

## Impermeabilidad y calidad general del revestimiento en los túneles construidos con TBM

Primera aplicación en Europa del relleno del espacio anular con bicomponente en los escudos no presurizados. El proyecto bitubo de Bolaños de la línea de AVE a Galicia



**Felipe Mendaña Saavedra**  
Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



**Juan Pablo Villanueva Beltramini**  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

### Resumen

En septiembre de 2013 se publicó en esta revista un primer artículo sobre las características técnicas y los ensayos previos llevados a cabo para usar bicomponente, el nuevo material para rellenar el espacio anular (el *gap*) existente entre el escudo y el terreno por primera vez en Europa en una TBM del tipo escudo no presurizado.

Una vez terminados los estudios y ensayos previos, se realizó un ensayo a escala real en la misma máquina montada en la obra, con resultado satisfactorio. En consecuencia, ADIF propietario del proyecto de la línea ferroviaria de alta velocidad al noroeste de España dio su aprobación final a la adaptación hecha al escudo HK S-805, así como al uso del bicomponente en la construcción de los túneles gemelos de Bolaños.

En el artículo se exponen las características de las instalaciones de obra así como las del sistema de control de bicomponente y procedimiento de su aplicación, continuando con el desarrollo de los trabajos de construcción de los casi 4.000 m construidos satisfactoriamente (de un total de 6.500 m) hasta el 31 de mayo de 2014 en el túnel de la vía derecha.

El artículo hace una mención especial relativa al problema de las importantes aportaciones de agua del terreno, resuelto por el uso de bicomponente, añadiendo el procedimiento empleado para reducir las pequeñas filtraciones residuales hasta su secado total.

### Palabras clave

Tamaño real, escudo simple, doble escudo, aportaciones de agua, gelificación

### Abstract

*In September 2013 this magazine published a first article about the technical characteristics and previous tests made to use Bicomponent, the new material to fill-up the annular void (the "gap") between the shield and the terrain, for the first time in Europe in a Single Shield TBM.*

*Once the previous studies and tests were finished, a full scale testing was made on the TBM itself, with a satisfactory outcome. As a result ADIF, the owner of the new high speed railway Project to NW Spain, gave its final approval to the adaptation of the Single Shield HK S-805, and to use Bicomponent for the construction of the Bolaños twin tunnels.*

*This article explains, firstly the Site Installations characteristics, as well as the ones of the bicomponent control system and its application procedure, and secondly the development of the construction works along the near 4,000 m (of a total 6,500 m length) of the right track tunnel satisfactorily built up to the end of May 2014.*

*Special mention is made about the significant water inflows which has been solved by using Bicomponent and an additional procedure to reduce the small filtrations up to its total drying.*

### Keywords

*Full scale, single shield, double shield, water inflows, gelling*

## 1. Introducción

El relleno del *gap* mediante bicomponente, frente el mortero habitual, tiene por objeto inyectar una lechada de bentonita-cemento fluida que, al mezclarse con un silicato y después de rellenar el citado *gap*, gelifica en torno a los 8 a 16 segundos de su salida por las líneas de ambos componentes impidiendo la circulación de agua del macizo por el trasdós de los anillos, causa del “lavado” asociado a los morteros tradicionales.

El nuevo procedimiento, que viene utilizándose con éxito en los escudos presurizados desde 2005, se está aplicando por primera vez en Europa a un escudo no presurizado, el “simple escudo” Herrenknecht S-805, con el que se está construyendo el primero de los túneles gemelos de Vilariño-Campobecerros (o túneles de Bolaños) de la Línea de AVE a Galicia. El escudo fue adaptado a esa nueva técnica, para inyectar el bicomponente por todas las líneas del escudo de cola de la máquina, simultáneamente con el avance, en forma similar a la de los escudos presurizados.

La presente comunicación, que tiene como objeto difundir en España, en la forma lo más completa y realista posible, las ventajas del nuevo sistema en los escudos no presurizados, responde principalmente a dos cuestiones, de las que la primera es complementar, con la puesta a punto a nivel de obra, lo ya publicado en la Revista De Obras Públicas (nº 3546, de septiembre 2013), órgano del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y repetido en el Libro 20 (capítulo 7) de la Colección Ingeo/Túneles que viene manteniendo la E.T.S.I. de Minas de la UPM.

Y la segunda, es señalar otra ventaja del bicomponente, de gran importancia para los escudos no presurizados (sea un ‘doble escudo’ o un ‘escudo simple’) TBM que siguen siendo imprescindibles en proyectos en macizos de rocas duras y muy duras con tramos de dificultad extrema para el avance, sea por el ‘*squeezing*’ de las zonas en falla, o por los tramos de roca muy fracturada con grandes presiones sobre el escudo, debidas a recubrimientos elevados. Pues bien, cuando hay que recurrir a esos tipos de escudo, el sistema bicomponente es la mejor solución técnica existente hasta la fecha, para resolver los incidentes por afluencias de agua significativas, que hacen imposible lograr revestimientos de impermeabilidad similar a los de las TBM presurizadas, evitando los inconvenientes que para el correcto funcionamiento de las instalaciones de un túnel de transporte en explotación, así como para la durabilidad

de su obra civil, supone una impermeabilidad deficiente del revestimiento.

## 2. Fabricación y almacenamiento del bicomponente

### 2.1. Dosificación inicial

A partir de los criterios establecidos como resultado de los ensayos previos (a los que nos hemos referido en las publicaciones anteriores) la dosificación por m<sup>3</sup> de mezcla a inyectar, inicialmente adoptada para la puesta a punto del sistema en obra fue la siguiente<sup>1</sup>:

<b>Com. A</b>	Cemento III/B 32.5 N/SR	300 kg/m <sup>3</sup>
	Bentonita CV 15 CLARIANT de SÜD-CHEMIE <sup>2</sup>	40 kg/m <sup>3</sup>
	Retardante/Estabilizante (Tipo Meyco GA-925)	3 kg/m <sup>3</sup>
	Agua	845 kg/m <sup>3</sup>
		1.188 kg/m <sup>3</sup>
<b>Com. B</b>	Silicato Sódico “Master Rock”	
	MEYCO ASA 430: (6 % s/peso de los aglomerantes <sup>3</sup> )	18-20 kg/m <sup>3</sup>

### 2.2. Fabricación y almacenamiento del com. A

La figura 1 siguiente representa el esquema de la Planta de fabricación de este Componente, que se montó en el exterior del Túnel. Desde ella se bombea al interior la mezcla fabricada, por medio de una bomba de embolo SCHWING KSP-25 HD a través de una tubería de Ø 2”, que se va prolongando según lo requiere el avance. El com. A bombeado se va depositando en los tanques de almacenamiento situados en el *back-up* que se ven en la figura 2.

Para conseguir un mezclado homogéneo y con las propiedades adecuadas para el trasiego del material de relleno hasta los tanques del *back-up* de la tuneladora, así como para su posterior inyección al hueco anular del anillo, en la fabricación de este componente se procede de la forma siguiente:

Por una parte, se mezcla con agua la bentonita para llevar a cabo su prehidratación, utilizando para ello una turbo-mezcladora MTW 1300 durante unos tres minutos. Una vez hidratada la bentonita se almacena en dos depósitos

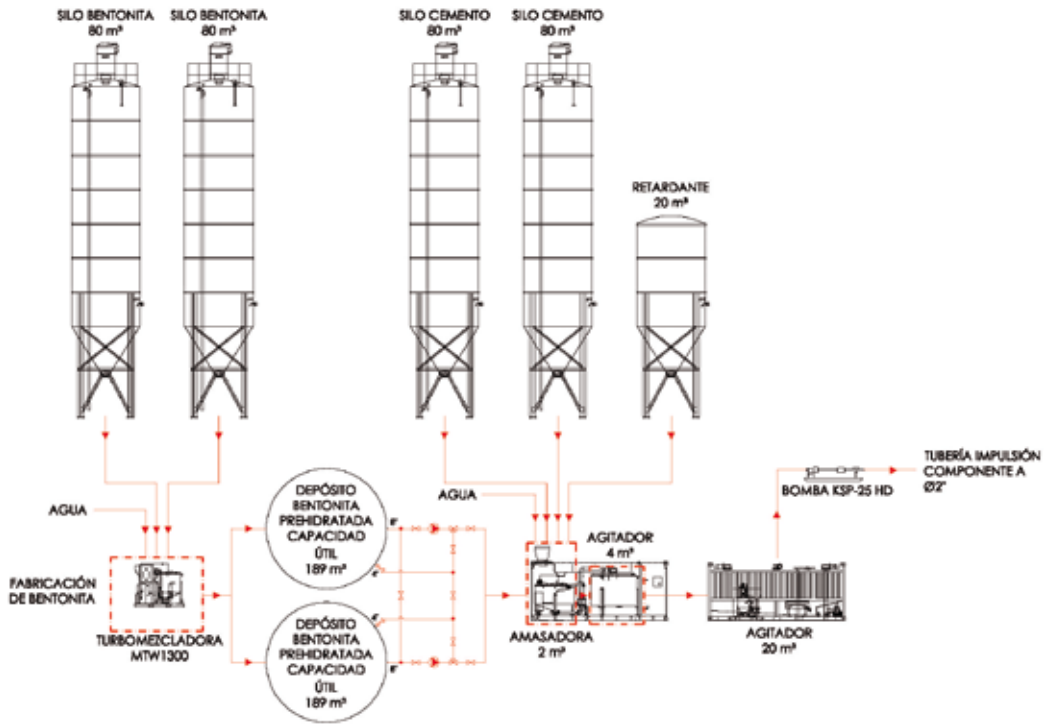


Fig. 1. Esquema de la planta de fabricación y transporte del com. A



Fig. 2. Tanques de com. A en el *back-up* de la tuneladora

de 189 m<sup>3</sup>/ud, desde los que se pasa al depósito agitador de 4 m<sup>3</sup> de la planta de dosificación y amasado de la pasta de cemento.

