Informes de la Construcción Vol. 21, nº 206
Diciembre de 1968

túnel de Donnerbühl, en Berna - Suiza

R. DESPONDS y K. ENSNER, ingenieros

sinopsis 573 - 2

El artículo trata de la construcción de un túnel ferroviario por el método de escudo y resume las medidas y observaciones hechas, después de la construcción, por R. Desponds, ingeniero jefe de la División de trabajos del primer distrito de los ferrocarriles federales suizos, en Lausana, y K. Ensner, ingeniero diplomado, jefe de la Sección de Medidas de la Dirección General de los ferrocarriles federales suizos, en Berna.

1. El túnel de Donnerbühl

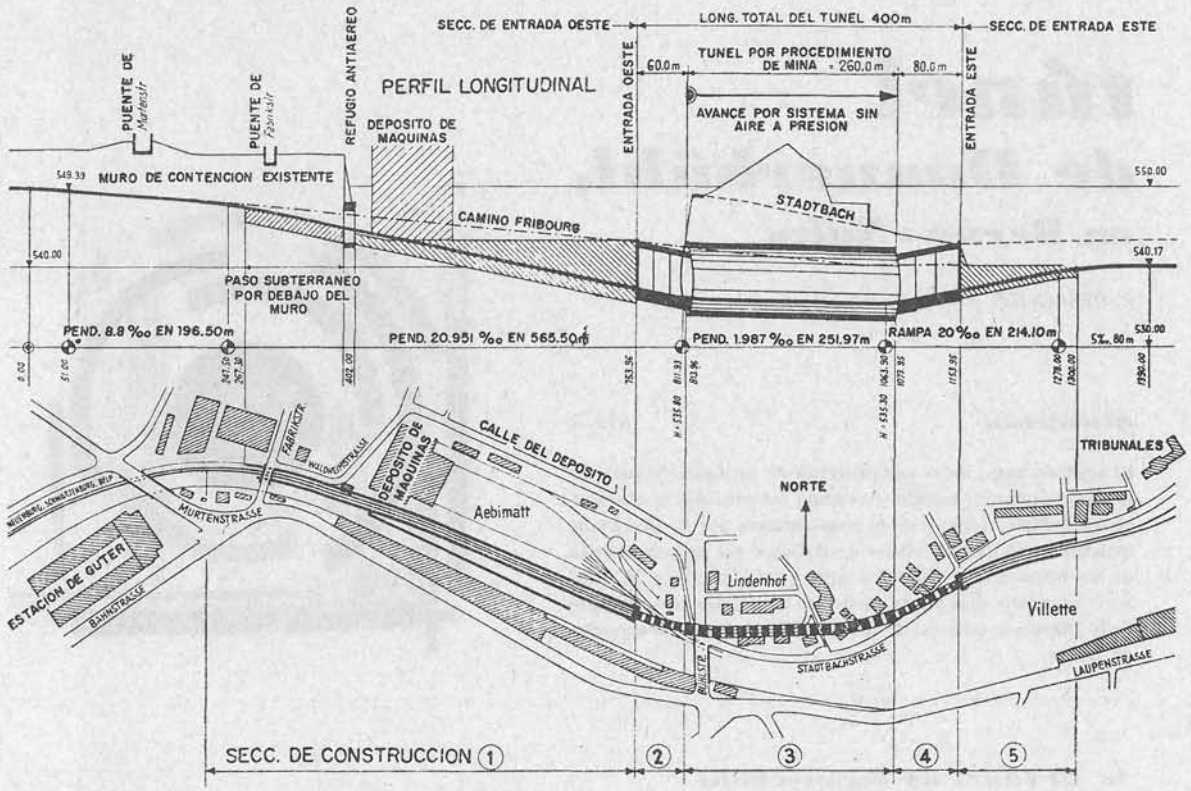
Con el fin de permitir la entrada en la estación de Berna a las líneas privadas de Neuchâtel, Schwarzenburg y Gurbe sin ningún cruce con otras vías de la estación, ha sido necesario perforar la colina de Donnerbühl. Las condiciones locales que eran particularmente difíciles —ejecución en plena ciudad en materiales de morrena sin aglomerar, bajo una débil cobertura que va de 3 a 10 m de espesor, presencia de inmuebles por encima del trazado del túnel y aparición del agua de la capa subterránea al nivel de las futuras vías— han obligado a la Dirección de los trabajos a perforar el túnel por el método de escudo sin aire comprimido. Este método ofrece, en efecto, la máxima seguridad en amontonamientos de arena sin cohesión, poco apta para ser estabilizada con gel artificial o inyecciones.

En nuestro caso, el escudo de construcción soldada, de 185 t, estaba constituido por un cilindro de 10,10 metros de diámetro y 5,50 m de longitud. Su cuchilla estaba reforzada por una corona interior de acero, a fin de que el escudo presentase una rigidez mayor.

Esta corona servía también de punto de apoyo a los 32 gatos hidráulicos repartidos en el contorno del escudo, que podían ejercer juntos una fuerza de 3.200 Mp, siendo la presión suministrada por bombas de 400 atmósferas. Dada su gran sección, el escudo constaba de una triple plataforma reforzada por tres tabiques verticales. El escudo estaba, pues, subdividido en doce compartimentos de trabajo. Una parte de las plataformas intermedias eran móviles, pudiendo introducirlas o retirarlas con ayuda de gatos hidráulicos. Esta disposición facilitaba el desprendimiento de los materiales en el frente de ataque cuando era necesario reforzarlo por falta de cohesión del terreno. La cola del escudo no poseía refuerzo alguno; el espesor de su cubierta era suficiente para permitirle absorber la presión de los materiales, ejercida en el espacio situado entre el último anillo de rigidez del escudo y la extremidad del revestimiento del subterráneo. Allí se encontraba la corona metálica móvil, transmitiendo el empuje de los gatos sobre las dovelas. En la parte trasera del escudo estaba dispuesta una plataforma sobre la que se fijó el brazo rotativo con mando hidráulico, que sirve para colocar en su sitio las dovelas de hormigón armado.

El revestimiento de las paredes cilíndricas del túnel está constituido por segmentos o dovelas prefabricados de hormigón armado. Cada anillo tiene un diámetro interior de 8,85 m y se compone de cuatro segmentos principales y un pequeño segmento de cierre: la clave. Habida cuenta del peso de los distintos elementos a manejar y el espesor necesario de 55 cm, la longitud de las dovelas se fijó en 50 cm. La masa total de un anillo completo es aproximadamente 50 t. La densidad de armaduras ha sido fijada teniendo en cuenta la presión del terreno sobre el túnel.

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



Entrada de los ferrocarriles privados en la estación de Berna.

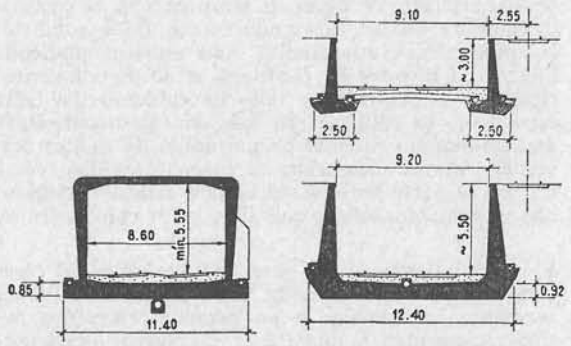
La fabricación de las dovelas se efectuó con encofrados de acero que permiten el relleno de un anillo entero. Los anillos rellenados fueron unidos mediante bulones paralelos al eje del túnel. Así conservaban su posición bajo la presión del escudo y aseguraban la rigidez del subterráneo en sentido longitudinal.

