

Estudio del fallo de un falso túnel. Análisis de los condicionantes de seguridad, fisuración y durabilidad que determinan su aptitud de servicio

Study about the failure of a false tunnel. Analysis of safety, cracking and durability requirements to ensure its aptitude for service

Eduardo Díaz Pavón^{a,*}, Ramón Álvarez Cabal^b, José Ángel Corbacho^c, Alberto Blanco^d

a: Dr. Ingeniero de Caminos. Jefe del Departamento de Patología de INTEMAC. ediazpavon@intemac.es

b: Dr. Ingeniero Industrial. Director del Área de Estructuras de INTEMAC

c: Ingeniero de Caminos. Área de Geotecnia de INTEMAC

d: Licenciado en Geología y Máster en Ingeniería Geológica. Director del Área de Geotecnia de INTEMAC

RESUMEN

Se presentan los resultados del estudio de las causas que motivaron importantes anomalías en un falso túnel. Dicho estudio puso de manifiesto una muy deficiente calidad del terreno del trasdós y la ausencia de un drenaje eficaz, que ante las infiltraciones de agua habían ocasionado la pérdida progresiva del material de relleno y con ello, distorsiones y diversos daños en las dovelas que conformaban el túnel.

Más allá de las citadas causas, el análisis de la interacción suelo-estructura ejemplifica la robustez de este tipo de construcciones -siempre y cuando las secciones tengan la ductilidad necesaria- y cómo su aptitud de uso viene condicionada no tanto por la propia estabilidad de la bóveda como por la seguridad de los usuarios y sus condiciones de durabilidad.

ABSTRACT

The results of the study of the causes of severe damages in a false tunnel are presented. The conclusions arise from the report showed a very poor quality of the soils of the backside and the absence of drainage, allowing the water to make a progressive loss of the fillings and, because of that, distortions and several damages in the dowels that constitute the tunnel.

Apart from these causes, the study of the interaction soil-structure is an example of robustness of this kind of constructions -if sections have the required ductility- and how its service aptitude is determined by the security of users and durability and not because of its stability.

PALABRAS CLAVE: robustez, estados límite, falso túnel, interacción suelo-estructura.

KEYWORDS: robustness, limit states, false tunnel, soil-structure interaction

1. Introducción

La detección de importantes distorsiones en la sección de un falso túnel, acompañada de desconchones del hormigón por su intradós e importantes fisuras por su trasdós en algunas secciones, obligó al corte del tráfico de la carretera que discurre por su interior.

Dichos daños se detectaron a raíz de unas intensas lluvias.

Este estudio comprendió una revisión de la documentación técnica disponible sobre el túnel (tanto la de Proyecto como algunas fotografías de la construcción) y de la información existente sobre las lluvias ocurridas; la inspección de detalle del túnel, tanto para comprobar el alcance y tipología de los daños como para verificar la configuración del mismo en relación con la documentación técnica disponible; el levantamiento geométrico de diversas secciones representativas de las distorsiones que había podido sufrir el túnel; un estudio geotécnico orientado a caracterizar los rellenos del trasdós de la estructura; y diversas modelizaciones y comprobaciones de cálculo planteadas para analizar la interacción suelo-estructura, obtener los esfuerzos sobre la propia estructura, y evaluar a partir de dichos resultados el origen y trascendencia de los daños.

2. Descripción del falso túnel

2.1. Configuración general

Se trata de dos tubos independientes cuyas longitudes, incluidas las boquillas, son del orden

de 440 m y 457 m. Cada uno de ellos está constituido por una bóveda tri-articulada formada por módulos prefabricados de hormigón dispuestos sobre muros ejecutados “in situ” y con cimentación superficial mediante zapata corrida. En la figura 1 se muestra una sección.

Los tubos del falso túnel presentan una luz interior del orden de 12,3 m y una altura libre aproximada de 8,5 m. La separación entre hastiales más próximos de ambos tubos es del orden de 6,8 m.

Las dovelas prefabricadas tienen 0,30 m de espesor y 2,5 m de anchura, con unos 10,5 m de desarrollo, y su trazado queda definido geoméricamente a partir de una ecuación implícita, cuadrática y paramétrica, adaptándose al antifunicular de cargas. Estas dovelas están articuladas en la clave y se apoyan sobre un mortero de nivelación en hastiales de hormigón armado ejecutados in situ de 0,70 m de ancho y altura variable comprendida entre 1,50 m y 2,50 m.

La cimentación de estos hastiales está resuelta mediante zapatas corridas de hormigón armado de ancho y canto variable en función del sector en el que se desarrollen ambos tubos del falso túnel (véase la citada figura 1).

Las características geométricas de ambos tubos son similares excepto en las dimensiones de las zapatas y la altura de los muros en los que se apoyan las dovelas.

