

CAPÍTULO 45 REPARACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

Eduardo ESTÉBANEZ SÁNCHEZ

1. Introducción

La reparación y reconstrucción de túneles es una de las áreas de actividades relacionadas con las obras subterráneas, cuyo interés ha experimentado un notable incremento en las últimas décadas.

Las razones principales son dos: el envejecimiento de muchos túneles, especialmente ferroviarios, que permanecen en servicio incluso con edades superiores a 50 años, y la necesidad de adaptar las secciones de otros a exigencias de tráfico mayores en cuanto a volumen y velocidad de transporte.

El conocimiento del estado de conservación de un túnel, concebido como una estructura formada por el revestimiento y el terreno encajante, requiere la creación de una base de datos relativos a su historia, geología y evolución de su patología, que debe estar permanentemente actualizada.

La complejidad de las actividades de inspección justificaría por sí sola un capítulo aparte; en el presente, se trata de las actuaciones a realizar cuando la información generada sugiera que la situación del túnel requiere una investigación más profunda y, si procede, su reparación, refuerzo o reconstrucción.

2. Valoración del estado de conservación del túnel

La *Federal Highway Administration* (FHWA) de Estados Unidos, estableció en el 2005 una escala del estado de conservación de túneles, que puede ser un punto de partida muy útil a la hora de valorar la necesidad de reparación de la estructura. La escala en cuestión varía entre 0 y 9 puntos, correspondiendo el primer valor a túneles en ruina total (irrecuperables) y el último, a túneles de reciente construcción.

En la Tabla 1 se han resumido los aspectos que afectan a revestimientos de mampostería o ladrillo y de hormigón. Para facilitar su interpretación, a continuación se definen algunos conceptos que aparecen en la misma:

- *Grietas*: fracturas lineales causadas por tensiones que exceden la resistencia a tracción del hormigón. Pueden aparecer durante el curado (de retracción) o posteriormente por cargas externas (estructurales). Según la separación de sus labios pueden clasificarse de la forma siguiente:
 - Menores: separación < 0,8 mm.
 - Moderadas: separación entre 0,8 y 3,2 mm.
 - Severas: separación >3,2 mm.

- *Descantilladura*: depresión en el paramento de forma sensiblemente circular u ovalada; es la cicatriz resultante del despegue y caída de un trozo de hormigón, Fig 1. La causa más frecuente es el aumento de volumen de las armaduras al corroerse que, a veces, quedan a la vista.

Pueden clasificarse como:

- Menores: profundidad < 12 mm; diámetro entre 75 y 150 mm.
- Moderadas: profundidad entre 12 y 25 mm; diámetro aproximado 150 mm.
- Severas: profundidad >25 mm; diámetro mayor de 150 mm.

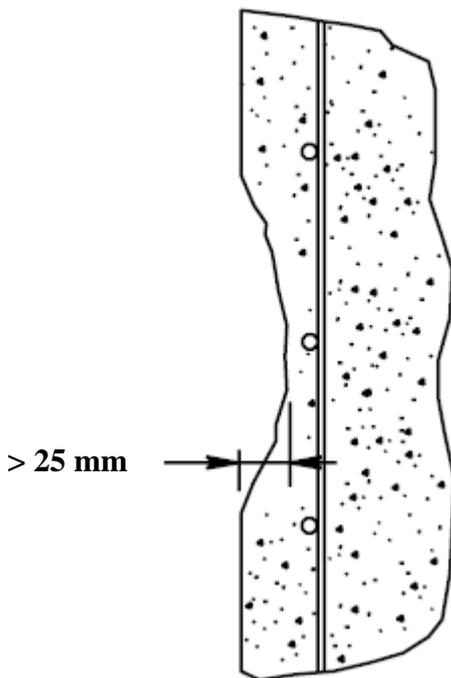


Figura 1. Descantilladura severa.

- *Delaminación*: separación de capas paralelas a la superficie. Suele estar provocada por la corrosión de las armaduras o por ciclos de hielo-deshielo. Es similar al descantillado salvo que afecta a grandes superficies y a menudo solo se puede detectar golpeando ligeramente la superficie.
- *Eflorescencia*: depósito de sales (generalmente de color blanco) que se

forma en la superficie; la sustancia emerge en suspensión del hormigón y precipita por evaporación.

- *Decoloración*: formación de manchas en la superficie por la precipitación de sustancias disueltas, que traspasan el hormigón por grietas. Pueden tener diferentes colores; las marrones suelen indicar corrosión de las armaduras.
- *Filtraciones*. Pueden distinguirse las siguientes categorías:
 - Menores: la superficie del revestimiento esta húmeda pero no gotea.
 - Moderadas: flujo menor de 30 gotas/minuto.
 - Severas: flujo mayor de 30 gotas/minuto.

3. Causas de daños en los túneles

Antes de realizar cualquier reparación deben conocerse las causas, las averías y eliminarlas, pues si no, volverá a producirse el daño.

2.1. Acción del agua

Es, con diferencia, la causa principal de deterioro de túneles. Su efecto nocivo afecta tanto al revestimiento como al terreno circundante.

2.1.1. Sobre revestimientos de fábrica de mampostería o ladrillo

En los túneles construidos con este tipo de revestimiento, los huecos que quedaban entre el revestimiento y el terreno eran rellenados con escombros del túnel compactados (que generalmente contenían gran cantidad de piedras) y que constituían un buen medio drenante en el trasdós.

Tabla 1. Calificación del estado de conservación de túneles (Federal Highway Administration (GHWA)).

Calificación	Condiciones / Descripción	Revestimiento de mampostería o ladrillo	Revestimiento de hormigón
9	Recién construido	Recién construido	Recién construido
8	Excelentes: no hay ningún defecto.	No se encuentran defectos.	No se encuentran defectos.
7	Buenas: <ul style="list-style-type: none"> Reparaciones: no son necesarias. El revestimiento trabaja según el diseño original Defectos aislados. 	<ul style="list-style-type: none"> La mampostería presenta grietas menores a intervalos mayores de 3 m; Eflorescencia ligera. 	<ul style="list-style-type: none"> Grietas transversales menores a intervalos mayores de 3 m. Eflorescencia ligera.
6	Intermedio entre 7 y 5.		
5	Regulares: <ul style="list-style-type: none"> Reparaciones menores. El revestimiento trabaja según el diseño original. Defectos menores, moderados y severos aislados. 	<ul style="list-style-type: none"> La mampostería presenta numerosos defectos menores. Grietas moderadas espaciadas 1,5-3 m. Eflorescencia: moderada. Filtraciones: puntuales menores a moderadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Grietas transversales moderadas espaciadas 1,5-3 m No más de una grieta longitudinal. Eflorescencia moderada. Filtraciones: moderadas. Presencia de fisuración en malla y decoloración, pero no hay armadura descubierta.
4	Intermedio entre 5 y 3.		
3	Malas: <ul style="list-style-type: none"> Reparaciones mayores. El revestimiento no trabaja según el diseño original. Defectos severos. 	<ul style="list-style-type: none"> Numerosas grietas moderadas. Eflorescencia, filtraciones y decoloración generalizada. Ligera dislocación de algunos mampuestos. Pérdidas puntuales de mortero de unión. Filtraciones severas puntuales. 	<ul style="list-style-type: none"> Grietas transversales y longitudinales generalizadas. Eflorescencia, filtraciones y decoloración generalizada. Delaminación y descantillado: afecta al 50% de la superficie. Armaduras vistas con pérdida de sección inferior al 15%
2	Graves: <ul style="list-style-type: none"> Se requieren reparaciones mayores inmediatas para mantener el túnel en servicio. 	<ul style="list-style-type: none"> Grietas severas, delaminación y pérdida de mampuestos, de forma generalizada. Filtraciones severas en numerosos puntos. 	<ul style="list-style-type: none"> Grietas severas, filtraciones, delaminación y descantillado, de forma generalizada. Armaduras vistas con pérdida de sección de hasta el 40%.
1	Críticas: <ul style="list-style-type: none"> Cierre inmediato. Deben realizarse estudios para valorar la viabilidad de la reparación. 	<ul style="list-style-type: none"> La mampostería esta totalmente deteriorad y no puede soportar por mucho tiempo las cargas de diseño. 	<ul style="list-style-type: none"> El revestimiento esta agrietado de forma generalizada y ha sufrido deformaciones significativas. Pérdida total de su capacidad para soportar las cargas para las que fue diseñado.
0	Crítica: el túnel esta cerrado y no tiene arreglo.	No tiene arreglo.	No tiene arreglo.

Si la excavación se realizaba en suelos, era necesaria la colocación de una entibación de madera que quedaba en el sitio. Las filtraciones de agua, potenciadas por esta cámara de drenaje, han conducido a lo largo del tiempo a la descomposición o la putrefacción de la madera, al lavado del terreno y el material de relleno y el deterioro de los ladrillos y el mortero de unión.

Los morteros, especialmente los fabricados con cal, ven disminuida su resistencia y adoptan un comportamiento frágil por la acción del agua. En algunos casos, la reacción química con sulfatos transportados por esta última provoca su expansión.