Para impedir totalmente la entrada de agua y barro en el túnel, se colocaron cámaras de estanquidad en las juntas transversales de las dovelas. Además, las placas de plomo intercaladas en las juntas longitudinales de los segmentos contribuían a transmitir íntegramente los esfuerzos del anillo.

Cuando el escudo avanzaba, el espacio vacío que se formaba en la parte trasera de su cubierta, entre el terreno lindante y la parte final del revestimiento, era inmediatamente apelmazado con ayuda de inyecciones. El avance se realizó a la velocidad media de 1 m por día con un turno de día y otro de noche.

Las juntas de enlace de las dovelas de un anillo, protegidas con placas de plomo de 4 mm de espesor, medían de 36 a 47 cm de lado, a fin de dar al apoyo la posibilidad de absorber la excentricidad de los esfuerzos normales, la cual puede llegar hasta 20 centímetros.

El anillo es así menos sensible a las solicitaciones asimétricas. Para centrar las juntas radiales de las dovelas y para absorber los esfuerzos tangenciales, cada junta está provista de una



Secciones características de las trincheras de acceso y del túnel en la zona construida a cielo abierto.

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

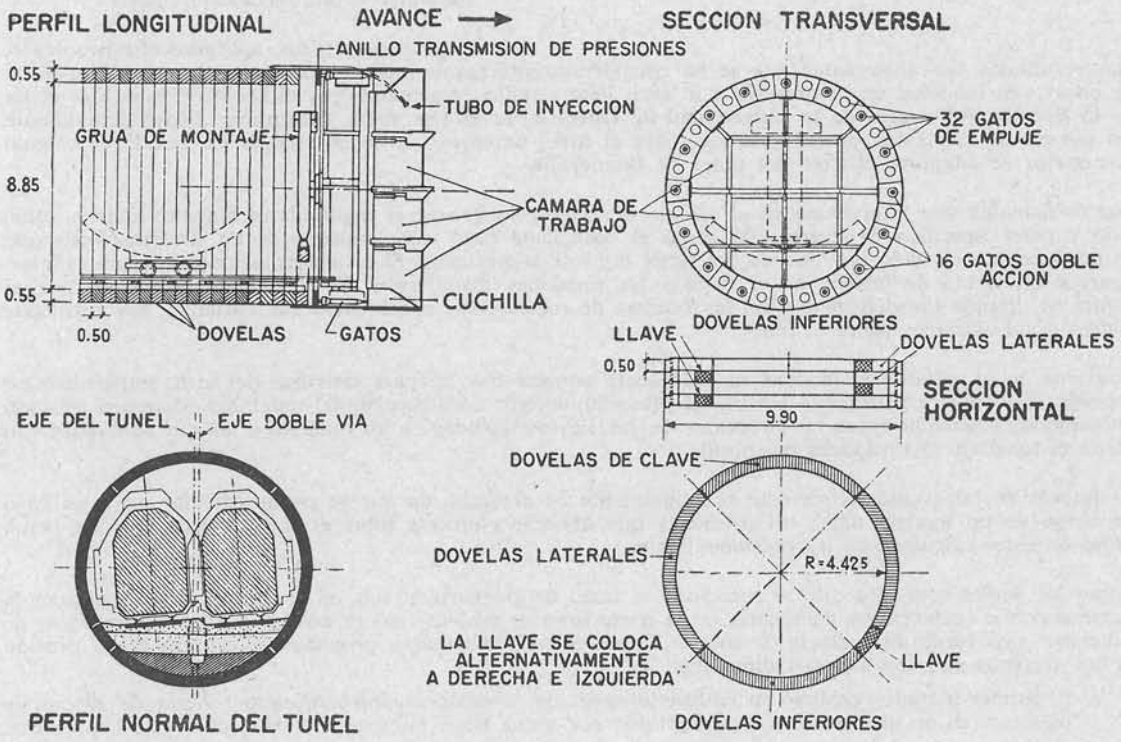
clavija de 40 mm de diámetro que penetra en los dos segmentos. En las juntas articuladas, las cuñas no tienen más que 15 cm de anchura precisos para realizar efectivamente las articulaciones admitidas por el cálculo.

2. *Terrenos envolventes, geología, estudio experimental del empuje de tierras*

El túnel de Donnerbühl atraviesa la morrena frontal del antiguo graciar del Aar, formada principalmente por morrena de fondo, arcilla arenosa de calidad variable, y depósitos diluviales de grava y arena más o menos lavados. Hay que anotar, sin embargo, que aparecen grandes variaciones tanto en sentido vertical como horizontal.

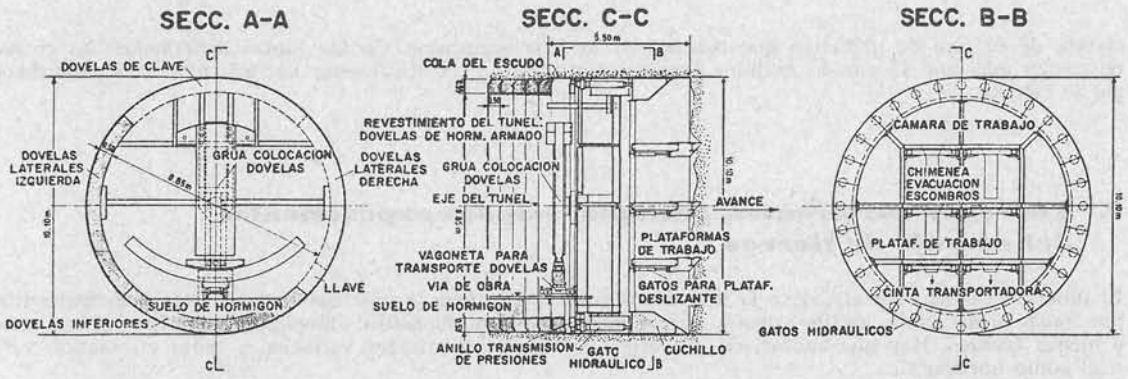
El material, con una cantidad tolerable de grava en grava en las capas superiores, tiene tendencia a volverse más fino con la profundidad. A nivel de la bóveda del túnel se encuentra arcilla ligeramente deslizante, mientras que en el del piso es una arcilla arenosa o con limo. La arcilla tiene una gran compacidad, con densidades aparentes de 21 kg/dm³, pero no está aglomerada. La permeabilidad del suelo es muy grande en las capas superiores, llegando a ser más débil con la profundidad. Ha sido descubierta una capa freática, mediante sondeos, aproximadamente a nivel de las vías.

Cuando se trató de calcular los anillos circulares de hormigón armado que forman el revestimiento del túnel de Donnerbühl, se comprobó inmediatamente que los diversos métodos de cálculo de presiones de terrenos, propuestos en los textos, eran esencialmente contradictorios. Así, por ejemplo, el método Caquot, descrito en el «Tratado de mecánica de los suelos», de Caquot y Kerisel, que permite calcular las presiones radiales y tangenciales en un macizo de suelo que rodea un túnel de sección circular, corresponde bien a la forma geométrica del túnel de Donnerbühl.

