

LA BENTONITA-CEMENTO Y SUS APLICACIONES(*)

Por LUIS DEL CAÑIZO PERATE

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

ADOLFO ERASO ROMERO

Dr. en Ciencias Geológicas y Licenciado en Ciencias Químicas

JULIAN AGUADO SOLER

Licenciado en Ciencias Químicas

La bentonita-cemento constituye un material singular, dado el hecho de que es un líquido tixotrópico durante bastantes horas, antes de fraguar, y, posteriormente, es un sólido muy impermeable, con elevada resiliencia y de una resistencia definida a voluntad dentro de unos amplios márgenes (entre 0,5 y 100 Kg/cm²). Su aplicación a inyecciones desde comienzos de siglo se ha extendido recientemente a otros campos de la Ingeniería Civil, como son las pantallas blandas impermeabilizantes, las pantallas prefabricadas o las zapatas semiduras, todas ellas de clara competitividad económica ante determinadas circunstancias.

Introducción.

Tanto la bentonita como el cemento son dos materiales de propiedades muy marcadas; la bentonita, por su tixotropía y alta plasticidad, y el cemento, por su capacidad de fraguar, adquiriendo así características resistentes. La combinación de ambos constituye un nuevo material de propiedades muy complejas, utilizado desde hace más de medio siglo en inyecciones, y del que en la última década han aparecido nuevas aplicaciones en el dominio de la ingeniería civil, aun en fase de desarrollo, a las cuales se refiere este artículo por el interés técnico que tienen y por ser aún poco conocidas en España.

El material está formado por agua con un pequeño porcentaje de bentonita (del 2 al 6 por 100, generalmente), al que se añade una cantidad variable de cemento, que en inyecciones suele ser del 75 al 200 por 100, expresado en peso de agua, e inferior al 50 por 100 en otras aplicaciones (fig. 1). La mezcla resultante se mantiene en estado líquido durante cierto número de horas gracias al poder retardador de la bentonita, permitiendo así su bombeo o la consiguiente realización de una perforación a su

amparo y una mayor penetrabilidad en inyecciones que la lograda por la lechada de cemento; este lodo es tixotrópico como la bentonita, pero más denso y de color gris, siendo susceptible de mantener verticales y estables las paredes

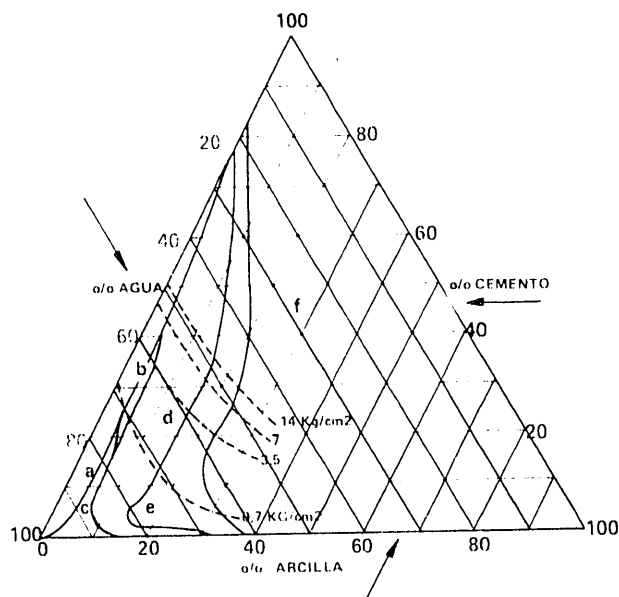


Fig. 1. — Posibilidad de utilización de las mezclas de bentonita-cemento según su dosificación (según Fulbert 570): a) suspensión inestable que sedimenta; b) suspensión estable temporalmente que sedimenta antes de fraguar; c) Geles de arcilla-cemento poco resistente; d) suspensiones estables y bombeables; e) suspensión estable viscosa y espesa; f) mezclas no trabajables, sólidos generalmente en forma de polvo.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de mayo de 1976.

