

Master Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas

ÁREA: C2
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

REVESTIMIENTOS "IN SITU" Y
PREFABRICADOS.

PONENTES: Davor Simic Sureda

I.C.C.P.
FERROVIAL-AGROMAN

Día: 17/05/07

Hora: 18:15 A 20:15

REVESTIMIENTOS "IN SITU" Y PREFABRICADOS

ÍNDICE

- 1.- NECESIDAD DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- 2.- CONSTRUCCIÓN DEL REVESTIMIENTO "IN SITU"
 - 2.1.- Hormigonado de los muros de arranque.
 - 2.2.- Hormigonado del anillo de bóveda.
- 3.- CONSTRUCCIÓN DEL REVESTIMIENTO PREFABRICADO
 - 3.1.- Fabricación de las dovelas
 - 3.2.- Montaje del anillo de dovelas
- 4.- CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTO EN TERRENOS EXPANSIVOS
 - 4.1.- Especificidad de este tipo de revestimientos
 - 4.2.- Problemática de la construcción.
 - 4.3.- Ejemplo de la ejecución del revestimiento del túnel de Fabares.

REVESTIMIENTOS "IN SITU" Y PREFABRICADOS

1.- NECESIDAD DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

En algunos túneles se contempla como acabado visible de los túneles, la disposición de placas prefabricadas de hormigón armado, cubriendo el sostenimiento primario del macizo rocoso, al cual se le encomiendan todas las funciones estructurales de contención del terreno.

Esta solución, que se ha usado y se sigue usando, puede plantear ciertos problemas, sobre todo en vías de comunicación de tráfico importante.

En primer lugar, debe considerarse la posibilidad de que un vehículo fuera de control impacte contra el paramento del túnel, golpeando (y probablemente rompiendo) las placas prefabricadas previstas. En ese supuesto, se pueden desprender, bien fragmentos importantes del revestimiento o bien, incluso, placas completas, al fallar los apoyos de unas en otras. Todo ello no haría más que agravar las consecuencias del hipotético accidente. Esta hipótesis no es solamente una posibilidad teórica, sino que se ha verificado en varias ocasiones en diferentes túneles españoles, algunas veces con consecuencias dramáticas.

En segundo lugar, es indudable además, que, incluso sin acciones mecánicas exteriores, pueden producirse desprendimientos o movimientos inaceptables de estas placas. Los elementos de sujeción al soporte están sometidos a corrosión (por ambiente húmedo y ácido debido a las filtraciones y a los humos de escape de los vehículos), a movimientos alternativos producidos por las corrientes de aire, cambios de temperatura, etc. y, además, resulta difícil controlar su estado de conservación.

Un factor determinante añadido a esta problemática son las importantes deformaciones que pueden producirse en el sostenimiento primario.

En estas condiciones, confiar la resistencia estructural de los túneles únicamente al sostenimiento primario, entrañaría cierto riesgo, no asumible. Hay que tener en cuenta que una buena parte de los componentes de este sostenimiento son elementos metálicos (cerchas y bulones), sometidos a procesos de corrosión, que transcurridos unos años, pueden verse afectados, perdiendo parte de su capacidad resistente y pudiendo dar lugar a caídas y desprendimientos del terreno sobre el revestimiento (en el caso de placas prefabricadas) que, incapaces de soportar empujes del terreno de cualquier tipo y sobre todo acciones bruscas, podrían llegar a romperse, con el consiguiente grave riesgo para la circulación de vehículos por el interior de los túneles.

Estas consideraciones aconsejan la disposición de un revestimiento definitivo en los casos de túneles con sostenimiento primario de hormigón "in situ", solución ampliamente sancionada por la práctica en el caso de infraestructuras importantes.

2.- CONSTRUCCIÓN DEL REVESTIMIENTO "IN SITU"

2.1.- Hormigonado de los muros de arranque

En la base de los hastiales se comienza por hormigonar unos muros de pequeña altura, iniciando así el anillo de hormigón. Estos muros servirán de apoyo al encofrado de la bóveda posteriormente.

El encofrado de estos muros se realiza mediante planchas metálicas curvas apoyadas en el suelo, con una estructura de apoyo de forma triangular dotada de un husillo que permite el movimiento de la zona superior del encofrado. Por otra parte, esta estructura triangular alberga unos orificios que permiten anclar el encofrado al suelo mediante pequeños bulones inyectados con mortero.

Una vez situadas todas las piezas en posición, se procede a la unión de éstas entre sí mediante tornillos taladrados en los laterales de cada módulo. Asimismo, se procede a apretar los pernos de anclaje para fijar los encofrados al suelo. En el

último encofrado, es necesario realizar un tape, para lo que se empleará tela metálica tipo nervometal y tablas de madera, fijadas mediante escuadras atornilladas al lateral del último encofrado.

Posteriormente, se acoplan al encofrado los anclajes para la colocación del encofrado de bóveda. Estos anclajes están formados por barras tipo Gewi, de rosca a izquierdas, en cuyo extremo se suelda una placa cuadrada de anclaje, y en el otro se acopla un cono roscado (Conos Gewi) con la base pegada al encofrado. Esta pieza, que queda embebida en el muro tras el hormigonado, se sujeta al encofrado por la parte exterior mediante otra barra roscada y una tuerca. Al desencofrar, se desenrosca el cono y se extrae del hormigón, quedando un orificio accesible con una barra roscada en el interior del muro, que servirá de anclaje para el encofrado de bóveda.

Por último, se coloca un perfil de madera de sección triangular atornillado al encofrado, en la parte superior del muro, de forma que al desencofrar quede un chaflán en la cresta del muro, el cual permitirá hacer imperceptible la junta con el hormigón de bóveda (berengeno). ?

A la hora de hormigonar estos muros, se utiliza una bomba eléctrica de hormigonado montada sobre camión, vertiendo el hormigón mediante un tubería metálica plegable. El hormigón, al que se añade una pequeña cantidad de fluidificante, se dispone en tongadas de pequeño espesor para minimizar el empuje del hormigón sobre el encofrado, y se homogeneiza el conjunto mediante vibradores neumáticos de tipo *aguja*, que a la vez, que a la vez expulsan el aire ocluido al exterior, quedando una masa compacta y homogénea de hormigón

Los rendimientos suelen ser de 12,5 m diarios de muro por ambos hastiales. Un detalle de suma importancia a la hora de ejecutar este tipo de muros estriba en que éstos deben tener un grosor mínimo, siendo incluso preferible que éste sea mayor que el marcado por el proyecto, ya que supondrán un anclaje seguro para el encofrado de la bóveda. No hay que olvidar que el hormigón contacta en el hastial con una lámina de impermeabilización, que disminuye en gran medida la

adherencia del hormigón al hastial, y por otra parte, al ir el drenaje en la parte inferior del mismo, la base por la que se ancla el muro al suelo es muy delgada. Estos factores, unidos a la relativa gran altura de los muros, podrían originar el caso de que el espesor fuera muy delgado y que, por tanto, los anclajes introducidos fueran muy cortos, el desmoronamiento de los mismos al anclar sobre él el enorme peso que supone el encofrado y el hormigón de bóveda.

