

ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE PERMEABILIDAD POR DEPOSITACIÓN DE FINOS Y BACTERIAS EN MEDIOS POROSOS.

Dora Patricia Restrepo Restrepo, Felipe Andrés Cardona Bernal, Martha Lucía Usta Díaz¹

Resumen

En este trabajo se muestra una descripción teórica y práctica de las PRINCIPALES variables y principios físicos que conllevan al taponamiento por partículas finas y por ende una reducción en permeabilidad en medios porosos no consolidados de casi un pie de longitud en un Portanúcleos Multipuertos. Los resultados fueron además ajustados a un modelo teórico para el taponamiento por partículas finas en la cara de entrada. Se realizó también un primer estudio para tratar de comprender el taponamiento ocasionado por bacterias cuando estas se encuentran en el agua de inyección de un proceso normal de recobro con agua.

Palabras Claves: Permeabilidad, depositación, finos, bacterias, medios porosos

Abstract

This work shows a theoretical and practical description of the main variables and physical principles that lead to the obstruction by fine particles and therefore a reduction in permeability for unconsolidated porous media with almost a length foot. The results were also adjusted to theoretical model for the obstruction by fine particles in the entrance face. A first study about bacteria plugging was also carried out in order to try to understand it when these bacteria are in the water of injection of a normal process of waterflooding.

Keys Words: Permeability, bacteria, porous media, fine particles

¹Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas 2002

1. Introducción

Durante la vida productiva de un campo de hidrocarburos existen varios factores que debido a reducciones en la tasa de producción conducen al abandono de este. En muchos casos esta reducción no es debida al agotamiento de las reservas sino a lo que en la industria del petróleo se conoce como *Daño de Formación*, que en últimas se traduce como la reducción de permeabilidad de la roca-yacimiento productora de hidrocarburos. Unos de esos daños es el ocasionado por partículas finas en suspensión y por bacterias. Investigaciones previas¹ han indicado que el proceso de depositación por partículas finas ocurre principalmente bajo cuatro mecanismos. Las bacterias por su parte, o al menos en la bibliografía encontrada, exhiben un solo² mecanismo fundamental para comprender el mecanismo de taponamiento del medio poroso, diferente al ocasionado por partículas finas. Debido a que no se conocían desarrollos experimentales previos que se adaptaran a las condiciones de este trabajo, fue necesario desarrollar casi todos los procedimientos.

2. Descripción Teórica

Muecke³ define las partículas finas como aquellas partículas capaces de atravesar la malla ASTM – 400, cuyo diámetro de abertura es igual a $37\mu\text{m}$, pudiendo ser tan pequeñas como $1\mu\text{m}$. Estas partículas pueden llegar a la matriz de la roca por diversos procedimientos que son desarrollados en la vida productiva de un pozo productor de hidrocarburos y en especial en rocas del tipo arenisca. Las partículas finas pueden ser químicamente generadas (precipitados solubles o insolubles por incompatibilidad entre fluidos de formación e introducidos en operaciones de campo), partículas externamente introducidas durante una operación (materiales sólidos, insolubles, bacterias y/o emulsiones) o partículas movilizadas in-situ (arcillas, las cuales pueden hincharse o migrar dentro del medio poroso, y otras partículas adheridas a la roca por fuerzas superficiales).

El daño de formación por partículas finas se encuentra ampliamente estudiado y se encuentra bien documentado, sin embargo involucra fenómenos

complejos donde uno o más predominan bajo ciertas circunstancias.

Los factores principales que influyen en la invasión de partículas son:

- *Distribución del tamaño de poro y garganta*
- *Fuerzas de movilización y retención*: Van der Waals (en especial en partículas menores a $1\mu\text{m}$), electrocinéticas (en especial en partículas menores a $30\mu\text{m}$), enlaces químicos (en especial en partículas menores a $0.1\mu\text{m}$), hidrodinámicas y de fricción (en especial en partículas mayores a $30\mu\text{m}$)
- *Concentración de iones*
- *Tasa de flujo*
- *Temperatura*
- *Presencia de materiales orgánicos*
- *Humectabilidad*
- *Presión capilar.*

Las fuerzas de retención antes mencionadas conllevan diferentes procesos de captura y retención de partículas finas en suspensión, los más importantes son mencionados a continuación:

- *Sedimentación*, la cual es fundamental en partículas de gran tamaño (mayores de $25\mu\text{m}$)
- *Inercia*, las partículas finas no siguen las mismas trayectorias tortuosas que sigue el fluido y quedan en contacto con los granos de roca en constricciones y grietas entre granos.
- *Efectos hidrodinámicos*, dado que las partículas no son perfectamente esféricas el campo de esfuerzos que actúa sobre estas no es uniforme ocasionando migración lateral de las mismas.
- *Interceptación directa*
- *Difusión por movimiento Browniano*, dado que las partículas se encuentran inmersas en un fluido estas se difunden y logran llegar a algunas áreas normalmente poco irrigadas por la suspensión y entonces quedan allí retenidas; por lo general en condiciones donde el taponamiento se da en todo el lecho éste puede considerarse despreciable respecto a la velocidad de flujo⁴ y es particular de partículas de tamaño diminuto.