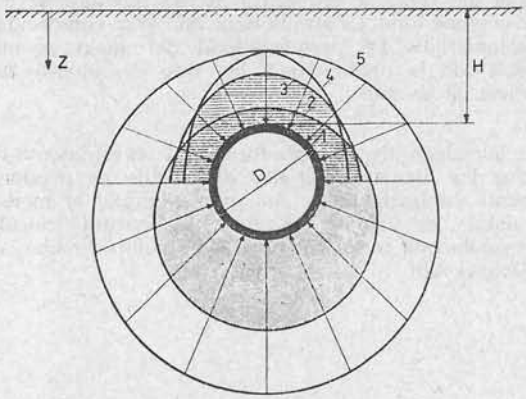


Avance con el escudo, sección del escudo y de las dovelas prefabricadas.

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



Avance con el escudo, sección longitudinal y transversal.



Esquema del reparto de empujes de terrenos sobre el extradós de un túnel de sección circular, 1; según Caquot, 2; Terzaghi, 3; y Kommerel-Culman, 4; y empuje hidrostático referido a la densidad del terreno, 5.

El método de Kommerel-Culmann es en parte gráfico. Permite calcular los valores relativos y el reparto de presiones sobre la cubierta del túnel, pero solamente cuando se escoge arbtirariamente la influencia del efecto de bóveda, lo que disminuye grandemente su interés.

El método de Terzaghi, expuesto en la Mecánica teórica de los suelos, ha sido establecido para una sección rectangular, pero puede adaptarse a una sección circular.

Estos tres métodos, aplicados al mismo caso, dan resultados tan divergentes que se ha considerado interesante intentar comprobaciones por el método de ensayo en modelos, en laboratorio e in situ. Este estudio, emprendido por el Laboratorio de Geotecnia de la **Escuela Politécnica de la Universidad de Lausana,** tenía por meta determinar experimentalmente los valores de la presión de los terrenos sobre el túnel de ensayo, a fin de escoger el método de cálculo que mejor se adaptase al caso del túnel de Donnerbühl.

Los coeficientes que intervienen en el cálculo de las presiones son: el ángulo de rozamiento interno, cohesión y peso específico de tierras, así como el coeficiente cuyo valor depende de las deformaciones que se producen en el suelo por encima del túnel durante la ejecución. Si las deformaciones son importantes, aparece un efecto de bóveda en el suelo y las presiones disminuyen. Si el método adoptado, por el contrario, impide las deformaciones, las fuerzas de rozamiento en el suelo no varían y las presiones siguen siendo grandes sobre el túnel.

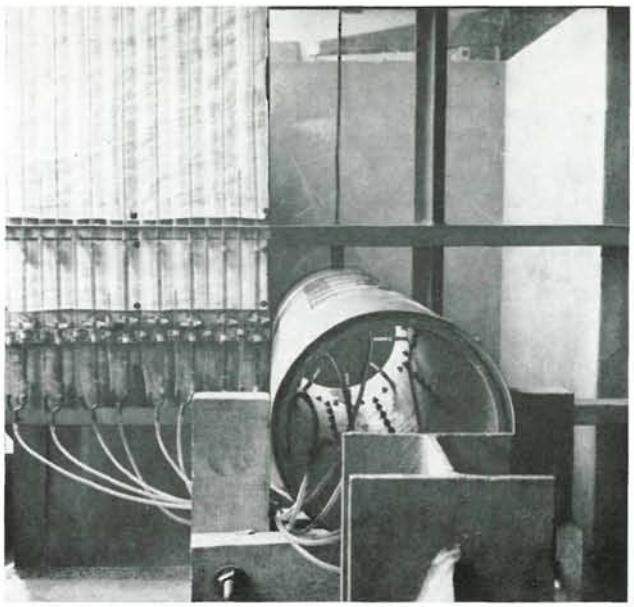
Conviene en el estudio en modelo, no solamente conocer bien las características del suelo empleado, sino reproducir lo más exactamente posible el procedimiento de construcción del túnel. No existe una relación de semejanza sencilla entre las presiones de las tierras medidas en los modelos y las que se manifiestan sobre el túnel en su verdadera magnitud.

El interés de tales ensayos consiste principalmente en el hecho de que se puede calcular, para un caso de carga de un modelo dado, las presiones que deberán ejercerse sobre el anillo y comparar los resultados de estos cálculos con las presiones reales.

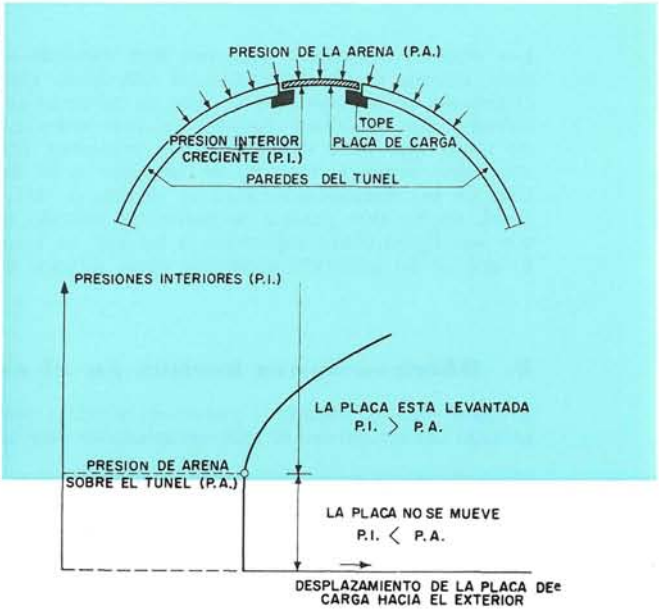
Como los suelos sobre los que se construyó el túnel de Donnerbühl son, en conjunto, sin cohesión en la parte superior (cubierta) y coherentes en la parte inferior (solera), no es posible ejecutar un modelo de túnel con una similitud perfecta de suelos. Esto nos ha conducido a proponer el estudio de la presión de los terrenos por dos métodos diferentes:

— El primer método consistió en realizar ensayos en laboratorio, introduciendo tubería de 30 cm de diámetro en un macizo de suelo constituido por arena seca, pulverulenta, perfectamente homogénea.

