

Los túneles de Almería: problemas de fluencia y anhidritas expansivas

The Almería tunnels: Problems of squeezing and expansive anhydrite soils

Luisa Peña Fernández. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directora de Obra (ADIF). Madrid (España). lpfernandez@adif.es

Carmen Rodenas de Miguel. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directora de Obra (INECO). Madrid (España). carmen.rodendas@ineco.es

Resumen: El túnel de Almería es el túnel más largo de la línea Vitoria – Bilbao, con aproximadamente 4.580 m. A nivel geotécnico, durante la fase de avance se han detectado dos fenómenos que afectan determinadamente a la ejecución del túnel: tramos con **presencia de facies sulfatadas** (anhidritas y yesos) y tramos afectados por **procesos de fluencia**. Ambos fenómenos se producen aproximadamente entre el PK 5+700 y el PK 6+300; las coberteras son superiores a 300 m. La presencia de anhidritas provoca fenómenos de hinchamiento de gran importancia al hidratarse y convertirse en yeso. Para afrontar los fenómenos de hinchamiento se ha adoptado una **solución rígida**. En los tramos donde se han observado **fenómenos de fluencia** (squeezing), se ejecutaron mallas de bulones autoperforantes y solera provisional en fase de avance. Con el objeto de proceder con mayor seguridad durante la ejecución de la destroza se han ejecutado puntales HEB 300 en fase de avance. Para validar los refuerzos y la sección estructural definitiva en revestimiento, se han realizado modelizaciones mediante **programas de diferencias finitas en 3D**.

Palabras Clave: Revestimiento en túneles; Anhidritas expansivas; Fenómeno de fluencia; Back analysis

Abstract: The 4580 m long Almería tunnel is the longest tunnel on the Vitoria-Bilbao railway line. At a geotechnical level, two conditions were detected during the top heading excavation which decisively affected the construction of the tunnel: sections with the **presence of sulphated facies (anhydrites and gypsum)** and sections affected by **squeezing processes**. Both these conditions occur approximately between km 5+700 and km 6+600, where the cover is over 300 m. The presence of anhydrites causes serious swelling on hydrating and converting to gypsum. A **rigid solution** was employed to tackle these swelling problems. In those sections where squeezing was observed, meshes were fixed with self-drilling dowels and a provisional base slab was laid during the top heading excavation stage. In order to ensure greater safety throughout the bench excavation, HEB 300 steel profiles were set during the excavation of the top heading. **3D finite difference models** were employed to validate the reinforcement and the final structural section of the lining.

Keywords: Tunnel linings; Expansive anhydrites; Squeezing; Back analysis

1. Antecedentes

En la Línea de Alta Velocidad (L.A.V.) Vitoria - Bilbao - San Sebastián y dentro del tramo Legutiano-Eskoriatza se está construyendo el túnel de Almería.

El túnel de Almería es el túnel más largo de la línea Vitoria – Bilbao, con aproximadamente 4580 m; está subdividido en dos subtramos, el subtramo I, que abarca desde el PK 2+500 (boca entrada)

hasta el PK 5+000 y el subtramo II, desde el PK 5+000 y hasta el PK 7+080 (boca salida).

La tipología del túnel es bitubo, de vía única cada uno de ellos, con una sección libre de 57 m², excavado por métodos convencionales, principalmente por voladura.

En lo que respecta al subtramo II, el túnel de Almería atraviesa el cerro Maroto y el monte de Almería, con coberteras máximas de 360 m (Figura 1).

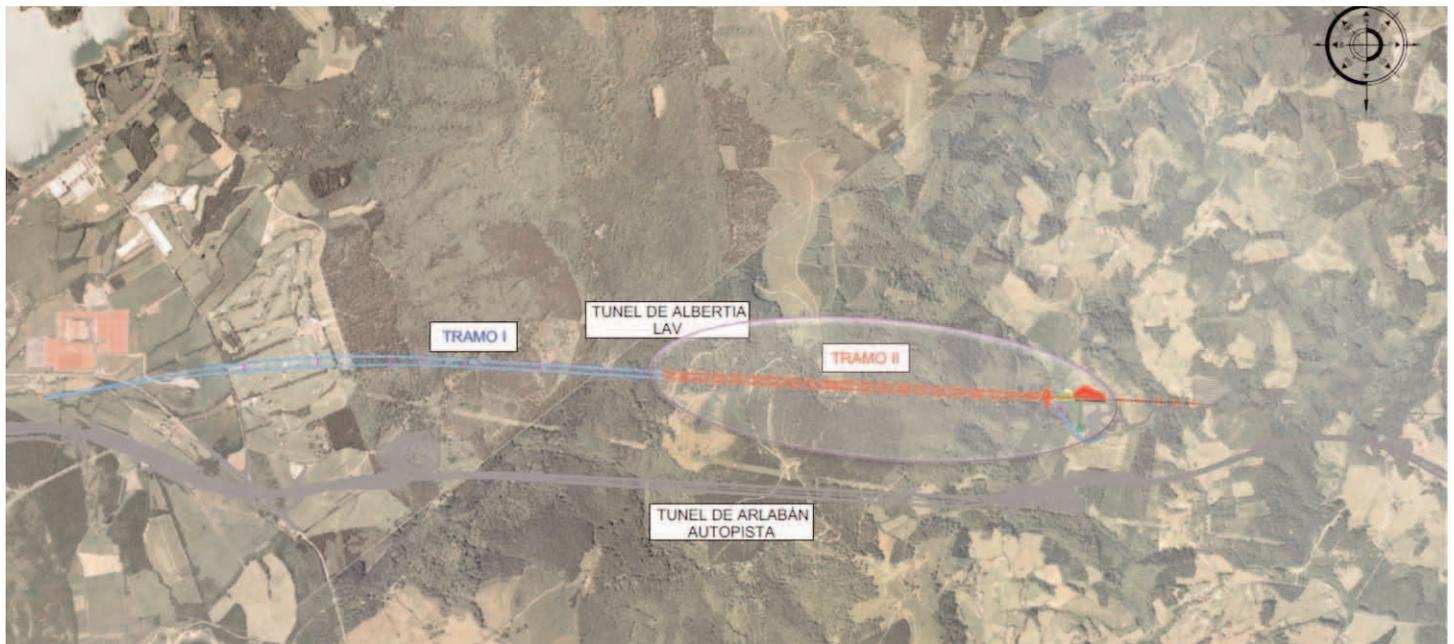


Fig.1.

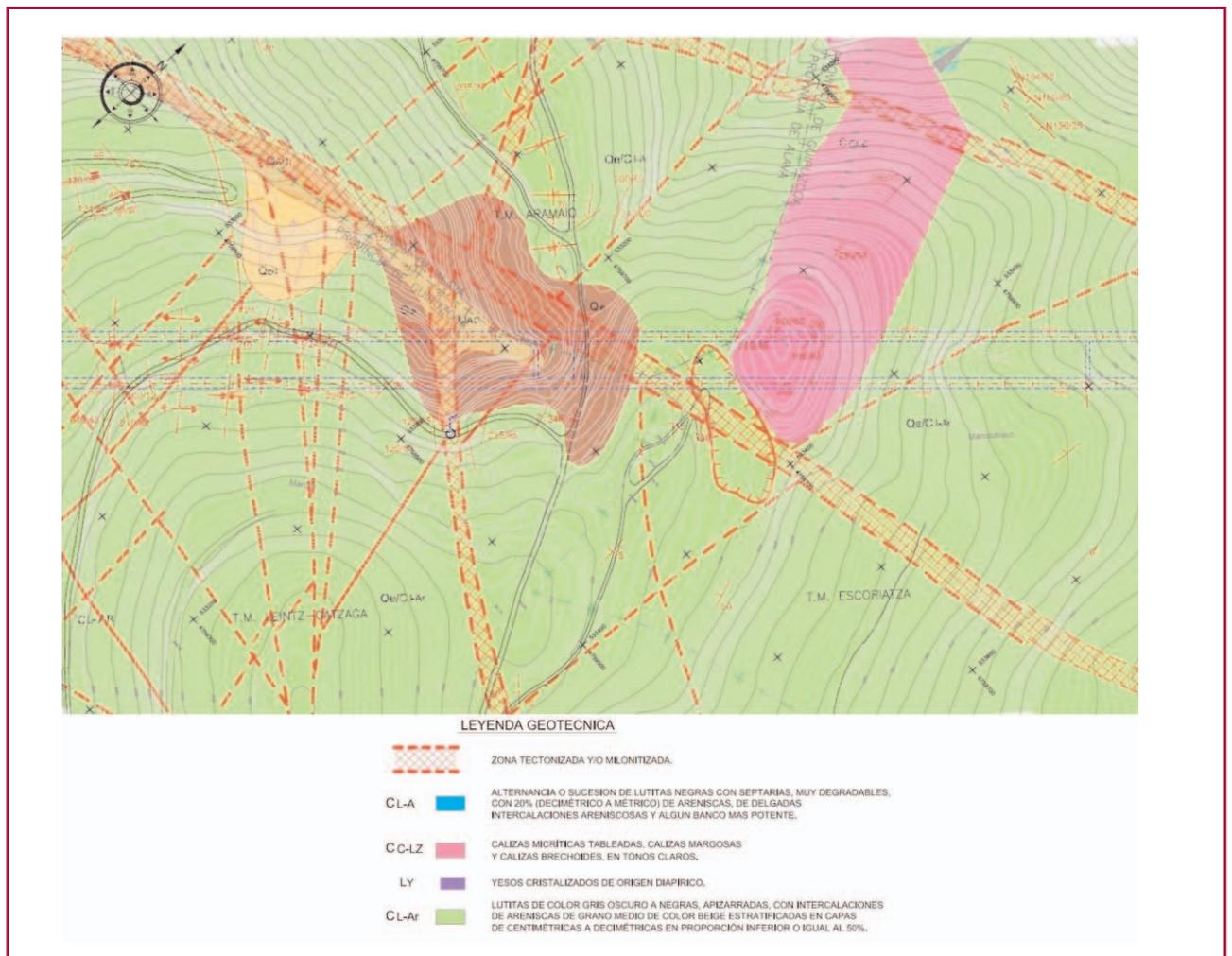


Fig. 2.

