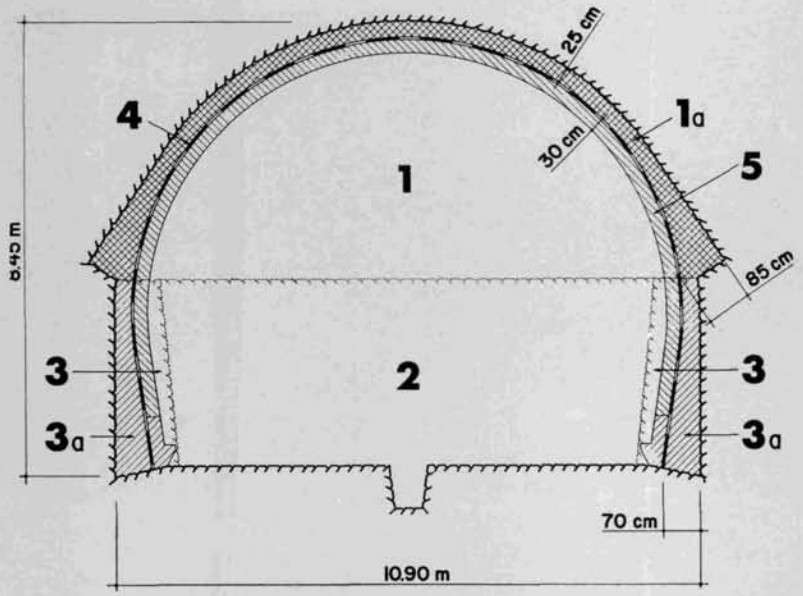
Informes de la Construcción Vol. 25, nº 244
Octubre de 1972

nuevo sistema de revestimiento de túneles

sinopsis 570-2

En este artículo se describe un nuevo procedimiento de construcción para el revestimiento provisional y definitivo de túneles en rocas sueltas. Su originalidad reside en unas chapas de forma especial que sirven, primero, como encofrado, y después, como armaduras del hormigón. Se señalan sus ventajas de orden técnico y económico, y se compara con otros métodos utilizados hasta ahora. Como ejemplo práctico de utilización de este método se describe la construcción de los túneles del Fronzaley en la autopista N-9 de Suiza.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



Perfil tipo del túnel de Flonzaley. Esquema de excavación y hormigonado.

1. Excavación de la bóveda, 40 m².
1a. Revestimiento de la roca de la bóveda con 25 a 85 cm de hormigón BH 300 y chapa Bernold de 2 mm.
2. Excavación del núcleo central.
3. Excavación de las partes laterales.
3a. Revestimiento de la roca sobre las partes laterales con 25 a 70 cm de hormigón BH 300 y chapa Bernold de 2 mm.
4. Gunitado de 2 cm, como mínimo.
5. Bóveda interior de 30 cm recubierta con una capa Vandex.

Introducción

El método ideal de perforación de un túnel sería aquel que permitiese excavar el perfil y hormigonar la bóveda del túnel simultáneamente.

Con los equipos técnicos actuales utilizados en la construcción de túneles y galerías, ese ideal es realizable.

Aunque en la práctica la excavación y el hormigonado no pueden hacerse en una sola operación, se ha logrado acercar tanto ambas operaciones que todo el trabajo se realiza en el período en que empiezan a desarrollarse tensiones internas en las rocas, mientras aquéllas permanecen aún iguales a cero o tienen un valor muy pequeño.

En todas las rocas, excepto en una roca sumergida en la que la presión hidrostática tiene un papel determinante, un orificio puede permanecer abierto durante un cierto tiempo, sin que sea necesario apuntalarlo, es decir, sin que se desarrollen tensiones en la roca y sea necesaria la consolidación.

Las zonas de descompresión alrededor del orificio se forman gradualmente y se extienden hacia el interior del macizo. Estos movimientos pueden detenerse e, incluso, impedirse por medio de un revestimiento de hormigón rápidamente colocado, que se adhiera perfectamente a la roca. Puede decirse, por lo tanto, que las tensiones de la roca aumentan, partiendo de cero, a medida que progresa la excavación (Wiedemann, 1948).

