

Relleno con bicomponente del *gap* de los anillos de dovelas en los escudos no presurizados



Felipe Mendaña Saavedra

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



Carlos Pindado Carrión

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Ingénieur des Ponts et Chaussées

Resumen

Los anillos prefabricados utilizados en los escudos presentan serios problemas derivados de los morteros usados para el relleno del hueco entre anillo y terreno.

Los nuevos materiales conocidos como 'bicomponentes A+B' son los que se han impuesto para sustituir al mortero. El componente A es una suspensión coloidal de una mezcla de conglomerantes hidráulicos y el B es un acelerante, generalmente silicato sódico.

En los escudos presurizados el bicomponente se viene aplicando con éxito a través de la cola del escudo, mientras que en los escudos abiertos la aplicación se ha hecho hasta ahora a través de las propias dovelas con problemas de conformación del anillo y de permeabilidad del relleno.

Para evitar estos inconvenientes, se está desarrollando la modificación de los escudos simples que construirán el túnel bitubo de Bolaños en la línea de AVE Madrid-Noroeste de España, para aplicar el relleno bicomponente también por la cola de la máquina. El artículo expone los ensayos previos con que se definieron las características, dosis y procesos de empleo del nuevo producto, así como las adaptaciones del diseño del escudo.

Palabras clave

Bentonita, suspensión coloidal, retardante, acelerante, silicato sódico, mezcladora coloidal, viscosidad/fluidez, exudación/estabilidad, gel, tiempo de gelificación, línea de inyección, salidas de inyección, embudo Marsh

Abstract

The precast rings used on the shields show serious problems due to the mortar used as backfilling of the void between the ring and the terrain.

The new materials known as "Bicomponents A+ B" have been the ones that offer the best results. Component A is a colloidal suspension cement based, with other hydraulic conglomerates, and Component B is an accelerator, usually sodium silicate.

On the pressurized shields, the bicomponent is applied without problems through the tail shield. In the case of open shields the bicomponent is being applied up to now through the segments with many problems due to the conformation of the ring and the permeability of the backfilling.

To avoid these inconveniences the shields that will build the Bolaños twin tunnels, on the AVE Line from Madrid to the Northwest of Spain, are being modified to apply the bicomponent also through the tail shield. The article shows the tests made for the definition of the characteristics, doses and appliance process, as well as the mechanical adaptation of the machines.

Keywords

Bentonite, colloidal suspension, stabilizer, accelerator, sodium silicate, colloidal mixer, viscosity/flowability, bleed/stability, gel, gel time, injection line, Marsh funnel

1. Introducción

Los primeros intentos de utilizar materiales diferentes de los morteros de cemento *portland* para rellenar el hueco existente entre el trasdós de los anillos de dovelas y el terreno excavado por los escudos (el *gap* del avance con

escudo), tuvieron lugar en Japón, en la década de los años 1980-90, sin llegar a resultados satisfactorios.

Puede decirse que, desde un principio, tales intentos se orientaron básicamente a ensayar mezclas viscosas de

agua y aglomerantes hidráulicos de fraguado lento bombeables (generalmente, cementos compuestos con puzolanas o arcillas bentoníticas) que, según iban rellenando el *gap*, se provocaba su fraguado al inyectarles un aditivo que transforma la mezcla en un sólido blando (un gel) que endurece rápidamente alcanzando características resistentes superiores, o al menos similares, a las de los terrenos blandos presentes en el trazado del túnel.

Las dificultades encontradas hicieron retrasar la reanudación de los ensayos hasta conseguir, en los años iniciales del presente siglo, los primeros resultados favorables al logro de la esperada nueva tecnología, si bien a través de versiones diferentes de las actualmente existentes, cuyo comienzo debe situarse en el entorno de los años 2005 a 2007. Ello no quita que, para algunos países, la actual nueva tecnología siga siendo una desconocida.

Y al decir “actual tecnología” nos referimos a que el nuevo producto de relleno del *gap* del revestimiento de los anillos de dovelas prefabricadas de hormigón armado de un túnel, producto que suele llamarse relleno bicomponente, es el obtenido al mezclar los dos componentes siguientes:

– El “Componente A” (en lo que sigue “Com. A”), una suspensión coloidal, lograda a partir de una lechada de agua, cemento portland, bentonita y aditivos de tipo retardador y estabilizador.

– El “Componente B” (en lo que sigue “Com. B”) es un acelerador de fraguado, usualmente silicato sódico.

Hasta comprobar que el “Com. A”, cuyo volumen supera el 90 % del total del bicomponente, tenía que ser una verdadera suspensión coloidal, no se consiguió que sus características físicas pudieran mantenerse prácticamente constantes, para poder ser bombeable durante un plazo prolongado de varios turnos de trabajo, pese a su relativamente alta viscosidad. Y ello supuso desarrollar el diseño y fabricación de los medios auxiliares adecuados para lograr dicha estabilidad, lo que equivale a decir que el componente fuese una suspensión coloidal.

Como suspensión coloidal que es, el “Com. A”, al recibir la inyección de “Com. B” se transforma en un “gel” y con tanta mayor efectividad –y también rapidez– cuanto más turbulento es el régimen en el que se hace la mezcla, para

conseguir lo cual, en la técnica actual, el “Com. B” se inyecta a alta presión (≥ 6 bar).

En cuanto a la elección de los productos y medios de fabricación del “Com. A” es muy importante procurar la mayor finura de molido del cemento, así como la mayor calidad y uniformidad de la bentonita. En todo caso, solo utilizando mezcladoras de alta resistencia, en vez de las convencionales de paletas, es posible reducir el tamaño de los granos de cemento, aproximándolo al de las arcillas, para lograr el carácter coloidal de la mezcla. Por último, es necesario también que el grado de hidratación de la bentonita alcance un nivel mínimo, lo que con frecuencia requiere una instalación adicional.

Estas son las condiciones básicas para lograr la suspensión coloidal deseada y, en definitiva, para obtener el sólido blando o “gel” con el que hacer el relleno.

Por último, en cuanto a los métodos o sistemas ensayados, la tecnología del relleno del *gap* con bicomponente en los escudos se inició con la aplicación de los componentes a través de los orificios de las dovelas.

Ya se comprende que los incidentes debidos a los atascos en las tuberías generales y, sobre todo, en las líneas de inyección, recomendaban la cautela de hacer la mezcla de los dos componentes en un punto próximo al recinto a rellenar.

