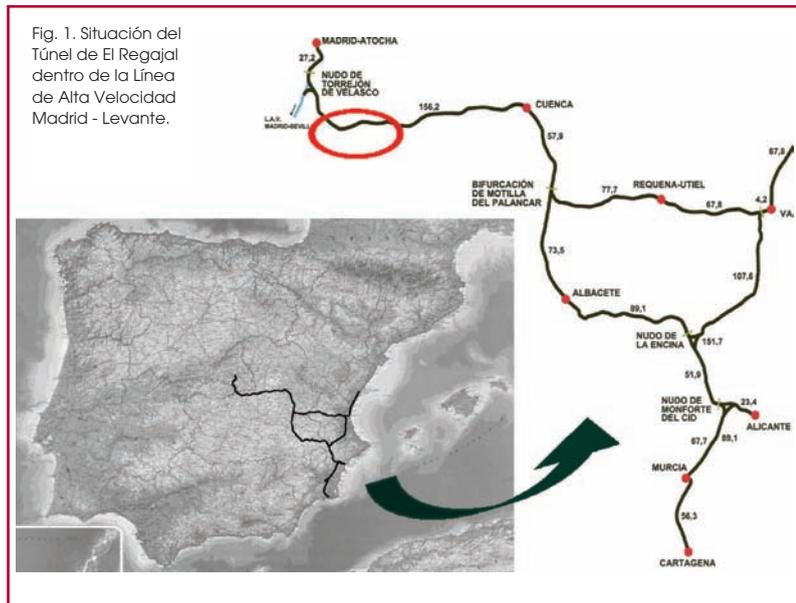
El túnel de El Regajal es una de las obras más singulares de la Alta Velocidad Española y forma parte de la línea que une Madrid con Valencia que se inauguró en Diciembre de 2010. Se trata de un túnel de doble vía que se encuentra englobado dentro del tramo Aranjuez- Ontígola, de 4,700 Km de longitud, de los cuales 2,437 Km son de túnel (2080 m en mina y 357 m de túnel artificial). Las obras de construcción de dicho túnel comenzaron en Febrero de 2008 y finalizaron en Enero de 2010, es decir en un tiempo aproximado de 24 meses, un plazo récord teniendo en cuenta la complejidad de construcción del mismo.

Cabe resaltar que uno de los condicionantes de la realización del túnel era la mínima afección al Parque Natural "El Regajal- Mar de Ontígola", zona de gran interés natural por las especies únicas de

flora y fauna que existen en el. El resto de los condicionantes de diseño eran fundamentalmente de carácter geológico-geotécnico debido a la complejidad de los distintos materiales atravesados. Esta circunstancia supuso que la viabilidad del proyecto del túnel tuviese que ser avalada por diferentes expertos y centros oficiales de investigación y que fuera necesario un diseño específico que tuviera en cuenta las especiales condiciones del terreno. Posteriormente, durante la fase de construcción se pudieron modificar y mejorar parte de los procesos originalmente diseñados gracias a un mayor conocimiento del terreno.

### 2. Descripción del proyecto

El tramo Aranjuez- Ontígola discurre por los términos municipales de Aranjuez (Madrid) y Ontígola (To-



ledo). Además del túnel de El Regajal, dentro de este tramo hay otra obra singular, el viaducto sobre el Arroyo de las Salinas.

En las tablas 1 y 2 que se presentan a continuación se incluyen las principales características geométricas del tramo. Entre ellas, cabe destacar que la sección de excavación llega a alcanzar los 180 m<sup>2</sup> cuando la sección útil interior es de únicamente 85,7 m<sup>2</sup>. Esto es debido a la necesidad de una sección con una contrabóveda de gran canto (entre 1,30 y 1,60 m) y un revestimiento estructural de gran espesor (1 m).

Tabla 1: Características geométricas del trazado	
Radio mínimo	4.500 m
Rampa máxima	25 ‰
Radio mínimo de acuerdo vertical	26.000 m
Ancho de plataforma	14 m
Velocidad máxima de diseño	300 Km/h

Tabla 2: Características geométricas del Túnel de El Regajal	
Longitud total	2.437 m
Pendiente	25 ‰
Sección libre	85,7 m <sup>2</sup>
Sección de excavación máxima	180 m <sup>2</sup>
Máxima montera	65 m
Montera media	40 m

### 3. Geología (2)(3)(4)

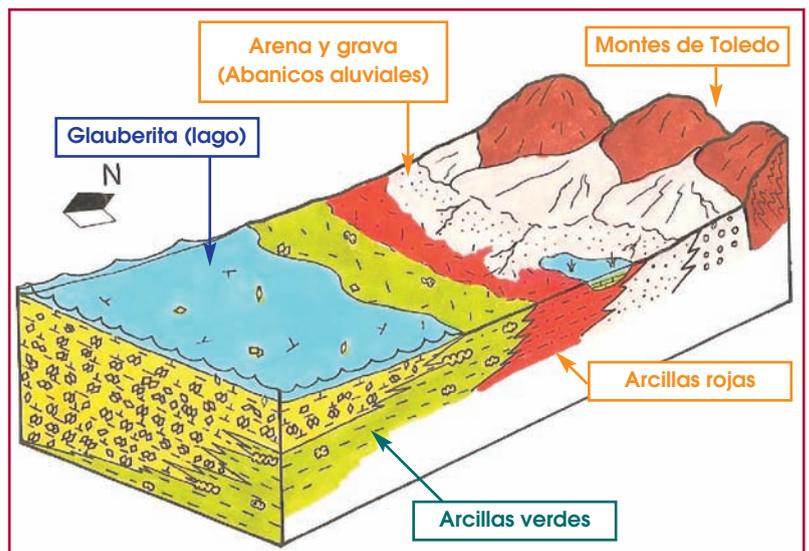
La particularidad del Túnel de El Regajal radica en el marco geológico- geotécnico en el cual se encuentra.

El túnel se sitúa en la margen meridional de la Cuenca de Madrid, formada por sedimentos continentales depositados en el Terciario. Los materiales que se encuentran a lo largo de su trazado se enmarcan en el Mioceno Inferior, que está constituido por sedimentos arcillosos sobre los que aparecen depósitos evaporíticos.

En la figura 3 se muestra el perfil geológico longitudinal del túnel tal como se concretó al final de la construcción, siendo interesante observar lo siguiente:

- En la primera parte del trazado (lado Aranjuez) predominan las formaciones arcillosas miocenas (gris verdosas y marrón rojizas), muy fisuradas y con cierto potencial expansivo.
- A unos 200 m la bóveda del túnel penetra en las formaciones evaporíticas tipo glauberita yesificada y glauberita sana. Por encima quedan los yesos sanos y lixiviados.
- A unos 700 m de la boca aparece una franja de unos 300 m en los que la yesificación ha profundizado notablemente, dando lugar a un material relativamente blando.
- A continuación el túnel cruza, en unos 200 m, una capa potente de halita-anhidrita, encajada superior e inferiormente en glauberitas, lo cual constituye una singularidad.

Fig. 2. Esquema del modelo geológico regional.





- En los 200 m siguientes el túnel se encaja nuevamente en glauberitas, sin afectar al sustrato de halitas.
- Sigue un largo tramo, de unos 650 m, en los que gran parte del túnel discurre en glauberitas sanas, con la base en halitas-anhidritas.
- En el resto, hasta la salida lado Ontígola, el túnel se encaja en glauberitas, afectadas superiormente por una cierta yesificación, existiendo aportes de agua importantes desde las cubetas cuaternarias superficiales, con lo que aumentan los riesgos de disolución y baja capacidad portante.
- Estas condiciones continúan en la trinchera de salida donde se ejecuta un falso túnel hasta que la rasante alcanza la superficie.
- A continuación el túnel cruza, en unos 200 m, una capa potente de halita-anhidrita, encajada superior e inferiormente en glauberitas, lo cual constituye una singularidad.
- En los 200 m siguientes el túnel se encaja nuevamente en glauberitas, sin afectar al sustrato de halitas.
- Sigue un largo tramo, de unos 650 m, en los que gran parte del túnel discurre en glauberitas sanas, con la base en halitas-anhidritas.
- En el resto, hasta la salida lado Ontígola, el túnel se encaja en glauberitas, afectadas superiormente por una cierta yesificación, existiendo aportes de agua importantes desde las cubetas cuaternarias superficiales, con lo que aumentan los riesgos de disolución y baja capacidad portante.
- Estas condiciones continúan en la trinchera de salida donde se ejecuta un falso túnel hasta que la rasante alcanza la superficie.