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



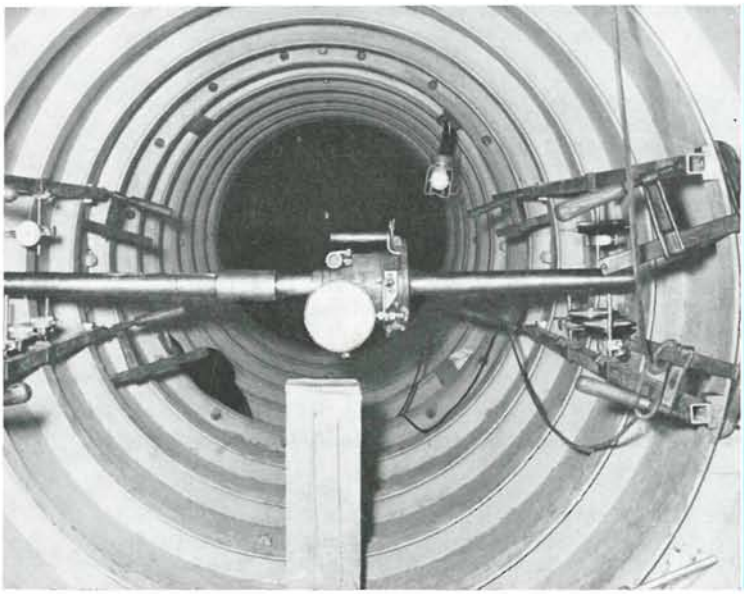
El túnel de ensayo en posición ante el cajón, antes de la colocación de la arena. A la izquierda, los tubos piezométricos unidos a las cámaras. En primer plano, el estribo que sirve de apoyo al gato.



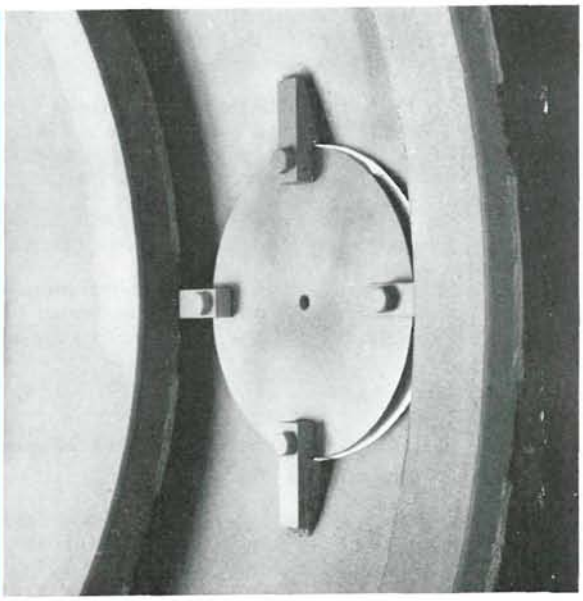
Principio de ejecución de los ensayos de carga con placas para la determinación de la presión de las tierras sobre el túnel.

— El segundo método se efectuó mediante ensayos in situ, introduciendo tubería de 1,50 m de diámetro en un suelo de arena con limo, cuya cohesión varía entre 1 y 2 Mp/m², descubierto en la parte inferior de los pozos inicialmente ejecutados para la construcción del túnel.

Hemos intentado, en ambos casos, comprobar si alguno de los métodos de cálculo tradicionales conducía a valores de la presión iguales a los medidos en los ensayos. Teniendo los dos túneles de ensayo dimensiones muy distintas, el método de cálculo escogido en definitiva debería ser utilizable para el túnel en verdadera magnitud.



Sistema de puesta en carga de las placas y de medida de sus desplazamientos.



Una placa de carga con su sistema de fijación.

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

Los ensayos llevados a cabo nos han inducido a escoger el método de cálculo de Terzaghi. En nuestro caso, en que el recubrimiento no sobrepasa apenas un espesor igual al diámetro del túnel y en el que el sistema de introducción de tubo es parecido al utilizado en los ensayos, el método en cuestión permite calcular, con exactitud razonable y directamente, las presiones verticales que se ejercen sobre el túnel, en tanto que para determinar las presiones laterales hay que mayorar en un 65 por 100 los valores obtenidos, según la fórmula de Terzaghi, a fin de tener en cuenta el método de introducción y la variación de los rozamientos. Para el cálculo de las presiones verticales que se ejercen sobre la solera del túnel, no ha sido posible proponer un método con seguridad. Los ensayos han mostrado que las presiones son ligeramente superiores a las que se ejercen verticalmente sobre bóveda, y es debido a esto por lo que se ha admitido aumentar estas últimas con el peso propio del túnel.

3. Observaciones hechas en el curso de la ejecución

El túnel está terminado y puesto en servicio desde hace algunos años. Tenemos la certeza de que el método del escudo era el más apropiado en este caso.

Sin embargo, a pesar del cuidado aportado en la ejecución del trabajo, no se han podido evitar algunos hundimientos y modificaciones de la capa superior del terreno.

Hubo que lamentar fisuras y otros desperfectos en los revestimientos de calzadas, en las canalizaciones y conductos situados por encima del cilindro del túnel.

Al comienzo de las operaciones de perforación, en los primeros metros, y por falta de experiencia, los hundimientos sobrepasaban los 10 ó 15 cm. En el curso de los trabajos, la importancia de los asientos ha disminuido rápidamente y hacia el fin de la obra no eran más que de escasos centímetros. Numerosos factores han provocado la aparición de los asientos; pero aunque hoy es difícil precisar con certeza su origen, sí es posible, sin embargo, dar aquí las causas probables.

A consecuencia del empuje, no resulta fácil apuntalar perfectamente el frente de ataque. A pesar de inyecciones cuidadosas, no se llenaron todos los vacíos dejados por la cubierta del escudo en su avance. El empuje mecánico de éste provoca desprendimientos que desencadenan descensos en las masas de arena. Dicho escudo, al igual que un pistón, ejerce una presión muy fuerte sobre una gran extensión del frente de trabajo, seguida de una depresión tras su paso. Dada su forma rígida, el escudo no se mueve siempre en línea recta, sino que serpentea, empujando en unos lados y provocando relajamientos en otros. Los pequeños movimientos interiores sobre el frente de trabajo son difíciles de evitar, especialmente cuando la arena está seca.

Igualmente son imputables ligeras deformaciones al sistema de revestimiento de dovelas de hormigón, las cuales están, en efecto, montadas en el interior de la cubierta del escudo; después de su avance, y pese a las inyecciones hechas en aquel momento, no se puede llenar perfectamente el vacío que se crea tras el escudo, en el espesor de la cobertura, lo cual origina indudables asientos. Las dovelas deben entonces realizar el apoyo a través de una articulación de plomo y sufren deformaciones elásticas cuando el empuje de las tierras se ejerce sobre ellas, de donde resulta otra causa de asiento en las masas terraplenadas imposible evitar por completo.

En vista de los factores mencionados y de sus efectos propios, no es extraño que se produzcan en superficie pequeños hundimientos de 1 a 4 cm. No obstante, los gastos ocasionados por la puesta a punto de los objetos dañados no representan apenas más que el 2 ó 3 por 100 del total de los de construcción, que, en el caso actual, era soportable.

En lo que se refiere a estanquidad, se puede decir que el sistema escogido ha sido satisfactorio en conjunto, en casi tres cuartas partes de la longitud del túnel.