A su vez Kastner escribe (1962): «Es necesario un cierto tiempo para que se desarrollen tensiones internas, es decir, las deformaciones plásticas de las rocas sólo comienzan, en general, algún tiempo después de realizada la perforación. Un método que permitiese colocar un revestimiento de hormigón de espesor adecuado durante este período de estabilidad sería preferible a los demás métodos de construcción.»

La experiencia ha confirmado la opinión de Wiedemann y Kastner sobre las condiciones de tensión en las rocas y se puede, pues, contar con un período mínimo de estabilidad en todas las rocas, a excepción de las sumergidas.

En el transcurso de los últimos 15 años el apuntalamiento tradicional de madera ha sido reemplazado por el de acero, que ha sufrido la prueba de numerosas obras. Pero desde hace ya algunos años se han hecho nuevos ensayos con un método para la consolidación de túneles por medio de anillos, que se suponía más económico. Este procedimiento con cimbras de acero, telas metálicas y hormigón proyectado, en la práctica, ha resultado más caro de lo que se esperaba y no ha podido reemplazar al apuntalamiento tradicional de acero, en rocas muy sueltas.

Hace aproximadamente 3 años, el ingeniero suizo Jean Bernold ha desarrollado y comercializado un nuevo sistema para la consolidación de galerías y pozos.

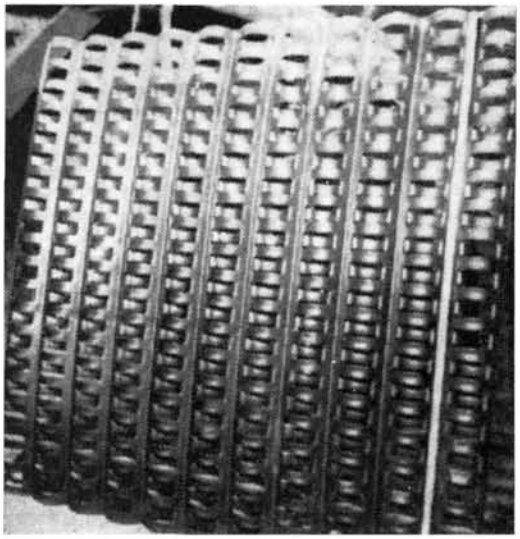
El elemento fundamental de este sistema es una chapa metálica de forma y perforaciones especiales que sirve, primero, como encofrado, y después, como armadura del hormigón de revestimiento.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Durante el endurecimiento del hormigón estas chapas, fabricadas por deformación en frío, con nervios de sección en V, son soportadas, provisionalmente, por arcos metálicos de montaje y, posteriormente, permanecen en el interior del hormigón como armaduras. Debido a su forma especial tienen la rigidez necesaria para absorber la presión del hormigón fresco y, por otra parte, son lo suficientemente densas para impedir que se filtre a través de ellas un hormigón de consistencia plástica, durante la compactación. Un hormigón bien compactado, que une el revestimiento al perfil de la excavación, protege al mismo tiempo la roca contra la desintegración y la destrucción por causa del agua y del aire.

La roca, el hormigón y la armadura forman una estructura homogénea que absorbe las cargas de la roca menos resistente.

De esta forma, el peligro en la zona que se encuentra inmediatamente detrás del frente de ataque se elimina en muy poco tiempo.



Chapa nervada de acero.

Características de las chapas metálicas de encofrado y armadura

Las chapas se fabrican en paneles de 1.200 × 1.080 mm y espesores de 1, 2, 3 y 5 mm.

Estos paneles pueden unirse y articularse por medio de redondos de acero, con lo que se consigue fácilmente adaptarse con exactitud a la bóveda del túnel. El montaje de los paneles es muy rápido.

En la tabla 1 puede verse el peso por m² de las chapas metálicas:

TABLA 1

ESPESOR DE LA CHAPA	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm
Panel normalizado $1{,}08 \times 1{,}20 = 1{,}296$ m²	10,5 kp	21,0 kp	31,4 kp	52,4 kp
Peso total por m² (incluidos redondos de unión)	11,0 kp	21,0 kp	31,0 kp	52,0 kp

Para utilizar la chapa metálica como armadura del hormigón pueden considerarse las secciones de la tabla 2:

TABLA 2

ESPESOR DE LA CHAPA	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm
Sección del acero de un nervio (cm²)	0,57	1,09	1,62	2,7
Diámetro de un redondo de la misma sección (mm)	8,5	11,8	14,4	18,5
Distancia entre nervios (cm)	12	12	12	12
Acero por m con recubrimiento de 12 cm (cm²)	5,3	10,2	15,2	25,2

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Los ensayos realizados en el EMPA de Zurich demuestran que las chapas Bernold están perfectamente capacitadas para servir como armadura, e incluso, que su adherencia al hormigón es mejor que la de las barras de acero.