Los ladrillos pueden ser sensibles a la acción del agua aunque esta no sea agresiva, dependiendo de su temperatura de cocción y de su composición química.

Los mampuestos de caliza, ahidrita y arenisca pueden ser atacados directamente por el agua.

Los ciclos hielo-deshielo siempre agravan los daños.

Otro fenómeno que puede generar huecos en el trasdós es el despegue entre terreno y revestimiento, provocado por la disminución del desarrollo de éste al desaparecer por disolución la argamasa de las juntas, Fig 2.

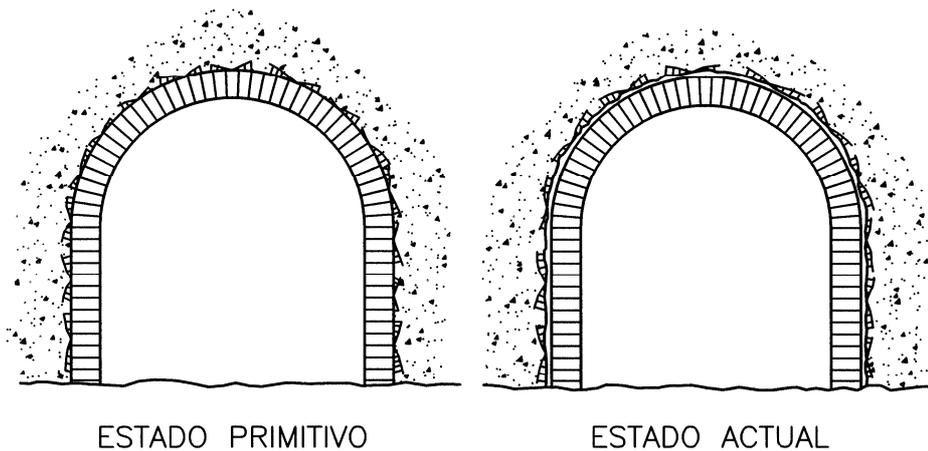


Figura 2. Formación de huecos por pérdida de desarrollo en revestimiento de fábrica de ladrillo (Tardieu, J.E., 1983).

Por otra parte, los huecos incrementan la circulación de agua, que a su vez agranda el tamaño de aquellos, pudiendo llegar al colapso con los consiguientes empujes asimétricos sobre el revestimiento, que puede llegar a sufrir daños estructurales, como la formación de grietas.

2.1.2. Sobre revestimiento de hormigón

En túneles antiguos, construidos antes de que se generalizase el uso de bombas para la puesta en obra del hormigón, la

problemática asociada al relleno del trasdós con escombro es prácticamente la misma que la descrita para los revestimientos de mampostería. Con el hormigón bombeado los huecos se reducen a la clave.

Como ocurre en cualquier material permeable, el agua puede penetrar en hormigón a través de poros y microfisuras, dando lugar a procesos destructivos de carácter físico o químico.

El más representativo de los primeros es el provocado por los ciclos hielo-deshielo

a causa de las tensiones internas generadas por el aumento de volumen del agua al congelarse.

En la agresión química, la magnitud del ataque depende de la movilidad del agua, ya que el poder de lavado del cemento aumenta con el flujo; en suelos cohesivos, en los que el movimiento del agua es lento, la intensidad del ataque es menor que en suelos arenosos. La agresión puede realizarse de dos formas principalmente:

a) Por disolución de los compuestos fácilmente solubles del propio hormigón o por la formación de sales también solubles y lixiviación de las mismas cuando hay un acceso continuo de agua:

- Ataque por aguas puras o blandas procedentes del deshielo o de lluvias en zonas no industrializadas, cuya agresividad radica, fundamentalmente, en el poder de disolución del hidróxido cálcico, dando lugar a un aumento de la porosidad del hormigón y, en consecuencia, de su permeabilidad y a una pérdida de masa y resistencia mecánica.
- Ataque por ácidos, como el clorhídrico y el sulfúrico, que reaccionan con el hidróxido cálcico dando lugar a sales muy solubles y, por tanto, fácilmente lixiviables.

b) Por formación de compuestos insolubles de mayor volumen que los primitivos y que al recrystalizar dentro del sistema capilar se expande provocan-

do tensiones que pueden llegar a destruir el hormigón.

- El ácido sulfúrico reacciona con el hidróxido cálcico dando lugar a la formación de sulfato cálcico dihidratado y expansivo. El origen de esta ácido puede estar en la oxidación de determinadas piritas, rocas volcánicas o graníticas. También puede proceder del ácido sulfhídrico oxidado presente en tuberías de desagüe y alcantarillas, en cuyo caso, el deterioro se producirá en el paramento de la conducción.
- El ácido sulfuroso, de efectos similares a los del sulfúrico, puede tener su origen en la disolución acuosa del anhídrido sulfuroso procedente de gases de escape de vehículos.
- El ataque por sulfatos se produce por una reacción entre éstos y el aluminato tricálcico hidratado procedente del cemento, dando lugar a la formación de sulfoaluminato tricálcico hidratado (etringita) altamente expansiva debido a la gran cantidad de agua cristalizada que posee.

Pueden contener sulfatos las aguas que atraviesan terrenos ricos en yesos o suelos en los que pueden encontrarse sulfatos de sodio, potasio, magnesio o calcio.

La Tabla 2 muestra la valoración de agresividad de las aguas y la Tabla 3, los límites de sustancias perjudiciales disueltas.

Tabla 2. Valoración de la agresividad de las aguas, según DIN 4030.

FACTORES PERJUDICIALES	AGRESIVIDAD DÉBIL	AGRESIVIDAD FUERTE	AGRESIVIDAD MUY FUERTE
Factor pH	6,5 a 5,5	5,5, a 4,5	< 4,5
Anhídrico carbónico	15 a 30 mg/l	30 a 60 mg/l	>60 mg/l
Amonios	15 a 30 mg/l	30 a 60 mg/l	>60 mg/l
Magnesio	100 a 300 mg/l	300 a 1.500 mg/l	>1.500 mg/l
Sulfatos	200 a 600 mg/l	600 a 3.000 mg/l	>3.000 mg/l
Dureza del agua en grados alemanes	3 a 5	< 3	< 3

Fuente: RIVAS, J.L. (1995).

Tabla 3. Límites perjudiciales de sustancias disueltas en aguas subterráneas.

SUSTENCIAS DISUELTAS	LÍMITES PERJUDICIALES EN EL HORMIGÓN (mg/l)	LÍMITES PERJUDICIALES EN EL ACERO (mg/l)
Sulfatos	>200	>300
Nitratos	>50	>50
CO ₂	Cantidades mínimas	Cantidades mínimas
Ácido Sulfhídrico	>1	>1
Cloruros	-	>100
Aceites y grasas	-	>4
Oxígeno	-	>4
Magnesio	>100	-
Fenoles	Muy perjudiciales	Muy perjudiciales

Fuente: RIVAS, J.L. (1995).

La corrosión de la armadura se da en hormigones permeables o con escaso recubrimiento, conduciendo inevitablemente al agrietamiento o disgregación de los mismos, debido a la expansión que experimenta el acero al corroerse.

2.1.3. Sobre el terreno encajante

El agua puede actuar sobre el terreno en el entorno del túnel, según sea su naturaleza, alterando el suelo o la roca, disolviéndola, o lavando las juntas. El resultado siempre será una pérdida de capacidad autoportante que podrá traducirse en un aumento de cargas sobre el revestimiento.

Algunos de los fenómenos relacionados con el agua que alteran el terreno encajante son los siguientes:

- Lavado de elementos finos en suelos granulares; provoca una disminución de la cohesión.
- Hinchamiento por hidratación de ciertas arcillas como anhidrita y serpentina.
- Disolución de rocas carbonatadas y yesíferas.
- Las rocas sedimentarias poco litificadas (rocas blandas), tales como las argilitas, limolitas, lutitas, margas y lodolitas, son muy sensibles al agua. Los cambios de humedad inducen deformaciones irreversibles (plásticas) en el material, que dan lugar a fisuras

y grietas. A través de estas, el agua puede introducirse cada vez con mayor facilidad, disolviendo los materiales cementantes con la consiguiente pérdida de resistencia.

- Lavado de juntas que puede llegar a provocar el desprendimiento o deslizamiento de cuñas, con la consiguiente sobrecarga sobre el revestimiento.
- El arrastre de finos puede provocar la colmatación del sistema de drenaje, dando lugar a la elevación del nivel freático y a sobrecargas por presión hidrostática.

2.2. Acción del fuego

Cuando un revestimiento está sometido a la acción del fuego sus componentes sufren las siguientes modificaciones, a medida que aumenta la temperatura:

- A partir de los 100 °C el agua libre o capilar empieza a evaporarse, retardando de esta forma su calentamiento.
- Entre 200 y 300 °C, la pérdida de agua capilar es completa sin que se aprecien aún alteraciones de la estructura del cemento hidratado y sin que la resistencia disminuya de forma apreciable.
- De 300 a 400 °C se produce una pérdida de agua en el gel del cemento, la resistencia disminuye sensiblemente y aparecen las primeras fisuras superficiales.