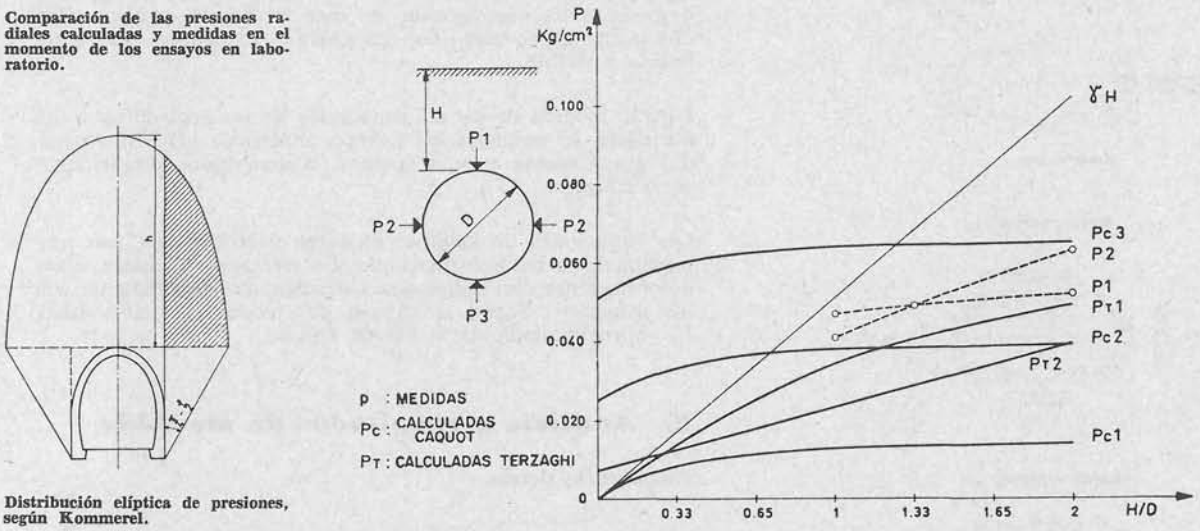
Sin embargo, han aparecido filtraciones en lugares en los que el túnel tiene una débil cobertura y atraviesa las zonas permeables. Las partes húmedas del revestimiento han sido rápidamente restañadas rellenando las juntas con un mortero especial.

4. Medidas efectuadas a posteriori en el túnel de Donnerbühl y sobre su trazado

En el curso de la fase de estudio se decidió que una comprobación a posteriori de los empujes efectivos de las tierras, que se ejercen sobre el túnel terminado, lo mismo que las acciones reales soportadas por las dovelas, sería del más elevado interés. Es, en efecto, el único método que permite confirmar o rechazar la validez de las hipótesis hechas en el cálculo y elaboración del proyecto. Esta es la razón

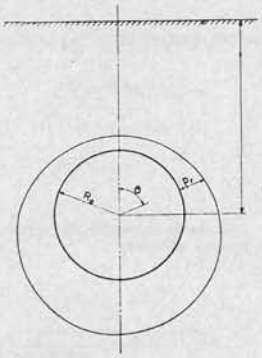
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Comparación de las presiones radiales calculadas y medidas en el momento de los ensayos en laboratorio.



Distribución elíptica de presiones, según Kommerel.

por la que algunos aparatos de medida fueron dispuestos en ciertos emplazamientos del túnel, escogidos antes del comienzo de los trabajos, con el fin de obtener imágenes de los esfuerzos que soporta la obra, permitiendo determinar los empujes ejercidos por el suelo que la rodea. Además, los movimientos del terreno de superficie han sido controlados varias veces mediante una nivelación de precisión, partiendo de numerosas señales distribuidas en toda la longitud del túnel. Esta nivelación se ha repetido varias veces durante la construcción de la obra, lo cual ha permitido seguir los movimientos que afectan a las construcciones que se encontraban encima.



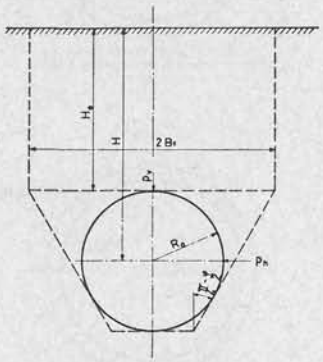
Reparto de presiones en un túnel circular, según Caquot.

5. *Elección y puesta en obra de instrumentos y medidas*

Los empujes ejercidos por el terreno de alrededor han sido absorbidos por medio de captadores hidráulicos del tipo «Glötzl».

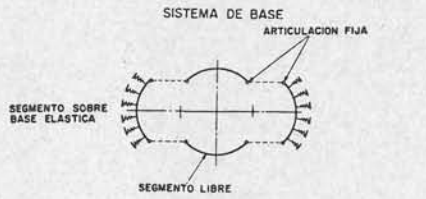
Estos elementos funcionan de la manera siguiente: el aceite es bombeado a presión en los conductos valiéndose de una bomba. Entre los captadores de presión y el conducto de aceite a presión se encuentra una membrana que funciona como una válvula. Cuando la presión de aceite en los captadores, medida por medio de manómetros, está equilibrada con el empuje que se va a medir, la válvula se abre y el aceite bombeado en exceso escurre fuera del conjunto. Este captador de precisión es muy útil para medir los empujes de las tierras. Por el contrario, no lo es para medidas en el hormigón. En efecto, el aumento de temperatura durante el fraguado del hormigón provoca una dilatación del aceite, cuyo volumen está limitado por el hormigón endurecido. En el momento del endurecimiento, los coeficientes de dilatación del hormigón y del aceite son distintos y las lecturas posteriores tras el enfriamiento del hormigón están falseadas: el aceite se contrae más fuertemente y las lecturas registradas son sistemáticamente demasiado pequeñas.

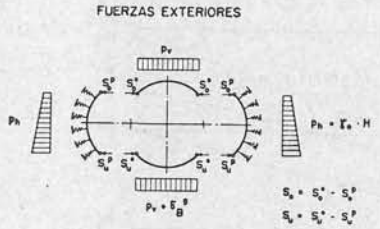
La eficacia de estos captadores ha sido probada en los ensayos preliminares que determinaron la conveniencia de estos aparatos para la medida de empujes de tierras, ya que entonces no tiene efecto la influencia de las variaciones de temperatura. Estos captadores de presión han sido fijados a la armadura de

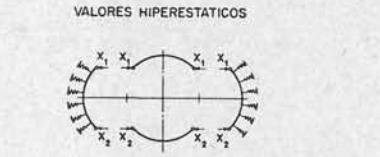


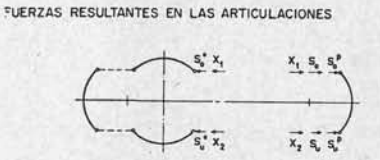
Empuje de terrenos, según Terzaghi.

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

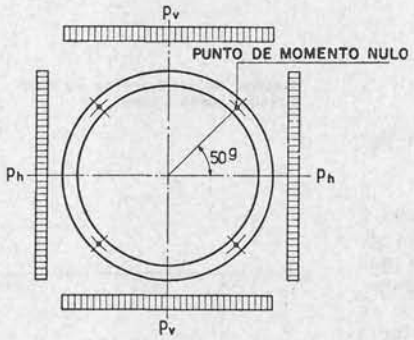


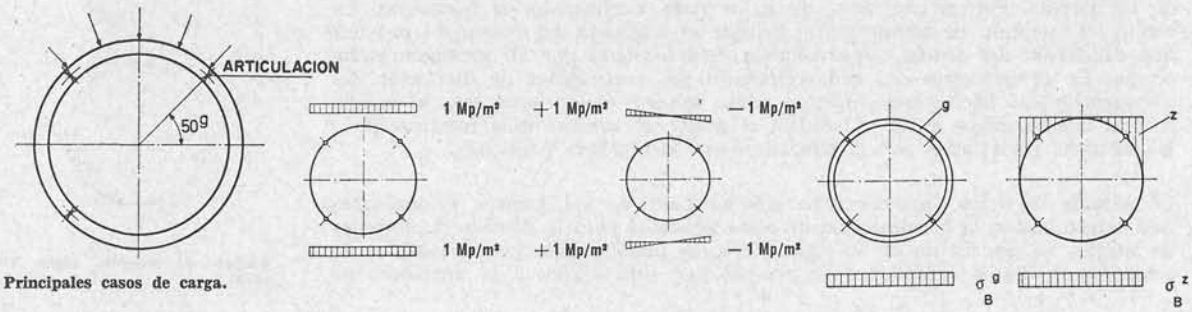






Cálculo de un anillo de cuatro articulaciones sobre apoyos elásticos.