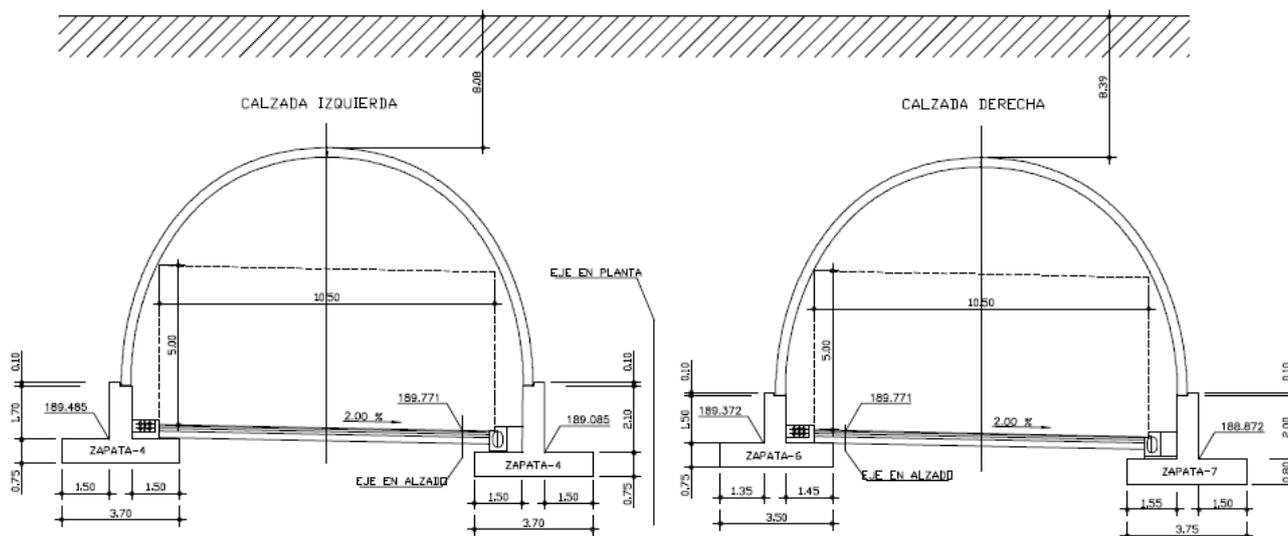


Figura 1. Sección transversal tipo del falso túnel

2.2. Proceso constructivo

El procedimiento de construcción del túnel parte de la ejecución de una importante excavación en trinchera y la construcción, sobre la explanada resultante, de la cimentación y los muros de cada tubo, la disposición de los módulos prefabricados de la bóveda sobre dichos muros y el relleno de la excavación hasta alcanzar la rasante prevista (figura 2).



Figura 2. Vista de los túneles en construcción

De acuerdo con la documentación fotográfica que pudo ser consultada, el talud derecho fue prácticamente vertical, con una berma superior

del orden de 5 m de ancho a la que le sigue un talud de 34° de inclinación (véase la figura 4).

La excavación se efectuó sobre suelos cuaternarios hasta 4 m de profundidad y de margas o calizas en el resto.

2.3. Características de los rellenos

Los rellenos del trasdós de los tubos se realizaron con materiales tipo todo-uno procedentes de las operaciones de desmonte efectuadas durante la ejecución de la traza, que tienen una naturaleza caliza o de margas calizas. Están constituidos por una mezcla de fragmentos de roca con partículas tamaño grava, arena y limo o arcilla, en proporción variable, con una fracción fina de reducida plasticidad.

Con carácter general, estos rellenos presentaban unas características variables en función del punto kilométrico del trazado de los falsos túneles y de la posición de los sondeos respecto a los túneles y su profundidad.

Cabe destacar que en todos los sondeos se detectó esporádicamente en el seno de estos rellenos restos de pequeños fragmentos de

escombros de distinta naturaleza (ladrillos, hormigón, cables o esponjas).

Además, en la inspección mediante cámara de vídeo de los sondeos, se observó la existencia de oquedades entre fragmentos gruesos, tal y como se puede comprobar en la figura 3.



Figura 3. Oquedades en un sondeo, a 5,1 m de profundidad

3. Anomalías observadas

En las figuras 5 a 7 se muestran los daños más aparentes, concentrados en un tramo de unos 250 m de uno de los tubos (en la figura 3 se muestra esquemáticamente su localización): desconchones del hormigón en algunas dovelas

del hastial derecho en el tubo derecho y apertura, centimétrica, de las juntas entre dichas dovelas y los muros de hormigón in situ sobre los que apoyan. También se detectó la existencia de fisuras paralelas, con separación constante, de trazado sensiblemente recto y dirección coincidente con la longitudinal del túnel, correspondientes a un esquema convencional de fisuración por flexión, con tracciones en la cara vista.