- A los 400 °C una parte del hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos se convierte en cal viva.
- Hacia los 600 °C los áridos, que no tienen todos el mismo coeficiente de dilatación térmica, se expanden fuertemente y con diferente intensidad, dando lugar a presiones internas que empiezan a disgregar el hormigón.
- Entre los 900 y 1000 °C se produce el colapso.

Debe tenerse en cuenta que la sensibilidad del hormigón frente al fuego depende de la naturaleza de los áridos utilizados; los elaborados con áridos calizos se ven menos afectados que los que contienen áridos silíceos, debido al menor coeficiente de dilatación térmica de los primeros.

En hormigones muy compactos, la rápida evaporación puede ocasionar elevadas tensiones que provocan exfoliaciones superficiales, desprendimientos y pérdidas de recubrimiento en el caso de hormigones armados.

Una propiedad del hormigón que juega a favor de su comportamiento frente al fuego es su baja conductividad térmica, haciendo que el calentamiento afecte solamente a las capas superficiales del mismo; salvo que el incendio tenga gran duración, las temperaturas que dañan el material solo alcanzan profundidades de entre 5 y 10 cm.

2.3. Esfuerzos transmitidos por el medio

Al hablar del efecto del agua sobre el revestimiento, se han comentado algunos fenómenos que pueden derivar en sobrecargas sobre la estructura (colapso de huecos y caída de cuñas por lavado de juntas). Además, pueden existir otro tipo de solicitaciones debidas al terreno y que pudieron no haber sido previstas en el proyecto; también pueden darse cambios en el campo tensional provocados

por el hombre. A continuación se dan algunos ejemplos:

- Empujes tectónicos en zonas activas.
- Comportamiento diferido del terreno: las rocas evaporíticas, como la sal o la potasa, presentan deformaciones importantes con el tiempo.
- Sobrecargas por rellenos de origen antropico (escombreras, terraplenes, etc.).
- Modificación del régimen de esfuerzos por excavaciones cercanas.
- Vibraciones generadas en el entorno.

3. Investigación

Las hipótesis respecto a las causas de los daños observables marcarán los objetivos de la investigación. De un modo general, deberán conocerse los estados del revestimiento, trasdós y terreno encajante, así como el caudal, presión y agresividad del agua y el estado tensional del revestimiento.

3.1. Revestimiento, trasdós y terreno encajante

De estos elementos interesa conocer:

- *Revestimiento*: espesor real, daños (deformaciones, grietas, huecos), estado de la masa del hormigón (microfisuración, porosidad, alteración química) y parámetros resistentes y deformacionales.
- *Trasdós*: existencia de huecos secos o con agua; naturaleza del relleno y su grado de compactación.
- *Terreno*: naturaleza (suelo o roca), si presenta carácter evolutivo y sus parámetros resistente y deformacionales.

Para conseguir estos objetivos pueden utilizarse una serie de técnicas clasificadas en destructivas y no destructivas.

3.1.1. Métodos constructivos

Son catas realizadas en el revestimiento para el reconocimiento del trasdós, habitualmente de 0,6x0,6 m y, principalmente, sondeos con recuperación de testigo

Los sondeos sirven para el reconocimiento tanto del trasdós como del terreno circundante. Los datos obtenidos sirven de apoyo para la correcta interpretación de los resultados de las técnicas geofísicas.

El taladro dejado puede ser inspeccionado mediante la introducción de cámaras de televisión y, posteriormente, utilizado para la colocación de instrumentos de medida como piezómetros o extensómetros, o la realización de ensayos geofísicos como las digrafías microsísmicas.

En la mayoría de los casos solamente interesa conocer el espesor y estado del revestimiento, si existen huecos en el trasdós y la naturaleza del terreno en el entorno del túnel. Para esto pueden utilizarse máquinas sacatestigos que llegan a una profundidad de 1,8 m.

Como alternativa a la recuperación del testigo se puede emplear un equipo re-

gistrador de parámetros de perforación (DIAGRASON), cuyo análisis permitirá evaluar las propiedades mecánicas del revestimiento y del terreno.

3.1.2. Métodos no destructivos

Se trata de técnicas geofísicas; a continuación se describen las más utilizadas.

3.1.2.1. Métodos sísmicos

Se basan en el estudio y medición de la propagación de una onda sonora compresional y/o de cizalla a través del medio en cuestión.

Las propiedades mecánicas del revestimiento se pueden estimar a partir de la velocidad de propagación de ondas sonoras a través del mismo.

Sobre la superficie del revestimiento se colocan una serie de sensores que miden el tiempo que tardan en llegar las ondas de compresión (P) y de cizalla (S) generadas por un impacto mecánico producido por el emisor, que se encuentra situado a una distancia determinada, Fig. 3.

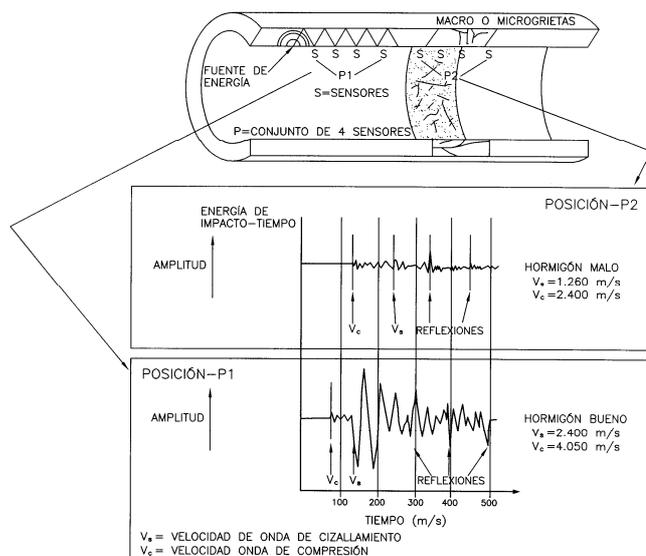


Figura 3. Medida de velocidad de propagación de ondas sonoras en el revestimiento de hormigón (Russel, H. et al, 1996).

Las velocidades de dichas ondas, V_p y V_s , son función de la densidad ρ y de los módulos dinámicos de deformación del hormigón: módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν); están relacionados según las siguientes expresiones:

$$E = 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \rho \cdot V_s^2$$

$$\nu = ((V_p / V_s)^2 - 2) / (2 \cdot ((V_p / V_s)^2 - 1))$$

El módulo de elasticidad del hormigón es un índice de su calidad; es proporcional a la raíz cuadrada de su resistencia a compresión simple, por lo que podrá determinarse esta última a partir de la velocidad de propagación de las ondas sonoras. En la Fig. 4 se muestra la relación existente entre ambas para un ratio $V_s/V_p = 0,55$, que corresponde a un coeficiente de Poisson de 0,28.

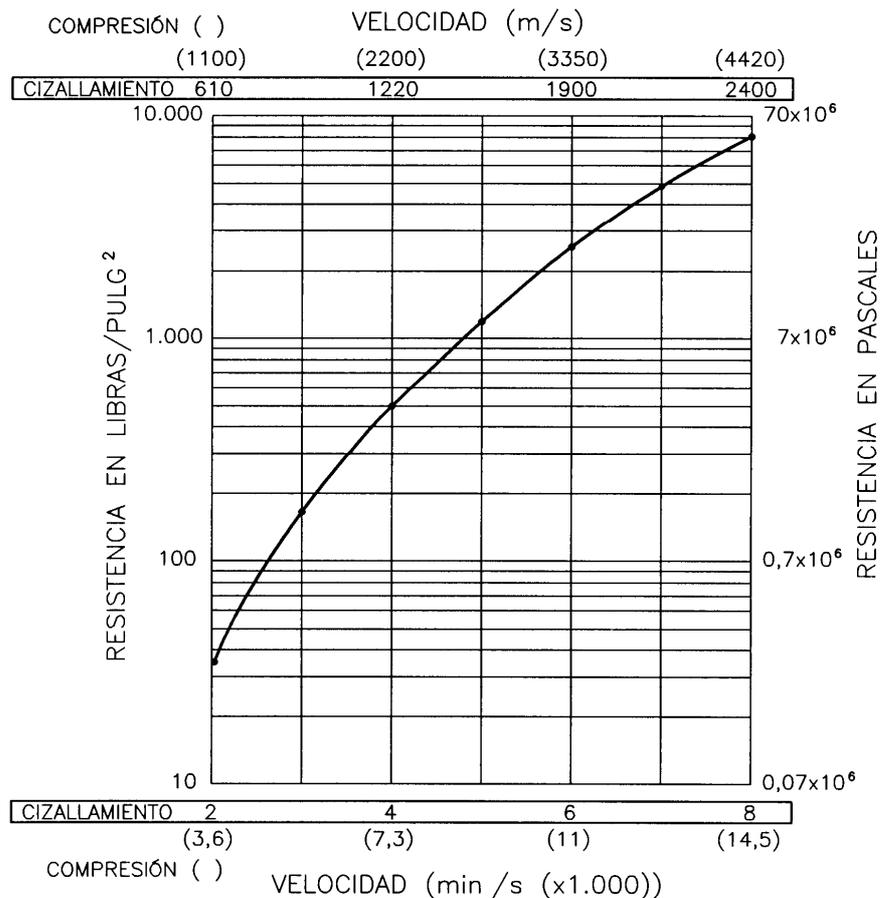


Figura 4. Relación entre velocidades de las ondas de compresión y cizalla y la resistencia a compresión del hormigón (Russel, H. et al, 1996).