Pues bien, las realizaciones de este tipo siguen utilizándose en muchos casos y, sobre todo, se han mantenido en las aplicaciones a los escudos no presurizados, en los que sigue predominando el empleo de morteros, por las dificultades que presenta la falta de un espacio confinado para el relleno.

En los escudos de frente en presión, por el contrario, ese confinamiento existe, por ser condición del propio sistema de ciclos de “avance/colocación y relleno del *gap* de cada anillo”. Ello ha permitido utilizar la inyección del bicomponente por la cola de la máquina, del mismo modo que se hace con los morteros convencionales. Es por eso que, a partir del año 2010, hay una proporción creciente de escudos presurizados que se diseñan para el relleno del *gap* con bicomponente.

Pues bien, la aplicación de la inyección por cola a los escudos abiertos o no presurizados está siendo llevada a cabo en un par de proyectos actualmente en fase de

construcción, uno de ellos en España, en el que estamos interviniendo y al que se refiere este artículo.

2. Ventajas de la aplicación del bicomponente en los escudos

El relleno del *gap* de los anillos con bicomponente, comparado con el realizado con morteros convencionales, presenta las ventajas generales siguientes:

- 1) La inyección de mortero requiere utilizar bombas de hormigonado de alta presión, lo que puede tener un efecto negativo sobre el terreno.
- 2) La fluidez y estabilidad del "Com. A" permite su bombeo a grandes distancias (2 a 3 km), lo que hace posible su almacenamiento en depósitos montados en el exterior o dentro del túnel, con capacidad para el consumo diario, desde los cuales se alimenta el tanque montado en el *backup* del escudo, cuya capacidad suele permitir el relleno de hasta dos anillos.

A lo anterior se añade que el tipo de inyección o bombeo suave, con bombas de helicoide (o tornillo), evita por completo los atascos de las tuberías generales del escudo o de las líneas de inyección, con todo lo cual, la nueva tecnología asegura que no se produzcan paradas no programadas, que aumentan el coste, tanto por afectar al rendimiento del

avance, como por las pérdidas del material de relleno que debe tratarse como desecho.

A estas ventajas generales deben añadirse, en el caso de los escudos no presurizados, las siguientes:

- 3) Las bombas de hormigonado de alta presión, que requieren los rellenos con morteros convencionales, suelen tener efectos negativos sobre la colocación de los anillos, al provocar desplazamientos de sus dovelas (bien entre las del anillo, bien respecto de las del anillo precedente), dando lugar a la formación de "cejas" (*sets-off*) o, incluso a la aparición de fisuras de flexotracción.

Por el contrario, el relleno con bicomponente afecta mínimamente al terreno y al anillo por dos razones: a) la inyección se hace de forma suave y a baja presión (1 bar como referente, con límite superior < 2 bar), y b) su baja viscosidad que facilita la entrada y relleno del *gap* de manera mucho más efectiva.

- 4) El inicio del fraguado del mortero convencional es excesivamente lento, pudiendo afectar al ritmo de avance. La aplicación de acelerantes, para evitarlo, complica mucho el proceso si no se dispone de operadores muy cualificados y con experiencia suficiente¹ y, aun así, no puede ser totalmente completo (ver figura 1).

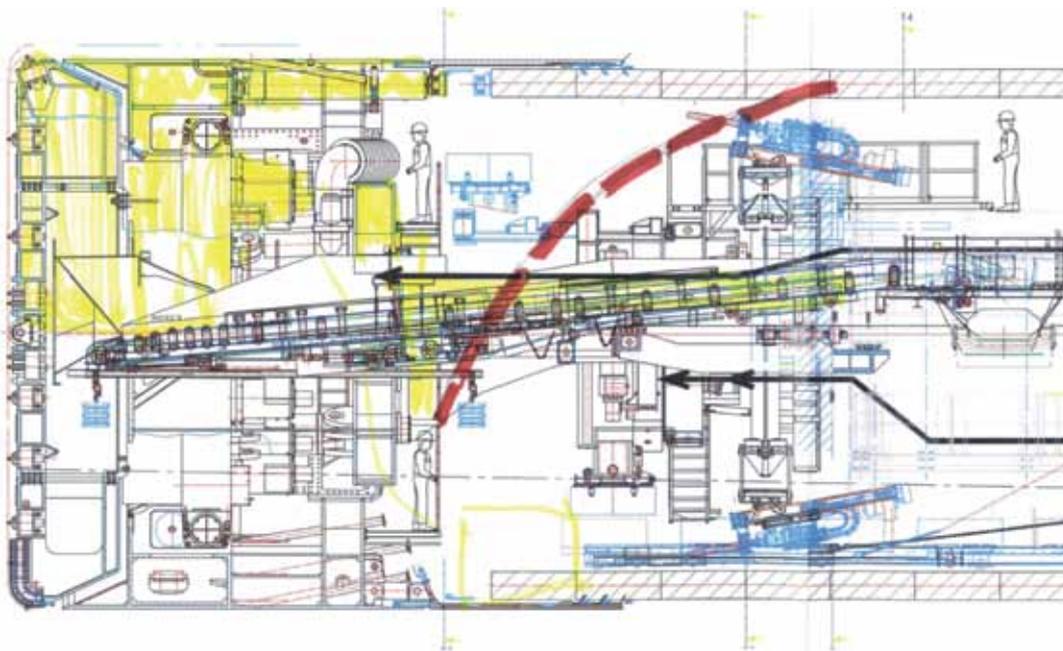


Fig. 1. Situación óptima del relleno del *gap* con mortero en escudos no presurizados

A lo anterior hay que añadir el riesgo de dejar huecos sin rellenar, causa de descolocación de las dovelas, que recibirán cargas excéntricas al excavar el módulo del anillo siguiente, con aumento del efecto *bursting* hasta niveles superiores a los de diseño, lo que puede originar una fisuración importante.

En cambio, la “gelificación” casi inmediata del bicomponente, junto con su rápido aumento de la resistencia², permiten fijar adecuadamente el anillo y, a la vez, favorecen la estabilidad de terreno excavado.

5) Por último, el bicomponente tiene mucho menor permeabilidad que el mortero fresco, por lo que es más resistente al lavado, habiéndose demostrado su efectividad en cuanto al sellado del relleno del *gap* frente a aportaciones freáticas.