Las partículas son retenidas dentro del medio poroso fundamentalmente en cuatro⁴ sitios: superficie de los granos, grietas, cavernas y constricciones entre granos.

La liberación de partículas por su parte se debe fundamentalmente al flujo normal de la suspensión a sitios donde ha ocurrido taponamiento. Herzig et al.⁴ enfatizan que la liberación de partículas se debe fundamentalmente a dos situaciones: el *provocado espontáneamente* debido a variaciones locales de la presión o del flujo en lugares de retención y el *ocasionado por el operador* que cambia drásticamente las condiciones de flujo.

Roque et al.¹ encontraron que la retención de partículas muestra dos mecanismos: el primero tiene que ver con la depositación superficial de las partículas en la cara de los granos expuestas directamente al flujo debido a fuerzas hidrodinámicas (gravitacionales y de arrastre), y el segundo por la restricción en poros y/o garganta cuando varias partículas llegan al mismo tiempo a los sitios de retención antes señalados dando lugar a la formación de puentes. Los autores muestran además cuatro etapas en las que ocurre el taponamiento (Gráfico 1): en la primera hay una depositación superficial (DS) en donde no se observa una reducción considerable de la permeabilidad (K/K_0); en la segunda etapa ocurre la formación de puentes (P) observándose una notable reducción en permeabilidad; en la tercera etapa ocurre una acumulación interna de partículas dando lugar a la formación de una costra interna (CI), esta se puede entender como una acumulación intensiva de partículas sobre los puentes antes formados haciendo que el flujo sea cada vez más restringido; y en la cuarta etapa ocurre la formación de costra externa (CE). Este modelo fue discretizado por Rochon⁵ et al. y fue aplicado en esta investigación.

Otro punto importante en este trabajo fue el de realizar un primer acercamiento a fin de estudiar el comportamiento del taponamiento cuando el agua de inyección contiene bacterias.

El agua utilizada en las operaciones de recobro secundario y terciario procede de ríos, lagunas, aguas de formación, del mar entre otras que inevitablemente están en ambientes donde las bacterias pueden desarrollarse, tanto en medios aeróbicos como anaeróbicos.

Existen fundamentalmente tres tipos de bacterias asociadas con problemas asociados a la producción de aceite crudo, éstas son:

- *Bacterias sulfato-reductoras*, del tipo anaerobias capaces de reducir iones de sulfato a sulfuro

reaccionando este último con hidrogeno, para formar el nocivo y venenoso ácido sulfhídrico.

- *Bacterias formadoras de limo (biopelículas*, ver páginas siguientes), del tipo aerobias capaces, son de capaces de formar grandes masas de limo en superficies sólidas y dentro del yacimiento, son comunes en aguas frescas y saladas.
- *Bacterias férricas*, del tipo anaerobias capaces de oxidar el hierro en su estado ferroso a férrico precipitándolo como una capa oxidada.

Kalish⁶ et al. encontraron diferentes especies de flora bacteriana en los sistemas de inyección de agua en diversos campos de petróleo de Estados Unidos, especialmente las especies *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Proteus* y *Bacillus* en concentraciones que oscilaban entre 10^4 y 10^8 células/ml.

Las primeras investigaciones (comienzos de los 60's) respecto de la reducción de permeabilidad por bacterias realizadas por el autor consistía en la inyección de células muertas, donde se encontró que la concentración de estas era una variable crítica para analizar el taponamiento. Nuevos estudios^{2,7} (finales de los 80's) utilizando microorganismos vivos demostraron que estos no solo actúan como partículas finas en suspensión sino que además pueden reproducirse a las condiciones de algunos yacimientos (si existen los nutrientes, temperatura, y otras condiciones del medio dependientes de cada especie bacterial) y que además producen biopelículas (biofilm o también denominado glycocalix) como resultado de sus actividades metabólicas, permitiéndoles mantener la vida y colonizar nuevas áreas en el medio porosos. Estas biopelículas son además un efectivo mecanismo de defensa utilizado por las bacterias contra antibióticos y biocida. La reproducción bacteriana y la producción de polisacáridos (biopelículas) son factores claves para argumentar el daño de formación por bacterias.

3. Experimentación

Todas las pruebas de laboratorio ejecutadas se realizaron en un Portanúcleos Multipuestos que permite determinar el progreso del taponamiento en empaques de arena y/o núcleos consolidados (núcleos de formación) de hasta 12pulg de longitud. En el caso particular de esta investigación los empaques de arena analizados tuvieron una longitud de 11pulg. El sistema

permite además aplicar una presión de sobrecarga para simular la carga de los estratos suprayacentes, la cual se fijo en 800lpc.

La arena empleada (la cual fue antes lavada en un baño ultrasónico con una mezcla de HCl/agua deionizada a fin de retirarle arcillas y materiales amorfos y restaurando su pH hasta la neutralidad) para la realización de los empaques de arena *Ottawa* seleccionada en tamices ASTM 20/30 que exhibe un tamaño promedio de grano de 775 μ m. Teóricamente³ estos granos representan un diámetro efectivo de poro de 119 μ m.

Descripción de las pruebas de inyección

- Pruebas de inyección de partículas finas.

