

Túneles de Bolaños

Estabilización de zonas de falla con resinas y relleno con bicomponente inyectado a presión del trasdós del revestimiento de anillos de dovelas en un escudo simple para roca dura

RESUMEN

La construcción de los Túneles gemelos de BOLAÑOS, de 6,7 Km de longitud, de la Línea Ferroviaria de A.V. al Noroeste de España (Galicia) se ha hecho con un escudo simple HK S-805, cuyo diseño se modificó para inyectar bicomponente a presión por el escudo de cola, como relleno del espacio anular (el "gap") entre terreno y revestimiento.

La construcción del TÚNEL DE VÍA DERECHA se inició en Noviembre de 2013, después de una serie de ensayos previos y de la puesta a punto del sistema sobre la propia TBM, montada en la Boca del túnel. Terminado este túnel, con un año de retraso, por causas ajenas al sistema constructivo, a finales de Septiembre de 2015 se inició el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA, que se terminó a mediados de Diciembre de 2016.

El artículo se refiere a los dos aspectos principales del Sistema, el primero el tratamiento previo de los múltiples tramos inestables con aplicaciones manuales de resinas órgano-minerales, método perfeccionado en el segundo túnel, que permitió aproximar el ritmo de avance al de los tramos de roca competente. Sobre este aspecto, se exponen: las características del macizo atravesado, constituido por rocas duras y abrasivas fracturadas, consecuen-



FELIPE
Mendaña

Doctor Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos.

Presidente: SPICC, S.L.

El proyecto y la construcción de los túneles de Bolaños Línea férrea de AVE a Galicia (noroeste de España)

cia del fuerte tectonismo de la zona; las dificultades de ejecución graves y diversas, que van desde caudales de agua significativos, con puntas importantes y presencia errática de finos, hasta frecuentes zonas de falla y, por último, el paso de un importante tramo con riesgo de “squeezing” debido a la presencia de ampe-litas en las pizarras.

El segundo aspecto destacado en el artículo fue la adaptación del Escudo simple para roca dura, que permitió hacer, con pleno éxito, el relleno por inyección a presión de “bicomponente” del “gap” de cada uno de los anillos. Sobre este particular, el artículo añade las características exigidas al bicomponente, los medios de control de las mismas y las instalaciones específicas montadas en la Obra con las que se consiguió alcanzar dichos objetivos.

PALABRAS CLAVE

Escudo simple, escudo de cola, espacio anular, resinas órgano-minerales, abrasivo, zona de falla, deformación plástica por fluencia

ABSTRACT

The construction of the 6.7 km length BOLAÑOS TWIN TUNNELS, of the new High Speed Railway Line to Galicia (in the North West of Spain) was made with a single type Shield Machine, the HK S—805, that was adapted to fill up the annular void (the gap) between the terrain and the ring by Bicomponent injected under pressure through the tail shield of the TBM.

The construction of the RIGHT TRACK TUNNEL started in November 2013 after the accomplishment of a series of previous tests concerning the injection system, which were made again on the TBM once mounted in the R. T. TUNNEL portal. One year after the

end of this Tunnel, and due to reasons beyond the construction system, in the end of September 2015 the construction of the LEFT TRACK TUNNEL started, which was completed in the middle of December 2016.

The article puts forward the two main points of the construction system. The first of them was the previous treatment of the unstable terrain of the tunnel faces by manual applications of organ—mineral resins. This procedure, that was improved after to be used in the L. T. TUNNEL, allowed the TBM to obtain advance rates near the ones got in competent rock. On this subject, the article explains the main difficulties that were found as: the hard and abrasive fractured rock of the massif, a consequence of the high tectonic phenomena that occurred in the area; the big and several difficulties for the tunnel excavation, as the significant debits of water, with erratic pulling of big amounts of fine particles, or the frequent fault ground sections along the tunnel route, and, in the end, the excavation of a long section under the risk of squeezing, due to the presence of ampe-lit mineral in the slate formations.

The second aspect pointed out in the article was the modification of the hard rock Shield Machine to allow to fill up the annular void (the gap) by bicomponent injection under pressure through the tail shield of the Machine, which was successfully achieved. On this subject, the article relates the technical specifications imposed to the bicomponent; the control measures applied by the Project Management and, in the end, the specific installations of the Contractor, the ones with that, those objectives were accomplished.

KEYWORDS

Shield Machine single type, tail shield, annular void, organic-mineral resin, abrasive, squeezing effect (or else, simply “squeezing”)

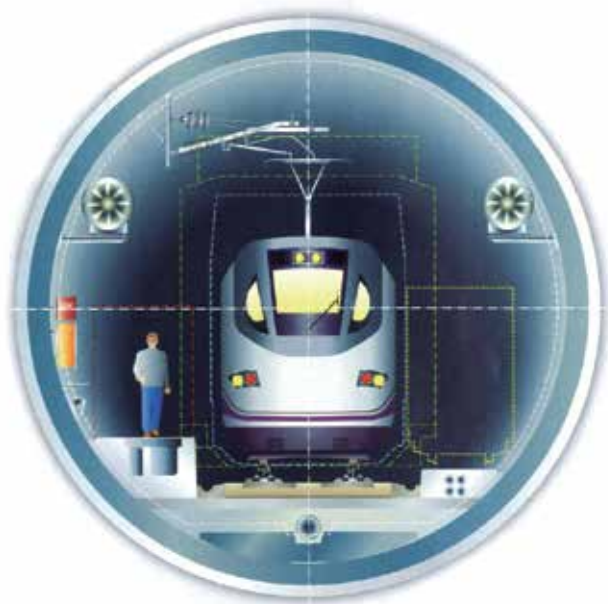


Fig. 1. Sección tipo de los túneles

1

Introducción

A finales de Diciembre de 2016 se terminó la excavación y revestimiento del segundo túnel, el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA, del Proyecto "TÚNELES DE BOLAÑOS" que el ADIF ha venido construyendo para la nueva LÍNEA de A.V.E. al Noroeste de España.

La excavación de estos túneles gemelos con un escudo simple se hizo con unos rendimientos importantes, gracias al sistema de estabilización con resinas órgano-minerales de las zonas de falla que se presentaron en número elevado en las formaciones geológicas de pizarras y areniscas de matriz dura y abrasiva, pero, a la vez, muy afectadas por el complicado tectonismo de la zona.

En cuanto al relleno del hueco anular entre el trasdós de los anillos de dovelas del revestimiento y el terreno (el "gap") se adaptó previamente el Escudo para hacer el relleno correspondiente a cada anillo con inyección a presión del nuevo material comúnmente denominado "bicomponente". Esta aplicación del nuevo material a los escudos no presurizados por vez primera en Europa ha tenido un éxito similar al ya conocido desde hace más de 10 años en los escudos presurizados, terminando con los problemas derivados de los morteros tradicionales de cemento y arena.

El objeto del presente artículo es informar con detalle de estos dos aspectos del Proyecto de Bolaños, a la vez que se resumen los datos principales relativos a la construcción de ambos túneles.

2

Marco geomecánico de los túneles

En los Túneles de BOLAÑOS se han reconocido dos conjuntos estratigráficos de clara diferencia litológica (grupos Nogueira y Paraño) dispuestos en una secuencia homoclinal. Forman parte de la unidad denominada Cabalgamiento de Verín (zona de Galicia de Tras os Montes), unidad en la que termina una de las macrofracturas orogénicas de la placa ibérica, la gran falla Coimbra – Chaves – Verín, que se presenta acompañada de manifestaciones hidrotermales.

El Grupo Nogueira lo forman rocas de color oscuro (grises y negras) ricas en material carbonoso y a él pertenecen dos de las formaciones atravesadas por el túnel. En cuanto al Grupo Paraño, que se sitúa por encima del anterior formado por rocas básicamente detríticas de tonos verdoso y pardo, le corresponden las otras dos formaciones de las cuatro que se describen seguidamente.

En las diversas fases de la orogenia de estas formaciones aparecen tramos de fallas, a favor de las cuales se manifiestan los acuíferos que, una vez producido el "golpe" de agua inicial, aportarán caudales limitados en la futura explotación del túnel.

A lo largo del trazado del túnel de vía derecha, que se excavó desde la Boca Oeste de Campobeceros, se atravesaron sucesivamente, las Formaciones siguientes:

- PIZARRAS GRISES (SPG) sobre las que descansan unas PIZARRAS NEGRAS más carbonosas que no se atravesaron por el Túnel. Las Pizarras grises corresponden a los primeros 1.180 m del Túnel y son rocas de competencia media (RMR 35-60) cuya excavación no presentó mayor dificultad salvo fuertes afluencias de agua en unos pocos tramos cortos.

- CUARCITAS Y ARENISCAS CON FILITAS (SARF) de competencia geotécnica más variable (RMR 25-50) en las que desde su contacto con la Formación anterior y hasta los 3.948 m se produjeron las aportaciones de agua más importantes.

Por otra parte, a partir de ese punto esta formación presentó un tramo de terrenos altamente inestables, calificado como tramo de fallas, que se prolongó hasta su contacto con la Formación siguiente a los 4.544 m de la Boca. Estas dos formaciones pertenecen al Grupo Paraño.

- PIZARRAS LAMINADAS FRACTURADAS (SPLFR) que aparecieron con características similares e igual calificación (tramo de fallas) hasta los 4.575 m en que se presenta el contacto con una nueva Formación.

- PIZARRAS AMPELITICAS (SAC) de calidad geotécnica media (RMR 30-60) salvo un tramo corto de calidad geotécnica pésima, formación que continúa hasta los 5.525 m. Por último

- PIZARRAS LAMINADAS (SPL) en este caso ya no fracturadas, de competencia media hasta el final del túnel a los 6.709 m de la Boca de Ataque.



