

Perforación y revestimiento del túnel de Villarejo

(Tramo del Acueducto Tajo-Segura)

Por LUIS ZAPICO MAROTO

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.
Ingeniero Director de la Obra.

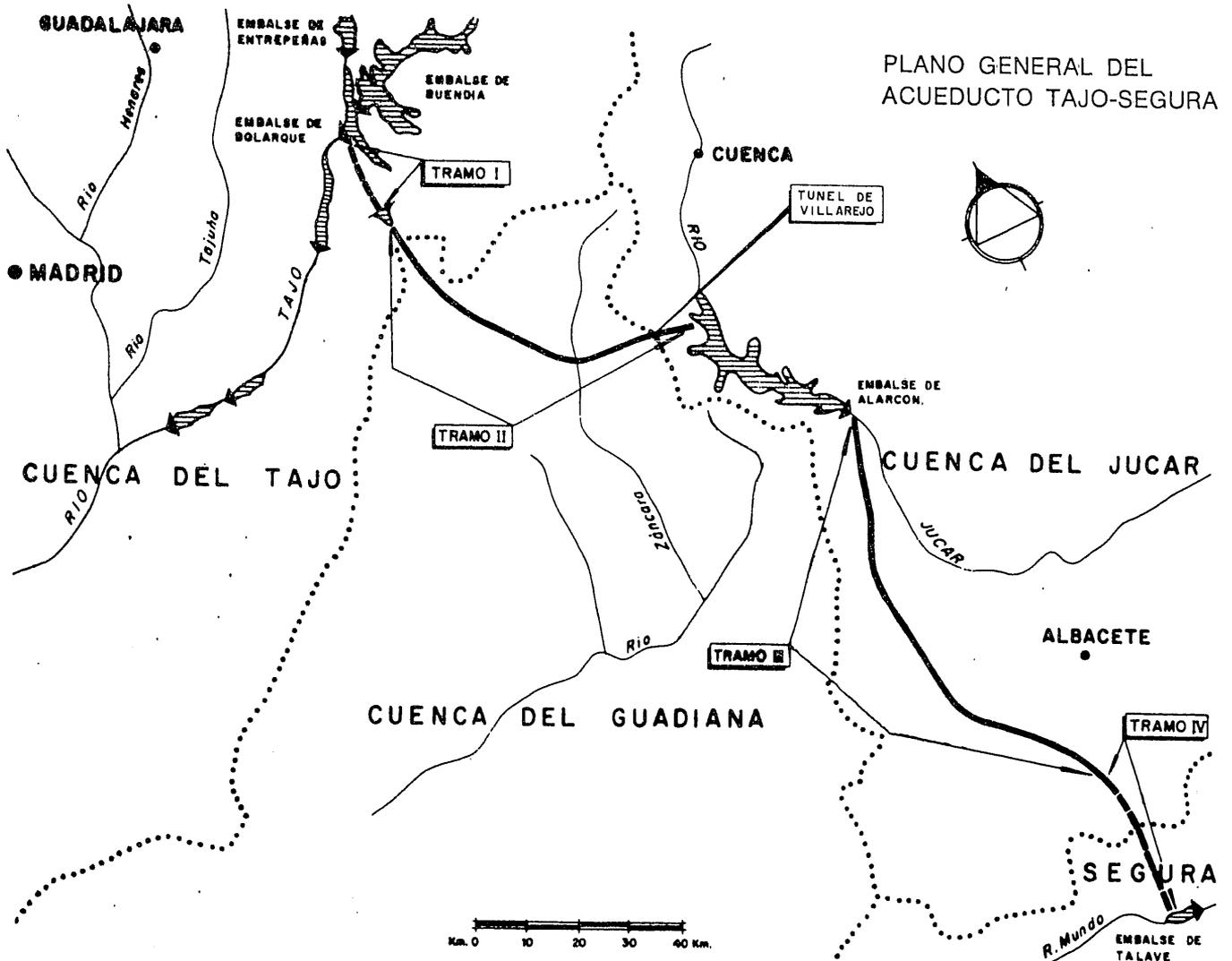
El túnel de Villarejo, en la divisoria de las cuencas del Guadiana y del Júcar, es una de las obras más interesantes del tramo II del Acueducto Tajo-Segura. En el artículo, después de señalarse las características del terreno atravesado y el equipo empleado, se exponen las principales incidencias surgidas y las enseñanzas que pueden extraerse de esta importante obra.