Campo de aplicación del sistema Bernold

Este sistema tiene su dominio de aplicación, principalmente, en la perforación de túneles en rocas ligeramente friables a muy friables. Para que su aplicación sea ventajosa desde el punto de vista económico hay que utilizarlo, no sólo como soporte provisional, sino formando parte del revestimiento definitivo de hormigón.

Cuando la naturaleza de las rocas varía fuertemente a lo largo del túnel, basta una sencilla comparación con otros métodos para demostrar la rentabilidad de este sistema. Para determinar el método de apuntalamiento más conveniente, las rocas deben clasificarse por su estabilidad temporal.

La clasificación de Lauffer (Norma SIA 179), puede verse en la tabla 3:

TABLA 3

	CLASE 3 Muy suelta		CLASE 4 Friable		CLASE 5 Muy friable	
	T		T		T	
L	Límite (meses)	Medio (semanas)	Límite (días)	Medio (horas)	Límite (minutos)	Medio (minutos)
5 m	0,5	1	0,25	3	7	—
4 m	—	—	—	—	10	5
3 m	1	2	0,5	6	15	—
2 m	—	—	—	12	30	15
1 m	3,5	8	2	24	90	45

L = Luz libre entre la última cimbra colocada y el frente de ataque.

T = Tiempo transcurrido entre el momento de la excavación y el comienzo de los desprendimientos importantes.

Por lo tanto, como la longitud de los pasos de la excavación depende de la calidad de la roca, habrá que calcular la distancia entre el último anillo hormigonado y el frente de ataque, teniendo en cuenta que los tiempos de estabilidad temporal dados por la tabla 3 deben ser suficientes para hormigonar un anillo.

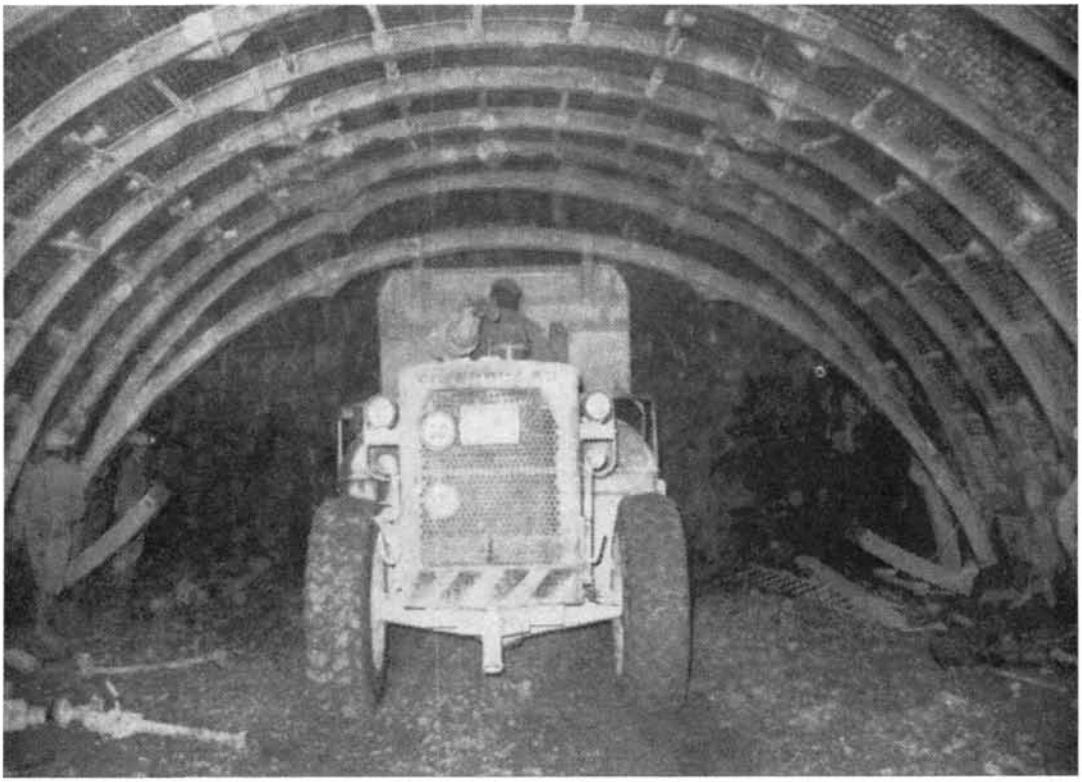
Con este criterio, la construcción de revestimientos de hormigón está particularmente indicada en las rocas de clases 3 y 4.