Principales casos de carga.

las dovelas en el momento de ser colocada en los encofrados; después se ha hormigonado de manera que la cara exterior, que queda en contacto con las tierras, permanece totalmente limpia y visible.

Para la medida de las deformaciones de las armaduras y del hormigón se emplean los calibres eléctricos «Philips», pegados directamente a las armaduras o sumergidos simplemente en hormigón.

Las variaciones de longitud medidas eléctricamente son proporcionales a las deformaciones. En ciertas condiciones, estas deformaciones dan indicaciones relacionadas directamente con los esfuerzos. Según el cálculo del módulo de elasticidad, E = aproximadamente a 450.000 kp/cm².

6. *Análisis y resultados de medidas*

Empujes de tierras

Los empujes de tierras registrados inmediatamente después de colocar en su sitio las dovelas, en una zona en que la capa de cobertura sobre la cubierta del túnel era de 9,7 m, acusan valores particularmente irregulares. Permanecen entonces, de una manera general, claramente inferiores a los empujes previstos en el cálculo, en los diferentes puntos medidos, incluso, mediante inyecciones, después de efectuar el relleno de las cavidades que han quedado tras el paso del escudo, entre las dovelas y las tierras envolventes. En este momento, los empujes están muy por bajo de los teóricos determinados por el método de Terzaghi. A título de ejemplo, los empujes registrados en la cubierta del túnel por instrumentos distantes 1 m dan valores extremadamente distintos, de 1,1 a 1,9 kp/cm², siempre que sea inmediatamente después de la colocación de las dovelas. Se puede deducir de ello que la compacidad del suelo ha sido perturbada en cierta medida, debido a los trabajos de avance, y que ha disminuido localmente.

En este momento, las dovelas están sometidas a solicitaciones inferiores a las previstas y muy irregularmente repartidas.

Repetidas regularmente con intervalos de algunos días, las medidas han revelado, por el contrario, que el empuje de las tierras sobre la bóveda aumentaba gradualmente, igualándose y repartiéndose más uniformemente en toda la longitud de la obra. Esta evolución termina prácticamente tras un período de unos 60 días. Los valores máximos alcanzados en este momento no fueron sobrepasados.

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

Hay que notar que estos últimos coinciden entonces notablemente con los empujes teóricos calculados según el método de Terzaghi, y esta conclusión ha mostrado por sí sola el interés que tiene el estudio teórico y práctico emprendido, llevándonos a facilitar la elección de un método de cálculo en casos semejantes.

Asientos

Los movimientos verticales de la superficie del suelo, por encima del túnel, han sido definidos, como hemos dicho, ejecutando nivelaciones de precisión.

Se puede observar en ella que el nivel del suelo se ha elevado unos milímetros un poco antes del paso del escudo y que los descensos más considerables han ocurrido inmediatamente después del paso de éste.

Se han atenuado a continuación progresivamente para acabar prácticamente después de 60 días, o sea, en un período idéntico al marcado por la evolución de los empujes.

El examen de las recuperaciones ha confirmado también, como podía esperarse, que la importancia de los asientos en superficie es inversamente proporcional al espesor de la capa de tierra que recubre el túnel.

Solicitaciones en las dovelas

El valor de las solicitaciones interiores de los elementos de construcción se obtiene, en numerosos casos, por las medidas de las deformaciones. Se puede recordar, a este respecto, que las tensiones de interés no pueden calcularse más que a partir del módulo de elasticidad. Este hecho complica el cálculo, ya que a las deformaciones que originan las tensiones pueden añadirse otras, provocadas por la retracción del hormigón, por variaciones de temperatura, etc.

La experiencia ha demostrado que las medidas efectuadas en un túnel son dificultosas, estando sometidas a menudo a la influencia de circunstancias difícilmente controlables.

Como el resultado de las medidas registradas en el hormigón no da una imagen clara de los distintos casos de solicitaciones, hemos recurrido a definir estas últimas para algunos casos particulares, utilizando los resultados de las medidas de deformación efectuadas en los aceros de la armadura. En efecto, estas últimas deformaciones pueden ser interpretadas de una manera mucho más segura, pues el módulo de elasticidad del acero varía poco y la influencia de la temperatura puede definirse en ellas con bastante certeza.

El examen de estos diagramas sorprende, a primera vista, por el hecho de que no coinciden en manera alguna con los esfuerzos que podían esperarse por el cálculo. Sin embargo, la figura 16, con esfuerzos debidos únicamente al empuje de los gatos sobre las dovelas, hace notar claramente que se engendran en las dovelas momentos horizontales muy considerables en el momento del avance del escudo, el cual se apoya, por intermedio de los gatos, sobre las dovelas ya colocadas. Las deformaciones resultantes de ello, variables según las condiciones del apoyo, no se reabsorben por completo tras la operación de avance, y los diversos elementos de construcción sufren tensiones «parasitarias».

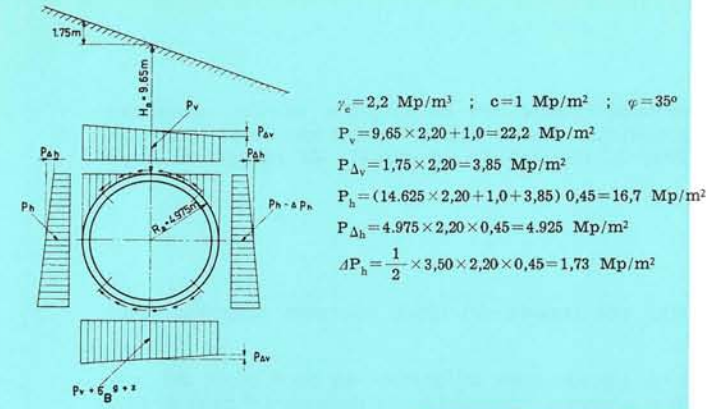
Cuando los anillos de hormigón dejan el cerco del escudo sufren la carga debida al empuje de las tierras, cuya influencia se superpone a los esfuerzos horizontales engendrados por la presión de los gatos. Así se explica la evolución, algo inesperada, de los diagramas de deformaciones.

Los esfuerzos soportados por las armaduras pueden calcularse fácilmente a partir de las deformaciones medidas, las cuales alcanzan un valor de 1.060 kp/cm^2 en los puntos más solicitados. Admitiendo deformaciones equivalentes para el acero y el hormigón, se obtiene para este último una solicitación máxima a compresión de 228 kp/cm^2. Es probable que estos esfuerzos de compresión hayan sido algo disminuidos en nuestro caso por el efecto de fluencia o retracción del hormigón, sin que este fenómeno pueda ser, sin embargo, demostrado de forma clara. En las zonas forzadas, las solicitaciones de tracción sobrepasan el límite de fisuración.