DESCRIPCION DE LA OBRA

El tramo II del Acueducto Tajo-Segura consiste en una canalización de 92,48 kilómetros de longitud que tiene por objeto conducir las aguas del trasvase desde el embalse de La Bujeda, en las proximidades del río Tajo, hasta la cola del embalse de Alarcón, sobre el río Júcar. En esta canalización, a cielo abierto en su mayor parte, se intercalan 11 acueductos cuya longitud suma 10,74 kilómetros y 12 túneles con una longitud total de

12,37 kilómetros. Entre estos últimos se cuenta el túnel de Villarejo, el más largo de todos ellos, con el que se atraviesa la divisoria de las cuencas del Guadiana y del Júcar.

El túnel de Villarejo tiene una longitud de 4.941 metros. Su sección es circular con 4,75 metros de diámetro interior. Va revestido de hormigón en masa con espesor constante de 35 centímetros. Su pendiente es de seis diezmilésimas con la que transporta el caudal de régimen, 33 m³/seg, con un calado de 3,77 m funcionando en lámina libre.



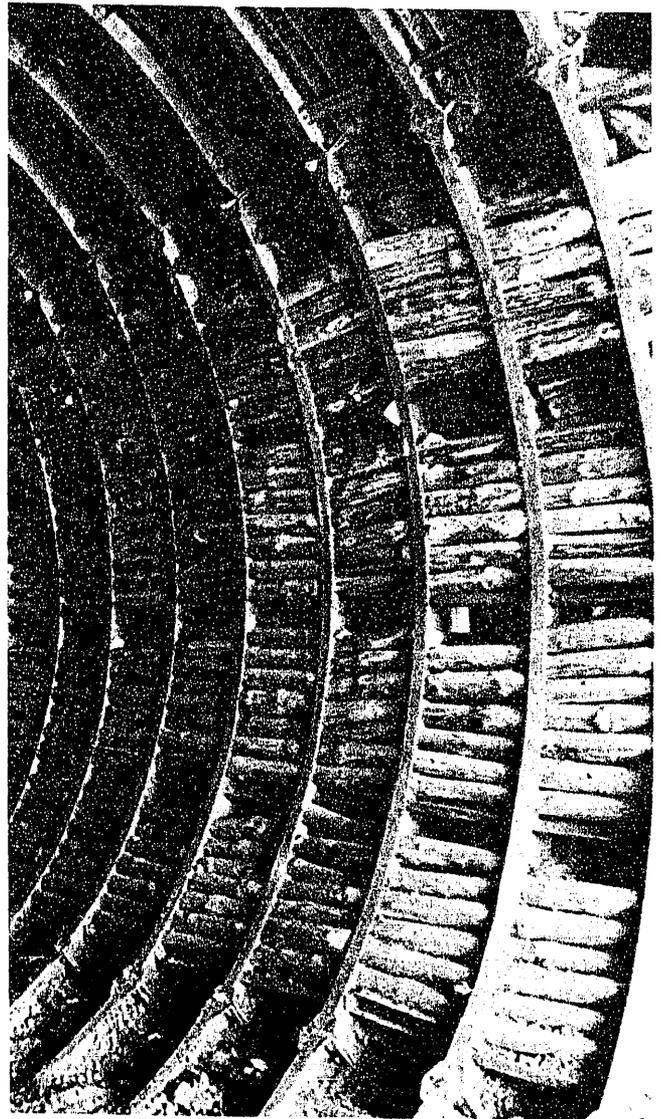
EL TERRENO ATRAVESADO POR EL TUNEL

El túnel atraviesa el flanco norte de un anticlinal suave en terrenos paleógenos y miocenos separados por una suave discordancia. La traza del túnel forma un ángulo de unos 50° con la dirección de los estratos que a su vez buzan con ángulos comprendidos entre 14° y 9° en la dirección de la marcha de las aguas. Litológicamente los terrenos se componen de areniscas y margas, éstas más o menos arcillosas, con contenido variable de yesos. También se intercalan estratos de yesos masivos, generalmente en forma rocosa, formando grandes lentejones. La alternancia margas-areniscas-yesos se repite abundantemente ya que la potencia máxima de los estratos no supera los 20 metros. Los paquetes de areniscas presentan muy diversos grados de cementación y, en general, están cargados con aguas que humedecen las margas de contacto.

En el perfil longitudinal adjunto se recoge el corte geológico del túnel en el que pueden observarse los recubrimientos que alcanzan un máximo de 108 metros.

Durante la construcción del túnel fue necesario completar el reconocimiento geológico de los terrenos procediendo a una detallada campaña de sondeos, casi uno por cada 100 metros, con extracción de muestras inalteradas e introducción de piezómetros para seguir los descensos de las aguas en los estratos portantes.