Por otra parte, se prepara la mezcla de cemento y agua en una amasadora de 2 m<sup>3</sup> de capacidad durante unos 4 minutos al cabo de los cuales se añade la bentonita. La mezcla final inyectable (el *grout*) se trata en el agitador de 4 m<sup>3</sup> mencionado para conseguir un producto homogéneo que se pasa a un depósito general de la planta de 20 m<sup>3</sup> de capacidad, dotado también de agitador desde el que se bombea al interior del túnel.

Mediante la bomba de émbolo (KSP-25 HD en la figura 1), el com. A se transfiere a los dos tanques de almacenamiento de la TBM que cuentan con unas aspas de agitación del producto para facilitar el aumento de fluidez de la mezcla eliminando partículas de aire y ayudando a mantener estables sus características antes de ser bombeada para rellenar el trasdós del anillo según este va saliendo del escudo de cola de la TBM.

Cada uno de dichos tanques (figura 2) tiene una capacidad de 14 m<sup>3</sup> que se fijó con el objeto de dimensionar sobradamente el volumen del almacenamiento del com. A en el frente, para poder atender sin problemas tanto el ritmo máximo del avance como las posibles sobreexcavaciones debidas a la presencia de accidentes geológicos, o los sobrecortes, consecuencia de la orientación de las formaciones de pizarras, todo ello además de poder responder

al mismo tiempo a la reinyección a lo largo del *back-up* de los rellenos de los anillos que lo precisen.

De acuerdo con lo anterior, los dos tanques están conectados entre sí y cada uno tiene tres 'bombas de husillo', montadas bajo el mismo. Las seis bombas envían el com. A, cada una por una línea independiente, rellenando el trasdós del anillo, a medida que va saliendo el escudo de cola. En serie con las 'bombas de husillo' están montados los respectivos caudalímetros para controlar el volumen de componente que se inyecta por cada una de las líneas, tanto del com. A como del com. B, como se ve en la figura 3.

En la figura 4 siguiente están representadas las posiciones en el escudo de cola de las seis 'salidas' al *gap* de las líneas 1 a 6 del sistema, una vez ya unidos los dos componentes como indican los detalles adjuntos a la figura.

Las características de las 'bombas de husillo' (ver figura 5) del com. A son las siguientes:

- Potencia eléctrica: 7,5 KW por ud.
- Caudal máximo de inyección: 115 l/min por ud.

Con estas capacidades de inyección del com. A, el volumen medio por anillo puede rellenarse en unos 20 a 30 minutos, dependiendo de su magnitud. Por otra parte, en general las dos 'salidas' inferiores (líneas L3 y L4 de la figura 4) son por



Fig. 3. Líneas y caudalímetros de salida de los tanques de com. A

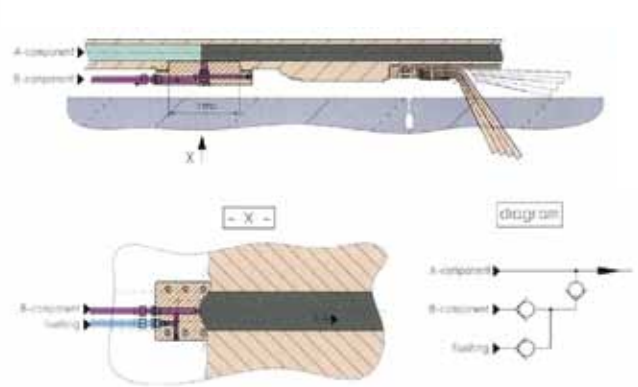
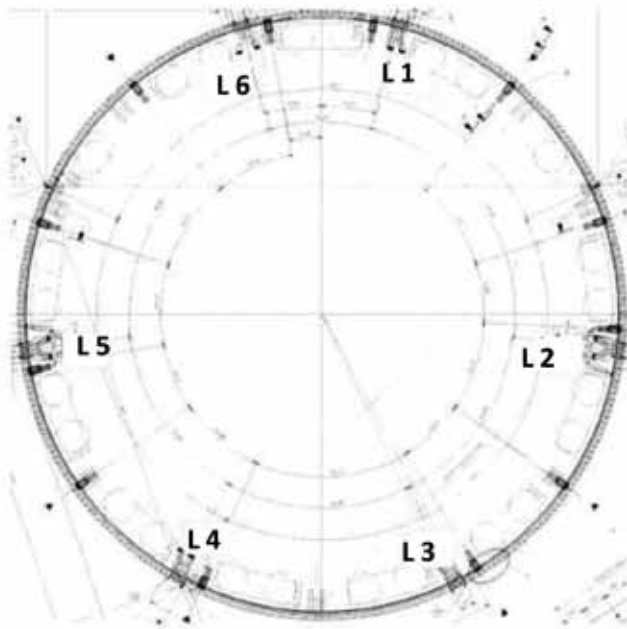


Fig. 4. Salidas de las 6 líneas de inyección en el escudo de cola y detalles de las mismas

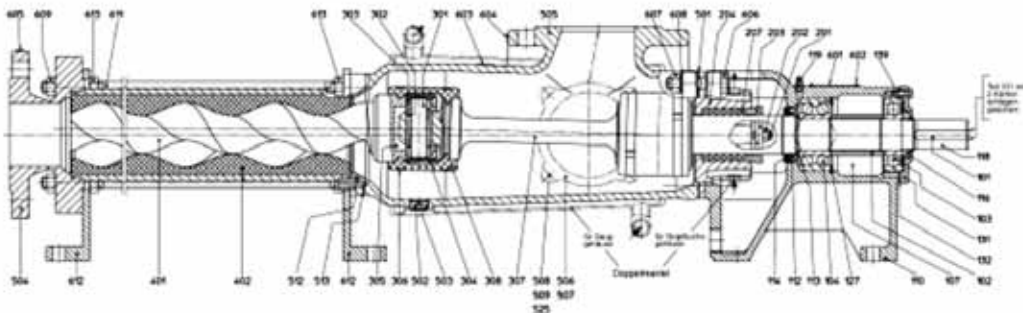


Fig. 5. 'Bomba de husillo' para inyección de componentes



las que se inyecta el menor volumen del relleno debido a su posición. A ellas le siguen las dos líneas intermedias (L2 y L5), que suman un volumen ligeramente superior al de las anteriores, de forma que por las dos líneas superiores (L1 y L6) suele inyectarse algo más de la mitad del volumen total del módulo<sup>4</sup>.

El PLC del sistema facilita una información muy detallada en tiempo real, que puede imprimirse según se produce, y de la que se incluye una muestra parcial en la figura 6 (arriba: gráficas de las presiones de inyección en las líneas L3 y L4; y abajo: presiones medias y volúmenes totales inyectados por las 6 líneas).



Fig. 6. Muestra de la información facilitada por el sistema en tiempo real relativa al anillo 300

**Inyección:**

	Promedio [bar]	Mínimo [bar]	Máximo [bar]	Cantidad [L]	
				A	B
P1	0.9	0.7	1.0	2054	119
P2	1.0	0.5	1.6	1869	108
P3	1.4	0.6	1.7	1757	102
P4	1.0	0.4	2.3	1346	77
P5	1.0	0.1	1.6	1461	85
P6	1.0	0.7	1.1	1972	114
P7	0.0	0.0	0.0	0	0
<b>Total</b>				<b>10459</b>	<b>605</b>

**Cantidad (Histórico)**

	Avance	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299
<b>A</b>	<b>Total [L]</b>	12483	18406	12823	12074	11368	10599	12213	11791	10217	10953
<b>B</b>	<b>Total [L]</b>	722	901	712	698	659	596	712	683	592	634

**2.3. Almacenamiento del com. B**

El com. B se deposita, mediante una bomba de trasiego, directamente del bidón de suministro (de 1.000 litros) situado en el tren al depósito del *back-up* de la TBM, de mayor capacidad (unos 3.000 litros), del que se alimentan

directamente las ‘bombas de husillo’ de dicho com. B a través de sus seis líneas hasta el punto de encuentro con las del com. A a partir del cual, la mezcla de ambos llega por un tramo muy corto a las respectivas salidas al *gap* indicadas en la figura 4.



Fig. 7. Depósito del com. B  
en el back-up

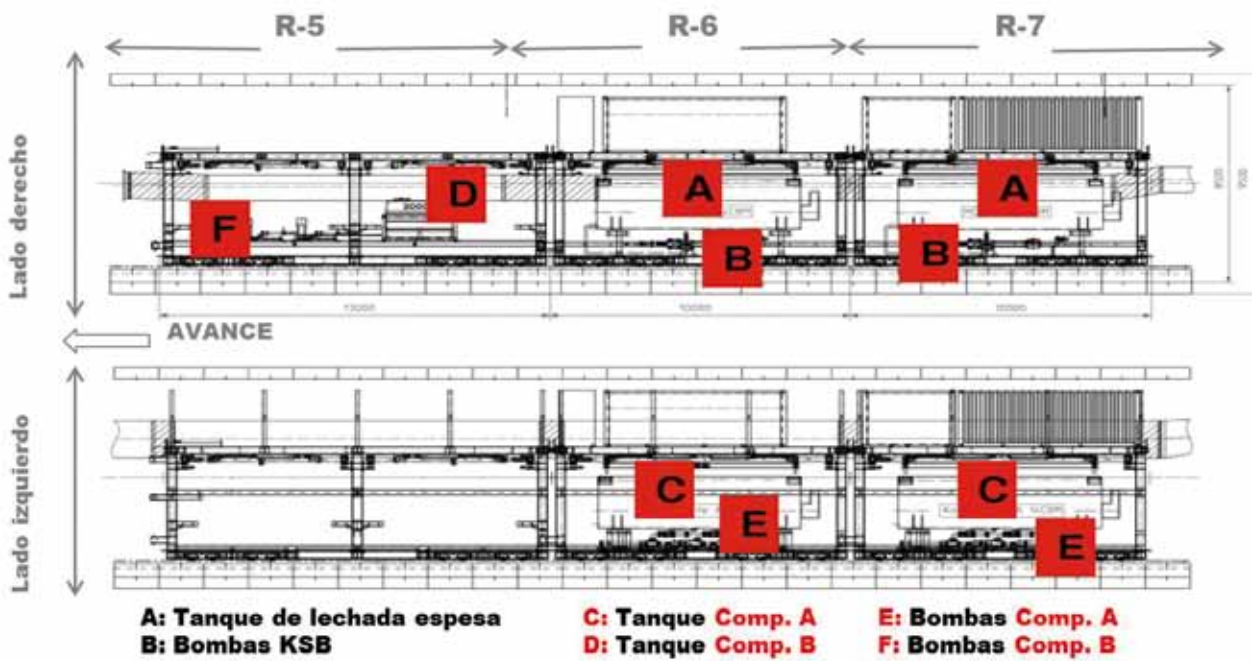


Fig. 8. Disposición de los equipos del sistema bicomponente montados en el *back-up* del escudo

