

ESTUDIO DE LAS POSIBILIDADES DE INYECCION
DE FLUIDOS GEOTERMICOS EN LOS ACUIFEROS
PROFUNDOS DE LA CUENCA DE MADRID

PEN



e. n. adaro
de investigaciones mineras s.a.

50346

I N D I C E

	<u>Págs.</u>
II.- ENSAYOS SOBRE TESTIGOS	
1.0.- RESUMEN	1
2.0.- OBJETIVOS	4
3.0.- CONCLUSIONES Y RESULTADOS	5
4.0.- RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS	8
5.0.- INTRODUCCION: PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA REINYECCION DE SALMUERAS GEOTERMALES	9
6.0.- BREVE DESCRIPCION DEL PROYECTO GEOTERMICO EN MADRID	11
6.1.- DATOS DE COMPLETACION DEL POZO	12
6.2.- LITOLOGIA	12
6.3.- DIAGRAFIAS	13
6.4.- SALINIDAD DEL AGUA DE FORMACION	13
6.5.- TEMPERATURA DE LA FORMACION	13
6.6.- GRADIENTE TERMICO	14
6.7.- CONCLUSIONES GEOLOGICAS	14
6.8.- EVALUACION DE LA ZONA PRODUCTIVA	15
7.0.- ESTUDIO DE LABORATORIO	16
7.1.- DESCRIPCION DE LA MUESTRA DE AGUA	16
7.2.- DESCRIPCION DE LAS SECCIONES DEL TESTIGO (INSPECCION VISUAL)	16
7.3.- EXAMEN DE LABORATORIO DEL TESTIGO SECO	17
7.3.1.- SELECCION Y PREPARACION DE LAS MUESTRAS DEL TESTIGO	17
7.3.2.- ANALISIS DEL MATERIAL SOLIDO DEL TESTIGO	18
7.3.2.1.- EXAMEN DE DIFRACCION DE RAYOS X	18
7.3.2.2.- SEM/EDAX EXAMINACION	20
7.3.2.3.- SENSIBILIDAD DEL MATERIAL DE LA ROCA AL AGUA ..	21
7.4.- PRUEBAS DE FLUJO EN EL TESTIGO	22

Además de presentar los resultados y de hablar de los variados aspectos relacionados con estos cuatro puntos, el informe muestra una amplia visión de los siguientes aspectos pertinentes, relacionados con algunos problemas de reinyección geotermal en general.

I - Se ha dado una visión bastante completa de las informaciones disponibles sobre el proyecto geotérmico de SSDLR en la región madrileña. La información está basada en el informe de ENADIMSA cuyo título es " Sondeo Geotérmico San Sebastián de Los Reyes ".

2 - Se ha pasado revista de los problemas de reinyección relacionados con partículas en suspensión. La información está basada en un amplio inventario de la literatura sobre el tema.

3 - Se ha pasado revista a las diferentes maneras de caracterizar y del medio de las partículas en suspensión acuosa.

4 - Se han discutido distintos métodos para determinar los daños en almacenes (especialmente sus méritos y sus inconvenientes).

Como parte de los estudios de laboratorio llevados por VR, se han determinado diferentes propiedades críticas de la roca del almacén, utilizando análisis convencionales del sólido sobre muestras seleccionadas del testigo y materiales de muestras. Los métodos específicos utilizados fueron difracción de Rayos X, SEM, EDAX, sensibilidad de las rocas al agua, permeabilidad (al aire, al agua de formación y a soluciones de K CL 2 %), medidas de porosidad y determinaciones de la densidad de granos.

Las suspensiones de partículas caracterizadas de pozo fueron preparadas utilizando sólidos de la roca del almacén. Estas suspensiones fueron utilizadas en todos los estudios de flujo de partículas en la prueba de flujo en el testigo.

Los resultados de todos los estudios de laboratorio están presentes en el informe, incluyendo todas las informaciones pertinentes que puedan ayudar a propósito de las operaciones de reinyección para el proyecto geotérmico de ADARO en la región madrileña.

Resumiendo los resultados del estudio (como está descrito en este informe), podemos subrayar los siguientes puntos :

- I - El material del testigo es sumamente heterogéneo tanto química como físicamente.
- 2 - Espesas capas de arena y de arcilla alternan en el almacén.
- 3 - La transmisibilidad habitual (valor de KH) no tiene utilidad, porque no creemos que cualquier zona almacén que tenga una permeabilidad de aproximadamente 5 milli Darcy o menos pueda ser mantenida durante una futura inyección. Toda inyección futura deberá ser relatada con las capas de arena que tienen una permeabilidad de 5 milli Darcy o más.
- 4 - La inyectividad de las capas de arena podrá ser mantenida sólo si las partículas de diámetro mayor a aproximadamente 2 micrones se han quitado de la salmuera enfriada antes de la reinyección.
- 5 - ADARO no debería tener problemas para quitar todas las partículas perjudiciales de la salmuera, de más de 2 micrones de diámetro, utilizando un equipo combinado para sedimentación y filtración.

Todos los detalles experimentales, resultados, conclusiones y recomendaciones relacionados con este estudio están indicados en este informe.

2.0 OBJETIVOS

Los siguientes objetivos fueron definidos por ADARO y SPEG y enviados a VETTER RESEARCH antes de realizar trabajo alguno sobre el proyecto geotérmico de SSDLR de ADARO :

- I . Explicar los distintos mecanismos que puedan conducir a un daño del almacén, debido a partículas en suspensión en la salmuera enfriada reinyectada.
- 2 . Examinar el testigo del pozo SSDLR N° I y sacar las propiedades siguientes :
 - a) Apariencia visual
 - b) Litología por SEM/MICROPROBE/XRD
 - c) Permeabilidad vertical y horizontal
 - d) Porosidad
- 3 . Realizar diferentes tipos de suspensiones de partículas e inyectarlas en las muestras de testigo en un estudio de laboratorio que simula las condiciones del pozo. Determinar el tipo y la amplitud de los daños que se puedan esperar al inyectar estas suspensiones de partículas.
- 4 . Utilizar los datos de laboratorio de esta prueba de flujo en el testigo para determinar :
 - a) Los daños en el pozo y en el almacén que se puedan esperar después de la inyección de dichas suspensiones de partículas en el proyecto de SSDLR de ADARO
 - b) Las medidas que ADARO tenga que tomar para prevenir o, al menos, rebajar el riesgo de deteriorar el pozo de inyección a causa de la inyección de estas partículas en suspensión.

3.0 CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Se pueden sacar las conclusiones siguientes después de haber realizado el estudio de laboratorio descrito:

1. El testigo tomado por ADARO en SSDLR N° I está compuesto de una arenisca cuyas propiedades físicas y químicas cambian drásticamente con la profundidad. El testigo es extremadamente heterogéneo. Las propiedades críticas de la roca cambian drásticamente incluso en un intervalo de sólo unos milímetros.
2. La permeabilidad crítica del material del testigo al agua varía entre menos de 0,001 milli Darcy y algunos centenares de milliDarcys.
3. El testigo contiene lechos horizontales de material arcilloso de espesores variables, y de composición de la arcilla variable. Estos lechos arcillosos no tienen permeabilidad mensurable y actúan como barreras para cualquier movimiento vertical del agua en el almacén.
4. Las arcillas de estos lechos arcillosos son extremadamente sensibles al agua. En contacto con el agua, algunas de estas arcillas sólidas se desintegran completamente para dar una suspensión de partículas de tamaños variados y de distribución de tamaños variados. Esta desintegración se producirá en pocos minutos. Esto significa que la integridad de los materiales arcillosos se destruye completamente en contacto con el agua.
5. Esta sensibilidad de la roca a fluidos acuosos no es debida solamente a la interacción del agua pura con las arcillas, sino que también es debida a interacciones con el agua del almacén y/o solución a 2 % KCL. En otras palabras, algunas capas de la roca se desintegrarán con agua pura o con agua del almacén o con solución a 2 % KCL.

6. La presencia de este tipo y cantidad de arcilla va a generar muchos problemas tanto en el pozo de producción como en el pozo de inyección. Sin embargo, estos problemas relacionados con la arcilla y previstos en ambos tipos de pozos estarán más o menos relacionados entre ellos.
 7. En el pozo de producción, las arcillas formarán suspensiones de partículas arcillosas cuando les toque la salmuera producida. Así pues, el agua producida estará constituida desde el principio por suspensiones de partículas, las cuales serán difíciles de manipular en las instalaciones de superficie y en el pozo de inyección. Tras un cierto tiempo, se puede que la concentración de partículas suspendidas en la salmuera producida decrezca drásticamente.
 8. Es posible que tras mucho tiempo de producción, las interacciones entre agua y arcilla en el pozo de producción conduzcan a "lessivages" o aún a cavaduras en el pozo si no se toman precauciones especiales (como instalación de crepinas o liners).
 9. Es posible que una estabilización química de la arcilla mediante un tratamiento especial de los pozos de producción resuelva en parte este problema. Por lo tanto, algunas pruebas con una solución a 2 % de cloruro de potasio (K CL) , demuestran tener un efecto mensurable, aunque no completo, sobre estas propiedades detríticas de la arcilla.
 10. Si no se toman precauciones especiales para quitar una parte de las partículas suspendidas antes de la inyección de la salmuera enfriada, las suspensiones de partículas formadas en los pozos de producción disminuirán la inyectividad en el pozo de inyección.
- II. El deterioro del almacén cerca del pozo de inyección, debido a la invasión de partículas, empezará por las partes poco permeables de la roca del almacén. En otras palabras, las partes poco permeables (en la escala de 5 milli Darcys o menos) se deteriorarán gravemente incluso si se inyectan

suspensiones de partículas muy diluidas. Las areniscas de poca permeabilidad serán gravemente deterioradas antes de que ocurra daño alguno perceptible en las zonas de areniscas de alta permeabilidad (escala de centenares de milli Darcys).

- I2. Las zonas de alta permeabilidad de la matriz de la roca del almacén (más de 5,0 milliDarcys aproximadamente), son mucho menos sensibles a una inyección de suspensiones de partículas que las zonas de baja permeabilidad (menos de 5,0 milli Darcys).
- I3. Parece ser que la mejor elección para ADARO sea impedir los daños debidos a la invasión de partículas en las zonas del almacén que tienen una permeabilidad superior a 5,0 milliDarcys aproximadamente. No parece ser posible técnica y económicamente impedir deterioros del almacén en las rocas que tienen una permeabilidad al agua inferior a 5,0 milli Darcys. Puede que sea económicamente más ventajoso dejar deteriorarse estas capas de baja permeabilidad, en vez de intentar quitar todas las partículas de la salmuera, como sería necesario para mantener la inyectividad en todas las capas de arena.
- I4. La filtración de la salmuera producida resolverá sólo una parte del problema de daños del almacén debidos a invasiones de partículas. Otras partículas pueden formarse en las partes del pozo abierto, del pozo de inyección e incluso en el almacén, que conducen a daños semejantes debidos a partículas, incluso si se inyecta agua bastante pura.
- I5. Para impedir o al menos reducir los daños en las zonas de alta permeabilidad de la roca del almacén (zonas de más de 5,0 milli Darcys), la salmuera producida deberá ser filtrada, de manera que ninguna partícula superior a 2 o 3 micrones de diámetro aproximadamente quede en la salmuera antes de la reinyección.

- I6. Para conservar un tamaño de filtro pequeño y económico, se deberá instalar un depósito de descanso para abastecer un tiempo de residencia a la salmuera. La velocidad de caída de partículas de diámetro superior a 13 micrones aproximadamente, es de 50 cm a la hora aproximadamente. El depósito de descanso de descanso podría ser dibujado de manera que esta velocidad de caída y el ritmo de inyección previsto quiten la mayor parte de estas partículas grandes (de 13 micrones de diámetro y superiores).
- I7. ADARO deberá realizar acidificaciones periódicas del pozo de inyección, para reparar los daños debidos a la acumulación de partículas en el hoyo, además de utilizar equipos de descanso y filtración en el campo.

4.0 RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

Las recomendaciones y sugerencias siguientes están basadas en el trabajo realizado dentro del marco del presente contrato.

- I - Se sugiere la utilización de un depósito de descanso y de un sistema de filtros para la salmuera geotérmica antes de la reinyección.
- 2 - El depósito de descanso que será utilizado en el campo deberá abastecer un tiempo de residencia de una hora por lo menos.
- 3 - El depósito de descanso deberá tener una altura de aproximadamente 2 metros. La salida de este depósito no deberá situarse a más de 50 cm por debajo del nivel del agua.
- 4 - El sistema de filtros, instalado debajo del depósito de descanso más bajo del circuito, deberá quitar todas las partículas suspendidas de tamaño superior a aproximadamente 2 micrones.
- 5 - Se sugiere la utilización de un sistema cerrado para ambos, el depósito de descanso y el filtro, es decir, evitar toda contamina-

ción de la salmuera por el aire. Si no es posible evitar la contaminación por el aire, se deberá añadir un captador de oxígeno a la salmuera para evitar una grave corrosión abajo en el circuito.

- 6 - Se sugiere utilizar un filtro en capas de arena "inverso" , el cual podría ser fabricado bastante fácilmente en España.
- 7 - Se recomienda fuertemente realizar algunas pruebas de laboratorio relacionadas con la solubilidad de la arcilla en diferentes tipos de ácido. Se debe determinar el tipo de ácido más apropiado y el tiempo requerido para el trabajo del ácido en condiciones de pozo para evitar una "subacidificación " o una "sobreactidificación" en el pozo de inyección. Se puede que una "sobreactidificación acarree daños severos en el almacén. Toda acidificación futura (pozo de inyección) deberá ser realizada por ADARO y no por una compañía comercial de servicio de acidificación como Halliburton.

5.0 INTRODUCCION : PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA REINYECCION DE SALMUERAS GEOTERMALES.

Las operaciones geotérmicas tienen a menudo problemas con la reinyección (I). Si la reinyección de salmuera en un almacén geotérmico es planeada para algún proyecto nuevo, es importante distinguir entre tres tipos de almacén fundamentalmente diferentes.

- 1 - Permeabilidad de matriz
- 2 - Permeabilidad de fracturas
- 3 - Permeabilidad mixta de fracturas y de matriz

Se pueden esperar o no graves problemas de reinyección según el tipo de permeabilidad. Como se ha demostrado en la Cuenca Parisina, así como en muchas otras operaciones de reinyección térmica en el mundo entero, la reinyección no es un problema mayor si la salmuera enfriada es reinyectada en un almacén fracturado, al menos en parte

Un almacén de roca dura, fuertemente fracturado, es extremadamente resistente por el hecho de estar tapado por las partículas suspendidas reinyectadas con la salmuera enfriada.

Al contrario, si la reinyección depende de una permeabilidad del almacén del tipo matriz predominante, se puede esperar a graves problemas de tapadura. Esto es conocido en numerosas operaciones geotérmicas en el mundo. Por ejemplo, la reinyección de las salmueras enfriadas geotermales en el Valle Imperial en California, es una pesadilla a causa de estos problemas de inyectividad que provienen de las partículas suspendidas. El proyecto futuro de SSDLR de ADARO dependerá del éxito de la reinyección en un almacén de tipo matriz. ADARO no puede contar con la facilidad de un almacén fracturado.

Las partículas suspendidas generan la gran mayoría de los problemas de reinyección conocidos en todo almacén geotérmico, donde la inyectividad dependa principalmente de un flujo de tipo matriz. Las partículas suspendidas en la salmuera reinyectada pueden formarse con diferentes mecanismos. Los daños conocidos en los pozos de inyección y debidos a la presencia de partículas suspendidas en las salmueras inyectadas, pueden ocurrir también con diferentes mecanismos (2, 3). El tipo de mecanismo de los daños conocido en los pozos, y ciertas características de las partículas suspendidas en la salmuera, están relacionados.

Bastante a menudo, estas relaciones entre daños en el almacén y partículas suspendidas pueden ser bastante complejas (I - 3).

Sería difícil evaluar estas relaciones para una aplicación actual en el campo. En este caso, el operador de un campo geotérmico intentará a menudo una reinyección experimental. La mayor parte de estas pruebas empiezan con el éxito inicial de la operación de inyección en el campo, pero pueden terminar con un desastre técnico al llegar a una fase ulterior de esta reinyección experimental.

Lo más frecuentemente, la inyectividad inicial del pozo, antes de que se realicen estas experiencias de reinyección en el campo, no puede ser restaurada, después de grandes pérdidas de inyectividad. Se puede que sea necesario perforar un nuevo pozo de inyección después de haber intentado restaurar la inyectividad, a un nivel técnica y económicamente posible, con obras de reparación costosas.

ADARO quiere evitar el riesgo y el costo de una reinyección experimental en sus operaciones geotérmicas planeadas en SSDLR en la región madrileña. Fue una decisión lógica. Por consiguiente, los objetivos siguientes fueron el tema del presente estudio :

I - Utilizar pruebas de flujo en el testigo para tantos parámetros y variables como sea posible, que conduzcan a daños en la formación.

2 - Utilizar los datos de estas pruebas de flujo en el testigo para sugerir contramedidas para vencer los daños potenciales en el almacén. Estos objetivos fueron la base del estudio descrito en el informe presente.

6.0 BREVE DESCRIPCION DEL PROYECTO GEOTERMICO DE ADARO EN MADRID

El recurso geotérmico de San Sebastián de Los Reyes está situado en la parte Norte de Madrid (España), (coordenadas Greenwich : X = 3° 37' 24"; Y = 40° 33' 34"), a una altitud de 670 m por encima del nivel del mar. El proyecto geotérmico de este sitio es llevado a cabo por la Empresa Nacional de Investigaciones Mineras, S.A. (ENADIMSA).

Las secciones siguientes de este informe dan algunos de los datos pertinentes relacionados con el pozo geotérmico SSDLR N° I. Los datos dados en estas secciones provienen del informe informal de ENADIMSA " Sondeo Geotérmico San Sebastián de los Reyes ".

6.1 - DATOS DE COMPLETACION DEL POZO;

La profundidad total del pozo SSDLR N° I es de 2130 m. La completación se presenta como sigue ;

Diámetros de la perforación :

17" 1/2 : entre 0 m y 421,5 m

12" 1/4 : entre 421,5 m y 1506,5 m

8" 1/2 : entre 1506,5 m y 2130 m

Tamaños de los tubos :

13" 3/8 : entre 0m y 421,5 m

9" 5/8 : entre 421,5 m y 1506,5 m

Unas pantallas de 7" están instaladas debajo de los tubos

9" 5/8 en los sitios siguientes :

Cima (m)	Base (m)
1556,28	1680,48
1704,11	1716,21
1728,18	1740,28
1752,26	1764,36
1788,23	1812,43
1836,48	1969,58
1981,67	1993,77
2005,81	2030,81
2052,98	2077,18
2088,82	2113,02

6.2 - LITOLOGIA

La lista 1 da la litología general de las formaciones desde la superficie hasta la profundidad de 2130 m. La lista 2 da la descripción litológica de la zona entre 1821,4 y 1838,7 m. Estos últimos datos fueron evidentemente obtenidos por petrografía.

6.3 - DIAGRAFIAS

Diferentes métodos de diagraffía fueron utilizados para identificar las rocas permeables del campo geotérmico de SSDLR N° I. Los diferentes métodos de diagraffía utilizados en este pozo están presentados en la lista 3.

Las informaciones sacadas de las distintas diagraffías permitieron concluir que, desde la superficie hasta una profundidad de aproximadamente 650 m, la formación consiste en capas de materiales permeables (arena, guijo, etc..), alternando con capas de materiales bastante impermeables (arcillas, lateritas, etc ..). Entre 650 y 880 m, la pérdida de inducción indica una zona de transición, en donde el agua de formación contiene algunas sales disueltas. Por debajo de 880 m, el "log" muestra claramente un cambio en la salinidad del agua del almacén.

Litológicamente, las rocas están enteramente constituídas de areniscas silíceas que alternan con capas de arcilla y limolita.

A 658 m, la densidad del material es de 2,79 g/cm³. A los niveles 1524 m, 1530m y 1541 m, la densidad de la roca es de 2,9 g/cm³, indicando una zona anhidrítica.

6.4 - SALINIDAD DEL AGUA DE FORMACION

La salinidad del agua de formación crece con la profundidad, cambiando de 4000 ppm hasta 30.000 ppm de Na Cl. La lista 4 muestra el cambio de salinidad del agua de formación con la profundidad.

6.5 - TEMPERATURA DE LA FORMACION

La temperatura de la formación ha sido estimada a partir de medidas de pozo con una "Kuster bomb" hasta las profundidades de 1520 m, 1817m y 2125 m.

A partir de estas medidas, la temperatura máxima en la formación está estimada a 98° C. Este valor parece demasiado alto comparado con el informe de ADARO.

6.6 - GRADIENTE TERMICO

El gradiente geotérmico parece ser de 3,25° C por 100 m de profundidad.

6.7 - CONCLUSIONES GEOLOGICAS

Los puntos siguientes son el resumen de los resultados geológicos del almacén de SSDLR:

- I - Hasta 1.000 m se encuentran zonas permeables de arena y areniscas. Entre 1.000 y 1560 m, se encuentran materiales mucho menos permeables que en las zonas de encima, con abundancia de arcillas y anhidrita. Desde 1540 m hasta el fondo del pozo, se encuentran capas constituidas de areniscas de granos medios. Estas capas de areniscas parecen constituir la zona productiva.
- 2 - El gradiente geotérmico de la arena es de 3,25 °C por cada 100 m de profundidad.
- 3 - Las temperaturas de la formación, calculadas a 1520 m, 1817 m y 2125 m, son de 77°C, 85°C y 97°C respectivamente. La zona productiva se sitúa entre los 1556 y 2130 m. La temperatura de los fluidos producidos en superficie, se espera a que se halle entre 80°C y 85°C, teniendo en cuenta la mezcla de las aguas de varios acuíferos a varias profundidades, como se ha experimentado en el pozo.
- 4 - Las características hidráulicas del almacén productor, deducidas de las diagráffas son prometedoras. Futuras pruebas de producción y de presión permitirán la evaluación de los parámetros, definiendo la transmisibilidad y la viabilidad económica de la explotación del almacén.

5 - La salinidad de la formación cambia entre 4.000 ppm en la cima de la zona de producción, y 30.000 ppm en la base de la zona de producción.

6.8 - EVALUACION DE LA ZONA PRODUCTIVA

El valor potencial del recurso geotérmico ha sido probado por algunas medidas de flujo antes de las pruebas definitivas sobre el pozo. El pozo ha producido por "air-lift" en esta prueba de producción. Los fluidos producidos de esta manera constituyen una emulsión de agua y aire. Los regímenes obtenidos a varias profundidades se presentaban como sigue :

2020 m	: 4,1 litros/segundo
I984 m	: 5,7 l/s
I855 m	: 25,3 l/s
I600 m	: 68,0 l/s
I589 m	: 72,5 l/s

La zona situada entre I675 y I750 m contribuye aproximadamente al 50 % del total.

La prueba de producción ha sido ejecutada por inyección de aire a presión (presión: 20 kg/cm²) en el pozo, lo que emulsiona el agua producida (régimen : 1100 l/s). Los tubos de inyección de aire estaban situados a una profundidad de 250 m y el elemento de presión amerada estaba situado a una profundidad de I600 m. La prueba comenzó el día I9 de Junio de I982, inyectando aire durante I2 horas y 9 minutos. La presión medida en la columna de agua era de I2 kg/cm². La prueba se acabó el día 2I de Junio de I982.

Los varios parámetros obtenidos en esta prueba pueden resumirse como está indicado en la lista 5.

7 - ESTUDIO DE LABORATORIO

El estudio de laboratorio realizado para ADARA está constituido de tres partes :

- I - Determinación de las propiedades críticas de la roca del almacén y de la salmuera.
- 2 - Determinación de las distribuciones de tamaño de las partículas en las suspensiones de partículas esperadas en el campo, durante las futuras operaciones de campo.
- 3 - Determinación de los daños a que se espera en el almacén, debidos a la invasión de las partículas suspendidas en la salmuera enfriada reinyectada.

Todo el trabajo de laboratorio ha sido ejecutado sobre cierto número de secciones del testigo de SSDLR N° I y con cinco muestras de agua que provienen del pozo.

7.1 - DESCRIPCION DE LA MUESTRA DE AGUA

Las listas 7 a 11 muestran los análisis químicos completos de las muestras de agua recibidas de San Sebastián de los Reyes. La lista 12 muestra la composición de la salmuera sintética utilizada en las presentes pruebas de laboratorio sobre el testigo. Al preparar la solución de salmuera, se utilizaron sólo los componentes mayores de las salmueras utilizadas.

7.2 - DESCRIPCION DE LAS SECCIONES DEL TESTIGO (INSPECCION VISUAL)

El testigo estaba seco, convencional, no preservado y su diámetro era de 4 pulgadas. Llegaron aproximadamente 17,3 m de testigo en cajas convencionales para testigo, de madera.

El material del testigo estaba marcado convenientemente, en lo que concierne la profundidad.

La lista 13 da los intervalos de profundidad en proveniencia del testigo. La inspección visual mostró inmediatamente la gran heterogeneidad del material a lo largo del testigo. Un material de tipo de arcilla gris oscuro era evidente en muchas secciones. Este material arcilloso parecía extremadamente compacto (muy baja permeabilidad). Otras partes estaban constituidas por areniseas gris claro, que parecían bastante bien consolidadas y parecían tener una alta permeabilidad.

En la lista 13 se dan algunos de los comentarios basados en la inspección visual del testigo.

7.3 - EXAMEN DE LABORATORIO DEL TESTIGO

Después del examen visual del testigo (véase más arriba), se realizaron cierto número de pruebas sobre este último. Los problemas bastante evidentes con este testigo fueron :

- I - Los cambios drásticos de composición, permeabilidad y porosidad en muy pequeños intervalos de profundidad. Esto era evidente al inspeccionar el testigo sólo visualmente (véase más arriba).
- 2 - La desintegración completa de la matriz de la roca con el contacto del agua en algunas secciones del testigo (véase más adelante en este informe).

La heterogeneidad evidente de las secciones del testigo hicieron difícil la selección de muestras convenientes de diferentes profundidades para el estudio de laboratorio.

7.3.1 - SELECCION Y PREPARACION DE LAS MUESTRAS DEL TESTIGO

La lista 14 da las diferentes profundidades de donde se sacaron las muestras del testigo. Todas las muestras fueron sacadas perpendicularmente al eje del testigo y así representan muestras de roca del almacén orientadas horizontalmente.