Para el estudio del espesor y características de la corona de roca descomprimida se han revelado útiles los perfiles de sísmica de refracción y los diagramas microsísmicos en sondeos horizontales.

de la roca descomprimida sea menor que la del propio hormigón; en este último caso, el revestimiento actuaría como capa espejo imposibilitando la prospección.

La primera de estas técnicas puede utilizarse siempre que no exista una cámara de drenaje en el trasdós que actúe como capa ciega o que la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (V_p)

Las diagragfías microsísmicas, que miden las variaciones de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales a lo largo de un sondeo, tienen un mayor grado de fiabilidad al presentar menos

problemas de interpretación, ya que no hay posibilidades de desviaciones en el recorrido de la onda entre emisor y receptor.

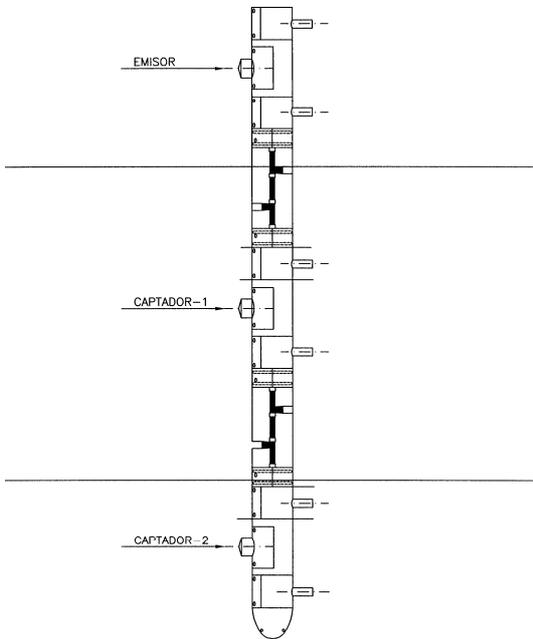


Figura 5. Sonda de microsísmica.

Tiene el inconveniente de tratarse de un reconocimiento puntual que no recoge

las variaciones laterales de espesor de la zona descomprimida.

3.1.2.2. Impact-Echo Test (IET)

El fenómeno en que está basado este método es la reflexión sufrida por las ondas (solo se utilizan las de compresión) generadas por un impacto de corta duración, aplicado sobre el revestimiento, al incidir sobre la interfase de dos medios con distinta impedancia acústica (velocidad de propagación x densidad). Estas interfases pueden ser grietas, contacto revestimiento-terreno o superficie del trasdós en caso de que este hueco o relleno de agua.

Conocidas la frecuencia de resonancia, f , de la onda de compresión reflejada y su velocidad de propagación, V_p , puede calcularse la distancia a la que se encuentra la interfase acústica mediante la fórmula:

$$T = V_p / (2 \cdot f)$$

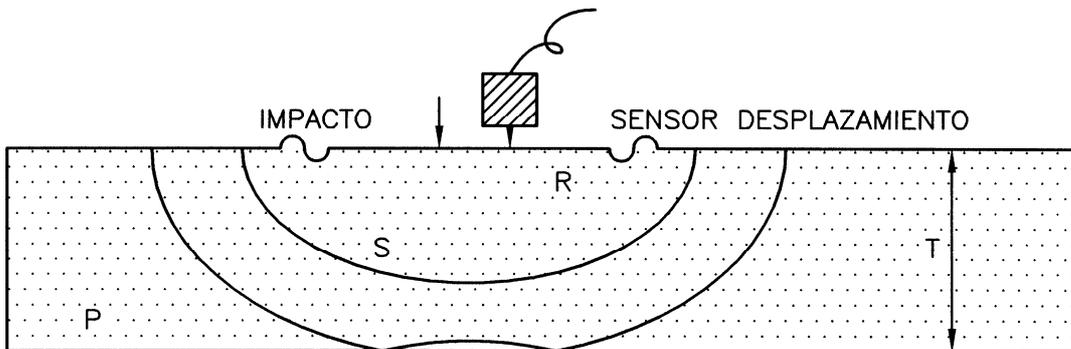


Figura 6. Principio del IET (Sánchez F. y Ribes J., 1998).

La velocidad de propagación puede obtenerse determinando f en una zona del túnel en la que sea conocido el espesor del revestimiento y despejando V_p en la expresión anterior. Cuando el espesor es desconocido y quiere evitarse la extracción de testigos, V_p puede determinarse colocando sobre la superficie del hormigón dos sensores situados a una distancia conocida y midiendo el tiempo trans-

currido desde la llegada de la onda a uno y otro. Debe tenerse en cuenta que los desplazamientos de la onda P por la superficie son de escasa amplitud y se requieren sensores de muy alta sensibilidad.

Teniendo en cuenta que la amplitud de la onda reflejada es función de la diferencia de impedancias de los dos medios en

contacto, el espesor del revestimiento podrá determinarse en todos los casos, salvo cuando las impedancias acústicas de aquél y la roca encajante sean similares.

Este método no está afectado por las armaduras si se utilizan tiempos de impacto adecuados.

3.1.2.3. Georradar (GPR)

Se basa en la obtención de perfiles de reflexión de ondas electromagnéticas emitidas por una antena que se mueve a lo largo del revestimiento y en contacto con él.

La difusión de estas ondas a través de un medio depende de la conductividad eléctrica y la constante dieléctrica del material. La primera variable influye en la atenuación de la amplitud de onda y la segunda determina la velocidad de propagación.

A su paso por el medio, la intensidad de la señal decrece en primer lugar por su reflexión en materiales conductores y en discontinuidades del medio dieléctrico; en segundo, por la conductividad (pérdida de calor); en último término, la frecuencia juega un papel importante en la atenuación. Por lo tanto, la reflexión, la conductividad y la frecuencia son los tres factores que determinan la profundidad de penetración de la señal. Al aumentar la conductividad y la frecuencia, disminuye la penetración.

La resolución lateral (mínima distancia a la dos objetos pueden ser percibidos) alcanza, de media, la mitad de la longitud de onda:

$$\lambda/2 = c / (2 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_R})$$

siendo:

λ = Longitud de onda.

ϵ_R = Constante dieléctrica.

f = Frecuencia.

c = Velocidad de la luz = $3 \cdot 10^8$ m/s.

Por lo tanto, al aumentar la frecuencia mejora la resolución, aunque debe tenerse en cuenta que disminuye la profundidad de penetración.

La profundidad del reflector está determinada por el tiempo de llegada y la velocidad de propagación:

$$S = 0,5 \cdot V_M \cdot t$$

siendo:

s = Profundidad (m).

V_M = Velocidad de propagación (m/s).

t = Tiempo (s).

El factor 0,5 tiene en cuenta el tiempo de ida y vuelta. Conocida V_M , se puede conocer la situación del reflector midiendo t.

La velocidad de difusión está relacionada con la constante dieléctrica del material por la siguiente expresión:

$$V_M = c / \sqrt{\epsilon_R}$$

donde:

V_M = Velocidad de propagación (m/s).

c = Velocidad de la luz.

ϵ_R = Constante dieléctrica.

En la Tabla 4 se muestran los valores de las constantes dieléctricas y las velocidades de propagación de varios materiales.

TABLA 4. Constante dieléctrica y velocidad de propagación de varios materiales (Boscomer Services S.A. 1989; van Egmond 1987; Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen 1988; Pezzati et al. 1985).

Material	Constante Dieléctrica Relativa	Velocidad de propagación (m/s) aprox.	Conductividad (Ω/m)
Aire	1	$3 \cdot 10^8$	0
Agua (pura)	81	$3,3 \cdot 10^7$	0,1 – 0,3
Agua salada	81	$3,3 \cdot 10^7$	400
Hielo	4	$1,5 \cdot 10^8$	0,1 – 0,3
Hormigón (seco)	6	$1,2 \cdot 10^8$	1
Hormigón (húmedo)	12	$0,86 \cdot 10^8$	5
Granito (seco)	5	$1,3 \cdot 10^8$	<0,001
Granito (húmedo)	7	$1,1 \cdot 10^8$	1
Caliza (seca)	7	$1,1 \cdot 10^8$	<0,001
Caliza (húmeda)	8	$1,06 \cdot 10^8$	25
Arenisca (húmeda)	6	$1,2 \cdot 10^8$	40
Basalto (húmedo)	8	$1,06 \cdot 10^8$	10
Hormigón arenoso (seco)	4	$1,5 \cdot 10^8$	0,1
Hormigón arenoso (saturado)	30	$5,5 \cdot 10^7$	7
Arcilla (saturada)	10	$0,95 \cdot 10^8$	30
Metales	1	$3 \cdot 10^8$	$>10^8$

La capacidad para identificar un objeto depende de la intensidad de la onda reflejada que, a su vez, depende (entre otras cosas) del coeficiente de reflexión (ratio entre las amplitudes de la onda reflejada y la incidente). Cuanto mayor es el coeficiente de reflexión, mayor es la intensidad de la onda reflejada y, en consecuencia, el contraste en el radargrama.