Fig. 2. Vista de las instalaciones de las Bocas de ataque

- Estas dos (o si se quiere, tres) formaciones pertenecen al Grupo Nogueira.

Las dificultades diversas que estas Formaciones tan variables produjeron fueron resueltas como se describe en los apartados siguientes.

En EL TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA se han repetido las mismas formaciones con longitudes similares, si bien con ligeros desfases en los puntos kilométricos de inicio y fin de los contactos, debido a la separación de 30 m entre ejes de las dos secciones gemelas.

3

La construcción del túnel de vía derecha

3.1. Aportaciones importantes de agua en pizarras y areniscas

Deben señalarse al respecto las siguientes decisiones previas adoptadas en el TÚNEL DE VÍA DERECHA en relación con las posibles aportaciones de agua: el diseño del anillo con doble "gasket", por una parte, y la reducción del % de "Com. B" hasta el 4,5 % por otra. Ambas medidas, junto a una perfecta colocación del anillo en su montaje, contribuyeron al satisfactorio resultado del empleo de Bicomponente.

Los importantes caudales soportados (entre 10 l/s y 20 l/s, llegando a medir 90 l/s en algunos de los avances) produjeron sobreexcavaciones significativas en los primeros 4.090 m de túnel. Se iniciaron en unos 74 m del total de 1.180 m excavados en la Formación SPG de pizarras grises, pero las mayores afluencias se produjeron sobre todo en la siguiente Formación SARF, en la que alternaban filitas muy débiles con cuarcitas y areniscas fracturadas, que añadieron una propor-

ción de finos muy notable, lo que aumentó el poder de erosión de las afluencias de agua, de forma que en unos 1.300 m del total de 2.906 m de dicha Formación (un 45 %) se soportaron caudales significativos de agua con aportaciones frecuentes de finos que produjeron un aumento del volumen de inyección del Bicomponente próximo al 20 %.

Pese a ello, el rendimiento medio del avance con relleno del "gap" de los anillos con Bicomponente fue satisfactorio, hasta la entrada en un tramo de falla que afectó a los últimos 165 m de la formación SARF

3.2. Terrenos altamente inestables

El día 4 de Junio de 2014, en el Avance N° 2464 (a una distancia de la Boca de 3.948 m) comenzaron las dificultades derivadas de las zonas de falla, con terrenos inestables que aparecieron tanto en la Formación de CUARCITAS Y ARENISCAS CON FILITAS (SARF) como en la siguiente de PIZARRAS LAMINADAS FRACTURADAS (SPLFR).

La alta inestabilidad de los terrenos era la consecuencia de la falta de cohesión de las areniscas junto con la gran debilidad de las pizarras laminadas debida a su extrema foliación y la frecuente presencia de finos mayoritariamente arcillosos en proporciones significativas.

En el Cuadro n° 1 se puede ver el Resumen correspondiente a este tramo del túnel, como muestra de los que realizaba el Geólogo de la Obra en sus visitas diarias al frente

- Se ensayaron primero medidas de tipo mecánico, consistentes en cierres de aberturas frontales principales (cangilones de carga de escombros); cierres de aberturas frontales complementarias y cierres de aberturas perimetrales, todas ellas con variantes de cierre total o parcial aplicado a un número prefijado de aberturas.

TÚNEL DE VÍA DERECHA

TUNELADORA HERRENKNECHT S-805									
DIAS	MEDIA 7 DIAS	MEDIA 30 DIAS	FECHA	ANILLO	ANILLO	TOTAL	TOTAL	METROS	
				COMIENZO	FINAL	ANILLOS	METROS	A ORIGEN	
265	174,727	817,530	24/05/2014	2235	2255	21	33,663	3614,765	SARF
266	181,139	827,148	25/05/2014	2256	2283	28	44,884	3659,649	SARF
267	193,963	828,942	26/05/2014	2284	2304	21	33,663	3693,312	SARF
268	213,199	844,781	27/05/2014	2305	2331	27	43,281	3736,593	SARF
269	222,817	831,957	28/05/2014	2332	2349	18	28,854	3765,447	SARF
270	232,435	856,002	29/05/2014	2350	2374	25	40,075	3805,522	SARF
271	259,686	862,414	30/05/2014	2375	2396	22	35,266	3840,788	SARF
272	259,686	872,032	31/05/2014	2397	2417	21	33,663	3874,451	SARF
273	222,817	838,369	01/06/2014	2418	2422	5	8,015	3882,466	SARF
274	232,435	846,384	02/06/2014	2423	2449	27	43,281	3925,747	SARF
275	211,596	857,605	03/06/2014	2450	2463	14	22,442	3948,189	SARF FALLA
276	184,345	833,560	04/06/2014	2464	2464	1	1,603	3949,792	SARF FALLA
277	144,270	795,088	05/06/2014	2465	2465	0	0	3949,792	SARF FALLA
278	118,622	785,470	06/06/2014	2465	2470	6	9,618	3959,410	SARF FALLA
279	92,974	761,425	07/06/2014	2471	2475	5	8,015	3967,425	SARF FALLA
280	84,959	735,777	08/06/2014	2476	2476	0	0	3967,425	SARF FALLA
281	43,281	706,923	09/06/2014	2476	2476	1	1,603	3969,028	SARF FALLA
282	22,442	678,069	10/06/2014	2477	2477	1	1,603	3970,631	SARF FALLA
283	22,442	665,245	11/06/2014	2478	2478	1	1,603	3972,234	SARF FALLA
284	36,869	652,421	12/06/2014	2479	2487	9	14,427	3986,661	SARF FALLA
285	51,296	657,230	13/06/2014	2488	2502	15	24,045	4010,706	SARF FALLA
286	59,311	644,406	14/06/2014	2503	2512	10	16,03	4026,736	SARF FALLA
287	89,768	647,612	15/06/2014	2513	2531	19	30,457	4057,193	SARF FALLA
288	105,798	634,788	16/06/2014	2532	2542	11	17,633	4074,826	SARF FALLA
289	118,622	610,743	17/06/2014	2543	2551	9	14,427	4089,253	SARF FALLA
290	131,446	604,331	18/06/2014	2552	2560	9	14,427	4103,680	SARF FALLA
291	133,049	596,316	19/06/2014	2561	2570	10	16,03	4119,710	SARF FALLA
292	113,813	581,889	20/06/2014	2571	2573	3	4,809	4124,519	SARF FALLA
293	97,783	551,432	21/06/2014	2574	2574	0	0	4124,519	SARF FALLA
294	83,356	559,447	22/06/2014	2574	2583	10	16,03	4140,549	SARF FALLA
295	96,180	556,241	23/06/2014	2584	2602	19	30,457	4171,006	SARF FALLA
296	84,959	514,563	24/06/2014	2603	2604	2	3,206	4174,212	SARF FALLA
297	100,989	511,357	25/06/2014	2605	2623	19	30,457	4204,669	SARF FALLA
298	112,210	495,327	26/06/2014	2624	2640	17	27,251	4231,920	SARF FALLA
299	134,652	493,724	27/06/2014	2641	2657	17	27,251	4259,171	SARF FALLA
300	173,124	492,121	28/06/2014	2658	2681	24	38,472	4297,643	SARF FALLA
301	166,712	466,473	29/06/2014	2682	2687	6	9,618	4307,261	SARF FALLA
302	149,079	445,634	30/06/2014	2688	2695	8	12,824	4320,085	SARF FALLA
303	149,079	440,825	01/07/2014	2696	2697	2	3,206	4323,291	SARF FALLA
304	121,828	400,750	02/07/2014	2698	2699	2	3,206	4326,497	SARF FALLA
305	94,577	378,308	03/07/2014	2700	2700	0	0	4326,497	SARF FALLA
306	92,974	402,353	04/07/2014	2700	2715	16	25,648	4352,145	SARF FALLA
307	78,547	426,398	05/07/2014	2716	2730	15	24,045	4376,190	SARF FALLA
308	78,547	426,398	06/07/2014	2731	2736	6	9,618	4385,808	SARF FALLA
309	75,341	428,001	07/07/2014	2737	2742	6	9,618	4395,426	SARF FALLA
310	76,944	432,810	08/07/2014	2743	2745	3	4,809	4400,235	SARF FALLA
311	75,341	432,810	09/07/2014	2746	2746	1	1,603	4401,838	SARF FALLA
312	76,944	432,810	10/07/2014	2747	2747	1	1,603	4403,441	SARF FALLA
313	56,105	436,016	11/07/2014	2748	2750	3	4,809	4408,250	SARF FALLA
314	64,120	453,649	12/07/2014	2751	2770	20	32,06	4440,310	SARF FALLA
315	86,562	461,664	13/07/2014	2771	2790	20	32,06	4472,370	SARF FALLA
316	76,944	445,634	14/07/2014	2791	2791	0	0	4472,370	SARF FALLA
317	72,135	415,177	15/07/2014	2791	2791	0	0	4472,370	SARF FALLA
318	81,753	408,765	16/07/2014	2791	2797	7	11,221	4483,591	SARF FALLA
319	125,034	439,222	17/07/2014	2798	2825	28	44,884	4528,475	SARF FALLA
320	126,637	431,207	18/07/2014	2826	2829	4	6,412	4534,887	SARF FALLA
321	104,195	424,795	19/07/2014	2830	2835	6	9,618	4544,505	SARF FALLA
322	102,592	450,443	20/07/2014	2836	2854	19	30,457	4574,962	SARF FALLA
323	133,049	480,900	21/07/2014	2855	2873	19	30,457	4605,419	SAC
324	152,285	484,106	22/07/2014	2874	2885	12	19,236	4624,655	SAC
325	187,551	500,136	23/07/2014	2886	2914	29	46,487	4671,142	SAC
326	184,345	538,608	24/07/2014	2915	2940	26	41,678	4712,820	SAC
327	235,641	565,859	25/07/2014	2941	2976	36	57,708	4770,528	SAC
328	238,847	551,432	26/07/2014	2977	2984	8	12,824	4783,352	SAC
329	262,892	578,683	27/07/2014	2985	3018	34	54,502	4837,854	SAC
330	285,334	593,110	28/07/2014	3019	3051	33	52,899	4890,753	SAC

Cuadro 1. Resumen diario de la geología

- No obstante el resultado de las medidas anteriores, en general aceptable, en cuanto el terreno presentaba inestabilidad, bien al aumentar tanto el volumen de material a recoger por la Rueda, como, a la vez, el rozamiento de esta con el material desprendido que cargaba la zona de la corona del túnel, el Par de giro de la TBM era insuficiente llegando a pararse la Rueda y, a veces, incluso la cinta de transporte.