2.2.- Hormigonado del anillo de bóveda

Una vez contruidos los arranques, es posible ir cerrando el anillo de hormigón en el interior del túnel. Para ejecutar estos anillos es necesario, en primer lugar, alinear el carro portaencofrados, de forma que avance totalmente centrado sobre el túnel. Para ello, mediante topografía, se posicionan los dos raíles sobre la solera, a través de los cuáles circularía el carro. Dicho carro transporta los encofrados en posición regida hasta la posición adecuada (también marcada por topografía) y, una vez allí, los despliega hacia las paredes del túnel, dejando el espesor adecuado para introducir el hormigón, y solapando unos 10 cm con el muro de arranque inferior. Una vez desplegados y situados a la altura correcta, se disponen los pilares de apoyo del encofrado, anclándolos a los conos que se fueron dejando en los muros de arranque. En ciertas ocasiones, donde la estrechez de los muros lo aconseja, se refuerza este apoyo mediante puntales anclados a la solera

En la colocación de los carros es imprescindible que las juntas que originan en el hormigón las rótulas del encofrado o las juntas de unión de los distintos módulos del encofrado guarden una simetría lo más perfecta posible. Esto por lo que respecta a los distintos anillos, puesto que la junta que se crearía entre el anillo de bóveda y el muro de arranque queda disimulada mediante la escuadra triangular de madera, que forma una muesca triangular en el hormigón que, a la vez que esconde la junta, proporciona un aspecto agradable al acabado del hormigón.

El hormigonado del interior del túnel se suele realizar en dos procesos bien distintos. El encofrado más avanzado va dejando huecos alternados de hormigón que serían rellenados mediante el encofrado trasero. De esta forma,

existe un encofrado en el que hay que realizar los dos tapes laterales, y otro en el que no es preciso realizar ninguno, pues se limitaría a rellenar un hueco intermedio entre dos anillos de hormigón.

La colocación de los tapes laterales de los anillos es similar a los efectuados en los muros de arranque: mediante tablas y malla de nervometal fijados al encofrado con barras acuñadas o perfiles atornillados. Se trata de un proceso laborioso y de difícil ejecución, pues la superficie a taponar es relativamente extensa y complicada en cuanto a su forma circular. Por otra parte, hay que tener especial cuidado en no dañar la lámina de impermeabilización ya colocada.

Una vez terminados los tapes, se colocan los andamios en la cara interior del encofrado y se bombea el hormigón a través de las ventanas inferiores que tiene el encofrado, llegando hasta la altura de dicha ventana, en cuyo momento se cierra la ventana y se pasa la bomba a la ventana inmediatamente superior. El proceso se realiza alternativamente en uno y otro hastial del encofrado para que la cantidad de hormigón vaya ascendiendo de forma equilibrada a lo largo del anillo. De esta forma se va ascendiendo por las ventanas superiores hasta llegar a la clave del túnel, donde la manguera de la bomba de hormigón se acopla a un tubo situado en la clave del encofrado. Este tubo está soldado a una trampilla, de forma que cuando se llena el anillo, se mueve el tubo lateralmente, cerrando la trampilla del encofrado. Un problema habitual consiste en saber en qué momento se ha llenado el anillo por completo. Por ello, cuando se observa que a la bomba le cuesta impulsar el hormigón, se debe ir despacio, vibrando continuamente el encofrado, llegando un momento en el que el tape de la clave empuja ostensiblemente hacia el exterior, sabiendo, entonces, con seguridad que el anillo está efectivamente lleno por completo.

Uno de los aspectos fundamentales a la hora de hormigonar consiste en el vibrado de la mezcla, para homogeneizar el conjunto y que no aparezcan las siempre desagradables *coqueras*. El sistema de vibrado de los anillos se basa en la colocación de una serie de vibradores en toda la superficie del encofrado, en un número que oscila entre 12 y 18 unidades. Estos vibradores funcionan mediante aire comprimido y están acoplados al encofrado en distintos puntos del mismo, de

forma que hacen vibrar en realidad al encofrado y éste transmite la vibración al hormigón. A medida que se va introduciendo hormigón en el anillo, se vibra continuamente, cambiando sin interrupción la manguera de aire comprimido de uno a otro vibrador.

El segundo encofrado no suele llevar tapes, pues los anillos de hormigón vecinos actúan como tapes. El proceso de hormigonado es absolutamente similar al explicado anteriormente. Se deja una ventana abierta en la clave para poder inspeccionar el proceso en el interior y vibrar en aquellas zonas en que se estime necesario. Una vez que el hormigón llega a esta ventana, se cierra y se continúa bombeando a la clave. En este tipo de encofrados no existe ningún tape que avise del llenado del anillo y, en caso de llenarlo, si se sigue bombeando, se corre el peligro de mover el encofrado. Para evitarlo se colocan tubos respiraderos en la clave del encofrado. En el preciso instante en que empieza a salir lechada por el citado tubo se puede considerar que el anillo está lleno; se tapa el agujero con una cuña de hormigón, entonces, y se introduce una embolada más, cerrando a continuación la trampilla de entrada del hormigón.

3.- CONSTRUCCIÓN DEL REVESTIMIENTO PREFABRICADO

3.1.- Fabricación de las dovelas

Es aconsejable diseñar las dovelas con un espesor constante en todo el trazado del túnel y se pueden emplear diferentes tipologías estructurales variando la armadura, y la resistencia del hormigón en función de las solicitaciones previstas para cada tramo. Esta elección facilita el mantenimiento del diámetro de perforación, de los sistemas de prefabricación y de los métodos de colocación.

Para conformar el revestimiento completo se utilizarán dovelas de diferente desarrollo que completen un anillo transversal, de forma que las juntas entre dovelas no coincidan en dos secciones consecutivas.

Así por ejemplo en el caso de los túneles de Guadarrama, cada anillo está compuesto por siete tipos de dovelas denominadas A, B, C, D, E, F y G. La dovela

A es la más pesada de ellas y siempre va situada en la parte de abajo del anillo. Le sigue la dovela B, la más esbelta de todas. Las dovelas C y G son idénticas, y las D y F son simétricas y tienen el borde inclinado. Por último la dovela E tiene forma trapezoidal para actuar como cuña a la hora de cerrar el anillo

El buen ensamblaje de los anillos y de las dovelas requiere, lógicamente, una gran precisión, por lo que las tolerancias de fabricación son muy exigentes. Para ello se utilizan moldes metálicos mecanizados en taller para lograr una precisión del orden de 0,5 mm.

En cada fábrica se dispone de seis juegos de moldes que contienen siete tipos diferentes, uno por cada tipo de dovela. Los siete moldes de un mismo juego van seguidos en la cadena de fabricación de tal manera que se van fabricando anillos enteros con el mismo número de molde.

Para la fabricación de las armaduras se dispone de un parque central de ferralla.

La armadura viene en parrillas hechas a medida para estas dovelas. En el taller de obra se cortan a la medida de cada molde, se doblan para darles la curvatura del anillo, y con ayuda de unas camillas montan las "jaulas" para su posterior acopio.

Más adelante se colocan en los carruseles de distribución. Del carrusel, la armadura pasa a la fábrica donde se introduce en el molde correspondiente dependiendo del tipo de dovela.

El hormigón se elabora en una planta que dispone de un sistema de dosificación automático. En función del tipo de anillo a fabricar se emplea una dosificación u otra.

Los áridos empleados para la fabricación del hormigón en las dovelas del túnel de Guadarrama provienen en su mayor parte de tratamiento de material seleccionado procedente de la excavación del túnel, si bien parte del árido fino proviene de aportación de una cantera de arena de río. Este pequeño aporte de

árido de río permite ajustar mejor la dosificación y confiere una mayor trabajabilidad al hormigón resultante resto de materiales (agua, cemento y aditivos) provienen del exterior de la obra.

La fabricación de las dovelas se realiza en serie, con moldes metálicos, hormigones muy secos para alcanzar resistencias elevadas, y con curado al vapor.

