


## De la Línea de Alta Velocidad Madrid Extremadura

# La depuración en el Túnel de Santa Marina (Cáceres)

En este artículo se muestra un claro ejemplo de cómo solucionar los problemas de grandes avenidas de agua procedentes de los túneles en ejecución. El Túnel de Santa Marina, con una longitud de 3595 m, forma parte del trazado de la línea de Alta Velocidad Madrid –Extremadura, Talayuela – Cáceres, tramo: Grimaldo – Casas de Millán. la Obra ha sido adjudicada a la UTE AVE GRIMALDO-CASAS DE MILLAN (Construcciones Sanchez Dominguez- SANDO S.A.; Obras Subterráneas S.A.- OSSA; y Construcciones Sevilla Nevado), y la Asistencia de Control de Obra ha sido adjudicada a UTE SANTA MARINA (Euroconsult; Paymacotas).

Palabras clave: AGUA, BALSAS, CAUDAL, CUARCITA, DECANTACIÓN, DEPURACIÓN, FANGOS, FLOCULACIÓN, PHARSALL, PIZARRAS.

 Pablo JIMÉNEZ GUIJANO, ICCP, Jefe de infraestructura de ADIF.  
Agustín TEJEDOR CASTAÑO, ICCP, Director de obra de INECO.  
Raquel CIENFUEGOS ÁLVAREZ, ICCP, Responsable Calidad, Medio Ambiente e I+D+i de OSSA.

Los trabajos de excavación del Túnel en su emboquille Sur (situado en el Termino municipal de Casas de Millán), dieron comienzo en abril de 2011. Desde entonces los diversos cauces que discurrían por la ladera fueron drenando sus aguas a la excavación. Los materiales excavados en la boquilla del túnel, de naturaleza fundamentalmente pizarrosa, permitían la circulación de agua de forma muy lenta, proviniendo los aportes fundamentalmente de escorrentía superficial. La primera planta depuradora de la obra se montó con capacidad de tratamiento 35m<sup>3</sup>/hora. De forma que mientras la excavación transcurría por materiales predominantemente pizarrosos, los caudales fueron asumidos por este sistema de depuración.

A medida que la excavación avanza, el volumen de agua y con ella la cantidad de lodos que se generan aumenta notablemente. Este incremento de volumen se ve favorecido por la presencia de niveles decimétricos de cuarcitas intercaladas entre las pizarras, lo que favorece la circulación de agua por fracturación. Esto obliga a la obra a dimensionar una nueva planta de tratamiento capaz de depurar este aumento de caudal.

Se deciden construir balsas de decantación más grandes y hacer una ampliación en la depuradora inicial para alcanzar un tratamiento de 80m<sup>3</sup>/hora. Se instaló antes de la depuradora un aforador Pharsall de 6", entonces



[Fig. 1] .- Depuradora inicial para el tratamiento de 15m<sup>3</sup>/hora.

dieron comienzo las mediciones diarias de caudal. Los valores medidos fueron tan elevados que fue necesaria la paralización de la excavación en avance para dar paso a la ejecución de inyecciones de impermeabilización, consiguiendo reducir el caudal.

Paralelo al túnel principal transcurre una galería de evacuación. La cual se va ejecutando al mismo tiempo que el túnel. Cuando se para la excavación en avance del túnel, los trabajos en la galería continúan. Como consecuencia de un empeoramiento del frente de la galería, apareciendo una mayor fracturación de cuarcitas, presencia de arcilla en las juntas y gran abundancia de agua, se origina un desprendimiento, lo que provoca un aumento en los caudales. Para solucionar los problemas se es-

tudia la posibilidad de ampliar la depuradora para llegar a tratar 510m<sup>3</sup>/hora, reforzándola con dos decantadores, un espesador de fangos y un mayor número de balsas de decantación. Al mismo tiempo el nivel freático desciende y se estabiliza completamente el desprendimiento.

Continuando con los trabajos de la galería de evacuación, el caudal se mantiene prácticamente invariable. A medida que avanza la excavación, la fracturación en el frente vuelve a aumentar, produciéndose un incremento del caudal durante varios días.