Aplicaciones del sistema Bernold

Los túneles del Flonzaley se encuentran situados en la Autopista N-9, en el tramo entre Montreaux y Lausana.

Se trata de dos túneles, casi paralelos, de 700 m de longitud, con 35 m de distancia media entre sus ejes. Por cada uno pasa una calzada de 7,75 m de anchura y dos aceras de 0,75 m; la altura libre es de 4,50 m.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



Transporte de una cimbra. Obsérvense las partes plegadas inferiores.

Otros datos técnicos:

Sección de la excavación	78 m²
Revestimiento de la roca:	
Espesor teórico de hormigón,	
— en la bóveda	25 cm
— en estribos de la bóveda	85 cm
— en bataches	25-70 cm
Chapas Bernold	2 mm
Gunita de protección	2 cm
Bóveda interna	30 cm

Geología

Los túneles atraviesan una molasa friable, una formación geológica con capas de arenisca y marga cuyo espesor varía desde algunos centímetros a varios metros. En las diversas capas se encuentran todas las variedades de rocas: areniscas duras, areniscas margosas y margas arenosas con bolsas de arcilla. La composición y la consistencia varían de un metro a otro, y existen numerosas grietas. En algunas zonas brota agua o gotea por las grietas.

La molasa tiene la siguiente composición:

Arenisca	15 %
Arenisca margosa	40 %
Marga, arcilla	45 %
Resistencia a la compresión: 200-500 kp/cm²	

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Proceso constructivo

En vista de que toda la roca es de mala calidad, el avance tiene lugar en dos fases de trabajo: En la primera fase se excava, por el método belga, la galería de avance de 40 m^2 de sección, a todo lo largo del túnel. En la segunda fase se excavan los 38 m^2 de la destroza.

En esta segunda fase se excavan separadamente la destrocilla y los bataches, para que estos últimos sirvan de soporte a la bóveda.

Para adaptarse a este método de trabajo se decidió ensanchar los estribos de la bóveda hasta 85 cm.

A continuación se procede al montaje de las chapas y al hormigonado.

Método de avance

La longitud de los pasos de la excavación varía, según la estabilidad temporal de la roca, entre 2 y 3 m; en rocas friables los pasos no serán mayores de 1 m.

Para la perforación, barrenado y retirada de 100 a 120 m^3 de escombros se necesitan de 4 a 5 horas. Esta condición determina, también, la longitud de los arcos de hormigón para el hormigonado.

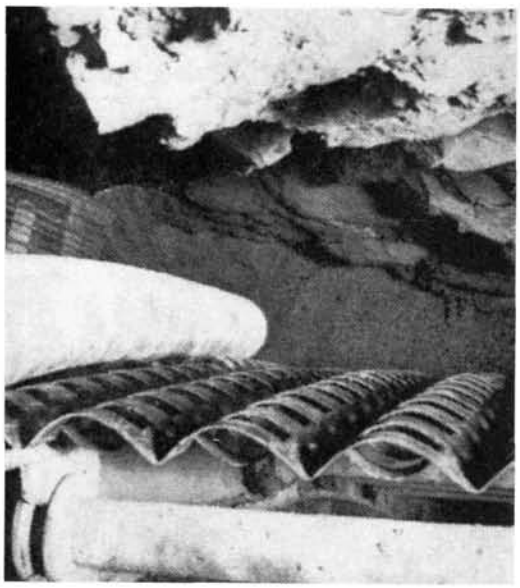
Una vez terminado el desescombro se colocan de 1 a 3 arcos metálicos de montaje, según la longitud del arco que se va a hormigonar. Como regla general, la distancia entre los arcos de montaje varía entre 0,96 y 1,02 m, según la anchura de las chapas previstas. Los arcos de acero se arriostran entre sí por medio de tubos.

