

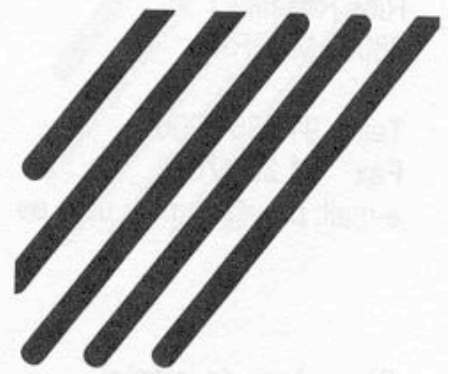
ingeo TÚNELES



INGENIERÍA
DE TÚNELES



ingeo



TÚNELES

SERIE: INGENIERÍA DE TÚNELES

LIBRO 5

capítulo 9



Laars LANGMAACK
MBT International

TECNOLOGÍA AVANZADA DE ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO EN TÚNELES CONSTRUIDOS CON ESCUDOS EPB

1. INTRODUCCIÓN

El método de construcción de túneles con escudos de equilibrio de presión de tierras (EPB) es bien conocido en el mundo de la Ingeniería civil, pero existen aún procesos no explicados que requieren una mayor comprensión. Esto se refiere en particular a los diferentes aditivos de acondicionamiento que existen, sus funciones y su empleo *in situ*. Una cuestión importante es el control de los factores clave correspondientes para obtener el acondicionamiento deseado y, al mismo tiempo, un avance rápido de la TBM sin problemas importantes.

2. SOSTENIMIENTO DEL FRENTE

El factor más importante -no sólo en construcción de túneles mediante en método equilibrio de presión de tierras- es equilibrar la presión del terreno en la cabeza de corte mediante una contrapresión en la cámara de trabajo. Para calcular la contrapresión necesaria existen diversos programas de cálculo del sostenimiento del frente que depende también del tipo de terreno *in situ*.

2.1. Sostenimiento del frente en terrenos granulares no cohesivos o ligeramente cohesivos

En terrenos no cohesivos o ligeramente cohesivos la presión mínima de sostenimiento requerida teóricamente se puede determinar mediante un modelo de equilibrio límite tridimensional (véase la Fig. 1).

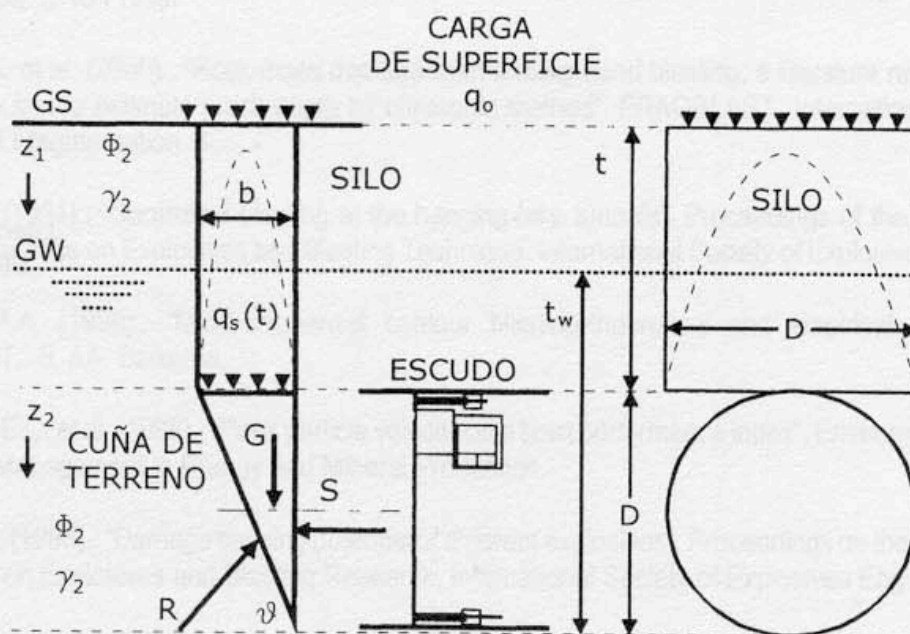


Figura 1. Modelo de equilibrio tridimensional para suelos no cohesivos.

Los detalles de las soluciones teóricas se pueden encontrar en diversas publicaciones (Jancsecz & Steiner, 1994).

2.2. Sostenimiento del frente en suelos cohesivos

El análisis del equilibrio límite en suelos saturados y cohesivos puede asumir los siguientes parámetros de cizalla (carga a corto plazo): el ángulo de fricción interna $\Phi_u = 0$ ($K_0 = 1$).

$$\tau = s_u \text{ kPa}$$

La solución de estabilidad se puede obtener empleando un mecanismo simple de colapso cinemáticamente admisible. Es posible deducir una función límite a partir de la ecuación de presión de tierras para el llamado Factor de Estabilidad (N):

$$N = \frac{4}{\pi} 3,4 \left(1 + \frac{t}{D} \right)$$

El Factor de Estabilidad es una relación crítica para el colapso total del frente, N_{crit} , en estado de equilibrio límite. Broms y Bennermark (1967) lo definieron por primera vez como la relación entre la presión del recubrimiento reducida por la presión del sostenimiento del frente (si existe) en el eje del túnel y la resistencia al corte del suelo sin drenar y la resistencia al corte del suelo sin drenar:

$$N_{AMC_{crit}}(t) = 5,86 \left(\frac{t}{D} \right)^{0,42}$$

Es posible expresar la presión de sostenimiento requerida p_{sreq} , de forma simple mediante la expresión:

$$p_{sreq} = p_v - \left(\frac{N_{crit}(t)}{\eta} \right) S_u$$

en donde p_v es la presión de tierras en el eje del escudo y $\eta = 1,5 - 2$ es el *Factor de Seguridad*. El esquema de cálculo de las presiones de sostenimiento se basa en la teoría de Atkinson y Mair (1981):

El cálculo numérico del Factor de Estabilidad $N_{AMC_{crit}}$ se ha modificado de tal forma que los factores mayores de 6 no están permitidos. Generalmente se admiten los siguientes valores límite para el Factores de Estabilidad:

- $N < 2$ Pequeños movimientos del terreno.
- $2 < N < 4$ Se emplea generalmente el escudo para reducir los movimientos del terreno.
- $4 < N < 6$ Movimientos crecientes del terreno.
- $N > 6$ El frente puede ser inestable. Puede entrar arcilla rápidamente a través del frente.

2.3. Por qué emplear acondicionadores del terreno en la construcción de túneles con EPB

Para conseguir la presión de sostenimiento necesaria en el frente el suelo debe ser impermeable al aire. Se han desarrollado tres técnicas de construcción de túneles con frente cerrado que no tienen este requerimiento:

• TBM presurizada

Es posible trabajar con aire comprimido cuando el suelo es casi impermeable al aire. Este método sólo es posible en raras ocasiones.

• TBM tipo *slurry*

La cámara de trabajo se llena con una suspensión de bentonita. La presión de sostenimiento se regula por medio de la burbuja de aire que queda en la parte superior de la cámara. Esta técnica puede emplearse en una gran variedad de suelos. Tiene, sin embargo, algunos inconvenientes como los que representan las grandes plantas de reciclado de bentonita en superficie y la mezcla resultante de suelo y bentonita que debe depositarse en un vertedero especial.

• TBM EPB (Equilibrio de Presión de Tierras)

La cámara de trabajo se encuentra rellena con el suelo original; la cabeza de corte es la responsable de

convertirlo en una pasta impermeable y homogénea. Para conseguir esta pasta se deben emplear, en la mayoría de los casos, aditivos de acondicionamiento, en función del tipo de terreno *in situ*. A veces es suficiente añadir agua; más habitual es añadir espuma para crear un suelo pastoso e introducir una cierta cantidad de aire para conseguir la presión de sostenimiento necesaria en el frente. Para suelos gruesos generalmente es necesario emplear polímeros, mientras que para arcilla dura pueden ser muy útiles los agentes antiobstrucción. La Fig. 2 proporciona una visión general del acondicionamiento del suelo:

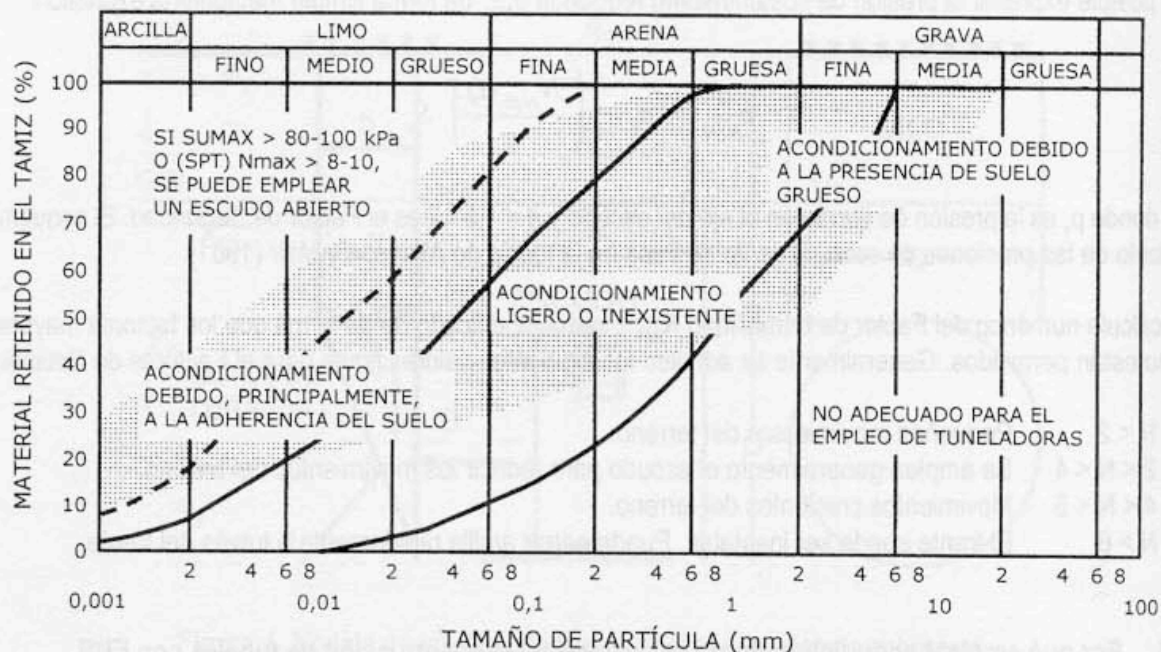


Figura 2. Acondicionamiento general para construcción de túneles con máquinas EPB.