El molde de hormigonado se prepara para cada nueva pieza limpiando los restos de hormigón de la anterior, colocando los insertos (tubo de inyección y roscas de tornillos), y aplicando un producto desencofrante.

Una vez introducida la armadura en el molde correspondiente se hormigona mientras se vibra, ya que el hormigón tiene una consistencia muy elevada (0 o 1 en el cono de Abrams) lo que obliga a emplear vibradores muy enérgicos. Después se fratasa y pasa al horno de curado donde está unas cinco o seis horas a 40-50°C y con una humedad del 95-100 %.

Después
Cuando las dovelas salen del horno se sacan del molde y pasan al volteador donde se giran 180° y se colocan en un soporte, para colocar la junta de estanqueidad y se numeran.

Después se acopian juntas ^{de} todas las dovelas del mismo anillo. La disposición de dovelas coincide con el orden de colocación en el túnel: E - A - B - G - C - F - D, y se conserva así hasta su llegada al túnel

Durante el proceso de fabricación se desarrolla un control de calidad que incluye las siguientes actuaciones:

- Ensayos de agua, áridos, cemento y armadura, para ver que cumplan con las condiciones exigidas.
- Ensayos característicos del hormigón. Se determina la resistencia característica, la permeabilidad, densidad y módulo de elasticidad.
- Calibración periódica de los moldes de hormigonado.

- Verificación periódica de las básculas de dosificación de la planta de hormigón.
- Control geométrico de las armaduras.
- Control de colocación de las armaduras en el molde.
- Control del hormigonado (tiempos de vibrado).
- Control de curado (tiempos de permanencia en el túnel de vapor)
- Identificación de cada dovela por su número, fábrica y molde.

Después las dovelas se trasladan a un acopio intermedio para evaluar los posibles defectos que pueden haberse producido en el proceso anterior.

Estos defectos son anotados y corregidos antes de su aprobación para la entrada en túnel. Los defectos más comunes son:

- Juntas despegadas.
- Golpes.
- Falta de recubrimiento de las armaduras, llegando a asomar en el trasdós.
- Fisuras por flexión en dovelas tipo A y B
- Fisuras de fraguado en el trasdós de la dovela tipo B.

3.2.- Montaje del anillo de dovelas

- Control de curado (tiempos de permanencia en el túnel de vapor).
- Identificación de cada dovela por su número, fábrica y molde.

Después las dovelas se trasladan a un acopio intermedio para evaluar los posibles defectos que pueden haberse producido en el proceso anterior.

Estos defectos son anotados y corregidos antes de su aprobación para la entrada en túnel. Los defectos más comunes son:

- Juntas despegadas.
- Golpes.
- Falta de recubrimiento de las armaduras, llegando a asomar en el trasdós.
- Fisuras por flexión en dovelas tipo A y B.
- Fisuras de fraguado en el trasdós de la dovela tipo B.

3.2.- Montaje del anillo de dovelas

Los anillos aprobados por el control de calidad pasan al acopio de playa de vías desde el cual se llevan al túnel para su colocación.

Para el movimiento de los anillos tanto de la fábrica al acopio previo, como de éste al acopio de la playa de vías, se emplean pórticos móviles que disponen de un útil para coger y mover hasta 4 dovelas simultáneamente. Cada anillo normalmente se transporta en dos grupos de dovelas: E+A+B, y G+C+F+D.

Los anillos se montan en las plataformas de los trenes de producción en los mismos grupos mencionados con anterioridad, y se llevan a la tuneladora.

Una vez que el tren llega a la tuneladora, las dovelas se descargan y mediante una grúa con ventosa se pasan una a una a la mesa de distribución de dovelas, donde las recoge el erector para su colocación en el túnel.

El posicionamiento de las dovelas las realiza el erector de la tuneladora. Este elemento está compuesto por una rueda de giro y un brazo con ventosas. El

erector recoge las dovelas de la mesa mediante las ventosas o placa de vacío, y la gira hasta su posición en el anillo, donde es sujeta por los cilindros auxiliares hasta que el anillo se cierra. La dovela de clave, responsable del cierre del anillo, se coloca de forma horizontal funcionando como una cuña para formar el anillo.

Por otra parte, las dovelas son sujetas a las adyacentes mediante tornillos tirafondos. Su función es mantener la forma del anillo hasta que se inyecta el trasdós y el anillo empieza a funcionar como tal estructuralmente.

Al ser las dovelas elementos prefabricados que no están en contacto directo con el terreno, es necesario rellenar el espacio vacío con un elemento con tres funciones básicas: consolidar el anillo, impermeabilizar el túnel y garantizar un contacto continuo entre los materiales que permita la transmisión prevista de tensiones

El relleno del trasdós se realiza en dos etapas, en la primera etapa se rellena la parte inferior del anillo a través del escudo de cola abarcando un arco de 120 grados. El resto de la sección se rellena a través de los agujeros de inyección situados en hombros y en la clave del anillo

El elemento de relleno puede ser o bien un mortero de cemento, o bien una gravilla a la cual se le inyecta una lechada a posteriori. Al mortero se le añade un producto "reductor de cono" con el fin de poder inyectar lo más cerca posible del último anillo colocado sin que el mortero llegue al escudo de cola.

Aparte de los esfuerzos del terreno, las dovelas deben soportar otras sollicitaciones:

- Ejecución de la inyección de forma asimétrica: la configuración de las tuneladoras no siempre permite el acceso a ambos hastiales, por lo cual uno de los lados debe inyectarse a través de la clave. Lo cual supone un desequilibrio de las presiones del mortero.
- Movimientos del anillo a su salida del escudo: por causas asociadas a la propia construcción del túnel, el mortero de inyección es de fraguado lento, lo cual permite cierto movimiento del anillo en las primeras horas. Las mediciones

del hueco entre dovelas y terreno en hombros y clave demuestran que el anillo desciende unos diez centímetros cuando sale del escudo de cola. También se ha comprobado mediante perfilómetro que se achata ligeramente. Estos movimientos crean la aparición de tensiones concentradas en los tirafondos que intentan impedirlos.

- Ajustes imperfectos de un anillo con el siguiente: se producen generalmente cuando la máquina está cambiando su trayectoria de forma brusca, en planta o en alzado, ya que el diseño del anillo no le permite adaptarse a dichos cambios. Lo cual supone que se produzcan concentraciones de tensiones en esquinas, y también en las zonas de los tirafondos.
- Presiones de los cilindros auxiliares mayores a las previstas: se producen en zonas malas o de falla, donde el terreno cae sobre el escudo, lo cual supone un esfuerzo mayor para avanzar, o bien cuando alguno de los anillos cilindros auxiliares está averiado, y el empuje que debería aportar lo deben asumir los cilindros adyacentes.

Todos los esfuerzos pueden provocar la aparición de defectos en las dovelas:

- Roturas de esquinas.
- Desconchones
- Golpes en el agujero de inyección
- Desplazamiento relativo entre los anillos en la junta.
- Roturas por flexión
- Roturas por compresión.

Durante la ejecución del relleno del trasdós, en los partes diarios de control de la inyección se registra diariamente el número de colocación del último anillo colocado, el del anillo en que se está inyectando en hombro derecho, el de hombro izquierdo y el de clave. Estos datos nos permiten comprobar si el procedimiento de relleno se ejecuta correctamente. Se realizan además anotaciones de todas las anomalías relacionadas con la inyección, por ejemplo se mencionan los atascos de las líneas de inyección o las bombas que se encuentran averiadas.