Originalmente, las dimensiones de todas las muestras fueron de una pulgada de diámetro y aproximadamente 3 pulgadas de longitud total. Las dos extremidades brutas de las muestras se cortaron con una sierra para rocas y así, la longitud final de cada muestra de testigo fué de 2,5 pulgadas.

Las piezas cortadas en la extremidad (dos piezas por muestra, es decir, una pieza de extremidad de cada lado de cada muestra), se guardaron para los análisis de rocas.

7.3.2 - ANALISIS DEL MATERIAL SOLIDO DEL TESTIGO

Las piezas de extremidad de las muestras fueron examinadas mediante distintos métodos de laboratorio.

- I - Análisis de difracción de Rayos X (XRD)
- 2 - Microscopia electrónica en "scanning" (SEM)
- 3 - Análisis de dispersión de energía de Rayos X (MICROPROBE o EDAX)

Estos exámenes y las observaciones y resultados están descritos en las siguientes partes de este informe.

7.3.2.1 - EXAMEN DE DIFRACCION DE RAYOS X

En principio, hemos utilizado dos métodos para preparar las muestras de rocas para el examen XRD :

I. La muestra de roca entera fué pulverizada en un molino de bolas y examinada "como estaba" por XRD, de pólvora.

2. La muestra de roca fué machacada en un mortero y después separada por sedimentación en tres fracciones diferentes, (siguiendo un procedimiento aceptado por el API :

- a) Fracción "Arena"
- b) Fracción "Limolita"
- c) Fracción "Arcilla"

Después, las tres fracciones diferentes fueron analizadas separadamente por XRD.

La lista 15 da el resumen de los resultados de los análisis XRD sobre el material del testigo entero, sin ninguna clasificación de las muestras molidas. Esto significa que una muestra de roca entera fué pulverizada en un molino de bolas y que la pólvora resultante fué examinada por XRD, tal como venía del molino. Esta lista 15 resume los resultados de algunos de los 30 análisis XRD.

Se debe recordar que este método no es muy sensible, porque el análisis XRD convencional no tiene un límite de sensibilidad muy fino. Por ejemplo, ningún mineral presente en la matriz de la roca con una concentración del 1 % (en peso) o menos, aparecerá en el análisis XRD. Como lo muestra la lista 15, ocho minerales mayores constituyentes fueron detectados en los materiales del testigo examinados.

Se escogieron algunas piezas de extremidad seleccionadas (piezas de corte) (material del testigo), para un examen XRD más detallado. Cinco muestras del testigo fueron pulverizadas con precaución en un mortero, con un pisón de madera. Se tomaron precauciones de manera que los granos de arena no se rompieran durante la operación. El material obtenido fué entonces separado por sedimentación en tres fracciones diferentes :

- I. Fracción Arena
2. Fracción Limolita
3. Fracción Arcilla

Las fracciones de arena fueron entonces analizadas de manera "standard" seca, con tamices.

(Tyler siere analysis)

Las listas 16 a 20 dan los datos de profundidad de las muestras de rocas (a), la distribución de pesos de las diferentes fracciones arenosas, limolíticas y arcillosas (b), y los datos del análisis "standard" de tamiz(c). Los datos de tamiz (Tyler siere data) están representados en las figuras 1 a 5.

Las diferentes fracciones arcillosas, limolíticas y arenosas de las distintas muestras de rocas (véase listas 16 a 20), fueron analizadas de nuevo por XRD. Cada muestra de estas diferentes fracciones de tamiz, fué analizada en su forma bruta y en su forma glicolada para determinar las concentraciones esmécticas de cada fracción. La lista 21 da los datos cuantitativos de XRD de estos análisis de las diferentes fracciones de tamiz. Todos los datos de la lista 21 están normalizados.

Los datos de la lista 21 fueron entonces utilizados para calcular la composición mineral de las muestras de la roca total. Estos datos calculados se encuentran en la lista 22.

7.3.2.2 - SEM-EDAX EXAMEN

Unos trabajos SEM (Scanning Elction Microscope) fueron realizados para un examen más fino de algunas muestras de roca. Las figuras 8 a 12 muestran muestran sólo algunas de las micrografías tomadas durante este estudio.

Los espectros EDAX (microprobe) se tomaron con el mismo microscopio SEM. Las figuras 11 a 15 muestran los espectros EDAX. Las micrografías (figuras 4 a 8), y los espectros EDAX (figuras 11 a 15), están relacionados. El pico de oro de la figura 15 es un artefacto causado por la aplicación de oro en las muestras, necesario para estos exámenes EDAX. Todos los exámenes SEM y EDAX de los distintos materiales del testigo confirmaron los datos obtenidos en el examen mineralógico hecho por análisis XRD antes mencionado.

7.3.2.3 - SENSIBILIDAD DEL MATERIAL DE LA ROCA AL AGUA

Algunos materiales de la roca del testigo son extremadamente sensibles al agua. Por ejemplo, si un pedazo de roca, de aproximadamente 1 cm x 1 cm x 1cm, proveniente de una profundidad aproximada de 1830 m, fuera sumergida en agua destilada, se desintegraría completamente en menos de diez minutos. Lo que significa que, lo que era una roca sólida y dura tomada de la caja del testigo, se transforma en numerosas pequeñas partículas si se sumerge en agua. El tamaño de las partículas mayores, que resultan de la desintegración de la roca con el contacto del agua, es de más o menos 1 mm, o menos, tras menos de 10 minutos de inmersión.

Esperábamos que esta extrema sensibilidad de la roca al agua no tendría lugar si se sustituya el agua destilada por agua del almacén. Así pues, controlamos la resistencia de algunas muestras de roca al agua del almacén, sumergiendo unos pedazos de roca en una muestra de agua del almacén entregado por ADARO. Desgraciadamente, no se pudo observar ninguna diferencia visible en la manera o el grado de desintegración de la roca al sumergirla en agua destilada o en agua del almacén.

Finalmente, el agua destilada fué reemplazada por una solución de K CL a 2%, con la esperanza de que los iones potasio produjeran una estabilización de la arcilla y, de esta manera, la resistencia del material de la roca a estas reacciones con agua. De nuevo, no se observó ninguna mejora con al solución de K CL a 2%. La desintegración de la roca en K CL a 2% se produjo casi de la misma manera que en agua destilada.

7.4 - PRUEBAS DE FLUJO EN EL TESTIGO

Las pruebas de flujo realizadas en el testigo durante este estudio fueron de tres tipos :

- I - Medidas de la permeabilidad de las muestras secas del testigo al aire.
- 2 - Medidas de la permeabilidad al agua (y a la solución de K Cl a 2%), antes de inyectar cualquier partícula en las muestras del testigo.
- 3 - Medidas de cualquier cambio de la permeabilidad al agua al inyectar suspensiones de partículas en las muestras del testigo.

Estas tres partes diferentes del estudio y la preparación de las distintas suspensiones de partículas utilizadas en este estudio están descritas en las secciones siguientes.

7.4.1 - MEDIDAS DE PERMEABILIDADES AL AIRE

Las permeabilidades al aire fueron medidas, antes de cualquier prueba de flujo con líquidos, utilizando un permeámetro sobre cada muestra sacada horizontalmente del testigo y secada. Cada testigo fué recubierto de Teflon, de manera a dejar expuestas sólo las extremidades de los testigos.

Las muestras recubiertas se pusieron en el soporte para testigos de tipo Hassler del permeámetro. Las medidas, variables sobre cada muestra, fueron las siguientes :

- I - La presión del gas en la superficie de entrada.
- 2 - El caudal del gas.
- 3 - La temperatura del gas.

La viscosidad del gas está sacada de las listas de viscosidad modelo para la temperatura medida. Los valores medidos para la presión, el caudal, la viscosidad del gas y las dimensiones de cada muestra del testigo, nos permitieron calcular la permeabilidad utilizando la ley de Darcy. La lista I9 da la porosidad, la permeabilidad al aire, y la densidad aparente de los granos de las muestras del testigo cogidas a diferentes profundidades en el pozo de SSDLR N° I.

7.4.2 - MEDIDAS DE PERMEABILIDAD AL AGUA

A diferencia de las pruebas de flujo que utilizan soluciones de partículas, las cuales fueron efectuadas a caudal constante, todas las permeabilidades al agua fueron medidas a presión constante. Se utilizó el agua del almacén (véase lista 12) para estas pruebas. Se utilizó nitrógeno para empujar el agua desde los cilindros de almacenamiento a través del testigo. El soporte del testigo, los cartuchos para testigo y el montaje del testigo están descritos en la sección 7.4.4.3 ("Pruebas de flujo en el testigo con suspensiones de partículas"). La presión fué calculada con un manómetro muy preciso (Heise gauge). El centro del manómetro estaba situado al mismo nivel que la salida del fluido para evitar cualquier variación hidráulica en los cilindros de almacenamiento del agua. Las viscosidades y densidades requeridas de los fluidos se medían respectivamente con un tubo viscosímetro tipo Cannon y un hidrómetro.

Para cada muestra de testigo, se ajustaba la presión para producir un caudal suficientemente grande y estable, antes de hacer cualquier variación. A partir de las medidas de caudal, presión y viscosidad, y de los datos de dimensión del testigo, se calcularon las permeabilidades, utilizando la ley de Darcy.

A menudo, los caudales líquidos no son muy estables durante grandes períodos de flujo. Estas variaciones de presión son debidas a la baja de presión causada por la erosión o la disolución del material del testigo, o al alza de presión causada por el movimiento de finas partículas sólidas en el interior del testigo.

Se efectuaron un gran número de medidas sobre cada testigo para determinar la reproductibilidad de la permeabilidad medida de los testigos al agua. La lista 23 da los resultados de las medidas de permeabilidad al agua.

Como se ve en la lista 23, los testigos de baja permeabilidad al aire, (menos de 10 md), tienen también una muy baja permeabilidad al agua. Por ejemplo, el testigo número I2 tiene una permeabilidad al aire de 1,9 md, y su permeabilidad al agua es sólo de 0,00 /md. Esto significa que hay una diferencia de más o menos 99,94 % entre la permeabilidad al aire (K_a) y la permeabilidad al agua (K_w). La razón K_w/K_a para el testigo número I2 es más o menos de 0,0005. Esta es una razón inhabitualmente baja. Por otro lado, el testigo número IO tiene una permeabilidad al aire de 260 md, y su permeabilidad al agua es de 48 md. La razón K_w/K_a para el testigo número IO es de 0,1846.

En general se encuentra una razón K_w/K_a del orden de 10-23% en las zonas de alta permeabilidad del almacén (más de 10 md). En el otro extremo, en las zonas de baja permeabilidad, la razón K_w/k_a es muy pequeña, a veces del orden de menos de 0,0004.

Las causas de estos valores inhabitualmente pequeños de la razón K_w/K_a pueden ser diversas :

I - La permeabilidad al aire (K_a) se ha medido sin exceso de presión sobre la muestra de la roca. Se aplicó sólo una presión total máxima de 200 psis (14 at) durante estas medidas de K_a . Este es el método convencional para determinar las permeabilidades al aire.

- 2 - Se ha medido la permeabilidad al agua bajo exceso de presión. Este exceso de presión era de 3400 psis (240 at), y se parecía a la presión en el almacén.
- 3 - El flujo de aire a través de la muestra del testigo no produce ninguna reacción física ni química importante entre la fase sólida y el fluido en movimiento. Al contrario, un flujo de la fase acuosa puede producir mayores reacciones físicas y químicas entre la fase fluyente (agua) y la fase sólida de la roca. Estas reacciones pueden llevar a la formación de partículas migratorias y/o al inflamamiento de la arcilla. Estas reacciones pueden reducir drásticamente la permeabilidad, como se ha experimentado durante este estudio.

Naturalmente, la roca que tiene una alta permeabilidad original al aire o al agua, no queda muy afectada por estas reacciones agua/roca. Por otro lado, la roca que tenga una permeabilidad original baja será drásticamente afectada por estas reacciones agua/roca.

Las secciones de rocas de baja permeabilidad, además de ser muy sensibles al agua, serán también muy susceptibles a daños de partículas, como ya se ha subrayado en precedentes secciones de este informe. Se había previsto que sería muy difícil llevar las experimentaciones de flujo de partículas en estos testigos de baja permeabilidad, es decir, que se necesitarían grandes diferencias de presiones para establecer cualquier flujo de suspensiones de partículas a través de estas muestras. De hecho, hasta partículas submicroscópicas tapanían los poros de estos testigos.

7.4.3 - MEDIDAS DE PERMEABILIDAD A SOLUCIONES DE K CL A 2 %

Después de hallar algunas de las muy bajas permeabilidades al agua (véase la lista 23), y tras haber llevado las experiencias de sensibilidad al agua, (véanse secciones precedentes de este informe), se intentó medir la permeabilidad de las muestras del testigo a una solución de K CL a 2 % sobre algunos testigos de baja permeabilidad.

Se secaron algunas muestras del testigo y se midió la permeabilidad al aire. Entonces, en vez del agua del almacén, se utilizó una solución de K CL a 2 % para determinar la permeabilidad. La lista 24 da algunos de estos datos. Por ejemplo, la muestra número I2 tiene una permeabilidad al aire de 1,9 md. Este valor bajo de permeabilidad al aire se considera como muy pequeño para permitirnos el realizar cualquier prueba de flujo de partículas. La permeabilidad de origen de este testigo al agua era de 0,001 md. El testigo fué secado de nuevo después de saturarlo con la solución de K CL a 2 % y se midió la permeabilidad a esta solución. El valor hallado fué de 0,004 md.

Entonces, se echó agua a través de esta muestra del testigo. De nuevo, se midió su permeabilidad al agua de formación y se halló de nuevo 0,004 md. Parece pues, que haya alguna mejora en la permeabilidad del testigo al agua después de un tratamiento con K CL a 2 %. Sin embargo, esta mejoría no es significativa. Naturalmente, la solución de K CL a 2 % no produjo ninguna mejora apreciable en cuanto a la inyección de agua del almacén. Esto significa que el hecho de utilizar una solución de K CL a 2 % para cualquier perforación, completación o "Work-over" en el campo, no producirá ninguna mejora substancial de los daños debidos al contacto entre roca y agua.

7.4.4 - CAMBIOS DE PERMEABILIDAD DEBIDOS A LA INYECCION DE SUSPENSIONES DE PARTICULAS

Los diferentes procedimientos utilizados en el estudio de laboratorio para determinar los cambios en la permeabilidad de los testigos seleccionados, producidos por la inyección de sólidos en suspensión, están descritos en esta sección.

Al principio, se planeaba utilizar partículas de características geométricas definidas que se encuentran en el comercio para llevar a cabo este estudio. Nuestro propósito era fabricar diferentes tipos de suspensiones utilizando partículas del comercio que tienen una geometría específica, y experimentar el comportamiento del testigo antes, durante y después de la inyección de estas suspensiones "artificiales" de partículas.

Después de hallar la extrema sensibilidad al agua de algunos de los materiales del testigo, cambiamos este primer plan. En vez de este, utilizamos el material de la roca del almacén para fabricar varios tipos de suspensiones de partículas. Además de ser conveniente, una suspensión de partículas preparada con el material mismo del testigo, representa de manera más realista lo que va a ocurrir durante las futuras operaciones de campo. El trabajo planeado inicialmente con partículas artificiales, no hubiera permitido una simulación en el laboratorio de los daños reales del almacén a que hay que esperarse en el campo.

Se utilizaron las siguientes consideraciones como base para el plan de nuestro estudio de laboratorio :

Se tardará cierto tiempo en producir la salmuera en el pozo, conducir esta salmuera a través de los intercambiadores de calor o bombas de calor, y finalmente reinyectar la salmuera enfriada. Antes de reinyectar la salmuera, después de producirla, se debería conducirla a depósitos de descanso para permitir la sedimentación de las mayores partículas por lo menos. Dependiendo de los diversos caudales y de la geometría de las instalaciones de campo, resultarán diferentes velocidades lineares y diferentes tiempos de residencia para la salmuera en movimiento. Dependiendo conjuntamente de las velocidades lineares y de los tiempos de residencia, las partículas que queden en las suspensiones tendrán ciertas características pertinentes. Mayor será la velocidad y menor el tiempo de residencia, menos se posarán las partículas. Cuanto menos se posen las partículas, más daños se podrán esperar en el almacén.

Para reproducir las condiciones de campo, hemos tenido que estudiar las características de sedimentación de las partículas en la salmuera de SSDLR.

Ello significa que hemos empezado el estudio preparando suspensiones de partículas que estaban saturadas con las partículas sacadas del mismo material de la roca.

Hemos previsto preparar tres series de suspensiones de partículas. Estas tres series están designadas por SP-I, SP-2 y SP-3. La lista 25 da una descripción de estas suspensiones.

La suspensión SP-I contiene partículas de menos de 2 o 3 micrones de diámetro. La suspensión SP-2 contiene partículas de entre 2 y 10 micrones de diámetro. Finalmente, la suspensión SP-3 contiene partículas de diámetro mayor a 10 micrones y menor a 30. Naturalmente, en todas estas descripciones, se supone que las partículas son esféricas.

Para preparar estas tres suspensiones, se utilizó el principio de sedimentación de partículas. Generalmente, para la preparación de las suspensiones, se calcula la velocidad terminal de partículas de diferentes tamaños en el agua de SSDLR. Para calcular las velocidades terminales, se supone que las partículas son esféricas y que siguen la ley de Stokes.

La lista 26 da las velocidades terminales de partículas de varios tamaños. Hay que mencionar aquí que, es posible que algunas de las arcillas así como algunas de las partículas muy finas contenidas en el testigo y utilizadas para componer las suspensiones, no sigan la ley de Stokes (véase más abajo).

7.4.4.1 - MEDICION DE LOS TAMAÑOS Y DE LAS DISTRIBUCIONES DE TAMAÑOS DE LAS PARTICULAS

Se utilizaron dos instrumentos diferentes para medir los tamaños de las partículas y sus distribuciones :

I - Un contador de partículas, "El Zone" de "Particle Data, INC."

Este instrumento es parecido al más convencional Contador Coulter. Por lo tanto, este instrumento permite operaciones más sofisticadas y está construido para manejar más fácilmente los datos computados que un Contador Coulter convencional. El principio de la medición está basado en las diferencias de conductividad eléctrica entre las partículas y el líquido que las rodea.

2 - Un contador de partículas MICROTAC, de Leeds and Northrup.

2 - Encontrar una manera de fabricar las diferentes suspensiones de partículas (SP-I, SP-2 y SP-3) que habrían de ser utilizadas para los experimentos de tapadura del testigo, en el estudio de laboratorio presente.

La lista 26 da las velocidades de sedimentación terminal calculadas en diferentes partículas en la salmuera de SSDLR. Estos datos fueron calculados utilizando la ley de Stokes. Desgraciadamente, la ley de Stokes ya no se aplica bajo ciertas condiciones. Algunas suspensiones de partículas de SSDLR no cumplen con estas condiciones límites. La ley de Stokes supone que las partículas (a) sean esféricas y (b) no estén rodeadas de grandes capas de agua inmóvil. Puede que estas dos hipótesis no se verifiquen para las pequeñas partículas de arcilla que constituyen la mayoría de los sólidos en las suspensiones de partículas de SSDLR.

Se llevó a cabo el experimento siguiente para determinar si los datos calculados en la lista 26 representan datos utilizables para aplicaciones de campo :

Se efectuaron algunas pruebas de sedimentación en el laboratorio, utilizando el material de los testigos de SSDLR y el agua de formación. Estos experimentos fueron realizados según el proceso descrito en el párrafo siguiente :

Una parte de material tamizado (partículas de 150 micrones y más pequeñas), provenientes de los testigos de SSDLR, fué mezclada con la salmuera de formación (véase la lista I2). La suspensión resultante fué vertida en un recipiente alto y cilíndrico donde pudieron sedimentar las partículas. A intervalos regulares, se tomó una muestra de la suspensión de este cilindro, a una profundidad de 50 cm. Entonces se midió la distribución de tamaños de las partículas de la muestra de la suspensión.

La utilización de este aparato es más conveniente que la del equipo de tipo Cñntador Coulter (El Zone Counter). El principio de medición está basado en la difusión de la luz del rayo laser. El instrumento utiliza la luz dispersa según un ángulo pequeño. De esta manera, suministra una información mucho mejor y más completa sobre las características de las partículas que un instrumento de rayo láser más convencional con ángulo fijo.

Estos dos instrumentos fueron utilizados en este estudio.

7.4.4.2 - PREPARACION DE LAS SUSPENSIONES DE PARTICULAS

La preparación de las suspensiones de partículas necesitó tiempo y experimentaciones considerables. Todas las suspensiones de partículas que habrían de ser inyectadas en las distintas muestras del testigo, deberían representar suspensiones que esperarían durante las las futuras operaciones de campo, bajo varias condiciones operacionales de campo. Algunas de estas experimentaciones preliminares están descritas a continuación.

7.4.4.2.1 - EXPERIMENTACIONES PRELIMINARES CON SUSPENSIONES DE PARTICULAS

Algunas experimentaciones preliminares fueron efectuadas para estudiar el comportamiento general de las suspensiones de partículas esperado durante las futuras operaciones en el campo de SSDLR. Estas experimentaciones tenían dos objetivos distintos :

- I - Determinar si la sedimentación de las partículas durante un tiempo razonable produciría una desaparición eficaz de grandes cantidades de partículas de la salmuera antes de su reinyección en un pozo de inyección.

La lista 27 da las distribuciones de tamaños de las partículas de las muestras tomadas de este cilindro a distintos intervalos de tiempo, a una profundidad de 50 cm. Las medidas de tamaño de las partículas se efectuaron utilizando el contador de partículas MICROTRAC.

La lista 27 muestra que la suspensión de origen (como estaba preparada en el tiempo 0), contenía partículas de tamaño de la escala de 1,9 micrones a 150 micrones. Se ha de subrayar aquí que esta suspensión contenía partículas mucho más pequeñas que 1,9 micrones (partículas submicroónicas), pero que no pudieron ser detectadas a causa de los límites del instrumento utilizado (Microtrac, de Leeds and Northrup).

La lista 27 muestra también que, tras 30 minutos de tiempo de descanso, todas las partículas mayores de 27 micrones habían desaparecido de la suspensión. (a una profundidad de 50 cm). Esto se adapta bien a los cálculos de la ley de Stokes para partículas grandes. Por ejemplo, las partículas de 30 micrones de diámetro tendrán una velocidad terminal de 278, 7 cm/hora, (véase la lista 26 para las partículas de 2,6 g/cm³ de densidad). Así, partículas de 30 micrones pueden sedimentarse a una profundidad de más de 100 cm en 30 minutos. Esto lo apoyan (al menos aproximadamente) las medidas de la lista 27. En la lista 27, podemos ver que después de 30 minutos de tiempo de descanso, una muestra de la suspensión tomada a una profundidad de 50 cm, no contiene ninguna partícula de más de 30 micrones.

La lista 27 muestra también que, hasta después de 120 minutos de descanso, la suspensión contiene todavía algunas partículas de más de 10 micrones. De nuevo, esto se adapta bastante bien con los cálculos de la ley de Stokes. Estos muestran que las partículas de 10 micrones tienen una velocidad terminal de 23 cm/hora. Luego, en dos horas, las partículas de 10 micrones o mayores, habrán descendido 46 cm (con partículas de 2,6 g/cm³ de densidad).

La lista 27 muestra que, cuando el tiempo de sedimentación aumenta, la suspensión tiende hacia distribuciones de partículas bastante finas (menos de 10 micrones).

7.4.4.2.2 - PREPARACION DE LA SUSPENSION SP-3

Esta sección describe el proceso utilizado para preparar la suspensión SP-3. Aproximadamente 500 g de material no consolidado del testigo, provenientes del intervalo de profundidad I830,19 - I830,28 fueron utilizados para realizar esta suspensión de partículas. El material del testigo fué repartido en tres partes y agitado vigorosamente en un mezclador con la salmuera de formación (véase la lista 12). Después de agitar durante 15 minutos se permitió a las grandes partículas posarse durante unos 20 segundos. Entonces, la salmuera que contenía las partículas que quedaban suspendidas, fué vertida en un recipiente cilíndrico de 10 litros. Luego, se añadió más salmuera al material que quedaba en el recipiente de mezcla y se agitó de nuevo durante unos 15 minutos. Se siguió el mismo procedimiento para las tres porciones del material sólido del testigo.

Se añadió bastante solución de salmuera en el cilindro, para obtener una columna de solución de un metro de altura. Entonces se cerró el cilindro y se volcó de un lado a otro hasta que todas las partículas quedasen en suspensión.

Después de un tiempo de descanso de 5 minutos, se cogió, a una profundidad de 60 cm (medidos a partir de la superficie de la columna de agua), 1 litro de solución que contenía las partículas suspendidas. Las partículas cogidas fueron analizadas en un analizador de tamaño de partículas Microtrac, de Leeds and Northrup. Se determinó que el tamaño medio de las partículas era de aproximadamente 30 micrones, ignorándose las partículas muy finas en suspensión.

Las partículas que quedaron en el gran cilindro se pusieron otra vez en suspensión, y se cogió un litro de solución a una profundidad de 60 cm después de 5 minutos de descanso. De nuevo, el tamaño medio de las partículas fué de 30 micrones aproximadamente. Se repitió este procedimiento una vez más, y de nuevo, la suspensión de partículas contenía partículas de un tamaño medio de 30 micrones.

Entonces se llenó de nuevo el cilindro para completar la altura de la columna a 1 metro, y se volcó de nuevo. Esta vez, se cogió 1 litro de solución, tras 25 minutos de descanso, a una profundidad de 40 cm. El tamaño normal de las partículas de esta nueva suspensión fué de 20 micrones aproximadamente.

Se permitió al litro de solución que contenía partículas de 20 micrones, descansar durante 10 minutos en un pequeño recipiente. Se quitó toda la solución de salmuera que contenía partículas finas suspendidas, y se rellenó el recipiente con salmuera fresca. Después de limpiar varias veces de esta manera, se quitaron las partículas muy finas. La suspensión que quedaba al final de este procedimiento constituyó SP-3.

Se utilizó una muestra de la suspensión SP-3 para medir la distribución de tamaños de partículas con el contador de partículas El Zone. La lista 28 da la distribución de tamaños de partículas de la suspensión SP-3. De nuevo, se ha de subrayar que cualquier partícula submicrónica que exista en la suspensión no se toma en cuenta. Ahora damos una breve descripción de la lista 28 :

La columna identificada por "SIZE" (Tamaño), da el diámetro de las partículas en micrones. La columna identificada por "COUNT" (Cuenta), es el número de partículas de un tamaño dado (columna I). La columna identificada por "VOLUME" (Volúmen), es proporcional al volúmen real de todas las partículas de un tamaño dado.