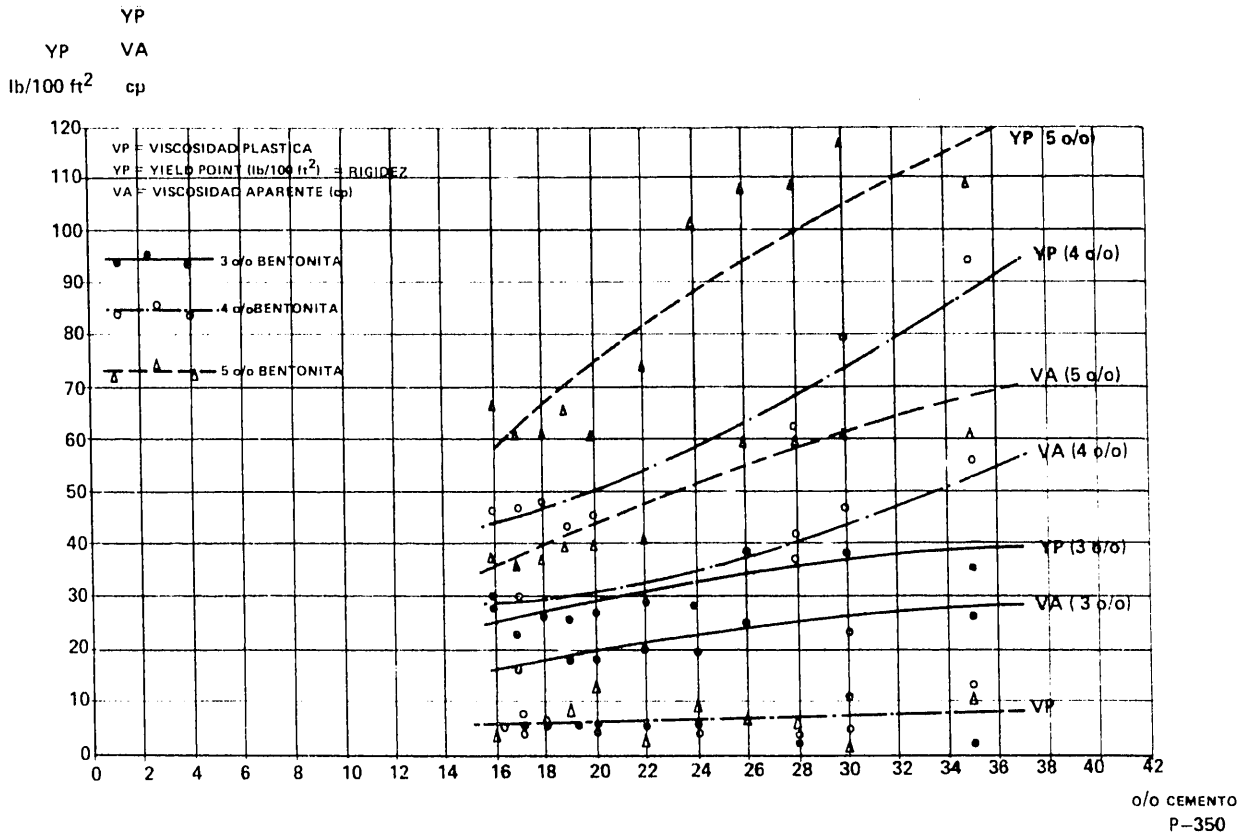


Fig. 2. — Variación de la viscosidad aparente, viscosidad plástica y rigidez de lodos bentonita-cemento de diferente dosificación (según A. Eraso).

de la perforación y evitar con su viscosidad la sedimentación del cemento. Posteriormente, tras determinado número de horas, se produce un fraguado lento del cemento, constituyendo un sólido de densidad baja y de gran contenido de humedad, con una extensa gama de resistencias según sea la relación agua-cemento; la bentonita aporta a dicho material una mayor impermeabilidad y una cierta plasticidad que disminuye la rigidez del sólido, permitiéndole adaptarse a algunos movimientos o asentamientos diferenciales sin agrietarse.

Propiedades de la bentonita-cemento.

Las principales propiedades de este material, que varían cuantitativamente según la interacción química particular de cada pareja bentonita-cemento, son las siguientes:

Viscosidad.

Aumenta con la dosificación de bentonita y también con el contenido de cemento (fig. 2).

Es necesario para alcanzar los valores de régimen un batido suficiente de la bentonita y un cierto período de maduración del lodo hasta conseguir la hidratación total de la arcilla, todo ello antes de proceder a la adición del cemento.

Una vez fabricado el lodo de bentonita-cemento, si el tiempo de maduración ha sido suficiente, su viscosidad permanece constante durante un cierto tiempo definible como tiempo de espesamiento (cuando la viscosidad alcanza 100 c. p., medidos en un consistómetro); a partir de aquí comienza espontáneamente a aumentar la viscosidad, iniciándose el fraguado sin solución de continuidad.

Durante la perforación de suelos, la incorporación al lodo de partículas del mismo produce un aumento de viscosidad. Cuando la relación entre el incremento de viscosidad aparente y la viscosidad aparente es proporcional a la relación entre el incremento de la viscosidad plástica y la viscosidad plástica la contaminación es de tipo físico, y si se deseara efectuar una corrección debe realizarse mediante la adición de agua, lo cual causará indirectamente

una disminución de la resistencia por elevar la relación agua-cemento. Si por el contrario la relación entre el incremento de la viscosidad aparente y esta misma es proporcional a la relación entre el incremento de rigidez y la rigidez o "yield point", la contaminación es de tipo químico (por ejemplo la causada por agua del mar), y el tratamiento correctivo se logra mediante el empleo de fluidificantes, los cuales suelen tener en general también un carácter de retardadores.

Tiempo de fraguado.

Varía bastante según la pareja bentonita-cemento y suele manipularse mediante retardadores cuando la obra lo requiere. El mantenimiento de una agitación retrasa considerablemente el comienzo del fraguado. Con el todo en reposo, el fraguado se inicia de media a diez horas después de la adición del cemento.

Decantación.

La sedimentación de algunas partículas de cemento hace que decante en la superficie cierta proporción de agua, lo cual debe limitarse por el menor rendimiento volumétrico que implica, escogiendo una pareja bentonita-cemento adecuada. Este fenómeno es consecuencia del cambio de base entre Na^+ y Ca^{++} : sufrido por la bentonita, motivado por la cal que libera el cemento al fraguar.

Densidad.

La densidad aparente varía de 1.1 a 2, según la dosificación de cemento. En aquellos casos en que esta dosificación es baja, el contenido porcentual de agua es muy alto, por lo que la densidad seca del material desecado en estufa puede oscilar de 0,3 a 0,6, lo cual implica se trata de un sólido muy ligero y poroso, formado por un esqueleto incipiente.