### Ampliación

Puesto que los volúmenes de agua residual generados se cifraban en aproximadamente 510m<sup>3</sup>/hora, con una concentración media estimada de 3000mg/l, y punta hasta 25000 mg/l, se construye una depuradora capaz de tratar dicho caudal.

El diseño de la depuradora se realizó con el fin de obtener unos valores finales de calidad que cumplieran con las exigencias de la Confederación Hidrográfica del Tajo en la materia y para su vertido a cauce público, los cuales se cifran en:

Ph: 6,0-9,0  
S.S.: ≤35 mg/l  
DBO5: ≤5 mg/l  
DQO: ≤125 mg/l  
Aceites y grasas: <20 mg/l.



[Figs. 2 y 3].- Medidor Pharsall de 6".

[Figura 4] .- Túnel en ejecución de avance.





■ [Figura 5].- Ampliación planta depuradora

La planta depuradora instalada permite el tratamiento de las aguas industriales y fangos generados en las obras de perforación del túnel principal y la galería de evacuación.

### Etapas de tratamiento

Considerando la línea de operación:

- **Línea de entrada del tratamiento:** Esta línea consiste en un laberinto tranquilizador y de mezcla, donde se aditiva coagulante y floculante para incentivar la separación por gravedad de los sólidos presentes en las aguas.
- **Balsas de entrada:** Se construyen un total de cinco balsas, para la recepción, adecuación y distribución de las aguas residuales. El agua entra en la primera balsa, de dimensiones 10x10x 4m, desde donde pasa por rebose a la segunda balsa que es de neutralización, 200m<sup>3</sup> de capacidad, en la cual se encuentran situadas dos parrillas difusoras de CO<sub>2</sub>. El agua pasa también por rebose a una tercera balsa, encontrándose estas tres balsas en línea, desde la cual por tubería se envía a las dos últimas balsas. Esta línea de balsas tiene una capacidad total de 1.000m<sup>3</sup>. Desde la primera balsa, donde se produce la decantación primaria, y desde la neutralización se bombea el agua, a una línea de decantadores lamelares. Se produce también un bombeo de fangos, mediante dos bombas sumergibles de extracción de fangos con luz de paso de 30mm, que envían el fango a la línea de tratamiento de los mismos. Debido a la cantidad de caudal a tratar, de la tercera balsa se conduce por tubería parte del agua, a una nueva línea de balsas. Compuesta por una nueva balsa de neutralización, de dimensiones 80x8x4m, con dos nuevas parrillas difu-

soras para la adecuación del pH del agua de entrada.

Por rebose pasa a una nueva balsa donde se bombea el agua a la segunda línea de decantadores.

- **Línea de tratamiento de aguas:** Se compone de dos sublíneas paralelas con los mismos tratamientos, diferenciándose en el caudal de carga de cada una. El bombeo de aguas residuales desde la balsa de neutralización, se realiza mediante bombas sumergibles. En la cámara de floculación se consigue una disminución de la velocidad del agua para conseguir una correcta mezcla de los coagulantes y floculantes. El decantador lamelar consigue separar, decantar las partículas y lodos floculados. Los fangos separados se extraen mediante una válvula automatizada y se envían al correspondiente tratamiento. Una vez concluido el tratamiento, el agua se puede verter a cauce.

### Línea de tratamiento de aguas

Las aguas residuales entran al proceso directamente al *laberinto tranquilizador*, en el cual se le proporciona al agua influyente una velocidad adecuada. Este laberinto también se utiliza de mezclador añadiendo coagulante y floculante.