Cuando se emplea el método EPB de construcción de túneles, no se requiere ni bentonita ni plantas especiales de tratamiento y el terreno que se extrae es casi natural. Si se emplean aditivos como la espuma o los polímeros existen composiciones biodegradables que pueden quedar destruidas en un 95 % al cabo de 28 días.

El método EPB de construcción de túneles puede ser una alternativa interesante al método *Slurry*. La elección de los aditivos de acondicionamiento juega un papel muy importante en el éxito del proyecto y tiene que llevarse a cabo por especialistas en acondicionamiento después de haber realizado exámenes de laboratorio preliminares, si es posible, con suelo procedente del lugar de la obra.

3. ADITIVOS DE ACONDICIONAMIENTO

La elección del tipo de espuma y de los diferentes polímeros posibles depende principalmente del tipo de suelo *in situ*, de las condiciones geológicas (agua subterránea, presión de agua, permeabilidad del suelo) pero, también, de las características del escudo (frente abierto o cerrado, puntos de inyección, tipo de generador de espuma, etc.).

Los acondicionadores más importantes son la espuma y los polímeros. Existen también otros aditivos como los que previenen las obstrucciones y la abrasión.

3.1. Espuma

El principal requisito de la espuma como aditivo de acondicionamiento es crear un suelo pastoso, conseguir y mantener la presión de sostenimiento necesaria en la cámara de trabajo y evitar grandes variaciones de presión. Las pequeñas burbujas generadas en la espuma e incorporadas a la pasta de suelo tienen el mismo efecto que la burbuja de aire que se crea en las tuneladoras tipo *slurry*. La espuma se emplea también en obtener una reología adecuada en el terreno.

La reducción del par y de la abrasión son también efectos muy importantes.

La espuma se puede obtener a partir de una mezcla turbulenta de una disolución tensoactiva con aire.

Para explicar los efectos de la espuma, el primer paso es observar los efectos de la disolución tensoactiva -como componente básico- como se muestran en la Fig. 3.

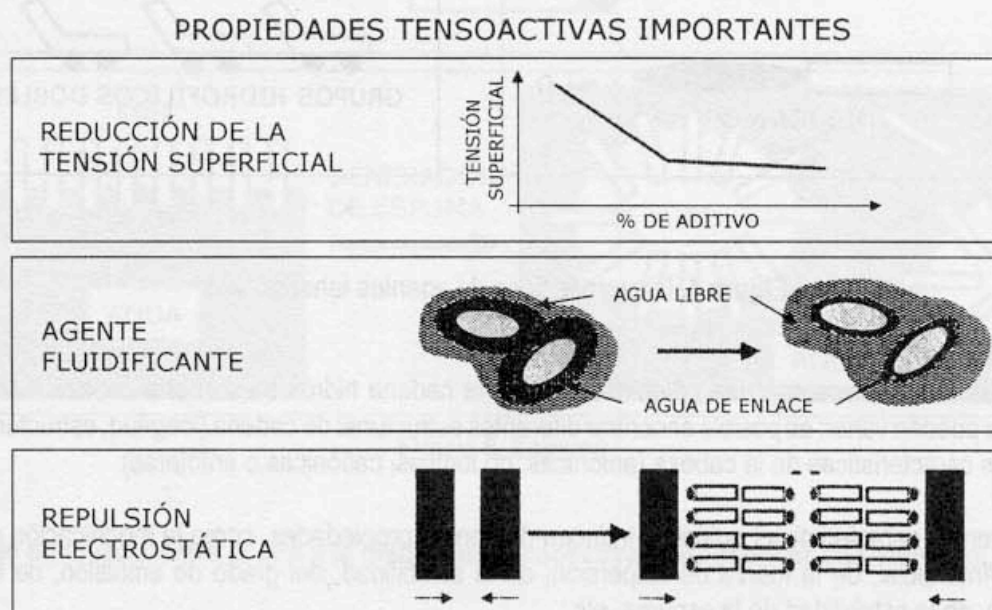


Figura 3. Propiedades tensoactivas importantes.

Las principales propiedades tensoactivas son:

- El efecto fluidificante en los suelos debido a la disminución de la tensión superficial. Las partículas dejan de estar sujetas unas a otras por agua de enlace.
- Efecto de repulsión electrostática, que puede separar dos partículas atraídas mutuamente por fuerzas electrostáticas.

Estos efectos pueden variar en función del tipo de agente tensoactivo, como se muestra en la Fig. 4.

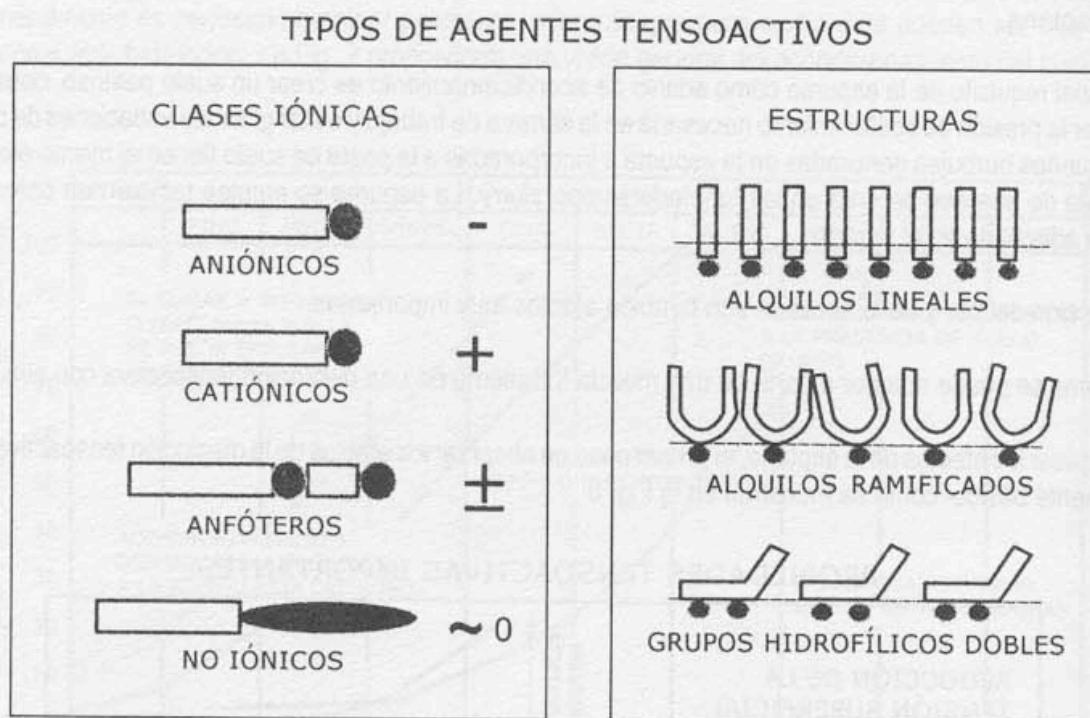


Figura 4. Diferentes tipos de agentes tensoactivos.

Los agentes tensoactivos son una combinación de una cadena hidrófoba con una cabeza hidrófila. Ambos parámetros pueden variar: es posible encontrar diferentes estructuras de cadena (longitud, estructuras estéricas) y diferentes características de la cabeza (aniónicas, no iónicas, catiónicas o anfóteras).

Estas diferentes características químicas inducen diferentes propiedades, como la modificación de la tensión superficial/interfacial, de la fuerza de dispersión, de la solubilidad, del grado de emulsión, de la capacidad espumante, de la estabilidad de la espuma, etc.

Cada tipo de suelo, desde arcilla dura hasta grava arenosa, requiere más o menos su propio tipo de espuma para alcanzar su máxima efectividad. El tipo de agente tensoactivo que será empleado en un lugar determinado debe seleccionarse mediante ensayos de laboratorio sobre muestras del tipo de suelo obtenidas *in situ*.

Los agentes tensoactivos se emplean, en la mayoría de los casos, en forma de espuma, tal y como se muestra en la Fig. 5, aunque se pueden emplear también en forma líquida.

La espuma debe emplearse bajo condiciones locales definidas, fijadas por el uso de parámetros específicos. La influencia de cada parámetro debe determinarse mediante ensayos de laboratorio preliminares. Los tres parámetros importantes de la espuma en las TBMs son:

• **Concentración de agente tensoactivo en la disolución espumante:**

La influencia de la espuma en el suelo depende, en primer lugar de la dilución del agente tensoactivo en agua. La concentración de agente tensoactivo c_f es la responsable de la cantidad de moléculas tensoactivas en la espuma. Una parte de esas moléculas debe establecer las burbujas de aire, la otra parte se encuentra libre en el agua para emplearse en el tratamiento de las propias partículas de suelo:

$$c_f = 100 \cdot m_{\text{agente tensoactivo}} / m_{\text{disolución de espuma}}$$

donde:

$m_{\text{agente tensoactivo}}$ = Masa de agente tensoactivo en la disolución espumante (kg)

$m_{\text{disolución de espuma}}$ = Masa de la disolución espumante (kg).

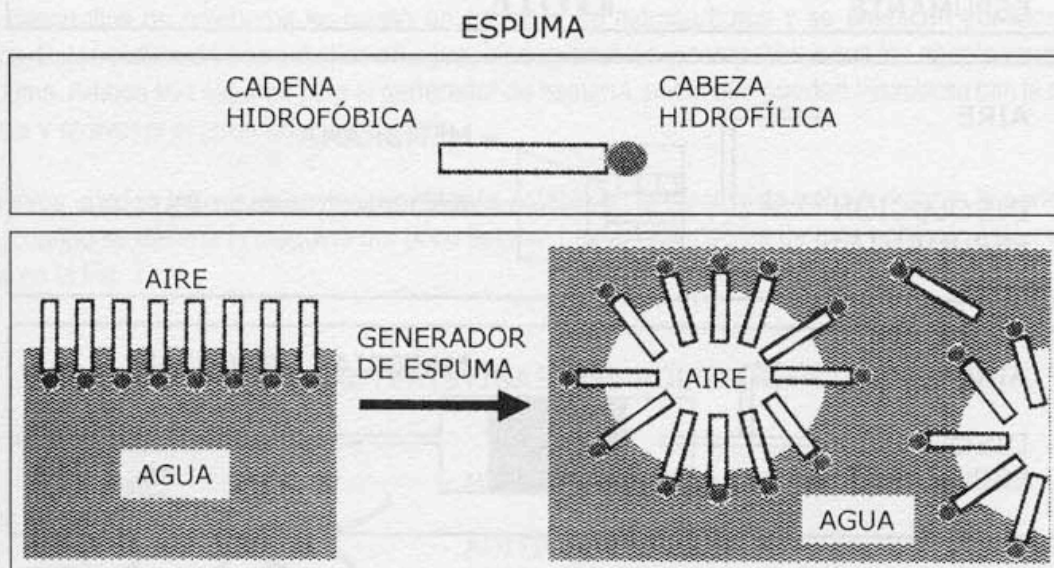


Figura 5. Espuma.