También en otras secciones del tubo se observó la apertura de la junta en el apoyo inferior de las dovelas, incluso en las situadas en el lado izquierdo, aunque en una magnitud muy inferior.

Ya con los medios de acceso oportunos, pudimos comprobar que la abertura de las fisuras de la cara interior, aunque variable, llegaba en ocasiones al milímetro (figura 8) y se registró el mismo tipo de fisuras en las zonas de las dovelas aledañas a la clave. Además, se examinó la junta entre dovelas en las zonas de mayores daños del tubo derecho: en el canto de las dovelas, como era de esperar, se apreciaban fisuras de gran abertura, creciente en dirección a la cara de tierras (figura 9).

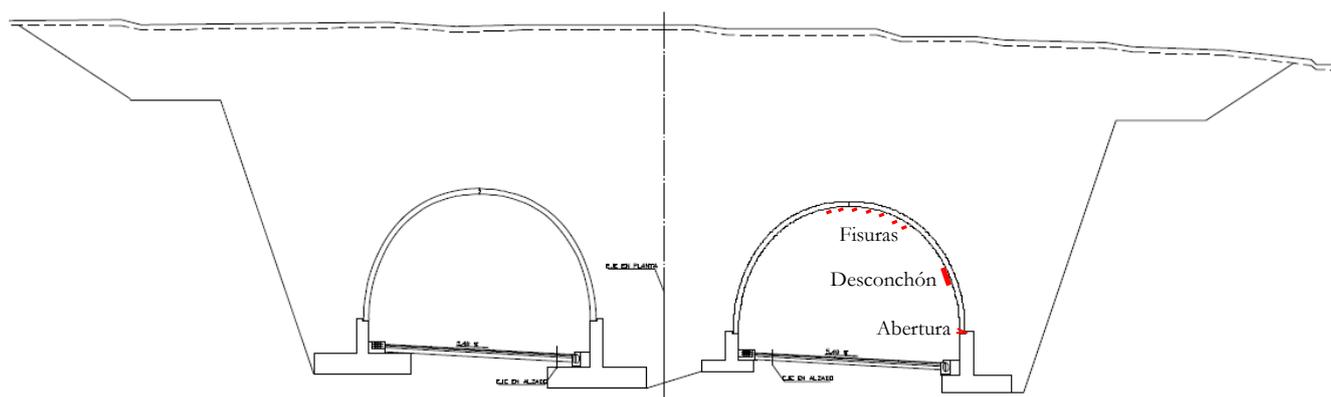


Figura 4. Localización esquemática de los daños en la sección transversal



Figura 5. Desconchones en la cara interior de las dovelas

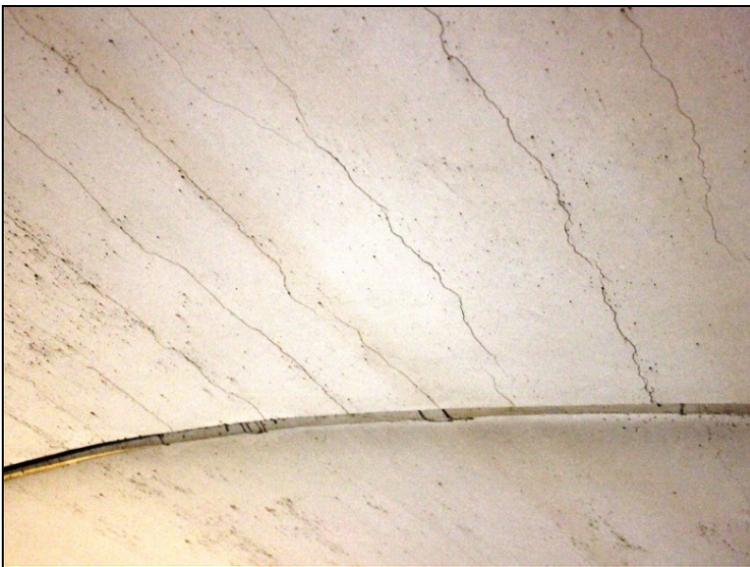


Figura 6. Fisuras de flexión



Figura 7. Giro de la sección de arranque del tubo

Algunas de estas fisuras mostraban evidentes muestras de la circulación de agua a través de su trazado, circulación que en algunos casos incluso había formado regueros que demuestran el paso de un caudal de cierta entidad y mantenido en el tiempo lo suficiente como para alterar la apariencia del hormigón. Además, se apreciaban manchas de oxidación que ponían de manifiesto que la exposición de las armaduras por la citada fisuración era muy anterior al episodio de lluvias que dio lugar a su detección.

Igualmente se pudo acceder al tubo izquierdo, en el que se observaron algunos tipos de daños semejantes a los descritos en el derecho.