2. Entorno geológico geotécnico

El Proyecto de Construcción dentro del subtramo II define 2 grupos geotécnicos que se verán afectados por la excavación del túnel:

- Grupo CLAR: Es una alternancia tabular y rítmica de paquetes decimétricos de areniscas silíceas algo micáceas y lutitas o limolitas. El porcentaje de areniscas en relación a lutitas y/o limolitas es del 50%; se atraviesa desde el PK 5+000 hasta el PK 5+600.
- Grupo CLA: Desde el PK 5+600 y hasta el emboquille de salida se reconocen lutitas con septarias y lutitas bituminosas. Corresponden a rocas muy foliadas, de naturaleza predominantemente arcillosa, con cierta composición carbonosa y fácilmente deleznable.

A nivel geotécnico, durante la fase de avance se han detectado dos fenómenos que afectan determinantemente a la ejecución del túnel: tramos con presencia de facies sulfatadas (anhidritas y yesos) y tramos afectados por procesos de fluencia.

Ambos fenómenos se producen aproximadamente entre los PK 5+700 y PK 6+300; en este tramo las coberturas son superiores a 300 m y se atraviesa la formación CLA (Figura 2).

3. Presencia de facies sulfatadas (anhidritas y/o yeso)

Durante la ejecución del túnel se han llevado a cabo los siguientes trabajos de reconocimiento y caracterización de las facies sulfatadas:

- Campaña complementaria de reconocimiento. Se realizaron tres sondeos verticales en el tramo de presencia de facies sulfatadas, con testificación de sondeos y determinación de anhidritas y yeso mediante ensayos de difracción de rayos X y reconocimiento petrográfico de láminas delgadas (TEAM INGENIERÍA S.L.).
- Muestreo en frentes de excavación. Se tomaron muestras de facies sulfatadas en todos los frentes de excavación dentro del tramo con presencia de anhidritas y se determinó el contenido de anhidritas y yesos mediante ensayos de difracción de rayos X (SAITEC).

A partir de estos trabajos de reconocimiento y caracterización se ha procedido a ubicar de forma

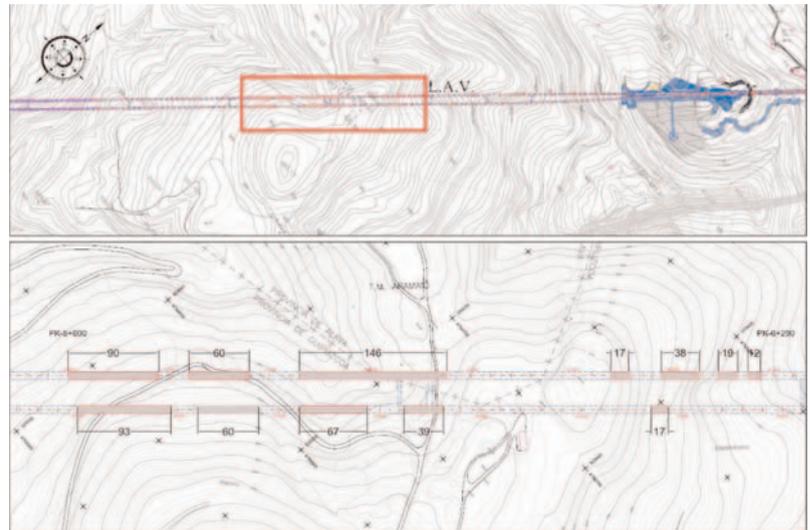
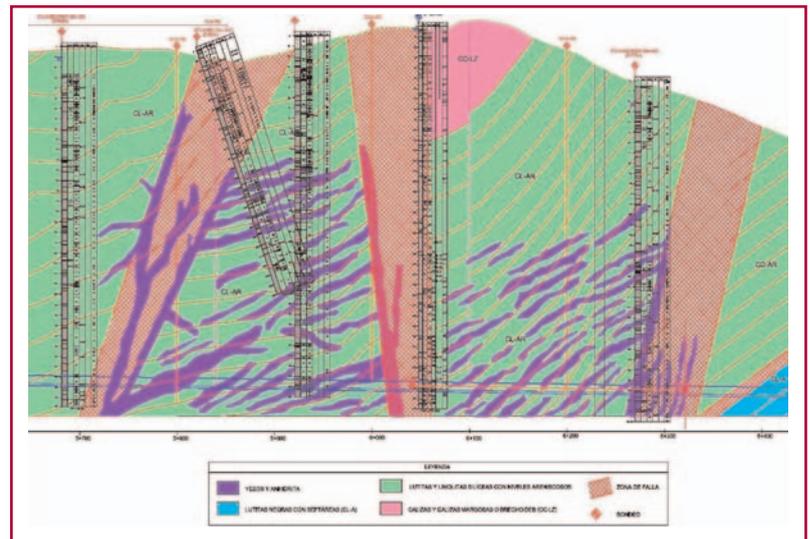
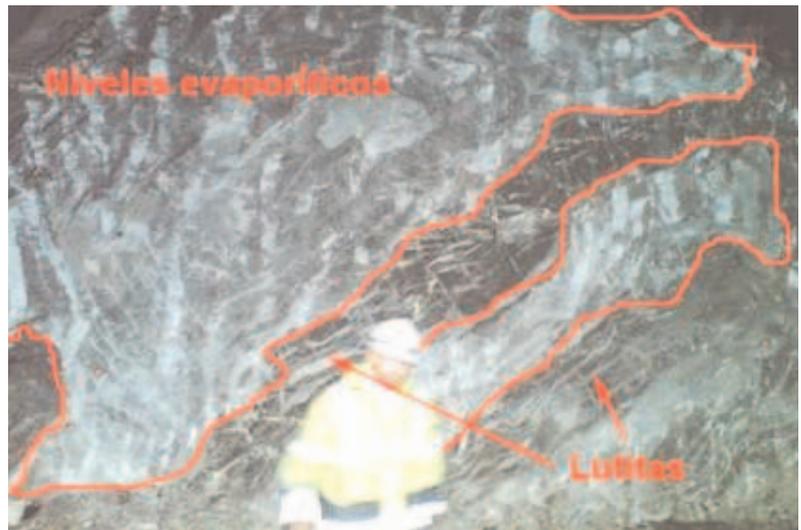


Fig. 3.



Arriba, fig. 4. Abajo fotografía 1.



aproximada las facies sulfatas. Éstas se han reconocido entre los PK 5+700 y PK 6+300 (Figura 3 y 4).

Desde un punto de vista geotécnico, la presencia de las facies sulfatadas en los frentes de excavación se traduce en valores de índice RMR básico superiores a 40. El grado de fracturación es medio (RQD 50-70%) y no existe presencia de agua.

Los niveles evaporíticos (anhidrita y yeso) intercalados dentro de la Formación CLA forman 3 tipos de estructuras (Fotografía 1).

- Anhidritas/yeso masivos intercalados en los niveles lutíticos.
- Estructuras brechoides de lutitas y anhidrita/yeso.
- Anhidrita/yeso como relleno de juntas.

En lámina delgada se identifica una estructura masiva y fábrica aparentemente isótropa. Presentan una textura cristalina, constituida esencialmente por cristales tabulares de anhidrita y en pequeñas proporciones de yeso (Fotografía 2).

La formación de estas facies estaría estrechamente relacionada a la Orogenia Alpina. En este periodo se formaron grandes fallas que enraízan en los depósitos plásticos del Keuper. Esta intensa fracturación favorecería la circulación de fluidos, y por consiguiente la disolución de las rocas evaporíticas situadas en los depósitos Trásicos y del tránsito Jurásico-Cretácico, llegando a saturarse en sulfatos (1).

Estos fluidos saturados en sulfatos, circularían preferentemente por las zonas más fracturadas (brechas de falla), inyectándose en las diferentes discontinuidades (estratificación y juntas). Los continuos cambios en las condiciones de los fluidos (temperatura, velocidad, composición y etc.) podrían provocar la precipitación de cristales de yeso y anhidrita dentro del fluido, formando una masa de cristales con fluido intersticial.

La removilización de estas masas generarían las laminaciones y los pequeños pliegues enteroflúcticos. En muchos casos los cambios de volumen que producen esta removilización y cristalización llegan a plegar y fracturar las capas suprayacentes. Si esta removilización continua, engloban los fragmentos de lutita y arenisca anteriormente fracturados (Figura 5). Procesos similares a estos se han descrito en el Túnel de Sorbas.

La presencia de anhidritas provoca fenómenos de hinchamiento de gran importancia al hidratarse y convertirse en yeso (2); este hinchamiento provoca un au-

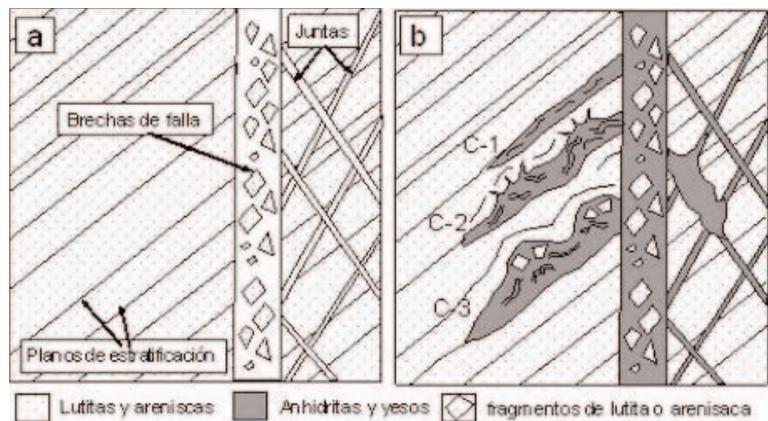


Fotografía 2.

mento de la presión sobre el sostenimiento/revestimiento según el siguiente proceso (3):

1. El agua infiltrada va diluyendo niveles sulfatados hasta alcanzar la concentración de saturación.
2. Cuando esta concentración de saturación se sobrepasa, el agua en contacto con el terreno continúa tomando sales, que son arrastradas sin diluir.
3. Al llegar a un punto en el que la velocidad del agua disminuye (zonas fisuradas y fracturadas) las partículas que no han podido disolverse tienden a precipitar.
4. La precipitación de sulfatos produce el crecimiento de yesos fibrosos en fisuras, que actúan levantando el terreno como un gato hidráulico. Dicha precipitación se produce mediante dos mecanismos:
 - Cuando la temperatura baja por debajo de los 10°C se produce la precipitación de los sulfatos en las fisuras del terreno.
 - Otro mecanismo de precipitación es la desecación del agua en las fisuras, que provoca la sobresaturación y por tanto la precipitación.