• **Relación de mezcla entre el aire y la disolución tensoactiva (para fabricar una espuma):**

Se necesita aire para fabricar una espuma a partir de una disolución tensoactiva.

La cantidad de aire introducido en el terreno se puede modificar actuando sobre la relación FER (relación de expansión de la espuma), que caracteriza la relación entre el volumen de aire y el de líquido.

$$FER = V_{\text{aire comprimido}} / V_{\text{disolución espumante}}$$

siendo:

$V_{\text{aire comprimido}}$ = Volumen de aire comprimido (l)

$V_{\text{disolución espumante}}$ = Volumen de disolución espumante (l).

La cantidad de aire introducido juega dos papeles principales: incrementar el efecto fluidificante basado en la acción tensoactiva sobre el suelo excavado y, si se desea, la migración de la espuma hacia el terreno con el objeto de inducir un efecto de desplazamiento del agua subterránea.

Otro requisito es crear regularmente pequeñas burbujas de aire para obtener una espuma estable y una mezcla de suelo homogénea. La naturaleza de las burbujas de aire puede estar influida por la elección del generador de espuma (véase la Fig. 6).

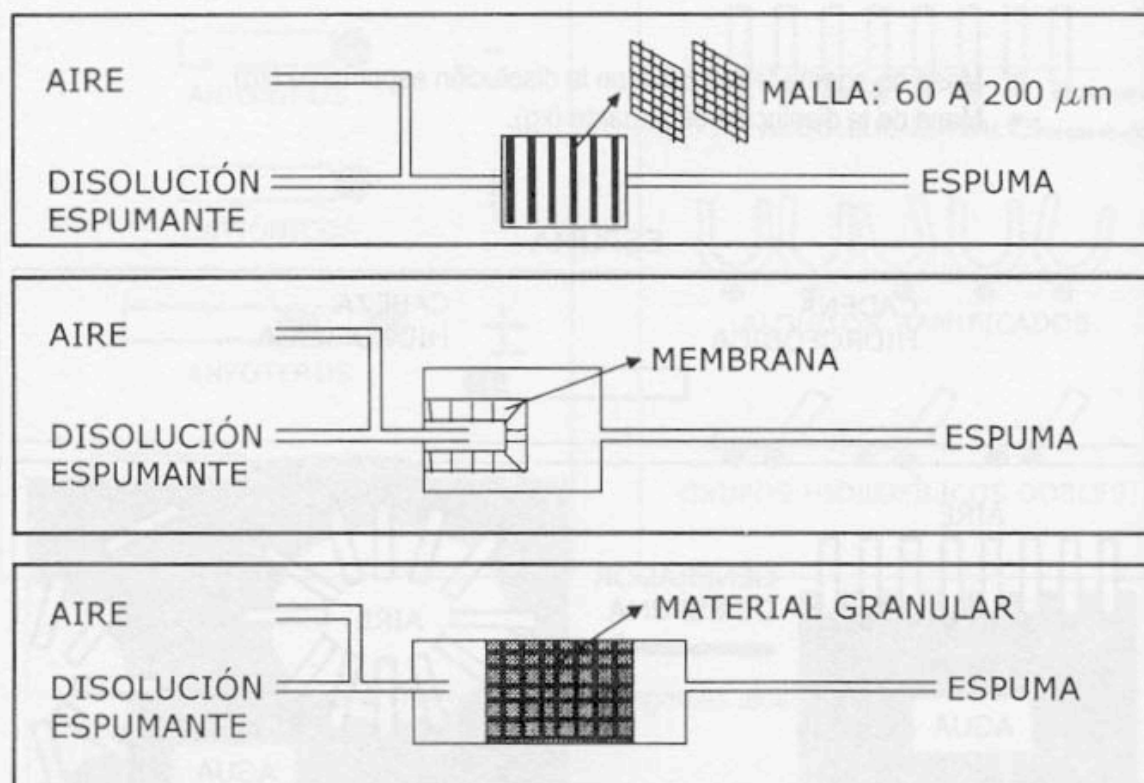


Figura 6. Diferentes tipos de generadores de espuma.

Los equipos convencionales, como los generadores rellenos de material granular crean burbujas de aire que van desde los 0,5 mm hasta los 2 mm (dependiendo del agente espumante y de la FER: aquí $c_F = 2\%$ y $FER = 10$).

Relación de mezcla de la espuma con el suelo:

La cantidad (volumen) de espuma inyectada en la cabeza de corte, dentro de la cámara y, si es necesario, también en el tornillo sinfín, se expresa por medio de la FIR (Relación de Inyección de Espuma), cuyo valor indica el volumen de espuma empleado por metro cúbico de suelo. Un valor de FIR del 40 % indica que se han añadido 400 l de espuma por cada metro cúbico de suelo:

$$FIR = 100 \cdot V_{\text{espuma}} / V_{\text{suelo}}$$

donde:

V_{espuma} = Volumen de espuma (a 1 atm) (l)
 V_{suelo} = Volumen de suelo a ser excavado *in situ* (l).

3.2. Polímeros

Además de su efecto de estabilización de la espuma, se pueden distinguir dos tipos funcionales de polímeros:

- Polímeros que desplazan el agua para secar suelos (líquidos).
- Polímeros *estructurantes* del suelo, que se emplean en suelos gruesos y sueltos para modificar su comportamiento y para prevenir su sedimentación.

Algunos desarrollos de polímeros se basan en cadenas de hidrocarburos y se producen por fermentación bacteriana. Estos polímeros son solubles en agua, biodegradables y compatibles con los agentes tensoactivos de la espuma. Ambos son seguros para el generador de espuma, por lo que pueden mezclarse con la disolución espumante y atravesar el generador de espuma.

Los polímeros pueden inducir un sostenimiento más estable en la cámara de trabajo durante la perforación y, también, cuando se detiene la máquina por poco tiempo. Las características de este polímero estructurante se muestran en la Fig. 7.

CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO

PARTÍCULA MINERAL



CADENA POLIMÉRICA

PSEUDOPLASTICIDAD



- MEJORA LA ESTABILIDAD DE LA ESPUMA
- ADITIVO CON PROPIEDADES REOLÓGICAS, ESTRUCTURANTE Y DE COMPORTAMIENTO PLÁSTICO
- EFECTO TIXOTRÓPICO
- ADITIVO ANTISEGREGANTE
- ADITIVO ANTIOBSTRUCCIÓN
- APTO PARA SUELOS ALTAMENTE POROSOS

Figura 7. Características de los polímeros estructurantes.

Todos los polímeros deben tener, preferentemente, forma líquida, para evitar problemas en la dosificación e

instalaciones adicionales para conseguir una solución/suspensión libre de polvo. Estos líquidos deben ser también solubles en agua.

3.3. Agentes dispersantes de arcilla

Para conseguir el efecto deseado, las moléculas dispersantes deben adsorberse en la superficie de la partícula de suelo. Deben disponer de una alta densidad de carga para separar las partículas de suelo y crear una barrera estérica.

Estas funciones se pueden conseguir por medio de agentes tensoactivos o empleando dispersantes pero, como se puede observar en la Fig. 8, los dispersantes son más efectivos.

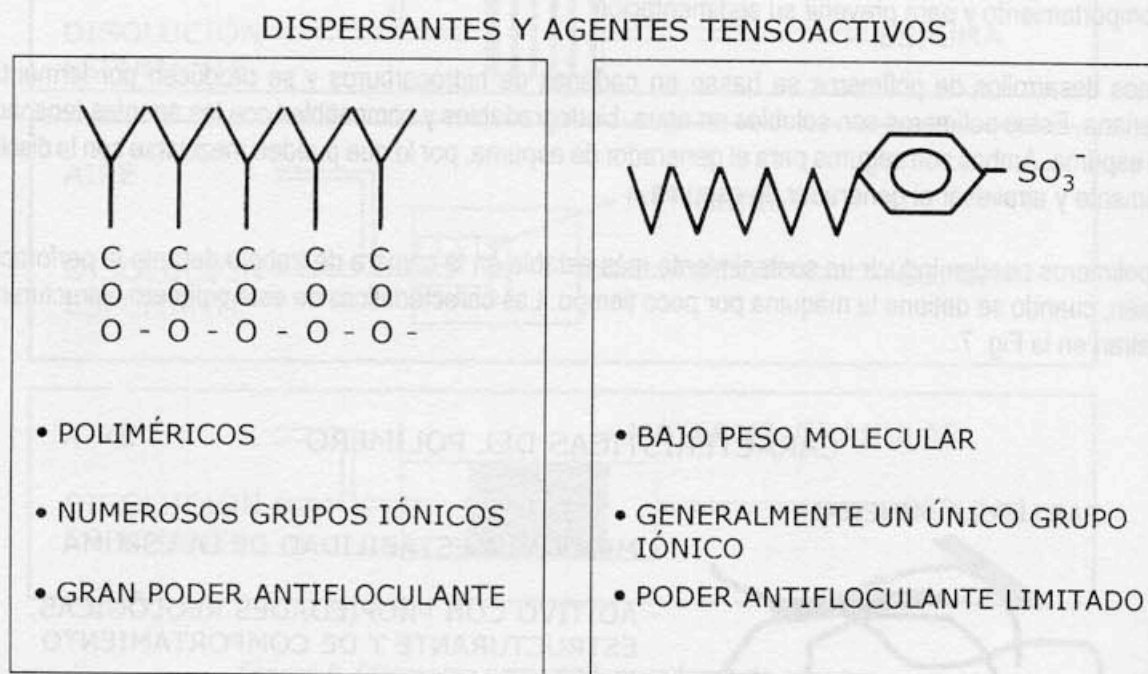


Figura 8. Estructura de los dispersantes y de los agentes tensoactivos.