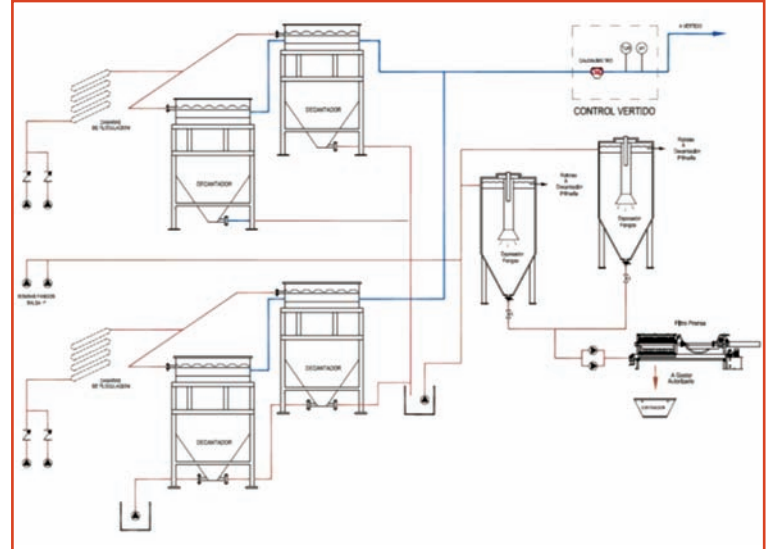
Las bocatomas secundarias están conectadas con los túneles, bien por pozos, o túneles inclinados de flujo libre.

A la salida del laberinto, se envían las aguas a las balsas de decantación primaria y neutralización. En la primera balsa de decantación primaria y en las dos balsas de neutralización se pro-

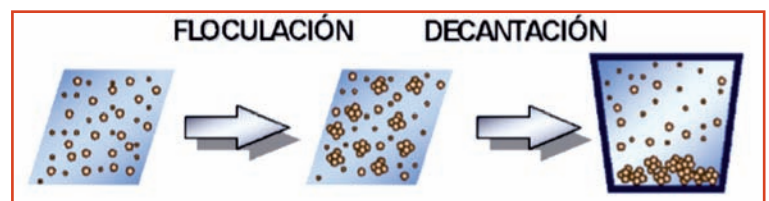
duce la deposición de fangos, por lo que se instaló en cada una de ellas una bomba para extracción de los mismos a la línea de tratamiento específica. La entrada en funcionamiento de las bombas estará controlada por las boyas de nivel que se instalen en la arqueta de bombeo.

En esta planta de tratamiento se emplean dos *cámaras de floculación*, una por cada sublínea descrita, de diseño serpentínico facilitando la adecuada turbulencia en el agua para producirse una adecuada mezcla con el aditivo. Es estas cámaras es donde se introduce el coagulante y floculante según el caudal de entrada al tratamiento. La determinación exacta de la cantidad de coagulante y floculante se realiza experimentalmente y en su selección se valora tanto el rendimiento como el coste del aditivo. Para la dosificación del aditivo se emplea una bomba dosificadora de uso para bajas presiones de descarga. Estas bombas pueden funcionar en seco sin que ello dañe a la bomba y están preparadas para un funcionamiento continuo de 24 horas.

El agua residual adecuadamente aditivada se introduce en una serie de *decantadores* para proceder a la adecuada separación de los flóculos formados, clarificando la corriente del agua. En este tipo de decantadores, los flóculos se aglomeran entre sí en su caída, aumentando progresivamente de tamaño y, por tanto, de velocidad de sedimentación.



■ [Figura 6].- Diagrama de flujo de la nueva planta depuradora



■ [Figura 7].- Esquema de floculación y decantación.

En estos equipos, el sólido al pasar a través de las placas decanta sobre la superficie de las mismas, deslizando debido a su inclinación, hasta caer al fondo de tanque donde se producen la purga o extracción. Una ventaja de estos equipos es el requerir menor espacio, y ser las unidades más compactadas.

Se instalaron cuatro decantadores lamelares, dos de dimensiones 2,5 x 3 x 5 m y dos de 4x4x 5 m de mayor capacidad de decantación. El tiempo de retención a caudal máximo del decantador considerado es de 20 minutos, lo que facilita la adecuada decantación de los sólidos.

Para la extracción de los sólidos separados en el decantador se dispone de una bomba neumática, con un diseño de conducto humedecido, tecnología de diafragma progresiva y operación libre de fugas durante la vida útil de la bomba. Estas bombas extraen los fangos separados mediante su accionamiento programado y los envían al espesador de fangos.

Para el control de vertido se instaló, un caudalímetro, un PHmetro y un medidor de turbidez, pudiendo de esta manera verificar que en todo momento el vertido está dentro de los límites establecidos por la legislación vigente.