En el contacto entre dos materiales con diferente constante dieléctrica, el coeficiente de reflexión viene dado por:

$$R = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})$$

siendo:

R = Coeficiente de reflexión.
 ϵ_1, ϵ_2 = Constantes dieléctricas de los dos medios.

Esta fórmula indica que cuanto mayor es la diferencia entre las constantes dieléctricas, más intensa es la reflexión de la onda. Por ejemplo, en el borde de una zona húmeda del hormigón (el agua tiene relativamente buena conductividad gracias a los minerales), la onda sufre

una reflexión parcial, mientras que en metales (muy buenos conductores) la reflexión es completa.

La antena tiene un ángulo de reflexión de aproximadamente 60° y, por lo tanto, el reflector es captado antes de que la antena llegue a su altura; el tiempo de llegada va disminuyendo hasta alcanzar este punto, para aumentar de forma paulatina a medida que se aleja. Esta es la razón por la que la curva tiempo-transito tiene forma parabólica, Fig.7.

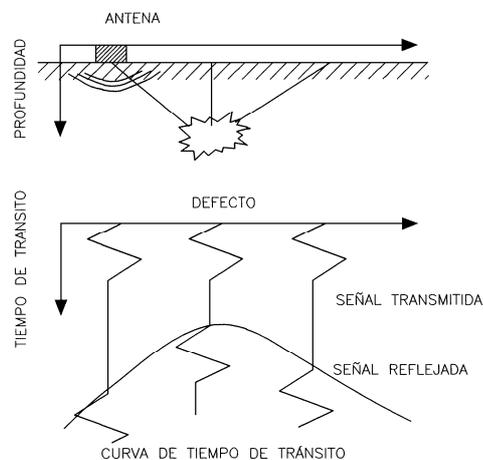


Figura 7. Principio del georradar (GPR) (Kirsh y Reinholds 1986).

Este método es útil para detectar huecos tras el revestimiento, pero no puede considerarse exhaustivo, por el efecto escudo que ejercen las armaduras.

dando como resultado la distribución de temperatura en la superficie.

3.1.2.4. Termografía de infrarrojos

En este método se mide la radiación térmica emitida por el revestimiento,

La distribución de temperatura en la superficie está determinada del flujo de calor a través de la misma que, a su vez es función del el gradiente térmico entre el ambiente del túnel y el interior de la estructura. Este gradiente depende de las discontinuidades mecánicas o hidráulicas existentes y, por lo tanto, variaciones en la temperatura superficial reflejan anomalías en el interior.

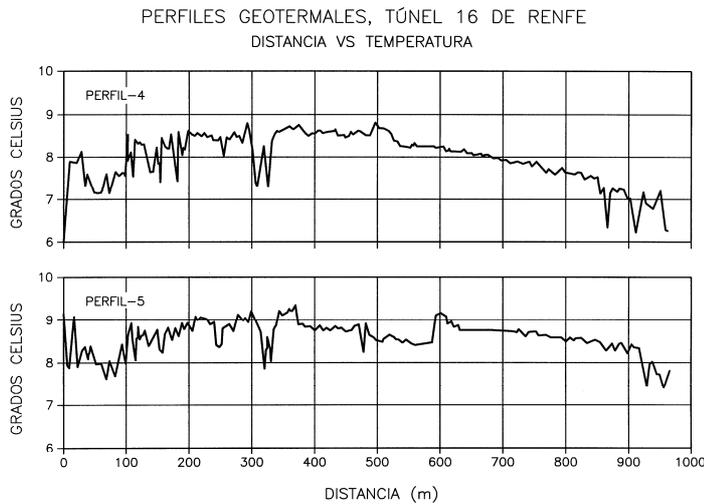


Figura 8. Perfiles termográficos (Romero y Pelaez m., 1992).

La principal aplicación de este método es la detección de flujos de agua provenientes de la superficie o de lugares alejados y cuya temperatura es distinta a la del revestimiento o la roca encajante.

profundidad y la forma de la anomalía basándose solamente en este método.

La termografía es menos sensible que el georradar, y es muy difícil estimar la

La Tabla 5 muestra la idoneidad de cada uno de los métodos considerados para la detección de los daños más frecuentes y la estimación de los parámetros elásticos y resistentes del revestimiento.

Tabla 5. Métodos de ensayo no destructivo para el hormigón (Russel H., 1996).

MÉTODO DE ENSAYO	GRIETAS		ALTERACIÓN QUÍMICA	DELAMINACIÓN	REFUERZOS METÁLICOS	VALORES MÓDULOS	RESISTENCIA
	MACRO	MICRO					
Métodos sísmicos: Sónico/Ultrasonico Velocidad compresio- nal/cizallamiento atenua- ción	□	□	□	□		□	□
Impacto-Echo Test: Sónico/Ultrasonico Reflexión/Resonancias				□		□	□
Georradar		□	□	□	□		
Termografía de infrarrojos		□	□	□			

- Método más adecuado
- Depende de las condiciones favorables

3.2. Agua

En las surgencias detectadas deben determinarse el caudal, la presión, la agresividad, el modo de circulación y, en algún caso, la temperatura.

En la medida de niveles piezométricos se recomiendan piezómetros puntuales, más que totales, ya que estos pueden alterara el régimen del acuífero, Fig. 9. También se recomienda un sistema continuo de registro, especialmente en terrenos de permeabilidad escasa, para medir fluctuaciones de nivel de corta duración.

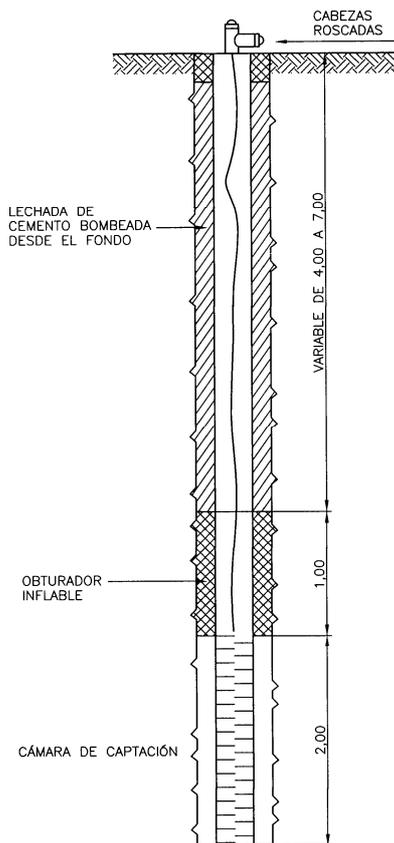


Figura 9. Instalación de piezómetro puntual.

3.3. Estado tensional y estabilidad

Para determinar la urgencia de la reparación es fundamental saber si el túnel

se encuentra en equilibrio o si se está deformando y, si es así, con qué velocidad. Esta información se obtiene a través de la medida de convergencias.

Para la medida de las tensiones a que está sometido el revestimiento pueden instalarse células de presión o utilizar el método del gato plano. Este método consiste en la ejecución de una ranura tras haber medido la distancia existente entre unas referencias colocadas a ambos lados; a continuación se introduce una célula de presión plana y se pone en carga hasta volver los bordes de la ranura a su posición inicial. La presión requerida será igual a la tensión perpendicular al plano de la ranura, Fig. 10.

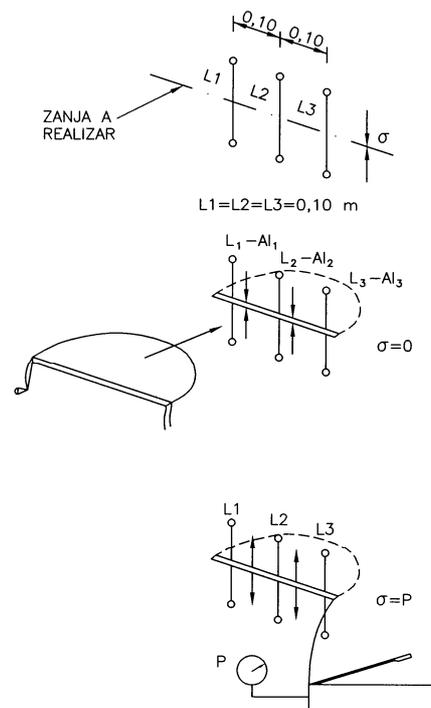


Figura 10. Principio del método del gato plano.

4. Reparación de grietas

Las grietas son el defecto más frecuente en los revestimientos de hormigón. Pueden comprometer la integridad estructural del túnel y/o permitir la filtración de agua que afecte negativamente al revestimiento, las instalaciones y la calidad del servicio.

4.1. Grietas estructurales

Pueden tener su origen en la retracción del hormigón o en deformaciones debidas a asentos o empujes del terreno. Para recuperar el carácter monolítico de la estructura original, hay que rellenarlas con un material que restablezca la continuidad mecánica del hormigón.