Los agentes dispersantes se añaden a la arcilla dura para compensar las propiedades dispersantes y destructivas de la espuma, pero también podrían emplearse sin espuma.

3.4. Aditivos antiabrasión

Se han desarrollado aditivos antiabrasión para emplearlos en suelos altamente abrasivos o en formaciones rocosas. Deben proteger principalmente la cabeza de corte, sus útiles de corte y el tornillo de extracción. En consecuencia, estos productos se pueden añadir en la cabeza de corte, en la cámara de trabajo o en el tornillo sinfín. Estos aditivos se pueden inyectar en forma concentrada, diluidos en agua o junto con la espuma (cuando se trabaja en modo EPB) para obtener una distribución más homogénea.

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LOCALES Y DE LABORATORIO CON ADITIVOS DE ACONDICIONAMIENTO

4.1. Espuma

Ensayos de asentamiento en laboratorio para Izmir (Turquía):

Los ensayos de asentamiento son extremadamente útiles para determinar la reología del suelo, que constituye un factor muy importante en la construcción de túneles con máquinas EPB. El equipo es el mismo que el que se emplea habitualmente para los ensayos del hormigón. En este caso, el suelo se encuentra mezclado con espuma. La Fig. 9 ilustra el ensayo.



Figura 9. Ensayo de asentamiento.

El valor de la consistencia tiene como resultado una diferencia de altura y constituye un indicador de la reología del suelo.

La Fig. 10 muestra la influencia de la espuma en grava arenosa e ilustra el cambio del comportamiento del suelo, así como la importancia del ensayo de asentamiento.

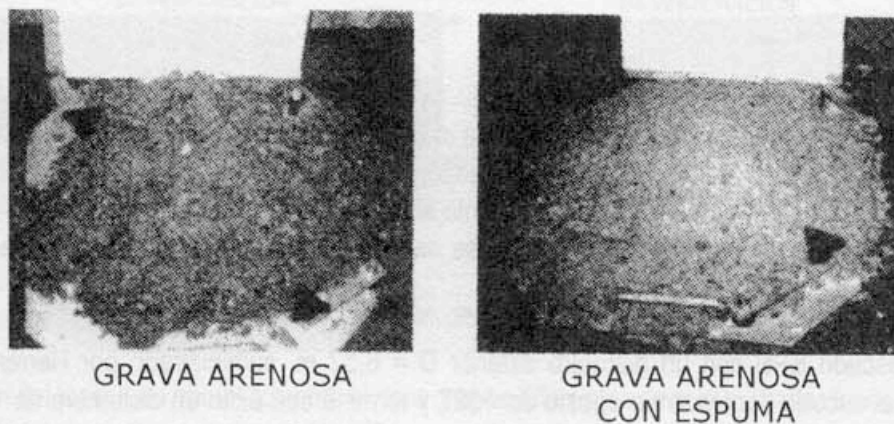


Figura 10. Visualización de los cambios en el suelo mediante ensayos de asentamiento.

En la Fig. 11 se presentan algunos datos de los ensayos de asentamiento obtenidos con el suelo original de Izmir.

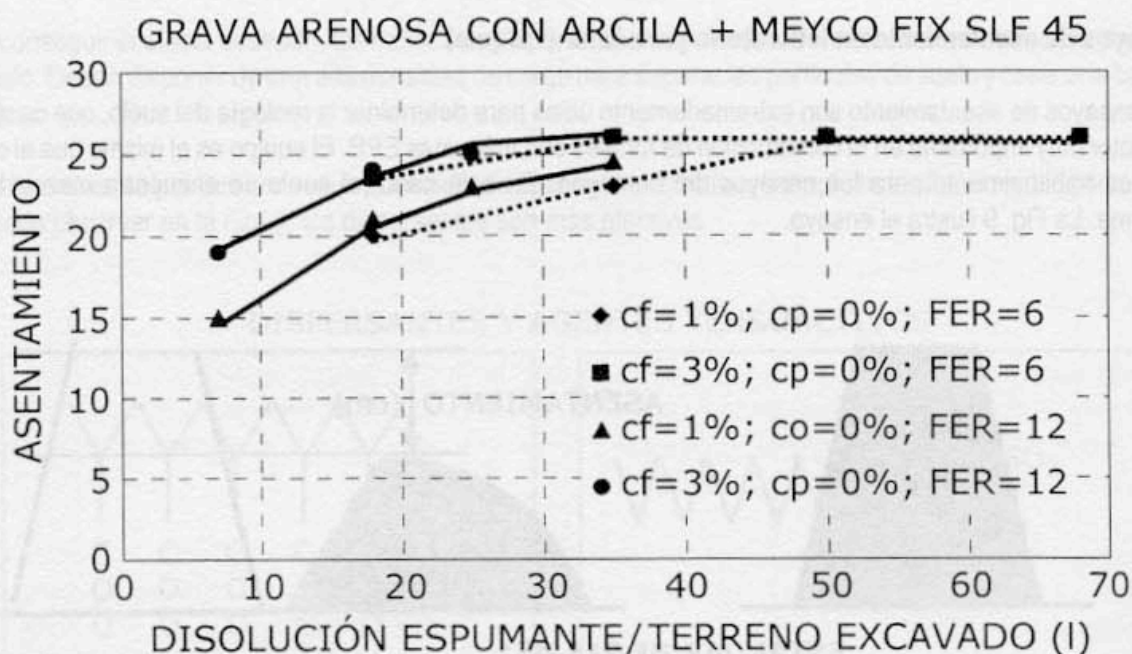


Figura 11. Resultados de los ensayos de asentamiento sobre una mezcla de suelo grueso y fino.

Fue posible conseguir una consistencia plástica del suelo incluso con cantidades bajas de agua (véase la Fig. 11). Sin la adición de espuma, el suelo se volvió demasiado consistente. Por esta razón, no resultó adecuado para una TBM tipo escudo. Los finos (partículas de arcilla y limo) cambian las propiedades reológicas del suelo, por lo que, en este caso, no fue necesaria la adición de polímero.

Resultados en Izmir

Con casi 3,5 millones de habitantes, Izmir es la tercera ciudad más grande de Turquía. La construcción de 11,3 km de longitud fue dividida en los siguientes tramos: un túnel de 1,375 km de longitud excavado con un escudo EPB, un túnel de 1,7 km de longitud excavado mediante el NATM (Nuevo Método Austriaco), 1,1 km de túnel a cielo abierto y, el resto en superficie. En la Fig. 12 se muestra un diagrama esquemático de la totalidad del proyecto.

Se empleó un escudo EPB con un diámetro exterior $D = 6,52$ m, suministrado por Herrenknecht Ltd. La perforación con el escudo comenzó en agosto de 1997 y terminó con éxito en diciembre de 1998 sin ningún colapso o asentamiento de importancia en superficie.

Las arenas y arenas gravosas mostraron un amplio rango de densidades relativas, desde sueltas hasta muy densas, pero durante la mayor parte del trazado se dieron arenas de tipo denso medio a denso. La Fig. 14 muestra los límites inferior y superior de las distribuciones granulométricas. La arena se clasificó principalmente como SM, aunque también hubo bastante cantidad clasificada como GM, de acuerdo con el código USCS.

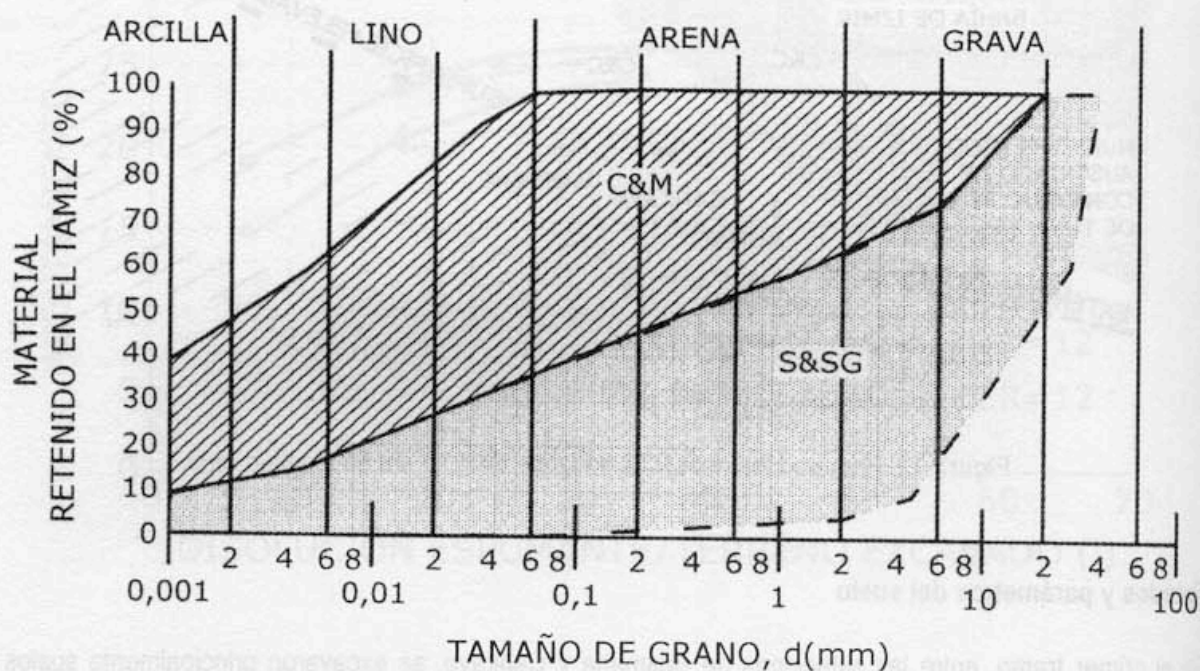


Figura 14. Distribuciones granulométricas de los suelos.

Tercer tramo en suelo limoso, en la costa

El tercer tramo se inició en suelo limoso con algunos pequeños estratos de arena. La perforación fue paralela a la línea de costa durante los 250 primeros anillos, manteniéndose a una distancia de unos 150 m. El suelo era suelto, no muy consolidado, el contenido en agua era alto y el de materia orgánica fue, aproximadamente, del 20 %.

La perforación de esos terrenos con el escudo EBP no planteó dificultades en lo que a empuje y par torsor en la cabeza de corte se refiere (véase la Fig. 15). Los asentamientos fueron reducidos y la presión de sostenimiento del frente se mantuvo dentro de los valores calculados (véase la Fig. 16).