- En varias ocasiones estas dificultades aumentaron, a causa principalmente del incremento del % de finos.

- Como consecuencia, fue necesario aplicar inyecciones a presión de resinas bicomponentes órgano-minerales cada cierto número (variable) de avances, en cuanto se presentaban esas circunstancias puntuales pésimas.

- Se propuso este tratamiento de acuerdo con experiencias de obras anteriores con TBMs (ABDALAJIS, PAJARES, TRINIDAD-MONTCADA, SORBAS) y también con Métodos convencionales (Túneles varios de las Líneas Madrid-Zaragoza-Barcelona y Córdoba-Málaga).

Dicha propuesta fue apoyada por un Informe de los expertos en Geotécnia aplicada y Escudos no presurizados de HERRNKNECHT AG, fabricante de la máquina, Informe que se aportó a la Dirección del Proyecto.

- Pese a la imposibilidad de predecir donde se iban a presentar las mencionadas circunstancias pésimas, la combinación de los dos tipos de medidas con pequeños ajustes, tanto de los cierres mecánicos parciales, como de la cantidad de resina para lograr la estabilización del avance (con aplicación frecuente en 2 fases y algunas a veces hasta 3 por anillo) produjeron resultados, en general, satisfactorios.

A lo largo de estos tramos con pizarras extremadamente débiles, debido a su abundante foliación y a la clara alteración tectónica de las formaciones, pueden señalarse dos subtramos en los que el rendimiento bajó a cifras pésimas, como sucedió en el primero de ellos que afectó a los 23 m iniciales (ver cuadro 2).

Este cuadro 2 recoge los rendimientos correspondientes a los avances en terrenos inestables, e incluye también el subtramo de las pizarras ampelíticas.

ZONAS DE FALLA EN "CUARCITAS Y ARENISCAS CON FILITAS" (S_{ARF}) Y EN "PIZARRAS LAMINADAS FRACTURADAS" (S_{PLFR})				
GRUPOS	Nº (y m. origen) último avance completo	PRODUCCIÓN / RENDIMIENTO		
		Periodo		Media
D	04/06/14..... 2464 (3.949 m) 11/06/14..... 2478 (3.972 m)	23 m ≈ 44 anillos	8 días	2,8 m/día ≈ 1,8 anillos/día
B	12/06/14..... 2479 (3.972 m) 30/06/14..... 2695 (4.320 m)	347 m ≈ 217 anillos	19 días	18,3 m/día ≈ 11,4 anillos/día
C	01/07/14..... 2696 (4.320 m) 20/07/14..... 2854 (4.575 m)	25m ≈ 160 anillos	20 días	12,8 m/día ≈ 8,0 anillos/día
PIZARRAS AMPELITICAS (S_{AC})				
GRUPOS	Nº (y m. origen) último avance completo	PRODUCCIÓN / RENDIMIENTO		
		Periodo		Media
A	21/07/14..... 2855 (4.575 m) 18/08/14..... 3381 (5.420 m)	845 m ≈ 529 anillos	29 días	29,1 m/día ≈ 18,2 anillos/día
D	19/08/14..... 3382 (5.420 m) 09/09/14..... 3420 (5.482 m)	62,5 m ≈ 39 anillos	22 días	2,85 m/día ≈ 1,8 anillos/día
C	10/09/14..... 3421 (5.482 m) 13/09/14..... 3447 (5.525 m)	43,34 m ≈ 27 anillos	4 días	10,8 m/día ≈ 6,7 anillos/día
Avances esperables (Grupo A).....ADV > 25 m/día (> 16 anillos/día) Avances aceptables (Grupo B).....Ente 16 y 25 m/día (10 a 16 anillos/día) Avances bajos (Grupo C).....Ente 8 y 16 m/día (5a 10 anillos/día) Avances pésimos (Grupo D).....ADV ≤ 8 m/día (< 5 anillos/día)				

Cuadro 2. Resumen de avances en terrenos inestables

A continuación del primer subtramo, y en una longitud mayor (350 m) el rendimiento pasó a ser el esperable y, a continuación (últimos 250 m) las cifras fueron más bajas hasta el contacto a los 4.575 m de la Boca con las pizarras ampelíticas de la Formación siguiente.

3.3. Las pizarras ampelíticas

Los reconocimientos del Proyecto señalaban la presencia de ampelitas en las pizarras de este tramo, de 950 m de longitud, lo que podía producir efectos de “squeezing”, comprobados ya en otros túneles de la Línea, con riesgo de atrapamiento de la TBM. El mineral que produce estos efectos es una mezcla de silicato de aluminio con cantidades variables de hierro, azufre y carbón.

En los primeros 845 m del tramo (hasta los 5.420 m) la excavación se hizo con incidentes y dificultades similares a las descritas en las pizarras y areniscas, pudiendo decir, incluso, que con mejores rendimientos, si bien en los 39 Avances siguientes (unos 62 m) dichos incidentes y dificultades aumentaron notablemente, constituyendo el subtramo de mayor número de módulos que hubo que estabilizar con resinas.

Este segundo subtramo de calidad geotécnica muy baja se inició el 19 de Agosto de 2014 en el Avance nº 3382 (a los 5.423 m de la Boca aproximadamente) y su excavación tuvo una duración excepcional, ya que el comportamiento del terreno no se empezó a regularizar hasta el día 9 de Septiembre de 2014 al entrar en el Avance nº 3421, terminándose el 12 de ese mes en el Avance nº 3.435 a 5.506 m de la Boca.

Los rendimientos bajaron a cifras pésimas. Como puede verse en el Cuadro nº 2, del 19 de Agosto al 9 de Septiembre (22 días) se hicieron solo 62,6 m es decir, 2,80 m/día y en todo el periodo del Subtramo (25 días) se excavaron 86,6 m (3,4 m/día) lo que equivale a 2 avances/día.

Aunque en los últimos 100 m de la Formación de PIZARRAS AMPELÍTICAS (SAC) fue menor la presencia de ese mineral en el material de los frentes, se mantuvieron las medidas tendientes a evitar el atrapamiento del escudo.

Pues bien, por lo que a dicho riesgo se refiere, el tramo pudo excavarse totalmente sin llegar a iniciarse síntomas de atrapamiento, si bien debe decirse que se adoptaron las medidas siguientes:

- Aplicar la gran experiencia conseguida por los especialistas para lograr siempre un tiempo mínimo de colocación del anillo (inferior a 20 min.) y realizar la excavación del módulo con la mayor regularidad que permitiese la estabilidad del terreno.
- El contacto escudo/terreno se mantuvo “lubricado” con lodo bentonítico constantemente.
- En cuanto se presentaba la menor inestabilidad en el frente, se aplicaron resinas bicomponente para reducir a un mínimo las paradas.

3.4. Tramo final del túnel de vía derecha

El inicio de este tramo se sitúa en el contacto con las ampelitas a 5.525 m de la Boca. Las rocas pertenecen a la Formación

de PIZARRAS LAMINADAS no fracturadas de características geotécnicas medias (RMR 30-60) con una longitud total de 1.181 m.

Dado el escaso recubrimiento en este último tramo y el paso del túnel bajo un tramo a cielo abierto de la antigua línea ferroviaria ZAMORA-ORENSE actualmente en explotación, se extremaron las precauciones en la excavación con las medidas siguientes:

a) Inicio de la inyección de resinas.

- No esperar a que se agote la capacidad de giro de la TBM en la recogida del producto de la excavación (medida por el valor límite del parámetro Par de giro).

- Relacionar el inicio de la inyección con los valores de la pesada del material excavado (en principio a partir de pesadas superiores al 30 % del valor teórico de la pesada por anillo se aplicó la inyección).

b) Fases de la inyección de resinas / anillo.

- No limitar a 2 el número de fases por módulo de avance.

- Iniciar la inyección en cuanto la curva del pesaje a lo largo del avance del anillo tienda a rebasar el límite anterior a).

El día 10 de Octubre puede decirse que el paso bajo la línea ferroviaria en servicio estaba terminado, sin incidentes que señalar. Se rebajó la velocidad de paso de los trenes y, por otra parte, en todo momento se vigilaron los asientos del terreno y el nivel de la vía, con registro automático en una Estación total siempre que lo permitieron las fuertes precipitaciones en la zona.

La excavación del tramo se llevó a un ritmo muy aceptable, y se terminó el día 30 de Octubre de 2014. El TÚNEL DE VÍA DERECHA se había iniciado en Noviembre de 2013 y después de un periodo de emboquille, ajuste de Instalaciones y puesta a punto de los equipos, la TBM inició su trabajo a partir del Avance nº 45 (a 70 m de la Boca) el día 16/12/2013, completando los 6.706 m en un total de 360 días de calendario.