Este com. B, que es simplemente un silicato, tiene las siguientes propiedades:

- Modifica la consistencia líquida del com. A hasta dejarla prácticamente con un gel, con gran tixotropía.
- Acelera el fraguado del com. A con el que se ha inyectado.
- Tanto la modificación de la consistencia como el efecto que produce como acelerante de fraguado pueden ser controlados por medio de la dosificación del producto.
- La dosificación permite también regular las resistencias iniciales deseables.

La inyección de com. B se hace por 'bombas de husillo' similares a la de la figura 5 anterior, y sus características técnicas son:

- Potencia eléctrica: 1,5 kW por ud.
- Caudal máximo de inyección: 17 l/min por ud.

#### 2.4. Disposición de los equipos en el back-up de la tuneladora

Los equipos del sistema bicomponente se han montado en los Remolques n° 5, 6 y 7 del back-up de la TBM, al nivel de la vía central y a ambos lados de la misma, para dar paso a las composiciones que transportan las mesillas con dovelas (2 mesillas por anillo), carriles y materiales varios destinados al frente.

La disposición de los tanques de los componentes A y B y de las bombas K&B de inyección correspondientes está representada en la figura 8 anterior.

### 3. Sistemas de inyección del bicomponente

El sistema de inyección de bicomponente de la TBM dispone de tres modos de funcionamiento: automático, semiautomático y manual o de mantenimiento.

#### 3.1. Líneas básicas del funcionamiento del sistema y modo de funcionamiento automático

En el modo de funcionamiento automático que es la base de diseño del sistema, la inyección del espacio anular se realiza dentro de un área fijada previamente por los límites inferior y superior de presión (parámetros de regulación: presión mínima y máxima) n° 2 y 1 en la figura siguiente.

Dentro de esta área de presiones se regula la velocidad de las bombas. Dicha velocidad es calculada por el sistema a partir de la velocidad de avance de la TBM y el espacio anular a llenar, estimando así el volumen a inyectar y haciendo a la vez su distribución automática entre las líneas seleccionadas, a lo largo del avance.

La mezcla porcentual del componente B es automática (fijada previamente en la pantalla de introducción de parámetros) y se indica en el sistema de visualización (parámetros volumen).

A continuación, se describe el proceso de funcionamiento del sistema según se encuentren las bombas en un área u otra del rango de presiones del esquema de la siguiente figura 9.



Figura 9. Esquema de las presiones de trabajo programadas

- (1) Presión máxima prefijada para el trabajo.
- (2) Presión mínima prefijada para el trabajo.
- (3) Parada Del Sistema: se ha rebasado la presión límite superior.
- (4) Detención de avance de la TBM: se ha pasado a trabajar por debajo de la Presión límite inferior.



En cuanto a las diversas posiciones de las presiones de trabajo, ha de tenerse en cuenta:

A y B,) Las bombas son reguladas automáticamente por el sistema en función del volumen calculado y la mezcla de los dos componentes rellena el espacio anular. Como la presión en el espacio anular está dentro del entorno de presión de trabajo (presiones mínima/máxima) el caudal se mantiene constante.

C) Si el espacio anular se reduce o si se frena el avance, entonces el caudal preestablecido es muy grande y la presión sube pudiendo rebasar el valor límite superior de presión. Ahora bien, si el caudal se reduce paso a paso hasta que la presión esté de nuevo entre los dos valores límite, el sistema vuelve a activar el proceso.

D) Si la presión superior al valor límite llega a producir la parada del sistema las bombas se detienen automáticamente. Los conductos del com. B se aclaran con agua a alta presión. Los conductos del com. A se aclaran con com. A. Tan pronto la presión ha bajado a un valor admisible se reinician el bombeo.

B,) Si el espacio anular aumenta o si se acelera el avance, entonces el caudal preestablecido es muy pequeño y la presión baja pudiendo llegar a trabajar por debajo del valor de límite inferior establecido. Si el caudal aumenta paso a paso hasta que la presión esté de nuevo entre los dos valores límite, el proceso continúa.

E) Pero si la presión en el espacio anular se mantiene inferior al valor 4 no se garantiza el relleno completo del espacio anular porque el caudal es muy pequeño. El avance de la TBM se detiene automáticamente hasta que se vuelva a alcanzar el valor límite inferior de la presión, ya que las bombas siguen aportando bicomponente.

Ahora bien, como en el modo automático, no se puede regular la presión de las líneas independientemente, los parámetros teóricos de los límites de presión se corregirán al terminar el anillo, si fuera necesario.

**3.1.1. Introducción de los parámetros de regulación del sistema**  
Antes del comienzo de la excavación, se introduce en la pantalla de parámetros el valor teórico de la sección del hueco anular a rellenar, para que el autómata pueda ajustar el caudal de cada línea en función a la velocidad de la TBM. La fórmula empírica empleada es del tipo:

$$Q \text{ (l/min)} = K \times S \text{ (m}^2\text{)} \times V \text{ (mm/min)}$$

Existe un segundo factor de corrección en (%) para asegurar el posible hueco de las irregularidades del terreno o posibles sobreexcavaciones detectadas en el avance del módulo (que se conocen por las pesadas de control de su excavación realizada seis o más ciclos antes). Este valor se fija igualmente y es el llamado índice “corrector de la cantidad a inyectar”.

En esta misma pantalla de parámetros se fijan los valores de presiones máximas y mínimas de funcionamiento de cada una de las líneas de inyección de la tuneladora, parámetros que se denominan también presión de regulación mínima y máxima.

Existe una tercera corrección por línea por medio de dos parámetros adicionales: un parámetro límite de desconexión de avance que es la presión mínima en cada línea para que el avance se pueda activar y, por último, otro valor de desconexión del sistema que controla el atasco de cualquier línea por sobrepresión y detiene automáticamente el bombeo por dicha línea, que se reactiva una vez hecha la limpieza de la misma.

Por último, hay que introducir otro parámetro, el porcentaje del com. B en relación con el volumen del com. A.

El tiempo de limpieza de las líneas de mortero se realiza automáticamente, al parar de inyectar por una línea, valor que se introduce en la casilla de tiempo de aclarado com. B.

En la página siguiente, se puede observar la pantalla de introducción de parámetros.

### 3.1.2. Desarrollo del proceso de inyección

Al iniciar la excavación se arrancan las bombas de inyección de bicomponente (A y B) con la consigna de inyección de caudal según la velocidad de la TBM.

En la pantalla de control se puede visualizar el caudal de cada línea, así como la presión de inyección a la que se está trabajando.

La regulación de presiones se realiza según los parámetros introducidos anteriormente.

Al lado de cada línea de caudal existe una casilla que refleja el volumen inyectado (en tiempo real) por cada línea, así como el total de la inyección.

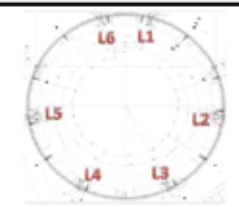


Fig. 10. Pantalla de parámetros



Fig. 11. Pantalla del Operador del Sistema

Líneas de mortero	L1 - L6	L2 - L5	L4 - L3
P máx. Corte	1,60	1,90	2,50
P máx.	1,40	1,80	2,30
P min	0,70	0,80	1,20
P min Corte	0,50	0,60	1,00



Cuadro 1. Ejemplo de tabla de presiones

A instancias de la dirección de obra de ADIF, la UTE solicitó de Herrenknecht la inclusión de un gráfico con el volumen teórico según la longitud de avance en el cual se refleja también el volumen real para que el operador pueda ver la diferencia.

En caso de que alguna de las líneas alcance la presión mínima ‘desconexión del avance’ el avance se detendrá hasta conseguir la presión mínima de arranque en la línea, lo que permitirá reanudar el avance o excavación.

La visualización del control de inyección del relleno se ha instalado también en la cabina del piloto de la TBM, para que de esta manera tenga información sobre la inyección del bicomponente, pero en todo caso tienen prioridad total las decisiones del operador de la inyección de bicomponente. A continuación, se puede ver la pantalla de trabajo del operador de la inyección o mejor dicho, del operador del sistema.

### 3.1.3. Control del volumen de inyección

El volumen teórico de relleno del *gap* (Gteo.) para un anillo de 1,6 m es de 9,75 metros cúbicos, en consecuencia se podría considerar que con ese volumen inyectado el *gap* de los anillos quedaría completamente relleno. Debido al hecho de que la excavación no es perfecta, se tiene que establecer un sistema que asegure el control de llenado, aparte de los controles volumétricos que serán los de referencia.

Dependiendo de la posición de cada línea de inyección, ésta tendrá que vencer una presión equivalente al circuito de la propia línea más la altura de mortero inyectado en el trasdós. Las presiones de referencia por sector para el control de llenado del *gap* se establecerán mediante una tabla de presiones<sup>5</sup>.