Al principio prácticamente no fue necesario el acondicionamiento del terreno. De vez en cuando se inyectaron pequeñas cantidades de espuma para desplazar el agua y para hacer menos pegajosa la pasta en el tornillo de extracción. El consumo de espuma empieza siendo 0. Después llega hasta una FIR = 70 % como resultado de unos problemas técnicos con la TBM (cajas reductoras dañadas). La excavación tuvo que hacerse *más fácil* para la TBM, lo que supone en este caso mayor acondicionamiento para reducir el par en la cabeza de corte (véase la Fig. 17).

Las arenas y arenas gravosas mostraron un amplio rango de densidades relativas, desde sueltas hasta muy densas, pero durante la mayor parte del trazado se dieron arenas de tipo denso medio a denso. La Fig. 14 muestra los límites inferior y superior de las distribuciones granulométricas. La arena se clasificó principalmente como SM, aunque también hubo bastante cantidad clasificada como GM, de acuerdo con el código USCS.

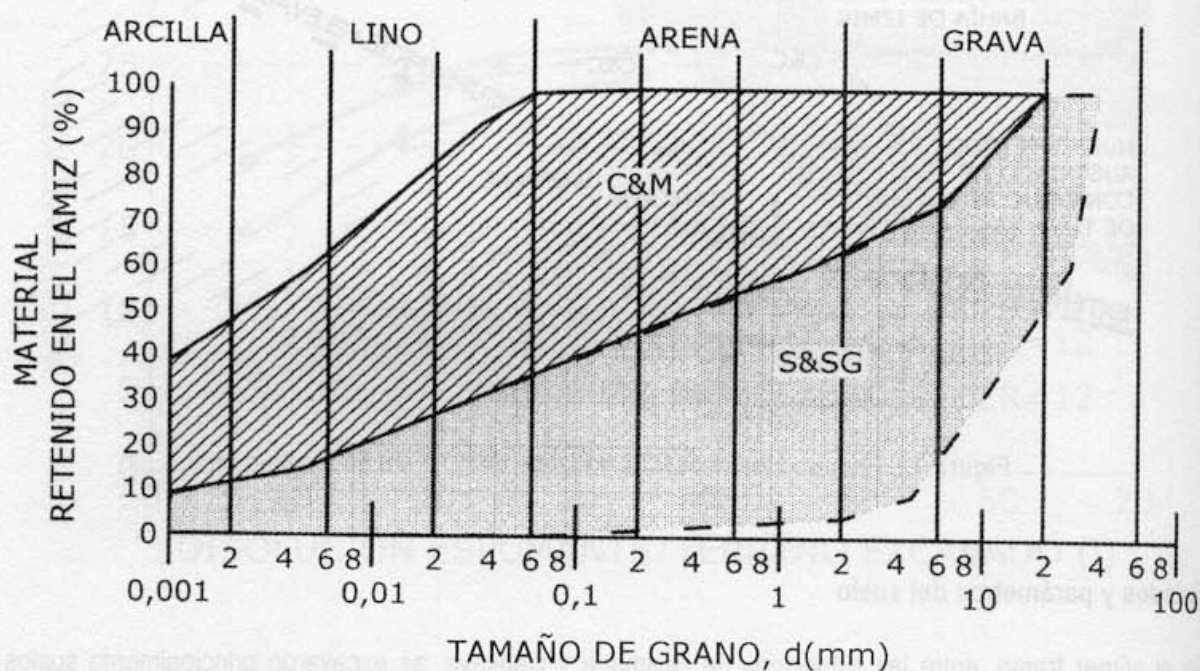


Figura 14. Distribuciones granulométricas de los suelos.

Tercer tramo en suelo limoso, en la costa

El tercer tramo se inició en suelo limoso con algunos pequeños estratos de arena. La perforación fue paralela a la línea de costa durante los 250 primeros anillos, manteniéndose a una distancia de unos 150 m. El suelo era suelto, no muy consolidado, el contenido en agua era alto y el de materia orgánica fue, aproximadamente, del 20 %.

La perforación de esos terrenos con el escudo EPB no planteó dificultades en lo que a empuje y par torsor en la cabeza de corte se refiere (véase la Fig. 15). Los asentamientos fueron reducidos y la presión de sostenimiento del frente se mantuvo dentro de los valores calculados (véase la Fig. 16).

Al principio prácticamente no fue necesario el acondicionamiento del terreno. De vez en cuando se inyectaron pequeñas cantidades de espuma para desplazar el agua y para hacer menos pegajosa la pasta en el tornillo de extracción. El consumo de espuma empieza siendo 0. Después llega hasta una FIR = 70 % como resultado de unos problemas técnicos con la TBM (cajas reductoras dañadas). La excavación tuvo que hacerse *más fácil* para la TBM, lo que supone en este caso mayor acondicionamiento para reducir el par en la cabeza de corte (véase la Fig. 17).

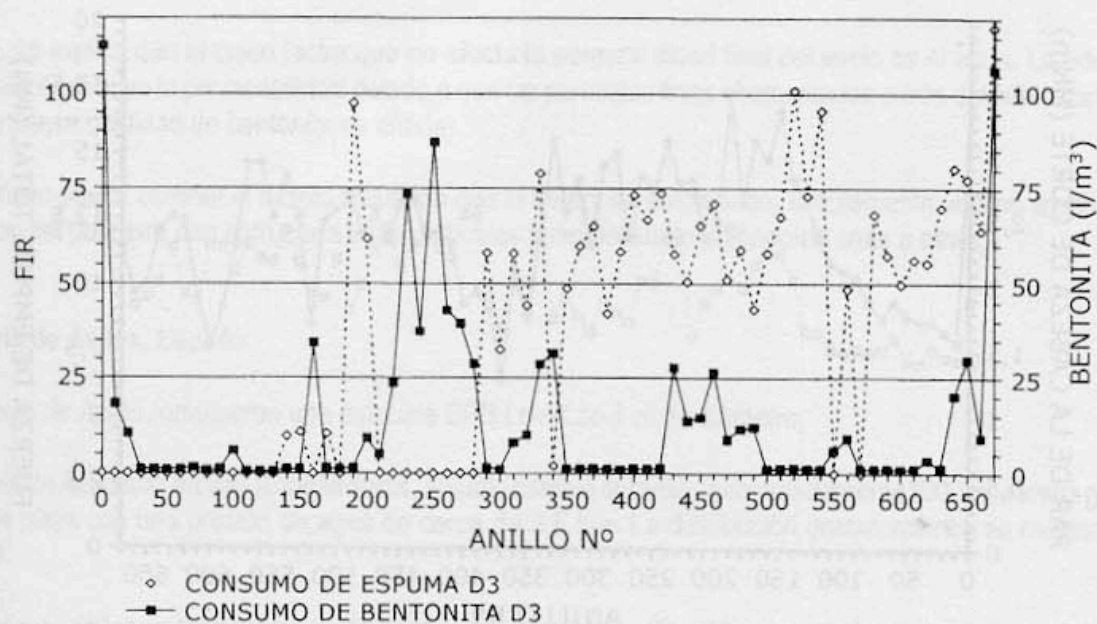


Figura 15. Acondicionamiento del tercer tramo.

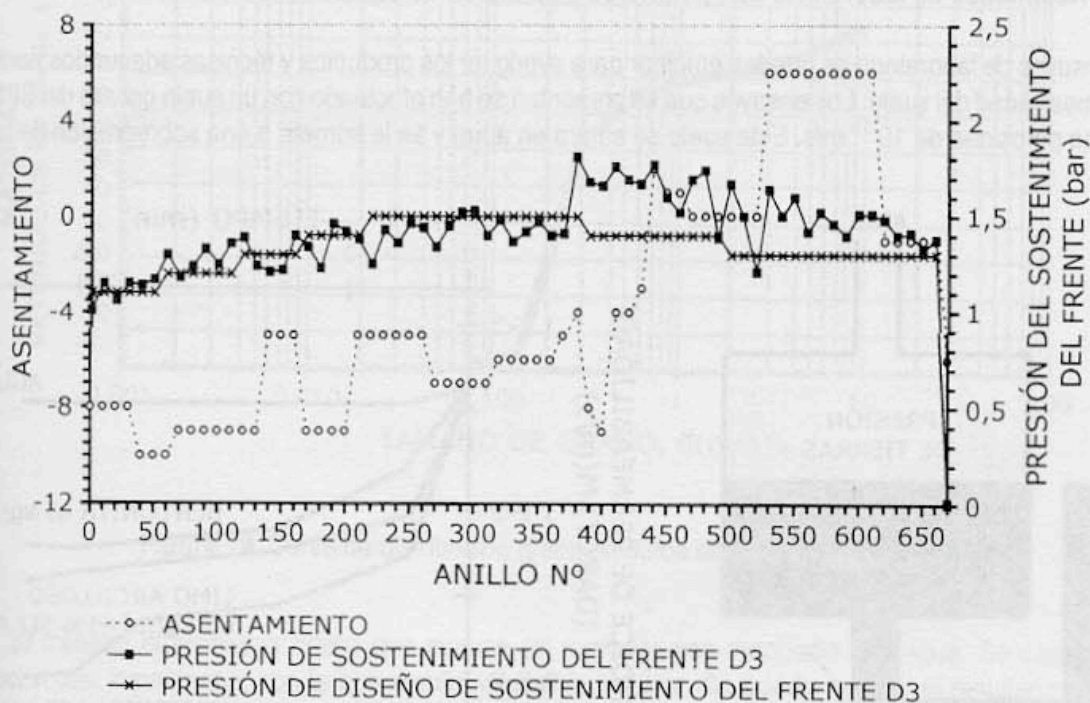


Figura 16. Presión de sostenimiento del frente y asentamiento a lo largo del tercer tramo.