3. Los proyectos de los túneles de Bolaños

Los proyectos de los túneles gemelos de Bolaños, situados en la provincia de Orense (Galicia), actualmente en construcción, se inscriben en el tramo Vilariño-Campobeceros (eje Lubián-Orense), de la línea del nuevo acceso ferroviario de Alta Velocidad al norte y noroeste de España.

Los túneles, de un diámetro interior de 8,75 m, con una separación entre ejes de unos 30 m y longitud total de unos 6.723 m cada uno, se están excavando desde el presente verano con tuneladoras del tipo “escudo simple”, con ruedas de corte de unos 9,90 m, y se revestirán con anillos de dovelas prefabricadas de hormigón armado de 1,60 m de largo y 0,37 m de espesor, con doble junta de estanqueidad (*double gasket*), de anchura normal la más próxima al terreno y anchura menor la próxima al intradós. Además de una garantía adicional de impermeabilidad, se evita también el riesgo de contacto directo entre hormigones.

La elección de dicho tipo de máquinas se justificó en los proyectos, atendiendo a las características de los terrenos del macizo a atravesar, que se distribuyen, aproximadamente, en unos 2.855 m (un 42,5 % de la longitud total) en areniscas y cuarcitas duras y abrasivas, con recubrimiento máximo de 205 m y unos 3.870 m (un 57,5 % de la longitud total) en pizarras, con un recubrimiento máximo de 200 m.

Las experiencias anteriores en los túneles con tuneladora de la red nacional de Alta Velocidad sobre el control de las aguas procedentes de los macizos, cuya afluencia es consecuencia del efecto drenante de los túneles, no fueron

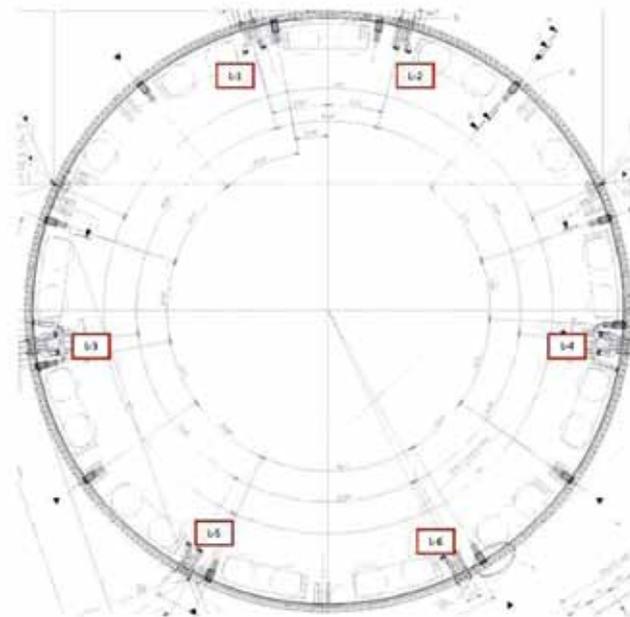


Figura 2. Distribución de los puntos de inyección

todo lo satisfactorias que se esperaba. La causa principal se atribuyó, principalmente, a la permeabilidad de los rellenos del *gap* anillo/terreno, construidos con morteros convencionales, ya comentada entre otros inconvenientes de los mencionados morteros.

Por otra parte, la aplicación de los rellenos con bicomponente por inyección por cola en escudos presurizados (principalmente de tipo EPB) ha resuelto de forma satisfactoria dicho inconveniente en un número significativo de túneles construidos desde 2005. Ello unido a las otras ventajas, ya comentadas, que ofrece el relleno con bicomponente respecto de los morteros convencionales, fueron el motivo por el que la dirección de obra de los túneles de Bolaños se mostró interesada en que se estudiase la posibilidad de la aplicación de la nueva tecnología, con relleno por cola, a un escudo simple.

Se eligió para el estudio un escudo Herrenknecht, que había trabajado ya en los túneles de Pajares en formaciones similares y con recubrimientos bastante mayores (próximos a los 1.000 m) contando, a la vez, con la colaboración de dicho fabricante, de amplia experiencia en la nueva tecnología en escudos EPB.



Fig. 3. Escudo de cola preparado para colocar las líneas de inyección

Respecto de la experiencia del fabricante, debe decirse, por una parte, que estaba iniciando un desarrollo similar para un escudo simple de unos 8 m de diámetro, que construirá un túnel de unos 53 km en los Estados Unidos, en la localidad de Cleveland (Ohio), obra con el que mantenemos un intercambio de información.

Y, respecto de la experiencia de fabricante y constructores, se ha de añadir que dos escudos Herrenknecht tipo EPB, de

unos 10 m de diámetro fueron utilizados por las empresas Acciona Infraestructuras y FCC Construcción, pertenecientes a sendas UTE adjudicatarias de este túnel de Bolaños, en las respectivas obras, recientemente terminadas, del acceso al aeropuerto de Brisbane (Australia) y del Metro de Panamá.

4. Adaptación del escudo abierto

Los estudios del fabricante en relación con la adaptación de los escudos fueron discutidos ampliamente con la dirección de obra, llegándose a la siguiente solución.

4.1. Líneas para la salida de la inyección

El esquema aprobado que se representa en la figura 2 reproduce la sección del escudo de cola con que se dotará la máquina, con 6 salidas o puntos de inyección. En la figura 3 puede verse el escudo de cola de la máquina tal como se presentó en taller para la adaptación de las tuberías de inyección, en forma similar a las anteriormente empleadas para el mortero, también dobles (una de reserva) para cada salida.

Por otra parte, para estas líneas de inyección del “Com. A” y “Com. B” situadas en el interior del escudo de cola, se adoptó la disposición y salida de la figura 4.