Permeabilidad.

Oscila alrededor de 10^{-10} cm/seg., que normalmente es un valor sobrado para obtener la impermeabilidad deseada.

Erosionabilidad.

El peligro de erosión interna por la presencia de un fuerte gradiente hidráulico es frecuente en los suelos limosos de baja densidad y re-

sistencia. De la experiencia acumulada no parece que este material sea propenso a que dé en él el citado fenómeno, quizá por su plasticidad, si bien debe actuarse con cierta prudencia cuando se defina el espesor de una pantalla impermeable.

Resistencia.

Varía mucho según la pareja bentonita-cemento siendo mayor en general para los cementos de alto horno y menor para los puzolánicos.

La resistencia a compresión simple R_c aumenta con la dosificación de cemento según una ley de tipo potencial (fig. 3).

$$R_c = K(C/A)^n$$

Siendo C/A la proporción cemento-agua y n un parámetro que oscila alrededor de 3 para dosificaciones bajas de cemento y alrededor de 2 para dosificaciones altas debiendo obtenerse experimentalmente en cada caso.

Análogamente al caso de los hormigones hidráulicos la resistencia aumenta proporcionalmente al logaritmo del tiempo.

Una cierta pérdida de agua por parte del material lleva consigo una cierta consolidación y un aumento de la resistencia.

La incorporación de arena en pequeñas cantidades para formar un mortero o la contaminación por incorporación de partículas del suelo durante una obra de perforación ocasiona una elevación pequeña de la resistencia, pues, en general, las partículas alcanzan a poseer pocos contactos entre sí.

Deformabilidad.

La curva de rotura a compresión simple posee una forma análoga a la de las arcillas blandas, con un tramo elástico y un codo bastante marcado.

El módulo de elasticidad correspondiente a la primera parte es del orden de 150 a 400 veces mayor de la resistencia a compresión simple de la mezcla, al igual que en las arcillas normalmente consolidadas (fig. 4).

La rama plástica alcanza una deformación del orden del 2 al 4 por 100, siendo ésta mayor cuando la mezcla posee menor resistencia (figura 5). Se aprecia un notable alargamiento de esta rama plástica, hasta alcanzar incluso de-