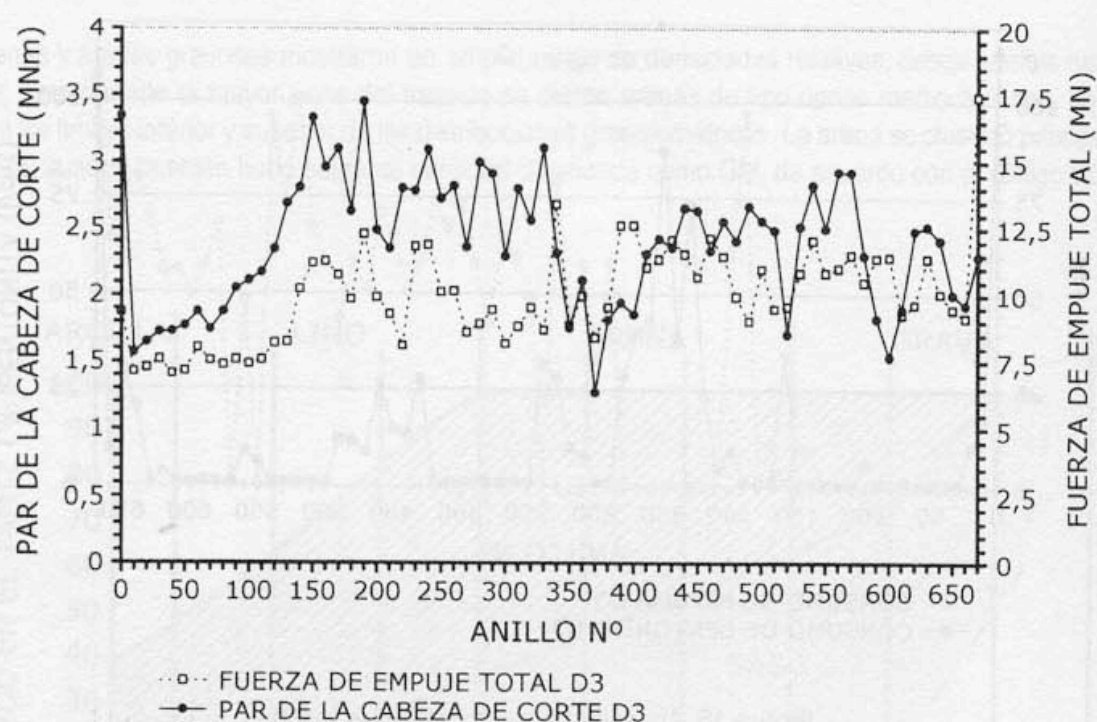


Figura 17. Fuerza de empuje y par de la cabeza de corte durante el tercer tramo.

4.2. Resultados de laboratorio con polímeros y ejemplos de campo

Los ensayos de laboratorio se pueden emplear para averiguar los productos y técnicas adecuados para reducir la permeabilidad del suelo. Los ensayos que se presentan se han efectuado con un suelo poroso del BPNL León, con una porosidad de $10^{-3.5}$ m/s. Este suelo se satura en agua y se le somete a una sobrepresión de 0,4 bar.

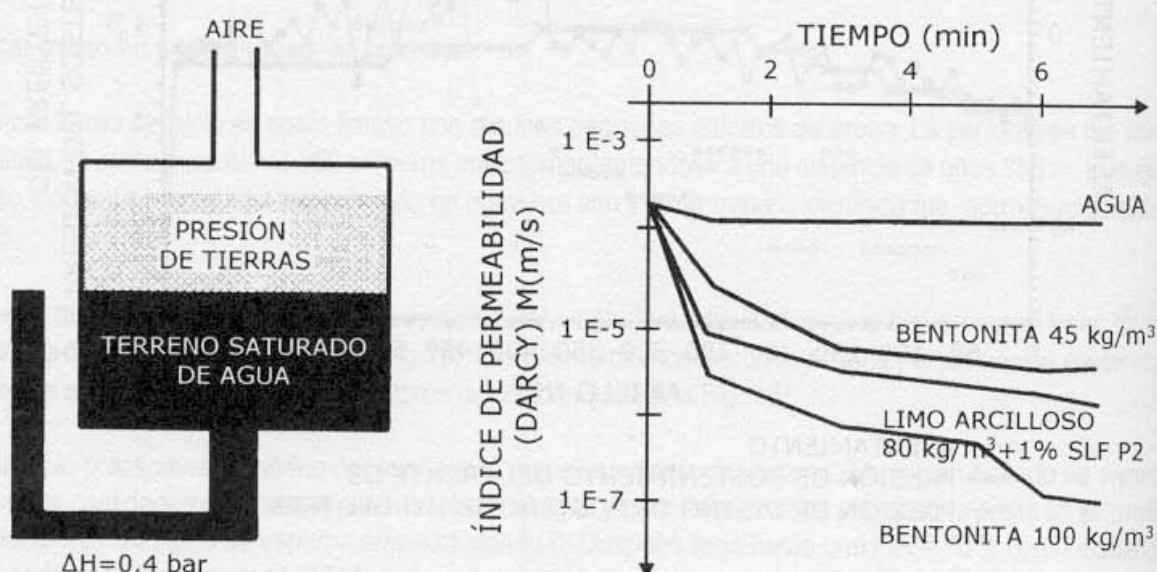


Figura 18. Desarrollo de la pasta dinámica.

La Fig. 18 explica que el único factor que no afecta la permeabilidad final del suelo es el agua. La adición de bentonita disminuye la permeabilidad debido a que las partículas finas obstruyen los poros del suelo (tanto más cuanto mayor cantidad de bentonita se añada).

El polímero puede obtener el mismo resultado que la bentonita empleando, simplemente un limo arcilloso. Las cadenas del polímero dan estructura a las partículas finas del suelo uniéndolas unas a otras.

Ejemplo de Avilés, España

Las obras de Avilés, emplearon una máquina EPB Lovat de 4 m de diámetro.

Después de encontrar arcillas limosas duras, el suelo cambió durante, aproximadamente 1000 m, a arena gravosa pura de playa con una presión de agua de cerca de 3,5 bar. La distribución granulométrica se muestra en la Fig. 19.

Los ensayos de laboratorio fueron algún control de segregación, Fig. 20, ensayos de permeabilidad, Fig. 21, de penetración, Fig. 23, con polímero SLP 2 y con el suelo original de Avilés. Todos los ensayos se llevaron a cabo con un $W_i = 7\%$, $d(\text{org}) = 1,5$.

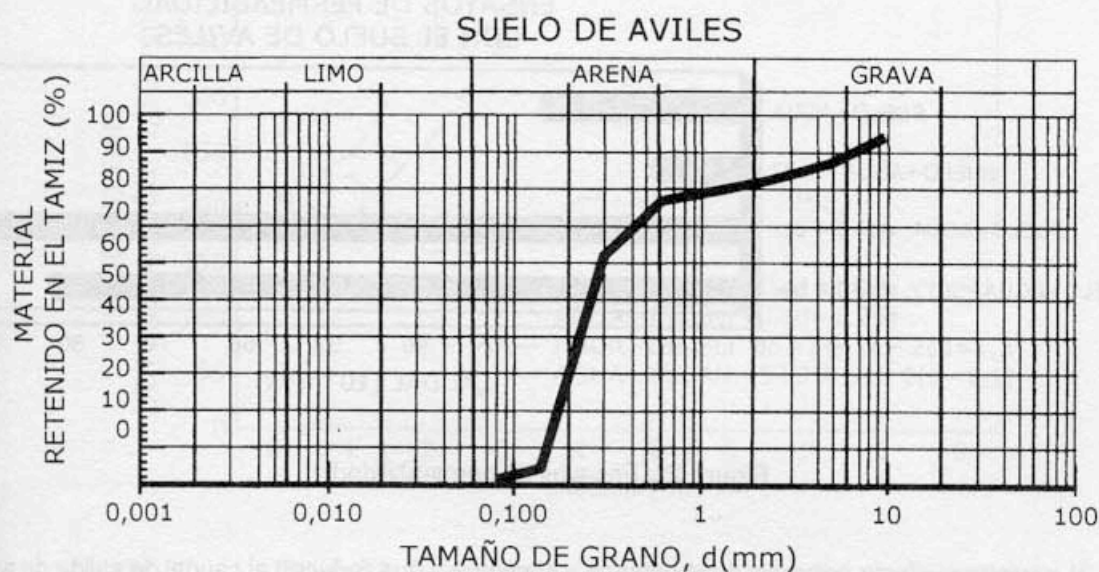


Figura 19. Curva de distribución granulométrica del suelo de Avilés.

La Fig. 20 muestra el problema crítico que supone un suelo grueso mezclado con agua. Se obtiene una segregación casi instantánea, con la que resulta imposible trabajar. Se puede mejorar el resultado con una espuma muy estable, pero se sigue obteniendo una segregación del 20 % después de 15 minutos -excesivo para el correcto funcionamiento adecuado de la TBM del tipo escudo EPB. La segregación así como la homogeneidad de la pasta de suelo únicamente se pueden controlar mediante la adición de un biopolímero estructurante.

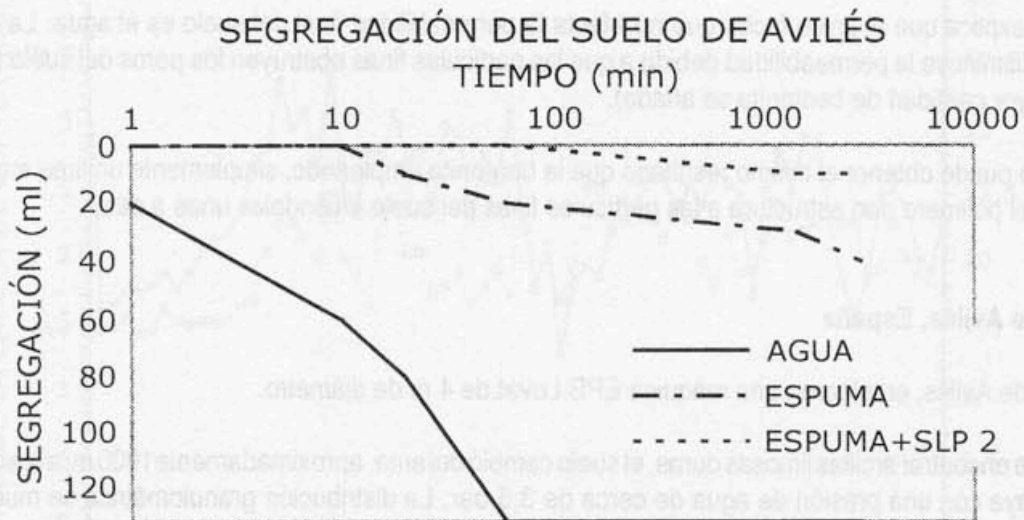


Figura 20. Ensayos de segregación.