Los arcos de montaje se construyen con arreglo al radio del túnel y van provistos de articulaciones; gracias a esas articulaciones es posible desplazarlos por el interior de aquél, sin desmontarlos. El tiempo necesario para el desplazamiento de un arco es, aproximadamente, 10 minutos.

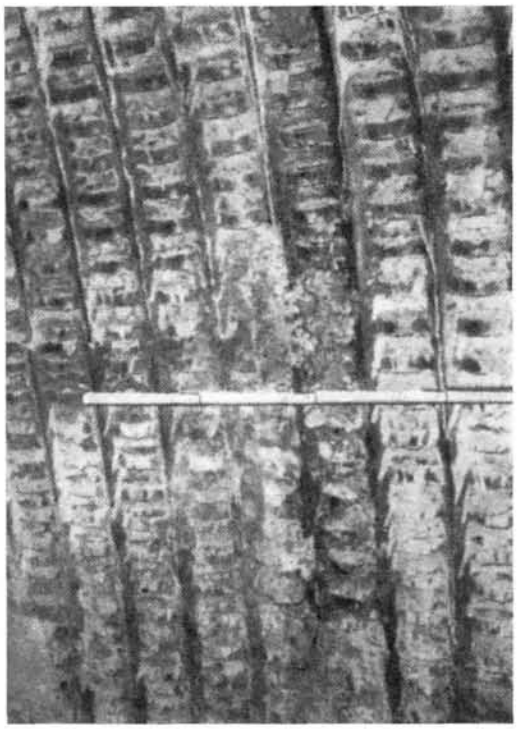
El número de arcos de montaje necesarios en la obra depende del ritmo de avance, pero, en general, suelen ser suficientes de 8 a 12 arcos.

Montaje de una chapa.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



Vista del trasdós de la chapa. Simultáneamente con su montaje se realiza el relleno de hormigón, de consistencia plástica rígida. A la izquierda, tubo de conducción.



Las chapas Bernold y el hormigón están estrechamente unidos.

Las chapas se colocan, partiendo de abajo, a ambos lados de la cimbra formada por los arcos de montaje; la unión de unas a otras se realiza de forma que resistan a la tracción. Simultáneamente a la colocación de las chapas, se va rellenando de hormigón el espacio entre ellas y la roca; este hormigón se vibra hasta que fluye por entre los nervios de las chapas. De esta forma, chapas, hormigón y roca forman un bloque unido y resistente.

La calidad del hormigón es decisiva en la resistencia y estanquidad de la obra.

En los túneles de Flonzaley se utiliza un hormigón BH 300, con la siguiente granulometría:

0- 3 mm	35 %
3- 8 mm	20 %
8-15 mm	22 %
15-30 mm	23 %

La relación agua/cemento es de 0,48. El aumento de la cantidad de arena a costa de la grava, favorece la unión entre el hormigón y los nervios de las chapas; en cambio, la resistencia a compresión disminuye ligeramente, pero se alcanzan siempre los 260 kp/cm^2 a los 7 días y 380-400 kp/cm^2 a los 28 días.

Aunque la colocación de las chapas se haya hecho con mucho cuidado, se producen desviaciones en la línea teórica de la bóveda de hasta 5 cm. Al dimensionar el recubrimiento interior hay que tener en cuenta ese hecho.

En estos túneles las chapas Bernold se colocan de forma continua en toda la longitud del túnel y en el desarrollo completo de la bóveda.

A lo largo de la galería de avance la molasa se ha presentado, a veces ligeramente suelta y a veces muy suelta, pasando por todos los grados intermedios y siempre correspondiendo a las clases 3 a 4, antes mencionadas. Por lo tanto, está justificado el montaje continuo de las chapas.

Los tiempos de estabilidad eran los justos para proceder a la preparación y revestimiento de arcos de 2,5 a 3 m de longitud. Con tiempos de excavación de 4 a 5 horas, y 4 a 6 horas de duración del hormigonado, es posible conseguir dos ciclos de trabajo por día, lo que permite un avance medio diario de 5 m, o sea, unos 100 m por mes.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Para poder lograr ese ritmo de trabajo es preciso que se cumplan ciertas condiciones:

— que el estado de la roca sea favorable (estabilidad temporal, estructura, presencia de agua);
— que el parque de maquinaria tenga suficiente capacidad (máquinas de reserva);
— buena organización, y
— equipos de avance experimentados.