También se dispone de información como el volumen de admisión en cada orificio o la presión de inyección.

Una vez ejecutado el relleno, también se comprueba su estado, en principio mediante una inspección visual a través de los orificios de inyección, aunque es mejor la realización de un taladro de comprobación a esta inspección, ya que ofrece una mayor fiabilidad del correcto estado de la inyección en el trasdós. Además este método permite conocer el espacio entre terreno y dovela.

Por otro lado, para caracterizar los terrenos atravesados por las tuneladoras, se suelen extraer testigos del material destinados a la realización de distintos ensayos que proporcionan información precisa de los distintos terrenos perforados. Aprovechando esta circunstancia, junto con el taladro para la extracción del testigo de terreno se extrae también un testigo de mortero, lo cual nos permite medir el espesor de la capa de mortero, y detectar en su caso la presencia de algún hueco sin inyectar. Si el testigo de mortero es lo suficientemente grande se lleva al laboratorio para su ensayo a compresión.

Adicionalmente a estas comprobaciones, se pueden hacer de forma estadística controles del volumen de mortero que entran al túnel en un periodo de tiempo determinado, comparándose después con las cifras del volumen inyectado, y con los valores teóricos según el avance realizado en ese tiempo.

Cuando una vez realizados los controles aparecen numerosos anillos con inyección defectuosa se procede a la reinyección en los túneles con una lechada especial.

El control de la reinyección se realiza de forma similar a la inyección, mediante la inspección visual con taladros de comprobación.

El control geométrico del anillo terminado se realiza mediante perfilómetro.

En general, los anillos terminados no son círculos perfectos, ya que durante el proceso sufren un ligero achatamiento.

El control de filtraciones es una manera indirecta de detectar zonas de relleno insuficiente o defectuoso. Además, nos permite conocer la agresividad del medio en que se encuentra colocado el revestimiento.

Se trata de determinar el caudal de agua procedente de las filtraciones existentes en el túnel, cuantificarlas, conocer si pueden causar problemas, y si son compatibles con las especificaciones de la DIA en lo referente a la afección a acuíferos y aguas subterráneas.

El control se basa en un examen detallado de las propiedades del agua, tomando para ello medidas de caudal, pH, temperatura y muestras para su análisis en laboratorio.

Se comienza realizando un levantamiento, localizándolas en la sección, de las humedades, rezumes, goteos y surgencias, y midiendo su caudal en este último caso.

En las surgencias más importantes, además de medir el caudal, se efectúan medidas de pH y temperatura. Se toman también muestras para realización de ensayos químicos en laboratorio para determinar la agresividad de estas aguas frente al hormigón.

Las medidas de pH y temperatura, realizadas en los puntos en que las filtraciones son más abundantes, se anotan en tablas y se obtienen gráficos que indiquen su evolución conforme aumenta la distancia en el del túnel.

Una vez se tienen todos los resultados se comparan con los resultados de informes realizados anteriormente. Se estudia las secciones nuevas en las que se han producido filtraciones y se observa la evolución de las filtraciones detectadas anteriormente, analizando e investigando cuales han podido ser las causas responsables.

Se comprueba que el caudal medio filtrado esté dentro de unos valores lógicos, que las propiedades químicas del agua filtrada no resulten agresivas para el hormigón y que se cumple con la normativa de la D.I.A.

La tendencia general, tanto del pH como de la temperatura, es ascendente según nos acercamos al frente de excavación.

El pH aumenta según nos acercamos al frente, tomando valores cada vez más básicos, sin duda por la presencia de mortero o lechada en el trasdós. Esa basicidad alcanza valores de más de 9,5 en las zonas más próximas a la TBM, y disminuye paulatinamente para llegar a valores cercanos al pH neutro en la boca del túnel.

De igual forma, la temperatura es elevada en las proximidades de la TBM, llegando casi a alcanzar los 20°C. Posteriormente va disminuyendo hasta llegar a la temperatura ambiente en la boca de túnel.

El análisis de los datos obtenidos en las inspecciones de calidad permite identificar aquellas unidades de obra con defectos que deben subsanarse para alcanzar un nivel de calidad aceptable.

Pero para una adecuada labor de control de calidad no debemos conformarnos con detectar los errores y repararlos. Un correcto análisis de esos mismos datos nos puede permitir tomar medidas para evitar los defectos en lugar de corregirlos. Por otro lado, una vez que las medidas se han puesto en marcha, también podremos estudiar su efectividad.

Si en una planta de prefabricación de dovelas se observa una tendencia al alza en los defectos de roturas de esquina y desconchones, se puede corregir el problema ajustando el recubrimiento de la armadura y reforzando las zonas de concentración de tensiones.

Es necesario también que la "jaula" de armadura se adapte al molde correctamente, y lograr que la armadura no pierda la geometría teórica en la

manipulación, ni en el vertido del hormigón, y mantenga también su forma inalterable en el proceso de vibrado.

La información obtenida por los equipos de control y vigilancia durante la construcción es muy importante para organizar los trabajos de conservación y mantenimiento.

El seguimiento de los sensores, extensómetros y placas de carga, permite ajustar el modelo, hasta lograr que las ecuaciones matemáticas reproduzcan fielmente los valores reales de las tensiones aportados por la instrumentación.

Cada túnel es diferente y el esfuerzo para modelizarlo correctamente siempre es una tarea complicada que se consigue mediante aproximaciones sucesivas, pero todo el esfuerzo realizado en profundizar en el conocimiento de las propiedades de los materiales y su interacción con el revestimiento, realizado en un túnel particular, aportará un conocimiento que será de utilidad en el diseño y construcción de cualquier otro túnel.

4.- CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES EN TERRENOS EXPANSIVOS

4.1.- Especificidad de este tipo de revestimiento

Los criterios más generales para diseñar secciones capaces de resistir al empuje elevados del terreno son:

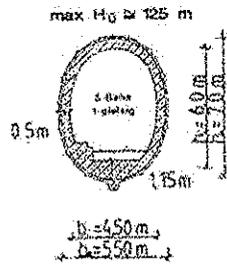
- o Secciones lo mas circulares posibles.
- o Colocación de contrabóveda robusta.
- o Permitir cierto hinchamiento del terreno con objeto de ^{por} reducir los empujes sobre el sostenimiento.
- o Aplicar el sostenimiento-revestimiento lo más cerca posible del frente.
- o Limitar la entrada de agua al terreno.
- o Evitar la degradación o plastificación del terreno que acompaña al hinchamiento, sobre todo en caso de fuertes tensiones geostáticas.

En cuanto al criterio de permitir ciertos hinchamientos se producen dos tendencias claramente diferenciadas:

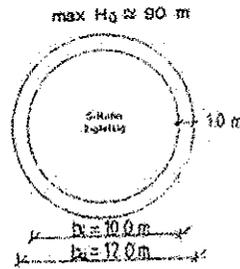
- Permitir el desarrollo de hinchamientos: Se consigue dejando zonas huecas debajo de la solera, colocando materiales con huecos como gravas, y mediante materiales de poca densidad con fácil capacidad para comprimirse. Se ha empleado en el pasado, en los primeros diseños, estando actualmente en desuso por presentar problemas de deformaciones asimétricas, y no impedir la entrada de agua al macizo, incluso favoreciéndola, con lo que de negativo tiene esto.
- Impedir cualquier hinchamiento resistiendo las presiones que se produzcan. Requiere un refuerzo de la bóveda y especialmente el empleo de una contrabóveda muy gruesa, buscándose una sección circular. Este tipo de soluciones se han visto potenciadas en su uso, además de por mejores resultados, por el avance en los métodos de cálculo.