4

La construcción del túnel de vía izquierda

La construcción del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA se hizo con la misma tecnología, medios y equipo humano con que se construyó el TÚNEL DE VÍA DERECHA, si bien con un sobredimensionamiento de las defensas contra la abrasividad y una mejora adicional de los medios de tratamiento de las zonas de falla, cuya localización muy aproximada y características principales se conocían, a partir de los datos del Túnel anterior.

Ello hizo pensar que las dificultades para el avance de este segundo túnel serían resueltas más fácilmente, pese a la demora en la orden de su comienzo, que supuso un desfase de unos 10 meses con la fecha de terminación del TÚNEL DE VÍA DERECHA.

Pues bien, desde que se alcanzaron las primeras zonas de falla (de los anillos n°s 2.450 al n° 2.460) se fue comprobando que el terreno presentaba más dificultades de las previstas para el avance, necesitando tratamientos más frecuentes, cuya causa no podía ser otra que la relajación del macizo, debida al tiempo transcurrido desde la ejecución del TÚNEL DE VÍA DERECHA.

A continuación se resumen las mejoras aplicadas a los medios de construcción, las dificultades ocurridas y su solución.

4.1. Previsiones y mejoras adoptadas para la construcción del segundo túnel

Para la construcción del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA, se hicieron las siguientes previsiones y mejoras tendientes a facilitar el proceso Constructivo y subsanar (o al menos reducir) los efectos que la existencia del túnel anterior, agravada por la demora del comienzo de la construcción del segundo túnel, pudieran haber producido en un comportamiento más desfavorable del macizo:

1) Incremento de los espesores de las piezas antidesgaste, ante la elevada abrasividad de la roca (figuras 3, 4 y 5)

2) Respecto de la localización de los tramos conflictivos de terrenos inestables, las previsiones se basaban en una esperable coincidencia de las formaciones de ambos túneles y, por tanto, en un conocimiento previo de las dificultades a resolver.

Por ello, se partió de la base de que era posible conocer anticipadamente y con gran aproximación, la localización de los terrenos inestables en los que muy probablemente iba a ser preciso el tratamiento previo con resinas órgano-minerales.

3) La propuesta de dicho tratamiento había sido aprobada en 2013 por La Dirección de Línea para su aplicación en el TÚNEL DE VÍA DERECHA, y, en consecuencia, el Contratista puso en marcha un Sistema de aplicación de resinas a las formaciones geológicas muy alteradas sistema que fue progresando a lo largo de su construcción, permitiendo definir una serie de mejoras a aplicar a la construcción del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA.

4) Por una parte, esas mejoras consistieron en montar unas instalaciones para la aplicación de las resinas, de acuerdo con el esquema de la figura 6 siguiente, con capacidad suficiente para poder actuar a uno u otro lado del eje del túnel sin esperar al vaciado de los envases de los dos componentes.

Por otra parte, y para mejorar el trabajo de los equipos de especialistas, se pusieron en marcha las medidas siguientes:

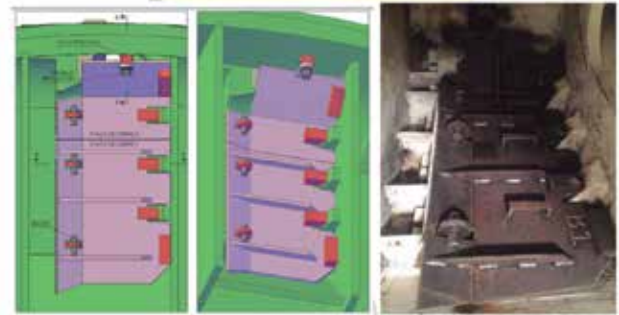
a) Añadir al Escudo unos dispositivos mecánicos para reducir el flujo de entrada de material por las aberturas de la Cabeza de corte, con el fin de evitar la necesidad de un "sobreparr", que podía producir bloqueo de la TBM, dispositivos que se ven en la figura 7.

En el TÚNEL DE LA VÍA DERECHA las aberturas de entrada de escombros a los cangilones de la Rueda se cerraron con chapas soldadas a las mismas, solución que los fabricantes recomiendan para las TBMs de diámetro menor de 7 m. En dichos escudos no debe debilitarse la estructura base de acero



Fig. 3. Rueda de corte con pletinas antiabrasión de 30 mm de espesor en el cono de entrada del escombros

Fig. 4. Montaje de la TBM para el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA Escudo frontal con pletinas antiabrasión reforzadas.



de la Rueda con orificios para los bulones o tornillos de fijación, pese a la ventaja de un cierre más perfecto y al evidente ahorro de tiempo que ofrecen los diseños del tipo de la figura 7.

Pero, como se ha demostrado en Bolaños, con máquinas de roca dura de diámetro mayor, lo recomendable es el diseño de las placas de cierre y la fijación mecánica de las mismas a la estructura base de la Rueda.

b) Como complemento de lo anterior, se redujo al máximo la separación entre el borde del Escudo delantero y la Rueda de corte, añadiendo una 4ª barra al “grill bar” de esta, con lo que, al mismo tiempo, se incrementó la resistencia al desgaste por abrasividad del borde periférico de la Rueda (ver figura 5).

c) Organizar el trabajo, estableciendo una forma ordenada de proceder al llegar a una zona de falla. Para ello, y a partir de las experiencias del túnel anterior se reunieron en un PROCEDIMIENTO, las nuevas instrucciones detalladas a seguir en los tramos de falla, para conocimiento y cumplimiento general.

5) Por su relevancia de entre las anteriores, deben señalarse las medidas mecánicas de cierre de aberturas de la cabeza de corte de la tuneladora y las instalaciones de generación y aplicación de las resinas bicomponente órgano-minerales.

6) Y, por último, se debe mencionar como medida previa principal, la decisión del Contratista de mantener el mismo equipo de especialistas que había intervenido en la construcción del TÚNEL DE VÍA DERECHA.

Como resumen de todo lo anterior, la previsión, que compartían la Dirección de Obra y el Contratista, era que la construcción del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA se podría hacer con el mismo ritmo de avance que el anterior, pese a la afección negativa de la presencia de éste, difícil de precisar “a priori”, aunque, obviamente esperable, máxime dado el retraso del comienzo de la construcción del segundo túnel.

ESQUEMA DE INYECCIÓN DE RESINAS BICOMPONENTES

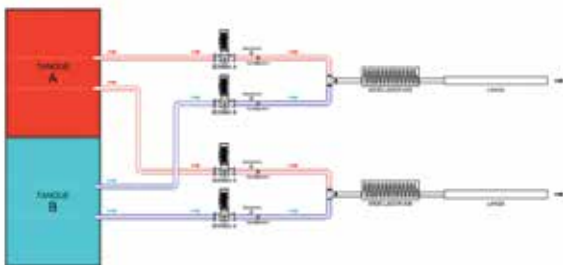


Fig. 5. 4ª barra del “grill-bar”

Fig. 6. Instalación de aplicación de resinas

Fig. 7. Cierre de las entradas de cangilones

4.2. Incidencias ocurridas a lo largo de la construcción

En primer lugar, debe decirse que, en general las previsiones relativas a la construcción del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA, se cumplieron, y sobre ello podemos aportar lo siguiente:

1) En el Cuadro nº 1 se incluye una parte de las descripciones de la Geología de los terrenos atravesados por el TÚNEL VÍA DERECHA, que se repitieron a lo largo del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA hasta el final de este último, que tuvo lugar el 12 de Diciembre de 2016.

Las características de los terrenos coinciden, a veces con un ligero desfase, que es consecuencia de la separación de unos 30 m entre centros de ambas secciones, pero, en general, la práctica coincidencia es evidente.

Ambas descripciones han sido hechas por el mismo Geólogo, que ha inspeccionado diariamente los frentes en ambos túneles, según progresaban los avances.

2) Por lo que se refiere a las resinas órgano-minerales, en el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA se consumió un total de 1.333 t que, frente a las 956 t del TÚNEL DE VÍA DERECHA, supuso un incremento de un 40 %, consecuencia, del aumento del número de tratamientos que hubo que realizar, y pese a las mejoras introducidas en la máquina y en las instalaciones, que redujeron los tiempos de aplicación.

3) La aplicación de bicomponente, como material de relleno del "gap" se hizo al mismo ritmo prácticamente, en ambos túneles con una media de unos 18 minutos / anillo de 1.600 mm de longitud

4) Y por último, junto al incremento del consumo de resinas, las incidencias negativas principales han sido las paradas obligadas, debidas a causas diversas y ajenas al proceso constructivo. Sobre ambas daremos más detalles a continuación

4.2.1. El mayor consumo de resinas en el túnel de vía izquierda

La aplicación de resinas bicomponentes (órgano-minerales y reactivas al agua) se inició y finalizó, prácticamente, en los mismos puntos de ambos túneles: comenzó en el Avance nº 2.450 del TÚNEL DE VÍA DERECHA y Avance nº 2.480 del TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA terminando respectivamente en los Avances nº 3.760 y 3.820, como puede verse en el gráfico de la figura 8.

El consumo total en el nuevo túnel fue de 1.333 T, mientras que en el túnel anterior se había llegado a un total del orden de las 956 T, es decir, el consumo aumentó en un 40 %. Por lo que se refiere a la evolución del consumo, y de acuerdo con dicho gráfico puede decirse lo siguiente:

1) El mayor consumo de resinas en el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA comenzó desde un principio, es decir, desde el Avance nº 2.470, pero el desfase de los consumos a origen se fue incrementando poco a poco, llegando a cifras a origen del orden de un 15 % mayores que las del TÚNEL DE VÍA DERECHA, hasta el tramo de los Avances nºs 2.750 a 2.760, es decir, a lo largo de unos 450 m de túnel.