### 3.1.4. Validación de la inyección del anillo

- El volumen total de la inyección será igual a la suma acumulada de todas las líneas de inyección, teniendo en cuenta que estos volúmenes serán distintos debido a la situación de cada una de las líneas (las situadas en la parte inferior se llenan antes y teóricamente su volumen será menor que las situadas a más altura). El corte de inyección debe ser por presión en todas las líneas asegurando así el perfecto relleno del hueco del trasdós y evitando que el mortero circule hacia el escudo y rueda de corte.

- En los casos en los que el control de pesada del material excavado se encuentre entre el 0,9 y el 1,1 del peso teórico

estimado, se considerará la inyección concluida (en el anillo montado correspondiente) cuando el volumen inyectado en el anillo supere el 0,8 del valor teórico ( $0,8 * G_{teo}$ ) siempre que las presiones de inyección hayan estado dentro de los rangos establecidos<sup>6</sup>.

- En el Cuadro 2 siguiente se indican los datos de una pesada teórica en pizarras excavando a sección completa.

Longitud avance	Densidad Material	Peso en Toneladas		Teórico
		Mínimo 10 %	Máximo 10 %	
1,60	2,70	299,29	365,79	332,54

**Cuadro 2. Datos de pesadas en pizarras (plena sección)**

- En el caso de que el volumen excavado supere el 1,1 del peso teórico, será preciso evaluar un nuevo valor de referencia del Gteo en función del estudio de la posible fracturación de la zona atravesada. El criterio de inyección será el mismo del caso anterior pero relacionado con el nuevo valor de Gteo. Es aplicable la misma nota (4) anterior.

- Se establecerá un control, por turno, del material inyectado (G total turno). Este valor se comparará con el volumen teórico que se debería haber inyectado ( $G_{total\ turno} / N \text{ número anillos turno} = G_{real}$ ) con el mismo criterio de aceptación indicado ( $G_{real} \geq 0,8 * G_{teo}$ ).

- Adicionalmente se pueden obtener testigos del trasdós de la dovela a efectos de comprobación del relleno del *gap*. Este método se realizó de forma sistemática en los primeros metros de la excavación del túnel, en la zona del pretúnel ejecutado por métodos convencionales, para lo cual, y como dato de partida, se estableció un control de testigos cada 6 anillos.

- Por último, con motivo de las afluencias de agua, también se han extraído testigos en otras zonas del túnel, trabajos que, al igual que las inyecciones para corregir dichas afluencias, se han realizado exclusivamente a través de los orificios de inyección de las dovelas (ver figura 12).

### 3.2. Modo de inyección semiautomático del bicomponente

En el modo de inyección semiautomático, el operador podrá regular los parámetros de inyección en función de cada

situación, es decir, tomando como referencia la carrera de los cilindros de avance (y, por tanto, el hueco generado) y la velocidad de avance de la TBM.

Podrá modificar el caudal de cada línea para ajustar el volumen en cada momento a inyectar en base a las presiones instantáneas de las bombas. Para esta operación existen los potenciómetros digitales del panel de control con la nomenclatura “revoluciones”.

Esta regulación se hace en % respecto del caudal nominal de las bombas que son de 115 l/min para el com. A y de 17 l/min para el com. B.

Para este proyecto se ha implementado una gráfica comparativa donde se refleja en tiempo real el volumen teórico frente al real inyectado para poder controlar en cada momento el estado de relleno de la excavación.

### 3.3. Procedimiento de reinyección de bicomponente

El procedimiento a aplicar para establecer si un anillo o paquete de anillos tiene que ser reinyectado (aunque no aparezcan signos de presencia de agua) es el siguiente:

- Si el volumen inyectado en un paquete de tres anillos consecutivos es inferior al 0,8 % del teórico de cada anillo, se compararán las cantidades inyectadas en ese paquete y los dos anteriormente montados. Si la media sigue siendo menor de 0,8 %, esos anillos (y los siguientes que cumplan la condición de volumen menor del 0,8 %) serán objeto de reinyección.
- Además, en el caso de aparición de humedades en anillos ya inyectados se procederá igualmente a realizar una campaña de reinyección en el punto más próximo a la humedad a tratar, para atacar la vía de agua lo más cerca posible. Dicha campaña de reinyección secundaria se realizará a través de los orificios de inyección de las dovelas.

## HERRENKNECHT AG | UTILITY TUNNELLING | TRAFFIC TUNNELLING



## SIEMPRE ENCONTRAMOS UN CAMINO.

Herrenknecht AG es líder de tecnología y de mercado en la excavación mecanizada de túneles.

Es la única empresa que provee toda una gama de productos y servicios mundialmente, y que suministra máquinas de perforación de túneles de alta tecnología (High-tech) para todo tipo de terrenos y en todos los diámetros de 0.10 m hasta 19.0 m. Las máquinas Herrenknecht son fabricadas a medida para crear sistemas de abastecimiento y evacuación de aguas, gas y petróleo (rama del Utility Tunnelling), así como túneles de carretera, metro y de tráfico ferroviario (rama del Traffic Tunnelling) en todo el mundo.

El grupo Herrenknecht emplea a más de 4.800 personas y cuenta con 82 filiales y empresas asociadas que trabajan en campos relacionados, por ejemplo, en soluciones de logística o sistemas de perforación profunda. Siempre encontramos un camino. Junto con nuestros clientes.

Herrenknecht Ibérica, S.A.U.  
Paseo de la Castellana 192 - 13°  
28046 Madrid  
Phone +34 913 59 80 08  
Fax +34 913 59 20 32  
herrenknechtiberica@herrenknecht.es

Herrenknecht AG  
D-77963 Schwanau  
Phone +49 7824 302-0  
Fax +49 7824 3403  
info@herrenknecht.com

www.herrenknecht.com





Fig. 12. Vista de los testigos de bicomponente

- Como medida habitual se intentará tratar estas posibles humedades lo más cerca posible del avance: una buena zona es la plataforma existente delante de la cabina del operador.

Para realizar estas reinyecciones a través de las dovelas existe una séptima bomba de inyección tanto para el componente A como componente B. Desde el remolque 5 del *back-up*, lugar donde están situadas las bombas, se ha montado una línea de inyección (la llamada línea 7) que llega hasta los primeros anillos situados a continuación del escudo de cola. Esta línea tiene conexiones en todos los carros del *back-up* desde el carro 5 hasta el carro 1, para poder realizar una reinyección desde cualquiera de estos puntos.

Los parámetros de reinyección (volumen, caudal y presiones) se registrarán para concluir si el menor volumen de relleno fue debido a un relleno previo generado, ó a una reducción geológica del *gap* anular.

#### 3.4. Modo de inyección manual o de mantenimiento

Este modo sólo se suele utilizar para realizar los mantenimientos del sistema y comprobaciones de su funcionamiento.

#### 3.5. Control externo

En los túneles de Bolaños, adicionalmente al autocontrol realizado según los procedimientos de ejecución y PAC del contratista, se ha establecido un control adicional por la Asistencia al Control de las Obras, por indicación de ADIF. Se dispone de una réplica del PLC en las oficinas de la Dirección de Obra, que recoge en tiempo real los parámetros de la máquina. Así, además de los controles indicados en los apartados 3.1.3 y 3.1.4 sobre el peso de la excavación y el relleno del *gap* de la totalidad del avance, fijado para este túnel en 1.600 mm (longitud del anillo de dovelas), se controla que el relleno se produce de forma completa y al mismo tiempo que este se genera se

recogen valores intermedios de peso de excavación y volumen del relleno del bicomponente cada 400 mm de avance.

De esta forma se revisa y asegura que se inyecta de forma continua el *gap*. Para esto se han incluido las modificaciones en las pantallas de control que se indican a continuación:

Se fija previamente el volumen teórico de inyección bicomponente por anillo, necesario para rellenar el *gap* anular entre el trasdós de la dovela y el corte teórico en función del gálibo de la rueda. Este valor será sujeto a revisión durante la excavación, pues puede disminuir hasta un 5 % del teórico en función del desgaste de los cortadores de gálibo de la rueda de corte. El control de la inyección se hace principalmente sobre estas tres variables:

- Volumen de inyección totalizado para todas las líneas respecto al volumen teórico de hueco generado. Este control se realiza cada 400 mm de avance (ver cuadro inferior izquierda en la pantalla de visualización de datos de la TBM, figura 13). Se establece, a la vez, un rango de tolerancia de desviación del volumen real sobre el teórico, con un código de actuación distinto para cada caso (ver cuadro 3: Criterios de aceptación sobre el volumen de inyección).

- Caudal de inyección relativo a la velocidad de avance de la tuneladora (equivalente a la velocidad de generación de hueco). Este control se realiza gráficamente mediante la comparación visual de la curva de generación teórica de *gap* y la curva de inyección real, a lo largo del avance de un anillo. Éstas tienen que tender a ser paralelas, o en cualquier caso, la curva de inyección debe estar siempre por encima de la teórica (ver gráfico superior derecha en la pantalla de visualización de los datos de la TBM, figura 13).

Régimen de funcionamiento	Rango de tolerancia del valor de volumen real V sobre el volumen teórico G (Gap)	Procedimiento de actuación (Cada paso no verificado conduce al siguiente)
Normal	$V \geq 0.80G$	OK
Revisión	$0.70G < V < 0.80G$ $V \geq 1.5G$	1) Comprobar evolución de la inyección del anillo anterior y de los 3 anillos posteriores y ver si los volúmenes se compensan indicando régimen Normal. 2) Comprobar que el volumen relleno se corresponde con la excavación. Reinyección hasta completar relleno.  Valor superior indica relleno de un hueco mayor o fuga de mortero hacia el frente: 1) Revisión de parámetros, observar material cinta. 2) Valorar reinyección para asegurar completo llenado del hueco. 3) Observar progresión
Anomalía	$V \leq 0.70G$	En cualquiera de estos casos, no se arrancará la excavación del siguiente anillo sin dar aviso a la ACO y consensuar medida corrección con la DO.  Valor inferior indica posible relleno inacabado: 1) Revisión de parámetros, medias y comparación con pesos excavados. 2) Reinyección hasta completar hueco. 3) Observar progresión.