Comparación con los métodos tradicionales

La experiencia demuestra que este nuevo sistema suizo de construcción de revestimientos de hormigón, presenta un número importante de ventajas tanto desde el punto de vista técnico como desde el económico.

Ventajas técnicas

Actualmente se admite, como principio general, que la primera condición que debe imponerse a un método de perforación y extracción de roca, estable o inestable, es que pueda aplicarse en un plazo muy breve un revestimiento de hormigón que ofrezca garantías suficientes.

El método descrito cumple esta exigencia; la rápida colocación de los arcos de montaje, el sencillo manejo de las chapas y la utilización de maquinaria adecuada para el hormigonado, permiten operar eficazmente en un plazo mínimo.

Al contrario que en el procedimiento en que se utiliza hormigón proyectado, en este sistema el hormigón fresco se mantiene protegido de los posibles daños ocasionados por la perforación, ya que las chapas actúan como encofrado hasta que el hormigón adquiere la resistencia adecuada.

Capacidad de adaptación

Cuando se perfora un macizo rocoso, el constructor de túneles se enfrenta, casi siempre, a una variedad de condiciones geológicas. El número de arcos de montaje, la distancia entre ellos y la dimensión de las chapas pueden elegirse en cada caso particular en función de la calidad de la roca. Además, es posible hormigonar hasta el frente mismo del avance.

Las chapas pueden adaptarse a las variaciones de sección y, por lo tanto, los ensanchamientos, bifurcaciones, etcétera, pueden realizarse sin grandes problemas y sin gastos excesivos.

Seguridad

Un revestimiento o cualquier otro trabajo de sostenimiento de rocas, sólo tienen sentido si ofrecen garantías contra la caída de dichas rocas o fragmentos de ellas.

Sin embargo, en las rozas de rocas muy friables es precisamente durante el montaje cuando el equipo de trabajo corre el mayor peligro, y es frecuente que en ese período ocurran accidentes graves.

En este aspecto el sistema Bernold presenta grandes ventajas, ya que la colocación de los arcos de montaje por medio de una pala cargadora sólo dura una fracción del tiempo necesaria para montar cualquier cimbra de acero o colocar una capa delgada de hormigón proyectado. Si, provisionalmente, se ponen, sobre los arcos de montaje, unas hojas de tela metálica, se forma una galería de protección durante el tiempo que duran los trabajos de montaje propiamente dichos.

Ventajas económicas

Para la Administración de la obra, la economía de un método de construcción tiene una importancia decisiva.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de tres métodos frecuentes de apuntalamiento. El ejemplo está basado en condiciones de excavación similares a las de los túneles del Flonzaley.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

CUADRO COMPARATIVO DE DIVERSOS METODOS DE CONSTRUCCION DE TUNELES

Sección de la excavación: 78 a 87 m²; Perímetro: 22 m

CLASE DE ROCA	METODO DE CONSTRUCCION	Coste total (referido al sistema Bernold)	Coste de la consolidación (referido al sistema Bernold)
Roca suelta	Montaje de chapas Bernold con 25 cm de hormigón, sin zapata auxiliar sobre los bataches.	100	100
	Montaje semipesado HEB 180, con 16 cm de hormigón proyectado, sin zapata.	116	148
Roca friable	Montaje de chapas Bernold y 25 cm de hormigón, con zapata.	112	100
	Montaje pesado HEB 200, con 18 cm de hormigón proyectado, con zapata.	136	166
	Montaje pesado HEB 200 con bóveda exterior de 50 cm, con zapata.	141	173

Como se ve en el cuadro, el sistema Bernold es el más económico en esas clases de roca. El método cuyos precios se aproximan más a los del sistema Bernold, supone un coste suplementario de 1.000 francos por m de galería, o sea, para un doble túnel de autopista, de 1 km de longitud, 2 millones de francos.

Sin embargo, la economía del sistema es muy dudosa cuando se trata de rocas sanas y estables.

Por lo tanto, puede decirse, en pocas palabras, que en rocas buenas el sistema es malo, y en rocas malas, el sistema es bueno.