Del análisis de estos diagramas se puede deducir que los esfuerzos de tracción principales no se ejercen paralelamente al eje de las dovelas. Estas últimas están sometidas, pues, por regiones, a ciertos esfuerzos de torsión, confirmados, además, por la aparición bien visible, en ciertas dovelas, de fisuras diagonales.

A fin de conocer mejor la influencia, sobre las dovelas, del empuje ejercido por el escudo en el momento de avance, se han colocado algunos extensímetros «Philips» directamente sobre uno de los anillos observados.

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



$\gamma_c = 2{,}2$ Mp/m³ ; $c = 1$ Mp/m² ; $\varphi = 35^g$

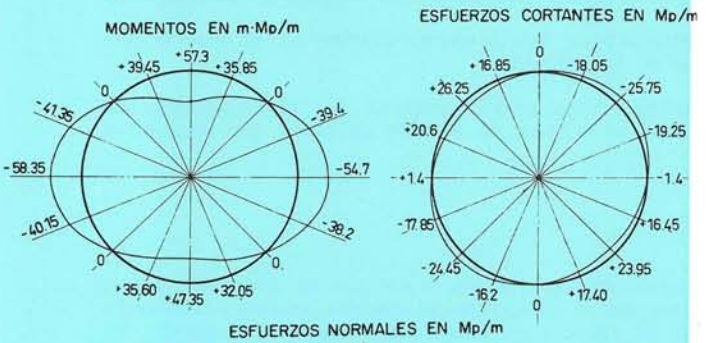
$P_v = 9{,}65 \times 2{,}20 + 1{,}0 = 22{,}2$ Mp/m²

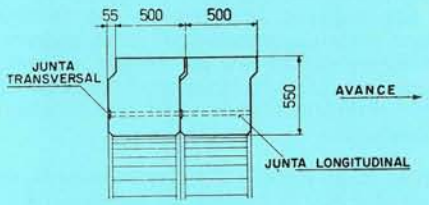
$P_{\Delta_v} = 1{,}75 \times 2{,}20 = 3{,}85$ Mp/m²

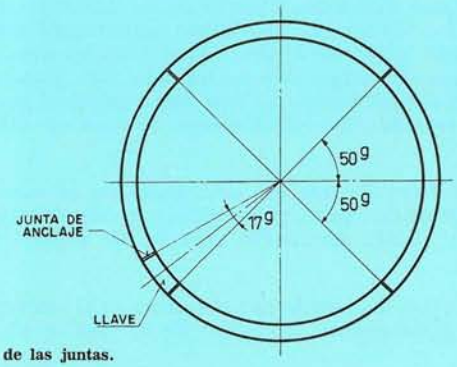
$P_h = (14.625 \times 2{,}20 + 1{,}0 + 3{,}85)\ 0{,}45 = 16{,}7$ Mp/m²

$P_{\Delta_h} = 4.975 \times 2{,}20 \times 0{,}45 = 4.925$ Mp/m²

$\Delta P_h = \frac{1}{2} \times 3{,}50 \times 2{,}20 \times 0{,}45 = 1{,}73$ Mp/m²







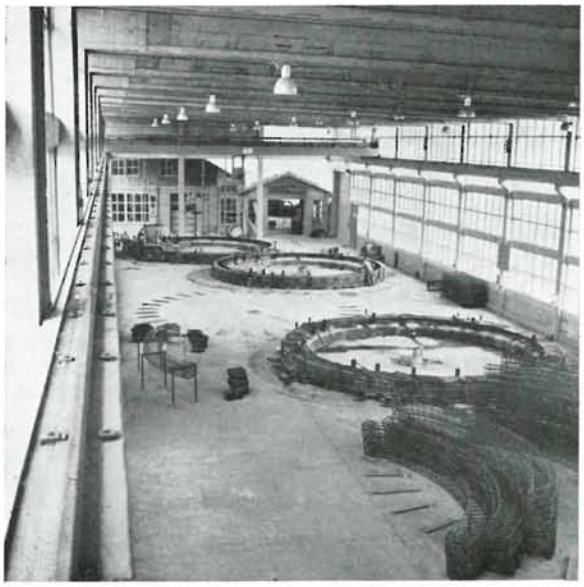
Disposición de las juntas.

Caso de carga tipo: esfuerzos interiores al anillo en el caso de carga normal.

El avance, rítmico, con un intervalo de 1 a 2″, provoca subsidiariamente modestas solicitaciones dinámicas en las dovelas. Por lo demás éstas tienen poca importancia, ya que el alargamiento medido de 8×10^{-6} debe corresponder a esfuerzos de unos 4 kp/cm². Estos golpes en el avance del escudo, descubiertos por las medidas, explican a posteriori los choques espaciados que se oían distintamente en las construcciones subyacentes en el curso de los trabajos.

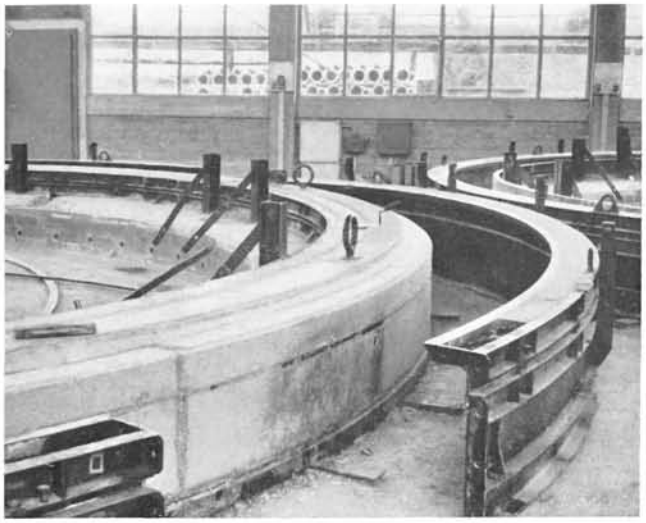
Las medidas realizadas confirman los conocimientos que teníamos a través de las medidas de deformaciones, efectuadas directamente en las armaduras de las dovelas. Notemos que habría sido posible suprimir las fuertes solicitaciones locales mencionadas, incluyendo un dispositivo que repartiera las fuerzas de reacción de los empujes de los gatos, de forma sistemática y regular, sobre las dovelas.

Si pensamos lo difícil que resultaría deducir de aquí, para un cálculo correcto, el resultado exacto de las medidas, que el dimensionamiento de la construcción se ha hecho de forma adecuada.