La pieza que figura en el esquema protegiendo el punto de unión de los dos componentes es fácilmente retirable para

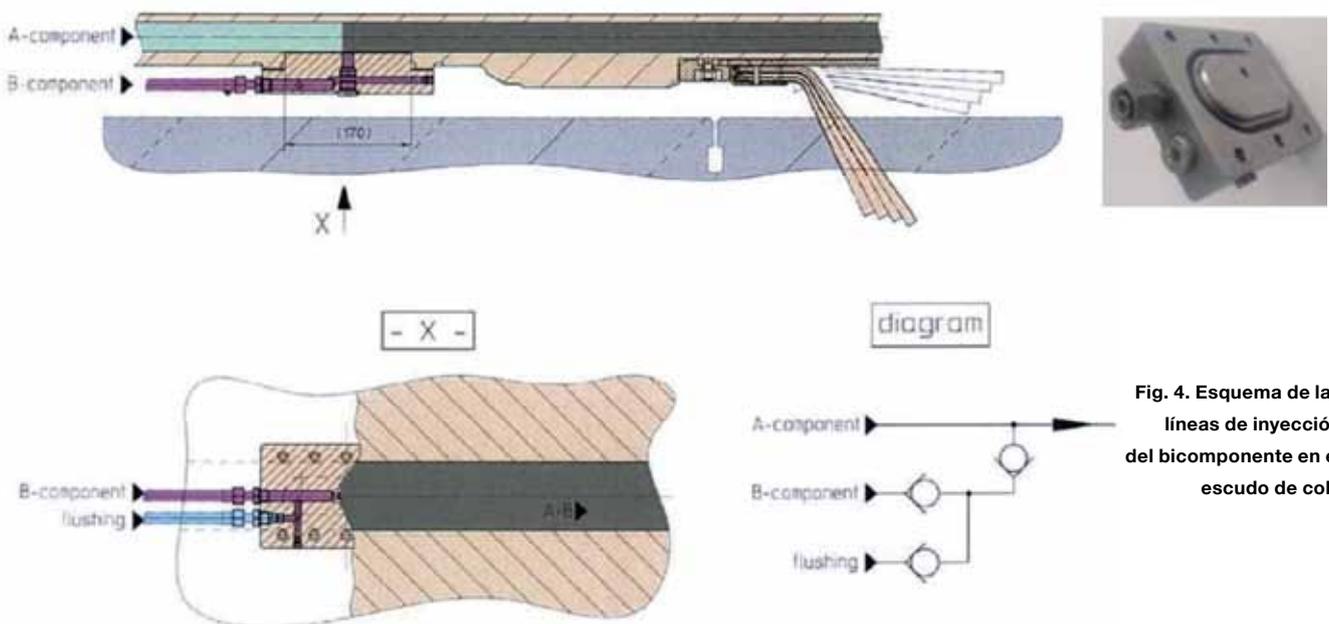


Fig. 4. Esquema de las líneas de inyección del bicomponente en el escudo de cola

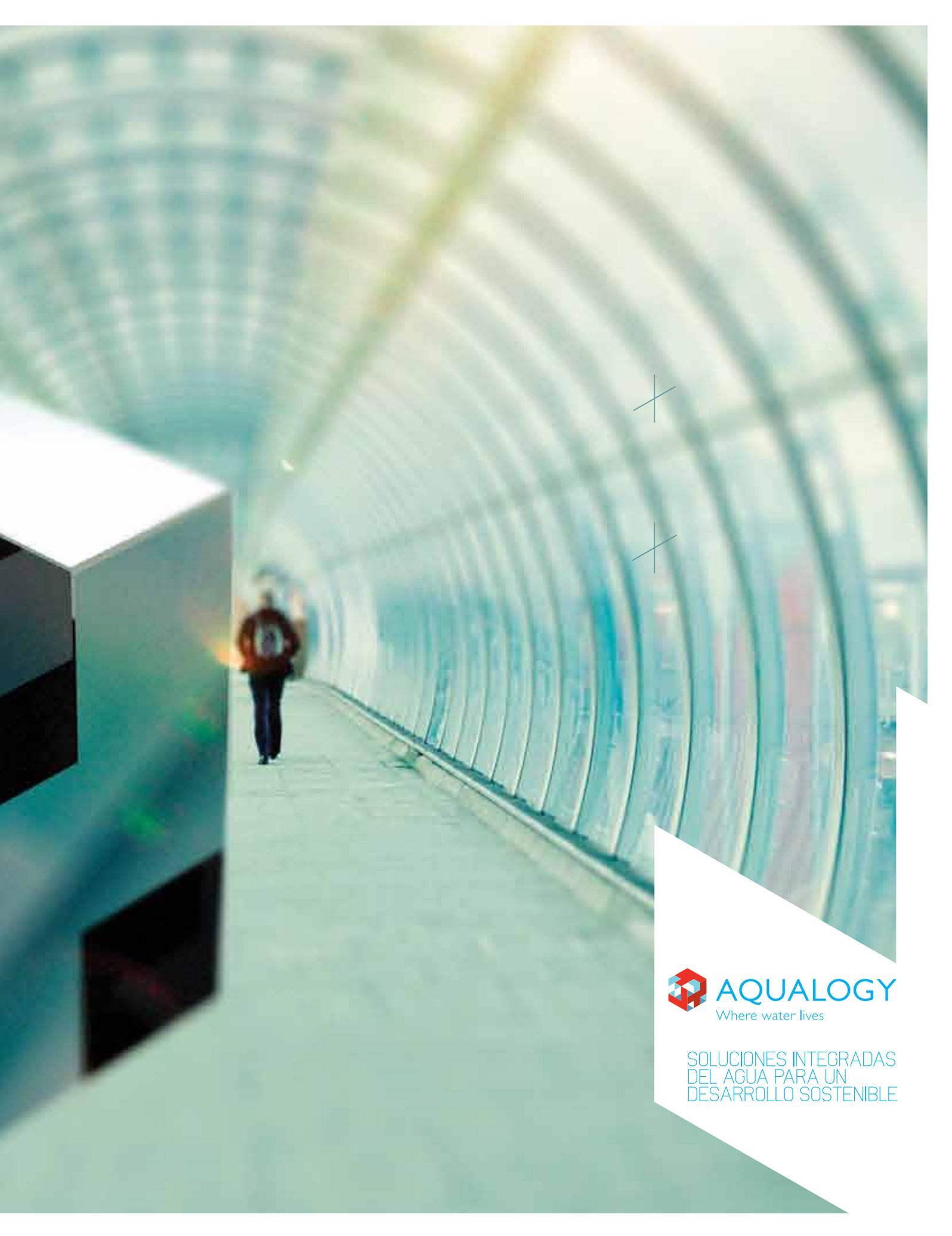
desarrollo sostenible



Más que agua

Talento, conocimiento y compromiso.
Aportamos respuestas adecuadas
para una gestión más eficiente.
Compartimos conocimiento
y generamos innovación.
Trabajamos por un futuro basado
en el compromiso y la cooperación.