El número dado en la columna identificada por "VOLUME" es exactamente igual a $NxdE^3$ (número de partículas de un tamaño dado multiplicado por el cubo del diámetro de las partículas). Para obtener el volumen real (en micrones cúbicos) de la suspensión, se debe multiplicar los números de la columna "VOLUME" por 0,523.

Algunas de las características importantes de la suspensión SP-3 están resumidas en la lista 29. Esta lista 29 muestra que el tamaño normal (media aritmética) es de 19,12 micrones. La lista 29 muestra también los distintos porcentajes de la suspensión. Por ejemplo, en la suspensión SP-3, el 10 % de las partículas enumeradas tienen diámetros mayores a 23,85 micrones (véase la lista 29).

7.4.4.2.3 - PREPARACION DE LA SUSPENSION SP-2

La suspensión de partículas SP-2 consiste en partículas en una escala de diámetros entre 2 y 10 micrones. Para realizar esta suspensión, se utilizó una sección de testigo de material no consolidado, como se ha descrito en la sección 8.4.4.2.2.

La suspensión de partículas de origen fué vertida en un alto cilindro (Imetro de alto), y se le permitió descansar. Se cogió la porción ligera (es decir, la región de baja concentración), y nos encontramos con que estaba aproximadamente en una escala entre 2 y 10 micrones. Esto constituyó la suspensión SP-2. Se cogió también la solución sobrenadante y se guardó (véase la sección siguiente del informe, que describe la suspensión SP-I)

Una muestra de la suspensión SP-2 fué utilizada para medir la distribución de tamaños de partículas con el contador de partículas El Zone. La lista 30 da la distribución de tamaños de partículas en esta suspensión. Se ha dado una explicación de los títulos de esta lista en la sección precedente. La lista 31 da un resumen de las características más importantes de la suspensión SP-2.

Se puede ver en la lista 3I que el 50 % del total de las partículas en la suspensión estaba constituido por partículas de más de 3,04 micrones de diámetro. Sólo el 10 % del volumen de las partículas de la suspensión está constituido por partículas de 4,86 micrones o más. El 90 % del volumen de partículas de esta suspensión SP-2 está constituido por partículas de 1,36 micrones o más.

Esta suspensión SP-2 se parece de muy cerca a la distribución de tamaños de partículas que se quería, aunque contenga probablemente algunas partículas muy pequeñas (más pequeñas que 2 micrones), y también unas pocas partículas de diámetro mayor a 10 micrones. Se podrían encontrar fácilmente suspensiones de partículas semejantes en las mismas operaciones de campo. Por lo tanto, se piensa que la suspensión de partículas SP-2 se parece a las mismas suspensiones de campo.

7.4.4.2.4 - PREPARACION DE LA SUSPENSION SP-1

La suspensión SP-I ha sido preparada a partir de la solución sobrenadante que se había puesto de lado durante la preparación de la suspensión SP-2 (véase la sección precedente). Se hicieron tentativas para quitar las partículas mayores de 3 micrones de esta suspensión, centrifugando la suspensión entera muy brevemente. Esta tentativa no tuvo éxito. La mejor manera y de mayor éxito para preparar la suspensión SP-I se encontró al permitir a la suspensión sobrenadante un descanso de unas 20 horas (véase más arriba).

La mezcla resultante contenía partículas menores de 3 micrones con unas cuantas partículas mayores que no se pudieron quitar. Este contenido de partículas grandes no pudo ser evitado (mayores de 3 micrones de diámetro). La distribución exacta de los tamaños de las partículas de esta suspensión no pudo ser medida, precisamente porque, razonablemente, no existe ningún buen método para la determinación de los tamaños de partículas suspendidas

de tamaño inferior a aproximadamente 0,6 micrones.

7.4.4.3 - PRUEBAS DE FLUJO EN EL TESTIGO CON SUSPENSIONES DE PARTICULAS

Las pruebas del testigo con soluciones de partículas suspendidas fueron realizadas con un aparato puesto a punto por Vetter Research. Se muestra un diseño esquemático del aparato en la figura 16.

Se envolvió cada testigo, limpio y seco, en una película de Teflon, y se ató resistentemente cada muestra del testigo por cada cara a pistones, utilizando tubos retractables de Teflon como manguitos. La muestra del testigo y los dos pistones se montaron en un soporte para testigo (véase la figura 17), y se llenó con agua el anular del soporte. Entonces, se aplicó al soporte que contenía el testigo una sobrepresión de 3400 psis alrededor de este testigo (es decir, al anular entre el tubo retractable de Teflon y el soporte del testigo). Luego, se vació el testigo hasta que se estableciese un buen vacío estable (2 a 4 horas). Entonces se sumergió el testigo en agua de formación y se le aplicó aproximadamente 1000 psis durante una hora, antes de cualquier experimentación de flujo, para asegurar la saturación y el equilibrio térmico. La saturación, tras vacío de los testigos con la solución de KCl a 2 %, se efectuó con el mismo procedimiento que con el agua de formación. Entonces, se pudo medir la permeabilidad inicial a los líquidos.

Después del flujo a través del testigo, éste presentaba una permeabilidad estable al agua de formación. Entonces, las soluciones de partículas suspendidas fueron bombeadas en el testigo con un caudal constante. Un registrador de datos "fino" conectado a cierto número de transductores de presión, suministró una impresión del tiempo en relación con las presiones; la presión crecía al taparse los testigos con las soluciones de partículas.

Cuando un testigo quedaba tapado, el aparato permitía quitar el pistón de entrada de manera que se pudiera inyectar por la extremidad del testigo agua de formación para limpiar las líneas de entrada. Las medidas de permeabilidad efectuadas después de limpio, mostrarían si el tapamiento observado en el testigo era debido a la formación de un filtro de "cake" sobre la extremidad del testigo, o a la invasión de las partículas dentro del testigo.

Las distintas suspensiones de partículas pueden tener características de tapamiento drásticamente cambiantes, y que dependen de los parámetros siguientes :

- I - Las características propias de las suspensiones de partículas, es decir, el tamaño, la distribución de tamaños, la concentración y la forma de las partículas suspendidas.
- 2 - La velocidad linear de una suspensión de partículas dada, cuando entra en el testigo y fluye a través de la matriz de la roca.
- 3 - Las propiedades propias de la matriz del material de la roca.

De manera a poder estudiar los distintos efectos de las distintas suspensiones de partículas a través de la matriz de la roca de SSDLR, tuvimos que variar en nuestros experimentos tres variables :

I - La permeabilidad del testigo :

Las muestras del testigo tuvieron que tener permeabilidades variables para estudiar los efectos de una suspensión de partículas fluente, dada como función de la velocidad linear a cada permeabilidad dada.

2 - Las características de las partículas en la suspensión.

Para cada conjunto de velocidad de flujo y permeabilidad del testigo, se tuvo que estudiar los efectos de la suspensión de partículas fluentes sobre la permeabilidad del testigo resultante.

3 - La velocidad linear :

Incluso cuando la salmuera enfriada era inyectada con un caudal constante en un pozo que tuviera una simple geometría cilíndrica, ocurrían cambios drásticos de la velocidad crítica del flujo en el almacén, cerca del pozo. La inyección del fluido en la matriz de la roca del almacén, con un régimen constante, producirá velocidades lineares de flujo variables en la matriz de la roca. En un sistema radial, la velocidad mayor se establecerá cerca del pozo. La velocidad decrecerá rápidamente cuando crezca la distancia al pozo.

Todas nuestras experimentaciones de laboratorio fueron construídas alrededor de estas variables. Un estudio detallado que investigaba los efectos de estos distintos parámetros sobre los daños en el medio poroso, había sido ya efectuado en V.R. (2). Algunos de los resultados obtenidos en este estudio precedente fueron utilizados para interpretar los resultados del presente estudio para el campo geotérmico de SSDLR.

Las listas 32, 33 y 34 presentan las características propias de las muestras del testigo utilizadas en los estudios de flujo con las suspensiones de partículas SP-1, SP-2 y SP-3, respectivamente. Todos los cilindros utilizados tenían un diámetro de 1 pulgada (2,54 cm) y una longitud de más o menos 2,5 pulgadas (6,3 cm). Se seleccionaron tres escalas de permeabilidad al aire para cada conjunto de experimentaciones de flujo de partículas. Los valores específicos utilizados en cada caso están presentados en las listas 32 a 34. Se ha tratado de elegir siempre muestras del testigo que tuvieran una permeabilidad al aire del mismo orden de magnitud para cada suspensión de partículas.

La permeabilidad al aire de las muestras del testigo utilizadas para las pruebas de inyección de partículas cambia entre 3/6 md (el valor máximo de este estudio), y 0,34 md (el valor mínimo utilizado en este estudio).

Se utilizaron tres diferentes valores de caudal en todas las experimentaciones. Estos caudales corresponden a velocidades lineares de 7, 4 y 2 pies por día. Los resultados de estas pruebas de flujo con suspensiones de partículas en el testigo, están descritos en la sección siguiente de este informe.

7.4.4.3.1 - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLUJO CON SUSPENSION SP-1

La lista 35 presenta un resumen de los resultados obtenidos a partir de las experimentaciones de flujo de partículas, utilizando la suspensión SP-I. La suspensión de partículas SP-I contiene partículas de diámetro inferior a 3 micrones. La mayoría de las partículas de esta suspensión están en la escala submicrónica. Los datos presentados en la lista están dispuestos de manera que la columna I indique el número de la muestra del testigo, (véase también la lista 23), para identificación. La columna número 2 indica la velocidad linear en relación con el caudal utilizado. La columna número tres indica la permeabilidad inicial al agua de cada testigo. La columna número 4 da la permeabilidad al agua de cada testigo, después que 10 volúmenes de poros (o menos) de la suspensión SP-I, hayan sido inyectados a través de los testigos, con las velocidades especificadas (véase la columna número 2).

Los resultados de las pruebas de flujo en el testigo, utilizando la suspensión SP-I, se resumen como sigue :

- I - Las muestras del testigo que tienen permeabilidades al agua de 10 md o más, no fueron afectadas por la suspensión SP-I (véanse datos sobre los testigos I y 4). Luego, las suspensiones que contengan partículas inferiores a 3 micrones, no producirán ningún daño medible a los medios porosos en las muestras del testigo que tengan valores de Kw mayores a aproximadamente 10md.

2 - Las muestras del testigo que tenían valores de Kw entre 1 md y 10 md, fueron afectadas hasta cierto punto por la inyección de 10 volúmenes de poros de la suspensión SP-I. Por ejemplo, el testigo número 2 tenía un valor inicial de Kw de 6,2, pero este valor de Kw se redujo a 5,8 md. Ya que la suspensión que contiene partículas inferiores a 3 micrones, ya produce daños medibles a los medios porosos en las muestras del testigo que tienen valores de Kw en la escala de I a 10 md.

3 - Las muestras del testigo que tenían valores de Kw inferiores a I md fueron completamente tapadas por la inyección de la suspensión SP-I, inmediatamente después de comenzar la inyección. Por ejemplo, el testigo número 5 tenía un valor inicial de Kw de 0,3 md, pero el valor de su Kw cayó por debajo de 0,001 md. Un tapamiento similar ocurrió con las muestras del testigo 3,6,8 y 9 que tenían, para empezar, muy bajos valores de Kw.

Por lo esencial, las suspensiones que contienen partículas inferiores a 3 micrones, producen un daño inmediato en las muestras del testigo que tengan permeabilidades al agua inferiores a I md. Se producirán daños de largo plazo, si la permeabilidad es inferior a 5 md.

7.4.4.3.2 - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLUJO CON LA SUSPENSION SP-2

La lista 36 presenta un resumen de los resultados obtenidos en las experimentaciones de flujo de partículas, utilizando la suspensión SP-2. La suspensión de partículas SP-2 contiene partículas cuyo diámetro cambia de 2 a 10 micrones, con un valor medio de unos 3 micrones. Alrededor del 50 % de las partículas tienen 3 micrones o más en la suspensión. Los datos de la lista 36 están presentados de la misma manera que en la lista 35.

Los resultados de las pruebas efectuadas sobre muestras del testigo con la suspensión SP-2 se resumen así :

I - Las muestras del testigo que tienen valores de Kw mayores a 28 md, son afectadas ligeramente por las partículas de la suspensión SP-2. La muestra número IO tenía un valor inicial de Kw de 48 md, y este valor cayó hasta 47,6 md después de la inyección de IO volúmenes de poros de la suspensión SP-2. El grado de reducción del valor inicial de Kw es aquí inferior a 1 %. Para el testigo número I3, se produce una reducción del valor de Kw de un 5,4 % (desde 28 md hasta 26,5 md), después de haber inyectado IO volúmenes de poros de la suspensión SP-2. Luego, la suspensión que contenga partículas en la escala de tamaños de 2 a IO micrones, puede producir daños a los medios porosos de valores de Kw superior a 28 md. Cuanto más bajo esté el Kw inicial de la muestra del testigo, mayor parece ser el daño provocado por suspensiones en la escala de 2 a IO micrones.

2 - Las muestras del testigo que tienen valores de Kw superior a 1 md, pero inferior a 5 md, resultan ampliamente afectadas por las partículas suspendidas en la suspensión SP-2. Por ejemplo, el valor Kw del testigo número II cayó en un 33,3 % (de 3 md a 2 md), después de la inyección de IO volúmenes de poros de la suspensión SP-2. Luego, las suspensiones que contienen partículas en la escala de tamaños de 2 a IO micrones, pueden provocar daños substanciales en los medios porosos de valor inicial de Kw de 5 md o inferior, pero superior a 1 md. Las muestras de testigo que tienen un valor inicial de Kw inferior a 1 md, pueden sufrir daños inmediatos con una suspensión que contenga partículas con tamaños que cambian entre 2 y IO micrones.

7.4.4.3.3 - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLUJO CON LA SUSPENSION SP-3

La lista 37 presenta un resumen de los resultados obtenidos en las experimentaciones de flujo de partículas, utilizando las suspensiones SP-3. La suspensión SP-3 contiene partículas de diámetros a una escala de 10 a 30 micrones, con un valor medio de 19,1 micrones. Alrededor del 50 % de las partículas son de 18,2 micrones o más, en esta suspensión. Los datos están presentados en la lista 37 de la misma manera que en las listas 35 y 36.

Los resultados de las pruebas del testigo con la suspensión SP-3, se resumen como sigue :

- I - Las muestras del testigo que tienen valores de Kw mayores a 8 md, son substancialmente afectadas por las partículas de la suspensión SP-3. Por ejemplo, la permeabilidad de la muestra número 19 cayó en un 33,3 % (desde 30 md hasta 20 md), al inyectar 10 volúmenes de poros de la suspensión SP-3. De manera similar, la permeabilidad del testigo número 22 bajó en un 68,3 % (desde 8,2 md hasta 2,6 md), al inyectar 10 volúmenes de poros de la suspensión SP-3. Luego, las suspensiones que contienen partículas en una escala de tamaños entre 10 y 30 micrones suelen provocar daños substanciales en los medios porosos de valores de Kw superior a 8 md.
- 2 - Las muestras del testigo que tienen valores inferiores a 8 md son completamente destrozadas por suspensiones que contienen partículas en una escala de 10 a 30 micrones.

8.0 - INTERPRETACION DEL TRABAJO DE PRUEBAS DEL TESTIGO

En las secciones siguientes y finales de este informe, daremos la interpretación de los datos experimentales obtenidos durante el presente estudio.

8.1 - LA ROCA DEL ALMACEN , RICA EN ARCILLA , PROVOCA SENSIBILIDAD AL AGUA Y PROBLEMAS OPERACIONALES DE CAMPO

Como se ha mostrado en las secciones precedentes de este informe, resulta bastante evidente que los distintos materiales de la roca examinada sean extremadamente ricos en algunas arcillas. Particularmente, las esméctitas (arcillas inflantes), illitas y cloritas, suelen causar muchos problemas durante la explotación comercial de este recurso geotérmico. Estos problemas están relacionados tanto con los pozos de producción como con los de inyección en el proyecto geotérmico de SSDLR de ADARO.

En este informe, nos dedicamos sólo a los problemas de inyección. De manera básica, se deben esperar dos problemas distintos provocados por el gran contenido en arcilla de dicha roca del almacén :

- I - Partículas finas móviles (es decir migratorias), pueden provocar daños bastante pequeños debidos a los efectos de la velocidad de la salmuera inyectada en la roca del almacén. La salmuera en movimiento puede arrancar algunas de las arcillas de la matriz de la roca y transportarlas al almacén.
- 2 - La salmuera producida contendrá una cantidad considerable de sólidos en suspensión, la mayor parte de ellos siendo partículas de arcilla. Estas partículas pueden tapar los pozos de inyección durante la reinyección futura de rutina de la salmuera enfriada, si dichas partículas no se quitan antes de la reinyección.

El primer conjunto de problemas, es decir, la generación de partículas finas móviles o migratorias, debida a los efectos de la velocidad, no fué examinado en este estudio. Para estudiar estos efectos, se necesitaría un tipo de trabajo sobre testigos bastante diferente a los previsto en este contrato.

De todas maneras, los efectos de las partículas migratorias sobre la inyektividad del pozo deben ser considerados como muy pequeños. Estas partículas migratorias desempeñan un papel mayor en la productividad del pozo (pozos de producción), que en la inyektividad (pozo de inyección). En otras palabras, estas partículas migratorias tienen efectos muy perjudiciales sobre los pozos de producción, pero tienen muy poco efecto en los pozos de inyección.

El segundo conjunto de problemas, es decir, el tapamiento potencial de un pozo de inyección, debido a la inyección de suspensiones de partículas, fué el tema principal del presente estudio. Estos efectos de tapamiento, debidos a partículas inyectadas, podrán producir efectos severos y perjudiciales sobre la inyektividad de cualquier pozo de inyección geotérmico. ADARO tendrá este problema de tapamiento en su pozo de inyección, aunque se tomen precauciones especiales para quitar algunas de las partículas más dañosas de la salmuera enfriada antes de reinyectarla.

Estas suspensiones de partículas están generadas en el campo por el simple movimiento de la salmuera del almacén a través de la roca del almacén. La salmuera producida entrará en contacto con las secciones arcillosas del almacén y se convertirá en una suspensión de partículas. El objetivo principal del presente estudio fué simular este efecto de tapamiento durante las futuras operaciones de campo en el laboratorio. Los datos de este estudio de laboratorio podrán entonces ser utilizados para la concepción del equipo de campo y los procedimientos que evitarán la necesidad de experimentar con el pozo mismo. Cualquier experimentación de campo de este tipo con un mismo pozo, podría conducir a graves y costosos daños en el pozo o en el almacén. El arreglo de este daño podría costar varias veces el precio de este estudio de laboratorio, aunque sea posible al final reataurar la inyektividad de origen del pozo.

Algunas de estas suspensiones de partículas, que han de ser esperadas en el campo, fueron realizadas en el laboratorio y fueron utilizadas para unas pruebas de flujo en el testigo, como se ha descrito antes en este informe.

8.2 - TAPAMIENTO DE LOS POZOS DE ADARO CON PARTICULAS SUSPENDIDAS

Los resultados más importantes de este estudio pueden ser parafraseados como sigue :

- I - Dependiendo de la permeabilidad de origen de la roca, diferentes tamaños de partículas en una suspensión provocan daños de diferentes grados.
- 2 - A priori, no se puede saber qué partículas se han de quitar para mantener la inyectividad del almacén a lo largo de la profundidad del pozo de inyección.
- 3 - Partículas bastante pequeñas (de menos de 2 micrones de diámetro), tendrán un gran efecto, y drástico, sobre la inyectividad en el almacén, donde la matriz de la roca tenga una permeabilidad inferior a 1 milly Darcy aproximadamente.
- 4 - Cuando la matriz de la roca tenga una permeabilidad de entre 1 y 5 milli Darcys aproximadamente, todas las suspensiones examinadas tendrán un efecto perjudicial, pero de largo plazo, sobre la permeabilidad de la roca.
- 5 - Para mantener la inyectividad de todas las secciones de roca que tienen una permeabilidad de aproximadamente 5 md o más, ADARO debe quitar todas las partículas de 2 o más micrones de diámetro, de la salmuera enfriada.
- 6 - Las conclusiones mencionadas más arriba son sólo válidas para los efectos de partículas en la matriz de la roca, es decir, que estas conclusiones están relacionadas sólo con las invasiones de partículas.

La formación de un filtro de "cake" de partículas sobre las superficies arenosas del almacén en el hoyo requiere consideraciones diferentes.

- 7 - Un filtro de "cake" sobre las superficies arenosas suele formarse con partículas que tienen un tamaño máximo tan pequeño como de 3 micrones incluso, a intervalos donde la permeabilidad está en una escala de unos centenares de milliDarcys.

Podemos sacar con seguridad grandes conclusiones basadas en estos resultados resumidos :

- 1 - No será posible económicamente proteger la permeabilidad total de este almacén, quitando todas las partículas que puedan provocar daños en el almacén durante la inyección de salmuera. En lugar de esto, se deberían proteger sólo las porciones del almacén de alta permeabilidad. Se deberían abandonar las zonas del almacén de baja permeabilidad, por razones económicas.
- 2 - Se puede producir algún tapamiento de las zonas de alta permeabilidad en el futuro, a causa de la formación de un filtro de "cake" sobre las superficies arenosas. En vez de quitar todas las partículas de la salmuera enfriada reinyectada, un filtro de "cake" que se forma lentamente podría ser tolerado cierto tiempo. Si la presión de inyección crece hasta un nivel no económico, se deberá quitar este filtro de "cake".

En principio, todo el problema (y su solución) del tapamiento futuro de los pozos de inyección de SSDLR , puede ser expresado como sigue :

Todas las partículas mayores a aproximadamente 2 micrones deberían ser quitadas de la salmuera antes de la reinyección. Con esto, se producirá el tapamiento permanente de todas las porciones del almacén que tienen una permeabilidad de origen de aproximadamente 1 milli Darcy o menos. Se puede que las porciones del almacén que tienen una permeabilidad entre aproximadamente 1 y 5 milli Darcys sean también afectadas por daños de partículas.

8.3 - PUEDE QUE SEA NECESARIA UNA FUTURA ACIDIFICACION DEL HOYO

Si ocurren daños en el filtro de "cake", al taparse las superficies arenosas con grandes partículas, será posible acidificar el pozo. Por el momento, no está claro qué ácido se ha de utilizar para este proceso, ni qué cantidad de ácido será necesaria. Para contestar a estas preguntas, sería necesario realizar algunas pruebas de acidificación con el material del testigo existente. Recomendamos fuertemente realizar estas pruebas de laboratorio, antes de utilizar cualquier ácido en cualquiera de los pozos. Seleccionar un ácido y acidificar un pozo, antes de probar el ácido seleccionado sobre el material del testigo, podría producir graves e irreparables daños en el pozo y en el almacén .

8.4 - SACAR LAS PARTICULAS DE LA SALMUERA ANTES DE REINYECTAR LA SALMUERA ENFRIADA

Como se ha mencionado más arriba en este informe, todas las partículas de tamaño superior a 2 micrones, deberían ser quitadas de la salmuera enfriada antes de la reinyección. Esta eliminación de partículas puede ser realizada utilizando dos métodos diferentes, o con alguna combinación de estos dos diferentes métodos :

1 - Sedimentación

2 - Filtración

La manera más eficaz es la filtración. Por lo tanto, para reducir la carga de filtro y, con ello, los gastos de inversión y de operación, se recomienda fuertemente se disponga de un equipo de descanso antes de la unidad de filtración requerida. Nuestras recomendaciones de base para estos dos diferentes procesos están descritos más abajo. El problema más difícil en ambos procedimientos está provocado por la necesidad de evitar la contaminación de la salmuera por el aire.

8.4.1 - SACAR LAS PARTICULAS POR SEDIMENTACION

El tamaño y la geometría de cualquier equipo de sedimentación depende de tres variables principales :

- I - El tamaño mínimo de las partículas que han de ser quitadas.
- 2 - La velocidad terminal de caída de estas partículas de tamaño mínimo.
- 3 - El caudal másico total de la suspensión entera de partículas.

Un depósito de descanso de una altura de 2 metros y una anchura de 2 metros, sería perfectamente conveniente para quitar todas las partículas de un diámetro mayor a aproximadamente 13 micrones, suponiendo que :

- I - La longitud de este depósito de descanso sea suficientemente grande como para proporcionar un tiempo de residencia de una hora por lo menos.
- 2 - La salida de la salmuera no sea más baja de 50 cm bajo el nivel de la salmuera en este depósito de descanso.

Estas recomendaciones están basadas en las velocidades de sedimentación de las partículas, como se ha determinado en este estudio. Se podrían hacer consideraciones similares para diferentes tamaños de partículas, utilizando los datos de partículas dados en este informe.

8.4.2 - SACAR LAS PARTICULAS POR FILTRACION

El sistema de filtración necesario para el levantamiento final de las partículas, como se ha determinado en el conjunto de especificaciones, debe ser concebido siguiendo los criterios siguientes :

- I - El caudal másico total a través del sistema de filtración.

2 - El costo de la inversión para el sistema de filtración.

3 - El costo de utilización del sistema de filtración.

Se puede que las consideraciones de costo sean el factor determinante para la adquisición de cualquier sistema de filtración, en una operación geotérmica de baja entalpía como el proyecto de ADARO en SSDLR. No sería económicamente conveniente ningún sistema de filtración sofisticado, el cual (a) debería ser importante, (b) necesitaría operaciones complejas y una mantención costosa, y (c) necesitaría cantidades excesivas de electricidad o de carburantes para su funcionamiento.

Estas consideraciones limitan automáticamente el tipo de sistema de filtración a un filtro de flujo de gravedad de capa de arena.

Tal filtro puede ser fácilmente concebido y construido por el trabajo local en la región madrileña. No necesitaría ningún material importado o tecnología compleja. Se sugiere fuertemente utilizar un "filtro de capa de arena inversado". Esto significa que el líquido "sucio" entra en el filtro por arriba, y que el líquido "limpio" sale por debajo. El medio está constituido de tres materiales diferentes :

1 - Antracita, de tamaño de grano bastante grande en la cumbre.

2 - Arena de tamaño de grano medio en la parte media.

3 - Granate de tamaño de grano pequeño en la base.