Fig. 5.



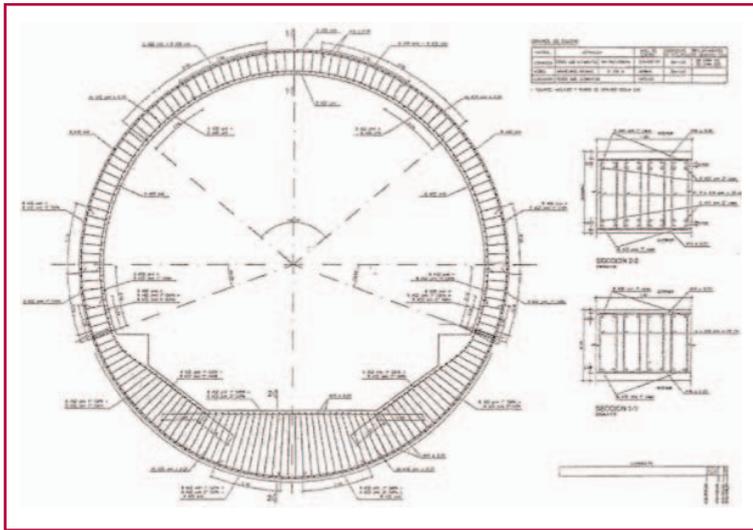


Fig. 6.

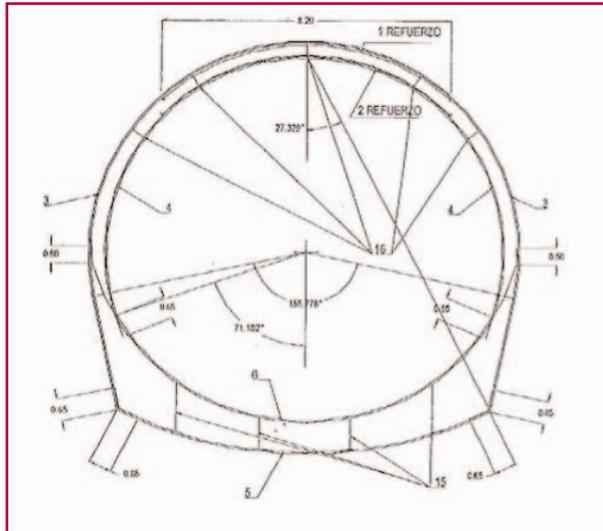


Fig. 7.

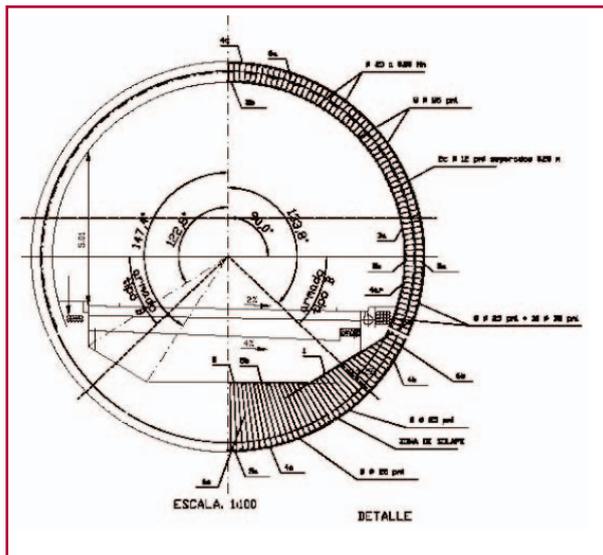


Fig. 8.

4. Diseño estructural en tramos con presencia de Anhidritas

Las principales soluciones que se han planteado en otros casos a la hora de diseñar el sostenimiento/revestimiento en terrenos afectados por anhidritas son las siguientes:

- **Solución flexible.** Consistiría en disponer una solera biapoyada y pilotarla para independizar los movimientos del terreno de la contrabóveda.
- **Solución semirrígida.** Consistiría en disponer una capa de poliuretano deformable, que absorbiese los movimientos del terreno.
- **Solución rígida.** Consistiría en ejecutar una sección lo suficientemente rígida que sea capaz de resistir las altas presiones esperables por el proceso de hinchamiento de las anhidritas.

En el Túnel de Alberta, al igual que en los casos que se mencionan a continuación, se ha optado por una solución rígida, ya que es la que, a priori, más garantías de éxito ofrece.

A continuación se presentan los criterios de dimensionamiento así como las diferentes soluciones constructivas adoptadas en otros túneles con anhidritas.

Túnel de Lilla

El Túnel de Lilla discurre por terrenos terciarios, formados mayoritariamente por argilitas y anhidritas.

La presencia de anhidritas supuso presiones de hinchamiento máximas de 4,24 MPa, provocando levantamientos de solera de hasta 45 cm.

En el diseño de la sección estructural se adoptaron como presiones de hinchamiento 4,5 MPa para la contrabóveda y de 2,5 MPa para la bóveda (Figura 6).

Túnel de Fabares

Los túneles de Fabares atravesaban materiales fundamentalmente del Triásico superior (Keuper), formados por arcillas y argilitas rojas con intercalaciones delgadas de arcillas grises y verdes, margas, calizas y dolomías, y con frecuentes niveles de yesos, anhidritas y otras sales marinas. En el caso del Túnel de Fabares se adoptaron presiones de hinchamiento de 6 MPa (Figura 7).

Túnel de Arlaban

El túnel de Arlaban atraviesa formaciones con presencia de anhidritas dentro de la formación Bolívar, compuesta por argilitas y areniscas y en menor medida calizas y yesos. Como se ha comentado este túnel discurre paralelo al túnel de Alberta (Figura 8).

El hormigón que se empleó fue de 550 kg/cm² de resistencia característica a compresión. La cuantía de acero por metro lineal fue de 7.884 kg. El espesor de la bóveda diseñada fue de 0,67 m. Para su dimensionamiento se tomaron como presiones de hinchamiento de referencia 5 MPa.

Túnel de Alberta

En el túnel de Alberta se han establecido los siguientes criterios de diseño:

- Secciones próximas a circulares, que eviten esquinas con concentración de esfuerzos.
- Contrabóveda robusta que limite los desplazamientos verticales.

En el caso del Túnel de Alberta se ha optado por dimensionar la sección para una presión de hinchamiento de 5 MPa, similar a la empleada en el dimensionamiento del Túnel de Arlaban.

Se ha diseñado una estructura rígida, frente a soluciones semirígidas o flexibles, ya que se estima que proporcionará una solución estructural más fiable (Figura 9 y 10).

5. Problemática asociada a fenómenos de fluencia (squeezing)

Una misma roca puede presentar, dependiendo de la presión de confinamiento, un comportamiento frágil o dúctil. En el caso de comportamiento dúctil, dominan generalmente los **fenómenos de fluencia**. Estos fenómenos conllevan que, a partir de una cierta deformación, el comportamiento del terreno no es elastoplástico sino elastoplástico-viscoso, es decir, entran en juego las propiedades dependientes del tiempo del material (4) (5) (6) y (7). Así, según aumentan las deformaciones se reduce progresivamente la cohesión del terreno.

En el Túnel de Alberta el tramo afectado por el fenómeno de fluencia se localiza entre los PK 5+900 y

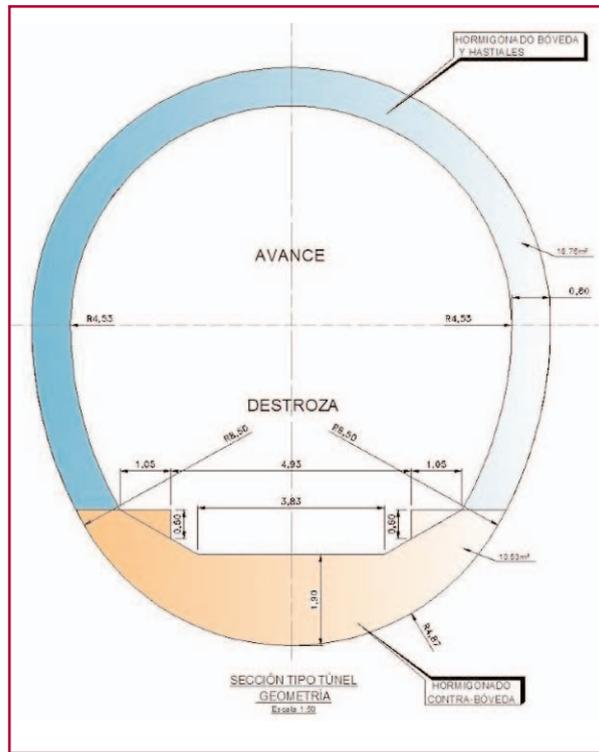


Fig. 9.

6+200, siempre con coberteras superiores a 300 m y en materiales de la formación CLA.

Desde un punto de vista geotécnico la formación CLA son lutitas arcillosas en bancos centimétricos con las superficies de la estratificación pulidas y lisas. El grado de fracturación es muy alto (RQD inferiores a 20%),

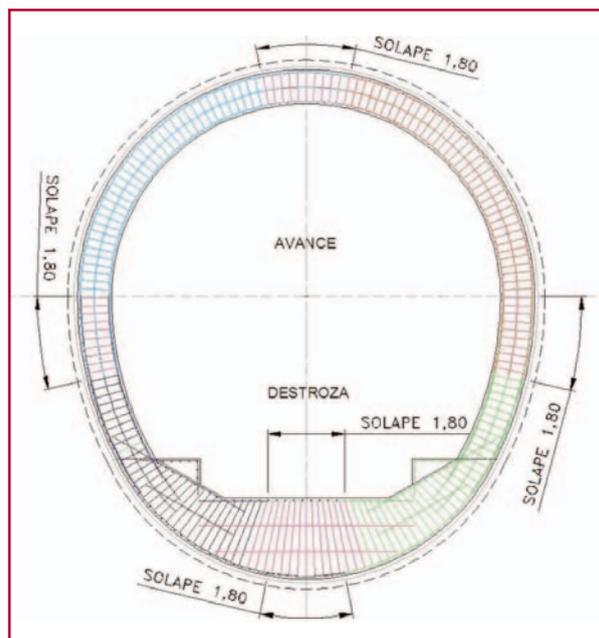
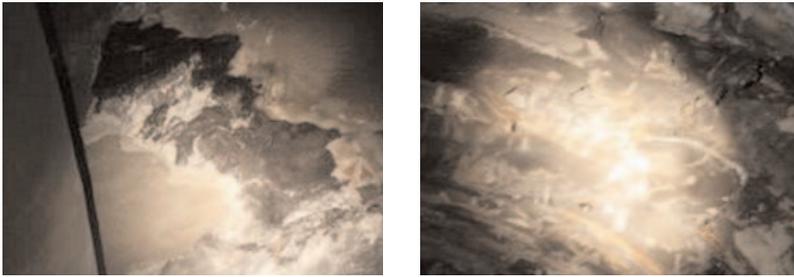


Fig. 10.



Fotografías 3 y 4.

no existe presencia de agua y el índice RMR básico en los frentes de excavación ha sido 25-30.

El fenómeno de fluencia (squeezing) se puso de manifiesto durante el control de las secciones de convergencia, donde se midieron desplazamientos entre hastiales superiores a 250 mm y velocidades de convergencia de 1-3 mm/día, que en algunos casos llegaron a superar los 20 mm/día. Estos movimientos se evidenciaron en caídas de gunita, grietas y desconchones (Fotografías 3 y 4).

El principal riesgo del fenómeno de fluencia reside en la pérdida de las propiedades resistentes del terreno (reducción de cohesión) según aumentan las deformaciones del terreno. Adicionalmente, esta pérdida de propiedades supone un aumento del radio de la cuña de plastificación en el entorno del túnel.

Es decir, según mayores son los desplazamientos, mayores son los esfuerzos a los que se verá sometido el sostenimiento y consecuentemente más complicada su solución.

La valoración del riesgo de fluencia se realiza desde dos perspectivas:

- Durante la fase de proyecto. A partir de formulaciones de diversos autores se estudia el riesgo de fluencia según el estado tensional en el que se encontrará el túnel y sus propiedades geomecánicas (8).
- Durante la fase de obra. A partir de las mediciones de las convergencias se comprueba si los desplazamientos se encuentran en rangos de fluencia (9).

Se han seguido los criterios de los siguientes autores para estimar el riesgo de squeezing en la ejecución del túnel:

Criterio de Barla (8)

Establece el riesgo de fluencia a partir de la resistencia a compresión del macizo y de su estado tensio-

nal. Este criterio predice el riesgo de que se produzcan fenómenos de fluencia a partir de la relación:

$$\frac{\sigma_{cmass}}{\gamma \cdot Z}$$

siendo:

σ_{cmass} , la resistencia a compresión del macizo rocoso (9)

γ , el peso específico de la roca suprayacente

Z, la cobertera sobre el túnel.

| GRADO DE FLUENCIA (BARLA) | $\frac{\sigma_{cmass}}{\gamma \cdot Z}$ |
|---------------------------|---|
| Sin fluencia | > 1,00 |
| Fluencia ligera | 0,40 - 1,00 |
| Fluencia moderada | 0,20 - 0,40 |
| Fluencia severa | < 0,20 |

La caracterización geomecánica de la formación CLA en el tramo con presencia de fluencia se realiza a partir del método propuesto por Hoek et al. (2002):

- Índice GSI: 26
- Parámetro mi: 6
- Resistencia a compresión simple: 29,3 MPa
- Cobertera: 320 m

De lo que se derivan los siguientes parámetros según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

- Módulo de deformación: 651,03 MPa
- Cohesión: 0,494 MPa
- Ángulo de rozamiento: 24°
- Compresión simple: 2,20 MPa.

Considerando una densidad media de la formación CLA de 2,5 tn/m³, el grado de fluencia general que se obtiene en el tramo considerado se define en las siguientes tablas (Tabla 1 y 2).

Se observa que, según el criterio de Barla, existe riesgo de fluencia moderada en la mayor parte del tramo analizado.

Criterio de Hoek y Marinos (9)

Establece la fluencia que se produce en el túnel a partir del control de las deformaciones durante la fase de excavación. En función de los resultados se esta-

Tabla 1. TUBO 1 IZQUIERDO

| Convergencia | PK | Montera (m) | RMRb | GSI | σ_m (t/m ²) | Barla (1995) |
|--------------|-------|-------------|------|-----|--------------------------------|--------------|
| C-29 | 6+337 | 275 | 38 | 33 | 219 | 0,31 |
| C-31 | 6+230 | 307 | 59 | 54 | 365 | 0,48 |
| C-31A | 6+200 | 321,8 | 44 | 39 | 257 | 0,32 |
| C-32 | 6+187 | 338 | 42 | 37 | 241 | 0,29 |
| C32A | 6+156 | 338 | 31 | 26 | 179 | 0,2 |
| C-33 | 6+130 | 349 | 51 | 46 | 305 | 0,34 |
| C-34 | 6+080 | 343 | 32 | 27 | 185 | 0,21 |
| C-35 | 6+055 | 342 | 36 | 31 | 207 | 0,23 |
| C-36 | 6+021 | 342 | 29 | 24 | 168 | 0,19 |
| C-37 | 6+005 | 342 | 30 | 25 | 174 | 0,2 |
| C-38 | 5+990 | 338 | 28 | 23 | 163 | 0,19 |
| C-39 | 5+963 | 330 | 33 | 28 | 191 | 0,22 |
| C-40 | 5+935 | 323 | 48 | 43 | 283 | 0,34 |
| C-41 | 5+910 | 316 | 44 | 39 | 257 | 0,31 |
| C-42 | 5+882 | 311 | 41 | 36 | 237 | 0,29 |

Tabla 1. TUBO 2 DERECHO

| Convergencia | PK | Montera (m) | RMRb | GSI | σ_m (t/m ²) | Barla (1995) |
|--------------|-------|-------------|------|-----|--------------------------------|--------------|
| C-29 | 6+362 | 274 | 40 | 35 | 263 | 0,37 |
| C-30 | 6+309 | 289 | 52 | 47 | 231 | 0,31 |
| C-31 | 6+261 | 295 | 61 | 56 | 379 | 0,52 |
| C-32 | 6+215 | 305 | 55 | 50 | 338 | 0,43 |
| C-33 | 6+172 | 322 | 44 | 39 | 256 | 0,31 |
| C-34 | 6+113 | 347 | 44 | 39 | 256 | 0,28 |
| C-34A | 6+080 | 347 | 53 | 48 | 321 | 0,36 |
| C-35 | 6+069 | 345 | 48 | 43 | 283 | 0,32 |
| C-36 | 6+039 | 343 | 31 | 26 | 179 | 0,2 |
| C-37 | 6+010 | 345 | 32 | 27 | 185 | 0,21 |
| C-38 | 5+991 | 342,5 | 38 | 33 | 219 | 0,25 |
| C-39 | 5+962 | 338 | 32 | 27 | 185 | 0,21 |
| C-40 | 5+934 | 330 | 33 | 28 | 191 | 0,22 |
| C-41 | 5+912 | 326 | 39 | 34 | 225 | 0,27 |
| C-42 | 5+889 | 324 | 48 | 43 | 283 | 0,34 |
| C-43 | 5+859 | 305 | 45 | 40 | 267 | 0,35 |
| C-44 | 5+840 | 301 | 39 | 34 | 225 | 0,3 |

blecen medidas de sostenimiento adicionales a las ejecutadas.

Los rangos para estimar el fenómeno de fluencia son los señalados en el cuadro A.

En las tablas 3 y 4 se observan los desplazamientos y el riesgo de fluencia según este criterio.

A partir del criterio de Hoek y Marinos (9) se ha producido fluencia y desplazamientos superiores a

| Barla (1995) | |
|--|-------------------------------|
|  | No fluencia > 1,00 |
|  | Fluencia ligera 0,40 – 1,00 |
|  | Fluencia moderada 0,20 – 0,40 |
|  | Fluencia severa < 0,20 |
| $\frac{\sigma_{cmass}}{\gamma \cdot Z}$ | |

CUADRO A

| CLASE | CONVERGENCIA | FLUENCIA O SQUEEZING |
|-------|--------------|--|
| A | < 1% | No se desarrollan fenómenos de fluencia |
| B | 1 - 2,5 % | Fluencia ligera: problemas de sostenimiento resolubles con gunita, cerchas ligeras y bulones |
| C | 2,5 - 5 % | Fluencia moderada: problemas resolubles con hormigón proyectado y cerchas pesadas |
| D | 5 - 10 % | Fluencia severa: sostenimiento muy pesado, problemas de estabilidad del frente, enfilajes y paraguas |
| E | > 10% | Fluencia extrema: sostenimientos especiales, graves problemas de estabilidad del frente |

Tabla 3. TUBO 1 IZQUIERDO

| Convergencia | PK | Montera (m) | RMRb | Desplazamiento acumulado (mm) | Hoek y Marinos 2000 | Velocidad tras refuerzo (mm/día) |
|--------------|-------|-------------|------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| C-31 | 6+230 | 307 | 59 | 13,76 | 0,1376 | 0,05 |
| C-31A | 6+200 | 321,8 | 44 | 30,66 | 0,3066 | 0,04 |
| C-32 | 6+187 | 338 | 42 | 103,86 | 1,0386 | 0,11 |
| C32A | 6+156 | 338 | 31 | 65,56 | 0,6556 | 0,12 |
| C-33 | 6+130 | 349 | 51 | 102,26 | 1,0226 | 0,1 |
| C-34 | 6+080 | 343 | 32 | 105,09 | 1,0509 | 0,15 |
| C-35 | 6+055 | 342 | 36 | 130,21 | 1,3021 | 0,08 |
| C-36 | 6+021 | 342 | 29 | 111,29 | 1,1129 | 0,08 |
| C-37 | 6+005 | 342 | 30 | 97,29 | 0,9729 | 0,09 |
| C-38 | 5+990 | 338 | 28 | 151,63 | 1,5163 | 0,08 |
| C-39 | 5+963 | 330 | 33 | 146,29 | 1,4629 | 0,12 |
| C-40 | 5+935 | 323 | 48 | 38,1 | 0,381 | 0,02 |
| C-41 | 5+910 | 316 | 44 | 30,77 | 0,3077 | 0,04 |

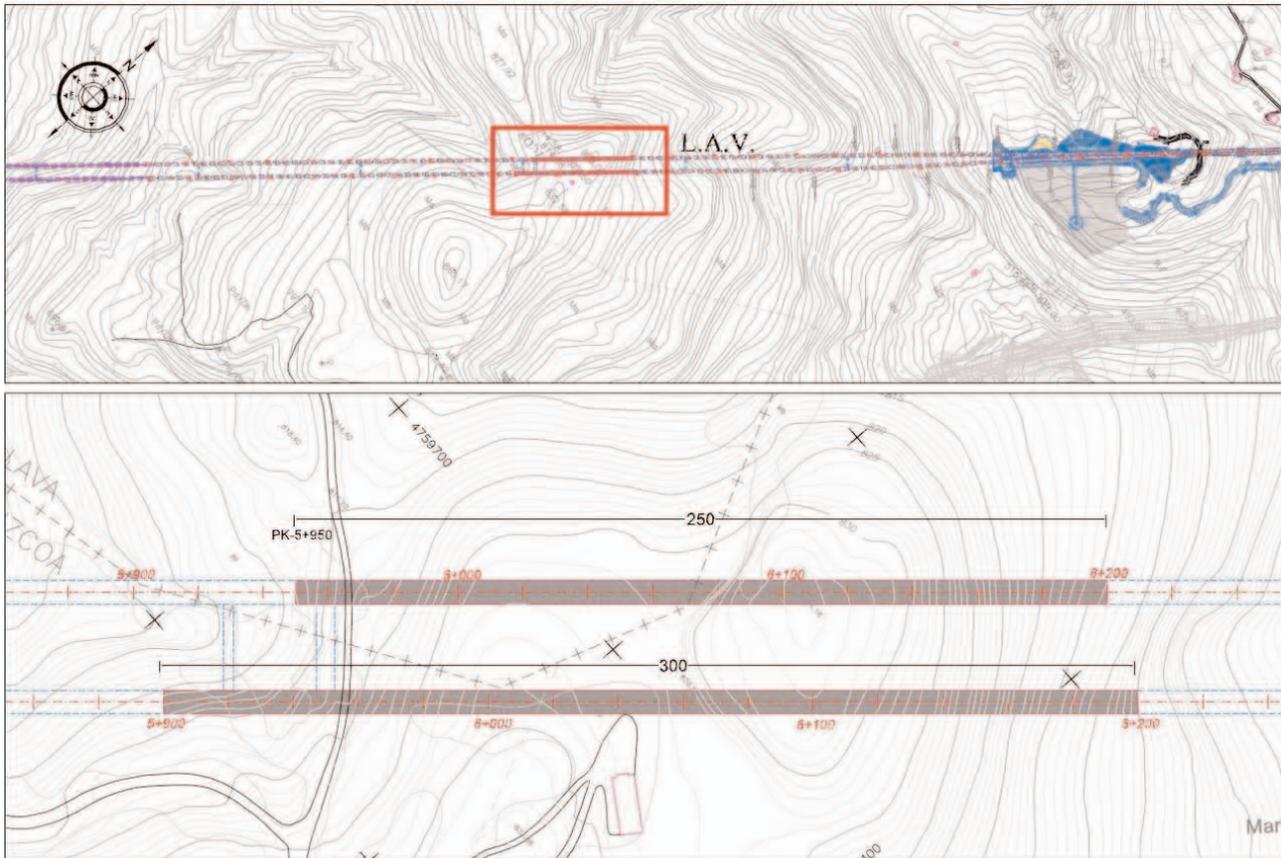
Tabla 4. TUBO 2 DERECHO

| Convergencia | PK | Montera (m) | RMRb | Desplazamiento acumulado (mm) | Hoek y Marinos 2000 | Velocidad tras refuerzo (mm/día) |
|--------------|-------|-------------|------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| C-31 | 6+261 | 295 | 61 | 11,6 | 0,116 | 0,06 |
| C-32 | 6+215 | 305 | 55 | 52,46 | 0,5246 | 0,37 |
| C-33 | 6+172 | 322 | 44 | 87,77 | 0,8777 | 0,13 |
| C-34 | 6+113 | 347 | 44 | 171,11 | 1,7111 | 0,16 |
| C-34A | 6+080 | 347 | 53 | 110,4 | 1,104 | 0,16 |
| C-35 | 6+069 | 345 | 48 | 130,13 | 1,3013 | 0,11 |
| C-36 | 6+039 | 343 | 31 | 249,3 | 2,493 | 0,1 |
| C-37 | 6+010 | 345 | 32 | 268,67 | 2,6867 | 0,15 |
| C-38 | 5+991 | 342,5 | 38 | 154,7 | 1,547 | 0,17 |
| C-39 | 5+962 | 338 | 32 | 109,16 | 1,0916 | 0,15 |
| C-40 | 5+934 | 330 | 33 | 110,73 | 1,1073 | 0,1 |
| C-41 | 5+912 | 326 | 39 | 56,05 | 0,5605 | 0,18 |
| C-42 | 5+889 | 324 | 48 | 59,72 | 0,5972 | 0,15 |
| C-43 | 5+859 | 305 | 45 | 62,72 | 0,6272 | 0,1 |

Umbral de riesgo (Hoek et al., 2001)

- > 100 mm (1 % de diámetro equivalente): no existen problemas de fluencia
- 100 - 250 mm (1 - 2,5 % de diámetro equivalente): fluencia moderada
- 250 - 500 mm (2,5 - 5 % de diámetro equivalente): fluencia severa

Fig. 11.



100 mm (1% del diámetro equivalente del túnel) en tramos específicos, que ha sido donde se ha hecho necesario el refuerzo del sostenimiento en avance.

En conclusión, se corrobora que cuando la formación CLA presenta un grado de fracturación alto ($RMR_{básico}$ 25-30) y coberteras superiores a 300 m existe riesgo de que se produzca la fluencia del macizo rocoso en el entorno de la excavación.

En la Figura 11 se ubican los tramos del túnel donde existe riesgo de fluencia.

6. Actuaciones de refuerzo en tramos con fluencia.

Proceso constructivo

Tras comprobar la existencia de evidentes fenómenos de fluencia se llevaron a cabo las siguientes actuaciones de refuerzo.

- Malla de bulones autoperforantes. Para mejorar el terreno y contener los desplazamientos se realizaron actuaciones de refuerzo mediante bulones autoperforantes de hasta 15 m de longitud (Fotografía 5 y 6).

Fotografías 5, 6 y 7.



- Solera de hormigón armado. Para evitar el cierre de la base de los hastiales y reducir el riesgo de fluencia se ejecutó una solera de 60 cm de hormigón armado (Fotografía 7).

Una vez ejecutado el refuerzo, la velocidad de convergencia entre hastiales disminuyó hasta valores de 0,1-0,2 mm/día.

Adicionalmente, tras observar las fuertes deformaciones se optó por la ejecución del sostenimiento más pesado previsto en Proyecto (independientemente del valor de índice RMR), mientras el túnel se encontrara bajo coberteras de más de 300 m.

La evolución de los desplazamientos tras las actuaciones se observan en las siguientes gráficas de convergencias (Figura 12 y 13).

Los problemas asociados a la excavación en fase de avance se verán incrementados en fase de destroza. Consecuentemente se llevarán a cabo las siguientes actuaciones, para reforzar la sección estructural:

- Ejecución de puntales HEB 300. Antes de proceder a ejecutar la destroza se han dispuesto pun-



Fotografía 8.

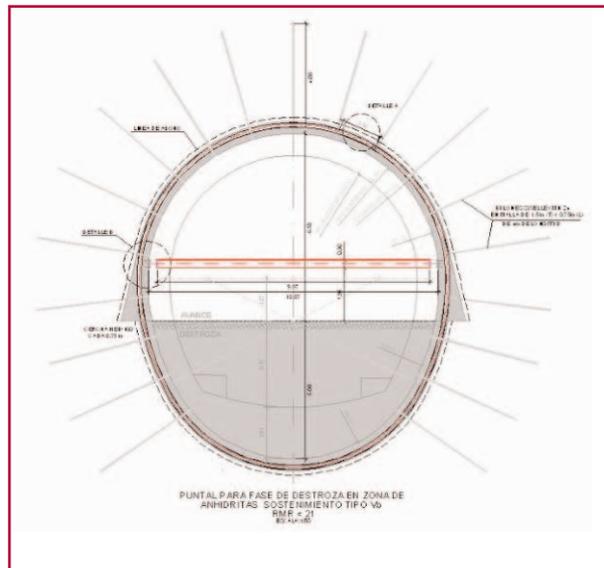


Fig. 14.

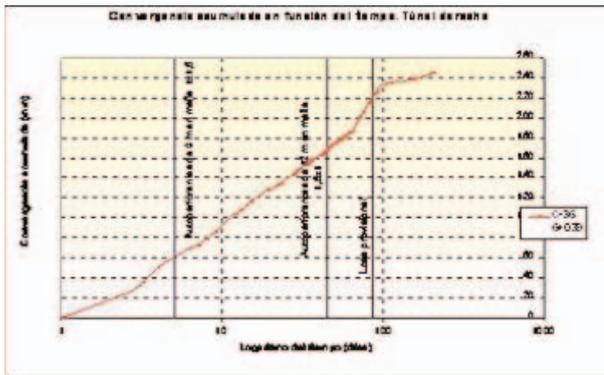


Fig. 12.

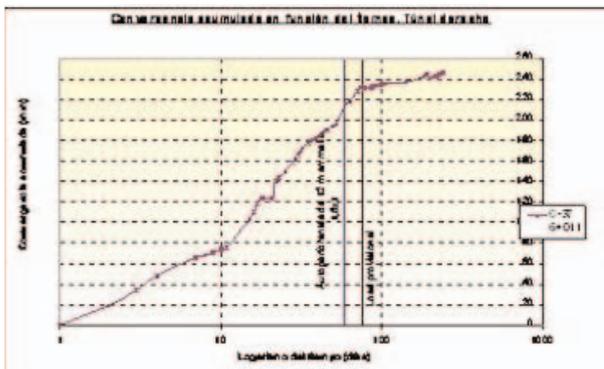


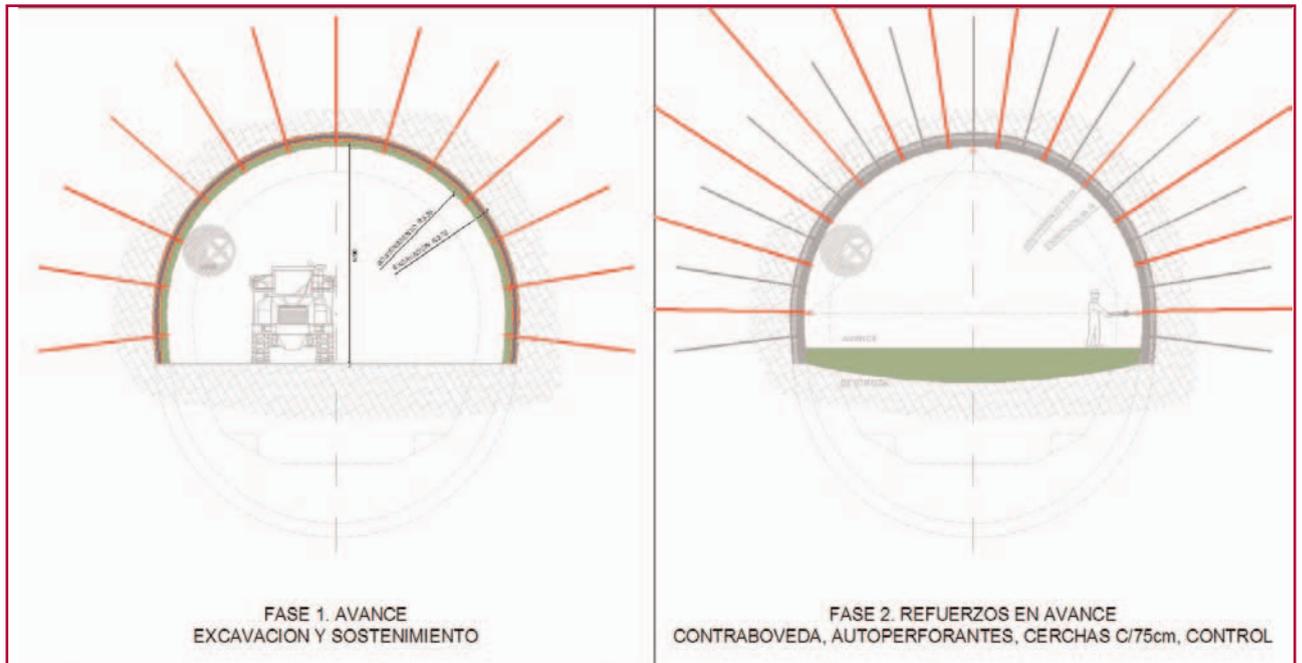
Fig. 13.

tales HEB 300 cada 3 m. Estos puntales tienen como función aportar el axil que en fase de avance aporta la solera provisional. De esta forma, ayudarán a reducir los desplazamientos y las tensiones en fase de destroza (Fotografía 8 y Figura 14).

- Ejecución de destroza. La destroza se realizará cerrando las cerchas HEB 160 en contrabóveda, para mejorar el reparto tensional en el túnel.
- Ejecución de revestimiento. Una vez ejecutada la destroza se deberá proceder, con la mayor rapidez que lo permita el proceso constructivo, a ejecutar el revestimiento.

Debido a que durante la ejecución de la destroza el estado tensional del túnel aumentará, se llevarán a cabo las siguientes medidas de control y actuación inmediata:

Fig. 15.

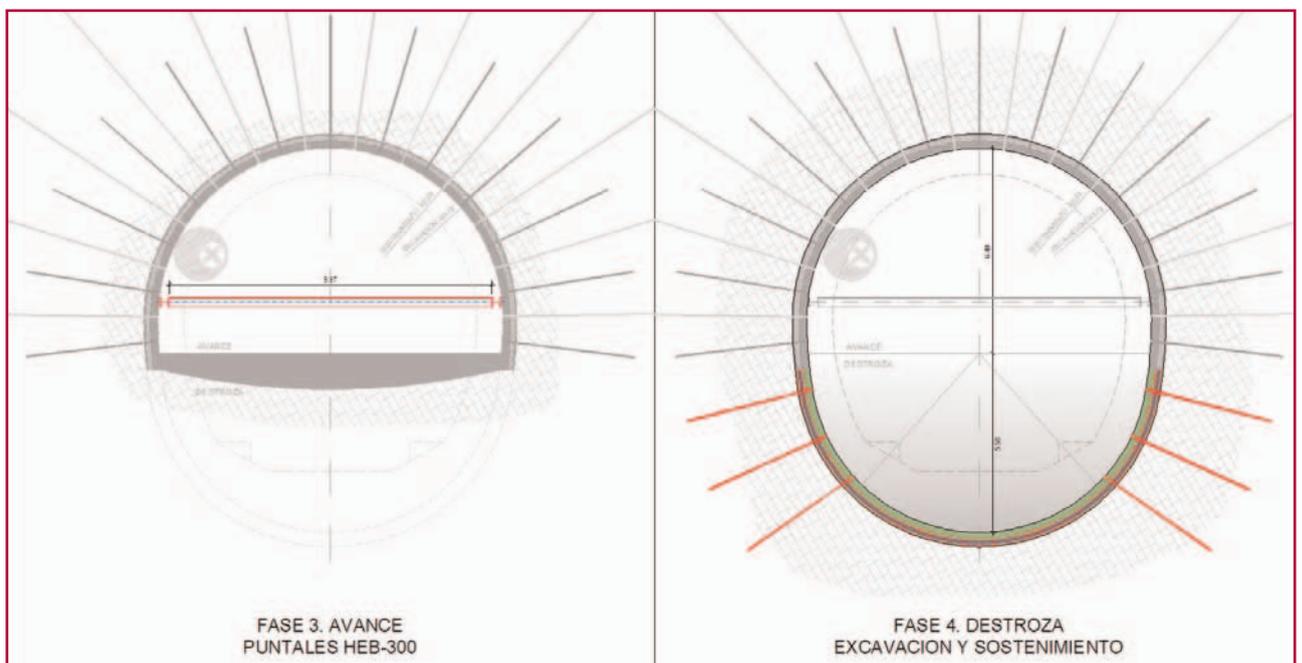


- Aumento del control de convergencias. Para ello, además de las mediciones de convergencias en destroza, se seguirán midiendo los desplazamientos horizontales entre hastiales en las mismas convergencias que se están midiendo en fase de avance.
- Ejecución de refuerzo de emergencia mediante bulones autoperforantes en destroza. En el

caso de que se detecten movimientos fuera de los previstos en las modelizaciones o caídas de gunita y/o grietas se ejecutarán refuerzos mediante bulones autoperforantes en destroza.

A continuación se detallan las diferentes fases constructivas (Figuras 15 a 20).

Fig. 16.



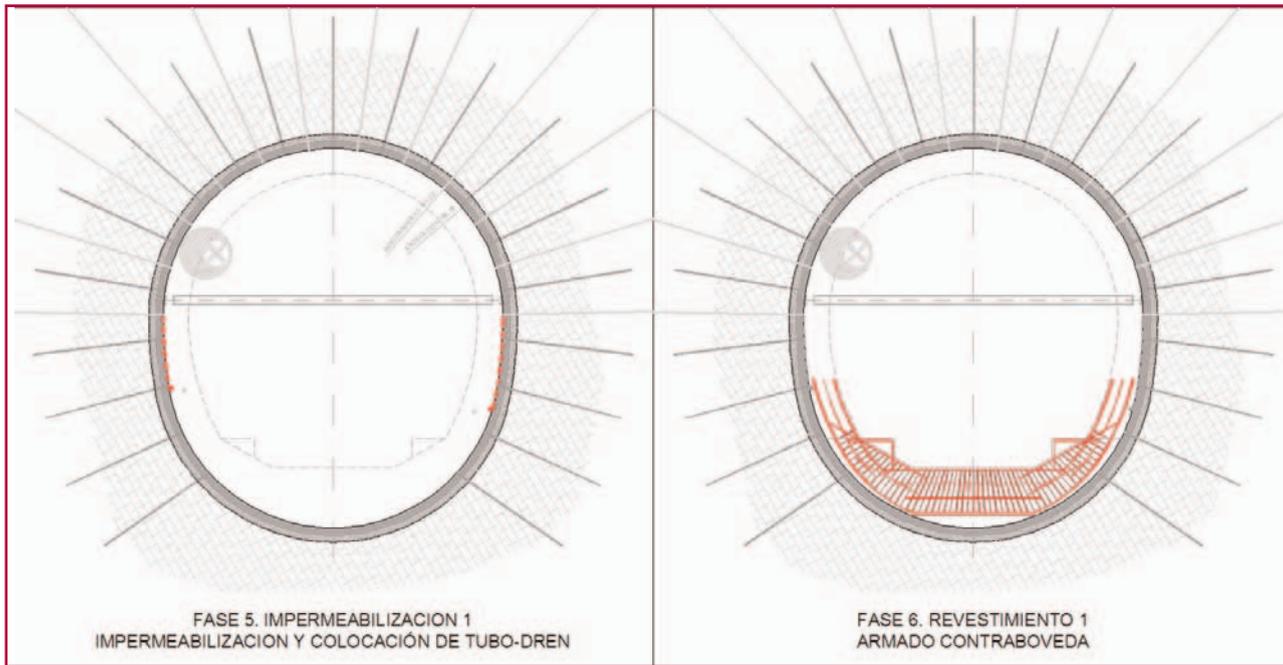


Fig. 17.

7. Validación del sostenimiento/revestimiento ante fenómenos de fluencia.

Se ha seguido la siguiente metodología para la validación del nuevo proceso constructivo:

- En primer lugar se ha procedido a realizar un análisis retrospectivo (Back Analysis), con el pro-

grama de diferencias finitas FLAC 3D, que ha permitido ajustar los parámetros del terreno mediante la reproducción de los desplazamientos medidos en el túnel en el sostenimiento ejecutado.

Estos parámetros del terreno son los que posteriormente se han empleado para verificar los nuevos sostenimientos propuestos.

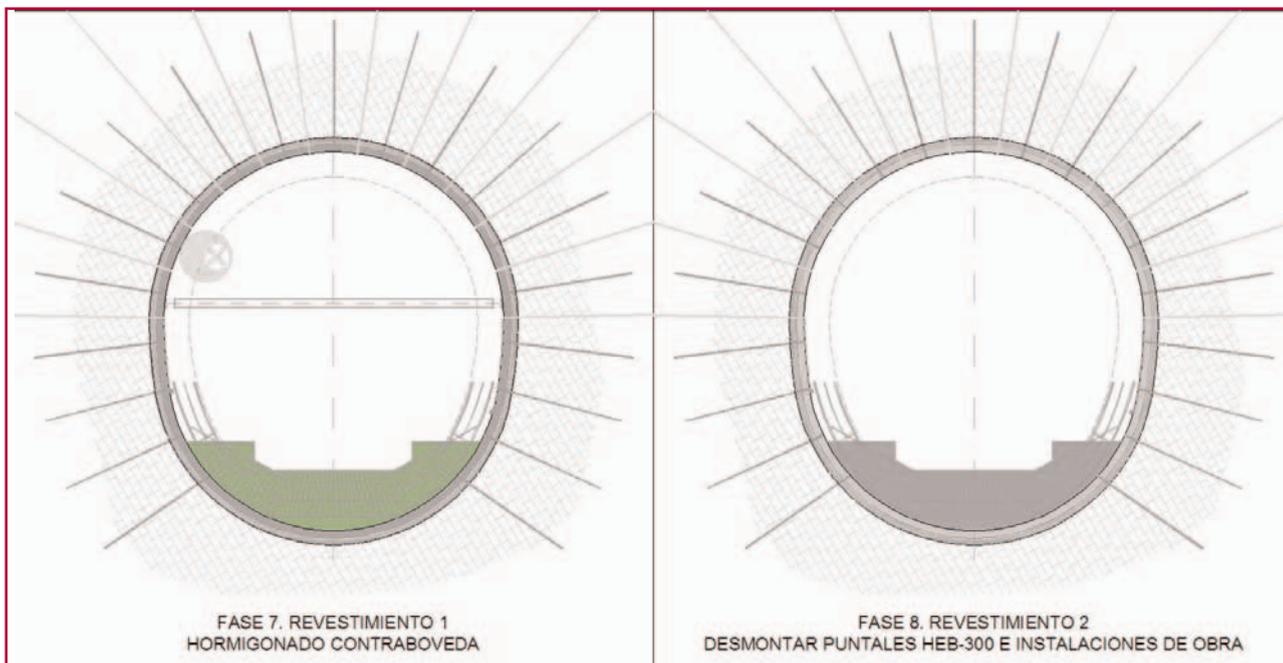
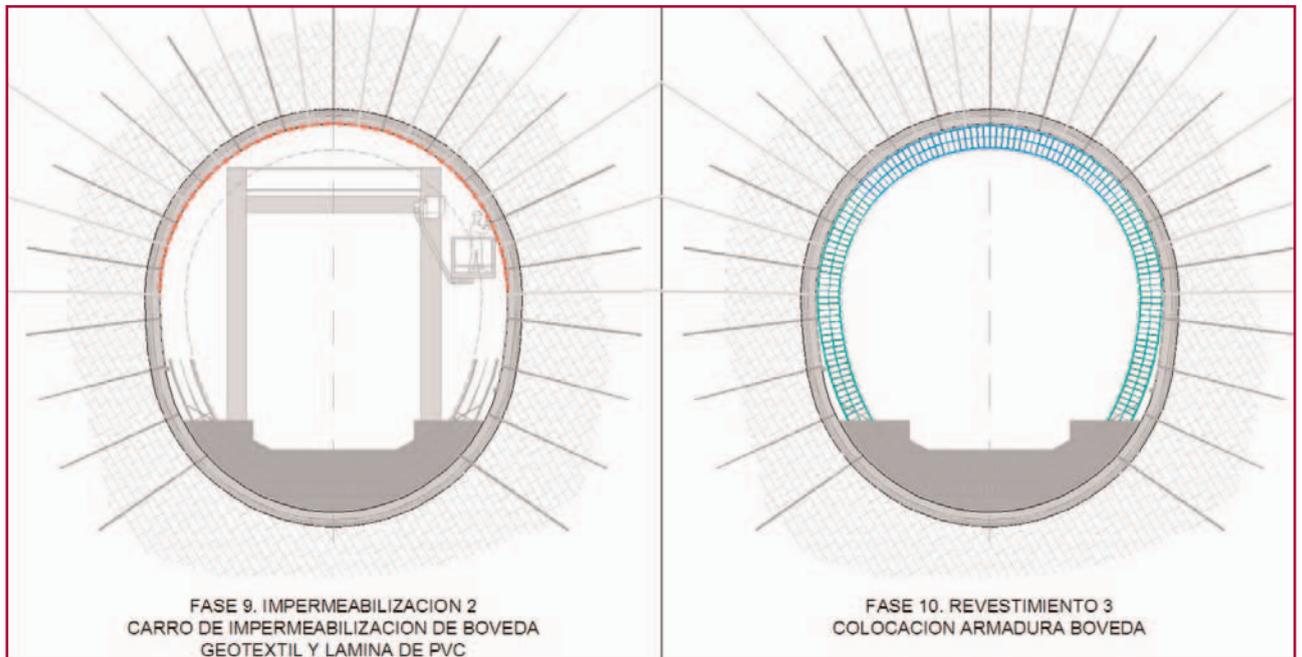


Fig. 18.

Fig. 19.

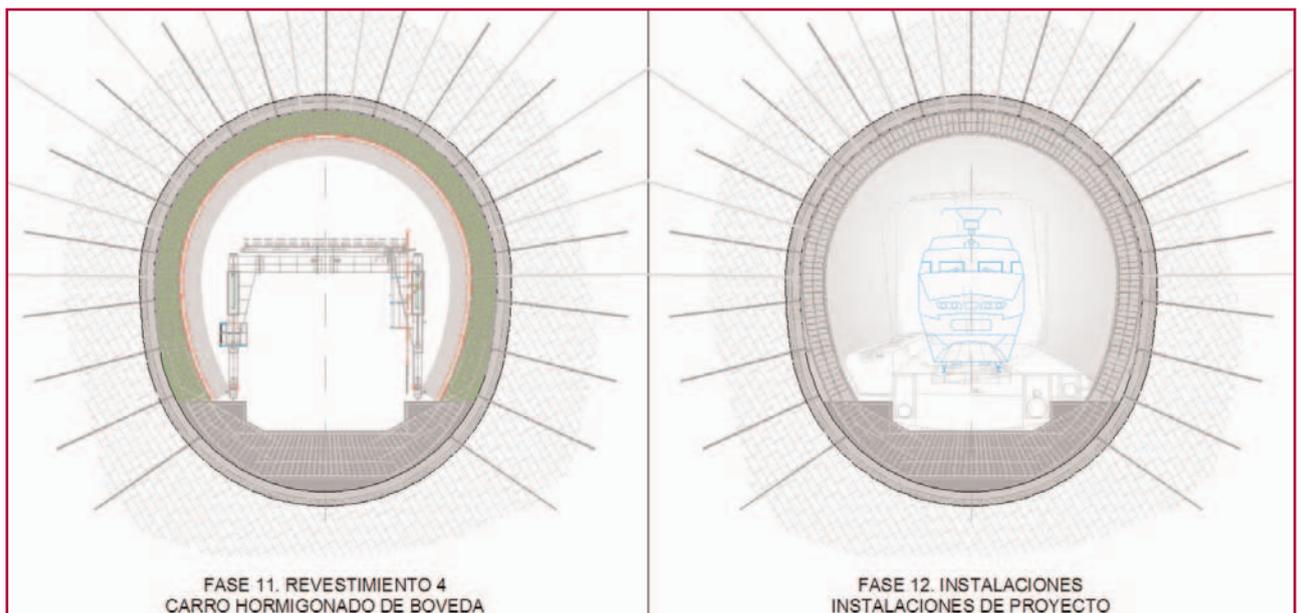


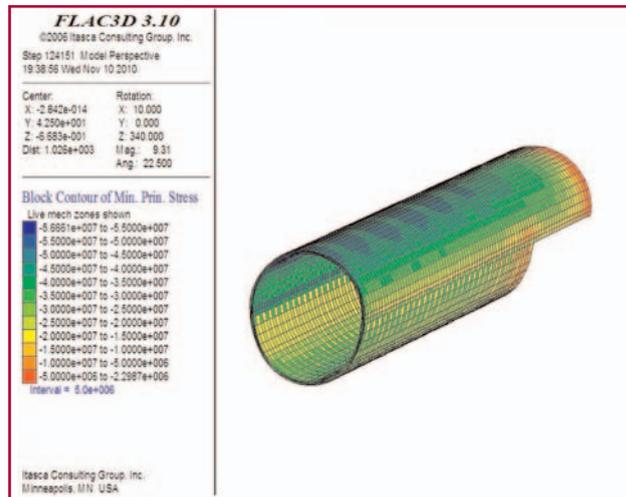
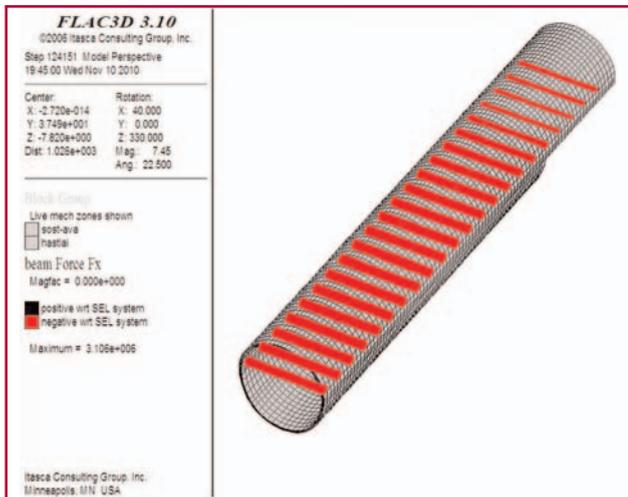
La caracterización de la litología CLA según el criterio de rotura de Hoek et. al., (10) es muy similar a la que se ha derivado de la aplicación del proceso de Back-Analysis. De esta manera se reafirma la validez del método utilizado para la caracterización del macizo rocoso en el tramo con fluencia y el dimensionamiento del sostenimiento y refuerzo del tramo (Tabla 5).

- Posteriormente se ha modelizado la fase de destroza tras la ejecución de los puntales de refuerzo. Se

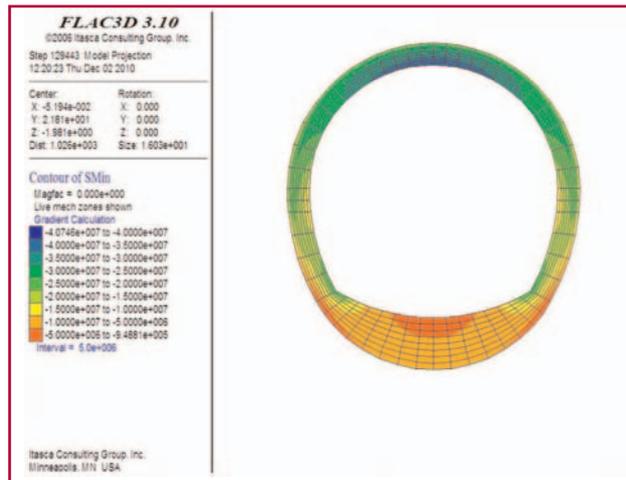
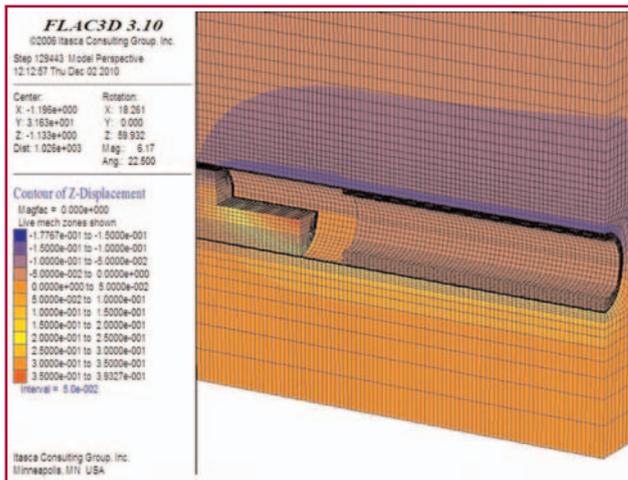
| Tabla 5 | | |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|
| | Hoek et al., (2002) | Back-Analysis (FLAC 3.10) |
| Módulo de deformación (MPa) | 651 | 697 |
| Coefficiente de Poisson | 0,22 | 0,22 |
| Cohesión (MPa) | 0,494 | 0,32 |
| Ángulo de rozamiento | 24° | 28° |

Fig. 20.





Figs. 21, 22, 23 y 24



ha comprobado la capacidad portante de los puntales y la variación del estado tensional del túnel en fase de destroza (Figura 15 y 16).

En la Figura 15 se comprueba cómo, al ejecutar la destroza, entran en carga los puntales hasta alcanzar axiles máximos de 310 Tn. Igualmente en el siguiente gráfico se observan los efectos tensionales en el entorno de los puntales una vez ejecutada la destroza (Figura 16).

- Finalmente se ha comprobado la validez estructural de la sección una vez se procede a eliminar los puntales y ejecutar el revestimiento definitivo (Figura 17 y 18).

8. Conclusiones

El túnel de Alberta es el túnel más largo de la línea Vitoria – Bilbao, con aproximadamente 4580 m; está

subdivido en dos subtramos, el subtramo I, que abarca desde el PK 2+500 (boca entrada) hasta el PK 5+000 y el subtramo II, desde el PK 5+000 y hasta el PK 7+080 (boca salida).

A nivel geotécnico, durante la fase de avance se han detectado dos fenómenos que afectan determinadamente a la ejecución del túnel: tramos con presencia de facies sulfatadas (anhidritas y yesos) y tramos afectados por procesos de fluencia.

Ambos fenómenos se producen aproximadamente entre el PK 5+700 y el PK 6+300; en este tramo las coberturas son superiores a 300 m y se atraviesa la formación CLA, donde predominan rocas muy foliadas, de naturaleza principalmente arcillosa, con cierta composición carbonosa y fácilmente deleznales.

La presencia de anhidritas provoca fenómenos de hinchamiento de gran importancia al hidratarse y convertirse en yeso (2); este hinchamiento provoca un

aumento de la presión sobre el sostenimiento/revestimiento.

Para afrontar los fenómenos de hinchamiento se ha adoptado una solución rígida, ya que es la que hoy en día más garantías de éxito ofrece.

Por otro lado, dentro de la formación CLA, se han atravesado tramos con grados de fracturación muy altos (RQD inferiores a 20%), e índices RMR básicos en los frentes de excavación menores de 30.

En estos tramos se han observado fenómenos de fluencia (squeezing), que se han manifestado durante el control de las secciones de convergencia, donde se midieron desplazamientos entre hastiales superiores a 250 mm y velocidades de convergencia de 1-3 mm/día, que en algunos casos llegaron a superar los 20 mm/día. Estos movimientos se evidenciaron en caídas de gunita, grietas y desconchones.

Para detener estos movimientos se ejecutaron mallas de bulones autoperforantes de 15 m y solera provisional en fase de avance, reduciendo los movimientos a velocidades de 0,1 mm/día.

Con el objeto de proceder con mayor seguridad durante la ejecución de la destroza se han ejecutado puntales HEB 300 en fase de avance que se eliminarán cuando se ejecute la contrabóveda definitiva.

Para validar los refuerzos y la sección estructural definitiva en revestimiento, se han realizado modelizaciones mediante programas de diferencias finitas en 3D. Estos cálculos han permitido reproducir el estado tensional en el túnel y diseñar los refuerzos a ejecutar en las diferentes fases constructivas.

Debido a que durante la ejecución de la destroza el estado tensional del túnel aumentará, se intensificará el control de convergencias. En el caso de que se detecten movimientos fuera de los estudiados en las modelizaciones o caídas de gunita y/o grietas se ejecutarán refuerzos adicionales.

9. Agradecimientos

Queremos mostrar nuestro agradecimiento a la Dirección de Línea por la confianza depositada en el equipo de la Dirección de Obra, y a todos los técnicos y trabajadores que participamos en el túnel de Albertia; la empresa constructora Ferroviaria Agroman, su oficina técnica TEAM INGENIERIA, la asistencia técnica para el control de las obras TYPASA y el propio ADIF.

Agradecer su aportación, a todos ellos, que han hecho posible la elaboración de este documento. ♦

Referencias:

- (1) MARTÍNEZ-TORRES, L.M. *El manto de los mármoles (Pirineo Occidental): geología estructural y evolución geodinámica*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, 1989. 294 p.
- (2) ESTEBAN MORATILLA, F. "Fenómenos de hinchamiento de formaciones margo-yesíferas de la cuenca del Ebro". *Ingeniería Civil*, Cedex, 1990, nº 77, p. 87-97.
- (3) ALONSO, E.E.; BERDUGO, I.; ROMERO, E. "Expansive behaviour of a sulphated clay in a railway tunnel". *Proceedings of the 16th International Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering*. Rotherdam: Millpress, 2005, vol. 3,

p. 1583-1586. ISBN: 978-90-5966-027-4.

- (4) SULEM, J.; PANET, M.; GUENOT, A. "An analytical solution for time - dependent displacement in a circular tunnel". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.*, 1987, vol. 24, nº 3, p. 155-164.
- (5) PAN, Y.; DONG, J. "Time dependent tunnel convergence I: formulacion of the model". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.*, 1991, vol. 28, nº 6, p.469- 475.
- (6) PAN, Y.; DONG, J. "Time dependent tunnel convergence II: Advance rate and tunnel support interaction". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.*, 1991, vol. 28, nº 6, p.477-488.
- (7) SANDOVAL, J.G. *Estudio de la convergencia por fluencia de túneles circulares en medios vis-*

coelásticos plásticos. Tesis Doctoral. Madrid: ETS Caminos, Canales y Puertos, 2008. 324 p.

- (8) BARLA, G. *Tunnelling under squeezing rock conditions*. Innsbruck: Eurosummer-School in Tunnel Mechanics, 1995.
- (9) HOEK, E.; MARINOS, P. "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses". *Tunnels & Tunnelling International*, 2000, vol 32, No. 11, p. 45-51 (part 1). No. 12, p. 33-36 (part 2).
- (10) HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.T.; CORKUM, B. "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition". *Proceedings of the fifth North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, 2002, vol. 1, p. 267-273.