En la zona del túnel se detecta la siguiente secuencia estratigráfica de muro a techo:

- Depósitos profundos de halita y anhidrita
- Glauberita
- Glauberita en proceso de yesificación
- Yesos
- Yesos karstificados, limos yesíferos

#### 4. Problemas geotécnicos (1)

El túnel de "El Regajal" atraviesa dos marcos geológico-geotécnicos completamente diferenciados:

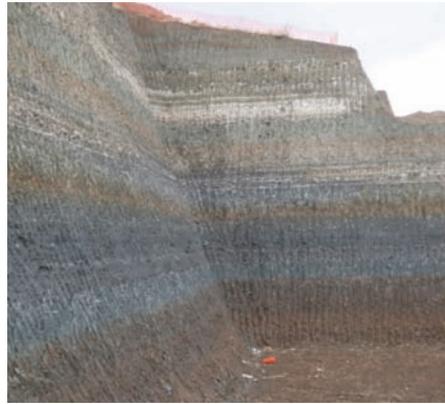


Foto 1. Arcillas.



Foto 2. Materiales Salinos.



Foto 3. Glauberita.



Foto 4. Halita.

materiales salinos y materiales arcillosos. Cada uno de estos materiales presenta sus propias problemáticas que han condicionado su diseño y proceso de construcción.

- Las zonas de **materiales salinos** presentan dos problemas fundamentales:
  - Expansividad debida a que el agua hidrata las sales y se expanden y a que la circulación del agua produce neoformación de cristales de yeso en las fisuras y posterior apertura de éstas. En fase de proyecto se determinaron presiones esperables de hasta 4 MPa.
  - Lixiviación debida a la disolución de las sales por circulación de las aguas.

Se trata de problemas relacionados con la circulación de agua, por lo que se han definido procesos constructivos que han tratado de eliminar o limitar al máximo dicha circulación. A pesar de ello, este tipo de problemas pueden producirse a medio y largo plazo en el túnel y han obligado al diseño de un revestimiento estructural con grandes espesores de hormigón armado de altas prestaciones que pueda contrarrestar los efectos de las previsiblemente fuertes presiones de hinchamiento. Para las

Tabla 3. Baremos contenidos en tritio

CONTENIDOS	PERIODOS
> 5UT	1959-1982
3-5 UT	1982-2008
1-3 UT	Mezclas de aguas anteriores a 1956 con aguas recientes
<1 UT	Aguas con edad muy superior a 60 años

zonas con riesgo de lixiviación en la base del túnel se ha definido una solución pilotada.

- Las zonas de **materiales arcillosos** presentan problemas debidos a su mala calidad geotécnica y un cierto potencial de hinchamiento motivado por la presencia de minerales expansivos. La mala calidad de las arcillas es un problema a corto plazo que debe ser resuelto durante la construcción del túnel mediante la ejecución de un adecuado sostenimiento.

La tramificación de riesgos se tuvieron en cuenta todas las combinaciones de disolución-expansividad-corrosión-zonas lixiviadas blandas-cruce de fallas o fracturas, etc.

Desde el punto de vista del diseño resultaba a veces muy difícil trabajar con riesgos combinados por lo que se intentaba evaluar el riesgo más crítico y adoptar algunas precauciones adicionales respecto a los otros riesgos concomitantes.

### 5. Hidrogeología (2)

Desde el punto de vista hidrogeológico, se puede decir que existe un nivel piezométrico continuo asociado a los niveles yesíferos superiores (limos yesíferos) que se encuentran sobre el sustrato impermeable de materiales arcillosos o de glauberita y halita.

La existencia de un acuífero colgado en los yesos sobre un nivel impermeable de glauberita se confirmó en la excavación del túnel ya que las máximas filtraciones se dieron en aquellos tramos en los que la clave del túnel se situaba próxima o interceptaba el techo de las glauberitas. En el resto del túnel, es decir, en los tramos donde el túnel se encajaba por completo en la masa de glauberita y halita, ofreciendo la unidad de glauberita un resguardo de espesor superior a los 6 m (a partir del P.K. 102+195), solamente se apre-

ciaron filtraciones puntuales en forma de humedades y goteos, no habiéndose detectado ninguna afluencia importante.

Los sondeos detectaron agua en algunas cubetas sobre el techo de la halita, lo cual podría indicar una penetración profunda de los frentes de disolución. Para estudiar esto se analizó el contenido en tritio de dichas aguas, ya que dicho elemento permite una datación aproximada de su antigüedad (ver Tabla 3). Las aguas superiores tenían contenidos superiores a 4 UT, mientras que las profundas tenían menos de 1 UT.

Por otra parte la representación de las muestras tomadas en el túnel en el diagrama de estabilidad del sistema Na-Ca-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O (Figura 5) demostró que las aguas procedentes de los sondeos o del acuífero superior tenían más capacidad de reacción con las sales del terreno que las captadas en el contacto glauberita-halita (acuífero inferior). Las primeras presentaban muy escasa afluencia al túnel, salvo en la parte final, lado Ontígola.

A la vista de estos resultados, se pudo determinar que las filtraciones que de manera natural aparecían

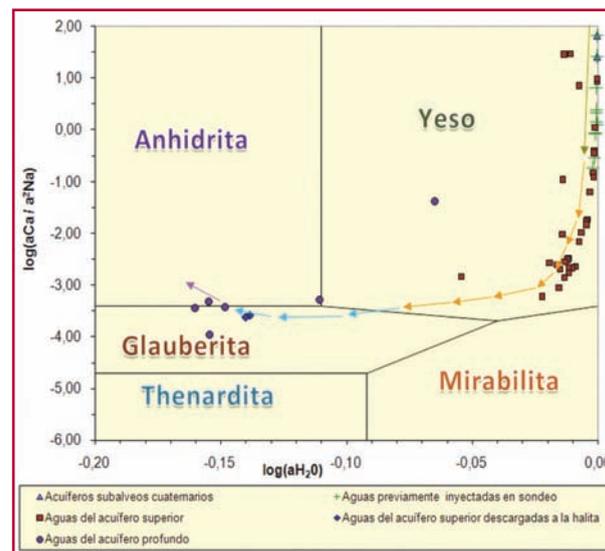


Fig. 4. Representación de muestras de agua tomadas en el túnel en el diagrama de estabilidad del sistema Na-Ca-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O.

en el túnel (no debidas a la intercepción de sondeos que habían cargado de agua el terreno) correspondían a aguas muy antiguas, no sometidas a recarga reciente. Esto es un claro indicador de que el flujo existente en el macizo rocoso es muy reducido o prácticamente inexistente.

Con estos datos se puede estimar que dentro de la vida útil del túnel, no es esperable la llegada de aguas de infiltración frescas al ámbito circundante del túnel, por lo que se mantendría la situación de equilibrio hidroquímico y no se favorecerían los procesos de disolución. Esto también tiene interés respecto a eventuales cambios de volumen por aporte de agua, aunque la expansividad también se podía desarrollar por descarga.

En algunas secciones se detectaron humedades en el hormigón proyectado que no se habían apreciado en la fase de excavación. La explicación de este fenómeno es geoquímica:

a) La hidratación genera la transformación de unos productos salinos en otros (Figura 5).