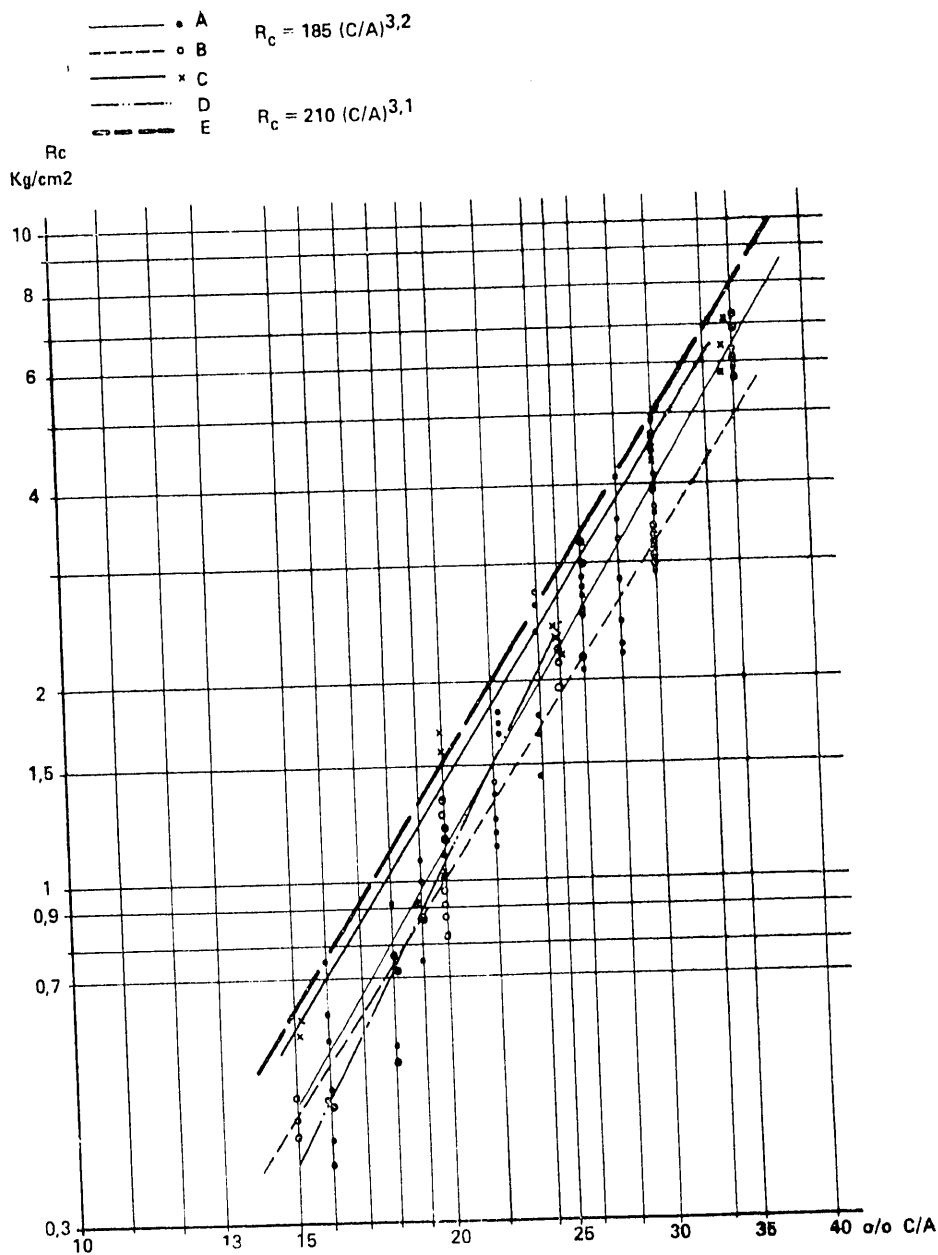


Fig. 3. — Resistencia a compresión a veintiocho días sobre probeta cilíndrica de diferentes mezclas de bentonita-cemento, según la relación cemento-agua (según J. Aguado y A. Eraso).

formaciones del 20 por 100 al realizar ensayos triaxiales aplicando simultáneamente una presión lateral; este hecho indica que el material posee una elevada resiliencia y será apto para soportar grandes deformaciones y asentamientos diferenciales sin romper.

Realizando ensayos lentos se aprecia una deformabilidad mucho mayor, con módulos edométricos del orden de sólo treinta veces la resistencia a compresión simple.

Plasticidad.

La mezcla bentonita-cemento es un material de alta plasticidad, si bien se sitúa por debajo de la línea A en el diagrama de plasticidad de Casagrande. Ello se debe, por un lado, a la fuerte adición de peso de cemento, que es un material no plástico y, por otro, al hecho de que el cemento actuó químicamente sobre la bentonita sódica, produciendo un cambio catiónico en la

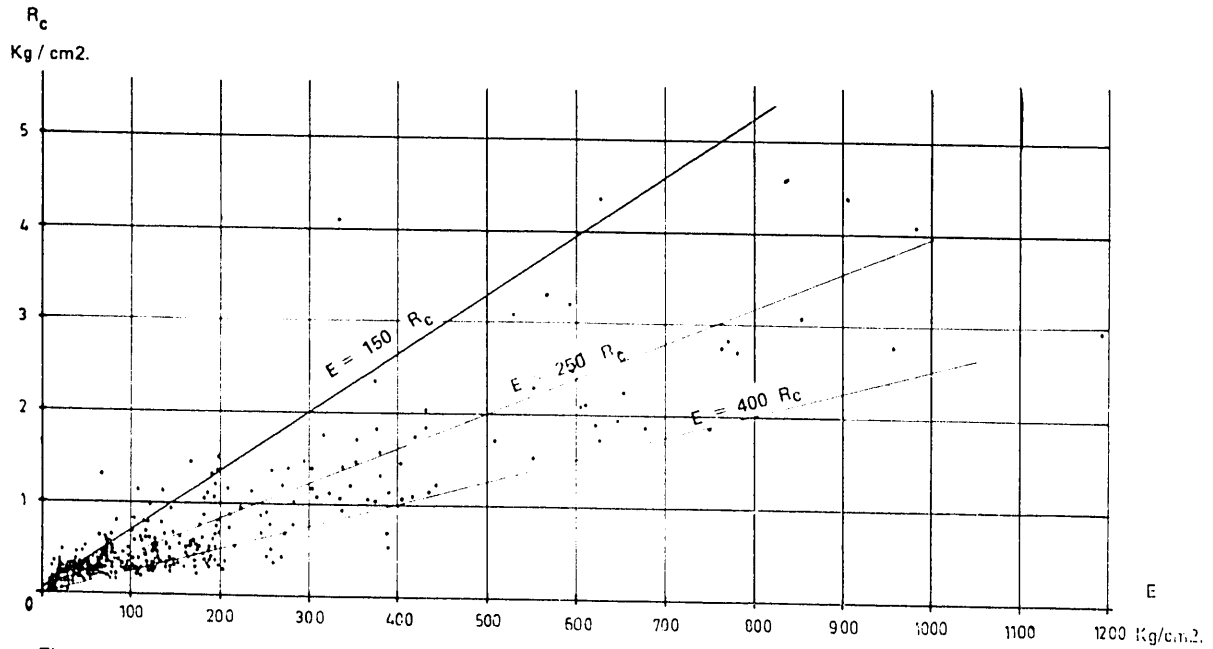


Fig. 4. — Correlación entre el módulo de Young (E) y la resistencia a compresión simple (R_c) para una bentonita-cemento española, deducida sobre probeta cilíndrica de esbeltez dos y para una presión mitad de la rotura.

misma y convirtiéndola en bentonita cálcica que es menos activa.

Durabilidad.

La adición de bentonita proporciona una excelente protección al cemento, dificultando con su impermeabilidad la penetración de líquidos. La experiencia acumulada en cortinas de inyecciones, durante más de medio siglo, en recintos de pantallas impermeables durante dos lustros, y los ensayos de Laboratorio en condiciones extremas, permiten asegurar una gran resistencia del material ante agentes agresivos tales como sulfatos, materia orgánica y diversos ácidos, muy superior comparativamente a la del mortero de cemento.

Aplicaciones.

De las propiedades anteriores conviene resaltar el aspecto práctico de algunas de ellas:

La elevada *impermeabilidad*, que permite su utilización en cortinas de inyecciones (presas) o en pantallas blandas para formar recintos estancos.