2) Pero fue a partir de dichos puntos cuando el incremento del consumo de resinas se disparó, alcanzando en el entorno de los Avances nºs 3.420 a 3.450 un desfase máximo del orden de un 85 % más a origen, respecto del consumo en el túnel anterior.

3) La punta anterior se redujo en los avances siguientes, y la cifra final del consumo a origen de resinas en el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA, a lo largo de un total bruto de 1.340 avances realizados (desde el Avance nº 2.480 al nº 3.820), ha sido de 995 kg. de resina por Avance (622 kg. por metro de túnel) en vez de los 713 kg. por Avance del TÚNEL DE VÍA DERECHA (445 kg. por metro de Túnel), es decir, un 40 % más.

De la experiencia del TÚNEL DE VÍA DERECHA puede estimarse que el avance mensual medio en los tramos en que no fue necesario el uso de resinas fue de 850 m/mes, aproximadamente, mientras que en los que hubo que estabilizar el terreno previamente con resinas, el avance fue de unos 500 m/mes, es decir, que el empleo de resinas produjo un aumento de plazo de 1,7 meses.

En consecuencia, sólo por esta razón y admitiendo una ley lineal, en el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA podría estimarse que el aumento de los tratamientos podía justificar un incremento del plazo de unos 0,65 meses, lo que no sucedió gracias a la medidas tomadas a cabo en la Obra.

4.2.2. Paradas de la obra por causas diversas ajenas al proceso constructivo

Como ya se ha dicho, las incidencias principales han sido las Paradas obligadas siguientes, debidas a causas diversas y ajenas al proceso constructivo propiamente dicho.

1) Parada de 45 días, a partir del Avance N° 2.271. La paralización de la Obra, desde el 9 de abril al 23 de Mayo de 2016, fue debida a que hasta el citado día 23.05.16 no se dispuso de la autorización administrativa del Proyecto Modificado correspondiente.

2) Segunda parada de 12 días, en el Avance N° 2.447. Transcurrió desde el 3 al 14 de Junio de 2016, y fue ordenada por la Dirección de Obra, cuando el frente de avance alcanzó una posición considerada de riesgo, por su proximidad a un socavón ocurrido sobre la vertical del Avance nº 2.467 del TÚNEL VÍA DERECHA.

Hasta terminar el relleno de dicho socavón y las inyecciones previas de consolidación del mismo, no se reanudó la actividad en el TÚNEL VÍA IZQUIERDA.

3) Tercera parada de 31 días, en el Avance N° 3.378. Transcurrido desde el 29 de Agosto al 30 de Septiembre de 2016 por causas ajenas al proceso constructivo seguido en el TÚNEL DE VÍA IZQUIERDA.

En la figura 9 siguiente pueden verse los gráficos de avance de ambos túneles, con las paradas mencionadas en el de VÍA IZQUIERDA.

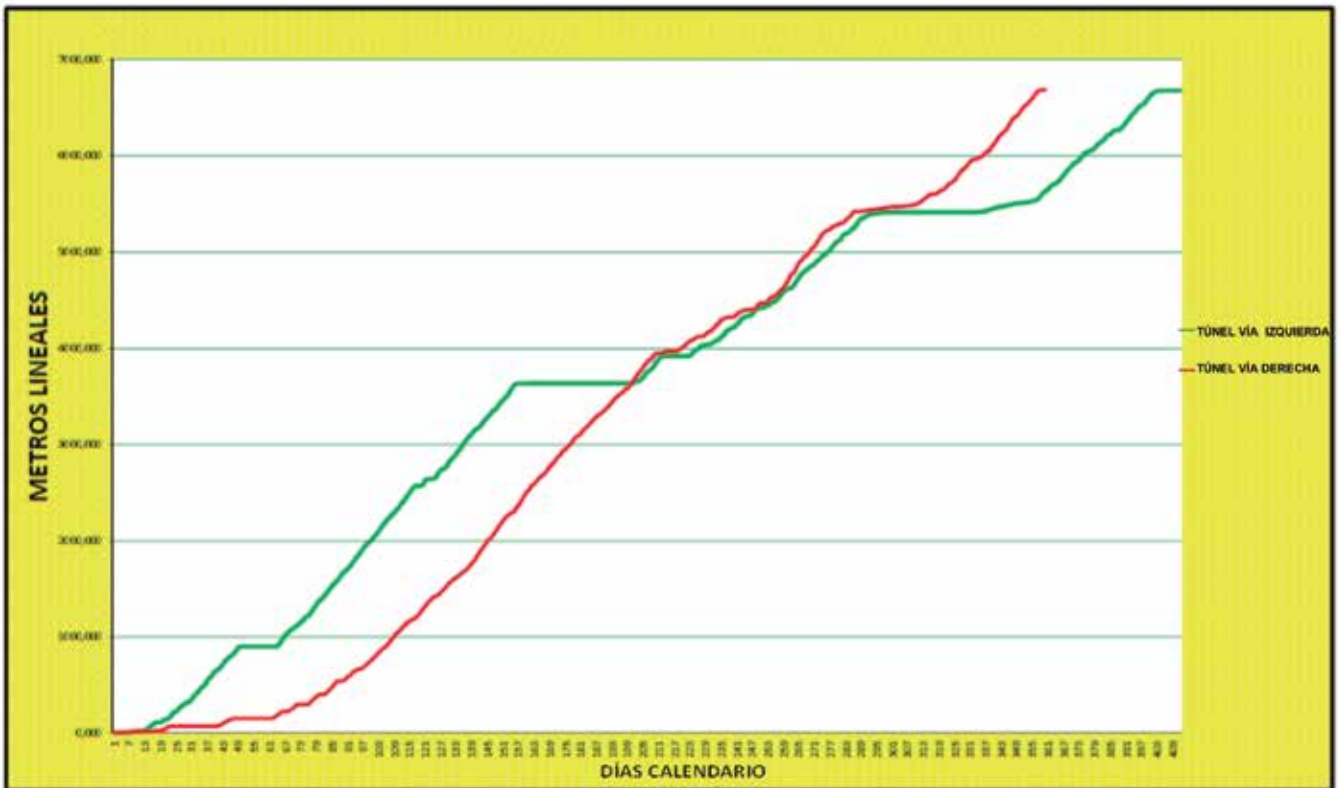
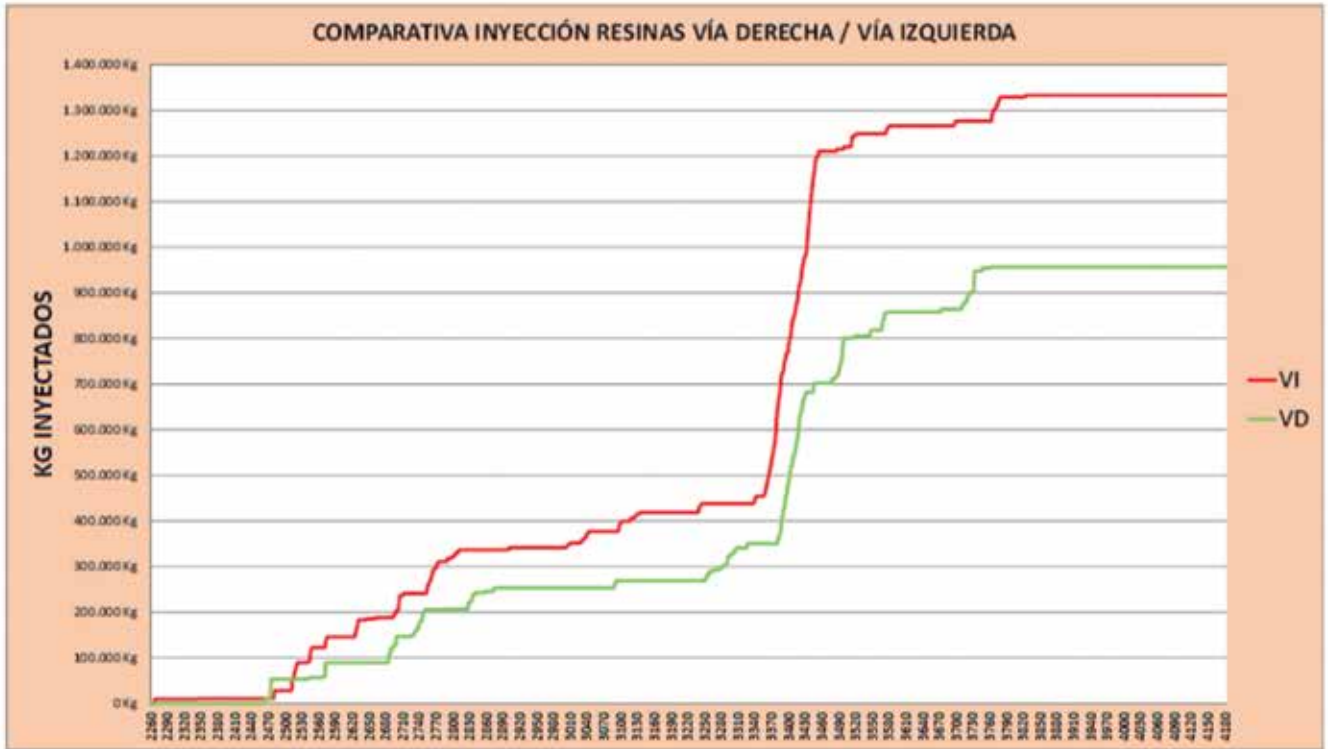


Fig. 8. Inyección de resinas en VÍA IZQUIERDA (azul) VÍA DERECHA (verde)

Fig. 9. Posición de los frentes de los Túneles de BOLAÑOS en días de calendario a Origen

4.3. Plazos de ejecución de ambos túneles

Si se representan los puntos kilométricos de los avances en función de los días de calendario (ya que se trabajó siempre a 3 turnos en todos los días del mes) resulta el gráfico que se ve en la figura 9 con los siguientes plazos brutos de cada túnel:

- Plazo del túnel vía derecha: 360 Días
- Plazo del túnel vía izquierda: 409 días

Y, deduciendo de este último, los 88 días que suman las 3 paradas obligadas, se obtienen la cifra siguiente que corresponde al proceso constructivo del segundo túnel:

- Plazo del túnel de vía izquierda: $409 - 88 = 321$ días

lo que confirma que en el segundo túnel se ha mejorado el plazo del proceso constructivo en 39 días (un 11 % respecto del plazo del primer túnel) gracias a las medidas previas tomadas a cabo y pese a las mayores dificultades que presentó el terreno, básicamente debidas al retraso en el comienzo del segundo túnel.