Se realizaron 11 pruebas de inyección de partículas finas a tasas entre 20.0 y 50.0cm³/min (las cuales garantizaron flujo laminar dentro del medio poroso) y a concentraciones entre 68 y 243ppm (25 y 50NTU) de partículas de sílice al 95%, previamente tamizado por tamiz ASTM 400. El análisis de distribución de tamaño de partícula mostró que éstas tienen un tamaño promedio volumétrico de 9.5 μ m a un pH de 7.0; se optó por inyectar este tipo de partículas pues son mineralógicamente similares a los granos de arena (los granos de arena son esencialmente cuarzo 100%) pues en este estudio se analizó el daño mecánico, minimizando al máximo las interacciones físico-químicas. El tiempo de duración de las pruebas de inyección de partículas fue de 400VPI (32 horas para la prueba a 20.0cm³/min, 18 para las pruebas a 35.0cm³/min y 13 horas para las pruebas 50.0cm³/min) de flujo continuado sin interrupciones. El montaje de una prueba de inyección de partículas finas se muestra en la Figura 1.

- Pruebas de inyección de bacterias.

Se realizaron 6 pruebas de inyección de bacterias a una tasa de 30.0cm³/min y a temperaturas de 20°, 35° y 50°C a concentraciones que variaron entre 31x10¹² y 81x10¹⁴ células/ml. El volumen de la solución que contenía las bacterias fue de 10VP (1l de solución aproximadamente). Las bacterias inyectadas corresponden a los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Proteus*. Se tomaron mediciones de las presiones absolutas a lo largo del empaque a las 0, 20 y 30 horas después de la inyección. Los efluentes recogidos fueron analizados para determinar el porcentaje de sólidos disueltos, es decir producción de polisacáridos (biopelículas), además de identificar las bacterias mejor adaptadas al medio poroso. El montaje de una

prueba de inyección de bacterias se muestra en la Figura 1.

- Prueba de inyección simultánea de bacterias y finos.

Una última prueba se realizó con la inyección simultánea de bacterias y finos y se aplicó un procedimiento sencillo de remediación cuando ambos se encuentran presentes. Para la remediación se simuló un filtro mediante la decantación durante 10 horas de una solución de 243ppm de sílice (las partículas en suspensión luego de la decantación mostraron un tamaño volumétrico de partícula de 2.03 μ m), y se aplicó bactericida al 0.5%.

4. Resultados obtenidos

Pruebas preliminares determinaron que la permeabilidad en la entrada (sección del empaque entre la entrada (in) y el puerto 1 de 1pulg de longitud) es significativamente menor de la permeabilidad evaluada en el resto del empaque de arena (puertos 1 a 6 de 10pulg de longitud) y por lo tanto fue necesario determinar en todos los empaques de arena de las pruebas de inyección de finos y/o bacterias tres permeabilidades a saber (Figura 2):

- Permeabilidad entre la entrada y el puerto 1 (K_{in-1})
- Permeabilidad entre puertos (K_{1-2} , K_{2-3} , K_{3-4} , K_{4-5} y K_{5-6}), además de la permeabilidad entre puertos extremos (K_{1-6})
- Permeabilidad entre la entrada y el puerto 6 (K_{in-6})

Pese a seguir siempre el mismo procedimiento para la elaboración de los empaques, la heterogeneidad de estos en permeabilidad fue una variable difícil de controlar. No se encontraron explicaciones certeras al respecto y en la literatura estudiada solo se encontraron desarrollos experimentales en empaques de arena de hasta 5pulg donde solo se determinaba una permeabilidad entre la entrada y la salida. Por ello se midieron la permeabilidad entre los puertos y se tuvo como criterio de control la medida de la permeabilidad entre los puertos extremos (K_{1-6}) y comparando la matemáticamente con la permeabilidad en serie entre puertos. El error evaluado en este caso fue inferior en todos los casos menor del 2.21%.

Por otro lado, la porosidad de los empaques de arena fue en promedio del 30%, desviación estándar del 2%, a 800lpc de presión de sobrecarga.

Las pruebas de inyección de partículas finas mostraron que el fenómeno de depositación por la inyección de partículas de sílice es similar al mostrado por Roque¹ et al. donde se identifican cuatro mecanismos principales que explican la dinámica de la invasión de partículas, que son: depositación superficial (DS), puenteo (P), formación de costra interna (CI) y formación de costra externa (CE). (Gráfico 1)

Sin embargo, este mismo análisis de reducción de permeabilidad (K/Ko) sólo fue posible para la cara, pues las secciones más internas del medio poroso mostraron que este mismo análisis conllevaba a interpretaciones erróneas ya que se observaban "estimulaciones" (K/Ko > 1) en lugar de reducciones de permeabilidad (ver Gráfico 2); este comportamiento se debe en gran parte a la heterogeneidad en permeabilidad que se presentan en los tramos del empaque de arena. Por lo anterior se optó por realizar análisis de la presión absoluta normalizada (P₀/P), la cual fue obtenida en seis puntos distintos (puertos 1, 2, 3, 4, 5 y 6) a lo largo de los empaques de arena. El análisis a partir de esta dio como resultado que el comportamiento de la invasión en secciones más allá de la cara de entrada son principalmente depositación superficial y arrastre de partículas (Gráfico 3).