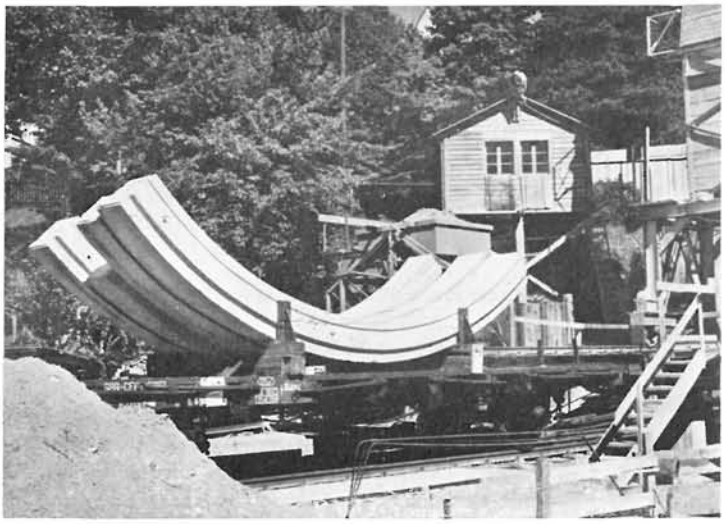
Fabricación de dovelas: vista del taller.

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



Desencofrado de una dovela.

Foto: R. BONER - IMBACH



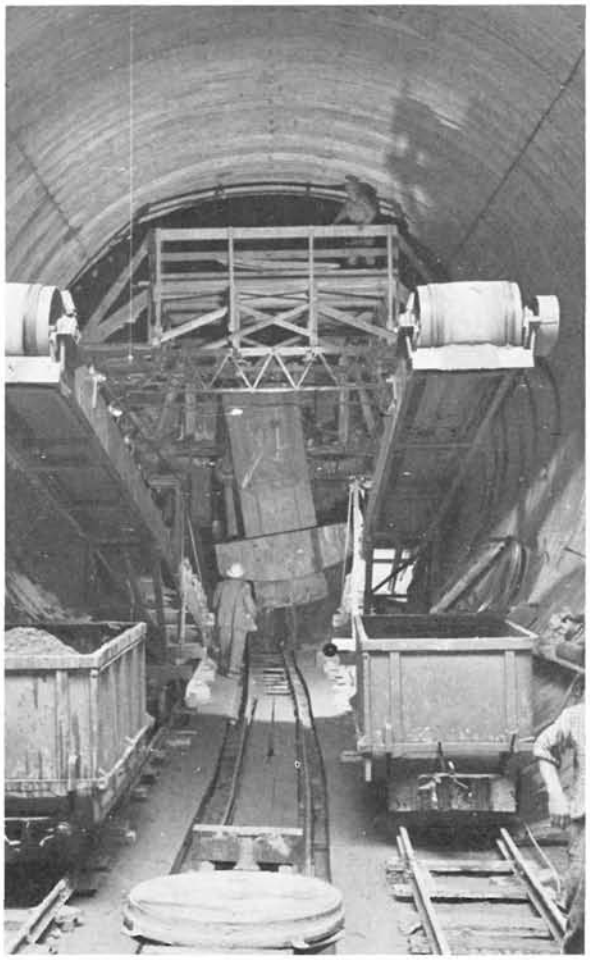
Transporte de dovelas
por anillo completo sobre vagón de ferrocarril.

7. conclusiones

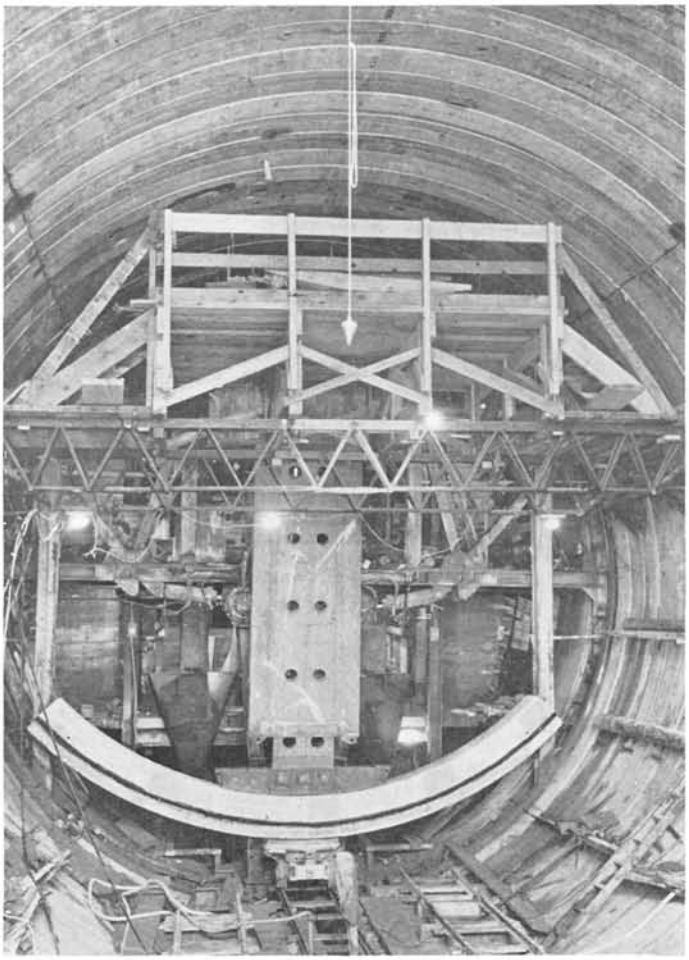
Nuestra intención de controlar, por mediciones, la exactitud de las hipótesis de cálculo, ha conducido a resultados positivos que justifican ampliamente los gastos de equipo y el tiempo importante consagrado a las observaciones. De una manera general se han obtenido preciosos datos acerca del comportamiento de diversos elementos constructivos que entran en juego en una cantera de perforación de túnel por el método del escudo.

G. B.

Evacuación de los materiales excavados mediante cintas transportadoras y vagonetas.



Vista del escudo con las plataformas de trabajo y la máquina con mando hidráulico para la colocación de las dovelas.



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

Tunnel de Donnerbühl à Berne - Suisse

R. Desponds et **K. Ensner**, ingénieurs

L'article traite de la construction d'un tunnel ferroviaire à l'aide de la méthode de bouclier et rappelle les mesures et les observations faites, après la construction, par R. Desponds, ingénieur en chef de la Division de travaux du premier secteur des chemins de fer fédéraux suisses à Lausanne et par K. Ensner, ingénieur diplômé, chez de la Section de mesures de la Direction Générale des chemins de fer fédéraux suisses à Berne.

Donnerbühl Tunnel, near Berne, Switzerland

R. Desponds & K. Ensner, engineers

This article describes the railway tunnel and its construction by the shield method. It summarises the measurements and observations that were taken after its completion by R. Desponds, the chief engineer of the Works Division of the 1st district of Federal Railways of Switzerland, and by K. Ensner, dipl. engineer, Chief of the Measurements Section of the General Direction of the Swiss Federal Railways, of Berne.

Tunnel von Donnerbühl bei Bern/Schweiz

R. Desponds und **K. Ensner**, Ingenieure

Dieser Aufsatz beschäftigt sich mit einem nach der Schildvortriebmethode erbauten Eisenbahntunnels und fasst die nach der Fertigstellung vorgenommenen Masse und Beobachtungen zusammen. Ingenieure: R. Desponds, Chefingenieur del 1. Distrikt der Bundesbahn, Abteilung «Öffentliche Arbeiten» in Lausanne, und K. Ensner, Diplomingenieur der Bundesgeneraldirektion des Schweizerischen Eisenbahn.

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