En definitiva, las distintas anomalías observadas eran indicativas de una deformación de las dovelas que respondía a un mecanismo formado por tres rotulas (no siendo, frente a lo que en principio sería previsible, el encuentro entre dovelas una de ellas), en las que se concentran los giros. La intermedia se sitúa en la sección con mayores daños y separa la dovela en dos partes en las que las deformaciones parecen más contenidas.

Estas deformaciones pudieron medirse mediante topografía láser, en la que se obtuvieron desplazamientos normales (a la generatriz del revestimiento) de hasta 30 cm. Estas

magnitudes, así como ciertas contradicciones entre las geometrías obtenidas y la distribución de los daños que no pudieron verificarse, hacen

que los resultados de esta topografía deban interpretarse con prudencia.



Figura 8. Medida de la abertura de fisuras del intradós

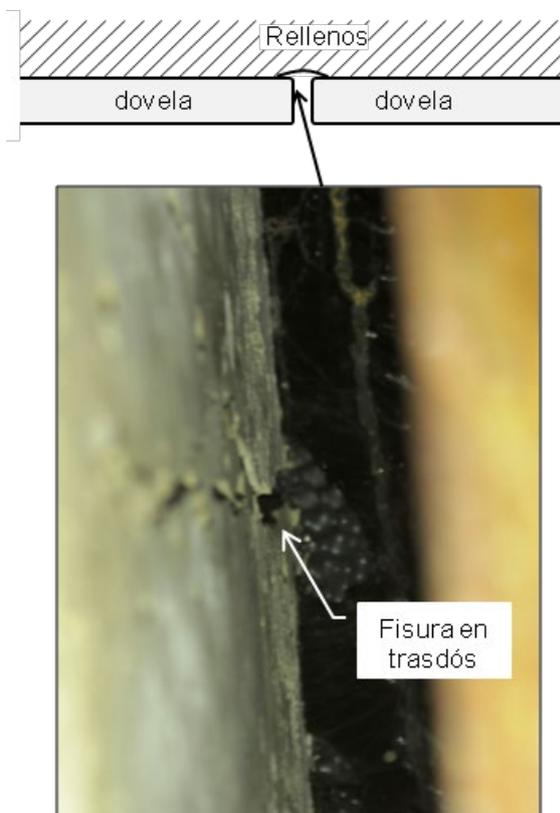


Figura 9. Fisura en el trasdós

4. Comprobaciones de cálculo

4.1. Modelización realizada

Para analizar las condiciones de seguridad de los tubos del falso túnel así como las causas de las anomalías en los mismos, obtuvimos los movimientos y esfuerzos en mismos modelizando la estructura y el terreno mediante el programa PLAXIS 2D, versión 10 (figura 10). Se trata de una herramienta de cálculo para el análisis de tensiones y deformaciones en suelos, rocas y estructuras geotécnicas, específica para el análisis de problemas de interacción terreno-estructura.

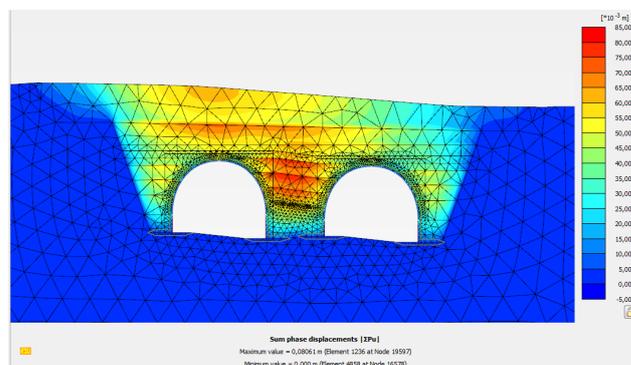


Figura 10. Caso general. Mapa de desplazamientos acumulados en el terreno desde el inicio hasta la finalización de la disposición de rellenos

En las distintas comprobaciones efectuadas, se analizaron los resultados obtenidos tanto de movimientos y esfuerzos en el terreno, como desplazamientos y esfuerzos en los túneles.

A modo de ejemplo, en las figuras 11 a 14 se muestran salidas gráficas obtenidas en distintas

comprobaciones. Por los aspectos que comentamos más adelante, se realizaron dos hipótesis de cálculo: *Caso general*, correspondiente a la situación nominal de Proyecto, considerando las características de los rellenos que se deducían

de las investigaciones geotécnicas realizadas; e *Hipótesis de falta de contacto entre túnel y relleno*, en la que se desactivaron alguno de los elementos de relleno adyacentes a la bóveda.