www.aqualogy.net



 **AQUALOGY**
Where water lives

SOLUCIONES INTEGRADAS
DEL AGUA PARA UN
DESARROLLO SOSTENIBLE

ESCUDOS Datos	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia total: 6.150 kW (14 mot. Elect. x 350kW/u) - Max. veloc. rotac.: 3,60 rpm - Max. par de giro nominal: 19.960 kNm (64 cortadores de disco) - Max. empuje: 17.088 kN (24=11x2+2 cilindros. Carrera: 1,8 m)
Dimensiones de los escudos	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro rueda de corte: 9,90 m - Diámetro escudo delantero: 9,84 m (6,38 m largo) - Diámetro escudo de cola: 9,82 m (3,41 largo) - Superficie del <i>gap</i>: 8,37 m²
Anillo prefabricado de H. armado	<ul style="list-style-type: none"> - 6 dovelas + 1 llave - 1,60 m de anchura media (sentido: eje del túnel) - 9,49 m de diámetro exterior - 8,75 m de diámetro interior
Relleno del hueco	<ul style="list-style-type: none"> - 11,63 m³ volumen del <i>gap</i> anular - 50 mm/min máximo avance medio (32 min/anillo) - 26,2 m³/h capacidad de inyección necesaria (Cs=1,2) - 23,6 m³/h de "Com. A" - 2,6 m³/h de "Com. B"
Inyección de "Com. A"	<ul style="list-style-type: none"> - Tanque de agitación de 10 m³ - 6 bombas helicoidales (7,5 kW/u) - 6,9 m³/h de capacidad/u
Inyección de "Com. B"	<ul style="list-style-type: none"> - Tanque de 15 m³ - 6 bombas helicoidales (1,5 kW/u) - 0,8 m³/h de capacidad/u
Tuberías	<ul style="list-style-type: none"> - 6 salidas (2 en reserva)

Cuadro 1. Características más importantes de los escudos

poder sustituir, si es preciso, una de las líneas de inyección o, simplemente, para limpiar dichas líneas. Por el buen resultado de experiencias del fabricante, se mantendrá, en cada uno de los 6 puntos de inyección, la distancia de 1,45 m entre el punto de inyección y el final de la cola del escudo.

Para lograr el necesario confinamiento del *gap* a rellenar con bicomponente, en el diseño propuesto por el fabricante se adoptan en principio las "juntas de grasa" típicas de los EPB, con 2 filas de cepillos metálicos y, se añade un obturador desplazable, que fue probado ya anteriormente para los morteros convencionales con los que sufría excesivo desgaste debido a su agresividad.

4.2. Resumen de características del escudo

Por último, en el cuadro 1 se han resumido las características principales que tendrán los escudos terminada la adaptación en curso.

5. Medios de fabricación, transporte y aplicación del bicomponente

5.1. Ensilado de los productos

5.1.1. Ensilado del cemento

El cemento se almacenará en obra en silos, con una capacidad total unas 500 t que puede ser el consumo de 1,5 semanas, con el fin de tener un 75 % del total en producción (máximo del orden de las 50 t/día). Y el otro 25 % para recibir el material de fábrica y hacer los controles de calidad y temperatura necesarios.

5.1.2. Hidratación de la bentonita

Dependiendo de las condiciones de suministro de este producto, está prevista la instalación de una planta de hidratación, por si fuese necesario, con una capacidad de ensilado del orden de las 75 t, es decir, un 15 % de la del cemento.

5.2. Planta de dosificación del "Com. A"

Para la dosificación del "Com. A" la obra dispondrá de una planta de dosificación por peso de todos y cada uno de los materiales y productos que lo constituyen, es decir: agua/cemento *portland* ordinario/bentonita y un aditivo dispersante y estabilizador.

Históricamente, algunos de los intentos para desarrollar esta técnica añadieron también como componentes de la mezcla una parte de áridos finos, en concreto, arenas de tamaño

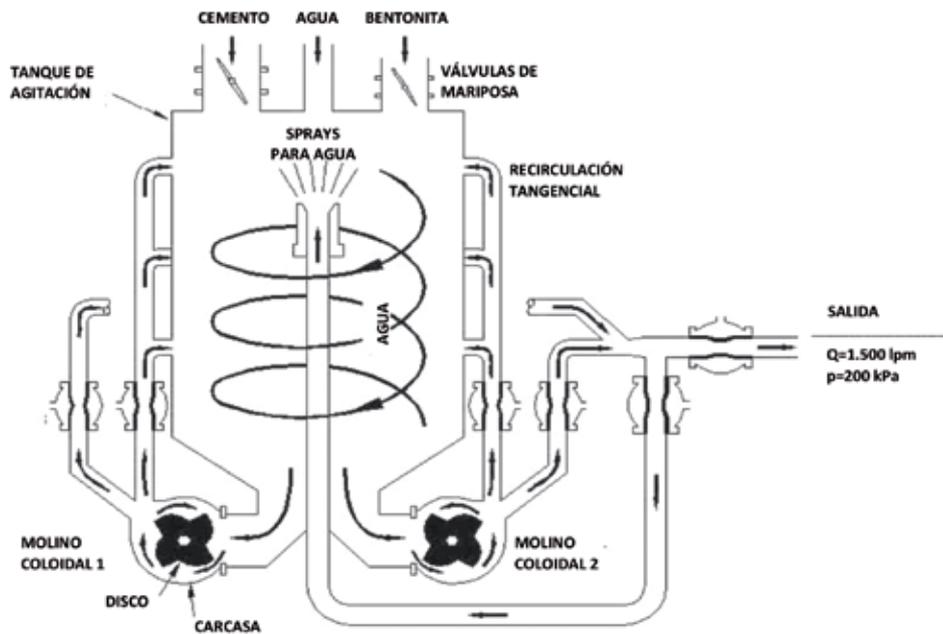


Fig. 5. Esquema de una mezcladora coloidal de alto poder de cizallamiento

máximo 1,2 mm, para reducir el coste de los materiales. No se llegó a resultados prácticos positivos y, por ello, ya a partir de los años 2004 a 2007, en todas las obras con escudos presurizados, en las que se aplicó lo que podemos llamar tecnología de última generación, se ha prescindido totalmente de intentar el empleo de áridos finos, al comprobar la necesidad de que el “Com. A” ha de ser una solución coloidal.

5.3. Mezcladoras para el “Com. A”

La planta de fabricación dispondrá de dos mezcladoras coloidales de alta turbulencia, que se han utilizado ya para fabricar las muestras de los ensayos realizados, a los que se referirá esta comunicación más adelante.