Estos tres medios de filtro podrían ser colocados sobre una capa de guijo.

Tenemos una excelente experiencia con este tipo de "filtros de capa de arena inversados", incluso para proyectos geotérmicos de alta entalpía, en donde las necesidades de filtración son mucho más importantes y mucho más estrictas que en las operaciones geotérmicas de baja entalpía. ADARO no debería tener problemas para concebir y construir tal filtro en la región madrileña.

Además, ADARO no debería tener problemas técnicos o económicos para hacer funcionar tal sistema de filtración en su proyecto de SSDLR.

9 - REFERENCIAS

1. Vetter, O.J., and Crichlow, H.B., "Injection, Injectivity and Injectability in Geothermal Operations: Problems and Possible Solutions", DOE/DGE (United States Department of Energy/Division of Geothermal Energy), Report under Contract No. ET-79-CO3-2044, February 1979.
2. Vetter, O.J., Kandarpa, V., and Harouaka, A., "Flow of Particle Suspensions Through Porous Media", DOE/DGE Report under Contract No. DE-ACO3-79ET27146, June 1982.
3. Vetter, O.J., and Kandarpa, V., "Chemical Damage Due to Drilling Operations", DOE/DGE Report under Contract No. DE-ACO3-79ET27146, July 1982.
4. Donaldson, E.C., et al., "Particle Transport in Sandstones", SPE 6905, presented at the 52nd Annual Fall Meeting of the SPE, Denver, Colorado, October 9-12, 1977.
5. Davidson, D.H., "Invasion and Impairment of Formations by Particulates", SPE 8210, presented at the 54th Annual Fall Meeting of the SPE, Las Vegas, Nevada, September 23-26, 1979.
6. Gruesbeck, C., and Collins, R.E., "Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media", SPE 8430, presented at the 54th Annual Fall Meeting of the SPE, Las Vegas, Nevada, September 23-26, 1979.
7. Muecke, T.W., "Formation Fines and Factors Controlling Their Movement in Porous Media", Journal of Petroleum Technology, pp.144-150, February 1979.
8. Abrams, A., "Mud Design to Minimize Rock Impairment Due to Particle Invasion", Journal of Petroleum Technology, pp.586-592, May 1977.
9. McCune, C.C., "On-Site Testing to Define Injection-Water Quality Requirements", Journal of Petroleum Technology, pp.17-24, January 1977.
10. Jordan, C.A., et al., "The Bay Marchand Pressure

Maintenance Project-Unique Challenges of an Offshore Sea Water Injection System", Journal of Petroleum Technology, pp.389-396, April 1969.

11. Todd, A.C., et al., "Review of Permeability Damage Studies and Related North Sea Water Injection", SPE 7883, prepared for SPE International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry, Houston, Texas, January 22-24, 1979.
12. Barkman, J.H., and Davidson, D.H., "Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment", Journal of Petroleum Technology, pp.865-873, July 1972.
13. Vetter, O.J., and Kandarpa, V., "Particle Characterization for Geothermal Operations", DOE/DGE Report under Contract No. DE-AC03-79ET17246, January 1981.
14. Kandarpa, V., and Sparrow, J.T., "A Useful Technique to Study Particle Invasion in Porous Media by Backscattered Electron Imaging", SPE 10134, presented at the 56th Annual Fall Meeting of the SPE, San Antonio, Texas, October 5-7, 1981.
15. Vetter, O.J., Kandarpa, V., Nelson, R., and Miller, R., "Particle Characterization for Geothermal Operations - Part 2: Field Experience", DOE/DGE Report under Contract No. DE-AC03-79ET27146, September 1981.
16. Vetter, O.J., Kandarpa, V., Nelson, R., and Miller, R., "Evaluation of Geothermal Brine Treatment Facility through Particle Characterization", Geothermal Resources Council, Transactions, Vol. 5, pp.245-248, October 1981.
17. Bohlemann, E.G., Menner, R.E., and Berlinski, P., "The Kinetics of Silica Deposition from Simulated Geothermal Brines", SPE Paper No. 7889, prepared for the International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry, Houston, Texas, January 22

TABLAS 1 HASTA 37
FIGURAS 1 HASTA 17

LITOLOGIA DEL POZO SAN SEBASTIAN DE LOS REYES
(INFORME ADARO SOBRE POZO SSDLR N° 1)

<u>DEPTH (m)</u>	<u>DESCRIPTION</u>
0-30	Coarse sand and gravel (sizes between 0.2 and 10 mm diameter).
30-65	Abundant beige colored clay with some intercalcations of siliceous sands (medium to fine sizes).
65-120	Silicious material of medium grain size (between 0.3 and 3 mm diameter) with maroon-reddish clays.
120-180	Formation similar to the one above (65-120m) with an increase in the percentage of clays.
180-190	Region of gravel and coarse sand (size between 0.2 and 10mm diameter).
190-210	Maroon colored clays with interbedded layers of sand.
210-400	Layers consisting of gravel and sand (medium to coarse) with some intercalcations of reddish clays.
400-490	Alternation of of gravel and sand layers.
490-515	Medium sized sands with intercalcations of silty clays.
515-550	Alternations of silicious sands (white-milky), and layers of clay (translucent and reddish).
550-600	Dark gray clays (very plastic) with intercalcations of sands with an abundance of mica (approximate diameter 0.1mm) cemented with calcarious dolomite.
600-655	Alternations sized medium grains of siliceous sands, (white-milky) and layers of clay/mica (translucent and reddish with gray clays).
655-790	Calcarious Dolomite (beige), dark maroon colored clays and siliceous sands (medium sized grains).
790-895	Alternations of sands similar to the ones above together with grayish clays.

- 895-940 Siliceous sands, gray-green compact clays, (between 913 and 916m), layers of sandstone with calcareous cement. At 935m beige colored limestone dolomite.
- 940-985 Siliceous sands of medium sized grains with some passes of gray clay.
- 985-1144 Formation similar to the one above, but with drastic reduction in sands.
- 1144-1165 Rose and green colored clays with some intercalations of sands. Traces of anhydrite.
- 1165-1249 Siliceous sands of medium sized grains, alternating with very silty clays.
- 1249-1370 Beginning of the appearance of traces of anhydrites between dark gray clays, maroon colored clays and siliceous sands of medium sized grain.
- 1370-1537 Maroon-red colored clays, gray-green clays and some nuclei of fine sandstone. At 1507m, clays are compact and black. At 1531m appears a level of anhydrite. Between 1524.5 and 1524.89m, a very cemented sandstone with dark gray colored silica and an abundance of mica.
- 1537-1786 The formation is much more detrital, composed of sands and sandstones of medium grains, alternating with gray-green compacted clays and pieces of white clays.
- 1786-2130 Lithology continues similarly with an abundance of detritals composed of medium grains of sandstone and some clays gray-green sands.

DESCRIPCION LITOLOGICA DEL POZO DE SAN SEBASTIAN DE LOS
REYES (INFORME ADARO SOBRE POZO SSDLR N° 1)

<u>DEPTH</u>	<u>DESCRIPTION</u>
1821.4-1821.58	Siliceous (gray-green) sandstone with an abundance of mica.
1821.58-1822.47	Fine siliceous material (gray-green), cemented silicate with an abundance of mica.
1822.47-1822.83	Sandstone (gray with some fine green strata).
1822.83-1823.05	Sandstone, clear gray with medium grains and cemented siliceous material.
1823.05-1823.45	Same as before, but of green color.
1823.45-1823.94	Dark green cemented siliceous material (encrusted with white silica of 0.2mm diameter). Traces of mica.
1823.94-1825.14	Grayish sandstone (grain size approximately 1mm). White and translucent grains. Much less cemented.
1825.14-1827.53	Very little cemented silicates (gray color), white and translucent grains of approximately 1 mm diameter.
1827.53-1828.68	Grayish green sandstone, very little cemented, medium size grains.
1828.68-1829.78	Sands of a lithology similar to the one described before, but much more cemented.
1829.78-1831.34	Dark gray-green sandstone cemented with a type of silt and white siliceous grains of medium size.
1831.34-1831.50	Similar to the one above, less dark and with siliceous grains of approximately 0.8 mm diameter.
1831.50-1832	Gray-green sandstone cemented with silt and and siliceous materials.
1832-1832.62	Gray-green sands (sizes between 0.5 and 4mm).

TABLA 2

1832.62-1833.32	Conglomerated with grains (gray-clear) of sizes up to 6 mm in diameter.
1833.32-1834.30	Gray sands cemented with medium grains of diameter approximately equal to 1 mm.
1834.30-1836.58	Very fine sandstone, gray to greenish type of silt.
1836.58-1838.24	Gray-green sandstone of medium sized siliceous grains.
1838.24-1838.7	Very silty sandstone of very dark gray-green.

TABLA 3

DAIGRAFIAS EN EL POZO SSDLR N° 1

<u>DATE</u>	<u>INTERVAL</u>	<u>LOGGING METHOD</u>
23 MARCH 1982	15 - 422 m	DUAL INDUCTION GUARD LOG
23 MARCH 1982	15 - 422 m	PRECISION TEMPERATURE LOG
22 APRIL 1982	60 -1482 m	PRECISION TEMPERATURE LOG
22 APRIL 1982	421 -1480,5 m	DUAL INDUCTION GUARD LOG
22 APRIL 1982	421 -1481,2 m	COMPENS. DENSITY NEUTRON LOG
22 APRIL 1982	420 -1480,5 m	CONTACT CALIPER LOG
22 APRIL 1982	60 -1480,5 m	PRECISION TEMPERATURE LOG

TABLA 4

SALINIDADES Y TEMPERATURAS CALCULADAS
DEL AGUA DE FORMACION A DIFERENTES PROFUNDIDADES
(INFORME ADARO SOBRE POZO SSDLR N°1)

<u>DEPTH</u> (m)	<u>TEMP.</u> (°F)	<u>SALINITY</u> (ppm)
1550-1665	154	4000
1665-1750	157	4500
1750-1800	159	7500
1800-1835	161	9000
1835-1880	163	12000
1880-1930	166	13500
1965-2050	174	28000
2050-2130	186	30000

INFORMACION DE BASE SOBRE EL POZO SSDLR N° 1

Porosity = 15%
 NaCl = 3.2 % (WT.)
 Temperature at 1600m = 172°F (= 78°C)
 Pressure at 1600m = 2144 psi
 Transmissivity, kh = 35322 md m
 h = 79m
 k = 447 md
 Skin factor, s = 8.6
 Density of formation water = 1.02 g/l
 Water column = 1485m
 Static column = 115
 Radius of investigation = 8326m

TABLA 6

DISTRIBUCION DE PARTICULAS INYECTADAS EN TESTIGOS DE
 ARENISCAS LOCHALINE (11)

INITIAL PERMEABILITY Ki (MD)	PARTICLE SIZE CLASSIF. (Microns)	PERMEABILITY AFTER 6000 INJECTED PORE VOLUMES (%Ki)	PERCENTAGE OF SOLIDS INJECTED[9]		
			IN FILTER CAKE	DEPOSITED IN CORE	PASSED THROUGH CORE
982	0-2	72	7	74	19
984	2-3	23	20	65	16
874	3-4	7	73	13	14
927	5-8	7	74	12	14

VR Code: 26668
 Dates analyzed:
 19-DEC-83 to 22-DEC-83

ANALISIS DE AGUA DEL POZO SSDLR N° 1

constituent **	ppm	meq/l	method
-----	---	-----	-----
Sodium (Na+)	5740	250.	icp
Potassium (K+)	104.	3.	icp
Lithium (Li+)	<0.01	-	icp
Calcium (Ca++)	207.	10.3	icp
Magnesium (Mg++)	720.	59.2	icp
Barium (Ba++)	0.4	0.006	icp
Strontium (Sr++)	4.2	0.09	icp
Aluminum (Al+++)	0.3	-	icp
Silver (Ag+)	<0.03	-	icp
Arsenic (As+++)	<1.	-	icp
Chromium (Cr+++)	0.36	0.0207	icp
Copper (Cu++)	0.22	0.007	icp
Iron (Fe++)	7.10	0.25	icp
Mercury (Hg++)	<0.3	-	icp
Lead (Pb++)	1.0	0.0101	icp
Antimony (Sb+++)	<4.	-	icp
Tin (Sn++)	<1.	-	icp
Titanium (Ti++++)	0.11	-	icp
Zinc (Zn++)	0.380	0.0116	icp

VR Code: 26668

Boron (B) ***	9.20	2.55	icp
Phosphate (PO4---)	<1.	-	icp
Chloride (Cl-)	8610	243.	titr
Sulfate (SO4--)	4000	83.3	turb
Bicarbonate (HCO3-)	<1.	-	titr
Carbonate (CO3--)	<1.	-	titr
Silica (SiO2)	17.	-	icp

meq/l= milliequivalents per liter

ppm and milligrams per liter used interchangeably

icp= inductively coupled plasma emission; titr= titration

turb= turbidimetric

*** boron is given as ppm elemental boron, but for the purposes of TDS and ion balance, boron is converted to BO3---

VR Code: 26669
 Dates analyzed:
 19-DEC-83 to 22-DEC-83

ANALISIS DE AGUA DEL POZO SSDLR N° 1

constituent **	ppm	meq/l	method
-----	---	-----	-----
Sodium (Na+)	11500	500.	icp
Potassium (K+)	206.	5.3	icp
Lithium (Li+)	<0.01	-	icp
Calcium (Ca++)	408.	20.4	icp
Magnesium (Mg++)	1350	111.	icp
Barium (Ba++)	0.95	0.01	icp
Strontium (Sr++)	8.2	0.2	icp
Aluminum (Al+++)	1.6	-	icp
Silver (Ag+)	<0.03	-	icp
Arsenic (As+++)	<1.	-	icp
Chromium (Cr+++)	0.41	0.0235	icp
Copper (Cu++)	0.34	0.01	icp
Iron (Fe++)	13.0	0.47	icp
Mercury (Hg++)	<0.3	-	icp
Lead (Pb++)	0.7	0.00651	icp
Antimony (Sb+++)	<4.	-	icp
Tin (Sn++)	<1.	-	icp
Titanium (Ti++++)	0.19	-	icp
Zinc (Zn++)	<0.07	-	icp

VR Code: 26669

Boron (B) ***	18.1	5.02	icp
Phosphate (PO4---)	<1.	-	icp
Chloride (Cl-)	19100	539.	titr
Sulfate (SO4--)	7550	157.	turb
Bicarbonate (HCO3-)	<1.	-	titr
Carbonate (CO3--)	<1.	-	titr
Silica (SiO2)	57.	-	icp

meq/l= milliequivalents per liter

ppm and milligrams per liter used interchangeably

icp= inductively coupled plasma emission; titr= titration

turb= turbidimetric

*** boron is given as ppm elemental boron, but for the purposes of TDS and ion balance, boron is converted to BO3---

VR Code: 26670
 Dates analyzed:
 19-DEC-83 to 22-DEC-83

ANALISIS DE AGUA DEL POZO SSDLR N° 1

constituent **	ppm	meq/l	method
Sodium (Na+)	11600	505.	icp
Potassium (K+)	206.	5.3	icp
Lithium (Li+)	<0.01	-	icp
Calcium (Ca++)	415.	20.7	icp
Magnesium (Mg++)	1350	111.	icp
Barium (Ba++)	0.93	0.01	icp
Strontium (Sr++)	9.4	0.2	icp
Aluminum (Al+++)	1.8	-	icp
Silver (Ag+)	<0.03	-	icp
Arsenic (As+++)	<1.	-	icp
Chromium (Cr+++)	0.47	0.0271	icp
Copper (Cu++)	0.38	0.01	icp
Iron (Fe++)	12.3	0.44	icp
Mercury (Hg++)	<0.3	-	icp
Lead (Pb++)	1.8	0.0177	icp
Antimony (Sb+++)	<4.	-	icp
Tin (Sn++)	<1.	-	icp
Titanium (Ti++++)	0.13	-	icp
Zinc (Zn++)	0.538	0.0165	icp

VR Code: 26670

Boron (B) ***	18.5	5.15	icp
Phosphate (PO4---)	<1.	-	icp
Chloride (Cl-)	17100	482.	titr
Sulfate (SO4--)	7550	157.	turb
Bicarbonate (HCO3-)	<1.	-	titr
Carbonate (CO3--)	<1.	-	titr
Silica (SiO2)	59.	-	icp

meq/l= milliequivalents per liter

ppm and milligrams per liter used interchangeably

icp= inductively coupled plasma emission; titr= titration

turb= turbidimetric

*** boron is given as ppm elemental boron, but for the purposes of TDS and ion balance, boron is converted to B03---

PR Code:

26671

Dates analyzed:

19-DEC-83 to 22-DEC-83

ANALISIS DE AGUA DEL POZO SSDLR N° 1

constituent **	ppm	meq/l	method
-----	---	-----	-----
Sodium (Na+)	12200	531.	icp
Potassium (K+)	231.	5.9	icp
Lithium (Li+)	<0.01	-	icp
Calcium (Ca++)	427.	21.3	icp
Magnesium (Mg++)	1450	119.	icp
Barium (Ba++)	2.4	0.03	icp
Strontium (Sr++)	11.	0.3	icp
Aluminum (Al+++)	3.0	-	icp
Silver (Ag+)	<0.03	-	icp
Arsenic (As+++)	<1.	-	icp
Chromium (Cr+++)	0.72	0.0418	icp
Copper (Cu++)	0.86	0.03	icp
Iron (Fe++)	13.4	0.48	icp
Mercury (Hg++)	<0.3	-	icp
Lead (Pb++)	2.9	0.0280	icp
Antimony (Sb+++)	<4.	-	icp
Tin (Sn++)	<1.	-	icp
Titanium (Ti++++)	0.23	-	icp
Zinc (Zn++)	0.427	0.0131	icp

VR Code: 26671

Boron (B) ***	18.2	5.05	icp
Phosphate (PO4---)	<1.	-	icp
Chloride (Cl-)	20500	578.	titr
Sulfate (SO4--)	7450	155.	turb
Bicarbonate (HCO3-)	<1.	-	titr
Carbonate (CO3--)	<1.	-	titr
Silica (SiO2)	64.	-	icp

meq/l= milliequivalents per liter

ppm and milligrams per liter used interchangeably

icp= inductively coupled plasma emission; titr= titration

turb= turbidimetric

*** boron is given as ppm elemental boron, but for the purposes of TDS and ion balance, boron is converted to BO3---

VR Code: 26672
 Dates analyzed:
 19-DEC-83 to 22-DEC-83

ANALISIS DE AGUA DEL POZO SSDLR N° 1

constituent **	ppm	meq/l	method
Sodium (Na+)	12200	531.	icp
Potassium (K+)	225.	5.8	icp
Lithium (Li+)	<0.01	-	icp
Calcium (Ca++)	417.	20.8	icp
Magnesium (Mg++)	1450	119.	icp
Barium (Ba++)	2.5	0.04	icp
Strontium (Sr++)	12.	0.3	icp
Aluminum (Al+++)	2.7	-	icp
Silver (Ag+)	<0.03	-	icp
Arsenic (As+++)	<1.	-	icp
Chromium (Cr+++)	0.73	0.0422	icp
Copper (Cu++)	0.71	0.02	icp
Iron (Fe++)	10.9	0.39	icp
Mercury (Hg++)	<0.3	-	icp
Lead (Pb++)	3.0	0.0285	icp
Antimony (Sb+++)	<4.	-	icp
Tin (Sn++)	<1.	-	icp
Titanium (Ti++++)	0.21	-	icp
Zinc (Zn++)	0.427	0.0131	icp

VR Code: 26672

Boron (B) ***	18.3	5.09	icp
Phosphate (PO4---)	<1.	-	icp
Chloride (Cl-)	17900	505.	titr
Sulfate (SO4--)	7800	162.	turb
Bicarbonate (HCO3-)	<1.	-	titr
Carbonate (CO3--)	<1.	-	titr
Silica (SiO2)	61.	-	icp

meq/l= milliequivalents per liter

ppm and milligrams per liter used interchangeably

icp= inductively coupled plasma emission; titr= titration

turb= turbidimetric

*** boron is given as ppm elemental boron, but for the purposes of TDS and ion balance, boron is converted to BO3---

COMPOSICION DE LA SALMUERA UTILIZADA EN LOS ENSAYOS
SOBRE TESTIGOS EN EL LABORATORIO

<u>CONSTITUENT</u>	<u>CONCENTRATION (mg/l)</u>
Na+	11600
K+	206
Ca++	415
Mg++	1350
Cl-	17100
SO4--	7550

TROZOS DE TESTIGO DE SSDLR N° 1 DISPONIBLES

BOX NO.	DEPTH INTERVAL (m)	LENGTHS OF INDIVIDUAL CORE PIECES (cm)	COMMENTS
12	1821.40-1822.78	29.5;11;9;8;5;10;3;5;12;2;4	Unconsolidated sand and clays at 1821.9-1822.0 m
3	1822.78-1824.25	47;21;5;5;31;15	Unconsolidated sand and clay at about 1823.5 m
10	1824.25-1825.77	41;48;32;19	Unconsolidated sand, clay and rocks between 1825.65 and 1825.77 m
4	1825.77-1827.17	32;36;15.5;26;18;13	Consolidated material
5	1827.17-1828.70	34;23;16;23;24.5;18	Core from 1827.49 m is broken
9	1828.70-1830.20	17;26;30;7;18	Unconsolidated sand and clay at 1829.10 m. Core below is badly broken
6	1830.20-1831.70	20;20;23;13;7	Between 1830.2 and 1830.47, and at 1830.70 m unconsolidated sand and clay
7	1831.70-1833.05	25;12;22;16;27;17;11;10	Between each of the core pieces, there is unconsolidated sand and clay; core at 1832.95m was split
1	1833.05-1834.55	29;14;77	Between 1834.27 and 1834.55 m large amounts of shale
2	1834.55-1835.80	15;57	Between 1835.27 and 1835.80 m, broken pieces of core and some unconsolidated sand

TABLA 13a

11	1835.80-1837.20	39;12;65	Between 1836.31 and 1836.55, unconsolidated sand and clay
8	1837.20-1838.70	15;27;41;20;47	Consolidated material

TABLA 14

DATOS SOBRE LOS CILINDROS SACADOS DE LOS TESTIGOS
DEL POZO SSDLR N° 1

DEPTH METERS	POROSITY %	AIR PERMEABILITY MD.	APPARENT GRAIN DENSITY (gm/cc)
1821.45	2.8	0.08	2.69
1821.76	(1)	(1)	(1)
1822.02	(2)	(2)	(2)
1822.45	(1)	(1)	(1)
1822.73	3.6	0.05	2.71
1822.96	1.7	0.10	2.70
1823.21	9.3	0.26	2.68
1823.43	2.6	0.25	2.71
1823.87	(1)	(1)	(1)
1824.12	3.4	0.02	2.81
1824.43	6.4	0.34	2.70
1824.70	12.1	8.7	2.64
1824.96	7.2	0.25	2.73
1825.30	13.2	2.8	2.63
1825.56	12.1	18.0	2.64
1825.86	9.7	18.0	2.65
1826.14	6.3	9.3	2.67
1826.40	12.1	31.0	2.65
1826.71	12.3	39.0	2.65
1826.97	8.2	124.0	2.67
1827.27	14.2	59.0	2.64
1827.58	(1)	(1)	(1)
1827.96	18.2	260.0	2.63
1828.29	19.3	316.0	2.64
1828.60	3.2	3.8	2.69
1828.75	19.6	1.9	2.71
1829.04	11.1	0.19	2.75
1829.35	11.8	0.60	2.67
1829.76	(1)	(1)	(1)
1830.72	(1)	(1)	(1)
1831.08	(1)	(1)	(1)
1831.38	10.7	2.3	2.67
1831.80	(1)	(1)	(1)
1832.12	4.5	1.0	2.67

DEPTH METERS	POROSITY %	AIR PERMEABILITY MD.	APPARENT GRAIN DENSITY (gm/cc)
1832.47	(1)	(1)	(1)
1832.77	2.3	170.0	2.68
1833.10	5.7	4.0	2.68
1833.46	17.7	206.0	2.67
1833.72	2.0	3.3	2.70
1834.04	1.8	1.8	2.69
1834.60	4.2	0.25	2.82
1834.88	3.7	0.04	2.83
1835.18	5.9	0.09	2.76
1835.75	(1)	(1)	(1)
1835.84	(1)	(1)	(1)
1836.10	7.2	0.07	2.72
1836.62	13.9	0.76	2.64
1836.92	12.3	0.88	2.64
1837.13	8.4	2.0	2.65
1837.32	8.1	23.0	2.65
1837.62	8.8	4.8	2.66
1837.92	16.7	15.0	2.65
1838.18	2.0	1.1	2.70
1838.48	0.9	0.01	2.96

(1) Fell apart on contact with water
(2) Fell apart while coring

TABLA 15

MINERALES MAS IMPORTANTES EN LOS TESTIGOS
(SSDLR N° 1)

1. Quartz
2. Feldspar
3. Illite & Mica
4. Anhydrite
5. Kaolinite
6. Smectite
7. Chlorite
8. Magnesite

ANALISIS CON TAMICES (FRACCION ARENOSA)

DATE: 8/3/83

WELL: SAN SEBASTIAN DE LOS REYES #1
 SAMPLE ID: 1827.96 meters

Screen Scale Opening (in.)	U.S. No.	Sample Wt. (grams)	Percent	Cumulative Percent
0.131	6	0.000	0.00	0.00
0.093	8	0.101	0.65	0.65
0.065	12	0.079	0.51	1.16
0.046	16	0.340	2.20	3.36
0.0328	20	0.661	4.28	7.64
0.0232	30	1.026	6.64	14.28
0.0164	40	2.199	14.24	28.52
0.0116	50	3.665	23.73	52.25
0.0082	70	3.081	19.95	72.20
0.0058	100	2.393	15.49	87.69
0.0041	140	1.032	6.68	94.37
0.0029	200	0.542	3.51	97.88
0.0021	270	0.287	1.86	99.74
0.0015	400	0.035	0.23	99.97
	PAN	0.005	0.03	100.00
	TOTALS:	15.446	100.00	

Weight % of Total Sample

Sand Fraction	90.00
Silt Fraction	4.61
Clay Fraction	5.26
Total Recovery	99.87

ANALISIS CON TAMICES (FRACCION ARENOSA)

DATE: 8/3/83

WELL: SAN SEBASTIAN DE LOS REYES #1
 SAMPLE ID: 1835.75 meters

Screen Scale Opening (in.)	U.S. No.	Sample Wt. (grams)	Percent	Cumulative Percent
0.131	6	0.066	0.40	0.40
0.093	8	0.021	0.13	0.53
0.065	12	0.095	0.58	1.11
0.046	16	0.562	3.43	4.54
0.0328	20	1.396	8.52	13.06
0.0232	30	2.440	14.88	27.94
0.0164	40	3.366	20.53	48.47
0.0116	50	3.277	19.99	68.46
0.0082	70	2.102	12.82	81.28
0.0058	100	1.389	8.47	89.75
0.0041	140	0.708	4.32	94.07
0.0029	200	0.492	3.00	97.07
0.0021	270	0.406	2.48	99.55
0.0015	400	0.065	0.40	99.95
	PAN	0.008	0.05	100.00
	TOTALS:	16.393	100.00	

Weight % of Total Sample

Sand Fraction	78.70
Silt Fraction	16.60
Clay Fraction	4.41
Total Recovery	99.71

ANALISIS CON TAMICES (FRACCION ARENOSA)

DATE: 8/3/83

WELL: SAN SEBASTIAN DE LOS REYES #1
 SAMPLE ID: 1837.13 meters

Screen Scale Opening (in.)	U.S. No.	Sample Wt. (grams)	Percent	Cumulative Percent
0.131	6	0.000	0.00	0.00
0.093	8	0.111	0.83	0.83
0.065	12	0.355	2.66	3.49
0.046	16	0.872	6.52	10.01
0.0328	20	1.370	10.25	20.26
0.0232	30	1.420	10.62	30.88
0.0164	40	1.737	12.99	43.87
0.0116	50	2.114	15.81	59.68
0.0082	70	1.988	14.87	74.55
0.0058	100	1.589	11.89	86.44
0.0041	140	0.797	5.96	92.40
0.0029	200	0.567	4.24	96.64
0.0021	270	0.398	2.98	99.62
0.0015	400	0.051	0.38	100.00
	PAN	0.000	0.00	100.00
	TOTALS:	13.369	100.00	

Weight % of Total Sample

Sand Fraction	86.00
Silt Fraction	11.20
Clay Fraction	2.38
Total Recovery	99.58

ANALISIS CON TAMICES (FRACCION ARENOSA)

DATE: 8/3/83

WELL: SAN SEBASTIAN DE LOS REYES #1
 SAMPLE ID: 1837.32 meters

Screen Scale Opening (in.)	U.S. No.	Sample Wt. (grams)	Percent	Cumulative Percent
0.131	6	0.076	0.49	0.49
0.093	8	0.579	3.73	4.22
0.065	12	0.909	5.85	10.07
0.046	16	2.042	13.14	23.21
0.0328	20	2.163	13.92	37.13
0.0232	30	1.819	11.71	48.84
0.0164	40	1.900	12.23	61.07
0.0116	50	1.746	11.24	72.31
0.0082	70	1.428	9.19	81.50
0.0058	100	1.402	9.02	90.52
0.0041	140	0.727	4.68	95.20
0.0029	200	0.449	2.89	98.09
0.0021	270	0.257	1.65	99.74
0.0015	400	0.033	0.21	99.95
	PAN	0.007	0.05	100.00
	TOTALS:	15.537	100.00	

Weight % of Total Sample

Sand Fraction	88.20
Silt Fraction	5.86
Clay Fraction	5.50
Total Recovery	99.56

ANALISIS CON TAMICES (FRACCION ARENOSA)

DATE: 8/3/83

WELL: SAN SEBASTIAN DE LOS REYES #1
 SAMPLE ID: 1837.92 meters

Screen Scale Opening (in.)	U.S. No.	Sample Wt. (grams)	Percent	Cumulative Percent
0.131	6	0.000	0.00	0.00
0.093	8	0.000	0.00	0.00
0.065	12	0.013	0.11	0.11
0.046	16	0.037	0.32	0.43
0.0328	20	0.074	0.63	1.06
0.0232	30	0.186	1.59	2.65
0.0164	40	0.341	2.91	5.56
0.0116	50	0.508	4.33	9.89
0.0082	70	0.629	5.36	15.25
0.0058	100	2.191	18.68	33.93
0.0041	140	3.379	28.82	62.75
0.0029	200	2.623	22.37	85.12
0.0021	270	1.402	11.96	97.08
0.0015	400	0.263	2.24	99.32
	PAN	0.080	0.68	100.00
	TOTALS:	11.726	100.00	

Weight % of Total Sample

Sand Fraction	77.30
Silt Fraction	15.60
Clay Fraction	6.92
Total Recovery	99.82

TABLE 21
ANALISIS POR DIFRACCION DE RAYOS X

(SSDLR NO.1: MEASURED DATA IN WEIGHT PERCENT)

Depth (Meter)	Smectite	Illite (& Mica)	Kaolinite	Quartz	Feldspar	Anhydrite	Chlorite	Magnesite
A. CLAY FRACTION								
1827.96	2.16	53.94	6.47	2.91	7.80	22.00	2.81	1.91
1835.75	6.01	77.41	9.56	1.24	ND	ND	4.56	1.22
1837.13	2.75	66.12	5.51	14.18	5.01	5.00	ND	1.43
1837.32	2.34	62.86	10.28	3.27	2.34	11.68	7.23	ND
1837.92	2.64	42.82	7.72	25.00	10.50	2.10	3.52	5.69
B. SILT FRACTION								
1827.96	0.95	43.29	6.05	11.35	17.14	12.29	6.50	2.43
1835.75	2.91	55.38	4.41	7.62	14.88	ND	8.57	6.23
1837.13	1.26	25.19	2.52	17.89	16.37	35.26	ND	1.51
1837.32	0.08	20.64	2.81	27.23	15.86	30.87	2.51	ND
1837.92	1.00	27.08	4.21	12.04	18.05	36.32	1.00	ND
C. SAND FRACTION								
1827.96	ND	ND	ND	73.20	25.23	ND	ND	1.57
1835.75	ND	7.61	ND	40.47	38.48	7.61	3.41	2.42
1837.13	ND	ND	ND	61.57	26.64	11.79	ND	ND
1837.32	ND	0.97	ND	40.55	37.62	16.45	4.41	ND
1837.92	ND	4.90	ND	48.01	31.82	11.15	2.56	1.56

ND= NOT DETECTED

TABLE 22
ANALISIS POR DIFRACCION DE RAYOS X - COMPOSICION MINERALOGICA

(SSDLR NO.1: CALCULATED DATA IN WEIGHT PERCENT)

Depth (Meter)	Smectite	Illite (& Mica)	Kaolinite	Quartz	Feldspar	Anhydrite	Chlorite	Magnesite
1827.96	0.17	4.85	0.62	66.58	23.92	1.73	0.49	1.64
1835.75	0.76	18.73	1.17	33.23	32.82	6.03	4.23	3.03
1837.13	0.29	4.59	0.19	55.58	25.01	14.29	ND	0.04
1837.32	0.18	5.59	0.79	37.68	34.29	16.99	4.48	ND
1837.92	0.16	14.37	1.10	39.80	27.20	13.48	2.28	1.61

ND= NOT DETECTED

TABLA 22

TABLA 21

PERMEABILIDADES AL AGUA DE TROZOS DE TESTIGOS
SELECCIONADOS (SSDLR N° 1)

CORE NO.	Ka (md)	Kw (md)	Kw/Ka
1	316.0	64.0	0.2025
2	18.0	3.5	0.1944
3	2.0	0.001	0.0005
4	170.0	35.0	0.2059
5	8.7	0.31	0.0356
6	1.1	0.001	0.0009
7	39.0	6.2	0.1590
8	3.8	0.003	0.0008
9	0.76	0.001	0.0013
10	260.0	48.0	0.1846
11	15.0	2.0	0.1333
12	1.9	0.001	0.0005
13	124.0	28.0	0.2258
14	4.8	0.012	0.0025
15	1.0	0.001	0.001
16	31.0	5.0	0.1613
17	3.3	0.004	0.0012
18	0.6	<0.001	0.0017
19	260.0	30.0	0.1154
20	9.3	0.27	0.0290
21	1.8	<0.001	<0.00056
22	59.0	8.2	0.1390
23	4.0	0.012	0.0030
24	0.88	<0.001	<0.0011
25	23.0	4.0	0.1739
26	2.8	0.001	0.00036
27	0.34	<0.001	0.0029

PERMEABILIDADES AL AGUA DE TROZOS DE TESTIGO CON BAJA
PERMEABILIDAD DESPUES DE TRATAMIENTO CON SOLUCION A
2 % DE K CL

CORE NO.	Ka (md)	WATER ORIGINAL	PERMEABILITY (md) AFTER KCl TREATMENT
3	2.0	0.001	0.004
6	1.1	0.001	0.002
9	0.76	0.001	0.002
12	1.9	0.001	0.004
15	1.0	0.001	0.002
18	0.6	<0.001	0.002
21	1.8	<0.001	0.005
24	0.88	<0.001	0.003
27	0.34	<0.001	0.002

DESCRIPCION DE LAS PARTICULAS EN SUSPENSION
UTILIZADAS DURANTE LOS ENSAYOS DE FLUJO

IDENTIFICATION OF SUSPENSION	DESCRIPTION
SP 1	A suspension containing particles up to approximately 2 to 3 microns
SP 2	A suspension containing particles from approximately 2 to 10 microns
SP 3	A suspension containing particles larger than 10 microns but smaller than 30 microns

VELOCIDAD TERMINAL DE SEDIMENTACION DE PARTICULAS
DEL AGUA DE SSDLR EN CENTIMETROS /ORA

(DENSITY OF WATER: 1.0183 g/cm³ AT 20°C)

PARTICLE SIZE (microns)	DENSITY OF PARTICLES (g/cm ³)		
	2.20	2.40	2.60
100	2314.00	2706.00	3099.00
90	1874.34	2191.86	2508.57
80	1480.96	1731.84	1982.08
70	1133.86	1325.94	1517.53
60	833.04	974.16	1114.92
50	578.50	676.50	774.25
40	370.24	432.96	495.52
30	208.26	243.54	278.73
20	92.56	108.24	123.88
10	23.14	27.06	30.97
5	5.79	6.77	7.74
4	3.70	4.33	4.96
3	2.08	2.44	2.79
2	0.93	1.08	1.24
1	0.23	0.27	0.31
0.5	0.06	0.07	0.08

DISTRIBUCION DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTICULAS DE
SUSPENSTION SP - 3

SIZE (Micron)	COUNT**	VOLUME***	SIZE (Micron)	COUNT**	VOLUME***	SIZE (Micron)	COUNT**	VOLUME***
9.50	15	12855	16.68	485	2250400	23.85	211	2862426
9.71	25	22875	16.88	492	2366028	24.06	181	2520787
9.91	17	16541	17.09	498	2485518	24.26	180	2570040
10.12	72	74592	17.29	508	2625344	24.47	158	2315016
10.32	93	102207	17.50	516	2765244	24.67	155	2327170
10.53	107	124869	17.70	540	2994300	24.88	173	2664373
10.73	191	235885	17.91	600	3446400	25.08	166	2618650
10.94	267	349503	18.11	640	3800960	25.29	164	2652700
11.14	308	425656	18.32	574	3528952	25.49	158	2616638
11.35	308	450296	18.52	526	3341152	25.69	124	2102296
11.55	292	449680	18.73	490	3219300	25.90	119	2067387
11.76	320	520320	18.93	460	3120180	26.11	114	2029200
11.96	324	554040	19.14	453	3175983	26.31	108	1966896
12.17	329	592858	19.34	491	3551403	26.52	96	1790496
12.37	332	628144	19.55	491	3668752	26.72	99	1888524
12.58	337	670630	19.75	393	3027279	26.93	92	1796760
12.78	344	717928	19.96	430	3419360	27.13	72	1437696
12.99	348	762468	20.16	514	4211202	27.34	73	1491755
13.19	352	807488	20.37	468	3955536	27.54	65	1357655
13.40	356	856536	20.57	461	4012083	27.75	60	1282140
13.60	360	905400	20.78	430	3857960	27.95	60	1310040
13.81	356	937348	20.98	415	3832110	28.16	34	759220
14.01	360	989640	21.19	430	4091020	28.36	34	775506
14.22	356	1023500	21.39	378	3699108	28.57	30	699600
14.42	360	1079280	21.60	426	4292802	28.77	28	666764
14.63	376	1177256	21.80	483	5003880	28.98	24	584112
14.83	380	1239180	22.01	385	4104870	29.18	25	621125
15.04	388	1319976	22.21	365	3998575	29.39	20	507720
15.24	404	1429756	22.42	389	4383641	29.59	17	440436
15.45	410	1511670	22.62	376	4351448	29.80	16	423408
15.65	440	1686520	22.83	336	3998064	30.00	12	324000
15.86	454	1811006	23.03	378	4616892	30.21	13	358410
16.06	464	1921888	23.24	294	3689994	30.41	5	140610
16.27	476	2049656	23.44	249	3206622	30.62	4	114832
16.47	481	2148627	23.65	211	2790897	30.82	4	117100

* SEE TEXT FOR EXPLANATIONS

** RELATIVE NUMBER OF PARTICLES OF THE CORRESPONDING SIZE WITHIN THE SAMPLE

*** THE NUMBER IN THIS COLUMN TIMES 0.523 GIVES THE RELATIVE TOTAL VOLUME WITHIN THE SAMPLE VOLUME OF PARTICLES OF CORRESPONDING SIZE

CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LA PARTICULAS DE LA SUSPENSION
SP - 3

ARITHMETIC COUNT MEAN = 19.12 MICRONS

PERCENTILE:	10%	OF COUNT IS AT	23.85	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	20%	OF COUNT IS AT	22.01	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	30%	OF COUNT IS AT	20.65	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	40%	OF COUNT IS AT	19.34	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	50%	OF COUNT IS AT	18.20	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	60%	OF COUNT IS AT	17.40	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	70%	OF COUNT IS AT	15.86	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	80%	OF COUNT IS AT	14.22	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	90%	OF COUNT IS AT	12.58	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	100%	OF COUNT IS AT	9.56	MICRONS AND LARGER

DISTRIBUCION DE LOS TAMAÑOS DE LA SUSPENSION SP - 2

SIZE (Micron)	COUNT**	VOLUME***	SIZE (Micron)	COUNT**	VOLUME***	SIZE (Micron)	COUNT**	VOLUME***
0.96	4519	4055	2.27	18077	21820	5.33	9038	1369834
0.99	411	395	2.32	16082	200265	5.46	8449	1534915
1.01	2876	2965	2.37	18898	253167	5.58	4930	858319
1.03	4108	4539	2.43	18309	277238	5.71	8627	1609773
1.06	4930	5838	2.49	20131	309786	5.85	4519	803754
1.08	8217	10428	2.55	20952	345561	5.98	5341	1144810
1.11	10682	14529	2.60	18898	334055	6.12	3697	849304
1.13	11503	16769	2.67	2063	404732	6.27	5341	13150419
1.16	6984	10912	2.73	20952	425436	6.41	4830	1300969
1.19	5341	8944	2.79	16844	366570	6.56	2465	697172
1.22	7395	13272	2.86	24650	574952	6.72	1643	498038
1.24	8627	16595	2.82	26704	667566	6.87	2465	800840
1.27	11092	22868	2.99	26704	715479	7.04	2465	858320
1.30	12325	27233	3.06	21363	613460	7.20	2465	919924
1.33	13147	31135	3.13	23417	720706	7.37	1643	857167
1.36	11082	28153	3.21	27937	921530	7.54	1643	7043349
1.40	8217	22353	3.28	25472	900526	7.72	1643	754886
1.43	10271	29946	3.36	25061	949586	7.90	2054	1011457
1.46	12736	39798	3.44	23417	950978	8.08	1643	867135
1.50	11914	39901	3.52	22596	983498	8.27	822	464969
1.53	10682	38343	3.80	23417	1092387	8.46	822	498342
1.57	11914	45835	3.68	20542	1027048	8.66	411	267055
1.60	10682	44045	3.77	23163	1144757	8.86	822	572444
1.64	11914	52650	3.86	26293	1510060	9.07	1643	1226315
1.68	13557	64211	3.95	20952	1289682	9.28	822	657566
1.72	16844	85506	4.04	20952	1382244	9.50	1643	1408665
1.76	15612	849403	4.14	20131	1423403	9.72	822	755345
1.80	13968	814503	4.23	15201	1151960	9.95	1643	1618133
1.84	8217	51354	4.33	20542	1668441	10.18	411	433832
1.89	1232	8252	4.43	16022	1394723	10.42	822	929939
1.93	18898	135669	4.54	13557	1264847	10.86	411	498342
1.87	19720	151731	4.64	11503	1150241	10.91	0	0
2.02	19720	162621	4.75	11503	1232797	11.17	411	572444
2.07	19720	174293	4.86	9860	1132558	11.43	411	613531
2.07	19720	174293	4.86	9860	1132558	11.43	411	613531
2.12	16844	159559	4.87	8627	1062054	11.70	0	0
2.17	14379	145985	5.09	8449	1246739	11.97	411	704762
2.22	16844	183285	5.21	9449	1336221	0	0	0

* SEE TEXT FOR EXPLANATIONS

** RELATIVE NUMBER OF PARTICLES OF THE CORRESPONDING SIZE WITHIN THE SAMPLE

*** THE NUMBER IN THIS COLUMN TIMES 0.523 GIVES THE RELATIVE TOTAL VOLUME WITHIN THE SAMPLE VOLUME OF PARTICLES OF CORRESPONDING SIZE

CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LAS PARTICULAS DE SUSPENSION
SP - 1

ARITHMETIC COUNT MEAN = 3.04 MICRONS

PERCENTILE:	10%	OF COUNT IS AT	4.86	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	20%	OF COUNT IS AT	4.04	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	30%	OF COUNT IS AT	3.60	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	40%	OF COUNT IS AT	3.21	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	50%	OF COUNT IS AT	2.86	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	60%	OF COUNT IS AT	2.48	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	70%	OF COUNT IS AT	2.12	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	80%	OF COUNT IS AT	1.76	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	90%	OF COUNT IS AT	1.36	MICRONS AND LARGER
PERCENTILE:	100%	OF COUNT IS AT	.96	MICRONS AND LARGER

DATOS DE LOS TESTIGOS Y DE LOS FLUJOS UTILIZADOS DURANTE
LOS ESTUDIOS DE FLUJO (SP- 1)

CORE PLUG NO.	CORE DEPTH(m)	Ka (md)	CORE DATA		FLOW RATE		TOTAL FLOW
			P.V. (cc)	Length (cm)	Ft/D	cc/min	TIME FOR 10 P.V. (hrs)
1	1828.29	316.0	5.82	6.32	7	0.1364	7.11
2	1825.86	18.0	3.04	6.33	7	0.0712	7.12
3	1837.13	2.0	2.63	6.35	7	0.0614	7.14
4	1832.77	170.0	0.73	6.32	4	0.0098	12.44
5	1824.70	8.7	3.97	6.35	4	0.0529	12.50
6	1838.18	1.1	0.62	6.34	4	0.0083	12.48
7	1826.71	39.0	3.82	6.30	2	0.0257	24.81
8	1828.60	3.8	1.01	6.35	2	0.0067	24.99
9	1836.62	0.76	4.50	6.36	2	0.0300	25.04

DATOS DE LOS TESTIGOS Y DE LOS FLUJOS UTILIZADOS DURANTE LOS
ESTUDIOS DE FLUJO (SP-2)

CORE PLUG NO.	CORE DEPTH(m)	Ka (md)	CORE DATA		FLOW RATE		TOTAL FLOW
			P.V. (cc)	Length (cm)	Ft/D	cc/min	TIME FOR 10 P.V. (hrs)
10	1827.96	260.0	4.82	5.83	7	0.1225	6.56
11	1837.92	15.0	5.17	6.35	7	0.1206	7.14
12	1828.75	1.9	4.89	6.36	7	0.1139	7.15
13	1826.97	124.0	2.58	6.33	4	0.0345	12.46
14	1837.62	4.8	2.78	6.34	4	0.0371	12.48
15	1832.12	1.0	1.42	6.34	4	0.0190	12.48
16	1826.40	31.0	3.77	6.34	2	0.0252	24.96
17	1833.72	3.3	0.62	6.32	2	0.00415	24.88
18	1826.40	0.60	3.70	6.33	2	0.0247	24.92

DATOS DE LOS TESTIGOS Y DE LOS FLUJOS UTILIZADOS DURANTE LOS
ESTUDIOS DE FLUJO (SUSPENSION SP-3)

CORE PLUG NO.	CORE DEPTH(m)	Ka (md)	CORE DATA		FLOW RATE		TOTAL FLOW TIME FOR 10 P.V. (hrs)
			P.V. (cc)	Length (cm)	Ft/D	cc/min	
19	1833.72	260.0	5.47	6.31	7	0.1284	7.10
20	1826.14	9.3	1.98	6.33	7	0.0463	7.12
21	1834.04	1.8	0.56	6.31	7	0.0131	7.10
22	1827.27	59.0	4.34	6.29	4	0.0584	12.38
23	1833.10	4.0	1.78	6.34	4	0.0238	12.48
24	1836.92	0.88	3.89	6.35	4	0.0519	12.50
25	1837.32	23.0	2.50	6.33	2	0.0167	24.92
26	1825.30	2.8	4.17	6.33	2	0.0279	24.92
27	1824.43	0.34	2.60	6.35	2	0.0137	25.00

RESUMEN DE DATOS RELATIVOS A ENSAYOS DE FLUJO DE SUSPENSIONES
DE PARTICULAS (SP - 1)

(PARTICLE SIZE RANGE: MAXIMUM 2 TO 3 MICRONS)

CORE PLUG NO.	LINEAR VELOCITY (ft/D)	WATER PERMEABILITY, Kw (md)	
		INITIAL	AT THE END OF 10 P.V. OF SP-1 INJECTION
1	7	64.0	64.0
2	7	3.5	2.9
3*	7	0.001	<0.001
4	4	35.0	35.0
5*	4	0.31	<0.001
6*	4	0.001	<0.001
7	2	6.2	5.8
8*	2	0.003	<0.001
9*	2	0.001	<0.001

* THE PERMEABILITY OF THESE CORES ARE EXTREMELY LOW
AND THE CORES PLUGGED IMMEDIATELY AFTER THE INJECTION
OF THE SP-1 SUSPENSION HAD BEEN STARTED

RESUMEN DE DATOS RELATIVOS A ENSAYOS DE FLUJO DE SUSPENSIONES
DE PARTICULAS (SP - 2)

(PARTICLE SIZE RANGE: FROM 2 TO 10 MICRONS)

CORE PLUG NO.	LINEAR VELOCITY (ft/D)	WATER PERMEABILITY, Kw (md)	
		INITIAL	AT THE END OF 10 P.V. OF SP-2 INJECTION
10	7	48.0	47.6
11	7	3.0	2.0
12*	7	0.001	<0.001
13	4	28.0	26.5
14*	4	0.012	<0.001
15*	4	0.001	<0.001
16	2	5.0	3.5
17*	2	0.004	<0.001
18*	2	<0.001	<0.001

* THE PERMEABILITY OF THESE CORES ARE EXTREMELY LOW
AND THE CORES PLUGGED IMMEDIATELY AFTER THE INJECTION
OF THE SP-2 SUSPENSION HAD BEEN STARTED

RESUMEN DE DATOS RELATIVOS A ENSAYOS DE FLUJO CON SUSPENSIONES
 DE PARTICULAS (SP - 3)
 (PARTICLE SIZE RANGE: FROM 10 TO 30 MICRONS)

CORE PLUG NO.	LINEAR VELOCITY (ft/D)	WATER PERMEABILITY, Kw (md)	
		INITIAL	AT THE END OF 10 P.V. OF SP-3 INJECTION
19	7	30.0	20.0
20*	7	0.27	<0.001
21*	7	<0.001	<0.001
22	4	8.2	2.6
23*	4	0.012	<0.001
24*	4	<0.001	<0.001
25*	2	4.0	<0.001
26*	2	0.001	<0.001
27*	2	<0.001	<0.001

* THE PERMEABILITY OF THESE CORES ARE EXTREMELY LOW
 AND THE CORES PLUGGES IMMEDIATELY AFTER THE INJECTION
 OF THE SP-3 SUSPENSION HAD BEEN STARTED

FIGURE 6

FIGURA 6

SEM MICROGRAPH

(SSDLR NO.1; 1827.96 Meters; Mica)

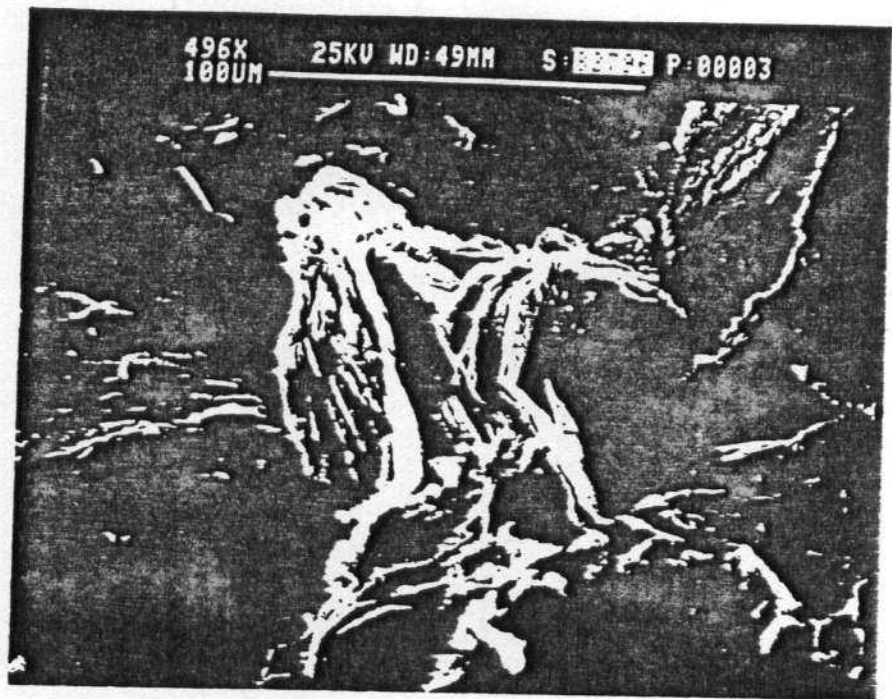


FIGURE 7

FIGURA 7

SEM MICROGRAPH

(SSDLR NO.1; 1827.96 Meters; Feldspar)