Cuadro 3. Criterios de aceptación sobre el control del volumen de inyección

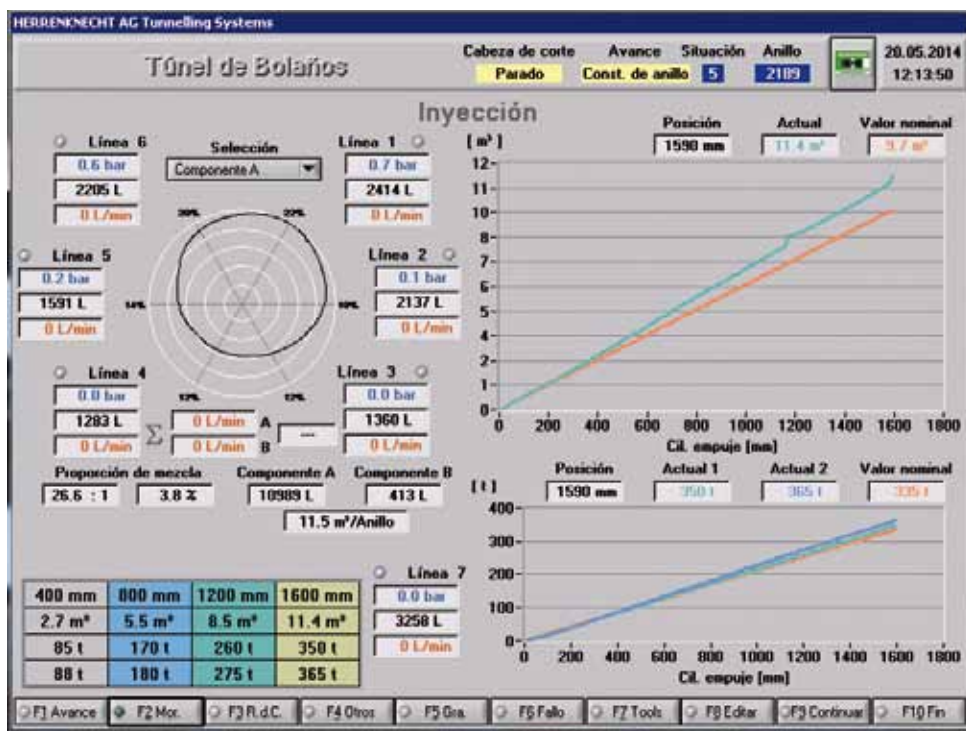


Fig. 13. Vista de la pantalla de visualización de los datos de Inyección de la TBM

- Presión a la salida de las líneas de inyección. Los sensores de presión instalados en la salida de las líneas de inyección registran la presión a la salida de la inyección. De esta forma, un cierto grado de presión que se opone a la inyección saliente indica la existencia de relleno en el trasdós, mientras que una salida de caudal sin presión indica existencia de hueco. Un aumento exagerado de la presión indica bloqueo de la línea. Se determina un rango de presiones de trabajo, dentro del cual la inyección debe funcionar para asegurar el relleno correcto (criterios de aceptación sobre la presión de inyección según lo indicado en el cuadro 1 anterior).

#### *Medidas adicionales de control de la inyección*

Durante la ejecución del relleno se comprueba que al menos cuatro de las seis líneas estén operativas. Si existen dos líneas inoperativas, el siguiente avance no se produce hasta que éstas no se hayan limpiado/reparado.

Por otra parte, se realizará una comprobación visual de que hay mortero de relleno en el trasdós de los anillos, a través del orificio de inyección instalado en la dovela. El orificio queda sellado con un tapón una vez se haya verificado.

#### **4. El tratamiento de las aportaciones de agua del terreno**

En los apartados anteriores se han hecho diversas referencias sobre el efecto positivo que el empleo del nuevo material que denominamos bicomponente, ha venido suponiendo para rellenar con éxito el espacio anular o *gap* de los anillos, en general, y cuando hay aportaciones de agua del terreno, en particular.

Como resumen, y aunque pueda parecer ajeno al problema del agua, debe señalarse en primer lugar la importancia prioritaria que tiene tanto el diseño del anillo con doble *gasket* (o junta de estanqueidad) como la perfecta colocación de las dovelas de los anillos, más importante si cabe cuando se utiliza el bicomponente que cuando se emplean morteros de cemento, porque las pérdidas por las juntas pueden llegar a ser difícilmente controlables, penalizando la nueva solución. La importancia dada desde el principio del proyecto de Bolaños a estas decisiones ha sido, en nuestra opinión, uno de los elementos principales del éxito de la nueva solución de relleno de espacio anular cuando hay presencia de agua, por lo que las señalamos como primera medida a tomar en el caso de utilizar el bicomponente en escudos no presurizados.

Por otra parte, debe señalarse que a lo largo del periodo de excavación de un módulo de avance es cuando se conoce la presencia de las aportaciones de agua, y cuando puede estimarse el orden de magnitud de sus caudales, ya que, en un escudo no presurizado son claramente evidentes los flujos que se producen no sólo a través de las aberturas de la rueda de corte, sino también a lo largo del propio espacio anular de la máquina, en los tramos de los escudos delantero e intermedio.

En consecuencia, y como ya se ha indicado en los apartados precedentes, la siguiente medida (que debe prevverse para el momento en que se rellene el anillo al que corresponde el avance que se está haciendo) puede ser la reducción del porcentaje de silicato al 5 %, dependiendo del caudal estimado.

Y como última medida, en caso de afluencias de agua, se debe usar siempre la línea 7 para reinyectar cada anillo y los dos o tres siguientes (aunque en estos haya bajado el caudal de la afluencia) según que el sistema indique que a través de dicha línea se admite más inyección, lo que se hizo en Bolaños sistemáticamente.

Las anteriores consideraciones han dado excelente resultado hasta ahora para reducir significativamente las afluencias de agua a través del revestimiento, de modo que únicamente quedaban como problema residual las filtraciones en forma de goteos o salidas laminares de caudal inapreciable, así como las humedades persistentes.

Es por ello que, expuesto el preámbulo anterior, lo que sigue de este apartado 4 se dedica particularmente a redactar lo que podemos llamar 'Protocolo de tratamiento de las filtraciones residuales' de acuerdo con la experiencia hasta la fecha del túnel de Bolaños.

##### *4.1. Tipología de las filtraciones*

Realizado el análisis sobre los primeros 1.400 anillos colocados se pueden establecer las tres tipologías de goteos y humedades según su posición en el anillo, que se tratan en los apartados siguientes (4.2 a 4.4):

- Humedades y goteos alrededor de un tornillo de unión de dovelas: indican filtraciones producidas por fallo del *gasket* o junta de estanqueidad exterior, sea radial o circunferencial.

- Filtraciones a través del tapón situado en el centro de cada dovela para la reinyección del *gap*: indican, en general, un relleno insuficiente en la zona.
- Filtraciones a través de juntas entre dovelas: señalan un fallo del sellado tanto en el *gasket* interior como en el exterior, con posible relleno insuficiente en la zona.

#### 4.2. Filtraciones a través de los tornillos de unión de dovelas

##### 4.2.1. Descripción

Se producen al puentear el agua el *gasket* exterior de sellado (circunferencial o radial) y penetrar al interior del alojamiento del tornillo de unión de dovelas. La arandela del tornillo no es un elemento de sellado y permite el paso del agua al interior del túnel. Este hecho se amplifica al extraer todos los tornillos de sujeción de los anillos, operación usual tanto en un túnel de transporte, como en un túnel hidráulico.

Como se puede observar en la figura 14 el problema se origina al fallar el sellado del *gasket* exterior pero no así el interior, de modo que la única salida para la filtración es el tornillo.

Los caudales observados hasta ahora son mínimos, por lo cual en la mayor parte de los casos, son el origen de humedades localizadas en los tornillos (figura 15).

##### 4.2.2. Metodología del sellado

Se utilizarán diferentes metodologías en las actuaciones en estas zonas en función de la importancia de la filtración o goteo y de los resultados obtenidos en las actuaciones aplicadas sucesivamente.

Obviamente la pericia del operador intervendrá notablemente en la elección de un método u otro.

##### Sellado mediante tapón

Se utilizará este método de sellado en alojamientos de tornillos donde se detecten humedades y goteos pequeños.

Para ello se ha diseñado un tapón fabricado con silicona de alta densidad (figura 16) capaz de sellar completamente cualquier filtración. Por ser la silicona de alta densidad posee la elasticidad necesaria para poder adecuarse al alojamiento de entrada del tornillo, impidiendo así el paso del agua. La fabricación del tapón se realiza en color gris integrándolo en el entorno de cada segmento.

La colocación de este tapón se realiza por presión mediante un durmiente de madera y una maza de goma. Si fuera necesario para favorecer su inserción se impregnará en vaselina. Si por fallos geométricos el tapón no ha ajustado completamente al orificio del tornillo, se podrá aumentar su sección o diámetro mediante una cinta autovulcanizable en frío de silicona.