Las mezcladoras coloidales, cuyo esquema se reproduce en la figura 5, son las más eficientes para mezclas de cementos. El “molino” coloidal tiene un disco que gira a 2.100 rpm y su separación con las paredes de la carcasa es de unos 3 mm, con lo cual en esta zona es donde se crea una fuerte turbulencia, con alto poder de cizallamiento, que puede romper las partículas con que se sirve el cemento seco ordinario. El caudal máximo de cada una de las mezcladoras es del orden de los 750 litros por minuto.

La incorporación al agua de la mezcla de los otros materiales del “Com. A” (cemento, bentonita y estabilizador) se

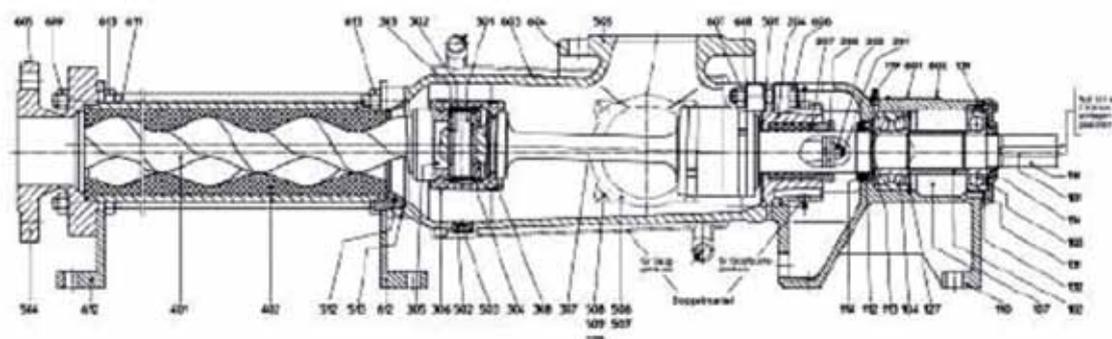
hace rápidamente por la fuerte acción del vórtice creado por la máquina.

El lodo resultante tiene propiedades de coloide, es decir, las partículas de cemento, como sucede con las de las arcillas (y la bentonita es una arcilla) permanecen en suspensión, con una sedimentación o pérdida de liquidez mínima a lo largo de más de 72 horas. En la práctica, y comparadas con las mezcladoras de paletas, no solo es posible conseguir este efecto, sino también un aumento de resistencia, hasta del orden del doble de la de una mezcla elaborada en una de paletas (Reschke), lo que hace imprescindible este tipo de mezcladora para la utilización del relleno de bicomponente.

Las mezcladoras coloidales reciben los materiales de la planta de dosificación y, una vez lograda la suspensión coloidal se bombean a los depósitos de almacenamiento. En cuanto a estos, se pueden montar en el exterior, con capacidad para las necesidades de una semana (depósitos protegidos del frío si la temperatura ambiente en invierno baja de los 0 °C durante días) o bien en el interior del túnel, en tanques de gran tamaño, con capacidad suficiente, en este caso, para el consumo de 24 horas, como mínimo. Desde estos depósitos, el “Com. A” se bombea al depósito agitador montado en el *backup* del escudo, de donde lo



Fig. 6. Bombas helicoidales



aspiran las bombas helicoidales (Fig. 6) que lo envían a las líneas del escudo de cola.

5.4. Manejo del “Com. B”

En cuanto al “Com. B”, los bidones cerrados que contienen ese producto se depositan en el remolque del *backup* donde están las bombas de aplicación del mismo. Los bidones se vierten sucesivamente al depósito correspondiente, del que toman bombas helicoidales de menor caudal.

6. Ensayos previos y pruebas en banco de ensayo sistema de inyección bicomponente

6.1. Selección de materiales y 1ª etapa de ensayos

Los materiales básicos seleccionados fueron los siguientes:

- Cemento: Cemento III/32,5 N-SR (Proveedor Tudela Veguín).
- Bentonita: CV-15 (Proveedor Süd-Cheme).

- Agua: red de agua Comunidad de Madrid³.

Como aditivos químicos se utilizaron los productos de tres suministradores acreditados. Con todo ello, se llevó a cabo una 1ª etapa de ensayos con un equipo de pruebas diseñado por el fabricante Herrenknecht (Fig. 7) en el que se definieron las diversas dosificaciones de las mezclas a ensayar en laboratorios, formando tres grupos de dosis similares de materiales básicos y cada una con los productos químicos del mismo suministrador. Los resultados fueron similares.

Este equipo puede reproducir el funcionamiento del sistema tanto en “automático”, como en “semiautomático” que es la alternativa para poder cambiar el porcentaje de “Com. B”.

Esta 1ª etapa de ensayos se completó con los resultados de los ensayos de laboratorio relativos a los parámetros de:

- viscosidad (Cono de Mash),



Fig. 7. Equipo Herrenknecht de pruebas



Fig. 8. Vista del Banco de pruebas

- densidad,
- exudación,
- punto de gelificación y
- resistencias mecánicas a 24 h/7 días/28 días,

realizados por los laboratorios de los contratistas, por una parte, y los de los suministradores, por otra, cada uno de estos utilizando sus productos químicos.

6.2. Segunda y tercera etapa de ensayos: diseño de un banco de ensayo para las pruebas del sistema de inyección
Una vez obtenidos los resultados satisfactorios de la 1ª etapa, la dirección de obra consideró necesario verificar también el correcto funcionamiento del sistema diseñado de inyección a través de la cola del escudo.

A este fin, se proyectó un banco de ensayos para poder simular: las condiciones de velocidad de avance de la TBM; el volumen generado por ésta para rellenar una línea de inyección a través del escudo de cola; la pérdida de carga que habría en la tubería a través de dicho escudo y el efecto de la gravedad en cada uno de los 6 puntos de inyección.