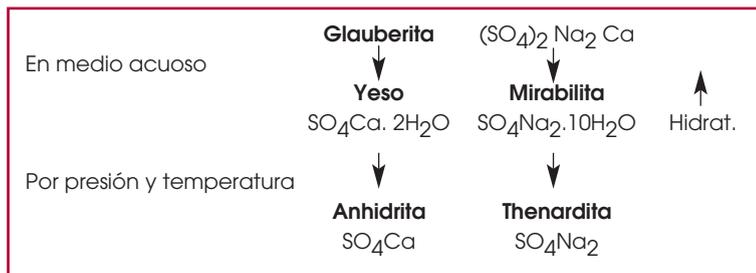


Fig. 5. Evolución de los compuestos salinos.

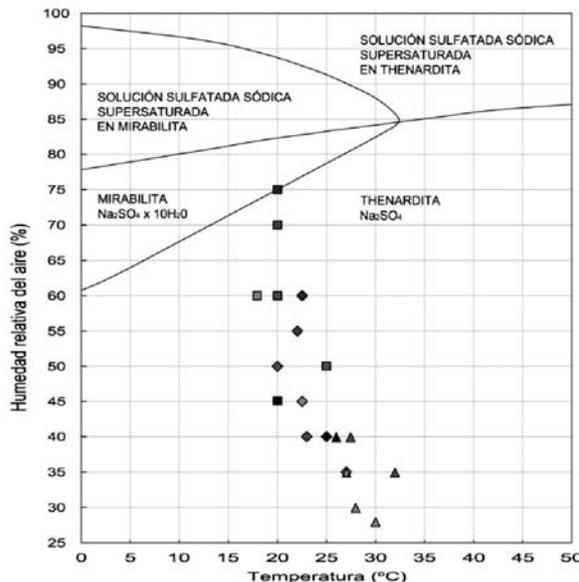
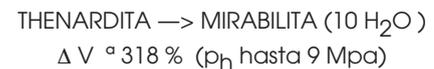
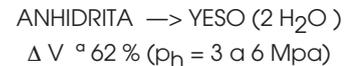


Fig. 6. Condiciones de humedad y temperatura en el túnel, representadas en el diagrama de fases del sulfato sódico.

b) El aumento de temperatura (Figura 6) favorece la transformación de la mirabilita en thenardita + agua. Esta liberación de agua es la que podría confundirse con una filtración de agua desde el terreno.

Estas transformaciones se producen con importantes cambios de volumen o desarrollando fuertes presiones de hinchamiento si el terreno está confinado:



En tramos a cielo abierto adyacentes al túnel, se manifestaron, en época invernal con fuertes descensos de temperatura y penetración de agua de deshielo, importantes hinchamientos por la transformación de thenardita en mirabilita.

## 6. Criterios básicos de diseño

A continuación se exponen brevemente los criterios básicos que se han seguido en el diseño de este túnel.

- Ejecución de un revestimiento estructural y una contrabóveda de gran espesor para contrarrestar los previsible efectos de los fuertes hinchamientos.
- Cierre inmediato de la sección con la ejecución de la contrabóveda y el revestimiento lo más cerca posible del frente para limitar convergencias y decompresiones que abriesen fisuras que favorecerían la circulación de agua.
- Ejecución por fases (avance, destroza por bataches y contrabóveda) de la sección de excavación debido a sus grandes dimensiones (180 m<sup>2</sup> de sección máxima).
- Eliminación de la circulación de agua para impedir que se activen procesos de hinchamiento, sobre todo en los materiales salinos. Para ello se han eliminado las posibles vías de agua, como por ejemplo los bulones.
- Ausencia de métodos de excavación con auxilio de agua. La excavación se ha realizado mediante rozadoras en los terrenos salinos y mediante martillos hidráulicos en zona de arcillas.

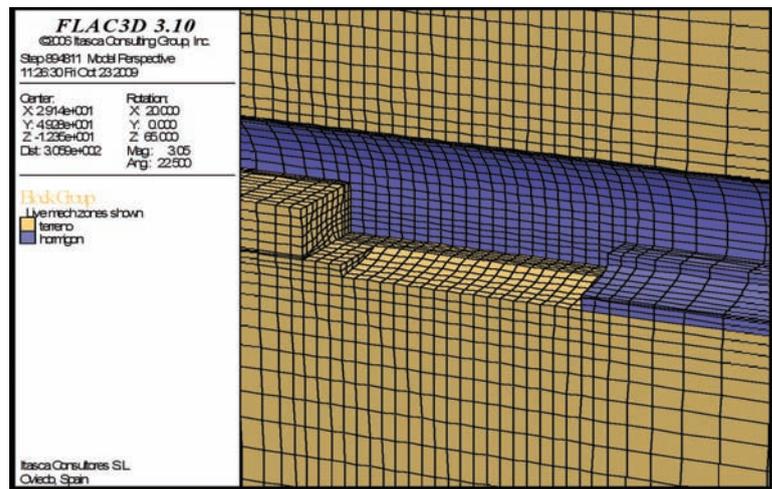
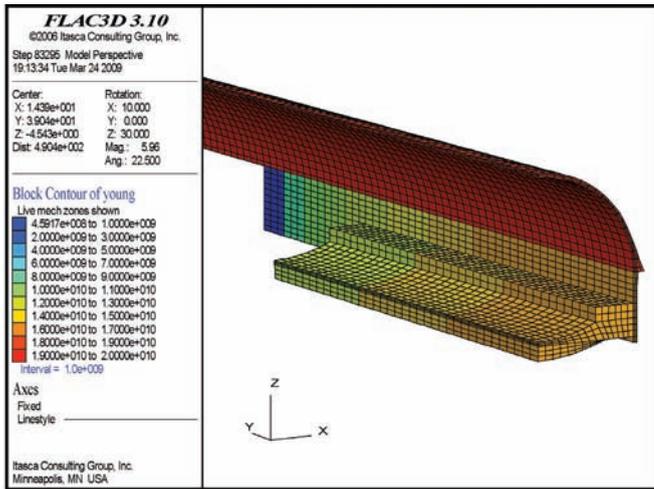


Fig. 7. Cálculos del proceso constructivo del túnel mediante el programa FLAC 3D.

- Definición de diferentes secuencias constructivas en función de las calidades geomecánicas de los terrenos atravesados.
- Eliminación de elementos de sostenimiento que puedan corroerse en medios salinos.
- Definición de secciones estructurales con pilotes en zonas susceptibles de sufrir disoluciones en el terreno de apoyo del túnel.

### 7. Dimensionamiento estructural

Tanto durante la fase de redacción del proyecto como durante la ejecución del túnel se han realizado numerosos cálculos que han permitido comprobar las secciones de sostenimiento, los procesos constructivos o la estabilidad de frente en terrenos arcillosos de mala calidad y con poco recubrimiento. También se han realizado cálculos del revestimiento estructural ante los efectos de largo plazo (hinchamiento y lixiviación) y de secciones especiales (paso de vaguada, paso bajo autovía Radial R-4, sección pilotada, etc).

La mayor parte de estos cálculos se han realizado con el programa de diferencias finitas FLAC 3D con la colaboración de Itasca e Iberinsa. Para los cálculos que analizaban los procesos constructivos con sus diferentes fases fue necesario emplear modelos tridimensionales, mientras que para comprobar los sostenimientos en muchos casos se pudo simplificar el procedimiento con modelos en 2D (5)(6)(7).

Los parámetros geotécnicos considerados en los cálculos han sido obtenidos en la mayor parte de los casos del Proyecto Constructivo, si bien durante la fase de construcción se realizaron numerosos recálculos a partir de una nueva caracterización geotécnica realizada en la zona de arcillas. La ejecución del túnel permitió comprobar que las arcillas tenían una calidad peor de la inicialmente considerada y fue necesario realizar una campaña de campo complementaria que permitió caracterizar con mayor detalle estos materiales.

A continuación se muestran los parámetros de proyecto, en donde se diferenció entre terreno en condiciones naturales, terreno inalterado (tabla 4).