A continuación se presentan secciones empleadas en diversos túneles de Alemania para terrenos expansivos:

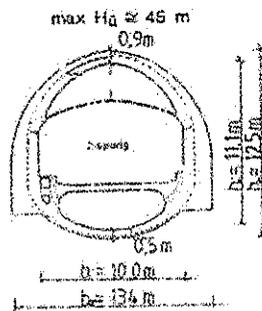
S-Bahn Stuttgart, Hasenbergtunnel:



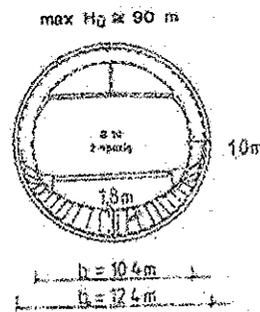
S-Bahn Stuttgart, Wendeschleife:



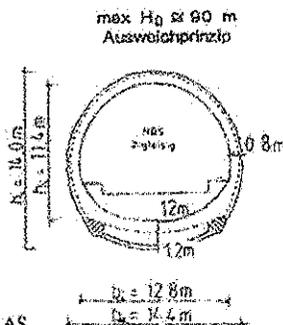
Wagenburgtunnel:



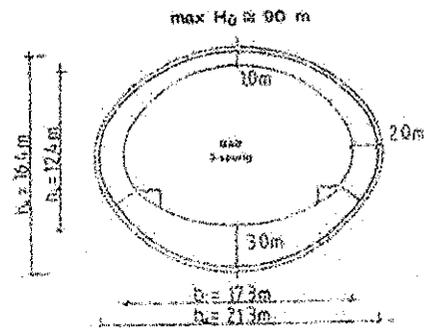
Tunnel Heselach II:



Freudensteintunnel:



Engelbergbasistunnel (Entwurf):

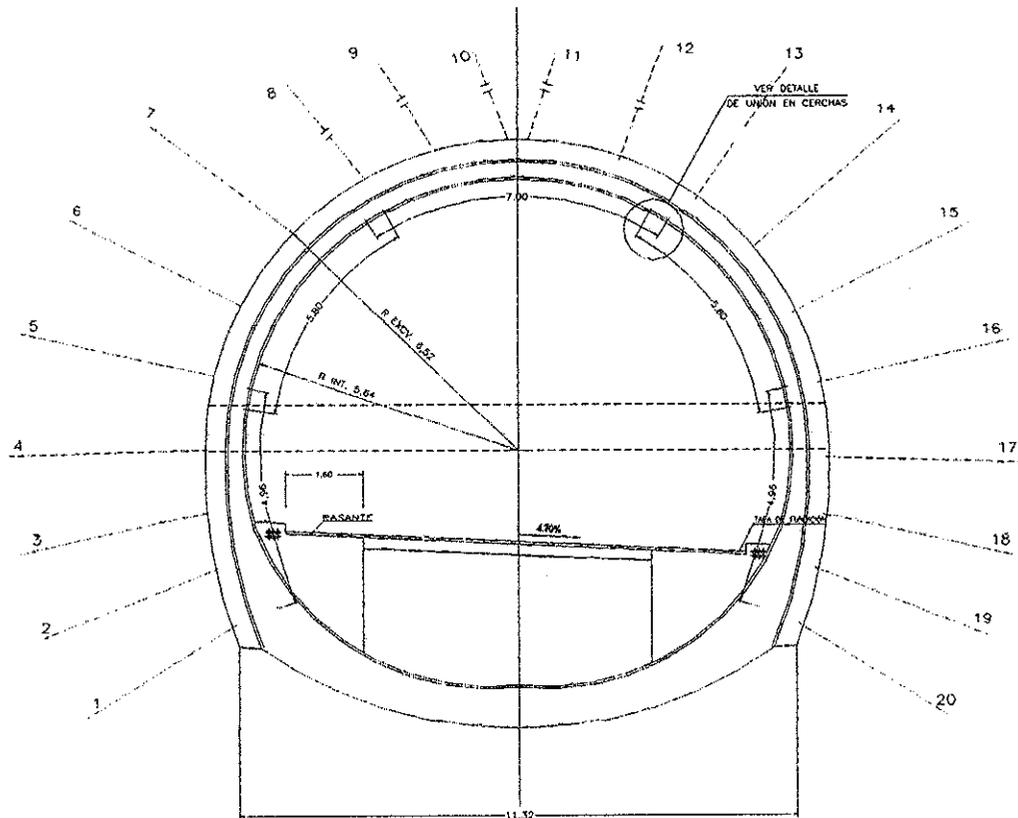


NOTAS

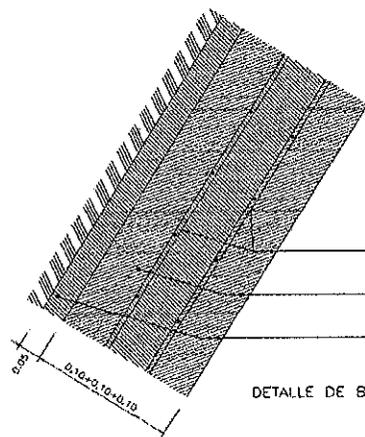
- Todos los túneles van en anhidrita, salvo el de Heselach II donde la anhidrita sólo llegaba al nivel de contrabóveda
- H_0 = Cobertura máxima

FIG. 3.- SECCIONES TÍPICAS UTILIZADAS EN ALEMANIA

En España, para el caso del Túnel de Fabares en terreno expansivo, a continuación se muestra la sección tipo y armado de la solución adoptada:



TUNEL DE FABARES
SOSTENIMIENTO SECCION TIPO V



NOTA : SOBRECARGO PREVISTO PARA
SEMI-CONVERGENCIA - 30mm

BULONES DE ACERO CORRUGADO DE ANCLAJE
REFORTADO CON RESINA
#25mm. L = 4.00m.
ESPACIADO LONGITUDINAL DE 1.00m.
Y TRANSVERSAL DE 1.00m.

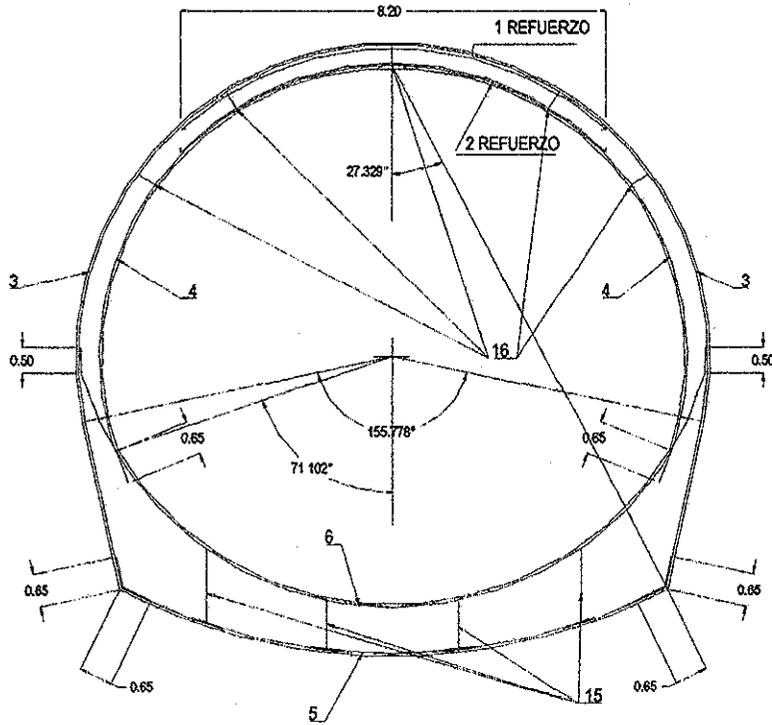
ME 150. v. 150. 86 (1)