Con este fin, se han desarrollado sistemas de inyección de epoxi rígido, utilizables en el caso de que la grieta este seca o simplemente húmeda, pero no si se encuentra saturada o con flujo de agua. En caso de saturación deben usarse resinas de poliéster especiales.

La reparación se realiza de la forma siguiente:

1º. Se extiende una pasta de gel sobre la superficie del túnel a lo largo de la

grieta con objeto de sellarla e impedir que salga la inyección.

2º. Se realizan taladros de inyección sobre la grieta a una distancia igual al espesor del revestimiento, no superando nunca los 600 mm.

3º. Se homogeneizan los 2 componentes por separado utilizando una batidora eléctrica de baja velocidad (600 r/min), mezclándolos a continuación y batiéndolos hasta conseguir una pasta totalmente homogénea. A continuación se procede a la inyección a presión constante, en sentido ascendente. Cuando la resina fluye por el taladro inmediatamente superior, la boquilla de inyección se cambia a este último y se tapona el inferior. La presión de inyección no debe superar los 0,7 MPa y es recomendable una presión de trabajo de 0,3 MPa.

La Fig. 11 ilustra esta actuación.

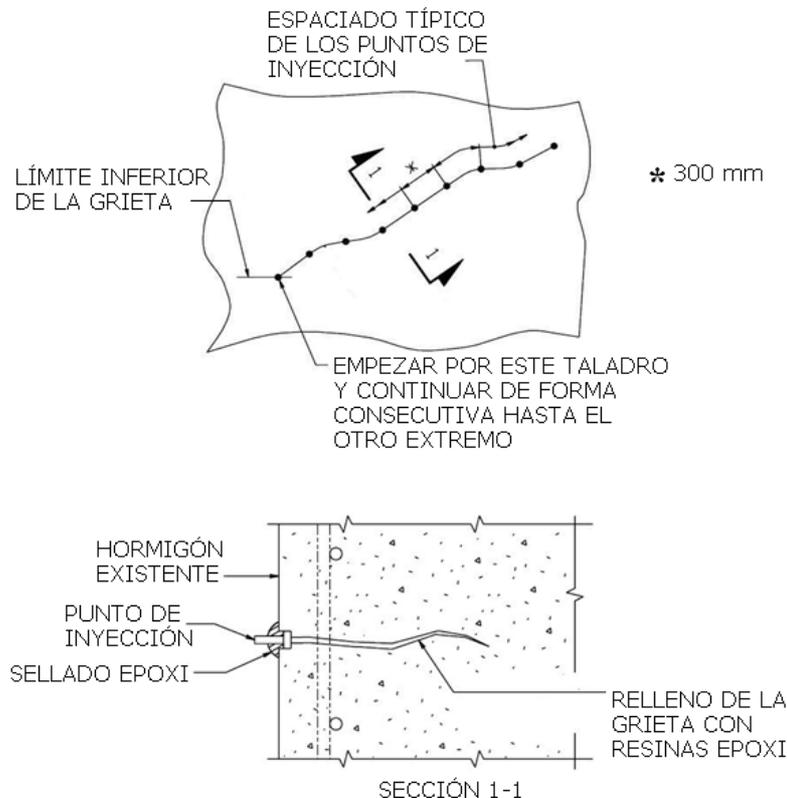


Figura 11. Reparación de una grieta estructural (FHWA).

Si las dimensiones de la grieta, o el empuje del terreno, hiciesen pensar que el tratamiento anterior es insuficiente para

garantizar la unión de sus caras, puede recurrirse, al cosido mediante taladros armados e inyectados, según la Fig. 12.

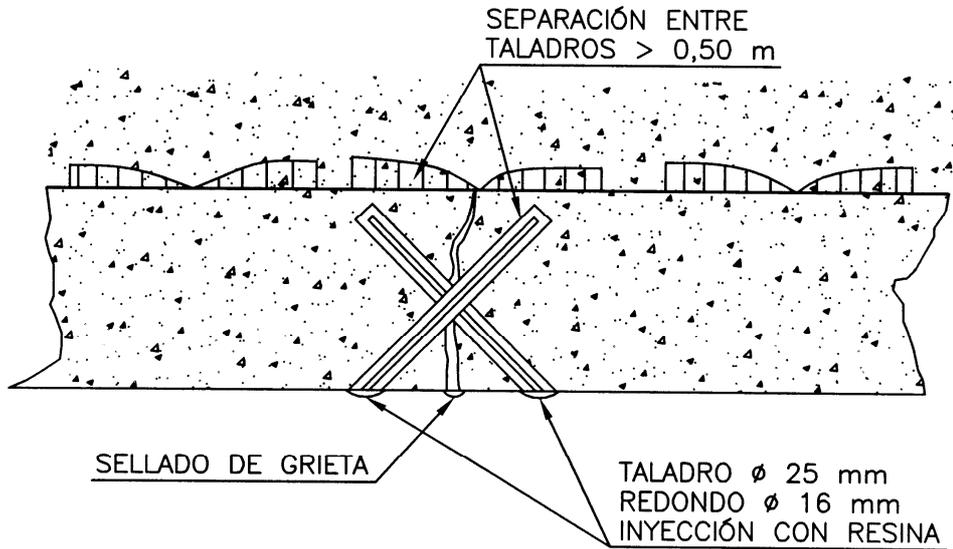


Figura 12. Cosido de una grieta mediante taladros armados (Tardieu, J.E., 1983).

4.2. Sellado de grietas

Existen grietas que, en principio, no comprometen la integridad de la estructura pero que permiten las filtraciones de agua que pueden causar corrosión en la armadura y el deterioro del hormigón a largo plazo, además de producir afectar al servicio y producir daños en el interior del túnel con los costes de mantenimiento consiguientes.

Las resinas de epoxi no son inyectables cuando existe flujo de agua, por lo que es necesario el uso de otros productos; dos son los principales:

- *Lechada de microcementos.* El cemento puede penetrar en grietas y cavidades más pequeñas que el tamaño de sus propios granos. El límite de penetración del cemento normal es una fractura de 0,2-0,3 mm de espesor.

El microcemento o polvo de cemento microfino (PCM) tiene una finura aproximadamente 1,7 veces menor

que la del cemento portland ordinario (CPO). Las suspensiones diluidas de este tipo de cemento precisan un agente dispersante para que las partículas y los flóculos se mantengan entre 1 y 20 micrometros.

Estas lechadas tienen baja toxicidad y no son flexibles después del fraguado; esta falta de flexibilidad las hace poco adecuadas para reparaciones a largo plazo ya que en el futuro pueden rezumar si se producen movimientos estructurales.

- *Lechadas químicas.* Son soluciones puras sin partículas en suspensión y, por lo tanto, y debido a su baja viscosidad, a veces cercana a la del agua, pueden penetrar en fisuras de hasta 0,01 mm de apertura. Los productos empleados, pueden ser acrilamidas, acrilatos, silicato sodico, lignosulfitos, aminoplastos y poliuretano, obteniéndose grandes variaciones en su aspecto, viscosidad y toxicidad.

Las más usadas son las resinas de poliuretano acuaactivas, que se poli-

merizan y expanden en contacto con el agua.

La inyección de lechada química se realiza de forma similar a la de resinas epoxi; la mayor diferencia está en el tipo y la posición de los taladros de inyección. Los taladros se realizan diagonalmente desde los bordes de la grieta y la interceptan dentro de la pared, Fig. 17. En los taladros se colocan los manguitos mecánicos que proporcionan una unión estanca y evitan el derrame de la inyección. La superficie de la grieta también debe ser sellada.

Los manguitos se dejan en el sitio y, si es posible, se reinyectan durante aproximadamente 7 días.

Se ha comprobado que se consiguen mejores resultados inyectando a baja presión durante periodos largos de tiempo que a alta presión durante periodos cortos; además, esto último puede dañar el hormigón.

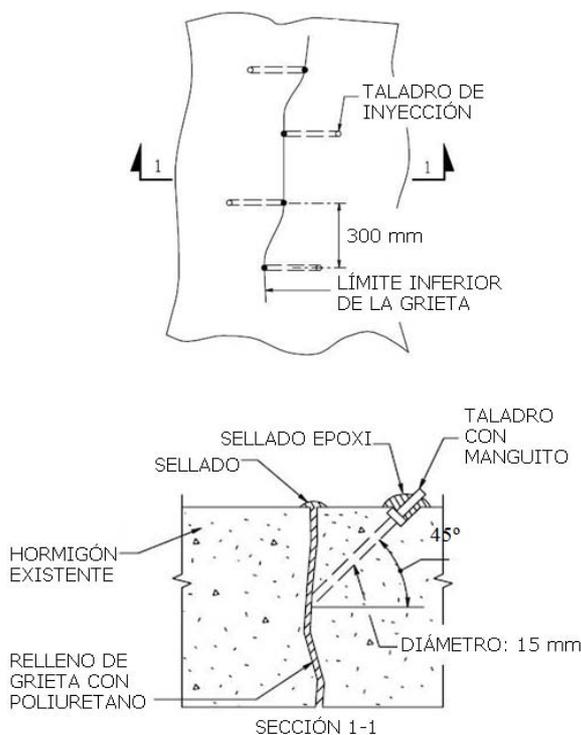


Figura 13. Sellado de una grieta.