Tabla 4: Parámetros de proyecto (terreno inalterado)

Parámetro	Rk	Q <sub>T</sub>		M <sub>YAR</sub>	M <sub>G</sub>	M <sub>Y</sub>	M <sub>HA</sub>	M <sub>AR</sub>
	Reellenos	Grav.	Llimas	A. Yesif.	Glauber.	Yesos Sup.	Halif. Anhidr.	Arc. M. Inf.
γ <sub>n</sub> (t/m <sup>2</sup> )	1.75	2.2	2.0	2.10	2.35	2.10	2.3	2.0
C' (t/m <sup>2</sup> )	0.5	0.2	1.0	6	20	15	15	4
φ (°)	30	36	30	34	34	33	30	32
E (MPa)	8	25	15	500	700	660	300	200
ν	0.35	0.3	0.35	0.25	0.25	0.25	0.30	0.3
P. hincham. (t/m <sup>2</sup> )	0	0	0	30	100	0	200	100

Tabla 5: Parámetros de proyecto (terreno lixiviado)

Parámetro	M <sub>yar</sub> A. yesíf.	M <sub>G</sub> Glauber.	M <sub>Y</sub> Yesos sup.	M <sub>HA</sub> Halita, anhidr.
$\gamma_h$ (t/m <sup>2</sup> )	1.6	1.7	1.65	1.75
C' (t/m <sup>2</sup> )	1	3	5	4
$\phi$ (°)	29	29	30	26
E(MPa)	50	40	60	30
$\nu$	0.5	0.5	0.5	0.5
P. Hincham. (t/m <sup>2</sup> )	0	0	0	0

Tabla 6: Parámetros de proyecto (terreno subsaturado después de lixiviado)

Parámetro	M <sub>yar</sub> A. yesíf.	M <sub>G</sub> Glauber.	M <sub>Y</sub> Yesos sup.	M <sub>HA</sub> Halita, anhidr.
$\gamma_h$ (t/m <sup>2</sup> )	1.7	1.8	1.7	1.8
C' (t/m <sup>2</sup> )	3	8	8	10
$\phi$ (°)	32	32	31	30
E(MPa)	100	150	200	150
$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3
P. Hincham. (t/m <sup>2</sup> )	30	80	0	15

Aparte de las condiciones "naturales", definidas por el estudio geotécnico se contempló la posibilidad de una progresión en profundidad del frente de disolución hasta alcanzar el túnel e incluso llegar a la base del mismo, terreno lixiviado (tabla 5).

También se tuvo en cuenta la posibilidad de que el terreno lixiviado pudiera recomponer parte de su estructura en caso de secarse o disminuir su grado de saturación (tabla 6).

## 8. Soluciones adoptadas

Debido a las complejidades que presenta en túnel de El Regajal hubo que descartar desde el inicio métodos de ejecución clásicos tipo Nuevo Método Austriaco (NATM) y buscar soluciones que permitieran cumplir con los criterios básicos de diseño enumerados anteriormente. También se descartó aplicar el método Belga debido a los fuertes condicionantes que tendría en el plazo de ejecución de la obra, aunque la solución que se adoptara se debía acercar en muchos aspectos a la filosofía de dicho método, sobre todo en lo referente a tratar de cerrar la sección completa del túnel con la contrabóveda y el revestimiento del mismo lo más cerca posible del frente.

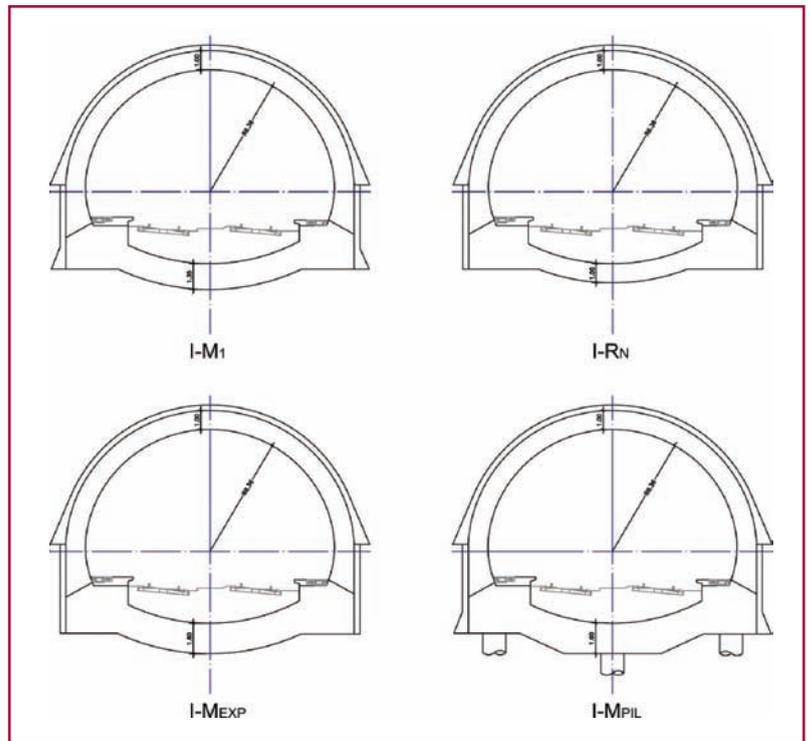


Fig. 8. Secciones constructivas del Túnel del Regajal.

Las secciones inicialmente planteadas en el proyecto se fueron simplificando posteriormente, en fase de obra, hasta acabar prácticamente en cuatro tipos, con un diseño muy similar pero variando el espesor de la contrabóveda y el armado (figura 8):

- Secciones para túnel en arcillas y margas arcillosas (I-M1).
- Secciones en glauberitas, halitas, etc. en terreno sin agua (I-RN).
- Secciones en anhidritas y materiales expansivos (I-MEXP).
- Secciones en tramos con potencialmente lixible (I-MPIL).

A continuación se muestran las características generales de cada una de estas secciones con sus sostenimientos, espesores de contrabóveda, altura de la zapata y revestimiento. Los armados de los revestimientos, zapatas y contrabóveda variaban en cada caso en función de los esfuerzos previstos. Estos armados eran muy importantes en las zonas con previsibles presiones de hinchamiento elevadas, sobre todo en la parte inferior del revestimiento. Las armaduras iban galvanizadas en estos tramos en materiales salinos para evitar riesgos de corrosión.

Tabla 7: Características de las secciones tipo

	ZONA ARCILLAS I-M1	ZONA GLAUBERITAS Y HALITAS SIN AGUA I-RN	ZONA CON EMPUJES MÁXIMOS I-MEXP	ZONA POTENCIALMENTE LIXIVABLE I-MPIL
SOSTENIMIENTO	-30 cm de HP-35 con fibras -Bulones $\varnothing$ 40 de L= 8 m en destroza -Cerchas HEB-140 ó 180 (según calidad del terreno) -Pata de elefante en Avance	30 cm de HP-35 con fibras Pata de elefante en Avance		
CONTRABÓVEDA	1,30 m de HA-50	1,00 m de HA-50	1,60 m de HA-50	1,60 m de HA-50
ZAPATA	H = 2,44 m de HA-50	H = 2,44 m de HA-50	H = 2,74 m de HA-50	H = 2,74 m de HA-50
REVESTIMIENTO	1 m de HA-50			
OTROS	Refuerzo en la sección de Avance con bulones subhorizontales de $\varnothing$ 40 de L= 12 m y un recalce con micropilotes subverticales de 10 m de longitud			Pilotes de $\varnothing$ 1,20 m

En la zona que se definió como potencialmente lixivable se ejecutó una sección con pilotes de diámetro 1,20 m y 17,5 m de longitud media.

A continuación se muestra un esquema de la sección de sostenimiento que se ejecutó para el tramo en arcillas del túnel. Debido a los problemas geotécnicos que planteaban estas arcillas fue necesario realizar un recalce con micropilotes subverticales de 10 m de longitud

y un refuerzo con tres filas de bulones subhorizontales de gran diámetro ( $\varnothing$ 40) y longitud (entre 8 y 12 m).