SOSTENIMIENTO DE 10x10x10cm. DE HP-300

SELLADO DE 5cm. DE HP-300

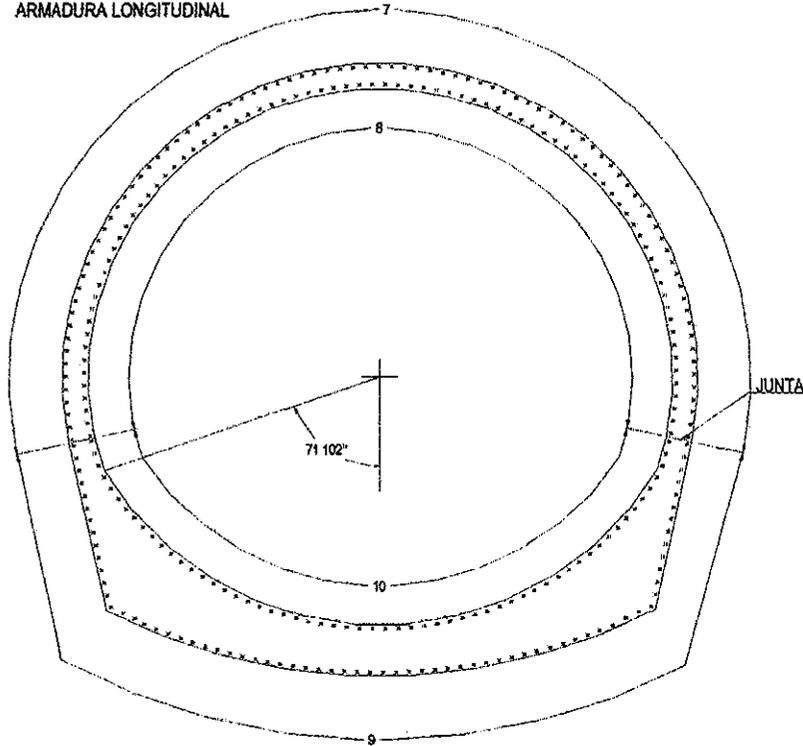
DETALLE DE BULON Y HORMIGONES (1) LA 2ª MALLA SE PODRA SUSTITUIR POR FIBRA METALICA
EN LA 3ª CAPA DE SOSTENIMIENTO (40Kg/m³)

ARMADURA TRANSVERSAL



- 1 5 ø25
- 2 5 ø25
- 3 5 ø25
- 4 5 ø25
- 5 10 ø25
- 6 10 ø25
- 7 ø12 a 0.25
- 8 ø12 a 0.25
- 9 ø20 a 0.25
- 10 ø20 a 0.25
- 15 ø16 (1/m²)
- 16 ø12 (5 cada m.)

ARMADURA LONGITUDINAL



4.2.- Problemática de la construcción

La mayoría de estos túneles fueron construidos con métodos ^{de secciones partida} que sectorizaban la excavación. De este modo, el avance se realizaba con varias galerías comenzando por los hastiales para, posteriormente, excavar la galería central y completar el avance. Después se excavaba la destroza colocando la contrabóveda muy plana en la mayoría de los casos. No obstante, el número de galerías y la secuencia de excavación cambiaba según los distintos métodos existentes (belga, austriaco, italiano, etc...). La excavación de la sección se prolongaba excesivamente en el tiempo.

Por estos motivos, se producían grandes deformaciones como consecuencia del método de excavación y de la forma de la contrabóveda, dando como resultado un incremento de la plastificación y de la pérdida de resistencia del macizo rocoso. Además, esto implicaba un factor tiempo, ya que la plastificación y la pérdida de resistencia depende del tiempo.

Por consiguiente, debía utilizarse un método de excavación ^{rápido} que realizara ésta rápidamente y permitiera también cerrar la contrabóveda lo más rápidamente posible. Por otro lado, la contrabóveda debía ser lo suficientemente curvada como para evitar la deformación.

El levantamiento de solera es un proceso de deformación diferida que solamente puede comprenderse considerándolo como parte de un sistema total que comprende el sostenimiento en la solera, hace a los hastiales incapaces de impedir dicho proceso de convergencia moviéndose hacia el interior, no tanto por la presión en su trasdós, sino por fuerzas tangenciales en su base.

En arcillas jurásicas, se pueden esperar presiones de hinchamiento algo superior a 0,3 – 0,7 Mpa. Se puede permitir la redistribución de tensiones, pero no una excesiva plasticidad del material.

Existe una notable diferencia de comportamiento expansivo entre las distintas litologías. No se comprenden bien todavía todos los fenómenos de interacción.

entre la argilita y la anhidrita-yeso, aunque sí puede decirse que hay una interacción entre el hinchamiento de la argilita (proceso físico) y la transformación de la anhidrita a yeso (proceso químico).

En las alternancias anhidrita/argilitas triásicas es poco probable que se excedan presiones de hinchamiento de 2,5 Mpa, siendo el valor medio más probable, según la experiencia actual, de 1,6-2,0 Mpa. El desarrollo de dicha presión de hinchamiento o el levantamiento depende del procedimiento de construcción y el tipo de sección. Secciones circulares en las que se aplica un sostenimiento rápido (cerrado del anillo) y de suficiente resistencia son las más adecuadas. Debe evitarse una excesiva plasticidad que va acompañada de una reducción de la tensión normal media y del acceso de agua. Cuando las tensiones naturales y redistribuidas permanecen en el macizo rocoso, es decir cuando no se permite el desconfinamiento de la roca, las presiones sobre el sostenimiento son mucho menores.

Con los conocimientos actuales, un método de construcción apropiado es fundamental para prevenir, en la medida de lo posible la movilización de elevadas, presiones de hinchamiento sería: excavación con tuneladoras y rozadoras, voladuras suaves seguidas del perfilado del recorte con una forma circular (sin esquinas ni cambios bruscos en el perfil). De esta manera aparecerán presiones de hinchamiento más pequeñas capaces de ser soportadas por el sostenimiento. Estos métodos de construcción cuidadosa, garantizan que las tensiones tangenciales permanecen en el terreno ayudando a prevenir el hinchamiento.