Las zonas de entrada y salida del túnel presentaban características locales especialmente desfavorables. En la de entrada existían importantes masas arenosas sueltas desde la altura del túnel hasta el terreno, empapadas de agua, alcanzando los primeros 611 metros. En la de salida un fuerte paquete de areniscas con un freático importante había humedecido las margas arcillo-



Cerchados especiales, con rodillos y a tope, en zonas en las que no era posible el anclaje directo de zapatas.

PERFORACION Y REVESTIMIENTO DEL TUNEL DE VILLAREJO

sas y yesíferas poco consolidadas subsiguientes presentando sustanciales dificultades al emboquillamiento.

En líneas esenciales se trataba de un túnel blando cuyas dificultades más importantes se presentaban en las dos zonas terminales, especialmente en la entrada, existiendo en su interior abundantes paquetes de margas arcillosas humedecidas por los freáticos confinados en las areniscas de contacto. El leve buzamiento de los estratos habría de prolongar las dificultades de perforación alargándose en techo y suelo las zonas de escasa capacidad portante.

EQUIPO PARA LA EJECUCION DE LAS OBRAS

Para realizar la perforación del túnel el contratista M.Z.O.V. y C.Y.T. dispuso el empleo de un minero continuo, marca Robbins, adquirido en Norteamérica. Esta máquina perforadora debería iniciar la perforación por la boca de salida y continuarla en sentido contrario a la pendiente para acabar saliendo por la boca de entrada después de calar en la zona de encuentro con los trabajos de perforación a realizar desde esta última boca. En ésta habría de perforarse con medios convencionales los 611 metros de masas arenosas sueltas que en ningún caso podrían ser atravesadas directamente por el minero continuo. Se decidió así mismo realizar un pozo vertical a 1.548 metros de la boca de entrada que proporcionase dos frentes más de ataque para el caso de que el minero encontrase en su trayecto dificultades que pudiesen afectar sustancialmente al plazo de ejecución. Este pozo habría de servir más tarde en la explotación proporcionando doble entrada al tramo menos seguro del túnel. Hay que señalar que no fue necesario utilizar este pozo durante la perforación si bien fue sumamente útil, tanto para facilitar los trabajos en uno de los incidentes más notables de la obra, la inundación y enarenamiento del minero de la que hablaremos más adelante, como para los trabajos de achique y revestimiento.