### 9. Proceso constructivo

Cabe distinguir entre el proceso constructivo adoptado en materiales arcillosos y materiales salinos.

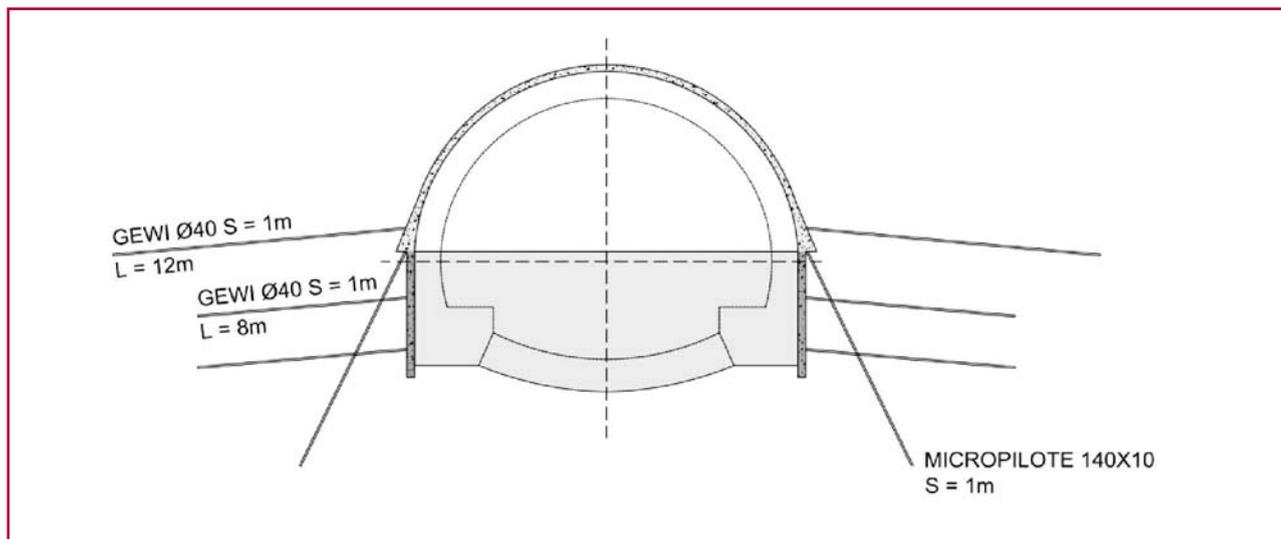
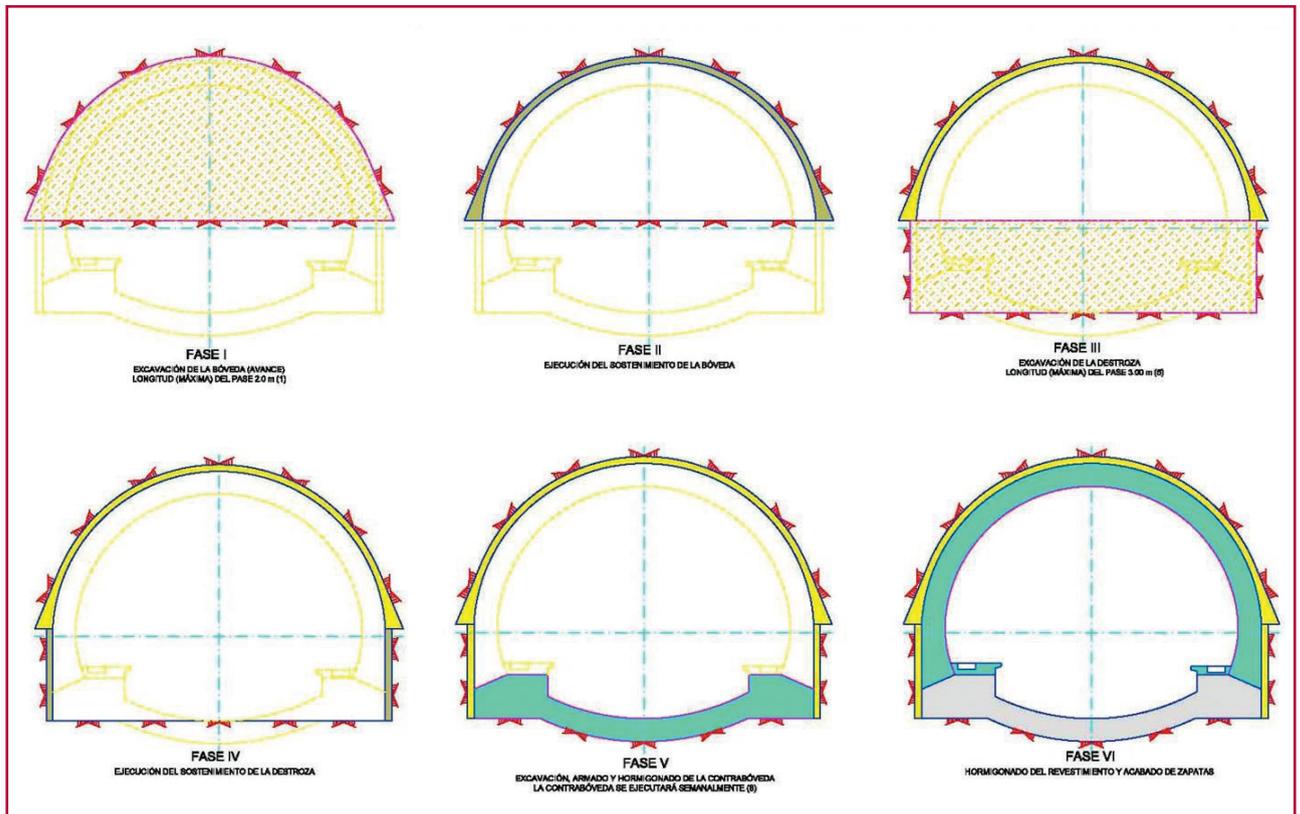


Fig. 9. Geometría de la sección en la zona de arcillas.

Fig. 10. Esquema del proceso constructivo en la zona de arcillas.



La excavación del túnel se ha llevado a cabo mediante martillo hidráulico y rozadora.

Las fases constructivas en la zona de arcillas han sido las siguientes:

1. Excavación del avance y colocación del sostenimiento.
2. Tras completar el avance se incorporan los elementos de refuerzo (bulones  $\varnothing 40$  y micropilotes de recalce).
3. Excavación secuencial de la destroza por bataches, en pases de 3 m, siguiendo la siguiente secuencia hasta completar módulos de 15 m de longitud:
  - Excavación del batache izquierdo
  - Sostenimiento del batache izquierdo y excavación del batache derecho
  - Sostenimiento del batache derecho.
4. Tras excavar la destroza y sostenerla en una longitud de 15 m (12 m del módulo previsto a los que se añaden 3 m por razones constructivas para poder posicionar posteriormente el carro de encofrado), se procede a la excavación de la contrabóveda y

posterior cierre de la sección mediante el hormigonado de la propia contrabóveda y de las zapatas de forma conjunta en una longitud de 12 m.

Este ciclo constructivo se repitió a lo largo de todo el tramo en arcillas y no se permitía comenzar el siguiente ciclo hasta que el anterior quedase completamente finalizado. A pesar de la dificultad del proceso constructivo de cada ciclo de 15 m, los rendimientos que se consiguieron en obra fueron realmente altos y el tiempo de ejecución no excedía de una semana de trabajo.

La ejecución del revestimiento en bóveda se iba completando inmediatamente por detrás a una distancia máxima de 24 m del frente, con lo que el túnel quedaba completamente finalizado. En alguna zona donde se observó que la calidad del material arcilloso mejoraba se permitió cerrar la sección a 36 m del frente.

En las siguientes figuras se muestran esquemas del proceso constructivo en las zonas arcillosas de mala calidad y algunos detalles del mismo.