Se construyó el banco de ensayos, con una cabida igual a la del sector del *gap* del escudo de cola a rellenar por cada una de las 6 líneas de inyección dispuestas en la forma indicada en la anterior figura 2. El banco construido consta de los elementos principales siguientes (figura 8):

- Estructura metálica con volumen interior de 2,5 m³ aprox. Compuesta por una parte fija y otra que puede ser desmontada para la limpieza de restos de la masa que haya quedado en el interior del encofrado metálico.
 - Bastidor de apoyo y de absorción de las reacciones y cargas generadas por la estructura metálica durante las pruebas de la fase de volteo.
 - Conjunto de charnelas de giro de la estructura para la simulación del efecto de la gravedad en los diferentes ángulos de inyección de las líneas de la tuneladora.
- El desplazamiento de la TBM está simulado por un émbolo que se desplaza, moviendo la masa inyectada a velocidades similares a las habituales del escudo durante los trabajos de excavación del módulo del anillo siguiente (unos 40 a 50 mm/min).
- La orientación de cada una de las salidas del producto en los puntos de inyección se reprodujo, dando al banco la inclinación correspondiente al ángulo de cada salida, antes de empezar las pruebas de la misma (figura 9):
- La sección es la representación geométrica de los puntos de inyección, con los respectivos ángulos de salida de la masa (16° para las líneas L1 y L2, 53° para las L3 y L4 y 29° para las L5 y L6).
 - Se añaden las tres posiciones correspondientes a dichos ángulos en las que se situó el banco para efectuar las pruebas. El movimiento se daba con un puente grúa que soportaba además el peso.

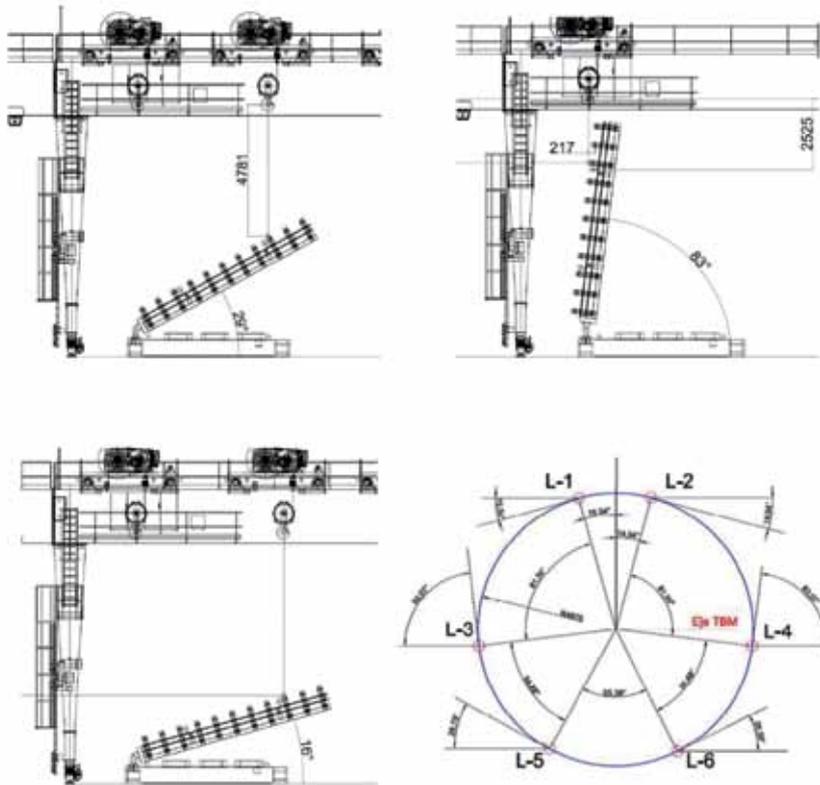


Fig. 9. Geometría de los puntos de inyección en la cola del escudo y posiciones correspondientes del Banco de pruebas para los ensayos

En cuanto estuvo disponible el banco, y pese a las muy bajas temperaturas reinantes, en abril de 2013 se hicieron las pruebas de la 2ª etapa de ensayos, en las que se comprobó el buen funcionamiento de todos los dispositivos.

Aunque los resultados de los ensayos sobre muestras tomadas in situ fueron aceptables, se decidió realizar una tercera y última etapa de ensayos que se llevó a cabo en mayo 2013 para simular unas condiciones ambientales parecidas a las esperables dentro del túnel y ensayar, además, los efectos de una afluencia de agua del terreno y de las posibles sobreexcavaciones. A esta última etapa se refiere lo que sigue.

– Para simular las condiciones de la posible afluencia de agua del terreno durante la excavación, y los efectos que pudieran derivar de las diferentes vías de entrada de agua las capas superficiales del relleno, dispuso un depósito de agua en la parte superior de la estructura metálica del banco, del que se derivan dos vías de aporte continuo de agua sobre la masa de inyección que se va generando en el banco de ensayo. El sistema se representa en la figura 10a.

Y, en la figura 10b puede observarse el estado de las vías de aporte de agua tras la realización de las pruebas. Las vías han sido totalmente obstruidas por el mortero bicomponente, llegando éste incluso a adentrarse dentro del propio depósito.

– Eficacia del sistema, en caso de sobreexcavación. El diseño del banco responde a un espesor del *gap* de unos 0,25 m que es ampliamente suficiente para la simulación de la sección de excavación previsible en condiciones normales del terreno.

No obstante, como pueden producirse cortes imperfectos de la roca, con sobreexcavación por encima del diámetro máximo en las citadas condiciones normales, se colocaron 4 moldes troncopiramidales que se ven en la mitad superior de la siguiente figura 11, duplicando el espesor para simular dicha situación.

En la mitad inferior de dicha figura puede observarse el aspecto de los bloques representativos de la sobreexcavación, una vez terminado el ensayo.



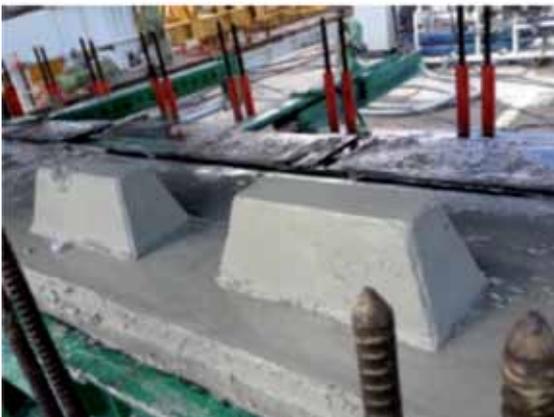
Fig. 10a. Vías de aporte de agua sobre la masa