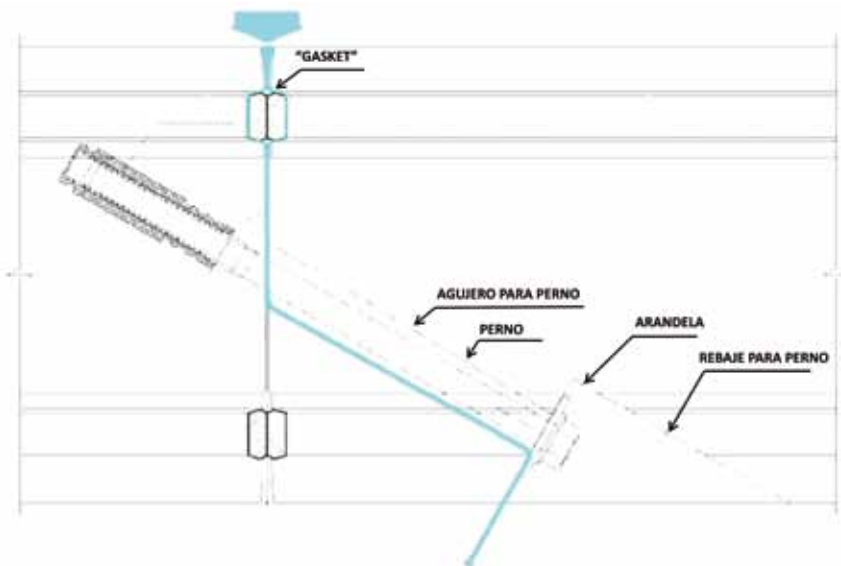


Fig. 14. Filtración a través del *gasket* exterior





Fig. 15. Filtraciones en tornillo de unión dovelas

Estos tapones se colocarán en todos y cada uno de los alojamientos que presenten filtraciones, partiendo desde el primer anillo colocado fuera del falso túnel hacia la TBM.

#### *Sellado mediante tapón+resina*

Este método de sellado se utilizará cuando se aprecien pequeños flujos continuos por el alojamiento del tornillo o cuando la aplicación anterior del tapón no haya sido suficiente.

En primer lugar, y previamente a la colocación del tapón de silicona, se obturará el alojamiento del tornillo mediante geotextil de 100 g impregnado de resina a base de poliuretano bicomponente o monocomponente y tras la introducción de la resina y el geotextil en el hueco del tornillo se cerrará el mismo con el tapón de silicona para intentar su sellado.

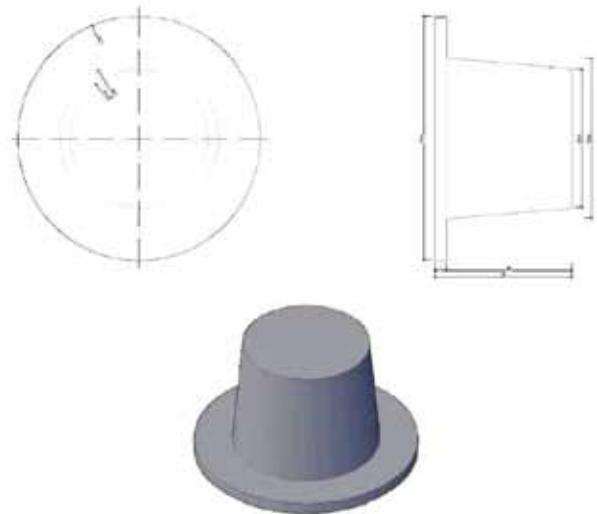


Fig. 16. Geometría tapón de sellado

#### *Sellado mediante obturador mecánico*

En caso de que las actuaciones anteriores no surtieran efecto se planteará una tercera vía, consistente en el cierre del alojamiento mediante un obturador mecánico provisto de una válvula de inyección (ver figura 17)

Una vez realizada la obturación se inyectará resina con una bomba hasta conseguir el llenado completo del alojamiento y la junta, de acuerdo con las fases señaladas en la figura 18.

Para la inyección del taladro se tendrá en cuenta lo siguiente: el volumen máximo de inyección se establece en unos 40 litros y, si se diera el caso de superar ese límite sin cerrar la filtración, se procedería a un estudio detallado del punto de afluencia.



Fig. 17. Obturador mecánico

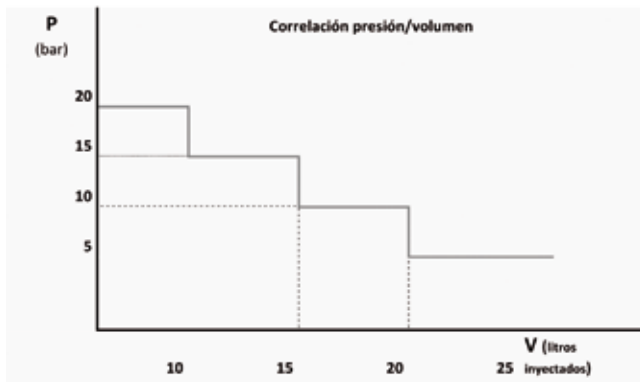


Fig. 18. Ley de inyección de resinas



Fig. 19. Casquillo de inyección

#### 4.3. Filtraciones a través del tapón de inyección

##### 4.3.1. Descripción

Estas filtraciones se producen a través del casquillo con tapón de cierre de la boca de inyección de cada dovela.

El casquillo para la reinyección del *gap* conforma un agujero ciego con un fondo de hormigón de 5 cm que es perforado en el caso de querer utilizarlo para realizar la citada reinyección (ver figura 19). Tras la perforación para efectuar la reinyección, el tapón debe de quedar completamente relleno para impedir cualquier filtración.

Las filtraciones de este estilo generalmente revelan una carga freática importante que muchas veces no se ve del todo taponada por haber quedado el *gap* con un relleno insuficiente.

##### 4.3.2. Metodología del sellado

Se llevará a cabo el sellado de estos puntos mediante un equipo móvil de inyección que no tiene por qué afectar al rendimiento del avance, incluso a la distancia máxima, porque se dispone de doble vía. La metodología a seguir, analizando para ello el equipo necesario y el material utilizado se describe a continuación.

##### Equipo de reinyección

El equipo de reinyección estará compuesto por:

- Una mesilla de 13 metros de largo para transporte de las estructuras que permitan el trabajo del personal.
- Otra segunda mesilla del mismo tamaño, provista de grupo electrógeno, compresor y plataforma elevadora.

- Una tercera mesilla similar, provista de mezclador y bombas con sus variadores y cuadros. Puede ser el equipo o banco de ensayos de Herrenknecht<sup>7</sup>.

- Una locomotora.

La composición irá provista de dos líneas de bombeo para posibilitar el trabajo simultáneo en dos puntos. El control de la inyección se realizará mediante la instalación de manómetros y caudalímetros, si no se usa el banco de ensayos.

##### Material a inyectar

Las reinyecciones que se efectúen fuera de la TBM y de su *back-up* en zonas con humedades se realizarán con bicomponente.

El motivo no es otro que el dar continuidad al material inyectado, es decir, introducir en el trasdós un material que no provoque juntas por las que pueda haber filtraciones y que confiera un alto grado de homogeneidad a todo el *gap*.

La dosificación del com. A prevista para la reinyección es: cemento 300 kg/m<sup>3</sup>, agua 825 l, retardante 1 % sobre el peso del cemento) y bentonita 40 kg/m<sup>3</sup>.

En cuanto al silicato se dosificará entre un 5 % y 6 % en función de los caudales encontrados.

El bombeo los componentes A y B se realizarán en modo no automático, es decir, las bombas irán provistas de caudalímetros de modo que se ajustará la proporción del com. B en función de los caudales aportados por la bomba que inyecta el com. A. En caso de variación de este último, se variará, según la relación anteriormente descrita, el otro componente.

### Procedimiento de trabajo

a) Definición de las zonas a reinyectar: previamente al comienzo de los trabajos se realizará un estudio consensuado con la ACO para establecer aquellas zonas que requieran de intervención, de entre las que se aprecien las humedades y goteos más significativos.

Todas las actuaciones se adecuarán a intervalos de anillos consensuados con la ACO, para poder observar a posteriori los resultados de los trabajos realizados en una determinada zona.

Las intervenciones en estos intervalos se realizarán hasta completarlas, evitando así la posible confusión al apreciar nuevas humedades en lugares diferentes a los inyectados. Las inyecciones se realizarán a través de los tapones de reinyección de las dovelas y por el punto más próximo a las fugas de agua.

A propuesta de la ACO, la zona elegida inicialmente para la puesta en marcha del procedimiento se situó entre los anillos 190 y 215.

b) Preparativos previos a la inyección: este procedimiento se llevará a cabo en todos los anillos donde se detecten humedades, con el fin de conseguir su perfecta impermeabilización. Las fases previas a la inyección serán:

- Retirada de tapones de inyección.
- Perforación del bicomponente mediante taladro con barrera continua para perforar el bicomponente existente en el *gap*, con el fin de facilitar la entrada de material.
- Colocación de bocas de inyección provistas de tajadera.

Una vez colocadas las bocas de inyección con sus tajaderas se procederá a la inyección en el orden siguiente:

- Se situarán las dos líneas de inyección en el anillo para inyectar el mismo de manera simétrica.
- El avance transversal de la inyección será desde la base a la clave mientras que el avance longitudinal en el intervalo elegido para las actuaciones será desde menos a más cota (contrapendiente).
- La inyección longitudinal avanzará una vez se haya inyectado el anillo transversalmente según la figura 20 adjunta.

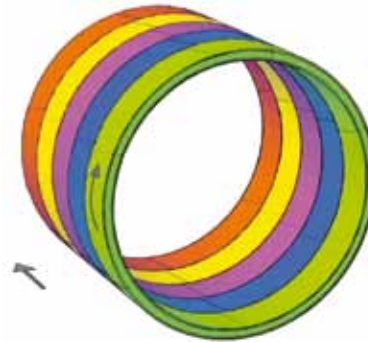


Fig. 20. Avance longitudinal y transversal de la inyección

c) Inyección 1ª fase: se comenzará la inyección regulando la cantidad de com. B inyectado en función de la cantidad de com. A y supervisando constantemente las presiones del bicomponente. La presión máxima en esta primera fase, en base a la experiencia obtenida con la reinyección dentro de la TBM, será de 4,5 bares.