Su *deformabilidad* y alta resiliencia, que le permite soportar grandes deformaciones y

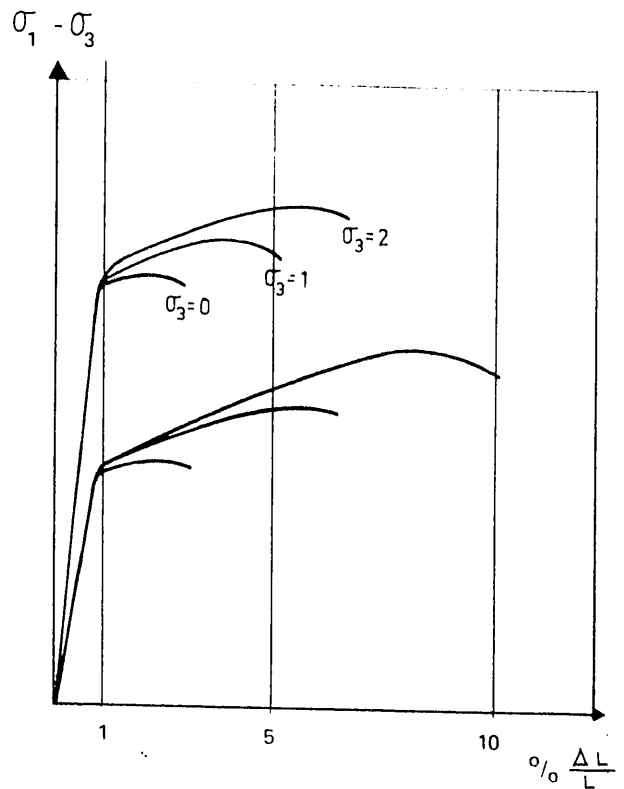


Fig. 5. — Curvas típicas tensión-deformación mostrando la mayor deformabilidad de la bentonita-cemento para resistencias menores y tensiones laterales mayores.

asientos diferenciales sin perder continuidad, en especial con cargas lentas y estado tensional triaxial, lo cual es de gran interés en las pantallas blandas.

La *gama de resistencias*, que puede ser muy baja en las pantallas blandas para que se auto-cierren las posibles grietas, o por el contrario puede ser suficientemente elevada para sustentar cargas verticales, que permite su empleo en zapatas semiduras o pantallas prefabricadas.

Su carácter de *líquido manejable que fragua*, que lo hace apto para rellenar por completo cavidades estrechas, lo cual se aplica no sólo en inyecciones, sino en instrumentación y en las pantallas prefabricadas.

Por último, su baja densidad, que implica un *ahorro* de materiales, con la consiguiente eco-

nomía que se suma a la obtenida por la sencillez de su manejo.

Las aplicaciones más interesantes son las siguientes:

Inyecciones.

El empleo de la bentonita-cemento como producto de inyección posee las ventajas sobre la lechada de cemento de su mayor estabilidad, penetrabilidad e impermeabilidad.

Las dosificaciones empleadas suelen oscilar del 2 al 6 por 100 de bentonita y del 50 al 150 por 100 de cemento.

El empleo en inyecciones desde comienzos de siglo ha permitido desarrollar una tecnología para la fabricación y manejo del lodo; así como



Fig. 6. — Perforación de una pantalla de bentonita-cemento.

una amplia gama de aditivos aptos para superar dificultades de diversa índole.

Pantallas impermeables.

Se denominan también pantallas blandas, plásticas o de lodo autoendurecible.

Comenzó su desarrollo en la década de los años 60, empleándose la mayoría de las veces un hormigón de bentonita-cemento como relleno de la pantalla, y utilizando diversos procedimientos constructivos.

El método más simple, que es el que se ha generalizado, consiste en perforar una zanja profunda y estrecha por paneles verticales, utilizando la maquinaria usual de excavación de pantallas continuas de hormigón (fig. 6), pero utilizando como fluido de perforación para contener las paredes un lodo de bentonita-cemento en lugar de un lodo simple de bentonita, el cual fragua tras cierto lapso de tiempo endureciendo lentamente. Si la perforación de los paneles contiguos es inmediata se mezclarán los dos correspondientes, quedando una pantalla sin juntas, realmente continua, y si se retrasa dicha perforación, se muerde el extremo aún pastoso del panel más antiguo (fig. 7), al cual se adhiere perfectamente el lodo nuevo gracias a la plasticidad del material de forma que tampoco llega a distinguirse la junta.

El éxito del método radica por un lado en la extraordinaria calidad del producto, impermeable en toda su masa gracias a la ausencia de juntas y susceptible de adaptarse a las grandes deformaciones que pueda provocar el cambio de nivel del agua (en el recinto de la esclusa de El Havre se registraron movimientos de la cabeza de la pantalla de 20 a 50 cm, tanto en horizontal como en vertical, debido al achique del mismo, sin que se detectara un caudal apreciable y creciente por la posible aparición de fisuras). Por otro lado posee un costo bastante bajo, gracias al consumo relativamente reducido de materiales y a la mecanización y simplicidad de la construcción que consiste en una operación única, rápida y continua.

Otros sistemas de impermeabilización de calidad similar o incluso peor, tales como las tablestacas o las pantallas perforadas con hormigón bituminoso son mucho más costosas, y aquéllos de precio análogo, como las pantallas de hormigón de arcilla o de suelo mejorado

suelen ser de calidad inferior por la irregularidad y dificultad de la compactación y por la existencia de juntas.