La ejecución

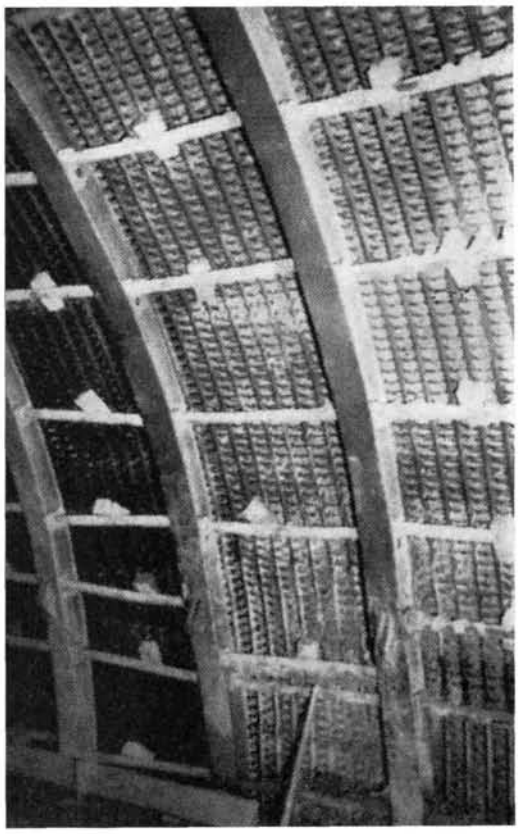
El ritmo de trabajo es otra ventaja del sistema Bernold. La excavación y el montaje están estrechamente unidos en el tiempo, y esto obliga a la racionalización del conjunto de los trabajos.

Con los métodos tradicionales, el relleno de los huecos que se originan por los desprendimientos ocasiona pérdidas de tiempo y gastos excesivos. La colocación rápida de la bóveda de hormigón evita los derrumbamientos y, por lo tanto, la operación de relleno.

Programa de trabajo

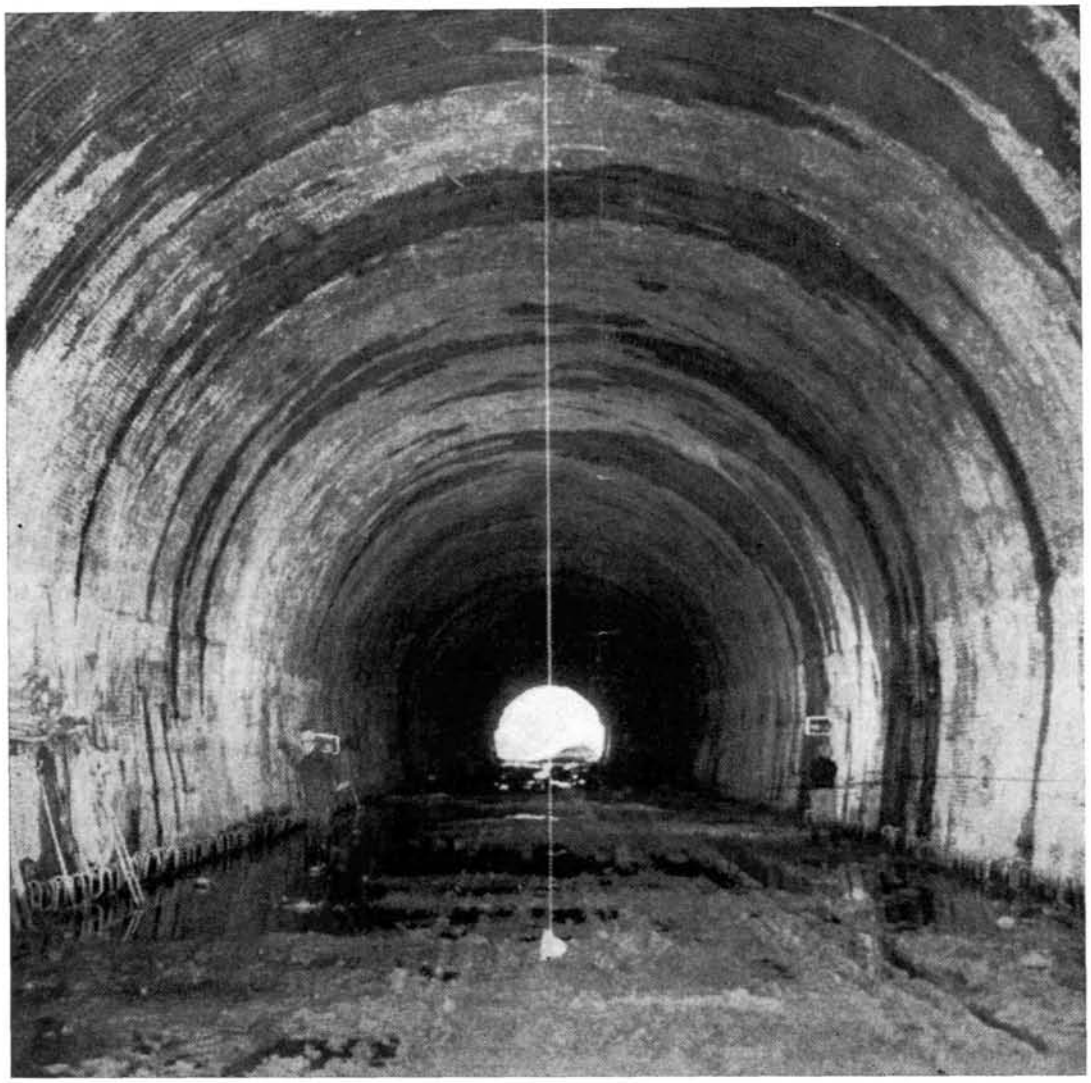
El cumplimiento de los plazos fijados en un plan de trabajo es una de las preocupaciones primeras de una empresa de construcción.