Realizado lo anterior, se anotará en el parte el lugar de inyección, el caudal inyectado y la presión del bicomponente. Se realizará también una inspección ocular de los anillos anterior y posterior del intervalo para confirmar que no hay fugas ni transferencias de material de un anillo a otro.

Se repetirá este proceso sucesivamente desde la base hasta la clave, siempre comenzando longitudinalmente de menor a mayor cota, hasta terminar cada tramo o intervalo elegido.

d) Inyección 2ª fase: tras la primera inyección, y trascurrido al menos 24 horas, se procederá de nuevo a la perforación del bicomponente para facilitar la admisión de material en los mismos puntos anteriores.

Posteriormente, se reinyectará siguiendo la misma metodología anterior hasta alcanzar una presión máxima (sancionada por la experiencia) de 7 bares, anotando los datos de la inyección en segunda fase y una vez realizada la inspección ocular de la zona con resultado positivo, se dará por sellada la zona.

#### 4.4. Filtraciones a través de las juntas de dovelas

##### 4.4.1. Descripción

Esta filtración se produce por un fallo conjunto de los *gaskets* de sellado tanto el exterior como el interior de la junta de las dovelas.

Las dovelas afectadas por este hecho a lo largo del túnel son muy pocas, no obstante lo cual se describirá el procedimiento a seguir.

Se aplicará esta metodología una vez se hayan finalizado todas las intervenciones descritas anteriormente y sólo en el caso de que sigan existiendo zonas de aportación de agua al túnel a través de juntas de dovelas.

En general en los casos existentes las filtraciones no tienen un caudal apreciable por lo que se supone suficiente la metodología que sigue en la que se emplea solo resinas.

Si en el futuro se presentaran caudales significativos, lo que sucede es que el defecto de los *gaskets* ha producido el lavado de parte del relleno del *gap* por lo que es recomendable aplicar primero la metodología citada para reducir dichos caudales en lo posible, añadiendo seguidamente la reinyección con componente a través del tapón como se expone en el punto 4.3 anterior.

Una vez terminada la reinyección, se deberá aplicar de nuevo la metodología que se indica en 4.4.2 para terminar el sellado.

#### 4.4.2. Metodología del sellado

La metodología de sellado de estas filtraciones se llevará a cabo mediante la inyección de resinas a través de obturadores mecánicos.

Tal y como muestra la figura adjunta, se realizará un taladro de diámetro aproximado de 17 mm. Dicho taladro se cerrará mediante un obturador de 17 mm a través del cual se inyectará resina con base de poliuretano hasta sellar completamente el espacio existente entre las dos juntas de dovela (figura 21).

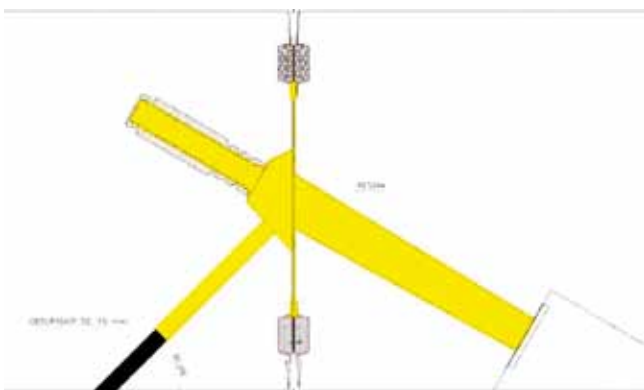


Fig. 21. Inyección en junta de dovela

Con la inyección de resina se conseguirá no sólo rellenar el espacio entre las juntas, sino también el alojamiento del tornillo de dovelas, por lo cual para realizar la inyección se deberá colocar antes el tapón de silicona en la boca del tornillo, con lo que se evitará la pérdida de presión en la inyección.

La ley de presiones y caudales será la misma descrita anteriormente para la inyección del alojamiento del tornillo.

#### 4.5. Conclusiones

Tras la aplicación de cada una de las metodologías anteriormente expuestas se procederá a realizar un seguimiento de la zona o intervalo en la que se ha actuado, teniendo cuenta que cada actuación que se realiza sobre una determinada zona puede llevar aparejados cambios en la ubicación de las filtraciones.

Por ello es probable que en un mismo intervalo se pueda llegar a tener que aplicar cualesquiera de las varias metodologías de sellado de filtraciones expuestas, debido a las diversas respuestas que pueden producirse ante las actuaciones realizadas.

### 5. Procedimientos aplicados en los anillos de emboquille y en los excavados a media sección (tramo mixto)

En la figura 22 siguiente se representa el tramo de los 36 primeros anillos colocados con el escudo, con los que se completará el falso túnel de la boquilla, más el de los 14 anillos del llamado tramo mixto (emboquille y avance en fases).

#### 5.1. Anillos de emboquille (14 m de túnel)

Durante esta fase, en los anillos situados fuera del escudo y que están dentro del túnel se inyectó bicomponente en los 120° inferiores aproximadamente. Esta inyección se realizó por las dos líneas más bajas asegurando el apoyo en la salida del escudo y evitando el asentamiento del anillo. Para conseguir el correcto llenado, se realizó un tape en la boca del túnel por la parte baja del anillo.

La inyección de estos anillos (que corresponden a las posiciones 37 y 38) se llevó a cabo simultáneamente con el avance de la TBM y en modo semiautomático.

Paralelamente, se estabilizó el anillo contra la gunita por la cara interior con redondos y placas ancladas a las dovelas inferiores y se cosió con la perfilera del mismo modo que los colocados en el falso túnel.

**5.2. Anillos excavados a media sección (anillos n° 41 a 45)**

Durante la excavación de estos anillos, se procedió al apuntalamiento y cosido como en la fase anterior.

La inyección de mortero se realizó como en la fase anterior por las líneas inferiores hasta rellenar los 120° aproximadamente. Como el hueco generado durante la excavación a sección completa es mayor que el tape de los flejes exteriores, no se utilizaron las líneas superiores ya que se corría el riesgo de que el mortero se desplazase hasta la cabeza. También puede ocurrir que salga por la boca del túnel.

Una vez excavado el anillo 47, todo el escudo estaba ya dentro del túnel a media sección. En este momento y con la TBM parada, se procedió a inyectar por las seis líneas el bicomponente. El porcentaje de dosificación del silicato fue el mismo que el que se utilizó en producción normal (buscando un tiempo de gel en torno a los 15 segundos). Se observó desde el interior del túnel la evolución del relleno del mortero abriendo los distintos tapones de las dovelas. Se tomaron datos de volúmenes, caudales y presiones para poder analizar estos parámetros con la evolución de la pendiente y relleno del mortero a escape libre.

Una vez que a través de las líneas del escudo no se pudo inyectar más mortero, se procedió a ejecutar el tape circunferencial en la boca del túnel para el posterior relleno desde la calle con hormigón o mortero convencional.

Antes de iniciar la excavación se aplicó el procedimiento de reinyección en uno de los anillos para comprobar la cantidad de mortero y las presiones de entrada de la lechada, anillo elegido en la zona teóricamente rellena por la inyección principal.

**Excavación dentro del túnel a media sección**

Una vez relleno completamente el trasdós de los primeros 14 metros de túnel, se procedió a iniciar la excavación hasta llegar al final del túnel convencional.

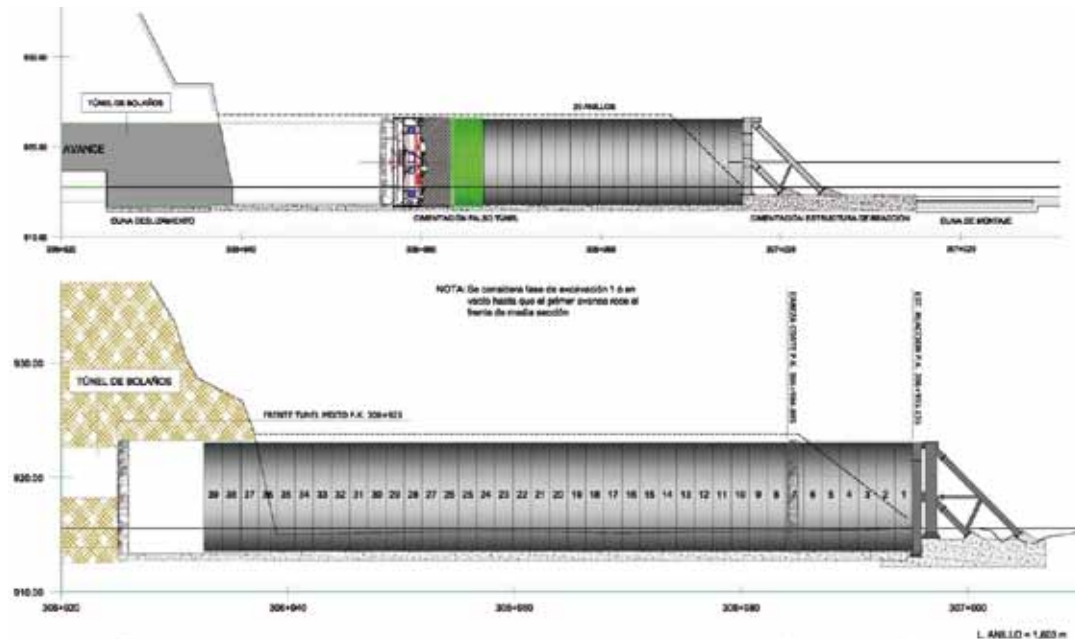
En esta fase, la inyección del bicomponente se realizó de manera normal a como se haría a lo largo del túnel.

Se abrieron los tapones de clave y hombros en todos los anillos para observar la evolución de la inyección.

**5.2.1. Control del llenado con micro cámara**

Como comprobación adicional del llenado del gap durante la excavación de uno de los anillos a media sección, se aprovechó el orificio de inyección de la dovela situada en clave más próxima al escudo de cola para insertar una microcámara con el objeto de intentar registrar el ascenso del mortero a través del hueco del trasdós (figura 23).