## Línea de tratamiento de fangos

Los fangos separados en las balsas son bombeados a su correspondiente tratamiento mediante *bomba* especial para trasiego de fangos, que se desplaza por la balsa suspendida con un polipasto, la cual envía los fangos a los espesadores.

Los fangos bombeados desde las balsas y los extraídos de los decantadores lamelares mediante bombas neumáticas, se unen en la misma línea de tratamiento, siendo tratados mediante un sistema de *espesado por gravedad*, procedimiento que permite incrementar el contenido de sólidos del fango por eliminación de parte de la fracción líquida. En este caso, el sobrenadante que se obtiene se retornará a la balsa de entrada para su posterior tratamiento.

La segunda etapa en el tratamiento de fangos corresponde a la mencionada deshidratación mediante *filtro prensa*. En estos equipos, la deshidratación se realiza forzando la evacuación del agua presente en el fango por la aplicación de una presión elevada. Sus ventajas son varias, incluyéndose las altas concentraciones de sólidos en la torta, la obtención de un líquido filtrado muy clarificado, la elevada captura de sólidos y el bajo consumo de productos químicos.

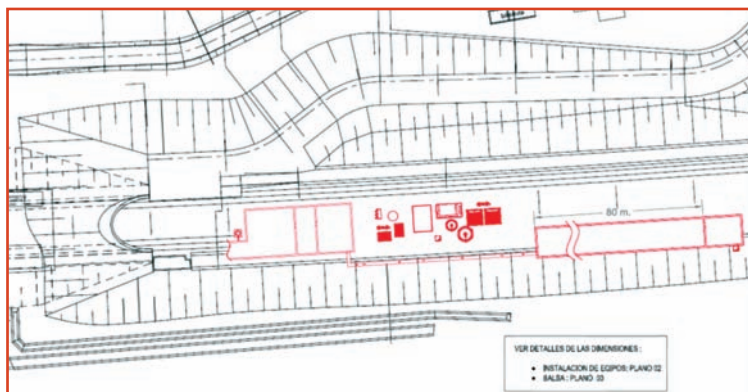
Los fangos espesados y deshidratados, con una considerable reducción en su volumen, son retirados mediante medios mecánicos y llevados a vertederos.

## Dimensionamiento de la planta

El cálculo se realizó para un caudal medio de trabajo de 510m<sup>3</sup>/h, y suponiendo una carga contaminante media de sólidos en suspen-



[Figura 8] .- Filtro prensa de la planta de tratamiento.



[Figura 9] .- Situación de la planta de tratamiento.

sión de 3000 mg/l, y puntas de 25000 mg/l.

Los datos de partida tomados para el cálculo de la dimensión de la planta de tratamiento fueron los siguientes:

- Volumen de agua diario → 12240 m<sup>3</sup>/día
- Caudal medio horario → 510 m<sup>3</sup>/hora
- Caudal punta horario → 520m<sup>3</sup>/hora
- Carga SS → 3000 mg/l.

### Dimensión de la línea de agua

En la decantación primaria, tomando para el diseño unos valores de: 45 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d de carga superficial a caudal medio, y 2 h de tiempo de retención, se obtiene:

$$Carga = \frac{Q}{S} \Rightarrow 45 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} = \frac{12240 \frac{m^3}{d}}{S} \Rightarrow S \approx 272 m^2$$

$$V = Q \cdot t_r \Rightarrow V = \left( 12240 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{1 d}{24 h} \right) \cdot 1 h \Rightarrow V \approx 510 m^3$$

$$V = Q \cdot T_r \quad V = S_h \cdot x \cdot h$$

Igualando estas fórmulas

$$h = Q \frac{T_r}{S_h} = 510 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} \cdot \frac{1 h}{200 m^2} = 2,55 m$$

Se construyeron cinco balsas con un volumen global de decantación de 3600 m<sup>3</sup> de capacidad. Con este dimensionamiento se consiguió proporcionar un rendimiento a la carga contaminante del 50% como mínimo, por lo

que la concentración de salida de esta etapa sería de 1500 mg/l, la cual se consideró carga de entrada para la siguiente etapa.