Uno de los mayores logros constructivos de este túnel fue conseguir que se hormigonasen las zapatas y la contrabóveda en una misma operación, con sus ar-



Fotos 5, 6, 7 y 8. Detalles del proceso constructivo en la zona de arcillas en el que se observa la excavación de la destroza, el armado de la contrabóveda y las zapatas, el carro de revestimiento y el túnel acabado.



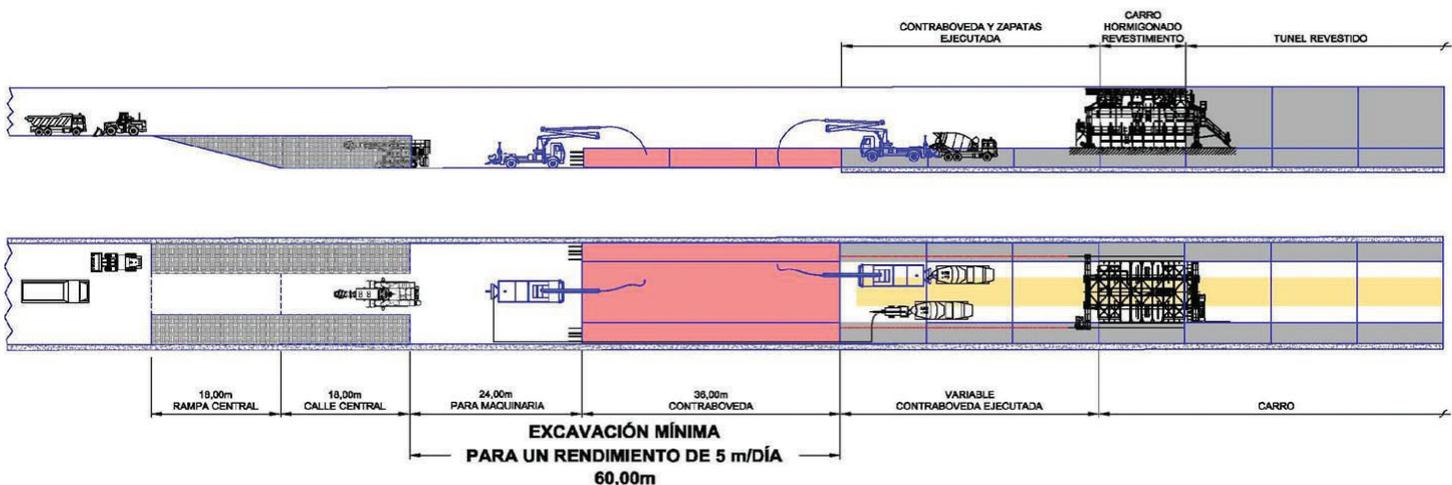
mados incluidos, lo que permitió eliminar juntas y solapes y mejorar claramente el rendimiento del ciclo.

En la zona de glauberitas y halitas la mayor parte del tramo ha sido de buena calidad geomecánica y el proceso constructivo indicado anteriormente ha

podido simplificarse en gran medida, sobre todo en lo referente a la longitud de los ciclos constructivos. De esta forma, en los materiales salinos de buena calidad se ha seguido el proceso constructivo que se muestra en la figura 11.

Fig. 11. Proceso constructivo en la zona de materiales salinos.

## SECUENCIA CONSTRUCTIVA DE LA DESTROZA EN GLAUBERITAS ROCAS DE BUENA CALIDAD GEOMECAÁNICA







Fotos 9 y 10. Detalles del proceso de hormigonado de la contrabóveda y zapatas conjuntamente.

En este caso se permitían tramos abiertos en desbroza sin la contrabóveda hormigonada de un máximo de 60 m de longitud. En cuanto al cierre completo de la sección con el revestimiento de la bóveda, también se iba ejecutando por detrás de las contrabóvedas, pero en los tramos en materiales salinos se podía mantener una distancia máxima al frente de 90 m.

### 10. Zonas singulares

A lo largo del túnel se atravesaron algunas zonas singulares que obligaron a la adopción de procesos constructivos especiales. Entre estas zonas cabe destacar las siguientes:

- Zona con riesgo de sufrir procesos de lixiviación
- Cruce de zonas con muy poco recubrimiento
- Tratamientos de impermeabilización en zonas con filtraciones de agua
- Intercepción de flujos

#### Zona con riesgo de sufrir procesos de lixiviación

En la salida del túnel en mina en el lado Ontígola (últimos 80m) se pilotó el túnel debido a que era una zona de glauberitas susceptibles de sufrir procesos de lixiviación en profundidad. Esta hipótesis se combinó con la de una posible expansividad, por lo que los pilotes se dimensionaron también a tracción.

Para este tramo de 80 m de longitud se aplicó una solución pilotada que constituye una técnica muy poco habitual en las obras subterráneas. Se determinó que se debían ejecutar filas de 3 pilotes de f 1,20 m

separadas 2,50 m entre ejes. Los pilotes se empotraron en el sustrato de halita sana y tienen una longitud media de 17,5 m.

El armado de estos pilotes se ejecutó con armadura de fibra de vidrio por la posible presencia de agua selenitosa. Las armaduras se iban introduciendo en maniobras cortas en función de lo que permitía el gálibo del túnel, por lo que hubo que diseñar empalmes especiales entre tramos y el rendimiento final fue bajo.

También se consideró conveniente pilotar 45 m en el interior del túnel, pero en este caso se optó por colocar unas columnas de mortero de 300 mm de diámetro y longitudes de 4,5 a 6 m bajo contrabóveda, pero realizadas desde el avance del túnel. Las filas de columnas iban separadas unos 2 m (figura 13).

Fig.12. Corte geológico de la zona susceptible de lixiviación y tratada con pilotes.

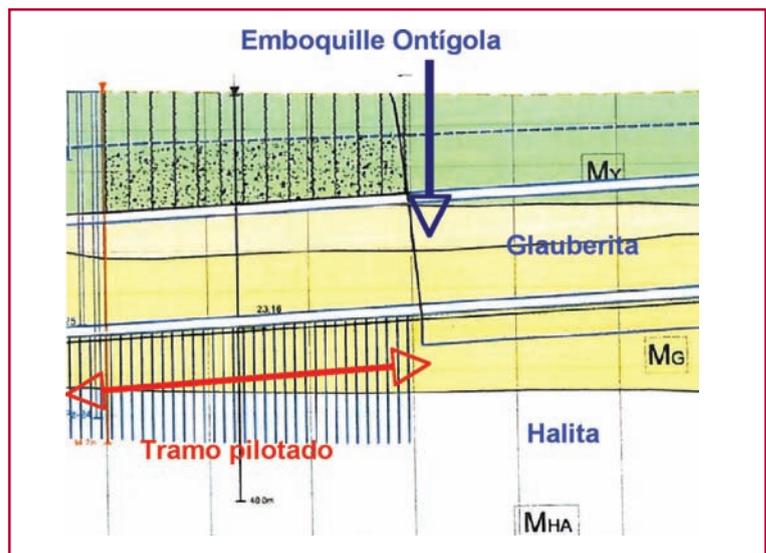






Foto 11. Ejecución de pilotes en la zona con riesgo de sufrir problemas de lixiviación.



Foto 13. Aspecto de los pilotes laterales.

### Cruce de zonas con muy poco recubrimiento

Se atravesaron dos zonas de estas características:

- Una vaguada cercana al emboquille del lado Aranjuez, con apenas 11 m de recubrimiento sobre la clave (menos de un diámetro).
- El cruce bajo la autopista Radial R-4 en la que la máxima cobertera es de 18 m.