5

El relleno del espacio anular con bicomponente

De acuerdo con la tecnología actual de materiales para el relleno del espacio anular del trasdós de los anillos de dovelas prefabricadas de hormigón armado, colocadas con una tuneladora tipo Escudo, en los TÚNELES DE BOLAÑOS se ha empleado el material llamado comúnmente “bicomponente”.

El “espacio anular” (o “gap”) entre el trasdós de las dovelas y el terreno excavado por el Escudo, se venía relleno hasta hace algo más de 15 años exclusivamente con morteros de arena y cemento, bombeados desde los equipos auxiliares de la tuneladora.

Los defectos de este sistema, principalmente la imposibilidad de mantener bombeable el mortero más allá de 1 hora, por el comienzo de su endurecimiento; su falta de fluidez para llegar a los huecos más pequeños del “gap” y lograr un relleno completo y, por último, la pérdida de resistencia e impermeabilidad por lavado del cemento cuando existe un caudal significativo de agua del terreno, obligaron a realizar multitud de estudios hasta lograr una solución alternativa adecuada, el “bicomponente”, que es el material de uso generalizado hoy día en la construcción de túneles con Escudos, hasta el punto de que en muchos proyectos se prohíben los morteros de cemento y arena, exigiendo utilizar el “bicomponente”.

No obstante, y al igual que sucedía con los morteros de arena, en los escudos no presurizados, el bicomponente empezó a aplicarse relleno a la vez, y sin presión, el “gap” de varios anillos, cuyo número depende de la longitud del módulo de avance (es decir, de la longitud del anillo) y del diámetro del Escudo, de acuerdo con el talud que adopte el relleno.

Esto hacía imposible alcanzar las ventajas antes mencionadas, que habían sido un éxito en los escudos de frente a presión,

en los que, desde los primeros años de este siglo, se había empezado a inyectar el bicomponente a presión en cada uno de los sucesivos anillos del túnel.

Pues bien, en Bolaños el ADIF aprobó una propuesta del fabricante del Escudo para adaptarlo de acuerdo con un prototipo ensayado con éxito en laboratorio, de forma que con un escudo simple se pudiera inyectar el bicomponente a presión, rellenando uno a uno el “gap” de los anillos sucesivos.

Las modificaciones se aplicaron a la vez en dos escudos de tipo similar del mismo fabricante; además del de BOLAÑOS, el de un túnel en Cleveland (Ohio). Ambas aplicaciones tuvieron pleno éxito, por lo que puede decirse que en los túneles de Bolaños fue la primera vez que se aplicó en Europa la inyección a presión de bicomponente en un escudo no presurizado.

5.1. Composición y propiedades del bicomponente

5.1.1. Composición del Bicomponente

Este nuevo material es la combinación de los dos componentes siguientes:

- El “Componente A” (que designaremos abreviadamente como “Com A”) es una lechada densa de cemento, bentonita, agua y un retardante / estabilizante, que se mezclan en las proporciones aproximadas siguientes, respecto del peso total de la mezcla con que se fabrica este Com A:

- Cemento, 25 % (± 2 %)¹
- Bentonita, y retardante, 3,5 % (± 2 %). El retardante ≈ 15 % de la bentonita
- Agua, un 71,5 % (± 2 %)

- El “Componente B”, en lo que sigue “Com B” es un silicato (generalmente silicato sódico) que se emplea disuelto en agua, con una proporción de silicato respecto del peso total del “Com A”:

- Silicato, un 6 % (± 1 %)

5.1.2. Propiedades del bicomponente

- Propiedades del Com. A

- Al añadir el cemento a la mezcla de agua y bentonita prehidratada, previamente tratada en una “turbomezcladora” para generar un régimen turbulento, el tamaño de sus granos se reduce a dimensiones de “micelas”, que son las de las partículas de la bentonita, una arcilla pura, con lo que la mezcla se convierte en una suspensión coloidal.

- La primera consecuencia de ello es que las partículas del Com A no se decantan durante muchas horas en las tuberías y depósitos en que se almacena. La segunda es su baja viscosidad, que permite su bombeo a grandes distancias² (hasta unos 8 km y, aún más) sin desgastes sensibles de las bombas, que son generalmente de pistón.



Fig. 10. Planta de Bicomponente

• Propiedades del Com B

- Dado que se utiliza disuelto en agua, tiene todas las propiedades de un líquido para su manejo.

- Propiedades del Bicomponente

- La baja viscosidad de la mezcla hace posible alcanzar rápidamente los huecos a rellenar en el espacio anular rebordeando cualquier obstáculo que hubiera, como puede ser un trozo de terreno desprendido sobre el escudo.

- Al llegar al “tiempo de gelificación” (habitualmente entre los 10 a 25 segundos a partir de la unión de los 2 componentes y su inmediata inyección a presión en el espacio anular) el producto se convierte en gel, es decir, un sólido blando impermeable, que resiste bien la presencia de agua del terreno.

- A partir de ahí, el gel va incrementando su resistencia a la compresión que, a las 24 horas alcanza cifras próximas a los 0,5 MPa, progresando después, hasta llegar a valores de 2 MPa a los 28 días. Con ello, puede decirse que el relleno con “Bicomponente” tiene la resistencia de un suelo duro de calidad óptima, por lo que su aceptación como material ideal de relleno se ha generalizado definitivamente.

5.2. Características técnicas y otras condiciones exigidas en Bolaños al bicomponente

5.2.1. Características Técnicas y de suministro de los materiales (figura 10)

• CEMENTO. Se utilizó un cemento “portland” que cumplía las condiciones usuales para su empleo en estructuras de hormigón armado, además de ser resistente a los sulfatos, condición impuesta en el Proyecto, por su posible presencia en el terreno.

Se montaron dos silos de cemento de 100 t cada uno, para dedicar uno a la fabricación del bicomponente, mientras el otro recibía los suministros de la fábrica. Este segundo silo permitió reducir la temperatura del cemento antes de utilizarlo, cuando llegaba a la Obra a más de 50° C.

• BENTONITA. Se utilizó una bentonita de gran calidad suministrada a granel, seleccionada en las pruebas previas al inicio del TÚNEL DE VÍA DERECHA, en las que se eligió también un segundo producto alternativo, para utilizar en caso de dificultades de mercado.

La bentonita se almacenó en Obra en 1 silo, de una capacidad de 70 t.

• AGUA. Se usó agua potable del suministro local de la zona, que cumplía las condiciones habituales para su empleo en la construcción de estructuras de hormigón.

• RETARDANTE / ESTABILIZANTE. Debe ser un producto compatible con el Com. B. Se sirvió a granel, almacenándolo en Obra en un silo de unos 10 m³.

• ACELERANTE (Com B). Se empleó el producto seleccionado en las pruebas previas para el TÚNEL DE VÍA DERECHA. El producto se sirvió a granel, ya disuelto en agua almacenándolo en obra en dos tanques de unos 5 m³ cada uno.

Para el manejo del acelerante se siguieron Instrucciones de seguridad bastante estrictas, porque pueden afectar a la salud de los operarios.

• Por último, el Comp. A se bombeó desde el exterior con una bomba de pistones KSP hasta dos depósitos de 14 m³ cada uno, situados en el frente (figura 11).



Fig. 11. Depósitos de Comp A en el back-up de la TBM

5.2.2. Ensayos a cumplir por el Bicomponente

Los ensayos para la elección del cemento, así como los relativos al agua se hicieron por el Laboratorio de Obra previamente a la elección del resto de los materiales, pues la elección de los suministradores de los productos restantes ha de hacerse sobre porciones de Bicomponente fabricado en el Laboratorio.

Las recomendaciones generales seguidas en Bolaños, tanto para los ensayos de elección de suministradores, como para los que se realizaron después en la Obra, pueden resumirse así:

- 1) El material "estrella" del Com A es la bentonita, por lo que el producto de cada suministrador de bentonita debe ser sometido a ensayo en varias proporciones y con cada uno de los productos ofrecidos por los suministradores de silicato más retardante.
- 2) Por su parte, la bentonita hubo de cumplir el ensayo de exudación (índice de la estabilidad ante decantación) con resultado por debajo de las cifras < 3 % a las 3 horas y < 10 %, a las 24 horas.
- 3) Aunque, para eliminar el riesgo de atascos, la dotación usual de Com B suele estar en un entorno del 6 % del peso de silicato respecto del peso total del Com A, los ensayos de selección se realizaron por una parte en ese entorno del 6 % y por otra en el de cifras inferiores.