En general se obtuvieron reducciones en la permeabilidad de entre el 67 y el 98% para la cara de entrada (in-1). Obsérvese además que a la tasa de 35.0cm³/min el taponamiento se prolonga por unos 100VPI comparado con las pruebas a 50.0cm³/min donde se prolonga por unos 150VPI. La leyenda de los gráficos se entiende así: los primeros dos dígitos son la tasa de flujo en cm³/min (35.0 y 50.0), los dos últimos dígitos la concentración de partículas de sílice en NTU (25 y 50), A y/o B son la replica de la prueba a las mismas condiciones; así la prueba 35-25A: prueba a 35.0cm³/min, 50NTU y tiene una replica en condiciones iguales en 35-25B (Gráfico 4 y 5).

Para el empaque entre los puertos 1 á 6 se obtuvieron reducciones en permeabilidad inferiores al 20% para el resto del empaque (1-6) y en total (in-6) de entre 83 al 97%. En este caso se muestran las variaciones de la presión absoluta durante la inyección de partículas (Gráfico 6).

Los resultados obtenidos en presión absoluta se analizaron a partir de herramientas estadísticas y un modelo matemático simple los cuales permitieron determinar una correlación que explicaba con una exactitud de hasta el 96% que la presión absoluta es directamente proporcional a la longitud, mejor entendida en este caso como distancia entre puertos, (L) y tiempo de flujo de la inyección de partículas finas (VPI) (Ecuación 1).

$$\text{Ecuación 1} \quad P = b_0 + b_1 \cdot L + b_2 \cdot VPI$$

Las reducciones en todo el lecho (in-6) presentan gráficamente una forma similar a los vistos en la cara (Gráficos 7 y 8), lo cual es evidencia de que el taponamiento en todo el medio poroso esta ligado profundamente a la cara de entrada, sin embargo no se observa tan claramente la formación de costra externa (compárense los Gráficos 4 y 5 con los Gráficos 7 y 8). En la sección del empaque entre los puertos 1 y 6 solo se evidenciaron fenómenos de arrastre y depositación superficial dado los cambios pequeños en la presión absoluta (Gráfico 6), comparada con la cara de entrada donde se observan los fenómenos de depositación ya señalados: la cara actúa como un filtro reteniendo la mayor cantidad de partículas que ingresan al medio poroso, reacuérdese que la longitud de la cara es de tan solo 1/11 la longitud del empaque. Esto valora el hecho de que se empleen para el análisis del daño de formación por partículas finas en núcleos de formación y/o empaques de arena de 10cm de longitud, sin embargo éstos no muestran la dinámica más allá de la cara.

El objetivo del modelo de *Rochon-Creusot-Rivet-Roque-Renard* es identificar el número de partículas requeridas para taponar una garganta una vez comienza la formación de la costra externa. El método consiste en la solución de la ecuación de balance de masa, para flujo lineal, que describe la cantidad de partículas depositadas en el medio poroso y que se encuentran aún en suspensión. (Ecuación 2)

$$\text{Ecuación 2} \quad \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial(n + fC)}{\partial t} = 0$$

Luego de un proceso matemático ligeramente complejo se llega a una solución que involucra la función integral exponencial F.I.E. (Ecuación 3)

$$\text{Ecuación 3} \\ \frac{K_0}{K} - 1 = \frac{1}{BL} [E_i(D) - E_i(De^{-BL})] - 1$$

La aplicación del modelo a los resultados de las pruebas de inyección de finos para la cara, dio como resultado que el diámetro de las gargantas, una vez terminaba la formación de costra interna y comenzaba la costra externa, fue reducido a tamaños tan pequeños de entre 2 y 3 tamaños de partículas de sílice en arena Ottawa cuyo diámetro promedio de poro es de 116 μm . (Gráfico 6). Este resultado es comparable al obtenido por los mismos autores en rocas Fountainbleau donde el valor es de 1 y el diámetro promedio de las gargantas antes de la inyección de partículas era de 26.6 μm .

El taponamiento por bacterias tiene un comportamiento diferente al de partículas finas, pues estas además de ocupar un espacio físico se multiplican y son retenidas casi totalmente en el medio poroso.

Para las pruebas de inyección de bacterias se observó que el taponamiento es mayor a temperaturas bajas (20 y 35°C) y que a diferencia de las partículas, son capaces de taponar todo el medio poroso, porque debido a su pequeño tamaño pasan a través de los poros de la cara. Las bacterias son retenidas en el medio poroso debido quizás a la gran diferencia de tamaño entre ellas y las rugosidades de los granos de arena.

Otro hecho importante es que análisis de los efluentes en estas pruebas indicaron que las bacterias son capaces de producir azúcares que son retenidos en el medio poroso. Medidas del porcentaje de sólidos disueltos en grados BRIX mostraron que luego de permanecer la bacterias 20 horas en el medio poroso la medida pasaba de 0% (al tiempo cero) a 0.5% (a las 20 horas) y a 0.25% a las 30 horas posteriores a la inyección. Otra medida tenida en cuenta en los efluentes fue la tinción de Gram donde se encontró que los microorganismos mejor adaptados a las condiciones del medio poroso fueron las bacterias Gram Negativas, es decir *Proteus* y *Pseudomonas*, y

en especial el primero que es un organismo anaerobio facultativo.

Para la prueba de inyección simultánea de finos y bacterias y de remediación, mediciones de concentración de bacterias en los efluentes tomados cada 20VPI no dieron indicios de vida microbiana lo cual indica que la aplicación de bactericida fue efectiva. Aunque se redujo notablemente el tamaño de las partículas y la inhibición de los microorganismos por el bactericida fue efectiva, el taponamiento parece incrementarse abruptamente por la presencia de bacterias, azúcares producidos por estas y por partículas finas.

5. Conclusiones

Se obtuvieron perfiles de taponamiento de partículas finas y bacterias evaluados a partir de la presión absoluta entre puertos. El sistema de piezómetros resultó ser efectivo para empaques de arena de alta permeabilidad y para evaluar el taponamiento en procesos de inyección continua.

La reducción principal se dio en la cara de entrada donde la reducción de permeabilidad llegó a ser de hasta el 98%. Aquí los mecanismos fundamentales fueron los descritos por Roque¹ et al. En las secciones más alejadas de la cara solo se observaron reducciones de hasta máximo el 20%, lo que indica que el fenómeno de depositación por finos se presenta fundamentalmente en la cara de entrada. Ello argumenta el hecho de que se estudie generalmente el daño de formación por partículas finas en núcleos o empaques de arena de hasta 10cm de longitud.

Un análisis clásico a partir de la relación K/K_0 no mostró resultados satisfactorios y por ello se propuso un análisis a partir de la presión absoluta normalizada.

El modelo analítico ejecutado⁵ a los resultados obtenidos mostró que una vez terminada la formación de la costra interna y comienzo de la formación de la costra externa el tamaño de las gargantas fue reducido a tamaños tan pequeños como 2 y/o 3 veces el tamaño de las partículas finas de sílice que ingresaban al medio poroso.

Los efluentes en las pruebas de inyección de bacterias mostraron un mayor taponamiento en las pruebas

realizadas a 20° y 35°C y que la reducción no solo ocurrió en la cara de entrada sino más allá de esta. Se notó además la producción de azúcares por parte de las bacterias las cuales justifican en cierta medida el taponamiento causado por las bacterias.

6. Nomenclatura

NTU = Unidades Nefelométricas de Turbidez

ppm = Partes Por Millón

°C = Grados Celsius

lpc = Libras por Pulgada Cuadrada

K = Permeabilidad absoluta, md

K_0 = Permeabilidad absoluta en el medio poroso sin finos ni bacterias, md

P = Presión absoluta, mmH₂O

P_0 = Presión absoluta en el medio poroso sin finos ni bacterias, mmH₂O

K/K_0 = Relación de reducción de permeabilidad

P_0/P = Relación de reducción de presión

$PN_i = P_{0i}/P_i$, Relación de reducción de presión en el puerto i. (i = 1 á 6)

VPI = Volúmenes Porosos Inyectados

VIA = Volumen inyectado acumulado, cm³

Q, A, x, n, C, t, F términos de la ecuación de balance de masa

B, L, D términos de la solución a la ecuación de balance de masa

E_i = Función Integral Exponencial

F.I.E. = Función Integral Exponencial

a^x = Número de partículas necesarias para taponar una garganta.

1 pulg = 2.54 cm

1 μ m = 1×10^{-6} m

1 md = 9.869×10^{-12} cm²

1 lpc = 703 mmH₂O

7. Agradecimientos

Queremos agradecer a los laboratorios de Análisis Petrofísicos Especiales, Microbiología Animal y Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. También a los bancos de proyectos Dime y Dinain por soportar económicamente esta investigación.

REFERENCIAS

- **Restrepo D. P., Cardona, F. A., y Usta, M. L.:** "Un Estudio de la Reducción de Permeabilidad por la Deposición de Finos y Bacterias en Medios Porosos". T.D.G. presentado para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, Junio de 2002.
- **Roque, C. et al.:** "Mechanism of Formation Damage by Retention of Particles", paper SPE 30110, May 1995.
- **Cusack, F. et al.:** "Bacteria Can Plug Waterflood Injection Wells", Oil & Gas Journal, p. 59-64, November 1987.
- **Muecke, T. W.:** "Formation Fines and Factors Controlling their Movement in Porous Media", JPT, pp. 144-150, February 1979.
- **Herzig, J. P. et al.:** "Application to Deep Filtration", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 62, No. 5, pp 9-35, May 1970.
- **Rochon, J. et al.:** "Wate Quality for Water Injection Wells", paper SPE 31122, February 1996.
- **Kalish, P. J. et al.:** "The Effect of Bacteria on Sandstone Permeability", paper SPE 579, June 1964.
- **Sutherland, I. W. and Tait, M. I.:** "Biopolymer", Encyclopedia of Microbiology, Volume 1, p. 339-348, 1992.

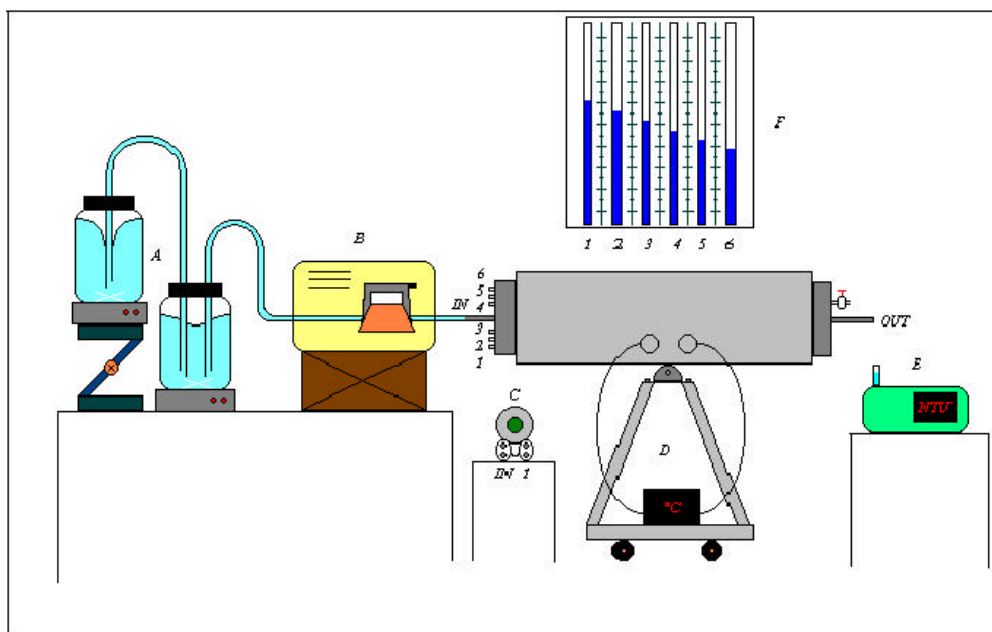


Figura 1. Montaje de una prueba de inyección de partículas finas y/o bacterias

- A. Suspensión que contienen las partículas finas y/o bacterias a inyectar
- B. Bomba peristáltica
- C. Transmisor de presión (medida de la presión diferencial entre la entrada y el puerto 1)
- D. Portanúcleos multipuertos con controlador de temperatura
- E. Recipiente recolector de efluente (en las pruebas de inyección de partícula finas se leía directamente en un turbidímetro; en las pruebas de inyección de bacterias se recolectaban para ser luego analizados en el laboratorio)
- F. Sistema de piezómetros (medida de la presión absoluta en mmH₂O para los puertos 1 a 6)

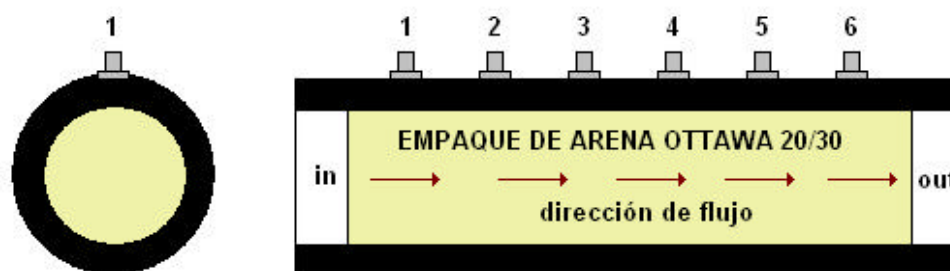


Figura 2. Ilustración de un empaque de arena desde la entrada (in) hasta el puerto 6

La distancia in-1 es de 1 pulg, las distancias entre los puertos 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 y 5-6 es de 2 pulg. Este dispositivo es el que se encuentra alojado en el Portanúcleos Multipuertos

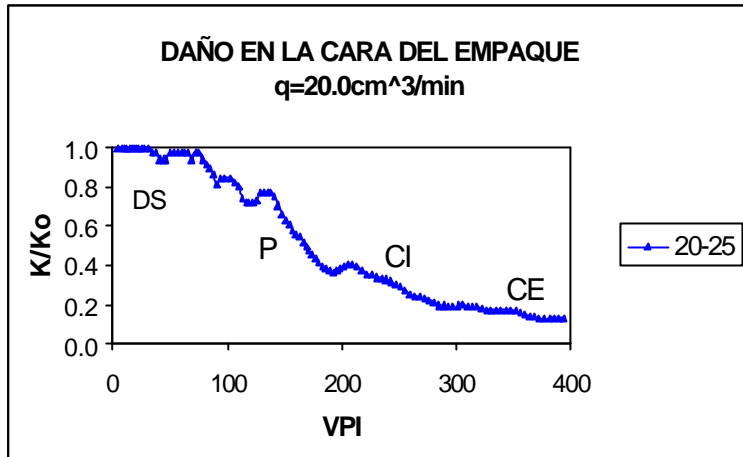


GRAFICO 1

Reducción en la cara del empaque. Prueba a $20.0\text{cm}^3/\text{min}$ y 68ppm (25NTU) de Sílice