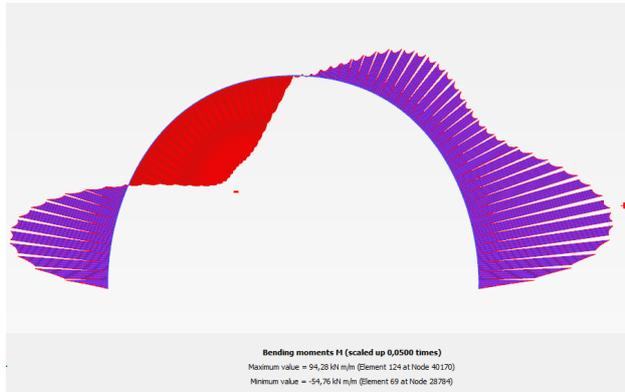


Figura 11. Caso general. Distribución de momentos flectores en la fase final de rellenos. Túnel derecho

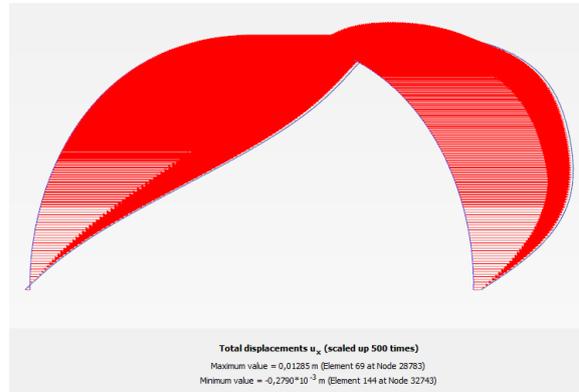


Figura 12. Caso general. Desplazamientos del túnel derecho en la fase final de rellenos

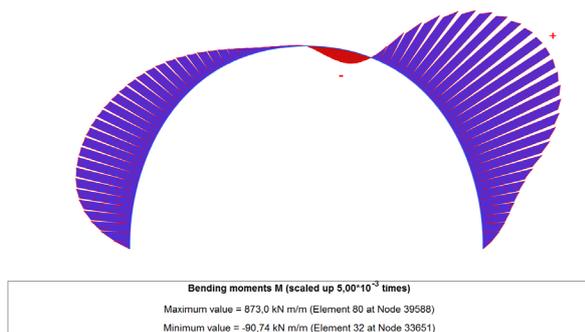


Figura 13. Hipótesis de falta de contacto entre túnel y relleno. Distribución de momentos flectores en la fase final

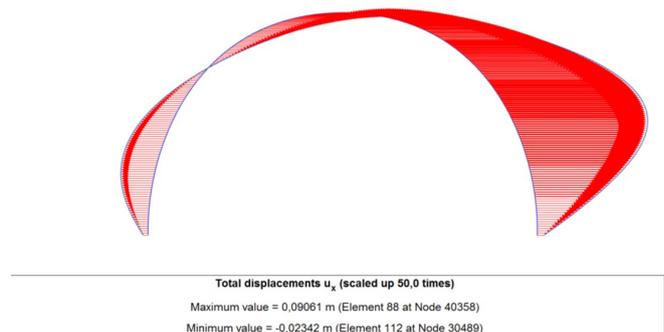


Figura 14. Hipótesis de falta de contacto entre túnel y relleno. Desplazamientos del túnel derecho en la fase final de rellenos

4.2. Análisis de resultados

Como resultado de las comprobaciones efectuadas, cabe destacar que la única hipótesis en la que se obtienen variaciones relevantes en los desplazamientos y esfuerzos obtenidos en los túneles, es el caso de simulación de falta de contacto entre túnel y relleno. Efectivamente, frente a los 30 cm de desplazamiento normal (a la generatriz del revestimiento) medidos con láser en alguna de las dovelas con mayores distorsiones, los desplazamientos máximos horizontales (los normales serían aún menores) obtenidos en las simulaciones numéricas que

efectuamos resultaban inferiores en un orden de magnitud, en torno a 1,2 cm. Y esto incluso considerando configuraciones de propiedades extremadamente asimétricas en un intento de inducir las sollicitaciones más desfavorables.

Tan sólo al admitir existencia de huecos en los rellenos se llega a magnitudes importantes, 14,9 cm, inferiores en todo caso a las medidas.

Cabe destacar además que la magnitud indicada de 30 cm tampoco es compatible con las características de ningún relleno: cualquier

material que hubiese existido entre el trasdós del túnel y el perfil de la excavación hubiera debido experimentar una deformación horizontal de valor próximo al 10% (que resulta de dividir el acortamiento, 30 cm, entre los 3 m que, aproximadamente, separarían el trasdós de las dovelas del perfil de la excavación en roca, que, en ese punto es, recuérdese, casi vertical). Sólo una hipótesis de rotura podría justificar tal valor, pero tal hipótesis no es razonable en un entorno tan confinado ni se deducía de ninguno de nuestros modelos de análisis.