El minero continuo, como es sabido, es una máquina que produce la excavación del terreno por fresado del mismo a sección completa. Consta en síntesis de una cabeza circular dotada de un conjunto de discos de corte que giran sobre su eje y simultáneamente avanza mediante potentes hidráulicos respecto a un bastidor que a su vez se sujeta a las paredes del túnel recién excavado a través de dos grandes zapatas laterales a las que imprime una sustancial presión. El efecto combinado de rotación y presión longitudinal produce el desmenuzamiento del terreno cuyo escombros es elevado por un conjunto de cangilones hasta una cinta transportadora que efectúa su entrega por la parte posterior de la máquina. Una vez efectuada la operación unitaria de avance, unos 80 cen-

tímetros, el bastidor avanza respecto de la cabeza, previo recogimiento de las zapatas laterales y de su apoyo de pie, para volver a restituir dichos apoyos en su nueva posición e iniciar un nuevo avance unitario. Un haz de rayos láser guía desde lejos la alineación del avance.

En la máquina empleada en el túnel el diámetro de la perforación era 5,45, el minero pesaba 160 toneladas y transmitía longitudinalmente un esfuerzo máximo de 500 toneladas, si bien dada la escasa dureza de los terrenos atravesados, podía trabajar con un empuje longitudinal menor. Las zapatas laterales, dos en total, tenían una superficie de 2,74 m² cada una y transmitían al terreno un máximo de 570 toneladas y un mínimo de 350 toneladas, o sea, compresiones limitadas entre los 20,80 y 12,75 Kg/cm². La cabeza de corte iba provista de cuatro motores eléctricos de 200 CV cada uno y disponía en el cuerpo trasero de la máquina de un transformador de 1.000 kVA de potencia y tensiones 380/5.000 V. El coste de esta máquina (a precios de 1970) ascendía a pie de obra a unos 80 millones de pesetas. La potencia total instalada en la máquina era de 860,25 CV.

La perforación de los tajos convencionales se realizó excavando primeramente la zona superior y realizando luego la destroza previo hormigonado en preanillo de la clave y bataches sucesivos. No fue necesario acudir a consolidaciones previas del terreno, de dudosa eficacia por otra parte, dada la desfavorable granulometría de las arenas, pero sí fue necesario activar el drenaje mediante taladros a este fin y en algún caso construyendo una galería inferior centrada que permitiese, con el rebaje del freático, proseguir la excavación y anillado del tajo de la luneta superior, facilitando, al distanciarse el frente, el trabajo de la destroza y construcción de los bataches. Para la excavación de estos frentes se utilizaron martillos picadores y cinta transportadora cargando sobre camiones.

La extracción de escombros procedentes del minero continuo se realizó mediante trenes arrastrados por locomotoras eléctricas de acumuladores marca Bartz tipo TA-10 y vagones marca Hägglunds tipo HRST-115B de fondo móvil de 11,5 m³ de capacidad. Estos trenes descargaban a la salida del túnel en una larga cinta transportadora con movimiento circular, de 24 metros de longitud y 750 milímetros de ancho de banda, accionada por un motor de 15 CV que repartía el escombros en la zona de acopio.

En el hormigonado se emplearon cisternas mezcladoras tipo Spuknik-4,5 m³ sobre raíl, arrastradas por locomotoras eléctricas, encofrados telescópicos marca Sicea, de fabricación italiana, con un total de 36 metros y bomba de hormigón marca Torkret tipo 109. En una primera fase de la construcción del túnel se utilizó un sistema original de la Contrata por el que se procedía al hor-

PERFORACION Y REVESTIMIENTO DEL TUNEL DE VILLAREJO

migonado diario de la fase excavada. Para ello, se prolongaba la cinta transportadora del minero continuo hasta detrás de los módulos de encofrado, sosteniéndose en ellos a su paso. En el espacio comprendido entre la máquina y el fin de los encofrados se situaba la bomba de hormigonado. Este sistema funcionó a plena satisfacción, pero hubo de ser abandonado por razones económicas ya que la diversidad de los terrenos atravesados y los desiguales ritmos diarios de perforación frenaba de forma antieconómica el rendimiento conjunto de los tajos de hormigonado y excavación.

En la salida del túnel se instaló la central de hormigonado, una planta Granier automática para 15 m³ de capacidad horaria. También se disponía de una estación de carga de baterías alimentada como el resto de las instalaciones por una línea eléctrica de alta tensión a 20.000 V, que enlazaba la boca de salida del túnel con un centro móvil de transformación de H.E. en la localidad de Montalvo.