La eficacia de las inyecciones químicas en el sellado de grietas es muy superior a las de partículas. Es importante señalar que si estas inyecciones se resecan pierden eficacia; esto puede ocurrir por el desvío del flujo de agua o por descenso del nivel freático por debajo de la cota de la fisura. En estos casos pueden emplearse esteres acrílicos que no se resecan.

5. Reparación del revestimiento

5.1. Revestimiento de fábrica de mampostería o ladrillo

La reparación de este tipo de revestimiento consiste fundamentalmente en la regeneración de juntas y la reposición de ladrillos rotos. En el primer caso, la sustitución del mortero por otro nuevo debe hacerse en una profundidad mínima de 3 cm, Fig. 14. Esta operación puede ir acompañada de una inyección de regeneración realizada mediante taladros perforados a una profundidad de 1/3 a 1/2 del espesor de la mampostería e inyectados a baja presión.

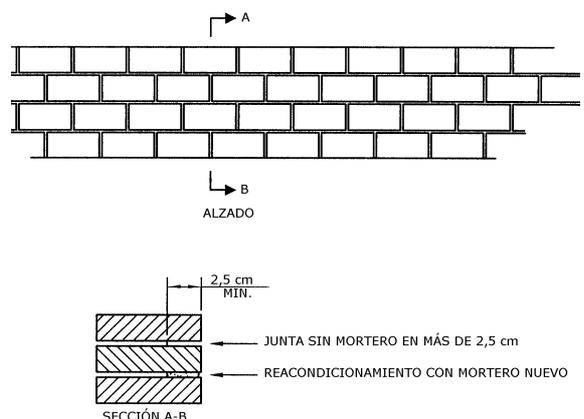


Figura 14. Regeneración de juntas en fábrica de mampostería (Rusell, H.; 1996).

Si el grado de deterioro alcanza a la caída de hileras completas de ladrillos, la

colocación de una capa de hormigón proyectado, reforzado con mallazo o fibras, es una solución más operativa que la reconstrucción de la misma.

Para la reparación de grietas pueden utilizarse las técnicas que se verán más adelante para revestimientos de hormigón.

Estos tratamientos pueden ir acompañados de la inyección de mortero o lechada de los huecos existentes en el trasdós.

5.2. Revestimiento de hormigón

Cuando existen zonas del revestimiento en las que el hormigón se ha deteriorado hasta una profundidad determinada, la solución más utilizada consiste en la eliminación de la masa dañada y la colocación un nuevo material.

El método de demolición, el material de sustitución y el sistema de su puesta en obra, dependen del tipo de construcción, de los condicionantes del servicio y de la gravedad y extensión de los daños. Los elementos que afectan más directamente a la elección de la técnica a emplear son:

- La resistencia y durabilidad requeridas del material de reparación.
- Las condiciones medioambientales

- La duración de los intervalos de tiempo disponibles.

Las condiciones medioambientales tienen una importancia de primer orden debido a la variedad de las mismas que pueden existir en el interior de un túnel. La presencia de agua, los cambios meteorológicos (ciclos hielo-deshielo); la situación respecto conductos de ventilación y los portales; la presencia de humos generados por vehículos o locomotoras; y la composición química del agua y del terreno circundante, tienen una gran influencia en la elección del producto de reparación más apropiado.

De acuerdo con las dimensiones de las áreas dañadas, la reparación puede ser puntual o generalizada.

5.2.1. Demolición del hormigón deteriorado

En las reparaciones puntuales, con objeto de no eliminar más hormigón del necesario, es conveniente la utilización de martillos neumáticos de mano. El picado debe comenzar por el centro de la zona a reparar, progresando hacia los bordes. La profundidad la determinará el propio martillo al rebotar sobre el hormigón sano. Los bordes del área picada deben formar un escalón de unos 0,5 cm de altura, Fig. 19.

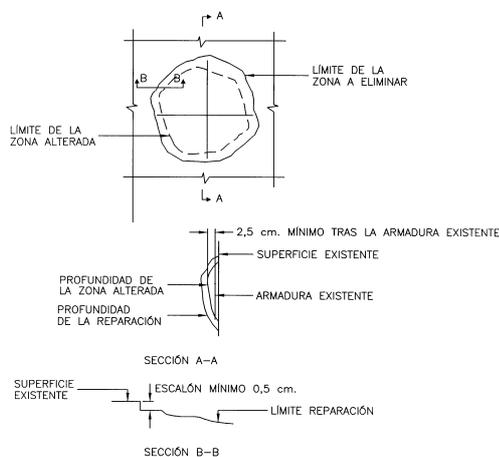


Figura 15. Eliminación de una zona deteriorada (Russell, H. et al, 1996).

Cuando la reparación afecta a tramos enteros de túnel, y el espesor a demoler es de 3-5 cm, puede ser más ventajoso utilizar la tecnología de hidrodemolición. Esta técnica emplea agua a alta presión (1.100 bar) para eliminar el hormigón dañado; se aplica mediante robot, Fig. 16.



Figura 16. Eliminación de hormigón dañado por hidrodemolición.

La capacidad de demolición varía de 0,5 a 1 m³/h, dependiendo de factores como la calidad del hormigón, la cantidad y dimensiones del hierro de la armadura y la profundidad de penetración. Sus principales ventajas frente a los métodos convencionales son:

- No produce vibraciones, no daña las armaduras y no crea ninguna microfisura.
- El demolido selectivo deja el hormigón sano en su lugar.
- Limpia las armaduras.
- La superficie del área trabajada queda rugosa, lo que facilita la unión con el nuevo material.
- No produce polvo.

5.2.2. Preparación de la superficie

Independientemente del producto de reparación y el método de puesta en obra elegido, es un requisito imprescindible para que la reparación sea eficaz, la correcta preparación de la superficie y

la limpieza o refuerzo de la armadura en caso de que exista.

Debe eliminarse todo vestigio de corrosión de la armadura; el método más eficaz es el chorro de arena, aunque también pueden usarse cepillos de púas metálicas. Una vez limpia la armadura e inmediatamente antes de la colocación del nuevo material, toda el área debe ser soplada con aire a presión para eliminar el polvo y cualquier resto de escombros. Sobre las barras debe aplicarse una capa de producto anticorrosivo de entre 0,1 y 1 mm de espesor.

Si debido a la corrosión algunas barras han perdido más del 50% de la sección debe revisarse el diseño estructural del túnel y, si se considera necesario, deben ser reemplazadas.

5.2.3. Materiales de sustitución

Los materiales a emplear en sustitución del hormigón deteriorado pueden ser:

5.2.3.1. Morteros de dos componentes a base de polímeros

Cuando el espesor de la zona a reparar es pequeño, estos productos constituyen un material apropiado para la restauración del revestimiento de túneles debido a su alta resistencia y velocidad de fraguado.

Los polímeros usados deben cumplir las siguientes funciones:

- Mejorar la resistencia al agua.
- Mejorar la resistencia a ciclos hielo-deshielo.
- Mejorar la adherencia.

- Reducir la retracción.
- Reducir el tiempo de fraguado.

Los copolímeros acrílicos (ACs) son los que mejor cumplen estos requisitos. Además, por su permeabilidad ante el vapor de agua, que previene frente a la acumulación de humedad en la superficie de contacto con el hormigón existente, eliminando los problemas de congelación-descongelación; por otra parte se previene la corrosión de las armaduras dentro de la zona reparada.

Otros productos muy utilizados son los que emplean resinas epoxi.

Los morteros de 2 componentes son mezclados normalmente en el tajo de reparación en pequeñas cantidades y colocados en capas de 2,5-5 cm. El espesor normal en estas reparaciones es del orden de 10-12,5 cm. En su utilización deben seguirse las recomendaciones del fabricante.

Esta técnica requiere el uso de imprimaciones que aseguren la unión fiable entre el hormigón antiguo y el mortero. Estos agentes son normalmente compuestos de latex o epoxi, que son extendidos sobre la superficie a reparar previamente a la colocación del mortero. Su aplicación se realiza mediante brocha o rodillo. Es preciso que el soporte este bien impregnado, sobre todo si esta húmedo.

5.2.3.2. Hormigón encofrado

Tiene un uso limitado debido, fundamentalmente, a que se requieren encofrados que solo pueden ser instalados en sitios con espacio suficiente para no invadir la sección de gálibo. No obstante, ha sido utilizado con éxito en obras en las que se ha suspendido el tráfico durante la reparación.

También requiere el uso de imprimaciones de adherencia.

5.2.3.3. Hormigón proyectado

Es la solución más apropiada cuando el área y espesor a reponer son grandes. Debe colocarse una capa de malla electrosodada (dos si el espesor es mayor de 20 cm). Para evitar que el material adherido a los alambres cierre la cuadrícula dejando huecos detrás, las malla mínima debe ser de 100x100 cm y 200x200 mm en el caso de doble paño. También pueden usarse como refuerzo fibras de acero.