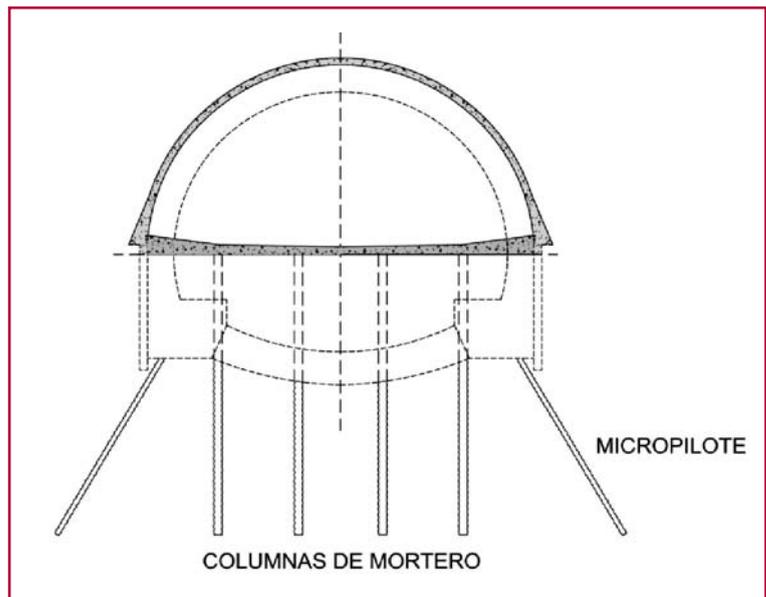


Foto 12: Introducción de un tramo de armadura de pilote, con bandas de fibra de vidrio.

Para estas zonas se realizó un análisis exhaustivo y, en fase de obra, se realizaron modelos de cálculo particularizado con el programa FLAC 3D para calcular el factor de seguridad del frente. Tras el estudio de la estabilidad del frente, se realizó un análisis de los sostenimientos a disponer, incluyendo una estimación de los asentamientos en la autopista mediante un modelo tridimensional de excavación secuencial en el que se reprodujo tanto la geometría y geología de la zona como la secuencia constructiva prevista para el tramo en estudio.

Ambos tramos se pasaron con un refuerzo adicional de hormigón proyectado respecto al resto del túnel y bajo la protección de paraguas de micropilotes.

Fig. 13. Apeo de la sección mediante columnas de mortero y micropilotes.





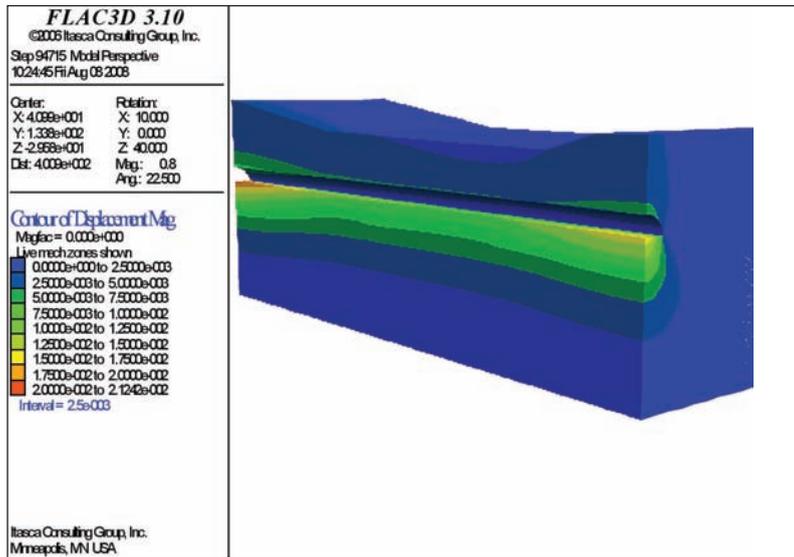


Fig. 14. Desplazamientos totales registrados al final de la fase de avance.

En el caso del paso bajo la radial el paraguas se ejecutó con bulones de fibra de vidrio (60x10 mm) debido a la presencia de materiales solubles y corrosivos.

### Tratamientos de impermeabilización en zonas con filtraciones de agua

Debido a la geología existente era fundamental evitar en la medida de lo posible la aparición de flujos de agua. Este problema se ha intentado corregir en primer lugar con el método de construcción del túnel, que supone un sostenimiento rígido para evitar que la deformación resultante de la relajación del terreno origine microfisuras que permitan la entrada de agua desde las capas más superficiales del terreno.

Durante la ejecución del túnel en algunas zonas de arcillas se detectó agua y fue necesario colocar una lámina de impermeabilización para impedir filtraciones que pudiesen afectar al revestimiento estructural.

Las principales humedades y filtraciones en el túnel se concentraron en los primeros 80 metros del mismo desde la boca del lado Ontígola. Esta zona se encuentra en el recubrimiento de limos yesíferos que se sitúa por encima de las glauberitas. Se trata de capas de limitada permeabilidad que contienen agua y definen el nivel freático. El muro del freático lo constituye una capa de mirabilita constituida por sulfato sódico en polvo saturado pero con incapacidad de hidratarse y cristalizar, lo que la convierte en una auténtica barrera natural impermeabilizante que impide el paso

de las aguas hacia las capas subyacentes compuestas esencialmente por glauberita.

La cinética de la formación de mirabilita es extremadamente rápida y estacional y también se ha desarrollado en el interior del propio túnel. Cuando las aguas del recubrimiento yesífero se filtraban hacia el interior del túnel por las juntas del revestimiento, la variación térmica entre trasdós e intradós precipitaba la formación de cristales de mirabilita, observándose en los hastiales del túnel humedades con eflorescencias blancuzcas características de este proceso de cristalización e hidratación del sulfato sódico.

El fenómeno natural culmina en un proceso de autosellado. Cuando se alcanzaba el equilibrio del sistema entre las aguas supersaturadas del trasdós (salmuera de sulfato sódico) y la génesis de mirabilita en el intradós, para unas condiciones de humedad y temperatura específicas, la humedad tendía a desaparecer y se observaba cómo la mirabilita en contacto con la temperatura ambiente se iba degradando y perdiendo el agua molecular, resultando una mancha pulverulenta como resultado final del proceso de filtración.

El sistema evolutivo de formación de mirabilita es muy dependiente de la temperatura, observándose que pequeñas oscilaciones son suficientes para desencadenar procesos de reequilibrio con una cinética muy rápida.

Las distintas actuaciones ejecutadas para reforzar la estanqueidad del túnel y combatir las humedades y eflorescencias aparecidas en el revestimiento han consistido en:

- Inyecciones de *resinas de poliuretano acuarreactivas* en las vías de agua existentes para crear una barrera impermeable en el trasdós de revestimiento
- Aplicación de un *mortero impermeabilizante* que en presencia de agua se hidrate rellenando los poros del hormigón mediante formación de silicatos cristalinos. Se trata de un tratamiento superficial para hacer desaparecer las humedades.
- *Resina epoxi* que se ha aplicado en las fisuras de retracción aparecidas en el hormigón de revestimiento para que se cree película adherente de tal forma que impida que sea una vía de agua.
- *Resina acrílica* que se aplicó en forma de pantallas con el objetivo de impermeabilizar y minimizar la removilización del agua, así como el de mantener las condiciones naturales del macizo rocoso.





Foto 14. Anillo de intercepción de flujos longitudinales.

En la zona más del emboquille de Ontígola, como medida final para detener la presencia de agua en el túnel se diseñaron y ejecutaron dos actuaciones diferentes, una en el interior y otra en el exterior. Estas actuaciones son las siguientes:

- Colocación de láminas de PVC y acero inoxidable en las juntas entre carros de revestimiento para evitar la presencia de agua en el interior del túnel
- Pantalla exterior de impermeabilización compuesta por 50 pilotes de diámetro 1 m secantes 40 cm rellenos de mortero M-200 y con una profundidad de 25 m.