INCIDENCIAS Y RITMOS ALCANZADOS EN LA EJECUCION DE LAS OBRAS

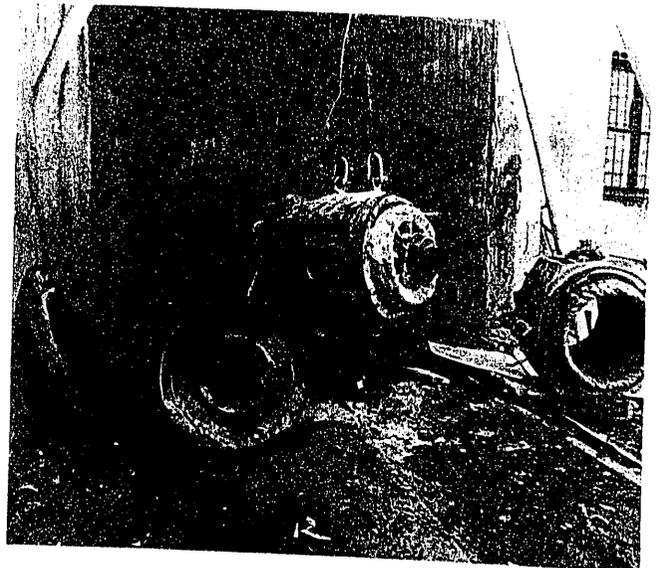
Entre las incidencias hemos de anotar, en primer lugar, la sustancial modificación del establecimiento de los frentes de emboquillamiento. Los emboquillamientos someros previstos en proyecto y apoyados en dos vaguadas se mostraron sumamente desventajosos, hasta el punto de que el minero continuo en la boca de salida se encontró, tras un dificultoso avance de unos 98 metros, en la imposibilidad de proseguir su trabajo, ya que las margas arcillosas y yesíferas muy humedecidas y poco consolidadas no permitían realizar los anclajes laterales ni mantener su alineación. Hubo que acudir por ello a una drástica reforma de los emboquillamientos avanzándolos 244 metros en la boca de salida y 183 en la boca de entrada hasta alcanzar cotas rojas próximas a los 120 metros. Con esta medida, que se tradujo en aumentar la excavación a cielo abierto de un volumen inicial de 103.498 m³ a un volumen final de 368.410 m³, se eliminaron dos tramos terminales de muy difícil y costosa ejecución subterránea, además de liberar la máquina Robbins prácticamente atrapada en el inicio de su funcionamiento.

Emboquillada nuevamente la boca de salida aún hubo que perforar previamente con medios convencionales y preanillado los siguientes 145 metros hasta pasar el freático origen de las dificultades habidas en dicha zona, freático confinado potente —llegó a dar un caudal en frente de más de 40 litros por segundo— que ofreció importantes dificultades de construcción. Pasado el mismo ya se presentó el terreno en condiciones adecuadas para su perforación con el minero continuo y, en consecuencia, se situó éste en el frente de trabajo

en el que ya continuó hasta calar el túnel en el frente terminal a 611 metros de la boca de entrada.