Puede afirmarse, por consiguiente, que para establecer cualquier recinto estanco en general la solución más económica y de mayor calidad técnica consiste en realizar una pantalla de bentonita-cemento, salvo en las de cortinas de inyecciones en roca, o de núcleos de arcilla levantados simultáneamente a los espaldones en presas de materiales sueltos, o de estanques con impermeabilización superficial con láminas

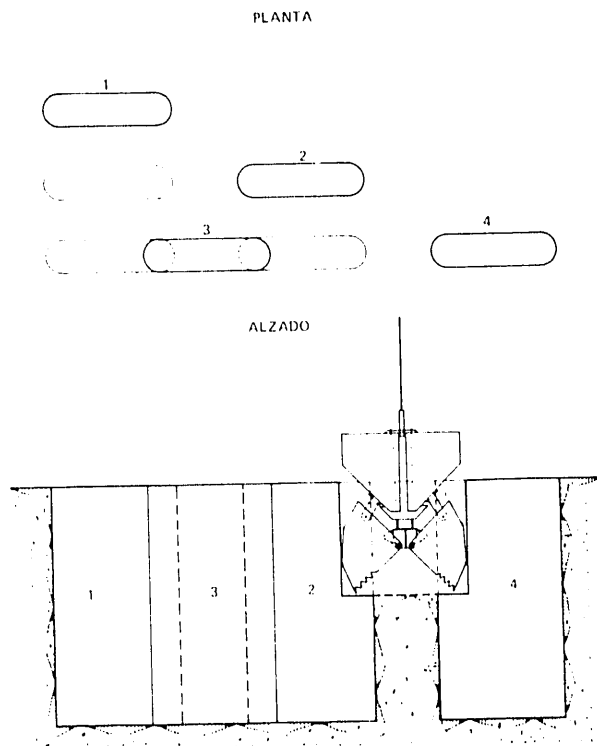


Fig. 7. — Excavación continua de una pantalla blanda, sin juntas, mediante paneles alternados.

plásticas o con capas de arcilla, ya que se trata de casos en que este tipo de pantallas excavadas no resulta viable, así como cuando no existe espacio para dejar un espaldón de tierras resistente y es preciso recurrir a una pantalla de tablestacas o de hormigón armado que además de ser impermeable sea capaz de resistir para salvar el desnivel necesario.

Las limitaciones o inconvenientes son, en definitiva, su falta de resistencia, el no poderse

atravesar capas rocosas de cierto tamaño, y el requerir una tecnología avanzada (fig. 8) y un personal especializado para su ejecución.

El campo de aplicaciones de este tipo de pantallas es muy amplio:

Rastrillos de presas cuando existen materiales granulares cuaternarios en su base; reparación de presas de materiales sueltos con el núcleo agrietado.

Establecimiento de recintos donde se va a proceder a un rebajamiento del nivel freático, tales como fosos de edificios industriales o sótanos de viviendas.

Impermeabilización de ataguías de material vertido, bien para cortar un río en la construcción de una presa, o bien para ganar terrenos al mar dejándolos en seco, como es el caso de la construcción de un dique seco.

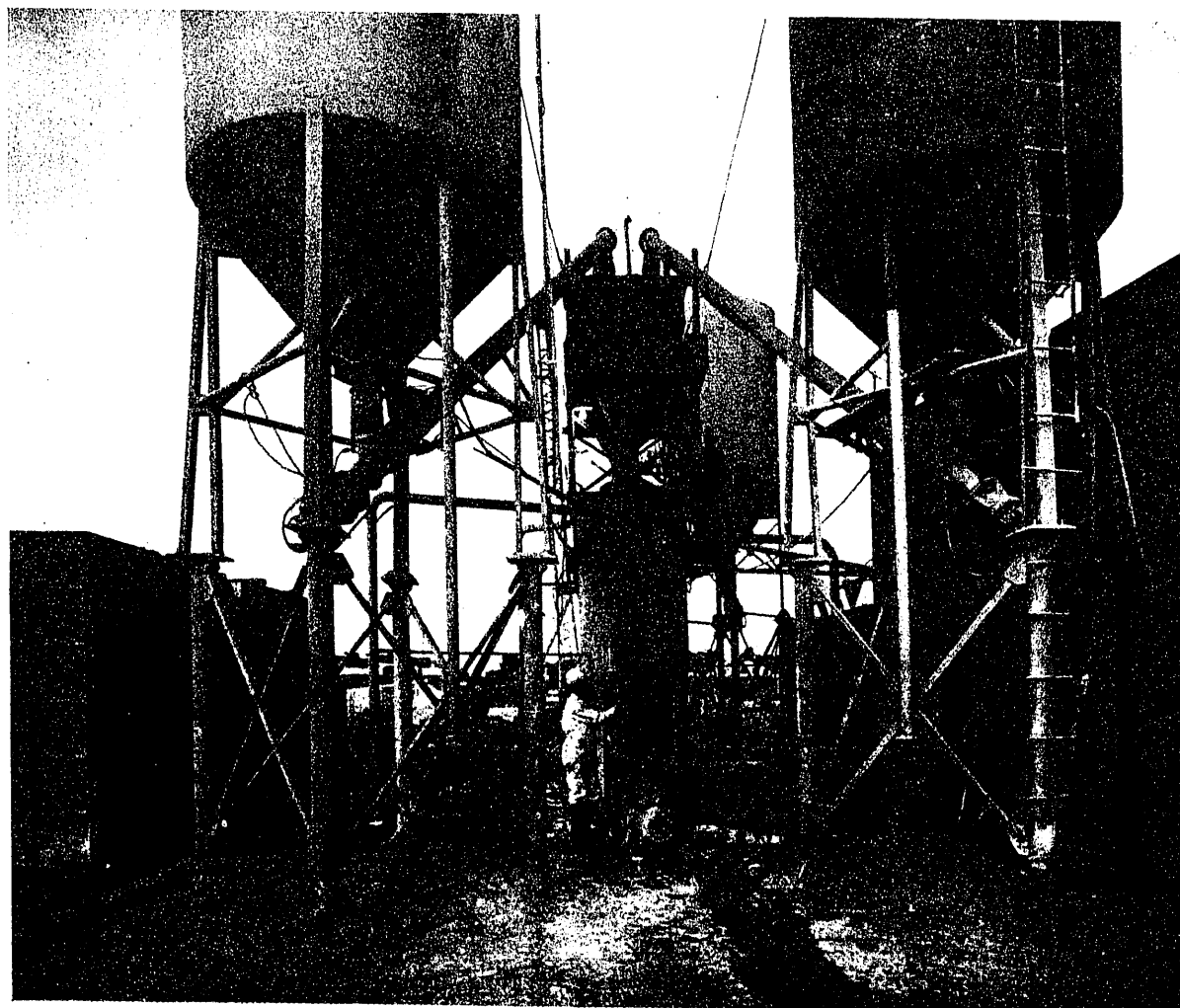
Separación de acuíferos, para evitar la contaminación de ríos por la proximidad de una factoría o para evitar la salinización de un área próxima al mar, desde donde se bombea agua dulce.