La inyección se realizó a través de las cuatro salidas de mortero inferiores de forma simultánea hasta cortar por presión



**Fig. 22. Montaje del escudo, colocación de anillos del futuro falso túnel y anillos del tramo mixto de Bolaños**

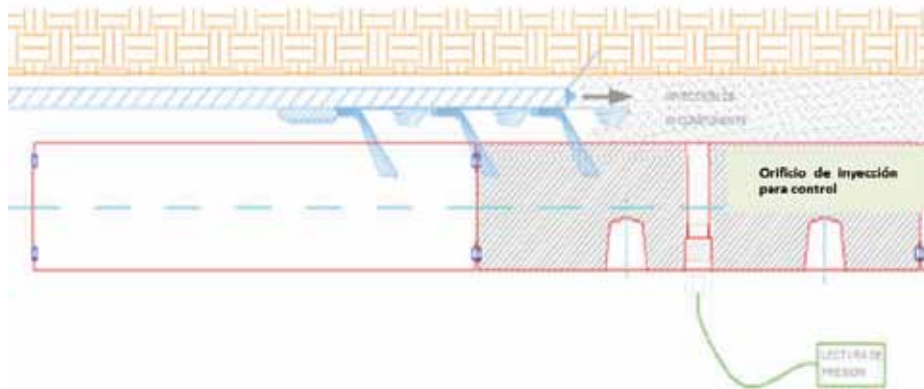


Fig. 23. Control de llenado con microcámara

o que el mortero alcanzase la microcámara del orificio de inyección de la dovela en clave, lo que indicaría que está lleno el anillo. A continuación, este orificio se tapó con su tapón correspondiente de inyección, y se continuó la inyección por las seis líneas hasta el corte por presión. De esta manera, se puede cubicar aproximadamente el volumen de un avance respecto del teórico.

### 5.2.2. Comprobación del procedimiento de reinyección

En esta fase durante dos anillos de cada ocho se aplicará el procedimiento de reinyección para comprobar la cantidad de mortero y a qué presiones entra la lechada (en el caso de que entre) en una zona teóricamente rellena en la inyección principal. Este dato arrojará los parámetros de corte (presiones y volúmenes) en las futuras reinyecciones a lo largo del túnel.

### 5.2.3. Comprobación con testigos

Como comprobación adicional al relleno en ésta fase, se procederá a realizar una campaña de testigos a través de los huecos de inyección de las dovelas. Estos testigos se extraerán en clave y hombros (cada seis anillos) y se harán pasados unos días para asegurar el correcto fraguado y, por consiguiente, la recuperación completa del testigo. Posteriormente, se procederá a sellar el hueco generado por la extracción del anillo.

## 6. Resumen de la producción

Para terminar, se incluyen los datos relativos a la producción desde origen hasta el 31 de mayo de 2014 de la obra del túnel de vía derecha.

### 6.1. Gráfico a origen de la obra de los avances mensuales

Como puede observarse en la figura 24, el avance del túnel ha alcanzado valores del orden de los 1.000 m/mes con una calidad del revestimiento que puede calificarse de óptima. La

evolución de la media del avance en los 30 días precedentes se puede ver en la figura 25 siguiente.

### 6.2. Reparto del tiempo útil a origen de la obra

Igualmente, el porcentaje dedicado a la excavación y sostenimiento respecto del tiempo útil total disponible supera ampliamente el 50 % como sucede en las obras más calificadas llevadas a cabo en diversos países en los últimos años. **ROP**

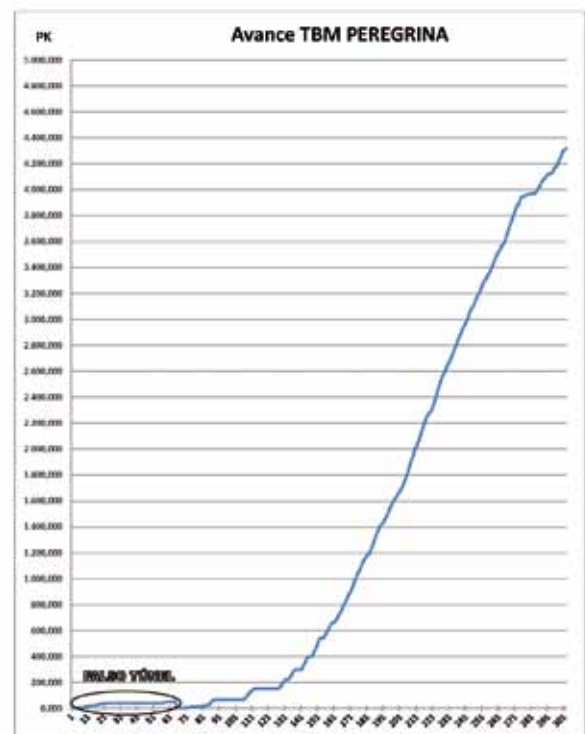


Fig. 24. Evolución de los avances mensuales a 30.06.2014

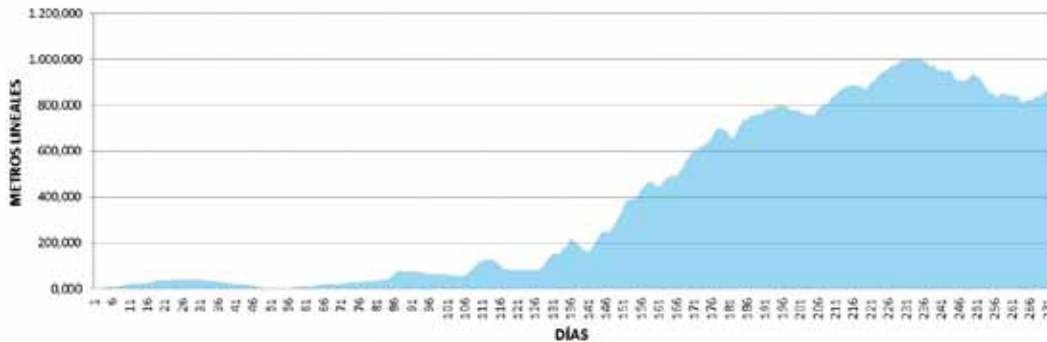


Fig. 25. Variación de la media en los 30 días precedentes

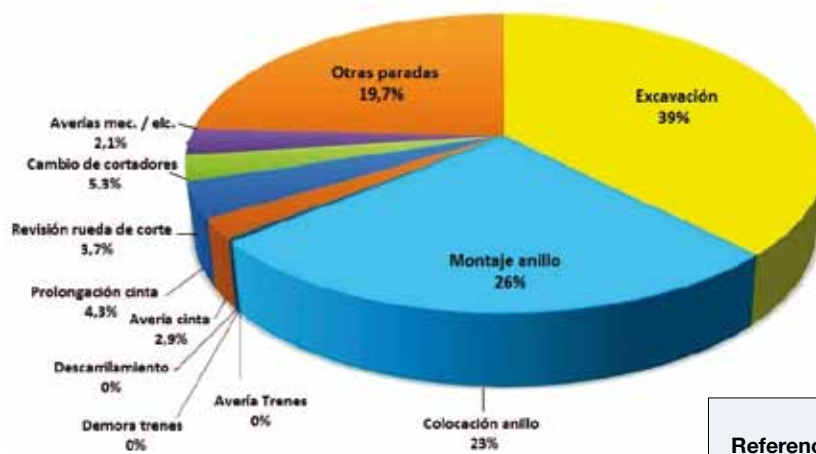


Fig. 26. Reparto del tiempo útil a origen de excavación del túnel

**Notas**

- (1) En todo lo que sigue se designarán los dos componentes con las abreviaturas com. A y com. B.
- (2) Se han ensayado también, con resultados muy satisfactorios, la THIXO BENTONITE 10 (VP) de SIKA y las BENTOAR 500 y BENTOAR GT de BASF.
- (3) Hasta ahora, la D. Obra ha autorizado rebajar la dosis de silicato sódico a un 5 % del peso de los aglomerantes en zonas con aportación de agua del terreno, con el fin de reducir el tiempo de gelificación del bicomponente y evitar su posible lavado.
- (4) Son cifras medias aproximadas que pueden variar sensiblemente.
- (5) Durante la excavación del túnel a media sección, se ajustarán estas presiones en función de la situación real.
- (6) Para el caso de los anillos excavados a media sección, los parámetros obtenidos servirán para ajustar los teóricos.
- (7) Fue el equipo utilizado para los ensayos previos y su capacidad se estima en unos 3,5 m<sup>3</sup>/h, cifra suficiente para las necesidades usuales de estas actuaciones.

**Referencias**

- ADIF (Varios autores). Jornada Técnica sobre Túneles de la L.A.V. Galicia "Túneles De Vilariño-Campobecerros". A Coruña, noviembre 2013.
- Kucher, Matias. "Test for study the distribution of the component a within the 2 componente A+B layers". Edit. Herrenknecht AG. Schwanau (Alemania) 2010.
- Kucher, Matias. "Training system & service seminar: bicomponent back filling". (Curso en Londres). Edt. Herrenknecht AG. Schwanau (Alemania). Abril 2011.
- Lovat Inc. "Grouting method for soft ground. A/B grouting mix design". Edit. Lovat Inc. Toronto (Canada) 2005.
- Mendaña F. et alt. "Relleno con bicomponente del gap de los anillos de dovelas en los escudos no presurizados". Revista de Obras Públicas. Madrid nº 3546 (Septiembre 2013).
- Reschke A, Noppenberger C. "Brisbane Airport link earth pressure balance machine. Two componenet tailsking grouting a new australian record". 14th Australian Tunnelling Conference. 2011.
- Vitale, M.G. et alt "Innovation in annular grouting at the euclid creek tunnel". Congreso RETC. Cleveland (Ohio) USA. Junio 2013.