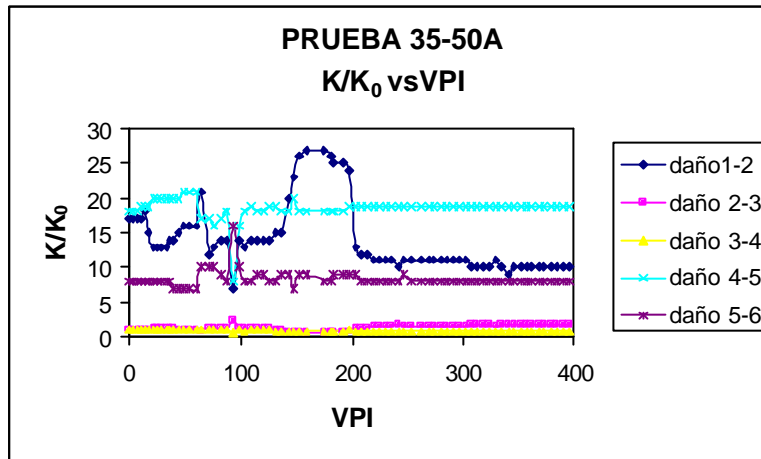


GRÁFICO 2

Reducción de permeabilidad en los puertos 1 á 6. Prueba a $35.0\text{cm}^3/\text{min}$ y 126ppm (50NTU) de Sílice

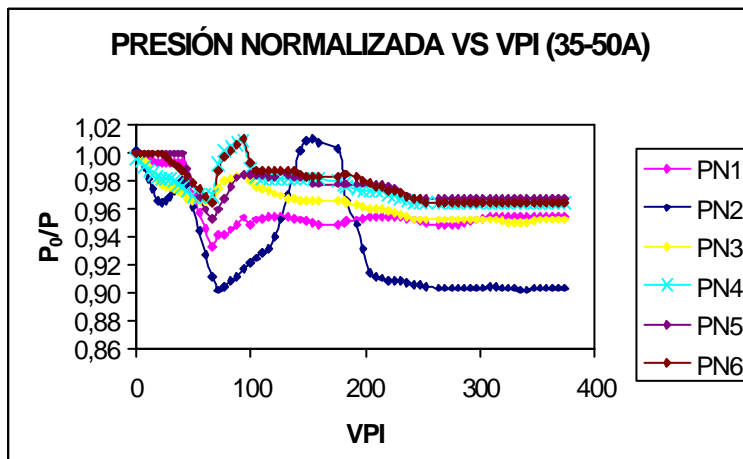


GRAFICO 3.

Presión normalizada en los puertos 1 á 6. Prueba a $35.0\text{cm}^3/\text{min}$ y 68ppm (25NTU) de Sílice

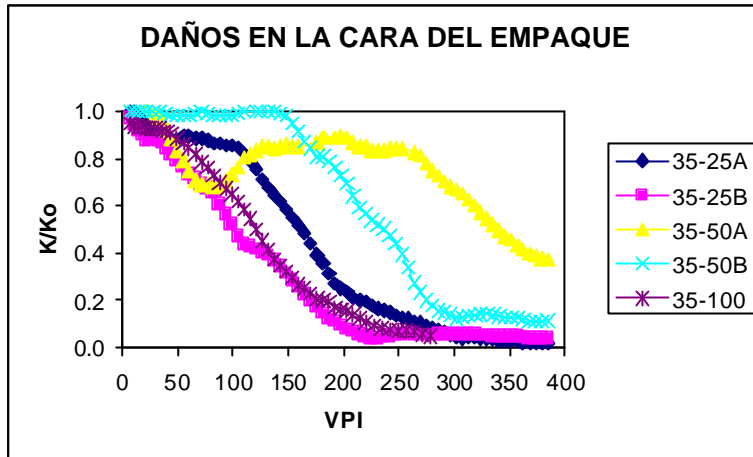


GRAFICO 4

Reducción de Permeabilidad en la cara. Pruebas a $35.0\text{cm}^3/\text{min}$ y concentración variable

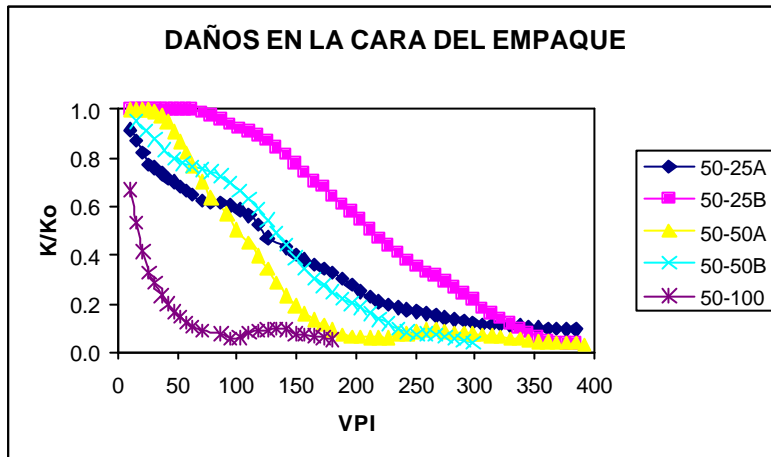


GRAFICO 5

Reducción de Permeabilidad en la cara. Pruebas a $50.0\text{cm}^3/\text{min}$ y concentración variable