Fig. 10b



Fig. 11.
Simulación de sobreexcavaciones



Componente A (kg/m ³)			Componente B		Resistencias (kg/cm ²)		
Cemento	Bentonita	Agua+estab/ retardante	% silicato	“Gel time” sg	24 h.	7 d.	28 d.
300	35	867 + 5	2	18	0	9	
300	35	847 + 5	4	28	4	25,3	
300	35	827 + 5	6	48	12	46,7	
300	40	830 + 3	5	9	3,8	21,1	22,1
300	40	830 + 3	6,5	23	6,5	30,5	31,1
300	40	830 + 3	8	28	9,34	34,9	35,2
325	35	859 + 5	2	14	1		Pendiente
325	35	839 + 5	4	23	6	25	Pendiente
325	35	819 + 5	6	38	12,5	47,2	Pendiente
*350	40	791	7,5	25	3,5	17,0	18,1
*350	40	815	5,8	23	3,4	11,4	22,4
*350	40	796	7,9	28	4,3	17,0	24,1
*350	40	778	10,0	32	4,2	11,9	19,2
*350	40	807	6,6	14	3,6	11,2	20,7
375	35	827 + 5	3,5	12	3,5	28	60
375	35	812 + 5	5	27	8	26	Pendiente
375	35	803 + 5	6	29	11,8	60,1	Pendiente
400	40	792	6,6	19	5,4	16,3	26,4

(*) Resultados de la Etapa 2ª afectados por bajas temperaturas

Cuadro 2. Resultados de las pruebas

6.3. Resultados de las pruebas finales

En el cuadro nº 2, se recogen los resultados de los ensayos realizados en los laboratorios de Acciona Infraestructuras y de FCC Construcción, correspondientes a las muestras de bicomponente tomadas a lo largo de la 2ª y 3ª etapas de pruebas del sistema, realizadas fuera de la obra.

Se debe indicar que, si bien hay datos suficientes para que la dirección de obra tome las decisiones pertinentes, respecto de la formulación del bicomponente, se harán en la obra las pruebas finales del funcionamiento de la inyección en los primeros avances con escudo y con los equipos montados en la propia máquina.

7. Conclusiones

No obstante lo dicho en el anterior punto 6.3 respecto de las pruebas finales en obra, es de interés adelantar las con-

clusiones que nos permiten formular los trabajos realizados y que esperamos sean confirmadas por dichas pruebas en obra.

- No existen grandes diferencias entre la formulación del “Com. A” de 350 kg/m³ de cemento (y 30 kg/m³ de bentonita) y la formulación de 300 kg/m³ de cemento (con 40 kg/m³ de bentonita).

Las formulaciones de 300 kg/m³ de cemento y 40 kg/m³ de bentonita alcanzan, a diferentes dosificaciones de “Com. B”, más de 3,5 kg/cm² a las 24 horas y rebasan los 2 MPa a los 7 días, por lo que dichas formulaciones se consideran, en principio, adecuadas.

- Para una formulación de 300 kg/m³ de cemento, el tiempo de gelificación es muy elevado en dosificaciones altas

de silicato, lo que podría proporcionar una mayor facilidad para que el mortero bicomponente fluya hacia el frente de excavación y a no asegurar un relleno compacto y con cohesión a tiempo suficiente para evitar el lavado del mortero en zonas donde haya afluencia de agua.

En base a los ensayos realizados, se estima que el rango de trabajo en cuanto a dosificación del "Com. B" debe variar entre un 5 % y un 6,5 %.

- A medida que aumenta la dosificación de "Com. B" en la mezcla, se incrementa la diferencia de presiones de inyección entre las líneas.

Por otra parte, las presiones de inyección con dosificaciones medias de "Com. B", suavizan el abanico de presiones obtenidos en los ensayos, por lo que utilizando los parámetros antes indicados de adición de silicato, disminuirá el riesgo de

que el mortero fluya hacia el frente de excavación. Aun así, es importante señalar que en ningún ensayo se ha superado la presión de 2 bar que se considera como límite admisible.

- Por todas las razones expuestas se concluye que el rango de dosificación de "Com. B" óptimo, para una formulación de "Com. A" de 300 kg /m³ de cemento, es el abarcado entre los valores de 5 % y 6,5 %, si bien en los resultados de laboratorio se observa que con variaciones de las cantidades de cemento y de los porcentajes de silicato cercanas a las cifras indicadas, se consiguen resultados de tiempo de gel y resistencias similares e incluso mayores.

- En cualquiera de los casos, ha quedado demostrado que el sistema de inyección de mortero bicomponente es capaz de rellenar el 100 % del volumen anular correspondiente al arco que ha de abarcar la línea más desfavorable del escudo de cola y sin sobrepasar la presión de 2 bar. **ROP**

Notas

(1) En este tipo de escudos no presurizados, el relleno de mortero del *gap* va tomando un talud muy tendido, que obligaría a dejar sin llenar totalmente la parte superior del *gap* de varios anillos, con un alto riesgo de descolocación. Para evitarlo, es necesario lograr que el relleno incompleto no afecte a más de unos 4 anillos, por lo que es imprescindible añadir acelerante al mortero según se produce el vertido en la parte superior del anillo anterior a los 4 últimos anillos colocados.

(2) El tiempo de inicio de la "gelificación", a partir del momento en que se mezclan los dos componentes, crece rápidamente con el porcentaje del peso del "Comp. B" (antes de diluirlo en agua) respecto del de "Comp. A". En los ensayos previos realizados para Bolaños se obtuvieron estas cifras:

Peso "B"/Peso "A"	4 % a 5 %	5 % a 6 %	≥7 %
Tiempo de inicio del gel (en segundos)	5 s - 12 s	12 s - 30 s	>35 s

En cuanto a la Resistencia a Compresión Simple (RCS), se han alcanzado valores del orden de 2 MPa a los 7 días, para los rangos a partir del 5 % de la relación de pesos. Con menos del 4 % no es medible la RCS y con más del 6 % la RCS se aproxima al entorno de los 3,5 MPa.

(3) Agua de pH y demás características similares a las del agua de la obra.

Referencias

- Herrenknecht AG. "PANAMÁ METRO LÍNEA 1". Edit. Herrenknecht AG. Schwanau (Alemania) 2011.
- 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.
- Pellegrini L., Perruzza P. "SAO PAULO METRO PROJECT. CONTROL OS SETTLEMENTS IN VARIABLE SOIL CONDICTIONS THROUHT EPB PRESSURE AND BICOMPONENT BACKFILL GROUT". Proceedings of the RETC. Las Vegas, Nevada. 2009.
- Reschke A, Noppenberger C. "BRISBANE AIPORT LINK EARTH PRESSURE BALANCE MACHINE. TWO COMPONENT TAILSKING GROUTING A NEW AUSTRALIAN RECORD. 14th Australian Tunnelling Conference. 2011.