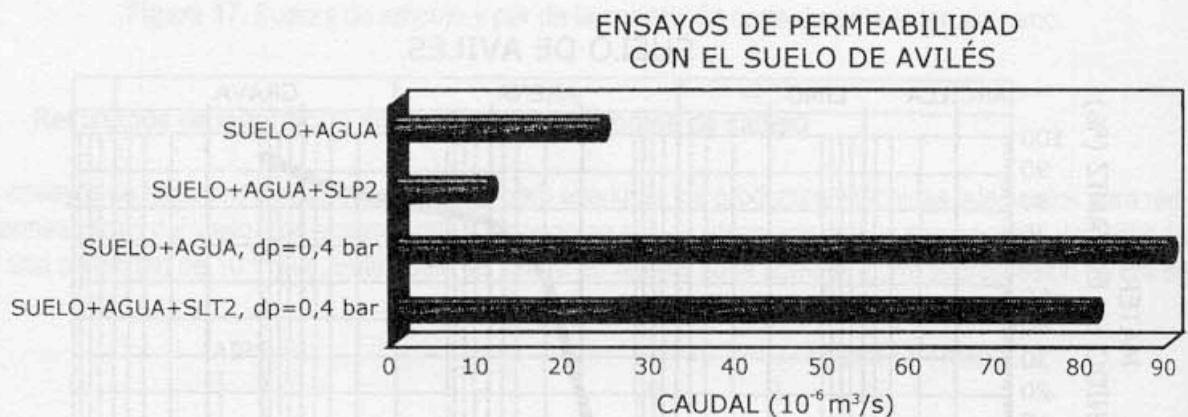


Figura 21. Ensayos de permeabilidad.

La Fig. 21 muestra el efecto *adhesivo* de la espuma y el polímero que reducen el caudal de salida de agua de un suelo mezclado con espuma y polímero o únicamente con agua a presión ambiente y con 0,4 bar de sobrepresión.

Se realizaron ensayos de penetración para obtener alguna información acerca de los problemas causados por los 3 bares de presión de agua.

La profundidad de penetración del cono indica la fluidez del suelo: cuanto mayor sea la profundidad de penetración, más líquido se encuentra el material. Si se ensayan los polímeros el objetivo es mantener la profundidad de penetración incluso cuando se añade agua. Los resultados de estos ensayos se muestran en la Fig. 23.

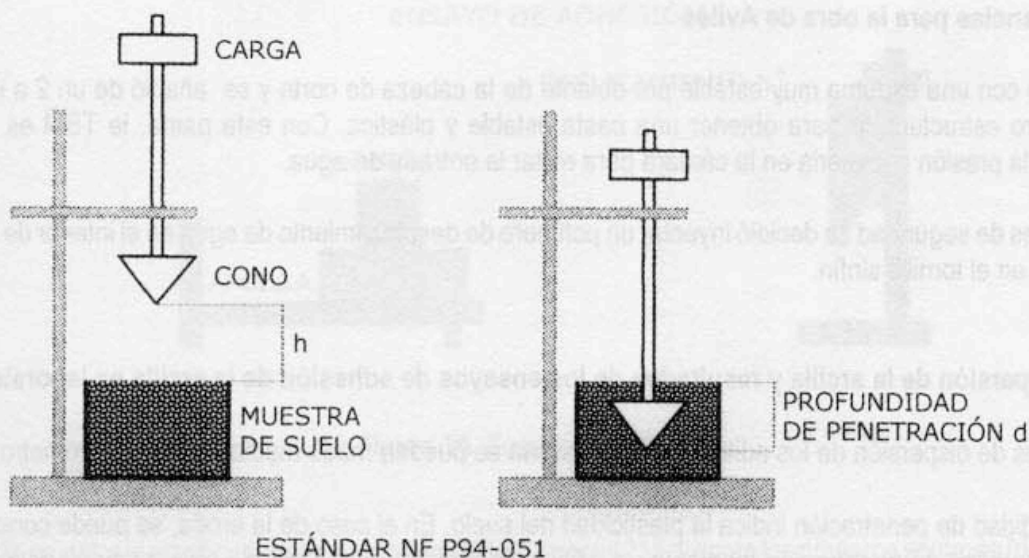


Figura 22. Penetrómetro de cono.

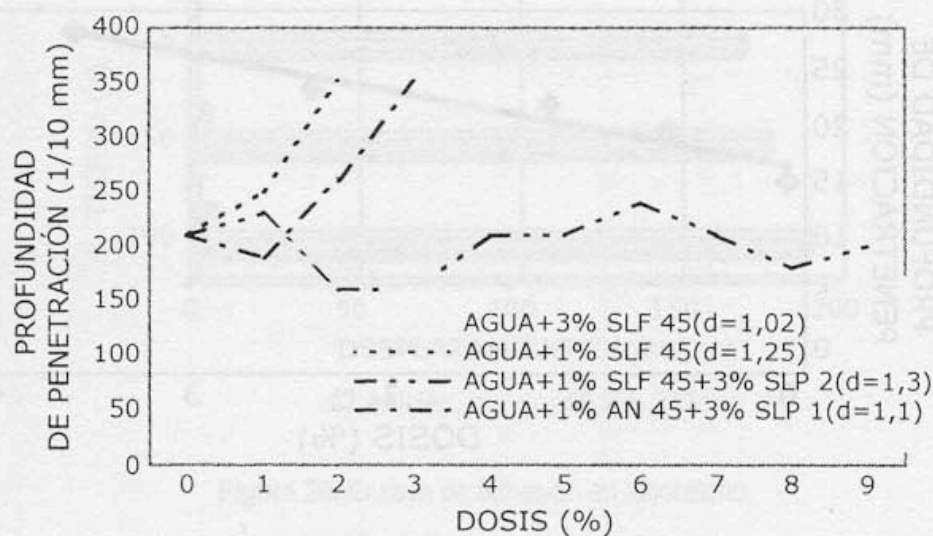


Figura 23. Ensayos con el penetrómetro de cono.

La Fig. 23 presenta los cambios en la reología del suelo en función del agua añadida más los aditivos. Los agentes espumantes muestran un efecto fluidificante (mayor profundidad de penetración) dependiendo de la concentración de agente tensoactivo c_t . Los polímeros para el desplazamiento del agua como el SLF P1 presentan, para el mismo suelo y la misma cantidad de agua, menor profundidad de penetración que las disoluciones espumantes ya que tienen mayor capacidad de desplazamiento del agua. Un polímero estructurante como el SLF P2 no muestra casi ninguna reacción en profundidad de penetración incluso añadiendo una cantidad elevada de agua.

Consecuencias para la obra de Avilés

Se trabajó con una espuma muy estable por delante de la cabeza de corte y se añadió de un 2 a un 4 % de biopolímero estructurante para obtener una pasta estable y plástica. Con esta pasta, la TBM es capaz de mantener la presión necesaria en la cámara para evitar la entrada de agua.

Por razones de seguridad se decidió inyectar un polímero de desplazamiento de agua en el interior de la cámara y también en el tornillo sinfín.

4.3. Dispersión de la arcilla y resultados de los ensayos de adhesión de la arcilla en laboratorio

Los efectos de dispersión de los aditivos sobre la arcilla se pueden medir mediante un penetrómetro de cono.

La profundidad de penetración indica la plasticidad del suelo. En el caso de la arcilla, se puede conseguir una gran profundidad de penetración mediante un aditivo dispersante que funcione bien, como se muestra en la Fig. 24.

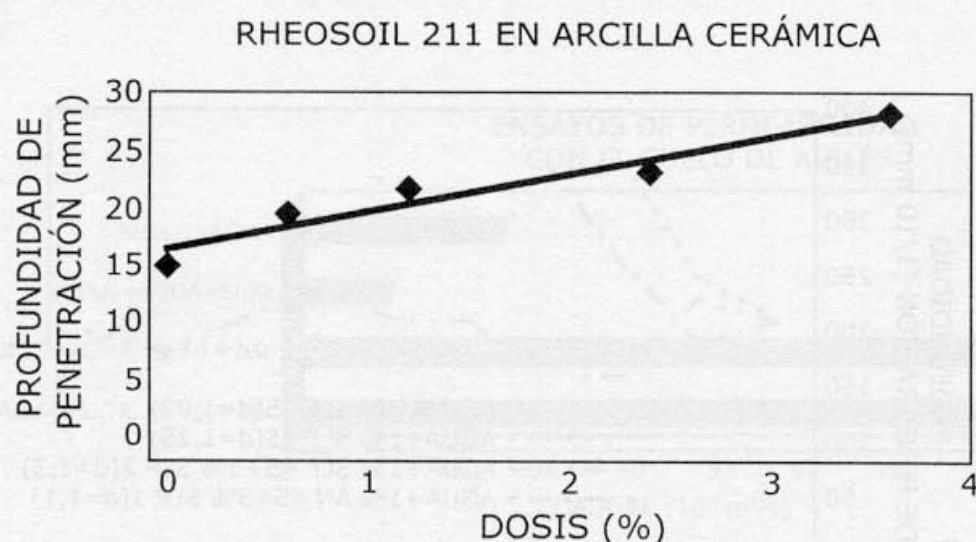


Figura 24. Efecto de los aditivos desestructurantes de la arcilla.

Este ensayo no es adecuado para estudiar problemas de adhesión, ya que únicamente indica los efectos dispersantes. Para obtener los valores de adhesión se puede emplear un ensayo de deslizamiento que muestre los cambios en la adhesión con la adición de aditivos. Existen diversos ensayos para esta clase de problemas. En este caso, se colocan 400 g de arcilla figulina en un plato de acero seco (un espesor de arcilla de 5mm) y se humedece la superficie con agua o con una disolución de agua y aditivo. A continuación se coloca otro plato de acero inoxidable sobre la superficie con una carga de 2 kg durante dos minutos, como se muestra en la Fig. 25.

El desplazamiento del plato superior se mide en función del tiempo y los resultados muestran los diferentes cambios en la adhesión cuando se emplean distintos aditivos.

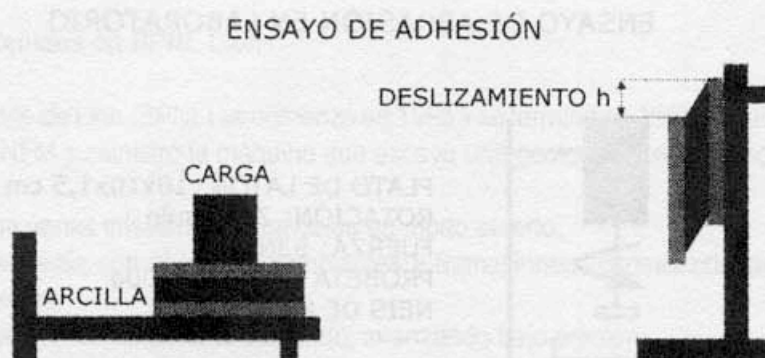


Figura 25. Ensayo de adhesión.