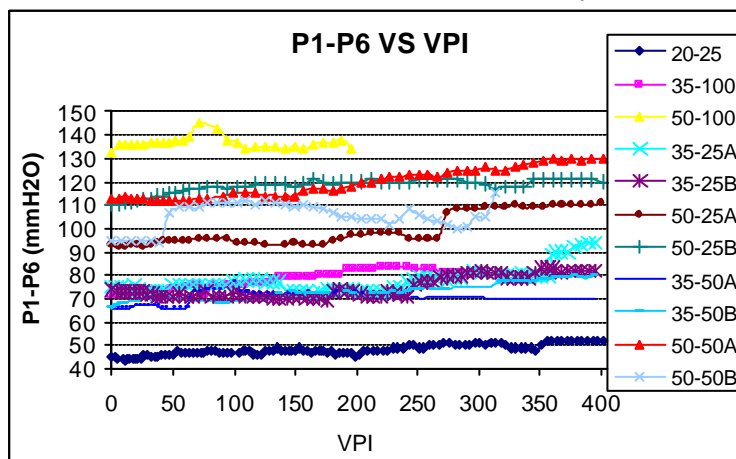


GRAFICO 6

Ajuste del modelo de Rochon et al. Prueba a $35.0\text{cm}^3/\text{min}$ y 126ppm (50NTU) de Sílice

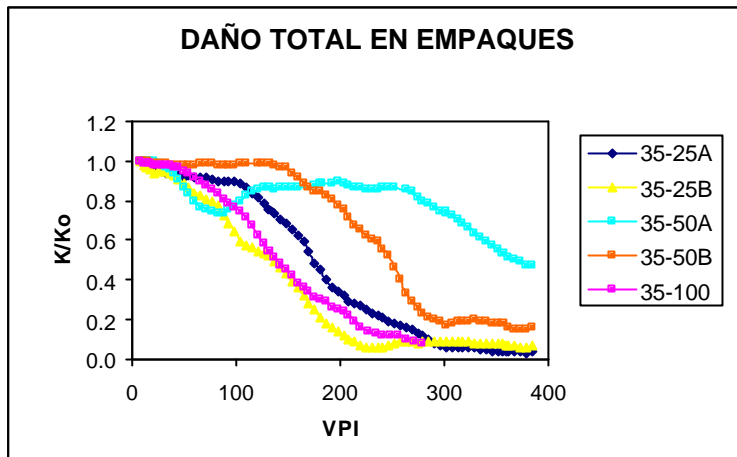


GRAFICO 7

Reducción de Permeabilidad en el empaque total. Pruebas a $35.0\text{cm}^3/\text{min}$ y concentración variable

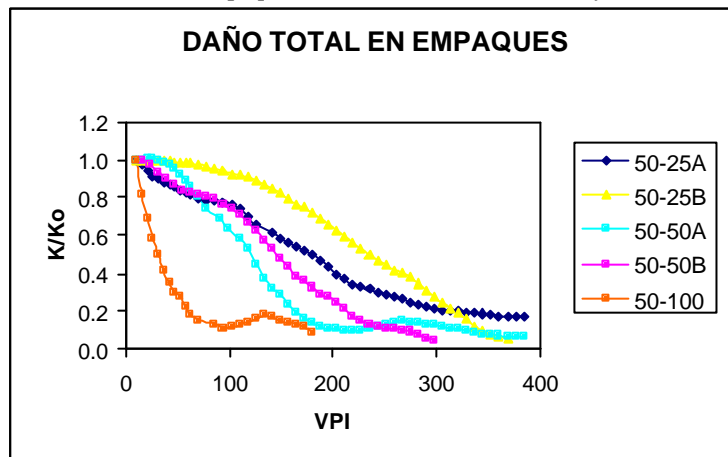


GRAFICO 8

Reducción de Permeabilidad en el empaque total. Prueba a $50.0\text{cm}^3/\text{min}$ y concentración variable

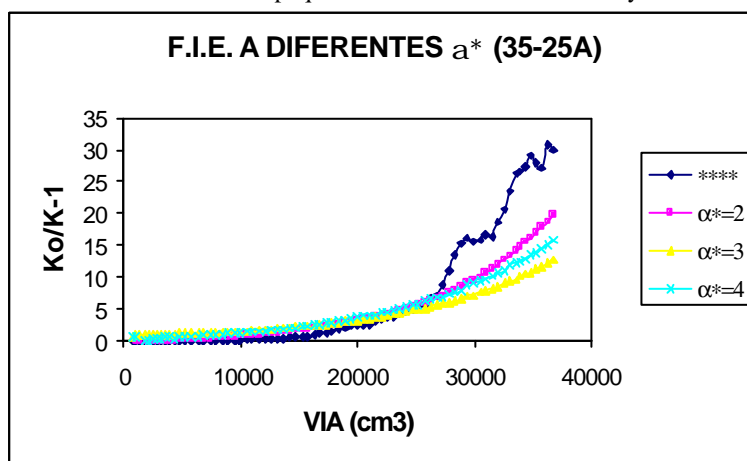


GRAFICO 9

Ajuste del modelo de Rochon et al. Prueba a $35.0\text{cm}^3/\text{min}$ y 126ppm (50NTU) de Sílice