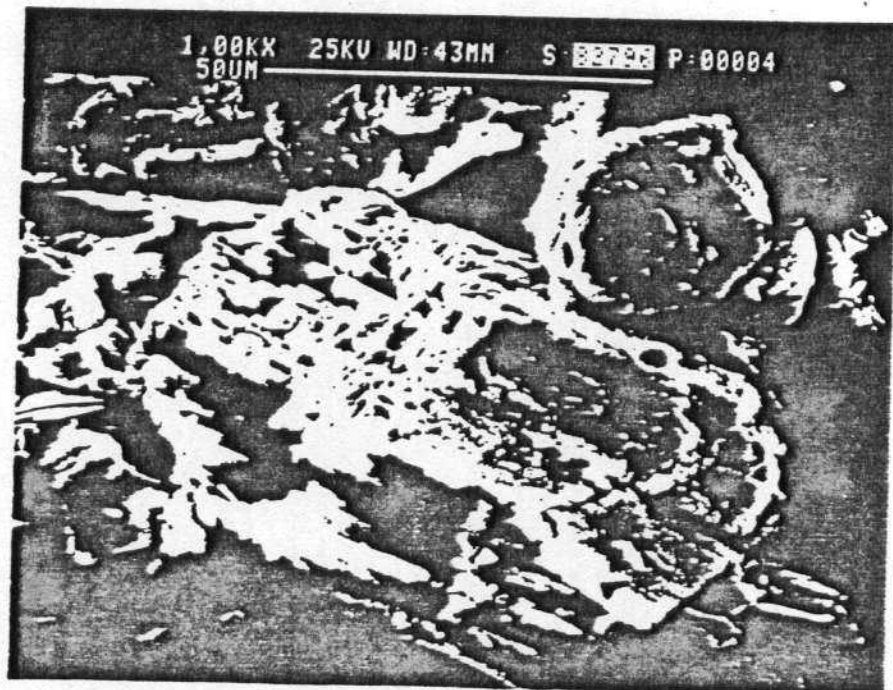


FIGURE 8

FIGURA 8

SEM MICROGRAPH

(SSDLR NO.1; 1828.29 Meters; Illite)

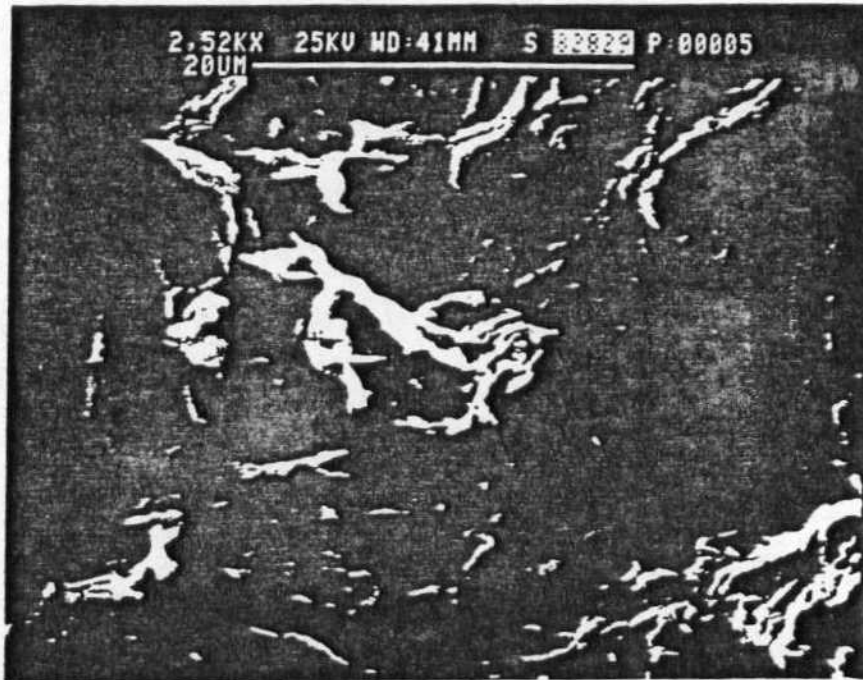


FIGURE 9

FIGURA 9

SEM MICROGRAPH

(SSDLR NO.1; 1828.29 Meters; Kaolinite)



FIGURE 10

SEM MICROGRAPH

(SSDLR NO.1; 1837.13 Meters; Feldspar)

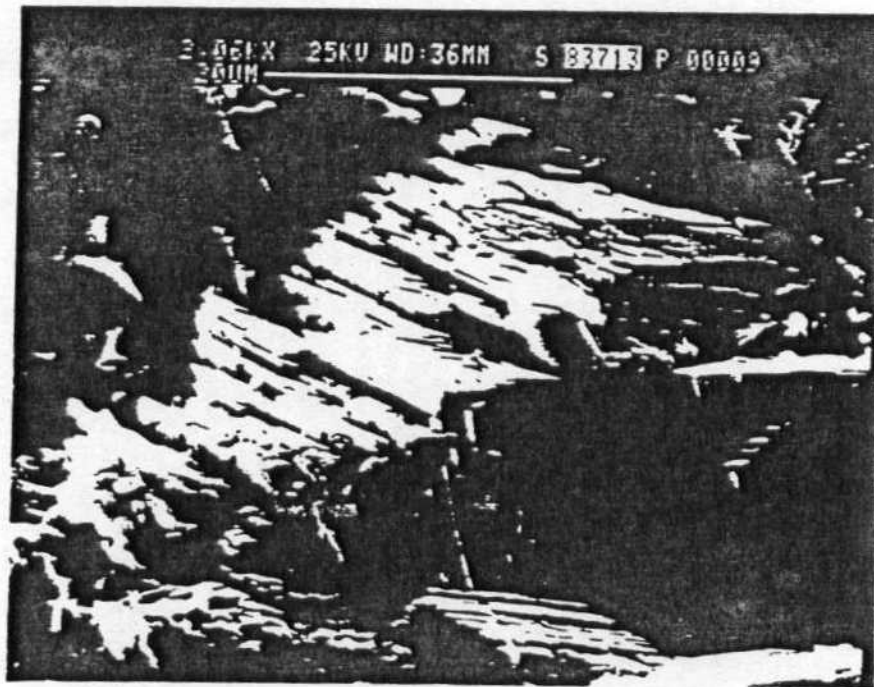


FIGURE 11

(EDAX: SSDLR NO.1; 1827.96 Meters; Mica)
207 CNT 4K FS: A
4880 EU 20 EU/CHAN
Link Systems 860 Analyser 31-Aug-83

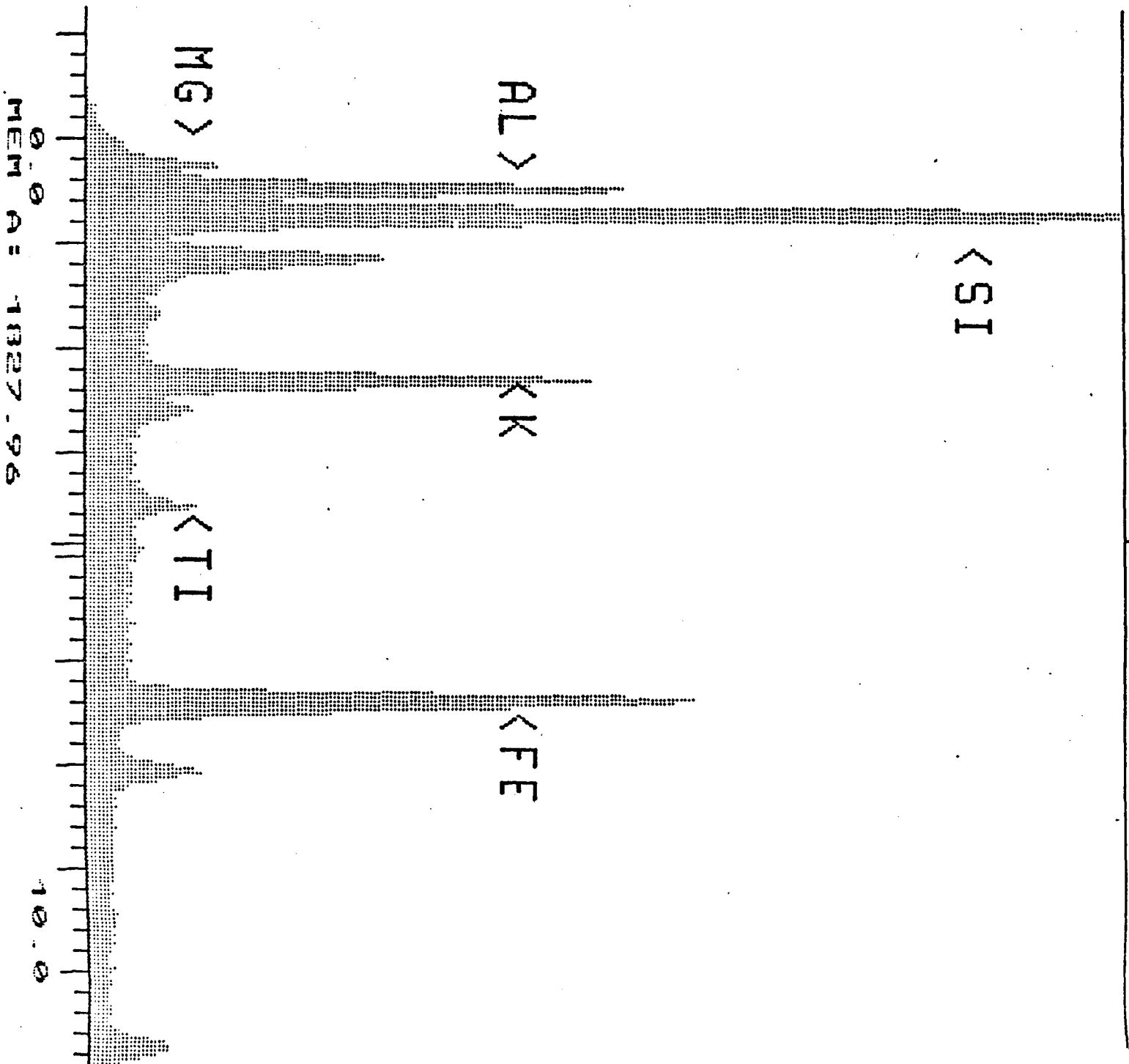
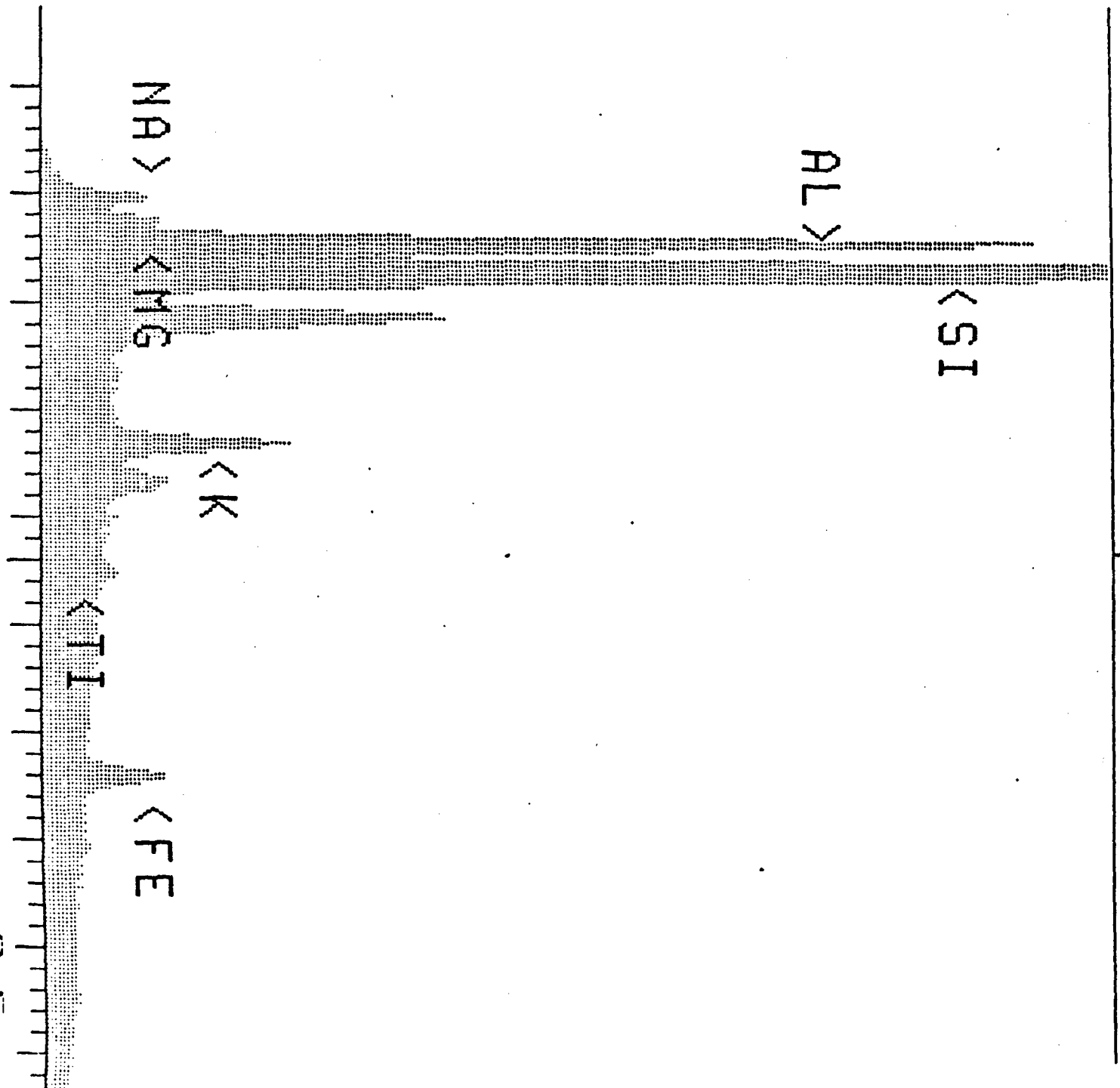


FIGURE 12

(EDAX: SSDLR NO.1; 1827.96 Meters; Feldspar)

521 CNT BK FS: A
4400 EU 20 EU/CHAN
Link Systems 860 Analyser 31-Aug-83



MEM A: 1827.96-FELDSPAR

9.5

FIGURE 13

(EDAX: SSDLR NO.1; 1828.29 Meters; Illite)

440 CNT 4400 EU 16K FS: A
Link Systems 860 Analyser 20 EU/CHAN 31-Aug-83

<SI

AL>

<K

<FE

MEM A: 1828.29-ILLITE

9.5

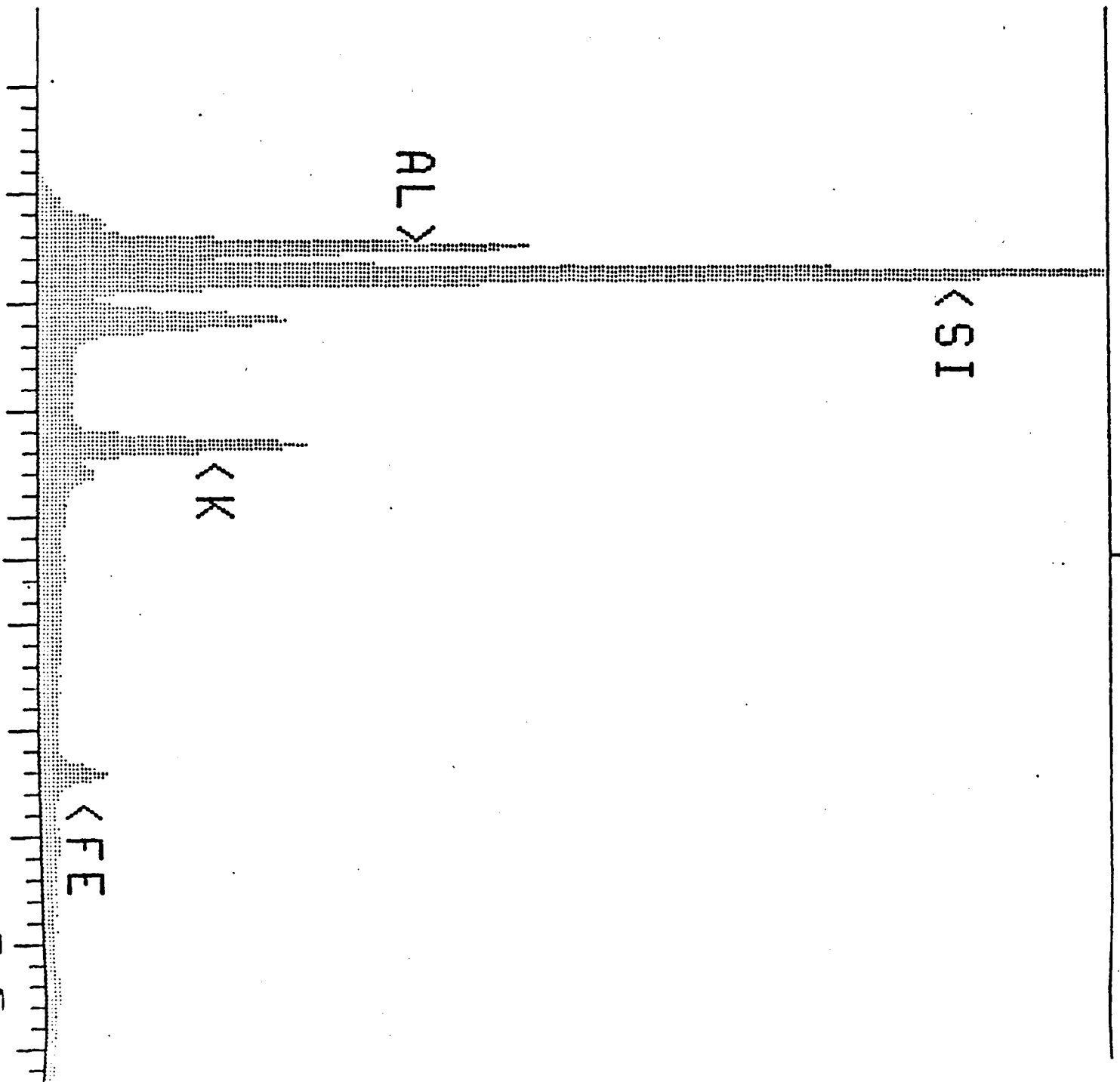


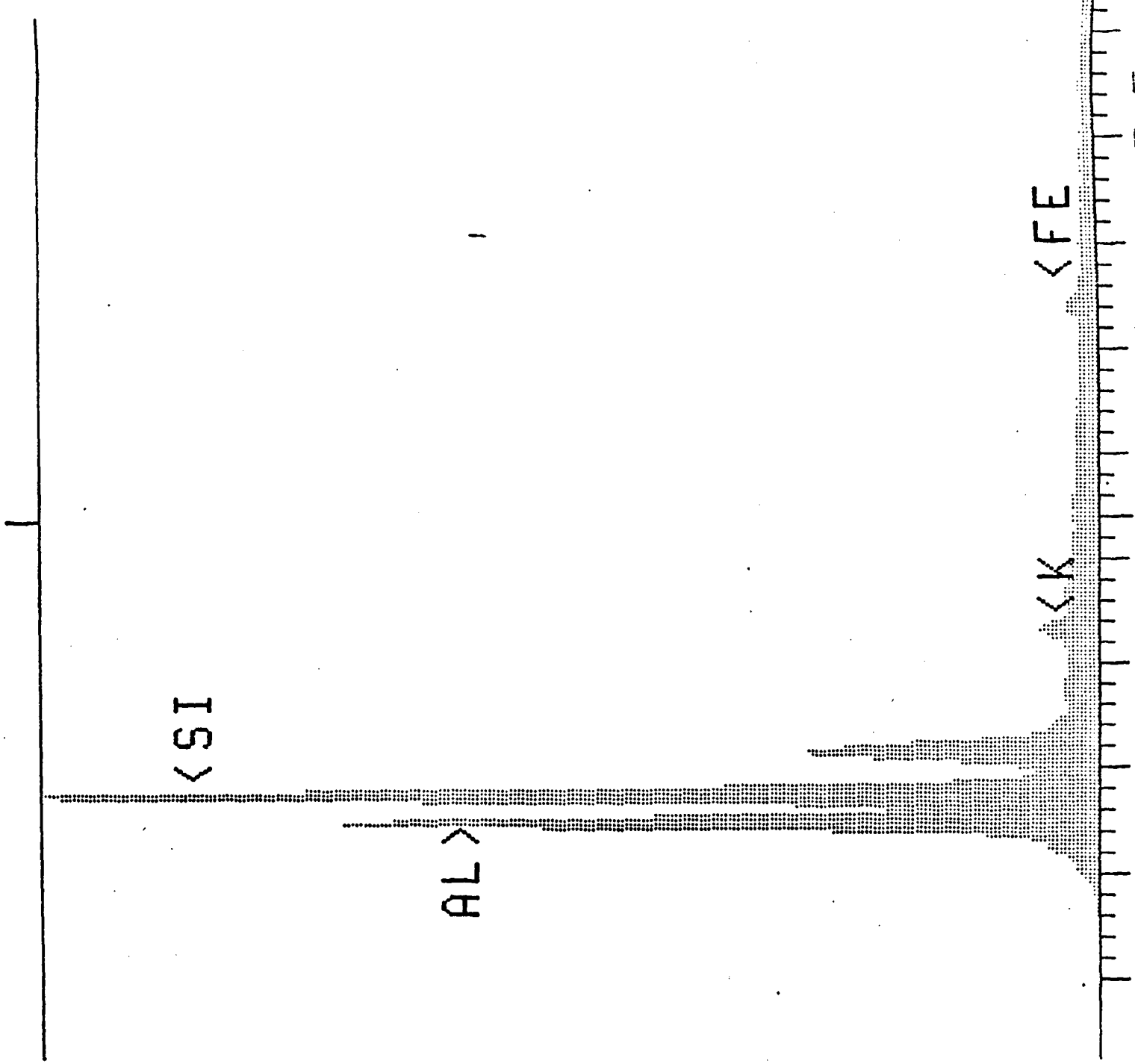
FIGURE 14

(EDAX: SSDLR NO.1; 1828.29 Meters; Kaolinite)

439 CNT

16K FS: A
4400 EU 20 EU/CHAN
31-AUG-83

Link Systems 860 Analyser

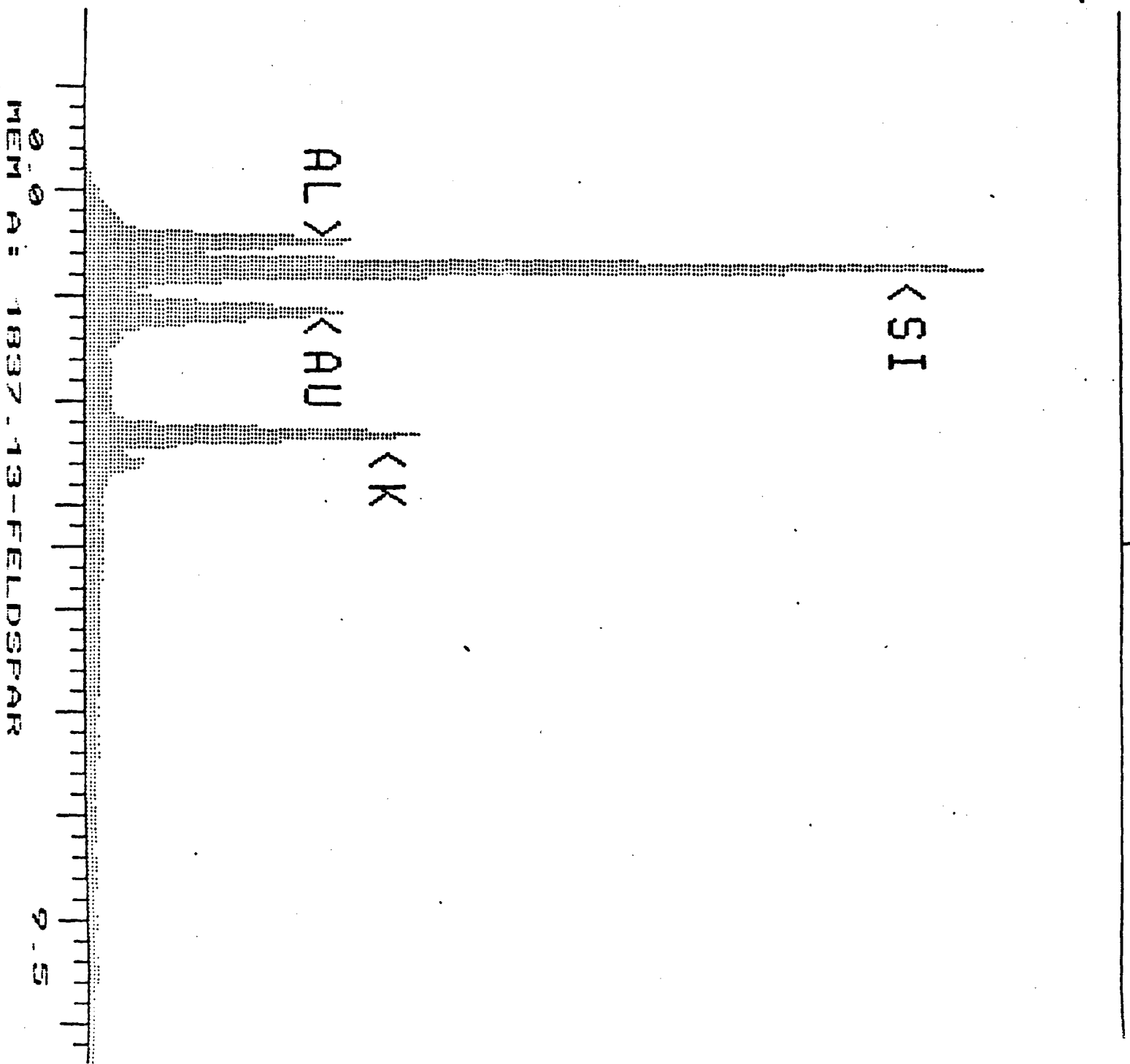


MEM 0: 1828.29 - KAOLINITE

FIGURE 15

(EDAX: SSDLR NO.1: 1837.13 Meters; Feldspar)

301 CNT 15K FS: A
4400 EU 20 EU/CHAN
Link: Systems 860 Analyser 7-Sep-83



ESQUEMA DEL APARATO PARA ENSAYO DE TESTIGO

APARATO DE FLUJO

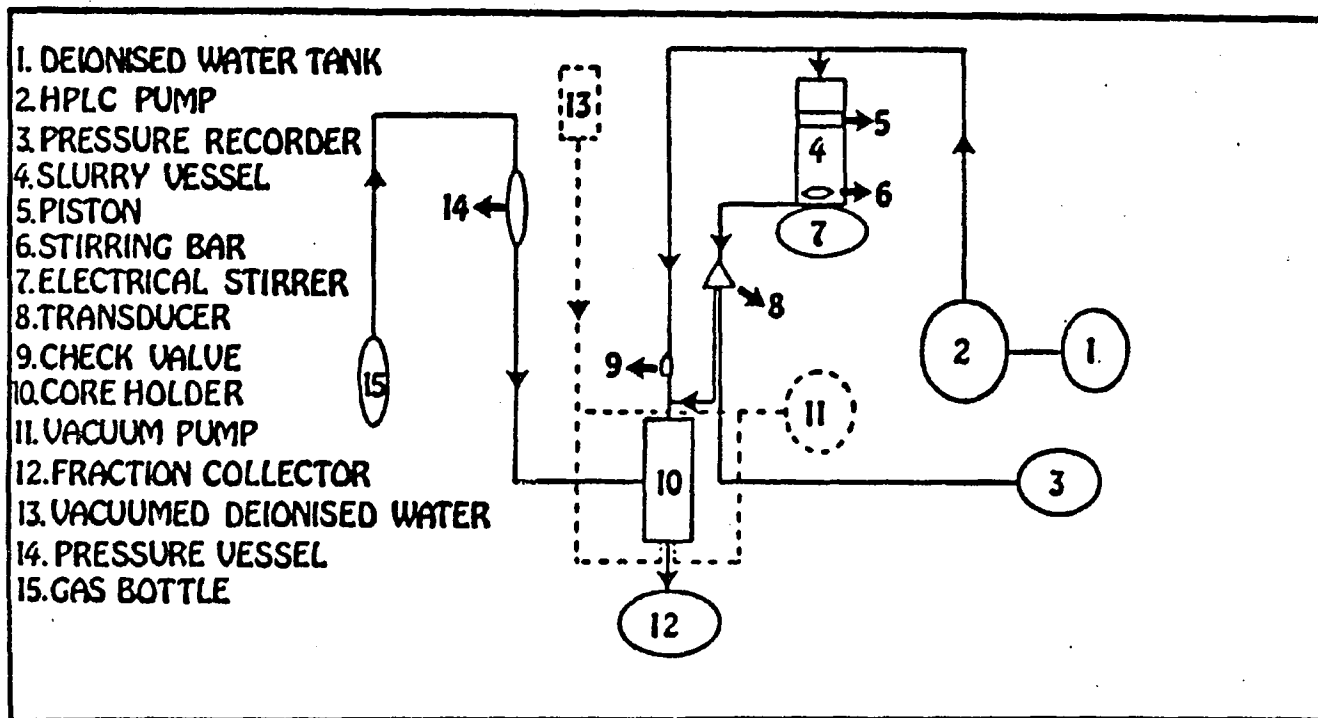


FIGURA 17

SOPORTE DE TESTIGO

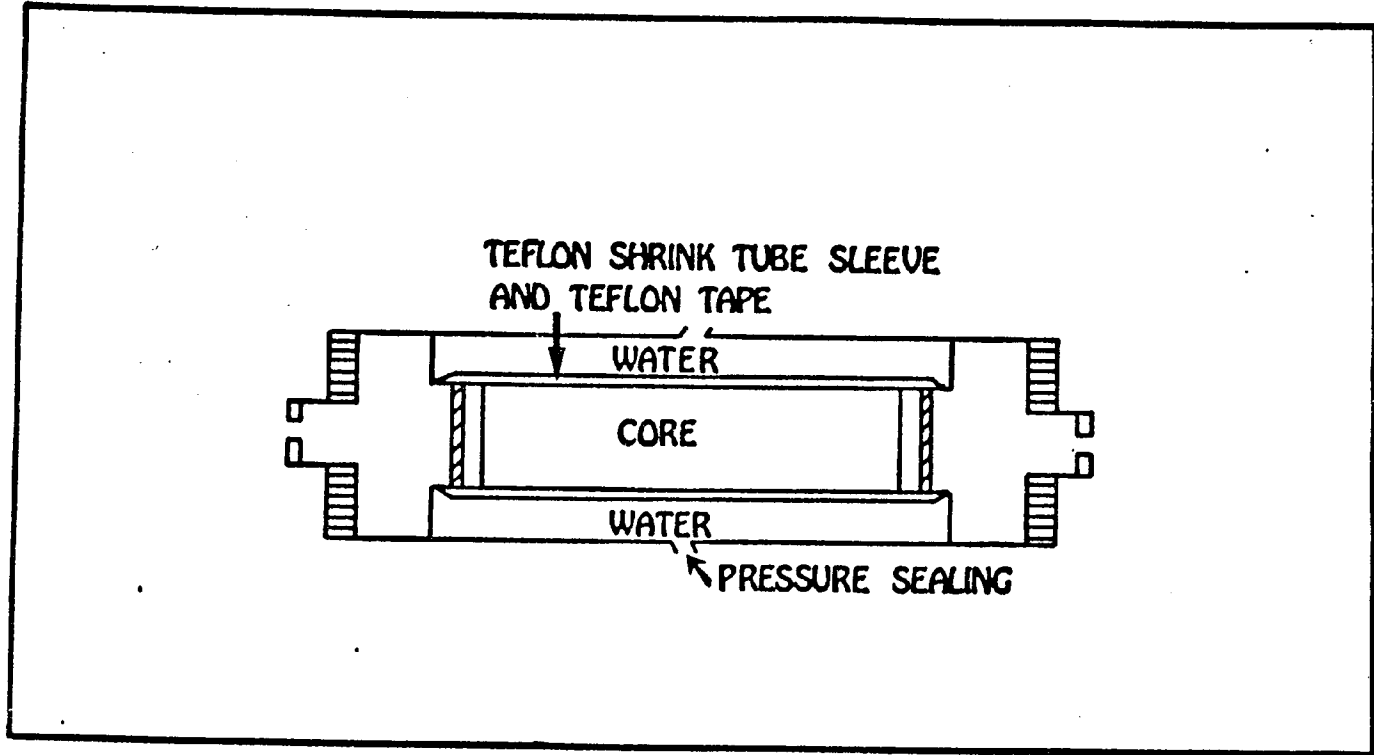


FIGURA 17

APENDICE I

PROBLEMAS DE REINYECCION RELACIONADAS A PARTICULAS SUSPENDIDAS

Este Capítulo, que describe los problemas generales de reinyección, no está directamente relacionado con el pozo de SAN SEBASTIAN DE LOS REYES y ha sido puesto en Apendice.

Se quedó en Inglés en este informe.

APPENDIX I

APENDICE 1

PROBLEMAS DE REINYECCION RELACIONADAS A PARTICULAS SUSPENDIDAS
REINJECTION PROBLEMS RELATED TO SUSPENDED PARTICLES

As mentioned before, the key to a successful geothermal reinjection is the proper removal of the suspended particles from the brine prior to reinjection. This must be accomplished in a technically and economically feasible way.

Before we describe the laboratory work, its results and implications for ADARO's operations of the San Sebastian De Los Reyes (SSDLR) project we would like to give a detailed description of the reinjection problems related to the suspended particles in any geothermal brine. This background is essential for a comprehension of the laboratory study conducted under this present contract.

Obviously, the suspended particles must be removed from the heat-depleted brine prior to any attempt to reinject this brine. However, removing all particles from a brine may not be

economically feasible. Only certain particles may have to be removed from the brine prior to injection. Therefore, the entire problem boils down to the need of accomplishing three major objectives:

1. Determine the pertinent characteristics of the particles suspended in the brine (e.g., size and size distribution) which can lead to a reservoir damage.
2. Determine the reservoir damage of various particles depending on their pertinent size characteristics.
3. Remove all those particles that will cause the reservoir damage.

It seems to be a fairly simple matter to follow this scheme to avoid any serious reservoir damage in the field. However, there are numerous technical details to be considered. Many of these correlations between particle characteristics and reservoir damage are extremely difficult to determine within the required accuracy and reliability limits for such a determination. Some of these problems are described below.

There are many studies in the literature related to formation damage by particles suspended in flowing and injected fluids. This subject is rather complex and as such no unified model explaining all the aspects of the resulting formation damage is presently available. In this section, the existing literature on the subject is critically reviewed.

Donaldson et al. [4] made a significant contribution to the mechanism of the flow of particles through porous media using laboratory flow experiments and a statistical interpretation of their experimental results. They conducted some experiments by flowing silica particle suspensions through three types of core plugs. The specific core plugs used in their experiments were taken from Berea, Noxie and Cleveland sandstone. They determined the particle size distribution of the suspension using the particle counter (ElZone) made by the Particle Data Inc. In their studies they determined the pore size distributions of the cores by using capillary pressure curve data measured through the centrifuge method (air-brine system). Figure I-1 shows the volume percent pore size distributions of the three cores used by Donaldson et.al. [4]. This Figure I-1 is reproduced here from the work of Donaldson et.al. [4].

Figure I-1 shows the lowest value of the pore size to be approximately 0.5 micron and the highest pore size value close to 40 microns. The accuracies near the two extreme values of the pore size distribution shown in Figure I-1 are questionable because of the limitations of the experimental procedures used by Donaldson et.al. [4]. For example, the values at the lower end are affected by the two phase systems used in the capillary

pressure measurement and at the larger sizes by the inaccuracies in measuring the low capillary pressures. We believe that mercury injection is a better method for determining pore size distribution than that used by Donaldson et al [4].

Donaldson et.al. [4] have developed a "random walk" model for the migration of particulates using Poiseuille's equation to interpret their experimental results. For the development of their model, the following points were assumed:

1. Particles are perfectly spherical.
2. The final bridging process is attributed to the cake on the entry face only.
3. The probability for having a certain particle diameter, (D_p) entering any capillary is subject to two conditions:
 - a. D_p smaller than pore diameter.
 - b. Maximum flow rate in a given capillary.

All the above assumptions are questionable. In calculating the probability for a particle entering a capillary, the cross section of the pore channel is assumed to be circular and the particles are assumed to be spherical. Neither of these assumptions is true. For example, needle shaped particles with equivalent spherical radius smaller than a given pore radius might not get through a pore. On the other hand, needle shaped particles with an "equivalent" spherical radii greater than a given pore radius might get through. This is, because, certain needle shaped particles can have an extremely small radius of the cross sectional area which can be smaller than the average pore radius.

The second assumption needed for calculating the probability, namely, the maximum flow rate in a capillary, is also questionable. This assumption is particularly doubtful in situations involving the dispersion phenomena in a single phase flow and the wettability phenomena associated with multiphase flow. Moreover, Poiseuille's equation can give only a very rough approximation of the true flow through a porous media.

Additional studies on the flow of particle suspensions through porous media were performed by Davidson [5]. Davidson used alundum cores with a mean pore diameter of 90 microns, a permeability of 14 darcies and a porosity of 35%. The particle suspension is made with silica flour having a particle size distribution characterized by a median size of 3 microns with a 12 microns upper bound. Based on the experimental results, Davidson developed a model of a pore plugging mechanism that

estimates the pore velocity required to achieve a so-called "non-retaining bed" by taking into account gravitational, surface and lift forces. A major finding of this work is that the velocity required to prevent deposition is inversely related to the particle size which is in contradiction with the results of Donaldson et al [4] as well as with some of our own observations. We believe that Davidson's conclusion is acceptable only under the specific conditions used in his experiments.

Using his experimental results and his model, Davidson [5] estimated that for an injection rate of 65 bbl/D/ft, the particle invasion will be 40 wellbore radii. He also estimated that a "two to one" formation impairment will take place in excess of 20 years at a concentration of 10 ppm of suspended solids in the injection brine. It is hard to find any concrete evidence to support these statements, which are presented as "specific estimates of field performance for respective particle and pore diameters of 2 and 20 microns". A rate of 65 bbl/D/ft is assumed to prevent silica particles from plugging pores at the face of the wellbore, specifically, if 2 micron particles are entering 20 micron pores.

Many more questions can be raised if one wants to use the model suggested by Davidson [5]. Is the 2 microns given in his publication a medium, an upper or a lower bound? Also, is the 40 wellbore radius invasion the maximum depth of penetration? About the extent of formation damage, Davidson does not say if the "two to one impairment" will occur at the wellbore, 40 wellbore radius away from the wellbore or somewhere in between. Is it simply a combination of all the locations mentioned above?

Gruesbeck and Collins [6] attempted to explain the abnormal decline in productivity of producing wells in terms of the movement of naturally occurring fines in porous media. They made a rather questionable hypothesis related to the interrelationship between the flow velocity and the rate of entrainment. They assume that there exists a critical velocity, or flow rate, below which entrainment of fines does not occur and above which the rate of entrainment increases linearly with flow rate. Having this critical velocity or flow rate, one could easily locate the radius of damage around a wellbore in an ideal reservoir. Based on this concept, Gruesbeck and Collins [6] estimated that for a well producing at about 670 bbl/d/ft, fines would be entrained within an outer radius of 33 cm for a single-phase flow (of white oil) at connate water saturation and out to a radius of 1.6 m with two-phase flow of water and oil. However, these estimates are valid only if their original hypothesis is correct. No basis for the hypothesis is presented in the paper [6]. Based on the critical velocity hypothesis, they [6] further reported that the entrainment and redeposition of fines is restricted to the near wellbore region. This statement is very hard to verify, except maybe for an ideal reservoir with a radial velocity proportional to the reciprocal of the radius of damage.

Muecke [7] presented an interesting qualitative analysis of fines movement through unconsolidated sand. This paper concentrated on the effect of single and multiphase flow of fines movement through porous media. The results are based essentially on a visual observation using a microscope. Some of the major findings of this study are summarized below:

1. Most formation fines are not clays. On a weight percent basis, Muecke reported that the composition of the fines are as follows:

Clay fines represent	11%
Quartz fines represent	39%
Other minerals represent	18%
Amorphous materials represent	32%

2. Particles will move only if the phase that wets them is moving.

Muecke [7] pointed out (a) the existence of bridging phenomena and (b) the difficulties of establishing properly defined criteria for bridging. As particles start piling up at or inside a pore entry (bridging), the sizes and concentrations of the retained particles will change continuously until the pressure buildup is high enough to break up the bridge. The bridging will occur again, with ever changing particle sizes and concentrations until an equilibrium is reached. This equilibrium could lead either to a completely plugged pore or one with partially narrowed flow paths allowing only a restricted flow through the core. Muecke raised the following question which many investigators, including ourselves, are trying to answer: What is the depth of penetration of the moving fines? Or in other words, what is the location of the damage due to particles invasion if the damaging particles are injected into the porous medium?

Abrams' [8] work was concentrated on minimizing formation impairment due to drilling mud. He used an unconsolidated sand in an apparatus that is capable of simulating radial flow. The permeability of the unconsolidated sand used in his experiments was between 4 and 6 darcies which is rather common around an open hole where a multitude of micro fractures are present. In order to estimate the location and size of the particles causing the impairment, Abrams drilled cores from the sand body used in the experiments to obtain samples. Particle size distributions were analyzed using a Coulter counter. The particles flowing through the sandpack were silica particles. The author himself reported that the quality of the experimental data were poor.

Abrams' approach is analogous to "gravel packing" of a well

during the drilling phase because one of the purposes of a mud or a drilling fluid is to prevent formation fluids from entering the wellbore during the drilling phase. This "desired" formation damage or plugging is obtained by forming a mud cake at the sandface. It is very difficult to quantify invasion from the standpoint of formation damage through penetration of particles into locations away from the wellbore. For injection wells, reliable well tests could quantify the extent (unfortunately not the location) of the permeability impairment resulting from a formation damage due to drilling fluid. Reliable tests will give an idea as to what remedial methods could be tried to stimulate such a damaged well.

McCune [9] described an on-site testing apparatus for determining water quality standards required for water flooding in oilfields. McCune's approach was to filter the injection brine down to 0.45 micron "absolute". At this level of filtration, he attributed all permeability losses to chemical interactions, such as rock sensitivity to pH, salinity changes and precipitation of solids from the water. This method should give the proper and required filter pore size at a given filtration rate prior to reinjection of the brine according to McCune [9]. We found this approach convenient as long as the results that it will provide are taken as general guidelines only. The author himself [9] recognized that membrane filters have characteristics different from those of the formation being flooded. For example, particles which are retained by a filter on the surface could penetrate the formation under wellbore conditions for a given pore size distribution. On the other hand, particles which are not retained by a filter may be retained by the formation. An interesting feature of the test apparatus described [9] is that core tests could be run at high temperatures. McCune's paper is somewhat an update of an earlier one presented by Jordan et al. [10].

The work of Jordan et al [10] dealt with an offshore sea-water injection project where the brine was filtered through 0.45 micron filters prior to injection. Even after filtering, Jordan et al. found that "colloidal-size" iron containing particles were the primary plugging agents. This is the first evidence we found in the literature emphasizing the impact of submicron particles on formation impairment. Even McCune, whose work was apparently heavily inspired by the work of Jordan et al [10] does not stress the impact of submicron particles on plugging. Moreover, he implies that at a filtration down to 0.45 micron all permeability losses are attributed to chemical reactions. This is in contradiction with what Jordan et al [10] stated about iron particles. Most probably, McCune was well aware of the impact of submicron particles on formation damage, but his major concern was the economics of water treatment. He suggested that a degree of plugging of an injector could be accepted sometimes as an economic compromise with reduction in the rate of injection. This is a reasonable argument as long as we know or can quantify the degree of damage attributable to a given particle size range,

specifically submicron particles. However, we cannot measure particle sizes with any meaningful accuracy because the particle measurement devices currently available on the market have a lower bound of about 0.8 micron [14]. This sheds some additional doubt on the results and conclusion of the previously published work. Even the methods based on scanning electron microscopy and filtration cannot offer possible ways of accurately measuring submicron particles. For example, with a scanning electron microscope the fact that a brine sample has to be dried and the residue has to be coated under vacuum, makes it very difficult to reliably measure submicron particle sizes. If we cannot determine a representative submicron particle size distribution under the prevailing technology, we cannot say much about the amount of these particles in a given brine either. Of course, filtration through various grades of filters can be used to determine submicron sizes. However, as mentioned earlier, membrane filters have characteristics greatly different from those of the formation rock being considered. We also found that submicron metallic oxide particles in a concentration high enough to be optically examined will not pass through a millipore filter with a "particle size to a filter pore size" ratio between one to two and one to five.

Todd et al. [11] worked on the impairment of permeability in core plugs resulting from water injection. This was a part of a global review of the problems of sea water injection in the North Sea. Some of the data presented in this paper [11] are reproduced in Table 6. The first row of this Table 6 gives a particle size classification between 0 and 2 microns using a Coulter counter which has a very limited resolution in that range and becomes, therefore, an unreliable instrument. Also, the particle concentration used in these studies makes it very difficult to achieve a material balance on particles (a) forming the cake, (b) settling inside the core and (c) breaking through the porous medium (not to mention other factors such as formation fines breaking through).

Figure I-2 shows a "typical" particle size distribution in sea water [11]. In Figure I-2 the smallest particle size reported seems to be 0.8 micron. There are about 60,000 particles per sample volume with a size of 0.8 micron while there are only about 300 particles per sample volume with a size of 2 microns. Todd et al [11], quoting other investigators, mentioned the existence of ever increasing number of particles at the low size range. However, their reported data (see Figure I-2) cover a size range from 0.8 micron and up, while the material balance presented in their paper specifies a size range from 0 micron and up. We believe that Todd et al. as well as many other investigators, may have overlooked the size range from 0 to 0.8 micron, mainly because of the difficulty to characterize particles in this size range. Todd et al. used a scanning electron microscope with an energy dispersive X-ray analyser to identify particles deposited inside a core. We believe that the

backscattered electron detector feature of the scanning electron microscope is more suited to detect particles inside a core, especially in the submicron size range as long as the average atomic number of the particles considered is higher than that of the porous medium [15]. We have used this technique in the past in performing some studies related to the formation damage due to submicron particle suspensions [2].

Vetter, Kandarpa and Harouaka [2] have performed a detailed laboratory study to evaluate the mechanisms of particle invasions into porous media. The principal conclusions of this elaborate study [2] may be summarized as follows:

1. Submicron particles can generate a damage within the porous medium whereas particles having a critical minimum size can not invade the porous medium. Thus, submicron particle can generate damage collars within the reservoir around the wellbore whereas large particles will not cause any damage inside the reservoir.
2. The depth of particle penetration inside the core is related to the flow rate for a given size and concentration of particles. The higher the flow rate, the greater is the depth of penetration of the particles into the core at a given particle size. Essentially, submicron particle distribution with a median size of about 0.7 micron are completely retained by Berea sandstone cores (up to 200 md) and do not break through at rates varying from approximately 1 to 10 cm/min.
3. Particles having a size distribution with a median of approximately 0.5 micron are observed to pass through Berea sandstone cores (up to 200 md). Permeability damage for a given concentration of these particles appears to be inversely related to the flow rate. The lower the flow rate the higher seems to be the permeability damage.
4. For cores mounted in tandem, a filter cake was observed on the injection face of each core segment at various flow rates. This suggests that similar cakes would form at fractures inside the reservoir around injection wells. It also means that core flow test experiments using cores mounted in tandem are suspicious at best if the data are related to particle movements.
5. A new technique has been developed to determine the location of particles that are retained in a porous medium. This technique is based on the backscattered electron detector feature of a scanning electron microscope.

6. Submicron particles at a given concentration and size distribution can be completely filtered out by a 5.0 micron millipore filter while they break through two Berea sandstone cores (up to 200 md) mounted separately but in tandem. This means that filter data cannot be compared with or related to core data as commonly suggested in the literature or as done in routine field operations.
7. An optimum degree of particle filtration prior to injection of liquids should be determined by site-specific conditions. This optimum degree of filtration depends on:
 - a) Injection rate after filtration.
 - b) Characteristics of particles suspended in the liquid prior to and after filtration.
 - c) Physical and chemical characteristics of the reservoir rock accepting the filtered brine.
8. Damage collars inside the formation can be generated by invasion of submicron particles. However, the precise mechanism of this damage collar formation is not clear and seems to be far more complex than suggested in the sparse literature references on the subject.

It is apparent from the literature survey presented so far that there are many gaps in the area of submicron particle characterization as well as on the mechanism of flow of particle suspensions through porous media. Much more detailed work is needed before a unified model for formation damage by suspended particles can be formulated.

1 TYPES OF RESERVOIR DAMAGE DUE TO SUSPENDED PARTICLES

Irrespective of their sources of origin, the suspended particles in an injection water can cause reservoir and/or well damage which can result in a drastic reduction in the injectivity of an injector. If particle suspensions are injected into an injection well, different types of reservoir damages can occur.

There are some methods to predetermine the reservoir damage to the injection of water that contains suspended particles. The method proposed by Barkman and Davidson [12] for water quality measurements and injectivity impairment, in spite of it's many

limitations [1], is probably the most widely used. The method consists of categorizing impairment from suspended solids into four mechanisms:

1. Wellbore narrowing (cake formation).
2. Invasion of particles into the porous matrix of the reservoir.
3. Wellbore fill up by settling.
4. Plugging of perforations (holes) or slots in the lines or the holes or other openings in a screen installed inside the well.

These four different types of damages are explained in some detail in the following four paragraphs.

1.1 DAMAGE THROUGH WELLBORE FILL-UP

This damage follows a fairly simple mechanism. The particles in the brine flow down the wellbore of the injection well. They may flow somewhat faster than the liquid surrounding these particles due to gravity effects. Slowly but steadily, the particles will settle inside the wellbore and the top of the mass of the settled particles may reach higher and higher up to the wellbore. Eventually, the injection pressure at a constant injection rate will reach dimensions which will render any further water injection technically and economically unfeasible.

1.2 DAMAGE THROUGH PLUGGING OF PERFORATED OR SLOTTED LINERS OR OF DOWNHOLE SCREENS

In the case of perforation plugging, Barkman and Davidson reported that "plugging is expected unless the suspended solids are so small that they can be transported through the rock matrix, or unless fractures exist which will allow the solids to bypass the perforations". Some of the questions to be asked here are: How small is so small and what about the effects of concentration of particles, the flow rate and the differential pressure on particle penetration into the rock?

1.3 DAMAGE THROUGH SANDFACE PLUGGING

Particles may be filtered out on a sandface. The liquid phase may enter the reservoir and the suspended particles will form a "cake" on the sandface. It does not take much to make this cake impermeable for any liquids thus bringing the entire injection operation to a premature halt.

1.4 DAMAGE THROUGH RESERVOIR DAMAGE COLLARS

In the case of invasion, Barkman and Davidson reported that if

particles in the injection fluid can be transported to great distances from the wellbore, deposition will occur in a region of low pressure gradient, and the rate of impairment will be small. Here again, what is meant by great distances? In determining the "water quality ratio" Barkman and Davidson acknowledged the difficulty in interpreting filtration data due to "small" particles which invade and plug the porous structure of the filter medium. Experiments in our laboratory [2] showed that submicron particles can be retained by a five micron filter but did break through two Berea sandstone cores (permeability of approximately 100 md) mounted in tandem within two separate in-line core holders.

2 ORIGIN OF SUSPENDED PARTICLES IN GEOTHERMAL BRINES

The suspended particles exist whether the injection of water consists of heat-depleted geothermal brine or imported brine or a combination of various brines. However, the severity and the variety of suspended particles are much larger in the case of a heat-depleted brine. There are many categories and various sources of suspended solids [1].

The categorization preferred by us is by their origin:

1. Particles generated through precipitation in the flowing brines. The precipitation reactions are caused by the drastic changes of the thermodynamic conditions. Typical examples are silica, silicates, heavy metal sulfides and calcium carbonate.
2. Particles native to the producing reservoir that are transported into the injection system by the flowing brine. Typical examples are sand grains and clay particles.
3. Particles formed through mixing of incompatible reservoir water with the injected brine. These particles are also formed by precipitation reactions as those described above and, therefore, are also dependent upon the thermodynamic conditions. However, these particles are not formed because of simple pressure and/or temperature changes. Typical examples are alkaline earth metal sulfates and carbonates.
4. Particles generated by undesired precipitation reactions caused through addition of chemical additives to the brine or through chemical brine alteration. Typical examples are the calcium and iron salts of scale inhibitors (e.g., calcium phosphonates and polyacrylates), calcium fluorides and basic "alkaline scale" particles (e.g., magnesium hydroxide).