En conclusión, resumiendo las recomendaciones recogidas de diversos autores, las pautas a seguir para la construcción de túneles en rocas expansivas son las siguientes:

1. Las secciones con problemas de hinchamiento están restringidas a las zonas con anhidrita (por debajo del nivel de anhidrita) y con arcillas expansivas (corrensita y montmorillonita). En aquellas zonas donde la

anhidrita está transformada totalmente a yeso y las arcillas hidratadas totalmente, las soleras permanecen esencialmente estables.

inmediata

2. El proceso puede comenzar inmediatamente después de la excavación con el hinchamiento de minerales arcillosos expansivos acompañantes a la anhidrita y se extiende durante décadas con la transformación anhidrita-yeso, aunque con tendencia decreciente. De acuerdo con la experiencia de los últimos años son esperables presiones de hinchamiento de 0,7 Mpa en arcillas y de 1,6-2,0 Mpa en anhidritas con intercalaciones de argilitas.
3. En ausencia de contrabóveda, el valor de hinchamiento se incrementa con el tamaño de la sección y la deformación puede prolongarse hasta una profundidad aproximadamente equivalente a la anchura del túnel.
4. El hinchamiento máximo ocurre cerca del eje del túnel disminuyendo hacia los hastiales. La desconsolidación de la roca se incrementa desde los hastiales hacia el eje y varía con la litología original (lutitas o sulfatos).
5. Las zonas internas están completamente secas cuando se excavan. Este estado cambia rápidamente al penetrar el agua por múltiples vías, como juntas, fallas y fracturas abiertas en macizo rocoso, agua de la propia maquinaria ó la rotura de los tubos de drenaje del túnel.
6. Son aconsejables métodos de construcción ^{con} destinados a conseguir un rápido cerrado de la contrabóveda o anillo. La excavación parcial en fases secuenciales, origina una redistribución de tensiones que causan la plastificación y la pérdida de resistencia del macizo rocoso.
7. Forma de la excavación. Las esquinas deben evitarse, debido a que provocan concentración de esfuerzos. Secciones circulares son más resistentes contra la presión de hinchamiento.
8. Evitar la degradación o plastificación del terreno que acompaña al hinchamiento, especialmente en el caso de fuertes tensiones geostáticas.

9. Limitar la entrada de agua al terreno e impermeabilizarlo si fuera necesario.
A este respecto, no se conoce bien la eficacia de eventuales barreras para cortar el flujo, como coronas de inyección, jet-grouting, etc.... Además tanto argilitas como las anhidritas son muy impermeables
10. La plastificación puede reducirse mediante una excavación cuidadosa con máquinas tuneladoras. La plastificación ya producida puede neutralizarse por la inyección de lechadas de cemento en fracturas y juntas para impermeabilizar el macizo rocoso.
11. Los diseños actuales de sostenimiento-revestimientos de túneles en material expansivos siguen dos líneas principales: 1) resistir los empujes mediante sostenimientos robustos; ó 2) Dejar expandir al terreno reduciendo así los empujes.

La solución que más se sigue actualmente es la primera. La segunda solución implica la hidratación de la roca y, por tanto, la pérdida de sus características resistentes y su degradación, que se haría mayor en las zonas más delicadas como la base de los hastiales y la solera. La transformación a yeso implica también un aumento de la porosidad y la permeabilidad al agua, que se renovarían por la circulación y podría continuar con el proceso de hidratación originando incluso la disolución del yeso formado y la anhidrita (karstificación), con la génesis de huecos en el trasdós del sostenimiento.

12. El sostenimiento-revestimiento debe ser colocado inmediatamente, lo más cerca posible del frente, utilizando gunita o segmentos prefabricados.
13. Los cambios de volumen de las rocas expansivas generan, principalmente, las siguientes deformaciones en los túneles:
- Levantamiento de la solera.
 - Cierre o convergencia de la base de los hastiales.

- Elevaciones de clave (se levanta todo el túnel clavándose en el terreno o incluso levantando la montera de tierra si el recubrimiento no es excesivo).
14. Las fuertes sollicitaciones sobre el sostenimiento debidas a la presión de hinchamiento, aconsejan utilizar hormigones de alta resistencia (HP-475 o HP-500) y el armado de las contrabóvedas con armaduras.
 15. Permitir cierto hinchamiento del terreno con objeto de reducir los empujes sobre el sostenimiento. Esto puede lograrse con la colocación de sostenimientos flexibles que permiten cierta deformación.
 16. La contrabóveda debe diseñarse con una forma tal que proporcione una sección transversal estáticamente favorable, que sea robusta y que, además elimine o reduzca la zona de mayor presión. A la hora de resistir los esfuerzos, son mejores las contrabóvedas de alta curvatura y grandes espesores (80 – 120 cm).
 17. La colocación de zonas con materiales compresibles no previene a la construcción de una sustancial presión de hinchamiento, que se producirá más tarde, pero que alcanzará las magnitudes indicadas.
 18. Los anclajes son inadecuados para contrarrestar fuertes hinchamientos. La zona donde se produce ^{de} el hinchamiento es generalmente demasiado grande, lo que requeriría anclajes muy largos y en un número demasiado grande como para crear una contrapresión suficiente. No serían económicos.
 19. Los conceptos avanzados de construcción de túneles requieren la monitorización (auscultación) de las deformaciones desde el principio de la construcción hasta el final de ésta y se prolongan durante la explotación del túnel. Esto permite seguir el proceso de hinchamiento midiendo los esfuerzos o tensiones sobre el sostenimiento, ó bien determinar las deformaciones en un amplio rango.

4.3.- Ejemplo de la ejecución del revestimiento del túnel de Fabares

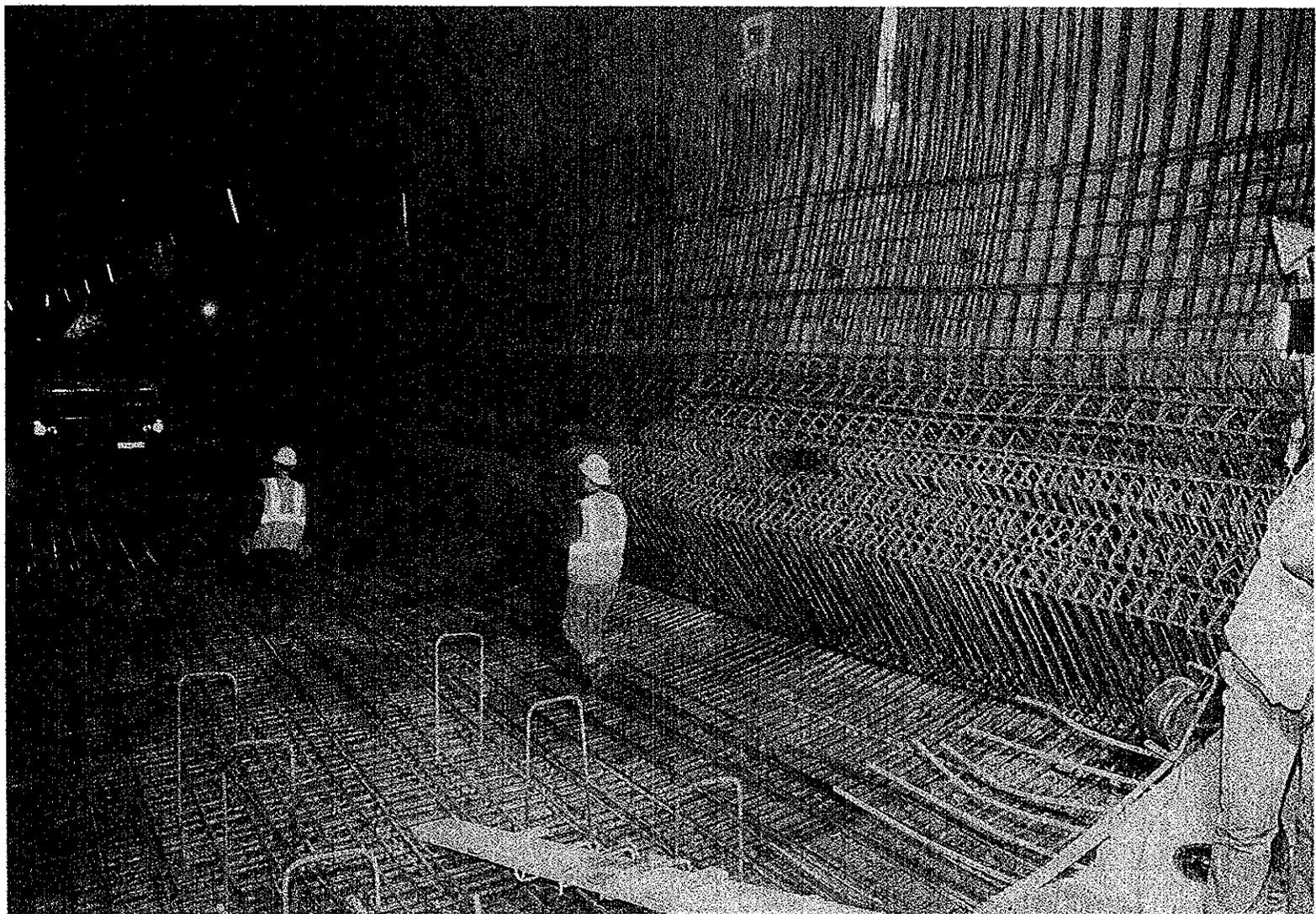
Las anhidritas puras son un material duro, requieren explosivo para su arranque. El martillo picador tiene muy poco rendimiento dado que el macizo es muy denso y cerrado, apenas tiene fracturas o diaclasas, la pica se entierra y no rompen lajas. Las rozadoras tampoco pueden con el material, y no por la dureza o desgaste en si mismo, sino porque se colmatan las picas y no son capaces de desahogar el detritus.