La Fig. 26 muestra el significativo efecto superficial del Rheosoil 211 durante los primeros segundos (deslizamiento inmediato) en comparación con los valores obtenidos añadiendo únicamente agua.

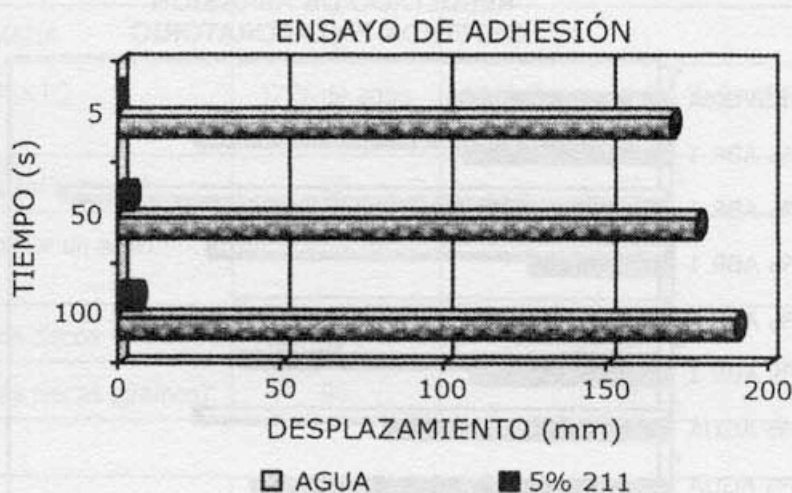


Figura 26. Ensayo de adhesión en laboratorio.

4.4. Ensayos antiabrasión en laboratorio y resultados *in situ*

Los siguientes ensayos de laboratorio se realizaron con un neis altamente abrasivo procedente de Lión, que fue extraído mediante sondeos. Se añadieron diferentes concentraciones de aditivo antiabrasión y se midió la pérdida de masa de un disco giratorio de latón. La Fig. 27 muestra el equipo de ensayo.

Los resultados de los ensayos se presentan en la Fig. 28.

La Fig. 28 muestra una abrasión reducida cuando se emplea una suspensión saturada en agua (17 %). La cantidad de agua juega un papel significativo en la problemática de la abrasión.

ENSAYO DE ABRASIÓN EN LABORATORIO

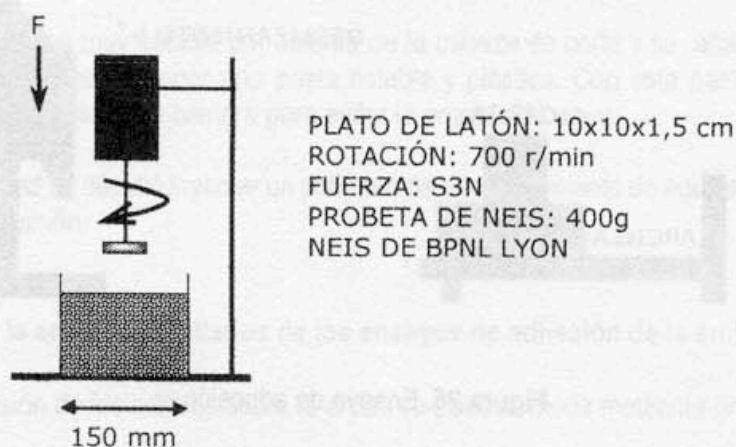


Figura 27. Ensayos de abrasión en laboratorio.

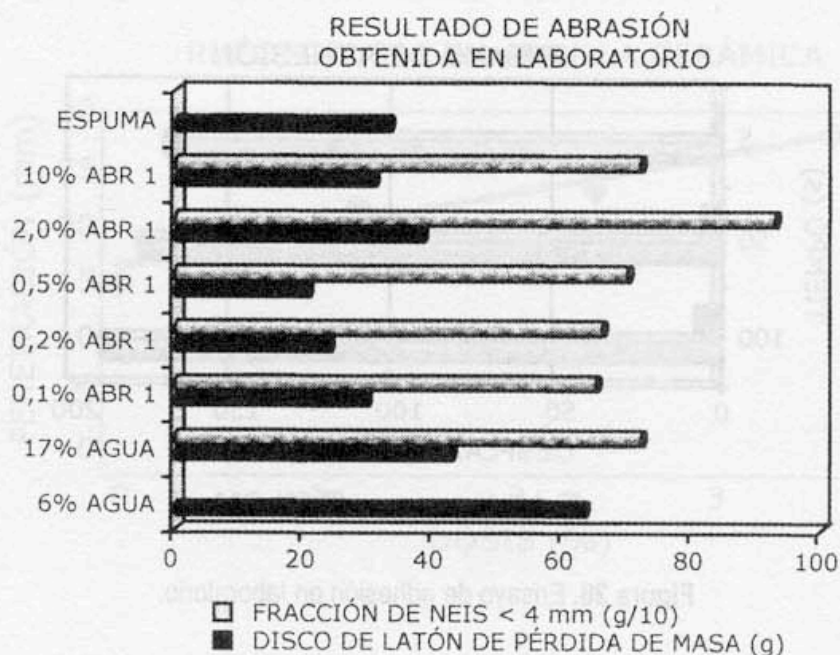


Figura 28. Resultados de abrasión en laboratorio.

Para determinar el efecto del aditivo antiabrasión Meyco Fix ABR 1, se mezcló el producto en diferentes concentraciones con agua. Durante estos ensayos siempre se emplea la suspensión saturada de agua. La abrasión puede reducirse hasta un 50 % mediante el uso del ABR 1 con respecto a los mejores resultados obtenidos añadiendo únicamente agua. Los efectos que causaron mayor abrasión cuando se añadió un 2 % de ABR 1 en el agua aún no están claros. Otro efecto interesante es la cantidad de partículas de suelo por debajo de los 4 mm de diámetro que aparecen durante el ensayo. Se puede concluir lo siguiente: cuanto mayor es la cantidad de partículas finas, mayor es la abrasión.

4.5. Resultados obtenidos en BPNL León

El Bulevar Periférico Norte de León (BPNL) se comenzó en 1995 y se terminó en 1997 con un escudo EPB grande de 11 m de diámetro. NFM suministró la máquina que excavó una geología muy poco homogénea:

- 1250 m de rocas con venas cristalinas, excavando en modo abierto.
- 450 m de zona intermedia con aluviones cambiantes y formaciones rocosas cristalinas, en frente mixto, excavando bajo presión.
- 1552 m de rocas sedimentarias a frente completo, avanzando bajo presión.

El aditivo antiabrasión se ensayó en neis fracturado. La cantidad de agua añadida fue de unos 60-70 m³ de cara a obtener una suspensión saturada (17 %). Se decidió instalar discos de referencia en la cabeza de corte. Además se instalaron placas metálicas de referencia en el tornillo para obtener algunos valores de abrasión también para esta herramienta. Los discos y placas de referencia se controlaron cada semana.

TABLA 1. Resultados de abrasión *in situ* en el BPNL León.

SEMANA	1	2	3
ACONDICIONAMIENTO	17 % de agua	17 % de agua + 0,5 % de ABR 1	17 % de agua
Avance del escudo (m/semana)	72	68	94
Tiempo para completar un anillo (min)	85	82	79
Abrasión total en los discos	15	9,8	122
Abrasión total en las placas (gramos)	90	15	100
RESULTADOS EN LOS DISCOS			
Abrasión (mm/m de túnel)	0,21	0,14	0,13
Velocidad del escudo (mm/min)	23,5	24,4	25,3
Potencia de corte (kW)	957	1497	1226
Relación (%)	100	42,7	45,2
RESULTADOS EN LAS PLACAS			
Abrasión (g/m de túnel)	1,25	0,22	1,06
Velocidad del tornillo (r/m de túnel)	425	164	183
Relación (%)	100	46	183

Como se muestra en la Tabla 1, el período de ensayos *in situ* fue de tres semanas. En la primera semana se añadió únicamente agua. En la segunda se empleó una disolución acuosa de ABR con una concentración del 0,5 %. Finalmente, en la tercera semana, se volvió a emplear de nuevo únicamente agua.

Los resultados obtenidos son difíciles de interpretar debido a la variabilidad de las condiciones del suelo así como de los parámetros de la máquina en una semana así como dentro del período de tres semanas de ensayos. Pero, teniendo en cuenta que la variación de los parámetros de la máquina como la velocidad, la potencia de corte o la velocidad de rotación del tornillo se encuentra en relación directa con las condiciones del terreno, los resultados *in situ* muestran un descenso muy acusado de la abrasión en las placas del tornillo de extracción. El descenso en la abrasión de los discos de corte de la cabeza es menos significativo, pero es apreciable. Se debe tener en cuenta las importantes diferencias en la potencia de corte.

Se requiere realizar ensayos adicionales para verificar la bondad de los resultados de laboratorio, pero las condiciones muy cambiantes del terreno y de los parámetros de la máquina crearán siempre dificultades. En consecuencia, se deben optimizar las condiciones de laboratorio y los ensayos empleando discos reales del escudo.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a las siguientes personas su colaboración en la preparación de este texto:

- Dr. M. Sari, Rhodia S.A., París.
- P. Ellenberger, MBT International, Zúrich.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ATKINSON, J. H. and MAIR, R.J. (1981): "Soil mechanics aspects of soft ground tunnelling". Ground Engineering. Emap Construct Ltd.
- BROMS, B. and BENNERMARK, H. (1967): "Stability of clay at vertical openings". Journal of ASCE.
- BT International, Zürich (CH).
- LANGMAACK, LAARS et al (1999): "Advantages of Soil Conditions in Shield Tunnelling". Experiences of LRTS Izmir. Proc. of WTC '99. Oslo.
- JANCSECZ, S. and STEINEIR, W. (1994): "Face support for a large Mix - Shield in heterogeneous ground condition". Proc. of Tunnelling '94. London - Chapman & Hall.

(Capítulo traducido por Juan Luis Fariñas de Alba, Ing. de Minas, U.D. de Proyectos de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid).