

# INYECCION DE SUSPENSIONES DILUIDAS DE MICROCEMENTO EN ARENAS FINAS

LUIS ARENZANA (\*)  
RAYMOND J. KRIZEK (\*\*)

**RESUMEN.** Se exponen los resultados obtenidos tras una investigación experimental sobre el comportamiento de suspensiones diluidas de microcemento al ser inyectadas en arenas finas, describiéndose al final el proceso de transporte y separación de partículas como un proceso de filtración a través de una matriz granular. Se describen nueve clases de medios porosos con D10 entre 0,3 y 0,045 mm son descritos en relación a su superficie específica, radio hidráulico y permeabilidad intrínseca. Se determinaron la viscosidad, curvas de sedimentación y características de floculación de las suspensiones de microcemento con relaciones agua:cemento de 2 o superiores. La inyectabilidad de estas suspensiones a través de los medios porosos seleccionados fue evaluada y observaciones con microscopio electrónico (SEM) permitieron estudiar muestras de la deposición de partículas de microcemento en el medio poroso y de los procesos de hidratación de las pastas de microcemento. Se observó cómo el proceso de separación de partículas se ajustaba a una distribución de probabilidad Chi-square.

**ABSTRACT.** *An account is given of the results obtained after experimental research into behaviour of diluted suspensions of microcement when they are injected into fine sands and a description is given of the transport and separation process of the particles, as a filtration process through a granular matrix. Nine kinds of porous media with D10 between 0,3 and 0,045 mm are described in relation to their specific surface, hydraulic radius and intrinsic permeability. The viscosity, sedimentation curves and flocculation characteristics of the microcement suspensions with relation to water: cement of two or above, are determined. The injectability of these suspensions through the chosen porous media was evaluated. Observations with electronic microscope (S.E.M.) made possible both the study of samples of the deposition of particles of microcement in a porous medium and the hydration processes of the microcement pastes. Observation was made of how the particle-separation process adjusted to a chi-square probability distribution.*

Cada vez más, las inyecciones de microcemento se vienen proponiendo como una alternativa a las inyecciones químicas (que a menudo suelen contener uno o más componentes tóxicos) en arenas finas, pero la viabilidad en su inyectabilidad está altamente condicionada por la relación entre el tamaño de las partículas en suspensión (bien partículas individuales o agregación de ellas) a inyectar y el de los huecos del medio poroso. Si algunos son partidarios de la aplicación de suspensiones concentradas (baja relación agua:cemento) y altas presiones de inyección, esta metodología no garantiza la homogeneidad del medio inyectado pudiendo desarrollarse caminos preferenciales durante el proceso de inyección (fracturación hidráulica del medio poroso); en cambio la aplicación de suspensiones diluidas ofrece un nuevo camino

para obtener un mayor alcance en la penetración y mejorar la distribución de la inyección a través del medio poroso, aunque es necesario un mejor conocimiento de los mecanismos de interacción en el transporte y retención de partículas para garantizar los resultados deseados con la inyección. Por todo esto, en este estudio se inyectaron arenas finas con suspensiones diluidas de microcemento siendo sus resultados interpretados como un proceso de filtración.

## MECANISMOS DE FILTRACION

El tratamiento de este fenómeno como un proceso de filtración obliga a tomar consideraciones apropiadas sobre la eficacia en la retención de partículas y de la resistencia hidrodinámica del medio poroso al flujo de la suspensión. El intercambio de partículas de la suspensión al medio poroso depende de: la disponibilidad de espacios de retención (superficie de las partículas, grietas y constricciones), la magnitud de las fuerzas de retención ejercidas sobre las partículas (presión de fluido, fricción y fuerzas de Van der Waals, electrostáticas, electrocine-

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Ph.D., P.E. Ing. Consultor, Madrid-Chicago.

(\*\*) Ph.D., P.E. Stanley F. Pepper Profesor y Presidente de Ingeniería Civil, Northwestern University, Evanston, Illinois.

máticas y químicas) y de los mecanismos de captura que permitan a las partículas entrar en los espacios de retención (sedimentación, inercia, efectos hidrodinámicos debidos a la no esfericidad de las partículas y a la no uniformidad en la variación de la viscosidad a la intercepción directa y a la difusión por movimiento Browniano).

La sedimentación, difusión (movimiento Browniano), fuerzas de arrastre y de ascensión, y fuerzas de superficie pueden considerarse de efecto despreciable en cuanto a su influencia en la retención de partículas de microcemento en suspensión en la matriz arenosa. Las fuerzas moleculares y electrocinéticas pueden ser apreciables sólo cuando las partículas de microcemento se encuentran próximas a la superficie de los granos de arena, y en cuanto a los efectos de volumen y fenómenos de superficie en la retención de partículas de microcemento son del mismo orden de magnitud. Dependiendo de la velocidad del fluido, las fuerzas de inercia pueden ejercer un efecto significativo en las trayectorias de las partículas de microcemento, produciendo desviaciones en las líneas de flujo, llegando a estar en contacto o próximas a los granos de arena. Aunque las inyecciones convencionales de cemento normalmente son consideradas como un fenómeno controlado por la relación del tamaño de las partículas de cemento al de los poros de la matriz a inyectar, en el caso que tratamos de suspensiones diluidas de microcemento, el fenómeno puede ser tratado como un proceso de filtración a través de una matriz granular.

### INVESTIGACION PROPUESTA

(a) Nueve medios filtrantes (seis arenas finas y tres clases de microesferas de cristal, fueron caracterizados en cuanto a su conductividad hidráulica y a la geometría de sus espacios porosos; (b) se desarrollaron procedimientos para la preparación de suspensiones diluidas de microcementos para obtener alta penetrabilidad; (c) se cuantificaron aquellas características de estas suspensiones relativas a la viscosidad, floculación y sedimentación (d) apropiados ensayos de filtración fueron realizados para evaluar la capacidad de retención de las partículas en suspensión y su distribución a través del medio filtrante. Se procuró realizar todos los ensayos de acuerdo con las normas vigentes para éstos, si bien algunas veces fue necesario modificar los equipos y técnicas existentes o desarrollar otros nuevos basados en los medios que dispusimos en el laboratorio. Los ensayos de viscosidad de las suspensiones de microcemento se realizaron con un viscosímetro de cilindro concéntrico.

Se prepararon suspensiones de microcemento con un amplio rango de valores para la relación agua:cemento w:c, en agitador y se inyectaron en columnas cilíndricas de material filtrante (medio poroso), midiéndose el coeficiente de permeabilidad inicial, la eficiencia como porcentaje de partículas retenidas en función del volumen de suspensión filtrado, y la eficiencia de partículas retenidas como función del tiempo y de su distancia al fren-

te de inyección. Un sistema de filtración al vacío fue diseñado para realizar ensayos de refiltrado y evaluar la posibilidad de su simulación en el comportamiento de una columna de material filtrante (medio poroso) bajo las mismas condiciones de inyección. Muestras de arena fueron observadas mediante un microscopio compuesto a 60 aumentos para evaluar la forma de las partículas, su tamaño y obtener información de la textura de los granos de arena. Con un microscopio electrónico (SEM) se observaron muestras y obtuvieron fotogramas a 20.000 aumentos, del medio poroso inyectado y de partículas filtradas obtenidas del efluente durante los ensayos de filtración.

### MATERIALES ENSAYADOS

En este estudio, se ha utilizado microcemento MC-500 (fabricado por Onoda Cement Company de Japón). Con un peso específico de  $3,00 \pm 0,10$  y una superficie específica sobre  $8.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , y el 98 %, 50 % y 2 % de sus partículas menores de 10, 4 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Su composición química es 48 % CaO, 30,6 % SiO<sub>2</sub>, 12,4 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5,8 % MgO, 1,1 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,8 % SO, 0,4 % pérdida al fuego y 0,5 % varios. Los nueve medios porosos consistieron en 6 arenas finas con D10 entre 0,16 y 0,030 mm y contorno de los granos desde subredondeado hasta angular, y tres tipos de microesferas de cristal con D10 de 0,310, 0,081 y 0,046 mm. Datos adicionales que caracterizan estas arenas y microesferas se recogen en la Tabla I.

### CARACTERIZACION DEL MEDIO POROSO

La superficie específica  $S_s$ , fue determinada por tres métodos diferentes (factor de esfericidad, permeabilidad por aire y gas cromatógrafo) y valores típicos se recogen en la Tabla I. Se considera que aquellos valores obtenidos a través del método de permeabilidad por aire se ajustan mejor a la realidad del problema por su similitud con las superficies de corriente de la matriz arenosa al ser inyectada. El radio hidráulico  $R_H$ , se define como la relación entre la superficie de huecos en una sección transversal y el perímetro de todas las partículas integradas en esta sección; en términos de la porosidad,  $n$ , y la densidad seca  $\gamma_d$ , queda relacionado por  $R_H = n/(1 - n) \cdot S_s \cdot \gamma_d$ .

En el caso en que el agua es el fluido a inyectar, la relación entre la permeabilidad intrínseca  $K$  y el coeficiente de permeabilidad en ingeniería  $k$ , puede considerarse aproximadamente  $K = 0,1 k$  donde  $K$  y  $k$  son expresados en  $\text{cm}^2$  y  $\text{cm}/\text{sg}$  respectivamente. Cuarenta y ocho ensayos de permeabilidad (dos series para cuatro estados de compacidad en cada arena), fueron realizados utilizando agua del grifo como fluido a inyectar, obteniéndose una correlación entre la permeabilidad intrínseca y el radio hidráulico definida por  $K = \zeta R_H^{2,8}$ , donde  $\zeta$  es una constante para cada arena (medio poroso); considerándose que arenas con una formación geológica análoga, tienen similares valores de  $\zeta$ .

MATERIAL	SIMBOLO	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	*SF	*AP	*GC
Arena Torpedo	TP	0,618	0,357	0,233	068	149	0351
Arena Crystal Silica	CS	0,600	0,460	0,290	046	163	0276
Arena fina Ottawa	OF	0,280	0,215	0,170	138	127	0191
Arena de playa Monterrey	MB	0,480	0,370	0,300	080	621	0780
Arena de playa Evanston	EB	0,219	0,180	0,159	148	887	1492
Arena media Ottawa	OM	0,334	0,298	0,272	100	117	0151
Microesferas MS-XP	M-1	0,450	0,357	0,310			0139
Microesferas MS-M	M-2	0,115	0,094	0,081			0214
Microesferas MS-L	M-3	0,063	0,092	0,046			0294

**TABLA I.** Características geométricas del medio poroso.

\* La superficie específica (en cm<sup>2</sup>/gr) fue determinada por tres diferentes métodos: Factor de Esfericidad (SF), Permeabilidad por aire (AP) y Gas Cromatógrafo (GC).

Se considera un valor medio del radio hidráulico para cada tipo de arena y microesferas, éste es una media entre los valores correspondientes del medio poroso en sus estados más suelto y denso en que fueron ensayados. Representados gráficamente estos valores medios por sus coordenadas  $R_H$  y  $K$  es de observar; que si dos matrices arenosas tienen la misma permeabilidad intrínseca, la de radio hidráulico mayor es la de superficie específica menor y en el caso de que dos matrices arenosas tengan igual radio hidráulico, la de menor superficie específica es la de permeabilidad intrínseca más alta. Basándonos sobre resultados obtenidos y de observaciones hechas durante los ensayos de permeabilidad e inyección, se considera que una suspensión de microcemento a una presión de 10 psi es inyectada con normalidad en un medio poroso formado por arenas finas para valores de  $K \geq 0,002$  cm y  $R_H \geq 0,00015$  cm.

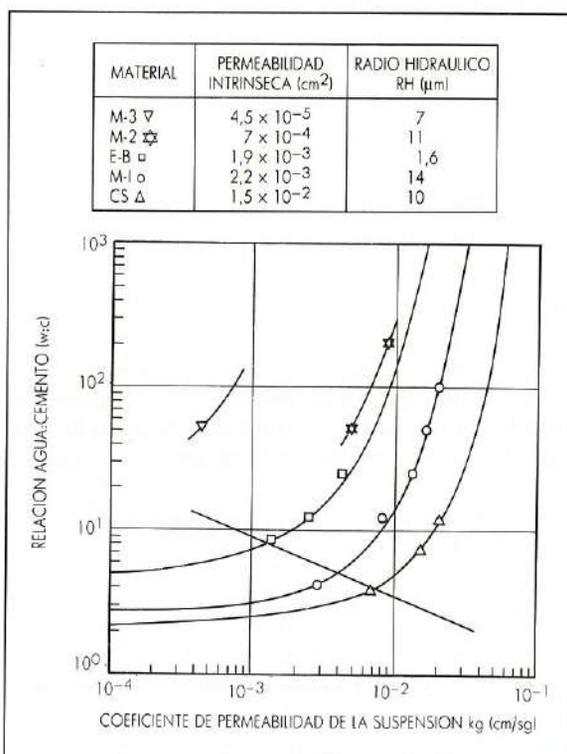
### CURVAS EQUIPERMEABLES

Ensayos de inyección-permeabilidad fueron realizados con dos tipos de arenas finas (Evanston Beach y Cristal Silica) y tres tipos de microesferas cuyos resultados se muestran en la figura 1. El coeficiente de permeabilidad en ingeniería  $k$  que define el «límite superior» en las curvas equipermables se obtuvo al utilizar agua del grifo como fluido inyectado ( $w:c = \infty$ ), mientras que en aquellos ensayos que al ir reduciendo la relación  $w:c$  la suspensión comenzaba a penetrar con dificultades permitía definir un límite inferior de estas curvas ( $k_g = 0$ ). La figura 1 puede utilizarse indistintamente para determinar la curva equipermable (permeabilidad intrínseca) para una determinada arena fina y un determinado estado de compacidad. En un caso un ensayo de inyección puede servir para obtener un punto en el gráfico e interpolar gráficamente entre las dos curvas existentes contiguas. Alternativamente si se ha obtenido información suficiente de la arena a tratar para definir un

punto en el gráfico  $R_H - K$ , se puede obtener (por lectura directa) valores aproximados para  $R_H$  y  $K$ .

### CARACTERIZACION DE LAS SUSPENSIONES DE MICROCEMENTO

Aunque las suspensiones de microcemento en agua son consideradas como fluidos no-newtonianos, la viscosi-



**FIGURA 1.** Curvas de igual permeabilidad intrínseca.

dad dinámica  $\eta$ , en suspensiones  $w:c \geq 2$  puede considerarse independiente del gradiente transversal de velocidad  $dv/dy$ , al menos durante las cuatro horas siguientes a la preparación de la suspensión. La relación entre el esfuerzo cortante  $\tau$ , como función de  $w:c$  y el gradiente transversal de velocidad  $dv/dy$  durante este período inicial de cuatro horas se expresa por,  $\tau = a(dv/dy)^m$  donde  $a = 26(w:c)^{-2}$  y  $m = 0,1(w:c)^{0,7}$ . La Figura 2 muestra la correlación entre el esfuerzo cortante y el gradiente transversal de velocidad para suspensiones en un intervalo  $w:c$  entre 2 y 12.

Dos ensayos fueron realizados para observar el efecto de un agente dispersante en el proceso de floculación en suspensiones de MC-500; muestras tomadas del tanque de mezclado después de cuatro horas indicaban que aquellas suspensiones en las que no se añadió agente dispersante se observaban flóculos entre 15 y 250  $\mu\text{m}$ , mientras que con la utilización de un agente dispersante el tamaño de partículas y flóculos se mantenía entre 1 y 20  $\mu\text{m}$ . Es de observar que el gradiente de las curvas de sedimentación y la porosidad del estrato de sedimentos aumenta al incrementar  $w:c$ , en cambio la intensidad de agitación (energía y gradiente de velocidad empleados en el proceso de mezclado de la suspensión) es de insignificante efecto en el gradiente de sedimentación y en la porosidad del estrato de sedimentos. La variación del porcentaje del agente dispersante produce pequeñas variaciones en el gradiente de las curvas de sedimentación; mientras que aumentar la concentración del agente dispersante supone una pequeña reducción en la porosidad del estrato de sedimentos.

### FILTRABILIDAD DE LAS SUSPENSIONES DE MICROCEMENTO

Para obtener un mejor conocimiento de los cambios físicos y químicos que se producen en el microcemento durante la inyección y posteriormente, se realizaron observaciones con el microscopio electrónico (SEM) de los sólidos (a) en suspensión antes de la inyección, (b) del efluente, (c) en el medio granular después de la inyección. Para valorar la filtrabilidad de una suspensión, se realizaron ensayos de refiltrado a través de una membrana y sus resultados fueron comparados con los obtenidos en ensayos de filtración en columna de medio granular.

### HIDRATACION DEL CEMENTO

Debido a la baja solubilidad de los constituyentes de los centros, inicialmente las reacciones se producen principalmente en la superficie de las partículas y un pequeño porcentaje de éstas se realizan en la solución. En la fase inicial de hidratación es el primer mecanismo (dilución) el que predomina, mientras que el segundo mecanismo (hidrólisis), llegará a ser dominante durante la segunda fase (DIAMOND, 1972). Debido a la hidrólisis del silicato de calcio, una solución supersaturada de hidróxido de calcio se va formando, hidróxido de calcio y etringita precipitan, y una gruesa costra de silicato de calcio hidratado se forma sobre la superficie de las partículas de cemento. Esto produce un período de inactividad y el proceso de hidratación no se reanuda hasta que la costra envolvente de silicato de calcio hidratado se abre

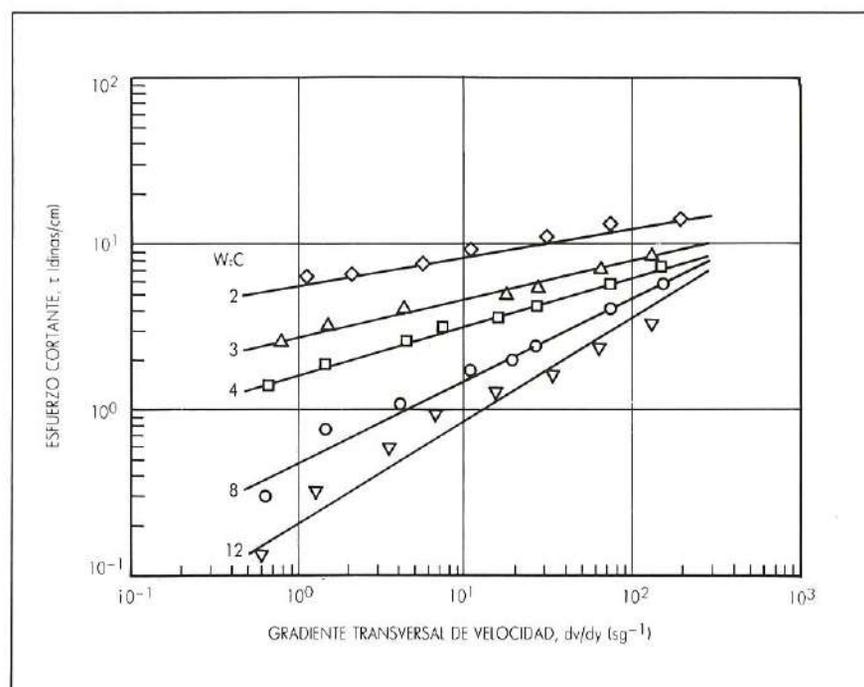


FIGURA 2. Viscosidad de suspensiones con un agente dispersante.

bajo la presión de cristalización (STRUCKE, 1975). El volumen de los productos hidratados es doble al del cemento anhidro, y los productos hidratados gradualmente van ocupando los espacios entre granos (DIAMOND, 1972). Una forma indirecta de analizar el proceso de hidratación en las suspensiones de microcemento fue medir la dureza de las suspensiones a diferentes tiempos después de su preparación. Resultados obtenidos por el método EDTA (Acido etilendiaminotetraacético) indicaron que: (a) al menos durante una hora después de la preparación el mecanismo de dilución era predominante y los reactivos eran disueltos, produciendo iones  $Ca^{++}$  en solución, y (b) seis horas después de la preparación los resultados no estaban concluidos, demostrando esto que el proceso de hidratación era controlado por los mecanismos de hidrólisis.

### OBSERVACIONES MICROSCOPICAS EN LA AGREGACION DE PARTICULAS

Se observó que aplicando el 1% de CAI como agente dispersante (obtenido de Concrete Chemicals Company of Cleveland, Ohio, EE.UU.) estabilizaba la agregación de partículas. Durante el proceso de inyección fue observado cómo la deposición de partículas de cemento y el silicato de calcio hidratado era mayor en zonas donde la velocidad era baja. Aunque la resistencia de la matriz inyectada no se considera significativamente dependiente de la relación w:c, sí en cambio del espesor de la costra envolvente de los granos y de las características de hidratación del gel. Además, el grado de hidratación es esencialmente independiente de la relación w:c durante las primeras horas siguientes a la preparación de la mezcla y por lo tanto durante el proceso de inyección. Partículas en suspensión con un diámetro igual o menor a un tercio del valor del radio hidráulico del medio filtrante no son retenidas en el filtro con una presión de inyección de 10 psi y pueden por lo tanto ser encontradas en el efluente.

### FILTRABILIDAD

Ensayos paralelos de filtración (por membrana al vacío y por medio filtrante granular) fueron realizados con las mismas suspensiones con el fin de poder determinar la filtrabilidad de una suspensión a través de una matriz granular basándonos en ensayos normalizados de filtración por membrana al vacío. En la técnica de filtración a través de membrana (HSIUNG y ASCE, 1972), se relacionan el volumen de la muestra de la suspensión  $V$ , el tiempo de refiltrado  $t$  y el contenido inicial de los sólidos en suspensión  $C_0$ , por  $V \cdot C_0 = M - N \cdot V/t$ , donde  $M$  y  $N$  son constantes. Por lo tanto, resultados de ensayos en suspensiones para diferentes valores de  $C_0$ , permitirán el cálculo de  $V \cdot C_0$  y  $V/t$ , y de éstos determinar  $M$  y  $N$ . Entonces se pueden realizar otras series de ensayos filtrando las mismas suspensiones a través de columnas de un medio granular filtrante dado, y determinar el porcentaje de retención de partículas. Finalmente los

resultados de ambas series de ensayos podrán ser comparados para establecer una correlación que permita valorar la filtrabilidad de una suspensión a través de ensayos de refiltración al vacío. Se observó que en el tiempo de refiltrado en un ensayo de filtración por membrana al vacío influyen, la utilización de un agente dispersante en la suspensión, así como el número de vueltas durante el mezclado.

Se inyectaron suspensiones de microcemento bajo una presión de 10 psi a través de columnas de arena Crystal Silica (suspensiones para una w:c = 2 no pudieron ser inyectadas). Durante cada ensayo la relación entre el peso total de partículas retenidas al peso total de partículas inyectadas, llamado  $R$ , aumenta según w:c aumenta. Resultando  $R = 0,017 Co^{0,79}$  en el caso de no añadir agente dispersante y  $R = 0,013 Co^{0,72}$  en el caso de añadir un agente dispersante (1% CAI). De acuerdo con la experiencia recogida la aplicación de un agente dispersante (1% CAI), una intensidad de agitación para 20 rpm y un tiempo de mezclado de 5 minutos para el agente dispersante seguido de 15 minutos como tiempo de mezclado de las partículas de cemento en el caso de suspensiones de MC-500, mejora notoriamente la capacidad de penetración en un medio poroso.

### ANALISIS DE LOS RESULTADOS EN LOS ENSAYOS DE FILTRACION

Para ensayos de las mismas suspensiones una relación lineal  $lg-ly$  fue establecida entre  $R$  de los ensayos de inyección y  $M$  de los ensayos de refiltrado. Se deseaba poder establecer una relación matemática entre el rendimiento en la retención de partículas, el tiempo de inyección, volumen inyectado, concentración inicial y velocidad de descarga. HERZIG, LE CLERC y LE GOFF (1970) consideraban la ecuación cinética ajustando el porcentaje de partículas transferidas al medio poroso tras resultados experimentales. LITWINISZYN (1963) consideró el carácter fenomenológico de la ecuación cinética y analizó los resultados estadísticamente: asumiendo que el número de partículas retenidas en un intervalo  $L$  desde el frente de inyección, eran todas retenidas en la sección distante  $L$  del frente de inyección y que el decrecimiento en la concentración de sólidos en suspensión por unidad de longitud de filtro,  $\delta C/L$ , venía definido por una ley de probabilidad de la forma  $\delta(C/C_0)/\delta L < > P(L, rt, p)$  donde  $p$  es la probabilidad para una partícula de ser retenida,  $r$  es la velocidad media de la partícula y  $t$  es el tiempo.

Eliassen (1941) investigó la retención de partículas deduciendo curvas entre los sólidos en suspensión retenidos por unidad lineal de filtro para diferentes tiempos de filtración, y la forma de éstas se considera similar a las del tipo de Chi-square ( $\chi^2$ ) de distribución de densidad para diferentes grados de libertad; eso indica que la retención de partículas tiene un máximo a una determinada profundidad y la sección de la columna correspondiente a este máximo se desplaza alejándose del frente de inyección. La probabilidad,  $P_c$ , de que el suceso  $w$

ocurra, considerado como una variable aleatoria continua, será

$$P_c(w_0 < w < w_1) = \int_{w_0}^{w_1} f_m(w) dw$$

donde  $w_0$  y  $w_1$  son los valores extremos de  $w$  para cada curva y la función de distribución de densidad de probabilidad Chi-square, se define como

$$f_m(w) = \omega^{(m/2-1)} \cdot e^{-\omega w/2} / 2 \Gamma(m/2)$$

donde es la función de distribución de densidad Gama, y estando la función de probabilidad Chi-square  $F(\chi^2)$  tabulada para diferentes grados de libertad. Los resultados obtenidos de los ensayos de distribución pueden ser descritos por una función de distribución de probabilidad si se establece una relación entre  $L$  y  $w$ ,  $t$  y  $m$  y  $C/Co$  y  $P$

**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Las condiciones para cada ensayo están resumidas en la tabla 2; en cada caso  $w:c = 12$  y la presión de inyección 9,5 psi. Muestras filtradas se tomaron a diferentes profundidades de la columna de filtrado para tiempos de 1, 10 y 25 minutos, y la variación en la retención de las partículas en suspensión a lo largo de la columna de filtración se representa en la figura 3, para arena de Evanston Beach; mostrando cómo la sección del filtro para la máxima retención de partículas se desplaza en la dirección de la corriente a través del tiempo. Resultados sobre el rendimiento de la retención acumulada de partículas, se presentan en la figura 4.a para Evanston Beach. Se deduce una familia de curvas para cada medio filtrante, y cada curva correspondiente para un tiempo específico acercándose asintóticamente a un valor máximo de la retención de partículas. La variación del porcentaje acumulado de partículas retenidas en

MEDIO FILTRANTE	RADIO HIDRAULICO $\mu$	SUPERFICIE INICIAL (cm/gr)	VELOCIDAD ESPECIFICA (cm/s)	TIEMPO DESCARGA (min)	CONCENTRACION (gr/cm)	
					ESTIMADA	MEDIDA
Arena Crystal Sylica	10	276	$1,5 \times 10$	1	0,012	0,013
				25	0,040	0,038
Arena Evanston Beach	2	1,492	$9,1 \times 10$	1	0,010	0,011
				25	0,031	0,030
M-1 microesferas de cristal	14	139	$8,4 \times 10$	1	0,011	0,012
				25	0,021	0,022

TABLA II. Concentraciones estimadas y medidas.

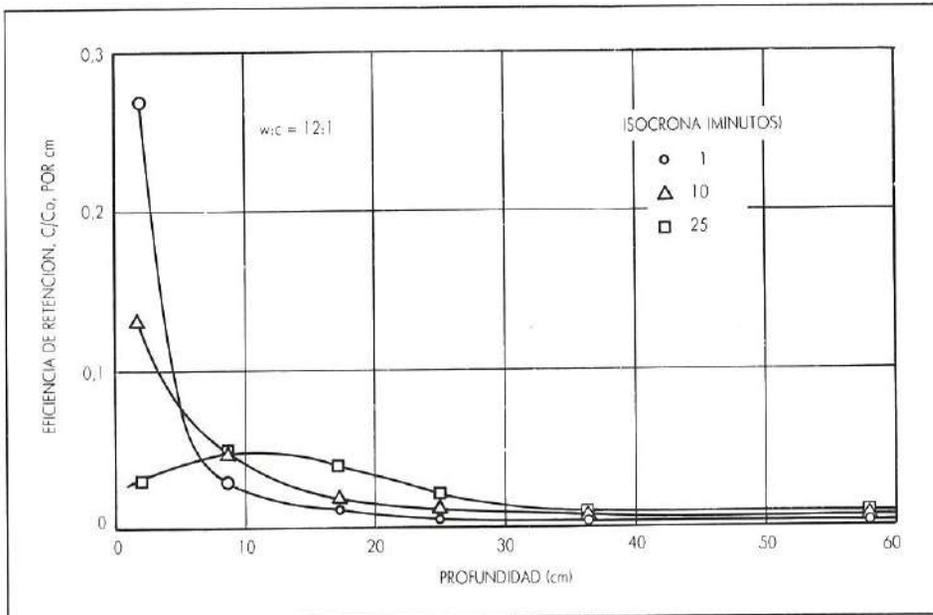


FIGURA 3. Eficiencia de retención en función de la profundidad.

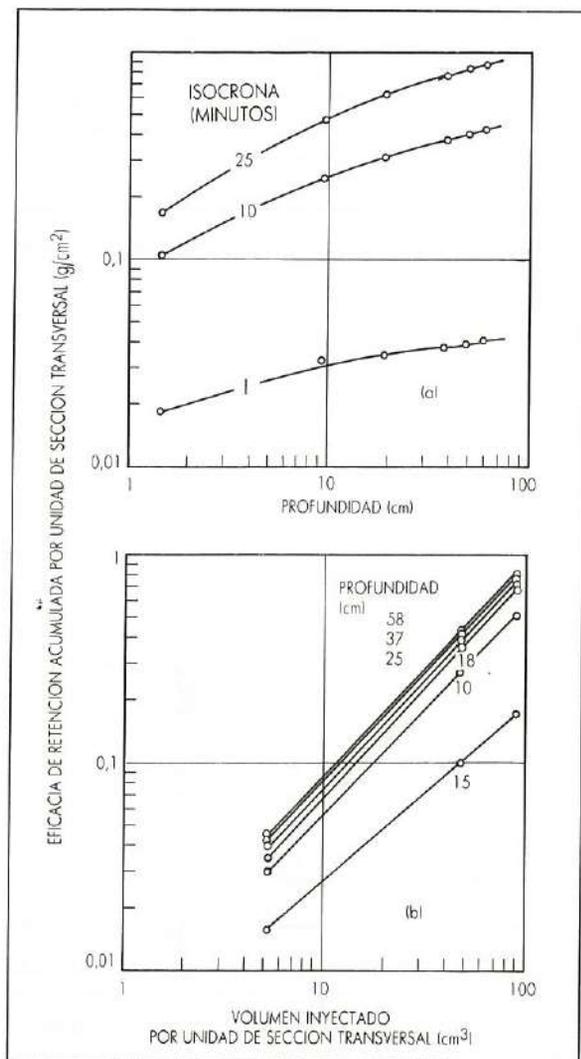


FIGURA 4. Grado de retención acumulado.

función del volumen inyectado se muestra en la figura 4.b para diferentes profundidades de la columna de filtración; para un determinado volumen de suspensión inyectada, el porcentaje acumulado de partículas retenidas alcanza un valor que no puede ser superado al incrementar la profundidad de la columna de filtración.