Gracias a las ventajas mencionadas, el sistema Bernold puede asegurar prestaciones muy apreciables aunque las condiciones de la roca no sean buenas. Si se tiene en cuenta que la inversión en maquinaria y en instalaciones, incluso en obras de tamaño medio, no es raro que esté entre los 2 y 3 millones de francos, se comprenderá rápidamente la importancia que tiene acortar los plazos,



Las cimbras de montaje soportan temporalmente la bóveda de hormigón que no sostiene todavía ningún elemento. A la derecha el hormigonado está ya terminado.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



Túnel de Chauderon. Vista del conjunto ya revestido con chapa Bernold.

y lo que se puede economizar en intereses y amortizaciones, así como la reducción de los gastos por aumento de los salarios y encarecimiento de los materiales.

Finalmente, debe citarse que las experiencias recogidas en este artículo han sido facilitadas por el consorcio de empresas «AG Conrad Zschokke y H. R. Schmalz AG», que construyen los túneles del Flonzaley y de Chauderon, en la Autopista N-9, de Suiza.

résumé

Nouveau système suisse de revêtement de tunnels

Dans cet article est décrit un nouveau procédé de construction pour le revêtement provisoire et définitif de tunnels pratiqués en roches libres. Son originalité consiste en des revêtements de forme spéciale qui servent, d'abord, de coffrage et, puis, d'armatures du béton. Ses avantages d'ordre technique et économique sont signalés et comparés à d'autres méthodes utilisées jusqu'à présent. L'exécution des tunnels du Fronzaley, à l'autoroute N. 9 suisse, est décrite comme exemple pratique d'utilisation de cette méthode.

summary

New Swiss system of lining tunnels

This article describes a new construction procedure for the provisional and permanent lining of tunnels in loose rocks. Its originality is due to specially shaped metal sheets which act firstly as moulding, and afterwards as concrete reinforcement. The technical and economic advantages of this system are shown, and it is compared with other methods which have been used until now. As a practical example of the use of this method the construction of the Fronzaley tunnels on the Swiss motorway N. 9 is described.

zusammenfassung

Neues Schweizer System um Tunnels zu verkleiden

In diesem Aufsatz wird ein neues Bausystem beschrieben, um Tunnels in losen felsigen Grund provisorisch oder endgültig zu verkleiden. Die Eigenheit besteht in der Anwendung bestimmter vorgeformter Platten die, erstens, als Schalung dienen und, zweitens, als Bewehrung für den Beton. Es werden die technischen und wirtschaftlichen Vorteile hervorgehoben, wobei man die Vergleiche mit anderen bis jetzt üblichen Methoden aufstellt. Als praktisches Beispiel wird die Anwendung dieses Systems bei der Ausführung der Tunnels des Fronzaley in der Autobahn nr. 9 in der Schweiz beschrieben.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es