La dosificación óptima del coagulante puede estimarse en 25-30 mg/l. Considerando esta dosis, la cantidad de coagulante consumido diariamente con una operación continua de 24 horas, es de:

$$\frac{11,25 L \text{ coag}}{h} \cdot 24 h = 270 L$$

Para determinar el tamaño de los equipos de decantación lamelar, se ha empleado el índice de sedimentación. Para el tipo de partículas típicas del agua residual, puede estimarse un valor de parámetro de 1.15 m<sup>3</sup>/horas por m<sup>2</sup> de área horizontal proyectada.

$$IS = \frac{Q}{S} \Rightarrow 1,5 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} = \frac{510 \frac{m^3}{h}}{S} \Rightarrow S = 340 m^2$$

Se consideró la utilización de paquetes lamelares con una inclinación de 60°, y espaciado lamelar de 80 mm con placas de 1040 x 940 mm, la superficie equivalente de cada una de ellas fue:

$$\cos 60 = \frac{L'}{1.040} \Rightarrow L' = 611$$

$$S_{equiv} = L' \cdot 940 \Rightarrow S_{equiv} = 0,57 m^2$$

Ante el elevado caudal de trabajo, se decidió disponer de un total de cuatro decantado-



■ [Figura 10].- Balsa de decantación.



■ [Figura 11].- Planta depuradora para 510 m³/hora.

res lamelares separados en las dos líneas de agua complementarias. Cada una de las lamelares de los decantadores tiene una superficie equivalente de 0.57 m<sup>2</sup>.

#### Dimensión de la línea de fangos

Se ha considerado un caudal medio de agua residual de 510 m<sup>3</sup>/h y un contenido medio de sólidos en suspensión de 3.000 mg/l, la cantidad diaria de sólidos aportados a la planta son de 27.360 kg en fracción seca. Una salida adecuada de 50 mg/l de sólidos, que supondría diariamente 180 kg, la diferencia entre la primera y la segunda es el total de kg de sólidos en suspensión a extraer. Esta cantidad alcanzaría el valor de 27.180 kg diarios.

El espesado de gravedad requiere un tiempo de retención aproximado de 2 horas, por lo que se requiere un volumen de espesador de 60m<sup>3</sup>; para ello se han instalado dos espesadores: uno de 50m<sup>3</sup> (4m de diámetro y 6,83m de altura; y otro de 20m<sup>3</sup> (3m de diámetro).

La generación de fangos que se generan en fracción seca es de 1140 kg de sólidos en una hora. Estos sólidos se extraerán del espesador de fangos con una humedad del 90%, lo que significará un volumen de fangos de 11.400 kg/h, con densidad de 1,3 gr/m<sup>3</sup> y supondrá un volumen a tratar:

$$11.400 \text{ kg} \times \frac{1.000 \text{ dia}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ cc}}{1.3 \text{ gr}} \times \frac{1 \text{ l}}{1.000 \text{ cc}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ l}} = 8,77 \text{ m}^3/\text{h}$$

El filtro prensa dispone de 80 placas de dimensiones 1.000 x 1.000 mm de superficie y 0,03 m de espesor. La torta tras la filtración presenta una humedad máxima del 40 %, por lo que la fracción seca de la torta supondrá el 60% del volumen total del filtro, esto es 1.848 kg en una hora. Esto supone una capacidad de filtración superior a la necesaria en un 20%.

Además el tiempo de duración de un ciclo de filtrado se cifra en 40 minutos. El filtro prensa en 40 minutos podrá tratar un 20% más de fangos que los que se generan en una hora de trabajo, lo que supone un filtro prensa sobredimensionado en un 50% superior a la necesaria para la hipótesis de trabajo. Esto permitirá tratar posibles puntas de generación de fangos e incluso fangos procedentes de otros.

#### Consumo de aditivos

Los aditivos involucrados en los tratamientos de aguas inicialmente son:

- Policloruro de aluminio al 18% (coagulante).
- Polielectrolito catiónico / aniónico (floculante).
- CO<sub>2</sub>.