Esta técnica se ha introducido en España en 1974, habiéndose realizado ya dos obras de grandes dimensiones con pleno éxito.

Pantallas prefabricadas.

La ejecución de pantallas de hormigón *in situ* perforando la zanja con ayuda de lodos tixotrópicos adolece de tres defectos técnicos: la dificultad de garantizar un hormigonado continuo y sin coqueas, la calidad y estanqueidad mediocre de las juntas entre paneles, y la rugosidad de sus caras con la presencia de pan-

Fig. 8. — Central automática de gran capacidad para la fabricación de bentonita-cemento (cortesía de Kronsa).



zas y exceso de recubrimiento. La idea de introducir una pieza prefabricada de hormigón dentro de la perforación, ya antigua, ha sido desarrollada hasta ahora por dos empresas constructoras francesas, en 1970, por otra suiza y, finalmente, por una española en 1975, todas ellas con diseños originales. Esta solución resuelve los problemas anteriores, en parte gracias a la calidad del prefabricado, con un paramento perfectamente liso, con un hormigón vibrado de alta resistencia y un acero con el recubrimiento estricto y, en parte, gracias al papel de la bentonita-cemento, que es aquí doble:

- Rellenar el hueco que queda entre el prefabricado y el terreno, para así transmitir tanto los empujes horizontales, evitando los asentamientos en las áreas próximas, como los esfuerzos verticales al terreno de la base.
- Rellenar la junta entre paneles logrando una estanqueidad de gran eficacia.

La dosificación de cemento debe ser del orden de los 300 Kg/m³ para poder lograr resistencias de 10 a 30 Kg/cm², según sea la magnitud de las cargas verticales.

Una variante interesante la constituyen las pantallas mixtas, en que el panel prefabricado no alcanza el fondo de la excavación (fig. 9). La

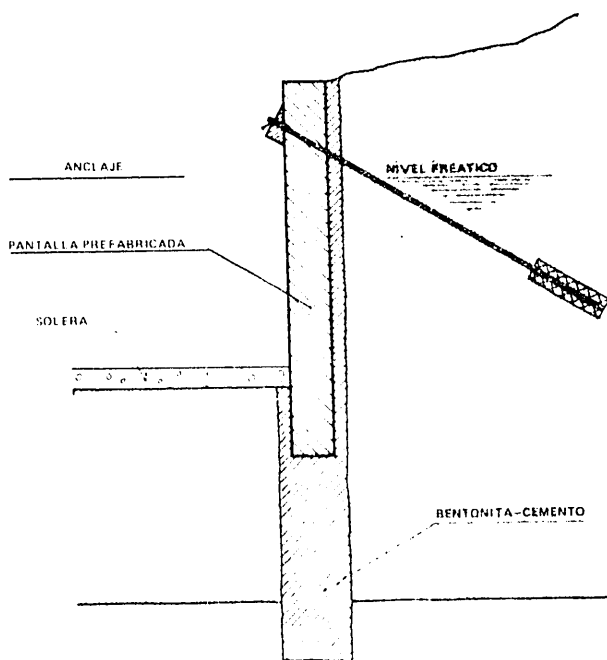


Fig. 9. — Pantalla mixta: prefabricada en la parte superior con misión resistente y blanda en la parte inferior, hasta alcanzar un estrato impermeable.

parte superior resiste el desnivel de tierras, y la parte inferior sólo de bentonita-cemento, más económica, actúa sólo como pantalla plástica para alcanzar un estrato impermeable y lograr la estanqueidad deseada en los sótanos. Otra posibilidad de pantalla mixta consiste en rellenar la parte inferior de hormigón hidráulico en masa para transmitir unas fuertes cargas verticales al terreno duro y con la parte superior formada por paneles prefabricados que quedan sellados gracias a la bentonita-cemento. Como se ve la flexibilidad de diseño de estas pantallas prefabricadas es muy grande, pudiéndose emplear el hormigón armado, el pretensado, piezas macizas o aligeradas, paneles de espesor constante o piezas en doble T de mayor rigidez combinadas con placas delgadas intermedias, pantallas de contrafuertes con las piezas prefabricadas engarzadas entre sí, y, en fin, una variedad de solución capaces de adaptarse a necesidades muy diversas.