El sostenimiento es capaz de resistir los pequeños empujes. Si no fuera por los hinchamientos apenas requeriría sostenimiento. No obstante por las razones de proteger lo antes posible el macizo se debe colocar inmediatamente.

La ejecución de la contrabóveda y bóveda de revestimiento presentan gran complejidad. La contrabóveda debe realizarse muy próxima al avance y a la destroza, complicando la organización de los trabajos, especialmente si solo se ataca desde un lado. Al disponer de una pesada sección de ferralla se corta totalmente el paso al avance y destroza hasta que se coloca la armadura, se hormigona y se tiene la resistencia para pisarla. Por otro lado la propia ejecución de la ferralla es muy complicada por la dificultad de acceso con el hierro al interior y por su manipulación con grúas muy pequeñas. La manipulación es muy costosa y la mayor parte del hierro ha de curvarse previamente.

Los rendimientos en avance y destroza serian similares a un trabajo en caliza, salvo por las interrupciones de la contrabóveda, por lo que finalmente avanza al ritmo de la contrabóveda. El rendimiento medio en la ejecución de la contrabóveda fue de 80 metros al mes.

A continuación se muestran unas fotos de la ejecución.





SECCION TIPO ANHIDRITAS

DICIEMBRE 2002



SECCION TIPO ANHIDRITAS

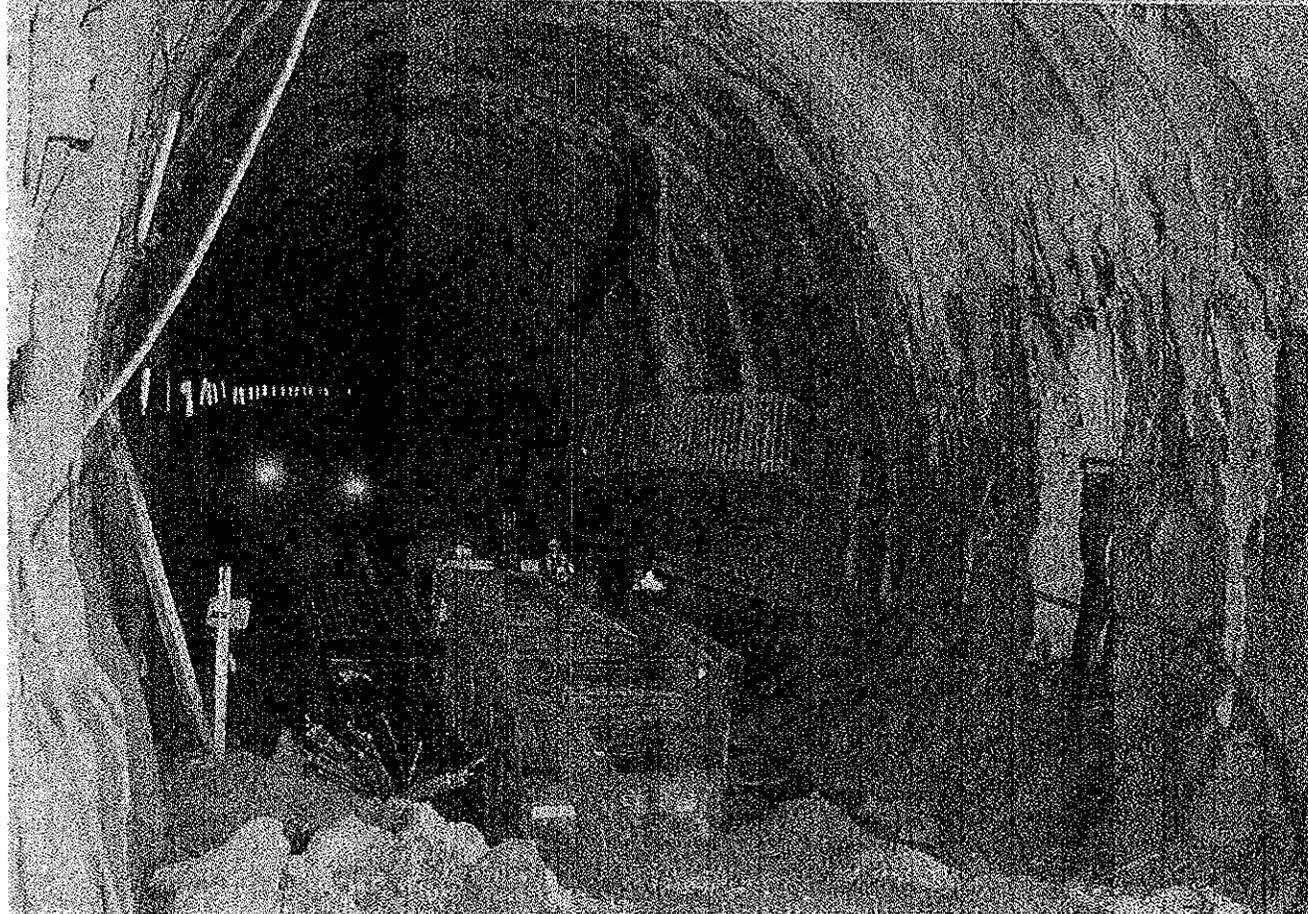
DICIEMBRE 2002

B



SECCION TIPO ANHIDRITAS

DICIEMBRE 2002



Rendimientos en la ejecución:

- **Excavación en avance y destroza:** se realizaron mediante voladura. El comportamiento fue bueno, no se presentaron problemas de sostenimiento. La destroza emplea mas tiempo de lo habitual en una sección normal, debido al gran volumen de excavación que tiene.

El avance se realizaba con una y dos voladuras diarias de 3,5 metros, el rendimiento medio promediado no llegaba a 5 metros día.

La destroza se atacaba condicionada por el avance y el resto del túnel. El promedio de excavación era de 6 metros día.

- **Ferrallado:** La contraboveda se ejecutaba por tramos de 36 metros que se hormigonaban a continuación. En el conjunto de los dos tubos se ferrallaban 100 metros mes. La bóveda se ferrallaba con la ayuda de unos carros para montaje con un rendimiento de 12 metros día.

- **Hormigonado:**

El hormigonado de la contraboveda se ejecutaba con un rendimiento de 80 metros mes. La bóveda se ejecutaba con dos carros a un rendimiento de 6 metros día.