Los consumos estimados anualmente, considerándose 24 horas de tratamiento al día y 365 días al año, esto es 4.467.600 m<sup>3</sup>/año, se cifran en:

- Policloruro de aluminio: 475 t/año.
- Polielectrolito aniónico/catiónico: 24 t/año.
- CO<sub>2</sub>: 72 t/año.

#### Potencia eléctrica instalada

Para el cálculo de la potencia eléctrica necesaria a instalar, se han tenido en cuenta varios factores, así como el bombeo de agua, bombeo de fangos, dosificación de aditivos, preparación de polielectrolito, filtro prensa, compresor y la neutralización del CO<sub>2</sub>. Teniendo en cuenta el modelo, características, unidades, y potencia necesaria de cada uno de los factores anteriormente citados, instalamos una potencia de 150.18 KVA.

#### En la actualidad...

A día de hoy han terminado los trabajos de excavación del túnel principal y galería de evacuación. La planta depuradora logró solventar todos los problemas surgidos durante la fase de excavación, depurando las grandes avenidas de agua y adecuándolas para cumplir con los parámetros de agua contaminante establecidos en la normativa vigente para el vertido a cauce público.

La planta depuradora sigue funcionando al 100% a un régimen de 17l/s, mientras la fase de ejecución del túnel consiste en los trabajos de impermeabilización y revestimiento.

#### Conclusiones

Al cortar materiales *cuarcíticos* con *pizarrosos* en la fase de excavación en avance de la boca sur del *Túnel de Santa Marina*, se produjeron grandes avenidas de agua, las cuales no estaban previstas, y el sistema de depuración implantado no era suficiente. Con lo cual se tuvo que optar por diseñar una depuradora capaz de tratar los grandes caudales de agua que se producían, pese haber realizado inyecciones

de impermeabilización en el túnel. Se llegaron a tomar medidas de caudales mediante un aforador *Pharsall* de 730 m<sup>3</sup>/hora.

Se tomó la decisión de ampliar la depuradora inicial de caudal de tratamiento 35m<sup>3</sup>/h, hasta una planta depuradora con capacidad de tratamiento de 510m<sup>3</sup>/h. Para ello se construyeron varias balsas de decantación de gran capacidad y se amplió notablemente la línea de tratamiento de depuración-decantación.

La depuradora finalmente instalada, podía tratar caudales de hasta 510m<sup>3</sup>/hora con una concentración media estimada de 3000 mg/l, y punta hasta 25000 mg/l. Para ello se instaló una línea de entrada del tratamiento, la cual constaba de un laberinto tranquilizador y de mezcla donde se aditiva el coagulante y el floculante para incentivar la separación por gravedad de los sólidos presentes en las aguas.

La siguiente etapa consistió en la construcción de cinco balsas de decantación para la recepción, adecuación y distribución de las aguas residuales; el agua entra en la primera balsa desde donde por rebose pasa a la segunda balsa que es de neutralización (en la cual se encuentran las parrillas difusoras de CO<sub>2</sub>), el agua también pasa por rebose a la tercera balsa, encontrándose estas tres balsas en línea, desde la cual por tubería se envía a las dos últimas balsas.

La tercera etapa que se instaló fue la línea de tratamiento de aguas, la cual se compuso por dos sublíneas paralelas con los mismos tratamientos, instalando un bombeo de aguas residuales desde la balsa de neutralización, la instalación de la cámara de floculación y a su vez la instalación de cuatro decantadores lamelares. Para la deshidratación mecánica se contó con la presencia de un filtro prensa, obteniendo grandes ventajas así como las grandes concentraciones de sólidos en la torta, la obtención de un líquido filtrado muy clarificado, la elevada captura de sólidos y el bajo consumo de productos químicos. ♦

**OBRAS SUBTERRÁNEAS, S.A.**  
Aragoneses, 2 A • P.I. Alcobendas  
28108 Alcobendas (Madrid)  
☎: 917 823 400 • Fax: 915 624 298  
E-m: [info@ossaint.com](mailto:info@ossaint.com)  
Web: [www.ossaint.com](http://www.ossaint.com)