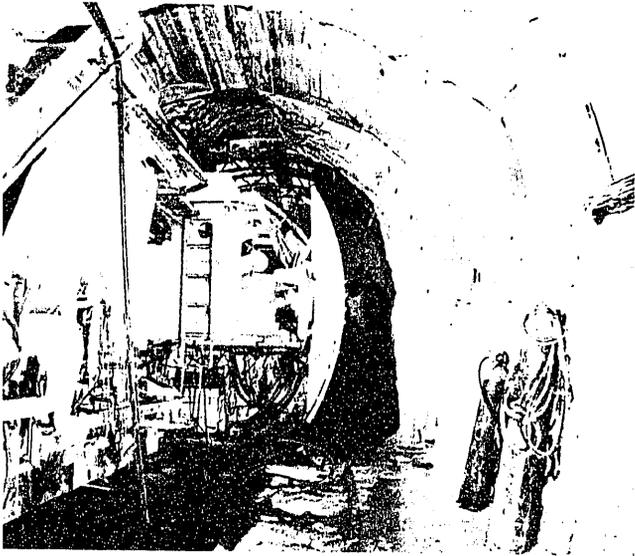
Durante su trabajo dentro del túnel se presentaron otras muchas dificultades locales, en unos casos por defecto de capacidad portante de los terrenos a efectos de anclaje y en otros por la irrupción de aguas o aguas y arenas en los diques formados por los contactos de areniscas y margas. En ellos, cuando estos contactos en margas arcillosas se encontraban fuertemente humedecidos, era necesario situar elementos de reparto en el apoyo de las zapatas de anclaje lateral para evitar la pérdida del anclaje por fluxión del terreno. Cuando se agotaban las posibilidades de esta medida se procedía al refuerzo de la sección detrás del anclaje mediante perfiles metálicos y rollizos de madera y en los casos de mayor dificultad, utilizando perfiles metálicos yuxtapuestos constituyendo así un tope que evitase el movimiento hacia atrás del anclaje como consecuencia del empuje longitudinal de fresado. En todos estos casos se disminuía al mínimo posible el valor del empuje longitudinal. Por otra parte, se mostró sumamente eficaz en la previa valoración de las dificultades el conocimiento de las zonas de contacto de areniscas y margas arcillosas y los valores obtenidos en los ensayos a compresión simple de las muestras inalteradas, pudiendo comprobarse que los problemas aparecían cuando el valor de la compresión simple descendía por debajo de 3 Kg/cm².

El flujo abundante de aguas en zonas de areniscas duras carstificadas produjo dos incidentes, uno de los cuales fue el más grave del proceso de perforación. En este caso la presión de agua en un estrato delgado previamente carstificado y relleno de arenas sueltas originó la avalancha de aguas



Inundación de febrero de 1973. Limpieza y reparación de los motores del minero.

PERFORACION Y REVESTIMIENTO DEL TUNEL DE VILLAREJO



Incidente de marzo de 1973. Trabajos de corrección del asiento y alineación del minero cuya cabeza se apoya en arenas poco cementadas en un estrato de pequeño espesor.



Operación de cale realizada en 24 de agosto de 1973. Vista frontal del minero.

y arenas finas en el frente de ataque introduciendo en el túnel más de 1.900 m³ de estos materiales, que tras tapar casi las más elevadas partes de la máquina, se extendían 200 metros detrás de ella. Hubo que retirar todo el escombros, limpiar y secar los motores y equipo eléctrico humedecidos y llenos de arena fina y desarenar los circuitos hidráulicos, lo que supuso una parada de ochenta días en los trabajos de perforación. En este caso, sin embargo, una vez reconocida la causa de la inun-

dación, no fue necesario proceder a otros trabajos ya que el estrato carstificado era de poco espesor, unos 40 centímetros, y sus bordes estaban constituidos por areniscas duras que no presentaban problema alguno para su paso. En otras dos ocasiones se produjo fuerte afluencia de aguas con pequeño contenido de arenas, pero las suficientes para tener que parar y proceder a la limpieza del eje de rotación de la cabeza de corte y de los conductos hidráulicos evitando la abrasión que pudieran producir estas arenas en los mecanismos aludidos. Finalmente, unos 200 metros antes del cale, se llegó a una capa de areniscas muy poco cementadas que por su falta de estabilidad y capacidad portante originó el descenso y cabeceo de la máquina. Hubo entonces que proceder a excavar convenientemente la zona inestable, de muy pequeña potencia, anillando al mismo tiempo la sección y tramo para situar posteriormente la máquina en su posición correcta. Este incidente supuso una última paralización del avance de treinta y seis días.