La razón de ello es que, si la cantidad de agua del terreno es significativa, puede ser necesario reducir el porcentaje hasta el entorno del 4,5 % a 5 % y, por ello, conviene saber la respuesta del Bicomponente que se ensaya antes de tomar esta decisión. Debe añadirse que, en los casos de afluencia masiva de agua del terreno, hubo que rebajar el % incluso a cifras próximas al 4 %, lo que también fue objeto de ensayos para la elección del acelerante.

4) Los requisitos mínimos exigidos a los ensayos a realizar en los casos anteriores fueron los siguientes:

- a) Al 4,5 % - 5 % de silicato
 - Tiempo de gelificación ("gel time") < 10 seg.
 - Cono de Marsh (Fluidez s/EN 445) < 50 seg.
 - Resistencia a Compresión a 1 día. $\geq 0,4$ MPa
 - Resistencia a Compresión a 7 días > 1,0 MPa (orientativa)
 - Resistencia a Compresión a 28 días $\geq 2,0$ MPa
- b) Al 6 % de silicato
 - Tiempo de gelificación ("gel time") < 30 seg.
 - Cono de Marsh (Fluidez s/EN 445) < 60 seg.
 - Resistencia a Compresión a 1 día. $\geq 0,4$ MPa
 - Resistencia a Compresión a 7 días > 1,0 MPa (orientativa)
 - Resistencia a Compresión a 28 días $\geq 2,0$ MPa

Como ya se ha dicho, además de los anteriores, se hizo el Ensayo de exudación de las bentonitas (Norma EN 445: cilindro 50 mm) por el que habían de cumplir: < 3 % a las 3 horas y < 10 % a las 24 horas.

5.2.3. Metodología de ensayos de laboratorio a realizar durante la obra.

A) Toma de muestras

- Com. A. Las muestras para el Laboratorio se recogieron, bien de la Planta de fabricación del exterior, o de los tanques de almacenamiento en la TBM. Para ello se utilizó un envase tipo "lechera".
- Com. B. Las muestras de silicato o Com. B se recogieron en otro recipiente separado, del depósito de unos 2.000 l montado en cada uno de los trenes que entraban al túnel o del de almacenamiento en la TBM, de una capacidad algo mayor.

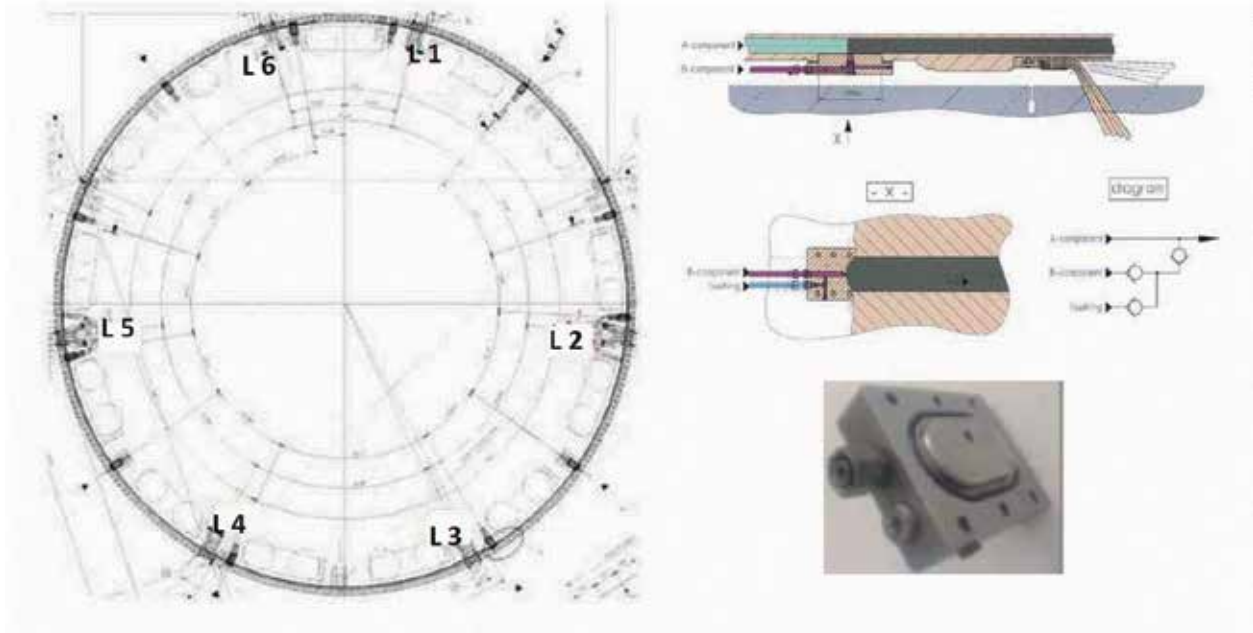


Fig. 12 Salidas de las 6 líneas de inyección en el Escudo de cola de BOLAÑOS y detalles de las mismas

- Bentonita prehidratada. Las muestras para el ensayo de exudación se tomaron de la planta exterior.

B) Ensayos

Todos los días en que la Planta de la Obra fabricaba Com. A, se tomaron muestras para hacer los ensayos siguientes:

- Un ensayo de exudación de la bentonita prehidratada según Normativa EN 445.
- Por otra parte, se tomaba una muestra de la mezcla de Com A, anotando su temperatura, para hacer el ensayo de viscosidad mediante Cono Marsh.
- Tiempo de gelificación. No hay un ensayo normalizado. El que hemos venido haciendo, de acuerdo con recomendaciones generalizadas en Europa, es el siguiente:

Se preparan 2 envases limpios, de sección constante (sin estrechamientos). Se hace la mezcla de Com A y Com B con la que se llena uno de ellos, a la vez que se arranca el cronómetro. Se va trasvasando dicha mezcla de un envase al otro hasta que el contenido de uno de ellos deja de caer libremente por la superficie interna del envase porque pasa de líquido a gel: el tiempo transcurrido que marca el cronómetro es el tiempo de gelificación.

- Es entonces cuando se llenan 3 probetas cúbicas con bicomponente, que se retiran y guardan hasta su desmoldeo a las 24 horas. Con ellas se realizan los ensayos de Resistencia a Compresión simple a las 24 horas.

Se fabrican otras tantas probetas más, que se pasan a la cámara de curado para la pruebas a 7 y 28 días. Las condiciones de curado dentro del túnel son similares a las de la cámara del laboratorio.

5.3. Control del relleno con bicomponente

5.3.1. Control general del proceso

El Bicomponente se inyecta en el espacio anular, o "gap", a través de varias líneas con "salidas" (en esta obra han sido 6) desde el Escudo de cola al "gap", cada una de las cuales está alimentada por dos bombas, una para el Com. A y la otra para el Com B, con sus caudalímetros respectivos, como puede verse en las figuras 12 y 13³.

Para confinar el relleno del "gap" de un anillo, se añadieron al escudo de cola, en su interior, dos juntas perimetrales de mastic a presión (llamadas también "junta de grasa") limitadas por tres filas de cepillos de alambre y, en su extremo final, un fleje de dos filas de chapas que van rozando contra el terreno, según avanza la tuneladora. Las juntas de mastic sirven de cierre frontal del "gap" al actuar entre el interior del escudo de cola y el trasdós del anillo, y los flejes lo hacen como cierre posterior del "gap", entre el final del escudo de cola y el terreno.

Por la naturaleza del producto que se bombea, estas bombas, "de rodete excéntrico" (también llamadas "de husillo") funcionan con total regularidad y la precisión de sus caudalímetros es muy elevada, por lo que el sistema ofrece datos totalmente fiables de los volúmenes inyectados, datos que el autómata del Sistema recoge en tiempo real de lo inyectado por cada línea, y que pueden imprimirse como indica la figura 14.

Al dispositivo anterior, suele añadirse una línea más con su bomba correspondiente, una de Com. A y otra de Comp B con tomas a lo largo del "back-up", que se utilizan para hacer inyecciones secundarias (en el caso de BOLAÑOS, la Línea 7) Como se ve en la figura, al terminar la inyección de un anillo,

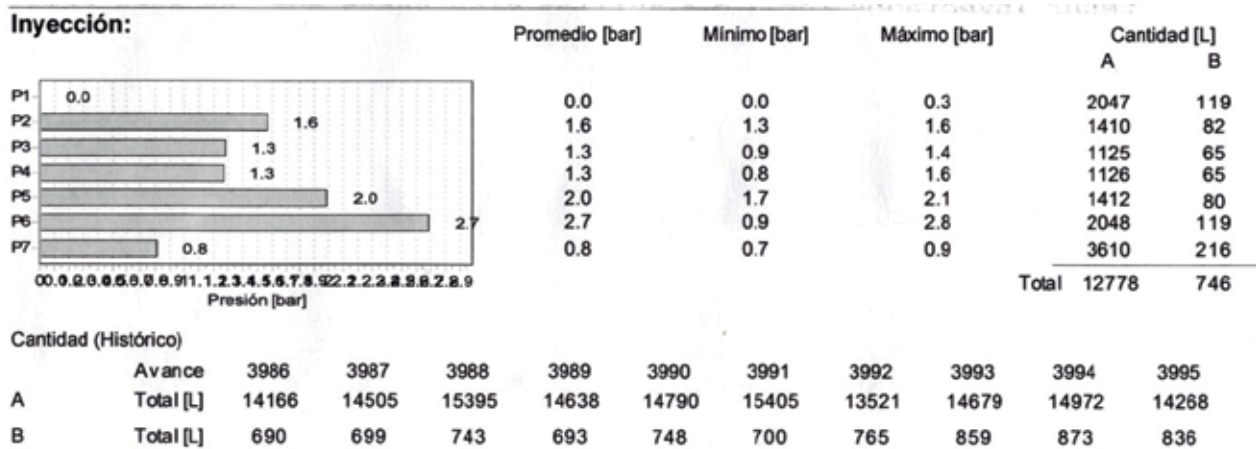


Fig. 13. Líneas y caudalímetro de Salida de los tanques de "Com. A"

Fig. 14. Registros de la inyección en tiempo real

los registros indican los volúmenes inyectados por cada línea y, por otra parte, se visualiza el "registro histórico" de los volúmenes totales correspondientes a los anillos anteriores.