La similitud entre las curvas función de densidad Chi-square y las presentadas en la figura 3 permite ajustar los resultados experimentales de los ensayos de filtrado por curvas de distribución de probabilidad. La variable  $w$  en la función de distribución Chi-square puede relacionarse con los resultados de filtrado estableciendo  $C/Co = F(w)$  y  $t$  (minutos) =  $m$ . Los valores  $C/Co$  medidos experimentalmente para varias profundidades de la columna filtrante y diferentes tiempos, pueden ser utilizados como datos de entrada en la tabla de probabilidad de  $w$ . Con estos datos, la representación

en coordenadas  $lg w$   $lg t$ , indica que los resultados para cualquier profundidad  $L$  quedan bien ajustados por líneas rectas. Para valores fijos de  $w$ , se establece una relación entre  $L$  y  $t$ . Dada esta relación, la concentración de sólidos en suspensión para una determinada sección de la columna de filtración, puede ser estimada para un tiempo determinado de inyección. En general, el error que se produce en la predicción de concentraciones por este método no supera el 10 %, como indica el cuadro 2 caso de  $L = 58$  cm.

### CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados de este estudio unidimensional, que inicialmente sirve para una mejor comprensión de los mecanismos que gobiernan el proceso de inyección en arenas finas con suspensiones diluidas de microcemento, podemos establecer las siguientes conclusiones:

1. Las suspensiones de microcemento con relaciones w:c de 4 y superiores pueden inyectarse con normalidad en arenas finas (D10 no inferior a 0,15 mm y radios hidráulicos no menores de 0,002 mm) para presiones de inyección sobre 10 psi. Lográndose profundidades de penetración no inferiores a medio metro.
2. Las partículas de cemento son capturadas alrededor de los puntos de contacto entre los granos de arena, siendo depositadas sobre la superficie de éstos para ir formando una costra espesa que, una vez endurecida, mejora las propiedades mecánicas del medio inyectado.
3. Las partículas en suspensión con un diámetro equivalente inferior a un tercio del radio hidráulico del medio poroso, pasan a través del medio poroso, encontrándose en el efluente filtrado.
4. La resistencia (capacidad portante) del medio poroso inyectado no se ve afectada significativamente por la relación w:c de la suspensión, dependiendo del espesor de la costra que envuelve los granos y de las características de hidratación del gel.
5. La retención de partículas de una suspensión diluida de microcemento a través de arenas finas saturadas puede ser considerada como un proceso de filtración a través de una matriz filtrante: este proceso puede considerarse de naturaleza aleatoria y ser determinado como una función de distribución de probabilidad Chi-square.

### REFERENCIAS

- DIAMOND, S. (1972). «Identification of Hydrated Cement Constituents Using a Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectrometer Combination», Cement and Concrete Research, Volume 2, Number 5, pp. 617-631.
- ELIASSEN, R. (1941). «Clogging of Rapid San Filters», Journal of the American Water Works Association, Volume 3, pp. 926-942.
- HEISIG, J. P.; LE CLERC, D. M., y LE GOFF, P. (1970). «Flow of Suspensions Through Porous Media - Application to

Deep Bed Filtration Flow Through Porous Media», Industrial and Engineering Chemistry, Volume 62, Number 5, pp. 8-35.

HSIUNG, K., y ASCE, M. (1972). «Filtrability Study on Secondary Effluent Filtration», Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Volume 98, Number SA3, pp. 505-513.

LITWINISZYN, J. (1963). «Colmatage Considered as a Cer-

tain Stochastic Process», Bulletin de l'Academie Polonaise de Science Serie de Science Technique, Volume XI, Number 3, pp. 81-85.

STRUCKE, M. S. (1975). The Composition of the Gel Phase in Portland Cement Paste, Building Research Establishment, Crown, pp. 19-78.

## Normas para la presentación de artículos técnicos en la revista INGENIERIA CIVIL

1. Los artículos técnicos que se propongan para ser publicados en **Ingeniería Civil** se deberán ajustar a las presentes normas.  
Han de ser inéditos y versar sobre alguna de las materias habituales de esta revista.
2. Las colaboraciones deben dirigirse al Comité de Redacción de **Ingeniería Civil**, Gabinete de Formación y Documentación del CEDEX, Calle Alfonso XII, 3, 28014 Madrid (España), el cual examinará los trabajos presentados, procediendo bien a su aceptación o a la devolución a sus autores, señalando en este caso posibles modificaciones o su rechazo total.
3. Los originales deben presentarse mecanografiados a doble espacio, paginados en hojas de tamaño UNE-A4 y escritos por una única cara.  
Se recomienda una extensión total de originales entre 10 y 20 páginas.
4. Los gráficos, figuras o fotos han de ir numerados y señalados con la palabra FIGURA. Los cuadros y tablas se numerarán independientemente de las figuras y se señalarán con la palabra TABLA. Todos ellos han de presentarse por separado del texto principal, pero su posición en el mismo debe señalarse en el margen.
5. Las figuras o tablas habrán de ser originales debidamente delineados, las fotografías o diapositivas se presentarán también en original y en la mayor calidad posible. Todas ellas deberán ir acompañadas de su correspondiente pie mecanografiado.
6. Todas las figuras o tablas deben ser definitivas, por lo que su ortografía y lenguaje han de ser correctos. Las dimensiones de las figuras o tablas deben planearse de manera que abarquen todo el espacio del texto o el de una columna, de forma que el tamaño de los rótulos o leyendas de las mismas, si es preciso reducirlas, sea legible.
7. Las referencias bibliográficas citadas en el texto se recogerán al final del mismo, en un apartado titulado BIBLIOGRAFIA, irán catalogadas según la normativa vigente (ISO 30, Identificación Bibliográfica de Publicaciones Seriadas).
8. Los títulos han de ser concisos y deben reflejar exactamente el contenido del trabajo.
9. Los autores indicarán su nombre y sus dos apellidos, el Organismo o empresa a que pertenezcan, el cargo y sus titulaciones.
10. Todo artículo debe acompañarse, en su comienzo, de un resumen analítico de extensión entre 100 y 200 palabras, que recoja de una manera sucinta los resultados y conclusiones del artículo, y señale especialmente la información novedosa del mismo.

# GEOLINER al servicio de la Ingeniería Civil

**IMPERMEABILIZACIONES SUPERFICIALES Y VERTICALES DE TERRENOS con láminas flexibles de Polietileno de Alta Densidad (P.E.A.D.) y CONSOLIDACION DE SUELOS inestables por DRENES VERTICALES de Polipropileno Flexible.**

*NUESTROS PRODUCTOS Y TECNICAS PATENTADAS POR EL GRUPO CORTLEVER HOLDING*

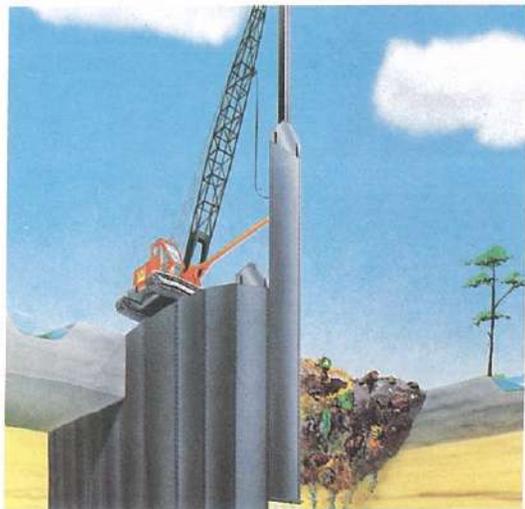
**Patentes en:**

Europa  
Japon

patente 0 129 275  
patente 127862/1985

Estados Unidos  
Canadá  
I.D.I.D.

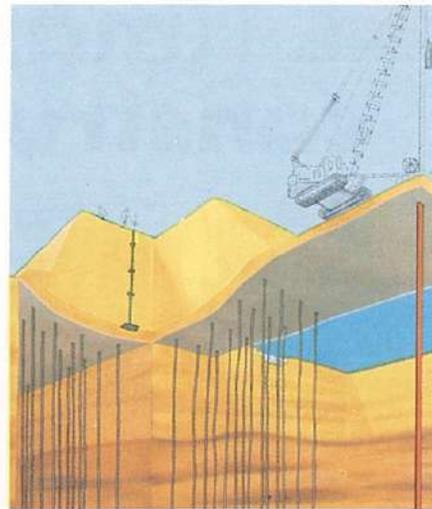
patente 4.664.560  
patente 1219455  
patente DM/006 207



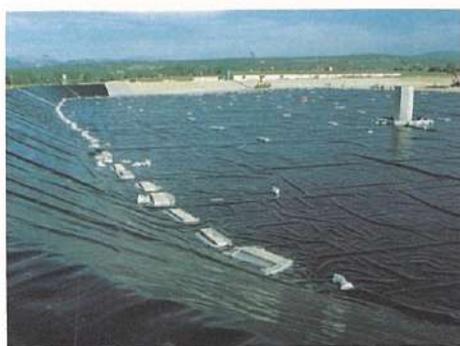
**GEOLOCK®**



**GEOLINE**



**MEBRA-DRAIN®**



## CAMPOS DE APLICACION:

- GRANDES OBRAS HIDRAULICAS: Embalses; Canales; Presas; etc.
- SANEAMIENTO: Lagunajes; Depuradoras; Biodigestores; etc.
- MEDIO AMBIENTE: Vertederos; Balsas de lixiviados; Sellado de Vertederos; etc.
- EDIFICACION: Depósitos; Cubiertas; Terrazas; etc.
- CARRETERAS: Consolidación de Terrenos Saturados; Puentes; Túneles; etc.
- PUERTOS: Balsas de recogida de lastres; Balsas de Almacenamiento de lodos; etc.
- AGRICULTURA: Acequias; Grandes Balsas; Sifones; etc.
- ACUICULTURA: Piscifactorias; Granjas de Cultivos; etc.

La mayor balsa de España para regular agua depurada para riego proyectada por IRYDA, construida por TRAGSA e impermeabilizada por GEOLINER SYSTEMS, S.A. con láminas GEOLINE de 1,5 mm. de polietileno de alta densidad. Situación: Cerro S. Jordi, Campos Ses Salines. (Mallorca).

**GEOTECHNICS  
HOLLAND BV**

Zuider IJdijk 58, 1095 KJ Amsterdam  
P.O. Box 4900, 1009 AX Amsterdam  
Tel. 020-665 16 14 or 665 14 04  
Telex 18481 GEOTH NL  
Telefax 020-94 14 57



**GEOLINER**  
GEO LINER SYSTEMS, S.A.

Chile, 1 - Portal 1, 2º - 2  
Tels. 639 67 11 - 639 68 50 - 638 64 20  
Fax 639 24 82  
28020 MAJADAHONDA (MADRID)



**COFRA b.v.**

Kantoor: Zuider-IJdijk 58, 1095 KJ Amsterdam  
Telefoon: 020 - 93 45 96/ 93 14 65  
Telex: 18481 GEOTH NL  
Telefax: 020 - 94 14 57