En el gráfico adjunto al corte geológico se recogen los ritmos y proceso de avance de la perforación, en el que pueden observarse las paralizaciones obligadas por estas incidencias. A ellas hay que sumar las impuestas por la Dirección de la obra que limitaba el desfase entre perforación y revestimiento y que una vez abandonado, por las razones antes indicadas, el sistema de hormigonado simultáneo al avance de la perforación, se tradujeron en paradas de la perforación en secciones adecuadas para proceder al hormigonado de la longitud previamente perforada, medida que se consideró imprescindible dada la naturaleza de los terrenos. Este tipo de paradas está asimismo indicado en dicho gráfico.

En relación con los ritmos hemos de decir que el avance máximo diario, siempre en jornada continua de veinticuatro horas, horario de trabajo durante la construcción de este túnel, alcanzó los 33,70 m, ritmo normal si bien netamente inferior a la capacidad intrínseca de la máquina contando con más potentes medios de extracción, menor distancia de transporte o mejor terreno. Es interesante observar que el ritmo medio total de perforación del túnel es de 1/8 de este máximo normal y que esta reducción se viene produciendo regularmente por unas y otras causas en la perforación de túneles con este tipo de máquinas, lo que no dice nada en contra de la extraordinaria eficacia de las mismas. Este túnel nunca se habría podido perforar en plazo con otro sistema, salvo proliferación de pozos de ataque y notable encarecimiento, y si sólo pone en guardia de valoraciones optimistas acerca de los ritmos que se pueden alcanzar con ellas, sólo justificables en condiciones sumamente favorables.

Los frentes convencionales con un ritmo máximo diario de un metro consiguieron un ritmo me-

dio de 12 metros al mes. En el mismo puede observarse el proceso del hormigonado en el que se ha alcanzado un ritmo máximo mensual de 450 metros.

RESUMEN Y COMENTARIOS

Las obras del túnel de Villarejo se iniciaron en marzo de 1970 quedando ultimadas en diciembre de 1974. Se trata de un túnel de 4.941 metros que atraviesa la divisoria de las cuencas del Guadiana y del Júcar en terrenos blandos terciarios. Ha sido perforado mediante el empleo de un minero continuo marca Robbins.

De la experiencia adquirida en esta obra procede resumir lo que sigue:

- Ha quedado demostrada la utilidad del empleo del minero continuo trabajando como lo ha hecho en este caso en su límite inferior de utilización dada la blandura del terreno y las dificultades adicionales encontradas.
- Se muestra una vez más la conveniencia de emboquillar los túneles con la máxima cota roja, especialmente cuando los trazados se apoyan con boquilla en vaguadas y procede luego retranquear dichos emboquillamientos mediante túnel artificial hasta contrarrestar los efectos de inestabilidad en las trincheras terminales.
- Siempre que se decida la perforación de un túnel blando con este tipo de máquina es

necesario disponer previamente de una completa campaña de sondeos, uno por cada 100 metros de túnel, y de los ensayos de rotura a compresión simple de muestras inalteradas a la profundidad del túnel. Debe prestarse asimismo gran atención a la presencia de aguas que puedan reducir la capacidad portante de los terrenos.

- En la valoración de los plazos de perforación deben reducirse sustancialmente los ritmos reales máximos alcanzados por este tipo de máquinas.
- Sólo cabe pensar en un proceso de revestimiento seguido a la perforación cuando existan condiciones óptimas por la homogeneidad de los terrenos atravesados. Caso contrario, ha de pensarse en la detención de la perforación para proceder al revestimiento marcando los distanciamientos máximos admisibles de acuerdo con la naturaleza de dichos terrenos.

Diremos, finalmente, que el coste de esta obra a precios de 1969 ha ascendido a 326,8 Mpts., lo que supone un coste por ml de 66.154 pesetas. Las entibaciones metálicas necesarias han arrojado un peso de 425 kilogramos por cada ml de túnel. En total ha habido que preanillar 720 ml de túnel. Las inyecciones de cosido han ascendido a cinco toneladas por cada ml de túnel y las de consolidación del terreno a dos toneladas por ml de túnel. Un 71 por 100 del revestimiento y de las inyecciones ha debido hacerse empleando cementos anti-sulfato por la naturaleza agresiva de los terrenos.