### Intercepción de posibles flujos longitudinales de agua

Para evitar en las zonas de glauberita y halita la posibilidad de que hubiese una circulación longitudi-

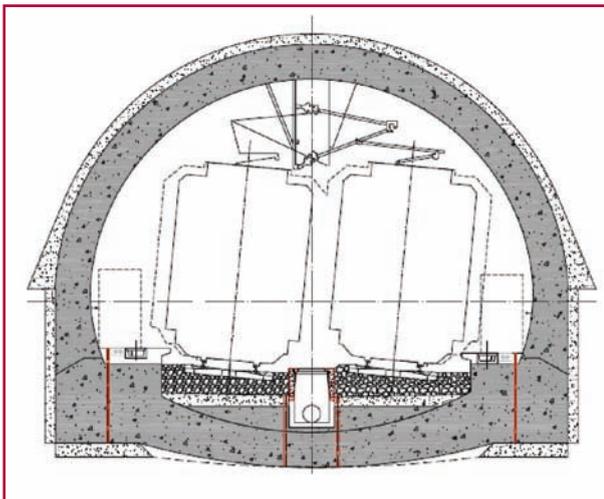


Fig. 15. Taladros para eventuales inyecciones bajo contrabóveda.

nal de agua por el trasdós del sostenimiento o incluso por el propio sostenimiento cuando éste se hubiese degradado, se diseñaron una serie de anillos de hormigón proyectado alrededor del túnel que penetraban en el terreno mediante unas rozas en el mismo de aproximadamente 50 x 50 cm. Teóricamente estaba previsto completar estos anillos con unas inyecciones radiales, si bien finalmente no se ejecutó este tratamiento.

### Inyecciones de Recalce

Estas inyecciones de recalce no se han ejecutado durante la construcción del túnel. Pero para corregir posibles asentamientos indicativos de algún fenómeno de disolución, en el entorno del túnel, se han dejado en la contrabóveda y andenes unas perforaciones registrables que llegan hasta el terreno de apoyo. A través de estos taladros podrían inyectarse productos no acuosos con las presiones adecuadas para producir un efecto nivelador.

Los taladros se han dispuesto de forma que sea mínima la interferencia con el tráfico ferroviario (figura 15), aunque cabe esperar que las inyecciones se ejecuten en paradas nocturnas.

### 11. Auscultación

Las secciones de convergencia durante la fase de avance del túnel mostraron movimientos de consideración en algunas zonas que debieron ser reforzadas mediante la colocación de bulones que, en algunos casos, llegaron a ser de gran longitud (hasta 12 m).

Los extensómetros de varillas midieron en general una pequeña zona plastificada circundante al túnel que, normalmente, no sobrepasaba 1 metro de espesor.

Se colocaron células de presión total en la bóveda (3) y, sobre todo, en la contrabóveda (5) y en el arranque de los hastiales (2) para controlar las presiones de hinchamiento en las zonas con mayores problemas. Los valores obtenidos se han estabilizado y fueron en general bajos, aunque hay algunas presiones de una cuantía importante y será necesario continuar con su seguimiento para comprobar si se ha llegado a una estabilización total de dichos valores.

Se colocaron micrómetros deslizantes (MD) en las zonas susceptibles de sufrir hinchamientos bajo la con-

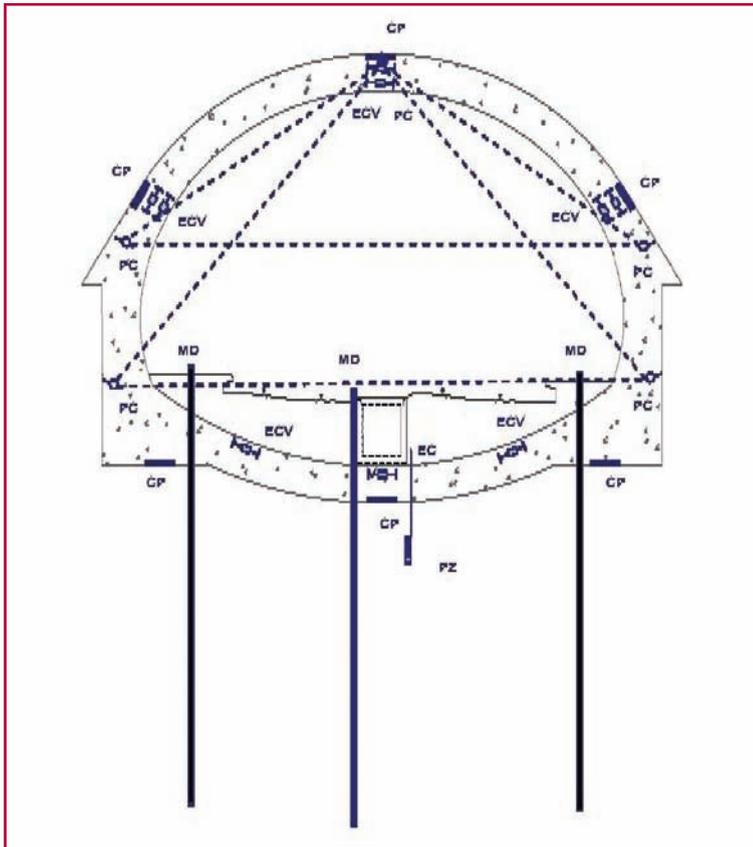


Fig. 16. Sección intensiva de auscultación que incluye pernos de convergencia (PC), células de presión (CP), micrómetros deslizantes (MD), extensómetros de cuerda vibrante (ECV) y piezómetro (PZ). En las zonas susceptibles de sufrir los mayores hinchamientos el número de CP en la contrabóveda se aumentó hasta 5.

trabóveda del túnel. Estas mediciones permitieron comprobar que podría considerarse una zona activa de unos 3 m, aunque hubo resultados muy dispersos.

En zonas con presencia de agua, humedades o alta susceptibilidad a la disolución se establecieron secciones de conductividad (SMA) en los arranques de la bóveda. El objetivo de estos medidores es detectar la aproximación de frentes salinos en disolución a largo plazo. La mayoría registraron valores de conductividad muy bajos (próximos a 0 ms), aunque las secciones más cercanas a los emboquillos marcaron valores de conductividad superiores a los 90 ms, lo que es indicativo de un alto porcentaje de cloruros y sulfatos disueltos en el agua captada por el sensor.

En la zona del cruce bajo la radial R-4 se controlaron los asentamientos con instrumentación desde superficie.

## 12. Agradecimientos

La autora agradece el apoyo recibido por la Dirección de la Línea de Alta Velocidad Este de ADIF, así como el esfuerzo y colaboración de todas las personas implicadas en la obra y pertenecientes a la U.T.E. constructora Acciona - Obras Subterráneas, Iberinsa, Getinsa y al asesor del ADIF tanto durante la redacción del proyecto como durante la construcción José M<sup>o</sup> Rodríguez Ortiz. ♦

### Referencias:

- (1) ADIF. *Proyecto de construcción de plataforma del Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia. Tramo: Aranjuez-Ontígola*. Madrid: SENER, 2007.
- (2) GAMMA GEOTÉCNICA, S.L. *Sobre la Geología e Hidrogeología del Túnel de El Regajal*. Madrid: Gamma Geotécnica, 2010.
- (3) CALVO, J.P.; ORDOÑEZ, S.; GARCIA DEL CURA, M.A. "Caracterización sedimentológica de la Unidad Intermedia del Mioceno en la zona sur de Madrid". *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, 1984, n<sup>o</sup> 2, p. 145-176.
- (4) CALVO, J.P.; ORDOÑEZ, S.; GARCIA DEL CURA, M.A.; HOYOS, M.; ALONSO ZARZA, A.M.; SANZ-M.E. y RODRIGUEZ ARANDA, J.P. "Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la cuenca de Madrid". *Acta Geológica Hispánica*, 1989, vol. 24, n<sup>o</sup> 2-3, 281-298.
- (5) DAWSON, E.M., ROTH, W.H. "Slope Stability Analysis with FLAC". *Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*, Minneapolis, Minnesota, September 1999, A. A. Balkema, Rotterdam (1999), pp. 3-9.
- (6) VARONA, P.; FERRER, M. "Cálculo de factores de seguridad con FLAC". *Ingeopres*, 1998, vol. 58, p. 38-41.
- (7) RAMOS GOMEZ, J. *Cálculos realizados durante la ejecución de las obras*. 2008-2009.