En ambos casos debe rematarse la superficie con una capa de unos 2 cm de mortero proyectado ("gunita") de tamaño de árido inferior a 5 mm. Si se requiere un mejor acabado, esta capa puede ser fratasada a mano.

La adición de polímetros mejora notablemente la adherencia al hormigón original.

6. Regeneración

Tiene por objeto la consolidación del hormigón por la cementación de los poros y vacuolas existentes en su seno. Debe suprimir la percolación de agua a través de la masa de hormigón, que es el origen de su degradación. Se realiza mediante inyecciones y debe ir acompañada del relleno de los huecos del trasdós.

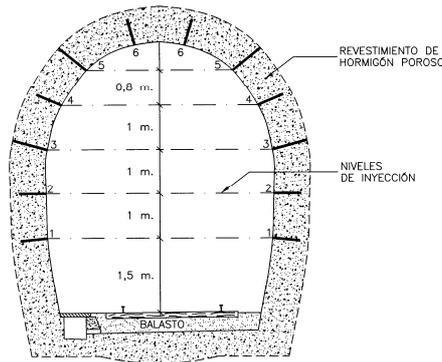
Los productos a inyectar pueden ser lechadas de microcemento o las resinas de alta penetración.

La inyección debe realizarse en sentido ascendente y detenerse cuando se dé alguna de las siguientes circunstancias:

- Cuando la presión supere el límite superior establecido (debe ser del orden de 0,2 MPa)
- En caso de surgencia de la lechada por uno de los taladros situado en la misma línea o superior al que se está

inyectando. En este caso se obturará este último y se seguirá por aquél por el que apareció la lechada.

- Cuando la admisión supere el valor medio registrado en los taladros anteriores.
- En caso de surgencia por una junta. La inyección continuará tras la colmatación de la junta.



DETALLE DE LA EJECUCIÓN DE LOS TALADROS PARA LAS INYECCIONES

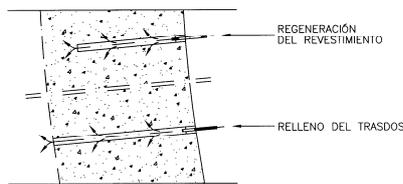


Figura 17. Regeneración de un sostenimiento de hormigón.

7. Refuerzo

Consiste en la colocación de un sostenimiento adicional al revestimiento existente.

En principio podrían utilizarse todos los elementos habituales en el sostenimiento y revestimiento de túneles, pero las restricciones que normalmente existen en cuanto a la reducción de galibo limitan las posibilidades en la gran mayoría de los casos al uso de gunita reforzada con mallazo o fibras y bulones.

Las principales ventajas del refuerzo mediante gunita son las de adaptarse a cualquier sección, no reducir sustancialmente el galibo (los espesores mínimos

utilizados más frecuentemente son de 7 cm) y poder realizarse de forma mecanizada y rápida (trenes de gunitado), lo que permite trabajar en cortes nocturnos manteniendo el túnel en servicio. Para conseguir una buena adherencia es fundamental un lavado previo del revestimiento existente, siendo el método más recomendable el de vapor a alta presión.

En contra destaca el hecho de que no permite seguir realizando observaciones directas del sostenimiento.

La colocación de bulones puede verse seriamente dificultada por el relleno de escombros del trasdós, especialmente en la clave, donde normalmente existirán huecos importantes. En estas condiciones el anclaje con resina o lechada puede llegar a ser inviable, quedando como única alternativa el empleo de bulones de expansión.

Cuando no exista la posibilidad de reducción de galibo, o incluso siendo necesaria la ampliación de éste, puede utilizarse el método denominado de *las costillas*, que consiste en la ejecución de arcos de hormigón armados en rozas realizadas en el revestimiento existente, Foto 1. En el caso de ampliación de galibo, una vez construidos los arcos, se aumentaría el de los tramos existentes entre ellos.

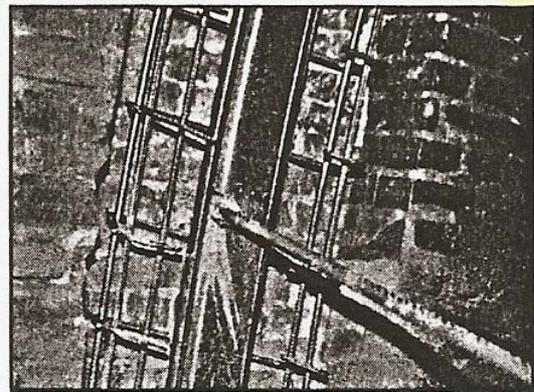


Foto 1. Colocación de armadura en una roza realizada en el revestimiento (Benford, V., 1983).

La armadura puede estar constituida por barras de acero o cerchas, estando especialmente indicadas las reticuladas.

El hormigón puede ser convencional, pero dadas las evidentes dificultades de colocación del encofrado, es más operativo el uso de hormigón proyectado.

Como paso previo a la demolición, es conveniente delimitar las rozas mediante cortes con sierra o coronas de taladros.

8. Reconstrucción

Se trata de las actuaciones que implican la demolición del sostenimiento existente y la ejecución de uno nuevo. La razón de la obra puede ser la renovación de un túnel en mal estado o la necesidad de ampliación de gálibo por cambios en las condiciones de servicio.

Para el nuevo sostenimiento pueden emplearse los elementos y las técnicas disponibles actualmente en la ejecución de túneles y que no existían en la época en que fueron construidos los que ahora se tienen que rehacer. Fundamentalmente estos nuevos elementos son los asociados al Nuevo Método Austriaco: hormigón proyectado, bulones y cerchas.

En macizos rocosos de buena calidad, cuando los túneles se revestían, el hueco dejado sobre la bóveda solía rellenarse con escombros que proporcionaba una rudimentaria unión con el terreno y evitaba los impactos que pudieran provocar la caída de bloques. Al demoler el revestimiento en estos casos se encuentra un hueco básicamente estable que con un sostenimiento formado por bulones y hormigón proyectado, alcanza coeficientes de seguridad aceptables.

En la Foto 2 se muestra la ampliación de un túnel con hastiales de mampostería y bóveda de hormigón, en el que el nuevo revestimiento está formado por cerchas HEB-160 y hormigón proyectado.

Una alternativa al hormigón proyectado, es el hormigón en masa junto con perfiles HEB y chapa tipo Bernold como encofrado perdido.



Foto 2. Aumento de sección.

La secuencia de ejecución puede ser continua, estableciendo ciclos de trabajo análogos a los de un túnel de nueva construcción en los que la fase de excavación estaría sustituida por la de demolición.

En suelos, tradicionalmente este tipo de trabajos se han realizado por bataches: demolición y reconstrucción por pequeños tramos no contiguos. En caso de emplear este sistema es aconsejable ejecutar en primer lugar los hastiales y, en una segunda fase, la bóveda.

La demolición del revestimiento conlleva ciertos riesgos para la integridad estructural del túnel y para el personal, frente a los que pueden tomarse las siguientes medidas preventivas:

- Refuerzos provisionales formados por bulones o cuadros metálicos.
- Mejora del terreno circundante mediante inyecciones.
- Control de la demolición: es de la mayor importancia que la rotura no se extienda más allá de la zona prevista. Para ello debe aislarse el tramo a demoler creando superficies de discontinuidad mediante cortes de sierra (Foto 3) o coronas de taladros que, además, evitan la transmisión de solicitaciones debidas al proceso de demolición.



Foto 3. Sierra radial realizando un corte transversal en la clave.

9. Bibliografía

- BENFORD, V. (1983).: "Maintenance of Federal German Railway Tunnels". Tunnels & Tunnelling. March.
- BIELZA FELIÚ, A. (1999).: "Manual de Técnicas de Mejora del Terreno". Editor Carlos López Jimeno.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2003).: "Highway and Rail Transit Tunnel Maintenance and Rehabilitation Manual".
- FERNÁNDEZ CANOVAS, M. (1989).: "Hormigón". E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- HAACK, A., SCHREYER, J. y JACKEL, G. (1995).: "State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining". Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 10, Nº 4. pp. 413-431.
- RICHARDS, J. A. (1998).: "Inspection, Maintenance and Repair of Tunnels: International Lesson and Practice". Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 13, Nº 4. pp. 369-375.
- ROGEL J. M. y SOLA P.: "Auscultación de túneles en infraestructuras varias: Metro de Madrid y Autopista A6 (Guadarrama)". II Simposio de Túneles. Explotación, Seguridad, Conservación y Reparación. Jaca.
- ROMERO, R. Y PELAEZ, M. (1982).: "INGEOPRES Nº 3". Pp. 20-40.
- RUSSEL, H. A., BCKEL. J. O., KUESEL, T. R. KING E. H. (1996).: "Tunnel Engineering Handbook". Chapman & may.
- SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, F. Y RIBES PANTOJA, J. (1998).: "Auscultación de sostenimientos y revestimientos de túneles por medio de la Técnica del Impacto-Echo Test". II Simposio de Túneles. Explotación, Seguridad, Conservación y Reparación. Jaca.
- TARDIEU, J. E. (1988).: " Reparación de túneles". Curso sobre túneles en roca en condiciones difíciles. Valencia.