Instrumentación.

Una aplicación de poco valor comercial, pero técnicamente interesante, y que es un ejemplo de las posibilidades de diversificación de este material, consiste en el relleno y sellado de taladros donde se colocan elementos de instrumentación, tales como inclinómetros o piezómetros, donde se pretende no dejar ningún hueco y que el material de relleno ofrezca una buena estanqueidad y una deformabilidad análoga al suelo que le rodea.

Zapatas semiduras.

Consiste en excavar un pozo o zapata profunda sin entibación, sustentando las paredes con lodo de bentonita-cemento, y procediendo seguidamente a verter y compactar gravas o áridos para constituir un hormigón plástico de bentonita-cemento de 20 a 60 Kg/cm² de resistencia (fig. 10).

El procedimiento es muy adecuado para el caso frecuente de que exista un terreno superficial muy flojo y aparezca el estrato resistente a pocos metros de profundidad, pero ya bajo el nivel freático, bastando la resistencia del hormigón plástico, que sólo debe trabajar a 5 ó 10 kilogramos por centímetro cuadrado.

Las otras soluciones hoy utilizadas realmente están pensadas para otras circunstancias, y

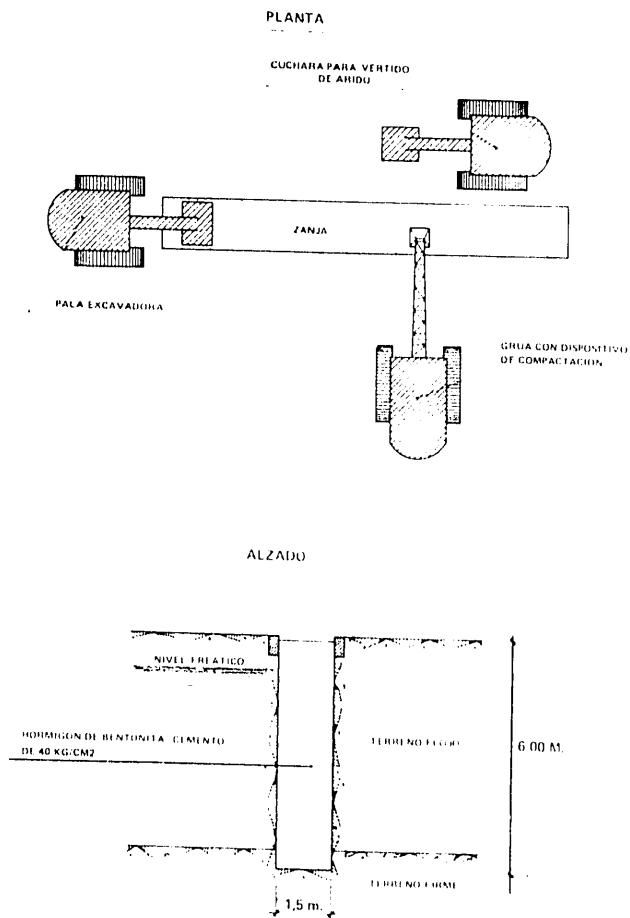


Fig. 10. — Cimentación mediante zapata corrida semidura; excavación continua con bentonita-cemento y relleno posterior de árido compactado.

para salvar un desnivel de agua de quizá sólo dos metros movilizan unos medios y recursos exagerados y, por lo tanto, costosos. Así ocurre con la posibilidad de efectuar un rebajamiento del nivel freático, que es una operación engorrosa, o de recurrir a pilotes muy cortos, con un bajo rendimiento en su construcción, o con la realización de pozos de cimentación con hormigón sumergido, que suele dejar ciertas dudas sobre su calidad, salvo si se recurre a una entibación o al empleo de lodos bentoníticos.

BIBLIOGRAFIA

- AGUADO, J.: "Ensayos sobre lodo de bentonita-cemento". Informe interno. Kronsa, 1975.
- CAÑIZO, L.: "Las pantallas impermeabilizantes de bentonita-cemento". *Boletín Inf. Laboratorio Trans. y Mecánica del Suelo*, M. O. P. Madrid, julio 1975 (con resumen en inglés y francés).
- CARCN, C.: "Un nouveau style de perforation. La boue autoducissable". Conferencia pronunciada en París, diciembre 1972.
- DUBOIS, J.: "L'ecran d'étanchéité de la nouvelle écluse maritime du Havre". *Travaux*, pág. 3-14, enero 1971.
- ERASO, A.: "Ensayos sobre lodo de bentonita-cemento y sepiolita-cemento". Informe interno Agromán. Métodos. Kronsa, 1975.
- KASTNER, R., et al: "Etude d'un coulis de perforation". *Construction*, pág. 73-82, marzo 1974.
- TORNAGHI, E.: "Parois souples moulées dans le sol avec un coulis de perforation bentonite-ciment". Congreso Europeo de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, páginas 577-583. Madrid, 1972.