Por otro lado, de las distintas combinaciones de esfuerzos analizadas, se deducía que en ningún caso se podría llegar a una situación de fallo de la sección, incluso en la hipótesis de degradación del terreno en el lado derecho del tubo derecho.

Por último, cabe destacar que no pudimos justificar las fisuras de flexión *positiva* (fisuras en la cara vista de las dovelas) a partir de los resultados obtenidos en nuestros modelos numéricos ni tampoco podríamos referirlas a las deformaciones igualmente comentadas. Su origen podría ser el mismo que el de los desconchones que constituyen los daños más aparentes: la existencia de huecos en los rellenos. Como la distribución de tales huecos puede ser muy variable en cada sección a lo largo del túnel sus consecuencias sobre la estructura del revestimiento pueden ser igualmente variables.

5. Análisis de las lluvias ocurridas

De la información meteorológica disponible se deducía que las lluvias registradas (136 mm en una estación meteorológica de AEMET muy próxima) previamente a la detección de las anomalías en el túnel no tenían carácter extraordinario. El análisis estadístico de dichos datos ponía de manifiesto que se trataba de valores previsible en la zona, que se registran aproximadamente cada 20 años (y que, por

tanto, se producirán cinco veces (siempre pensando en valores medios) a lo largo de los 100 años de vida útil de la estructura. De hecho, tan sólo en los últimos 50 años se habían superado ya tres veces en la zona (y de forma muy amplia: 220 mm frente a los 136 mm citados que fueron registrados en una estación meteorológica muy próxima, de AEMET).

Dichos 136 mm son además valores muy inferiores a los que prescribía el Ministerio de Fomento para la zona, 216 mm, que corresponderían a un período de retorno de 500 años.

Por tanto, lluvias como las ocurridas actuarán, con toda probabilidad (exactamente con el 99,36 %, que es la probabilidad de que un fenómeno con periodo de retorno de 20,3 años se produzca a lo largo de los 100 años de vida útil de la estructura) sobre los túneles repetidas veces a lo largo de su vida se producirán. De hecho, previamente a las anomalías objeto de estudio ya se habían registrado lluvias superiores a las analizadas.

6. Resultados del estudio

6.1. Sobre las causas de los daños

El único mecanismo que justifica las anomalías en el túnel es la pérdida de relleno en la zona de contacto dovelas-terreno, entendiendo el término en el sentido más literal, esto es, el que supone la formación de huecos en el trasdós del túnel.

En efecto, todas las simulaciones numéricas conducen a resultados seguros incluso cuando las características de los rellenos se degradan hasta extremos poco creíbles, y ello tanto en lo que se refiere a los propios valores como a su distribución. Tan sólo las hipótesis en las que se elimina parcialmente el relleno permiten justificar los daños.

En definitiva, cualquier relleno existente, por pésimas que fuesen sus características, hubiese impedido unos daños que sólo su total ausencia permite justificar.

En cuanto a la posibilidad de que se produzca una degradación tan significativa de los rellenos, de las investigaciones realizadas se deducían unas características granulométricas heterogéneas que le confieren una estructura abierta y susceptible de sufrir tal degradación. De hecho, en las grabaciones de video realizadas en el interior de los sondeos pudimos observar oquedades importantes que incluso imposibilitaban el relleno de los sondeos con la lechada inicialmente prevista, de consistencia densa, que se filtraba sin llegar a colmatar la perforación. Esta configuración de los rellenos permitía que se pudieran originar pérdidas de material por la acción del agua infiltrada.

Este proceso de pérdida de relleno debió ser progresivo, de tal forma que las dovelas se fueron deformando durante los años de servicio del túnel conforme desaparecía el material que las sujetaba lateralmente. Realmente, la sollicitación condicionante sobre el revestimiento del túnel no fue la producida por el peso de los rellenos situados por encima sino por los desplazamientos laterales debidos a la progresiva pérdida de los situados a su altura.

Sólo de esta forma se puede justificar la apariencia de los daños registrados, que claramente demostraba su existencia previa al episodio de lluvias objeto de estudio.

En definitiva, el proceso que concluyó en los daños del revestimiento consistió, en nuestra opinión, en la progresiva pérdida de relleno debida al lavado de los finos.

Por último, cabe indicar que este proceso de degradación comprendía necesariamente dos aspectos: por un lado, el ya expuesto en relación con las características inadecuadas del relleno, especialmente en la zona más próxima a las

dovelas; por otro, la formación de corrientes de filtración no controladas. Este segundo aspecto se relaciona con la gestión inadecuada de las escorrentías, que tampoco en este caso se había tratado adecuadamente (ni por limitar la entrada de agua en los rellenos mediante una topografía adecuada o las impermeabilizaciones de superficie oportunas, ni por facilitar la evacuación controlada de la que pueda entrar mediante el drenaje oportuno).