Por otra parte, el Jefe de túnel del Constructor conoce "a priori" las variaciones que ha tenido la pesada de la excavación del "modulo" del anillo que va a inyectar porque dispone de los registros de las balanzas que controlan la pesada de la excavación real del "avance" correspondiente que se ha hecho con anterioridad, debido al desfase que hay entre la excavación y la inyección de cada "avance" (desfase que depende de las longitudes del anillo y del escudo: distancia entre la Cabeza de corte y el escudo de cola).

Dicho de otro modo, la excavación del anillo a inyectar es la del "avance" realizado unos 4 o 5 módulos antes, por lo que el

Jefe de túnel puede saber en qué zona de la “Hoja de ruta”, o “Modo de Operación” (Verde, Ámbar o Roja) se ha calificado y, en consecuencia estimar el volumen total esperable a inyectar y comprobar después si los registros responden a esa previsión, o hay alguna anomalía. Con todos estos recursos, el Constructor puede hacer un correcto control de la inyección de cada anillo.

5.4. Las inyecciones secundarias

Las inyecciones secundarias, a las que nos referimos a continuación, se han de hacer siempre de la forma siguiente:

1) Se inyecta a través del orificio de las dovelas, retirando el tapón que lo protege para perforar el espesor mínimo de hormigón del fondo, que después puede taponarse adecuadamente con resina.

2) Las inyecciones se deben hacer siempre por los orificios de las dovelas de la semisección superior del anillo, ya que, por una parte, el peso de la TBM “descentra” verticalmente el anillo, siendo prácticamente imposible que en la semisección inferior haya huecos, que, de existir, ocupan el sector circular en la bóveda, correspondiente a un ángulo de 45° a uno y otro lado del eje del túnel.

Las inyecciones secundarias están motivadas por dos objetivos principales: la eliminación de huecos en el relleno y la corrección de filtraciones.

5.4.1. Eliminación de huecos del relleno

Si, por la razón que sea, no hay la correlación debida entre la pesada de la excavación y la inyección de relleno, el Constructor dispone de la Línea 7 citada para efectuar una inyección secundaria en el anillo correspondiente.

Como las tomas en dicha línea pueden hacerse a lo largo del “back up”, para hacer esta inyección debe esperarse a tener inyectados los 3 o 4 anillos siguientes que, de esta forma, sirven de “sello” para que la inyección se concentre en el anillo a tratar.

5.4.2. Inyecciones para la corrección de filtraciones

Las inyecciones secundarias han de usarse también para corregir las filtraciones de agua del terreno que se produzcan por las juntas u orificios de los insertos de los anillos con flujos de caudal apreciable, así como para eliminar goteos o simplemente humedades persistentes, como se hizo en BOLAÑOS.

En tales casos, se procede de la misma forma indicada en los párrafos precedentes.

3) Ahora bien, en los casos de caudales significativos de las aportaciones de agua del terreno la primera medida a tomar es la reducción a un 5 % de la dosis de Com. B, respecto del peso total del Com A.

4) Y si las aportaciones de agua alcanzan cifras importantes, puede ser necesario rebajar al 4 % la dosis de Com.B. Para tales casos se debe seguir un Procedimiento de tratamiento de grandes filtraciones en el que se indiquen las medidas y orden de aplicación de las mismas, tales como: propues-

ta de crear un “sellado previo” de la zona a tratar; perforaciones para concentrar la/s salida/s de caudales importantes y el sistema de su obturación final, como se hizo en BOLAÑOS, y que puede verse en la referencia [3] de la Bibliografía.

5.5. Supervisión del relleno del trasdós por la dirección de obra

La Dirección de Obra del ADIF recibió diariamente para su aprobación o reparos los datos relativos a la Fabricación diaria del Bicomponente, así como a los Resultados de los ensayos de roturas de probetas realizados en el día.

Por otra parte, dispuso también de los relativos a la Inyección de Bicomponente a través de las Hojas de control de los volúmenes inyectados, en la forma indicada en la figura 14.

Con ello, se pudo verificar si el relleno se había hecho en la forma adecuada o redactar en caso contrario una NO CONFORMIDAD, a resolver por la Contrata.

Por otra parte, y aproximadamente cada 100 avances, se obtuvieron muestras del relleno de Bicomponente para confirmar la inexistencia de huecos. Las normas seguidas fueron las siguientes:

5) Los sondeos deben perforarse con sondas para un diámetro del testigo del orden de los 50 mm como mínimo y no antes de las 48 horas para evitar que se dañe la muestra.

6) Las perforaciones se harán a través de los huecos de las dovelas para evitar el atravesar todo su espesor y siempre en las dovelas de la semi-sección superior del anillo.

7) La perforación debe entrar unos centímetros en el terreno lo que será la confirmación final de que el relleno ocupa todo el espesor del “gap”

En los casos de NO CONFORMIDAD, se procedió a efectuar las inyecciones secundarias de relleno necesarias para subsanar el defecto.

6 Conclusiones

Los TÚNELES GEMELOS DE BOLAÑOS son un referente a nivel mundial, que ofrece el ADIF, Organismo autónomo del Ministerio de Fomento de España para la tecnología actual de la construcción de túneles con cualquiera de los dos tipos de escudo abierto, que ofrece el mercado de Tuneladoras para roca dura o muy dura, los usualmente conocidos como “simple escudo” y “doble escudo”.

Y la razón en que basamos esta conclusión es que en BOLAÑOS, como se describe en el artículo, se ha demostrado la viabilidad de las dos soluciones con las que se han resuelto las limitaciones más importantes que presentaban estos tipos de TBMs:

a) La aplicación de resinas órgano-minerales para la excavar los tramos de túnel con frentes inestables, sin necesidad de parar el avance para aplicar sostenimientos previos complementarios, ajenos al Sistema constructivo, y

b) La modificación del diseño de estas TBMs para utilizar la inyección a presión de bicomponente, como nuevo material de relleno del espacio anular de cada uno de los sucesivos anillos colocados.

La primera de estas dos soluciones es un paso inicial que debe ser perfeccionado, lo que esperamos suceda en un próximo futuro

Por lo que se refiere a la segunda, el bicomponente, como material de relleno ideal tiene ya la acreditación definitiva, tras unos 20 años de experiencia con pleno éxito, desde los primeros ensayos japoneses de finales del pasado siglo, por lo que la construcción de los TÚNELES DE BOLAÑOS aporta unas recomendaciones relativas al Control de su Calidad, que entendemos de interés general.

Pero la aportación de BOLAÑOS que puede considerarse definitiva es el diseño de este tipo de Escudos de roca dura, con el fin de utilizar la inyección a presión del bicomponente, por las ventajas que reporta el relleno, uno a uno, del “gap” de los anillos del revestimiento con lo que estas máquinas abiertas han quedado equiparadas a los Escudos presurizados. ☺

REFERENCIAS

- 1 • ADIF (Varios autores) Jornadas técnicas sobre túneles de la L.A.V. a Galicia. “Túneles de Vilariño a Campobecerros”. A Coruña Noviembre 2011.
- 2 • Ballantyne, B. “Bolaños Tunnel Report” TUNNELS AND TUNNELING International Edition Abril 2017.
- 3 • Galindo F., Carballo R., “Línea de Alta Velocidad Madrid-Galicia. Construcción del tramo Vilariños - Campobecerros” INGEOPRESS (Madrid) nº 255 Diciembre 2016.
- 4 • Kucher, Matias. “Test for study the distribution of the component A within the 2 component A+B layers” Edit. HERRENKNECHT AG. Schwanau (Alemania) 2010
- 5 • Kucher, Matias. “Training system & service seminar: bicomponent bock filling” (Curso dictado en Londres) Edt. HERRENKNECHT AG. (Alemania) Abril 2011.
- 6 • Mendaña F. et alt. “Relleno con bicomponentes del gap de los anillos de dovelas en los escudos no presurizados”. Revista de Obras Públicas (Madrid) nº 2 3546 (Septiembre 2013).
- 7 • Mendaña E, Villanueva J. P. “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 las Línea de AVE a Galicia”. Revista de Obras Públicas (Madrid) nº2 3557 (September 2014).
- 8 • Resche A., Noppenberger C. “Brisbane Airport link earth pressure balance machine: Two component tails king grouting, a new Australian record” Proceedings of the 14 th Australian Tunneling Conference (2011).
- 9 • R. Ventosa, J. “Bajo la montaña gallega” FERROCARRIL (Madrid), Marzo 2017.
- 10 • Vitale, M. G.et alt. “Innovation in annular grouting at the Euclid Creek tunnel. Cleveland (Ohio)” Proceedings of the R.E.T.C. USA Juin 2013.

NOTAS

(1) En el caso de BOLAÑOS, el cemento fue un 28 % del total por utilizar cemento de escorias resistente a los sulfatos. Con cementos no compuestos, (100 % de “Clinker”) se puede trabajar sin problemas con dosis del entorno de los 250 kg/m³, que es, aproximadamente a lo que corresponde el 25 % que se indica.

(2) Debido a ello, se habla con frecuencia de su fluidez, lo que no es totalmente correcto, porque la fluidez es una característica propia de los líquidos y no de los lodos.

(3) Para más detalles puede consultarse la Bibliografía publicada en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS. Ver nºs [6] y [7]