Por último, no se puede descargar ninguna responsabilidad en las lluvias ocurridas, cuyo valor registrado actuará con toda probabilidad sobre la misma repetidas veces a lo largo de su vida, como de hecho ya había ocurrido. No obstante, esta repetición de este tipo de episodios de lluvia es importante porque refleja la degradación que han debido experimentar los rellenos entre sucesos.

6.2. Sobre el alcance de los daños

Queda condicionado por la forma de trabajo de este tipo de construcciones.

Al cargar las dovelas con el peso de las tierras sus laterales tienden a desplazarse hacia afuera, según indican las figuras adjuntas.

Si no existiese ninguna coacción (como la impuesta por la existencia de tierras en el trasdós) al libre desplazamiento lateral, el valor límite de las cargas aplicadas sería el que indujese en las dovelas un momento flector superior a su capacidad, momento en el que se formaría una rótula plástica en cada lateral. La estructura se convertiría en un mecanismo y se produciría el colapso correspondiente (figura 15).

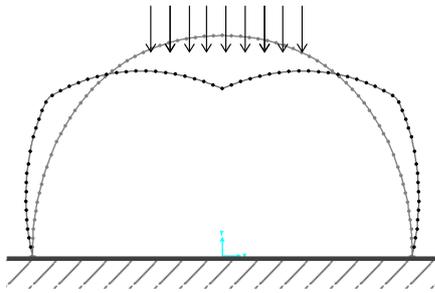


Figura 15. Colapso de la bóveda triarticulada (isostática) por la formación de dos rótulas adicionales

Cualquier coacción al libre desplazamiento lateral de las dovelas condicionaría el mecanismo de fallo descrito. En el caso más elemental se puede pensar en un conjunto de muelles que, de forma simplificada se dibujan horizontales en la figura 16.

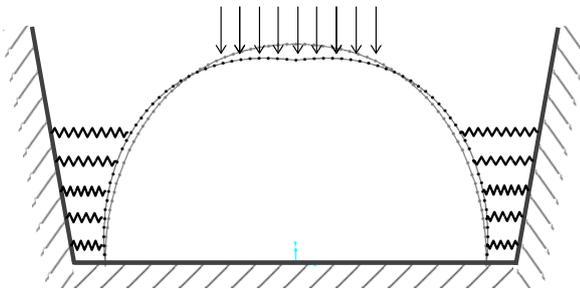


Figura 16. Los muelles impiden la formación de un mecanismo de colapso

Si la rigidez de los muelles es muy elevada en relación a la rigidez a flexión de la propia dovela, ésta no llega a flectar. Las cargas bajarían por la dovela en forma de compresión pura y las fuerzas desviadoras necesarias para que la línea de cargas siguiera el eje de las dovelas vendrían impuestas por las bielas rígidas en las que se habrían convertido los muelles (figura 17). Llevado al extremo, es el planteamiento de los sostenimientos de chapa plegada o el de las tradicionales cerchas de entibación.

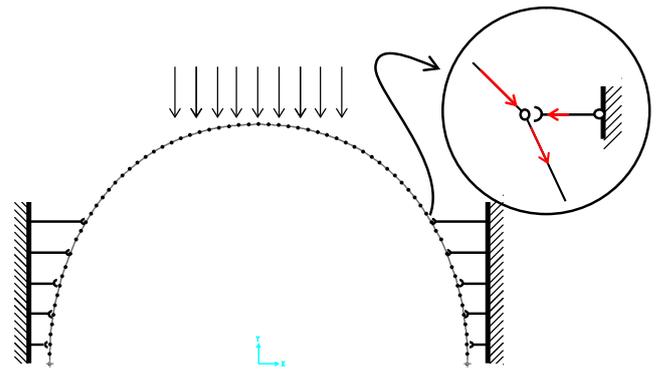


Figura 17. Si el relleno es rígido, la dovela trabaja en compresión pura

Conforme a los resultados obtenidos en todas las simulaciones efectuadas, la descrita es la forma en la que, en la práctica, funcionaría la sección del túnel si existiese cualquier tipo de relleno.

El efecto de los huecos en los rellenos equivale a desplazar lateralmente las bielas descritas. Las dovelas seguirían ese desplazamiento y, para acomodar la deformada, formaría rótulas en los puntos de máxima curvatura (figura 19).

Ese mecanismo sigue siendo perfectamente estable con las únicas condiciones de que las secciones rotuladas (que podrían, en el extremo, ser todas las desplazadas hacia los rellenos) pudiesen soportar el axil, y que en el tramo central no se formara un mecanismo. Lo primero no constituye una restricción importante porque los valores, muy limitados, de los axiles actuantes podrían ser recogidos casi exclusivamente por la armadura. La segunda tampoco, pues las deformaciones ocurridas están muy lejos de que se pueda producir dicho mecanismo, que tendría que ser por pérdida de forma (*snap through*).

En definitiva, el fallo de las dovelas, incluso en forma global (plastificando en todas las secciones, lo que no se ha observado) no conlleva el colapso de la estructura, que podría mantener su estabilidad.

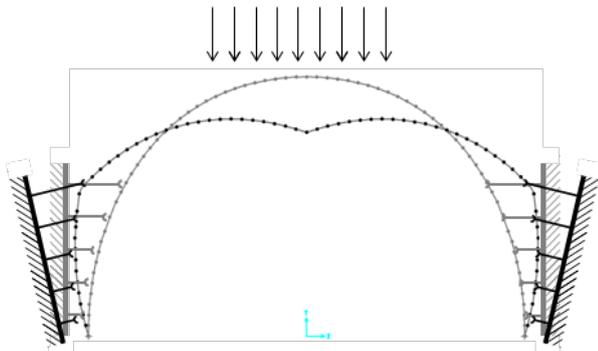


Figura 18. Esquema resistente del túnel, incluso con oquedades en los rellenos

Naturalmente, ello no permite aceptar esta situación como permanente. En primer lugar, porque no se puede garantizar que el proceso de erosión por el agua y lavado de finos y la consiguiente formación de huecos haya alcanzado su límite. Es de esperar, por tanto, que la progresiva deformación de las dovelas, tanto en las secciones con mayores daños como en otras cualesquiera, desemboque en nuevos episodios de daño (con el consiguiente riesgo de caídas de desconchones) ante cualquier tipo de desencadenante.

En segundo lugar, el mecanismo de fallo descrito requiere la fisuración generalizada de las dovelas en su cara oculta, lo que condiciona directamente la durabilidad de la estructura.

6.3. Sobre las actuaciones de reparación

Aunque las anomalías estudiadas no comprometían la estabilidad de la estructura, sí comprometen su funcionalidad (por el riesgo de caída de cascotes, aparte del evidente efecto estético) y su durabilidad (al presentar, conforme a los resultados de los modelos de cálculo, una fisuración no controlada en el trasdós de las bóvedas -aparte de las detectadas en su intradós-).

Era por tanto necesario proceder a la adopción de medidas correctoras, con carácter global

dado que los defectos que habían propiciado las citadas anomalías eran comunes a toda la longitud del túnel (los daños más aparentes son únicamente la manifestación extrema de un proceso que, en diversos grados, afecta a todo él), y dotando a la estructura de sistemas resistentes alternativos a los actuales (dada la imposibilidad práctica de asegurar el estado de los elementos que forman el sistema resistente actual, dovelas y rellenos). En este sentido, las actuaciones que como mínimo se recomendaron llevar a cabo fueron las siguientes:

- Inyecciones de colmatación y consolidación de los rellenos, que rellenen los huecos existentes entre las dovelas y el terreno, y que aumenten la rigidez y cohesión del terreno, evitando que se puedan producir nuevas situaciones de falta de contacto entre dovelas y terreno.
- Mejorar las condiciones de drenaje e impermeabilización en superficie.
- Construcción de un nuevo revestimiento diseñado para las acciones de proyecto.

7. Consideraciones finales

El estudio de las causas que motivaron las anomalías descritas en el túnel puso de manifiesto una muy deficiente calidad del terreno del trasdós y la ausencia de un drenaje eficaz, que ante las infiltraciones de agua habían ocasionado la pérdida progresiva del material de relleno.

Más allá de las citadas causas, el análisis de la interacción suelo-estructura realizado ejemplifica la robustez de este tipo de construcciones -siempre y cuando las secciones tengan la ductilidad necesaria- y cómo su aptitud de uso viene condicionada no tanto por la propia estabilidad de la bóveda -que en el límite podría admitir incluso infinitas rótulas-

como por la seguridad de los usuarios -desprendimiento de desconchones- y sus condiciones de durabilidad -oxidación de las armaduras del trasdós por la fisuración existente.

Todo ello exige la reconsideración no sólo de los criterios de fallo (en concreto la oportunidad de aplicar a estas estructuras los habitualmente empleados en otras construcciones -y que probablemente conduciría a que los requisitos condicionantes

sean los relativos a la fisuración, y no tanto a la seguridad-) sino también de los términos del Proyecto (en lo que, por ejemplo, implica la ductilidad de las secciones en estos casos, no acotada en este caso por la capacidad de giro de la sección como es habitual) e incluso del alcance del propio Proyecto, que debe considerar como estructura tanto el revestimiento del túnel como el propio relleno y el terreno circundante.