5. Particles caused by various types of corrosion. Typical examples are iron sulfides, hydroxides and hydroxy-oxides.
6. Particles caused by; oxygen contamination. Typical examples are iron oxides (as well as hydroxides and oxy-hydrates) and elemental sulfur.
7. Particles formed through bacterial reactions. Typical examples are bacteria slimes.
8. Particles consisting of dislodged formation material caused by temperature and mechanical stresses. Typical examples are clay particles.
9. Particles caused by a lack of cleanliness such as dirty pipeline and power plant components, mud and dirt in tankers, containers and other work-over equipment. Typical examples are dirt and mud particles.
10. Particles caused by a lack of inefficiency of clean-up after drilling and completion of producing wells. Typical examples are mud fines, formation cuttings and break-down products of drilling and completion fluid additives.

A detailed description of these various sources of particles in geothermal operations can be found in reports [1,13] issued by us.

At this point, we would like to emphasize that the suspended particles can have numerous sources of origin even within the same field. The particles suspended in a heat-depleted brine prior to reinjection have basically two types of origin:

1. Reservoir fines produced with the fluids.
2. Solids formed by various precipitations during drilling, production, and utilization of the geothermal fluids.

Depending upon the native materials in the reservoir, the varying conditions of drilling the wells, production methods and utilization processes, varying types and amounts of suspended solids will be found in the heat-depleted brine prior to reinjection even though the collected liquid (heat-depleted brine) has the same point of origin. This dependency of the type and amount of solids as functions of the numerous variables on the injectivity generates a rather complex set of problems for the operator of a geothermal field. Even small changes or variations of any of the sources of the suspended solids will greatly effect the types and amounts of solid material to be removed prior to reinjection [15,16].

3 MEASUREMENT OF PERTINENT PARTICLE CHARACTERISTICS

A complete description of a particle suspension in aqueous medium is essential to study the particle plugging effects on a porous medium and to design equipment for an efficient particle removal from the geothermal brines before brine injection.

3.1 PRINCIPAL PROBLEMS ENCOUNTERED DURING PARTICLE CHARACTERIZATION IN GEOTHERMAL BRINE

Below we describe some of the problems which are of principal nature and related to the highly specific situation regarding the particle characterization in various geothermal operations.

3.1.1 LABORATORY VS. FIELD MEASUREMENTS

Geothermal brines will cool down as their heat content is utilized or exploited. This cooling process causes a definite thermodynamic instability of the brines. This instability in turn, is the cause for the precipitation of salts, i.e., for the formation of particles which have to be characterized for a large number of reasons. As the particles form due to the brine instability, this instability may still be changing, thus causing not only the formation of constantly changing types of particles (i.e., particles consisting of different chemical species) but also constantly changing the geometry of still forming or already formed particles. This highly dynamic process of particle formation and particle alteration in a flowing geothermal brine causes numerous problems for a useful determination of the critical particle properties.

One could try to perform particle measurements by simulating geothermal field conditions in the laboratory. Attempts to simulate some of the complex precipitation reactions have been made [17]. However, we do not believe that particle characterization performed during laboratory experiments will have much relevance to the particles found in actual geothermal field installations. We do not believe that the hostile environment inherent to geothermal field operations can be simulated in the laboratory. Too many variables lead to the formation of particles and will change their critical properties in a flowing geothermal brine. This system seems to be too complex to be duplicated in laboratory experiments. Therefore, we strongly believe that any actual characterization of these particles must be based on methods developed and proven in real field experiments.

3.1.2 PARTICLE MEASUREMENTS VS. PARTICLE MONITORING

An operator of a geothermal field would like to determine as frequently as technically and economically feasible all the particle characteristics which are critical for his daily field operations. Preferably, he would like to obtain and record all measurements of the actual particle properties. Assuming that precise and instantaneous determinations of these critical particle properties are not possible the operator will be looking for substitute, in-line instrumentation which will allow him to monitor those particle properties or related phenomena which are most important for him to maintain his daily operations. Some kind of in-line monitors would be acceptable if these in-line monitors would allow an instantaneous indication of changing particle properties as a brine quality control measure.

3.1.3 SAMPLING VS. IN-LINE MEASUREMENTS

Assuming that there is no reliable or useful in-line instrumentation for particle measurements or monitoring, samples may have to be collected and the critical properties may have to be measured in these samples by using instrumentation and/or methods which are not adaptable for in-line operations. This method of particle characterization on samples collected in a geothermal installation is filled with "pitfalls for the unwary". As mentioned earlier, the thermodynamics of the sample suspension will be, most likely, quite different from those of the in-line fluid. Because of the effects of the thermodynamics on the particles themselves, all measurements within the collected sample may be quite irrelevant and may be non-representative for the particles within the line. Furthermore, additional uncertainties are caused by (a) the problems of collecting representative samples in a flowing suspension and (b) the time delays between the sample collection and the actual particle measurements.

3.1.4 PROBLEMS CAUSED BY PARTICLE BOUNDARIES

The particle suspension can be characterized by the properties of the particles in the suspension assuming the particle boundaries are rigidly defined and the particle properties (including its boundaries) are sufficiently distinguishable from the liquid properties (including its boundaries). These preconditions related to the particle boundaries are necessary for a successful particle characterization and may not exist in geothermal brines. Some of the particles (e.g., galena or argentite particles) may have boundaries which are very discrete and, therefore, rather easy to define and to determine. Other particles, e.g., the silica particles, may exhibit far more complex above mentioned boundary conditions.

The center part of a formed silica particle may be silica already

polymerized to various fairly high degrees. The particle shells, layers or portions outward from this center part may be polymerizing silica having still a fairly low but also varying degree of polymerization. The most outward shell layer or portion of a particle may consist of a liquid phase with strongly oriented water and monomeric acid molecules (or ion) bordering on the liquid phase.

Measuring the critical characteristics of this type of a particle may be nearly impossible because of the boundary problems. By boundary problems we mean (a) the lack of sharp and defineable boundaries in a particle of this nature and (b) the changing consistency and/or composition throughout the particle. In this present section we assume that the above described boundary preconditions are met, i.e., no boundary problems exist, thus allowing us to describe the various characteristics which are essential for the measurement of particles and for predicting the behavior of particles in porous medium. The chemical composition or nature of the particles and the density of the particle material are not considered in this present report.

Particles may be characterized by parameters or characteristics describing the chemical nature of the particles, the physical properties and the various statistical parameters. Table I-1 summarizes the various ways of characterizing particles in an aqueous suspension. The primary and secondary particle properties are described in the subsequent sections.

3.2 CONCEPTUAL PROBLEMS REGARDING PARTICLE CHARACTERIZATIONS

No matter what kind of particles have to be characterized in any type of aqueous suspension, there are still some problems related to the basic concepts of particle characterization. These conceptual problems lead to quite a confusion among geothermal field personnel and should be identified. An attempt to identify this type of problem is described in the following paragraphs.

3.2.1 PARTICLE SIZE

It can be very difficult to describe the size of any thing or body if it has very complex geometry. Suspended particles found in geothermal fluids can have a very complex geometry. Therefore, describing the size of any suspended particle can pose a real problem.

To illustrate the problem of determining the particle size we would like to describe a few examples: For a spherical, homogeneous particles, the characteristic size parameter would be its diameter, i.e., there exists no real size determining problem. For some other regular shaped particles, more than one size dimension may be necessary to describe the critical size of a given particle. On the other hand, particles of irregular

shapes may have to be characterized through their volume or through other equivalent measurable parameters, i.e., it may become impossible to describe these particles by a simple size determination. These other parameters may be converted later to an "equivalent or effective diameter". For example, if a particular method of measuring particles gives the volume of a particle, then the concept spherical diameter of a particle may be defined as the diameter of a sphere having the same volume as the particle.

There are various ways of defining the size parameter of particles. These various definitions have their origin in the techniques used in the measurement of particles. The different definitions of particle sizes are described in Table 1-2

None of these particle size definitions may be relevant for our objective to study formation damage through a particle invasion. A determination of the particle "size" without simultaneously determining the "shape" of the particles (see below) may be meaningless for investigating of a number of different damage mechanisms.

3.2.2 PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

Particle size distribution is the relationship between the size of the particles and the quantity of particles corresponding to the size. A distribution of particle sizes is always present in aqueous particle suspensions such as geothermal liquids. Therefore, an understanding of the distribution of particles is essential when one studies the plugging of a porous formation through particle invasion.

Once a particle size distribution in a suspension is known or measured, one can quantitatively determine the characteristic parameters (mean diameter, standard deviation, maximum diameter, etc.) that are useful for the interpretation of particle plugging experiments assuming the particles exhibit a rather simple shape (see below).

Particle size distributions may be presented in analytical form, in tabular form or as histograms. The analytical forms are extremely useful as they are easily adaptable for quantifying the particle plugging tendencies and for modeling the particle invasion of a porous medium. Several empirical forms of the particle size distribution functions are generally used and are summarized in Table 1-3

There are three important parameters that can be used in describing the particle size distribution. They are the "Mode", the "Median" and the "Mean". These distribution parameters are defined below:

1. The Mode of a particle size distribution is the size

corresponding to the peak on the size distribution curve. It is the most commonly used parameter. The Mode describes the size of the particle having the highest concentration of all the particles present.

2. The Median of a particle distribution is the size at which half the amount of particles are larger and the other half smaller than this size.
3. The Mean of a particle size distribution is the average size of all particles in a given suspension.

3.2.3 DEFINITIONS OF PARTICLE SHAPE PARAMETERS

A host of particle shapes are possible in any given particle suspension. A quantitative description of these particle parameters is extremely difficult. In the literature, several qualitative terms have been used to describe particle shapes. These terms are summarized in Table 1-4. These qualitative terms are not useful if one wants to describe quantitatively the effects of particle shape on the plugging of porous medium by particles.

3.2.4 OTHER PARTICLE PARAMETERS

There are at least four particle properties other than the ones mentioned in the previous sections that are important from the point of view of particle measurements and/or for the investigation of the plugging effects caused by particles. These parameters are as follows:

1. The population or concentration of particles.
2. The surface properties of particles.
3. The optical properties of the particles.
4. The electrical properties of particles.

The parameter which characterizes the amount of particles in a suspension is one of the most important quantity necessary in the study of particle invasion in a porous medium. There are three ways of expressing this parameter, namely, (1) particle population expressed as the number of particles, (2) the particle population expressed as the volume of the particles and (3) the particle population expressed as the mass of the particles per volume or weight unit of geothermal brine. These three different ways of expressing this pertinent parameter are defined below:

1. The particle population of a suspension may be expressed as the total number of particles in a unit volume or unit mass of the suspension. In this definition, the

particles are counted irrespective of their size or chemical nature. As mentioned in later sections of this report, it can be concluded that the methods based on the flow of electrolytes through orifices are suitable for such counting procedure without elaborate calibrations.

2. The particle population of a suspension may also be expressed as the total volume of particles in unit volume or unit mass of suspension. In this definition, the particle volume is counted irrespective of the chemical nature of the particles. The electrical sensing methods again are suitable for the measurement of this type of parameter. This type of measurement is useful when a broad distribution of a particle size is present. This parameter describing the particle population is used in most of our presently conducted investigations.
3. Another parameter that represents the particle content in a suspension is the particle concentration. The particle concentration in a suspension may be expressed as the total mass of suspended particles in a unit volume or mass of suspension. The determination of this type of parameter can only be accomplished by independent density measurements. However, this parameter is useful in the preparation of predetermined suspensions for the flow experiments.

In general, the quantity of particles in a suspension is an extremely important parameter in studying the plugging of the porous medium by invading particles.

3.2.4.1 SURFACE PROPERTIES OF PARTICLES

The surface properties of particles include two different aspects of particles and, at the present time, they can be stated only in rather qualitative terms. These are described in this section. One aspect of the surface properties of particles in suspension arises in the case of suspensions of extremely small particles (e.g., smaller than 0.5 microns). During the flow of such suspensions through porous media, the interaction between the surfaces of the porous medium and that of the fine particles in the suspension consists of surface forces. The origin of these surface forces may result through electrostatic or dipole interactions. However, the details describing such surface forces are difficult to determine experimentally. As a result, it is convenient to treat these surface forces as surface tension. In other words, the particles may tend to adhere to the solid surface of the porous medium and eventually may plug the formation, even if these particles are much smaller than the pore throats within the porous medium. This type of situation may exist in the case of flow of clay fines through the porous

formation.

The second aspect of the surface properties is concerned with the following "physical" surfaces boundaries:

1. The well-defined solid boundary of the particles consisting of sulfates, carbonates, heavy metal sulfides, etc.
2. The "fuzzy or transitional" boundary between the particles and the liquid as one finds in the case of the polymeric growth of amorphous silica particles (as mentioned earlier). The plugging effects of these two kinds of properties need further investigation.

.3.2.4.2 ELECTRICAL PROPERTIES OF PARTICLES

As mentioned in this report in a later section, the electrical capacitance within the electrolytes flowing through an orifice may change due to particles suspended in these electrolytes. These changes of the electrical capacitance offer a powerful way of measuring particle sizes. It may be suspected that the electrical properties of the particles may cause difficulties in the measurement of particle sizes by such methods. The evidence from the literature so far seems to indicate that such effects are insignificant.

3.2.4.3 OPTICAL PROPERTIES OF PARTICLES

The optical properties of particles are important and their nature should be known prior to the use of optical methods in the determination of particle sizes. The two most important optical parameters that are needed are, (1) the refractive index and (2) opacity of the particles. The refractive index becomes important in those optical methods that use the scattered light at an angle of scattering in excess of 5'. The opacity of the particles become important in those optical methods which use light obscuration or attenuation principles.

3.2.5 RELAVANCE OF VARIOUS PARAMETERS FOR PARTICLE MEASUREMENTS

The important particle properties that need to be measured in any study dealing with formation damage are the size, size distribution and the shape of the suspended particles. The criteria for the selection of particle measuring devices depend on the nature and the properties of both the particles and the fluid of the system under consideration. From the point of view of particles, such parameters as the size of the particle itself, the refractive index and the color of the fluids become important. On the other hand, from the point of view of the particle/fluid system, such properties as the solubility of the

particle in the fluid, other chemical reactions between the particle and the fluids and the relative refractive index of the solid particles with respect to the fluid become also important. The relative importance of each of the above mentioned properties depends upon the actual methods used for measuring the particle characteristics.

3.3 MEASUREMENT OF PARTICLE PARAMETERS

In addition, most of the methods known so far are not easily adaptable for in-line measurements of particle characteristics. Thus, the selection of instruments for measuring particle sizes or simply for monitoring of particles of given sizes in geothermal operations requires an understanding of the physical principles involved in the particle measuring instrumentation. The details of the various physical principles generally used in measuring particles are summarized with pertinent references in a VR publication [13]. Several commercial producers of instruments have utilized some of the physical principles mentioned [13]. They have manufactured commercial measuring instruments for sizing particles.

There are many instruments commercially available for adaption in determining particle size distribution in a liquid medium. However, not all the methods are readily adaptable for the measurements of particles in an in-line operation. There are several requirements that should be satisfied for an instrument to be useful as an in-line instrument. The characteristics of the instruments for in-line particle measurements are listed below:

1. It must operate automatically and continuously under preset and preprogrammed instructions.
2. The response time of the instruments from observation to readout must be short, i.e., nearly instantaneous.
3. It must be accurate and precise.
4. It must have the capability of detecting and measuring a wide spectrum of particle sizes and distributions.
5. It should have the capability to look at the shape factor.
6. It must be operational with high and low particle concentrations.
7. Instruments and sensors must be robust; they must be corrosion and erosion resistant.
8. It must not disturb the flow pattern of the particulate and fluid phase.

9. It should have the capability to study the changes in the particle size distribution with time.
10. It should be economically affordable.

In our opinion, there is not single instrument commercially available at the present time that can satisfy all the characteristics mentioned above.

3.3.1 ELECTRICAL RESISTANCE CHANGE

This method has application in the rapid sizing of particles in electrically conducting liquids. This method is based on the modulation of electrical current due to changes in electrical conductivity caused by the passage of particles through a small aperture between two electrodes. The method relies on the assumption that the modulated pulse is proportional to the particle volume.

3.3.2 LIGHT SCATTERING

The instruments based on light scattering find their use in both gaseous systems and liquid suspensions. The method is based on the light scattering property of particles. The intensity of scattered light by particles as a function of angle is related to the particle characteristics. The light scattering methods are employed in several commercial instruments.

3.3.3 LIGHT OBSCURATON

The method based on light obscuration is useful for gaseous and liquid suspensions. The principle of the method is based on the light blockage by particles. The operating principle of the method is described in the next paragraph.

A small sample of fluid passes through a small rectangular passage window. A beam of light is allowed to pass through the window and is detected by a photoelectric detector. Any particle passing through the window interrupts a portion of the light beam according to its size. This causes a momentary reduction in the photoelectric signal which is used in determining the particle size. The light obscuration technique is an extremely useful technique for determining the particle size distribution in a suspension. However, this method is very restricted in the sense that it is useful only to extremely small volumes of samples at low particle concentrations.

3.3.4 BETA RAY AND X-RAY ATTENUATION

The methods based on beta-ray and X-ray attenuation are useful for liquid suspensions. The method is based on separating particles of various sizes by means of centrifugal force applied to the system and measuring the beta ray or X-ray absorption by

passing the rays through the system. These methods are not suitable for application to the present work, as they require elaborate mechanical forces such as centrifugal force to be applied to the suspension.

3.3.5 ULTRASONIC ATTENUATION

The method based on ultrasonic attenuation is suitable for liquid suspensions. However, the smallest particles that are detected by this technique are 60 microns. Therefore, it is not useful for geothermal application where the suspended particles are expected to be much finer.

3.3.6 ULTRASONIC SCATTERING

The method based on ultrasonic scattering, a relatively new technique, may offer quite a few possibilities as a particle monitor and was tested by us for field application. The method is based on the dependence of the scattering intensity of ultrasonic waves on small-sized particles.

3.4 PARTICLE SIZE DISTRIBUTION MEASUREMENT DATA

Although the determination of the type of these materials is relatively easy, an accurate particle size distribution measurement is very difficult to achieve, especially in the submicron range.

Several particle analyzers were used in our laboratory [2,3,5].

1. Particle Data Inc., Particle Counter:

Basically, this device measures electrical resistivities, thereby requiring that the solution being analyzed have a certain salinity. In order to perform a particle size distribution measurement in the submicron range with the meaningful accuracy, the coincidence errors should be minimized [13]. This narrows considerably the utility of this particle counter to solutions having low concentrations.

2. Micropure Systems, Inc., MCM-1100A:

This particle counter could theoretically measure particles down to 0.3 microns. However, we were unable to get an accurate submicron particle size distribution measurement using the instrument.

3. Microtrac Particle Counter:

The Microtrac particle counter measures the particle size distribution through a process of cataloging the

forward scattered laser beam light. The data obtained give the differential particle size distribution expressed as the percentage of the total number of particles in various size ranges. All the statistical parameters are computed and printed by the micro-processor of the instrument. A flow-through cell makes this instrument feasible for on-line measurements of particles suspended in the flowing liquid.

4. Differential Scattering Particle Counter, Differential I

Differential I measures the intensity of laser light scattered by suspended particles as a function of the angle of the light scattering. The scattered intensity pattern of the light is characteristic of (a) the particle size, shape and concentration and (b) the difference in refractive index between the liquid and the suspended particles. Theoretically, such data can be utilized to determine the particle characteristics of geothermal fluids by using a standard differential scattering atlas.

5. Sedimentation:

Low concentrations of particles were put in two separate burettes and allowed to settle. According to Stoke's Law, particles with 0.05 micron diameter would settle at a rate of about 0.5mm a day. The problem we encountered here is that particles cling to the inner surface of the burette, making the reading of the interphase very difficult. Also, the effect of particle concentrations on the sedimentation is believed to have some detrimental impacts on the reliability of this method.

6. Filtration:

Solutions of fine particles in concentration barely high enough to be optically visible were run through different size millipore filters. All the particles were completely filtered out. During the filtration process, all the particles seem to have been attached to the filters. Thus the filtration method does not seem to be a useful technique for particle size measurements.

7. SEM:

Eventhough the particle size distribution can be determined only qualitatively by SEM methods, the method can give a good idea not only about the size of the particles but also about their shapes. One has to bear in mind that for a sample to be analyzed by SEM, it has to be coated under vacuum, usually with a solid palladium or gold alloy. This sample preparation

process would result in giving larger values to the particles than the values in the original suspension.

4 METHODS TO PREDETERMINE RESERVOIR DAMAGE DUE TO SUSPENDED PARTICLES

One of the major problems related to wellbore and reservoir damage due to particle suspensions is created by the need to determine what type of damage can be expected if various types of particle suspensions are injected. As mentioned above various types of particles injected under various sets of field injection methods can create various types and degrees of wellbore and reservoir damage. The main problem is to determine what type of particles will create what damage to what degree prior to starting the injection.

There are at least two different ways to predict the life-time of an injection well if particle suspensions are injected:

1. Filter Method:

A paper or any other type of filter having certain filter characteristics is used in a holder and the particle suspension is forced through this filter. Pressures and flow rates during a flow experiment are measured as a function of time to predict the half-life time of the injection well.

2. Core Flow Test Method:

Actual cores instead of a filter are used for this method. Again, the particle suspensions are forced through the cores and the pressures and flow rates are measured as a function of time to predict the life-time of the well.

Both methods are briefly described in the following paragraphs.

4.1 PREDICTIONS BASED ON FILTER METHODS

The standard membrane-filtration tests are based on Barkman-Davidson method [12] and they consist of flowing of water through a 0.45 micron pore-sized membrane filters at constant differential pressure. From these tests, a qualitative indication of water quality is obtained from the decline in filtration rate caused by the deposition of suspended solids on the filter. Unfortunately, this method suffers from a number of basic and critical shortcomings and limitations.

The behavior of a cake formed by particles on a millipore filter is not necessarily related to the behavior of particles forming a cake in the wellbore or penetrating the reservoir and forming

damage collars. The reasons seem to be rather obvious. Some short-comings of the filter test itself were outlined in previous paragraphs. However, even if the particle properties would be correctly measured, the method still would not be very reliable for a number of additional reasons:

1. The water must enter the reservoir uniformly. The injectivity must be the same over the entire injection profile. Hardly any well will exhibit this profile. If fractures extend into the wellbore, the method is not useable at all.
2. The surface of the filter and the sandface of the injection interval must receive the same type and number of solids per unit volume of injected liquid. "Proper" collecting of a representative fluid sample for the filter is nearly impossible. For example, if more solids (e.g., clay particles or heavy metal sulfides) are flowing in the lower half of an injection water line but the liquid from the upper half of the same line is examined through the filter, erroneous data will result: the coverage of equal areas on the filter and on the sandface will be different. Actual isokinetic sampling in the field had shown that this danger is real in many geothermal brine lines.
3. The permeability of the filter cake must be the same as that of the cake inside the wellbore. Experience in the laboratory and sandpack flow tests ("thick cake") have shown that the packing of the particles in the cake is pressure dependent, i.e., the arrangements of particles and particle aggregates dependent upon pressure profiles. For example, a low pressure applied across the filter cake will result in a different cake permeability than that resulting from the higher pressure in the wellbore. The pressures across the millipore filter cake can be quite different from those across the wellbore cake, thus yielding two different permeabilities and with that erroneous results.
4. The particle arrangement on any filter cake is also flow rate dependent. Here again different conditions on the filter and on the sandface will lead to erroneous data.
5. The filter cake in the wellbore must not have any fractures at all, which cannot be guaranteed.
6. The suspended particles in the water cannot be smaller than the filter pores and larger than the pore throats in the reservoir rock. The true pore throat size in the reservoir is generally not known, thus making it nearly impossible to predict particle invasion and the extent and location of damage collars.

7. Water injection must never be interrupted because stoppage or even back-flow may cause rearrangement of the particles in the cake. Changes of the pressure drop across any cake may cause particle rearrangements in the cake.
8. Variations of the particle geometry and the formation permeability as found in many wells can cause the simultaneous occurrence of various reservoir damaging mechanisms. For example, all the particles may form a cake at one interval, whereas, some particles may penetrate into the reservoir at another interval, thus possibly causing formation damage after a reservoir penetration of the particles. Another kind of mixed behavior is also conceivable: all particles retained on the millipore filter will form a cake having a certain cake permeability (depending on the many factors mentioned above), whereas, many of these particles in an actual well may sink to the bottom (wellbore fill-up), thus resulting in permeability of the wellbore cake totally different from that found and measured in the millipore filter cake.
9. Any mixed behavior will result in wrong predictions. "Deep bed invasion" or forming of damage collars can be predicted only in a very qualitative way unless the radii of the collars can be calculated from filter test data. No such calculation or prediction have been described in the open literature. Therefore "prediction" of damage collars is presently rather vague and meaningless.
10. The slope of the curve "cumulative volume vs. square root of time" may change after an extended millipore filter time. The second slope is more important than the initial slope. There may always be uncertainties after a given filtration period as to the proper slope determination. This is particularly true in fluids containing colloidal material such as amorphous silica. Geothermal brines are notorious for silica precipitations.

It is self-explanatory that all the basic limitations of the Barkman-Davidson method mentioned above hold also true for a geothermal injection brine. However, typical geothermal brines offer additional restrictions for the usefulness of the method:

1. The thermodynamic instability of geothermal brines offer additional problems. Precipitations can easily occur downstream of the sample port for the millipore filter, thus yielding erroneous predictions. Silica especially is notorious for "delayed" or "after" precipitations (kinetics). In these cases, more particles will form

downstream of the filter station, thus predicting longer injector half-lifetimes than experienced in the field.

2. The pressure and temperature drops across the filter cake and the filter itself can cause additional types of precipitations, i.e., more and different particles are found within the filter than in the well. This will result in rather pessimistic lifetime predictions.
3. Cementing of the materials may occur in the wellbore but not on the millipore filter. This will cause an effect opposite to that described above. This phenomena can be frequently observed in geothermal wells. The colloidal silica particles will "bind" the formerly loose suspended particles over longer injection periods. Unfortunately, this cementing occurs within the cake inside the wellbore. Bailed samples of the wellbore cake and fill-up often do not resemble loose particles but cemented rock with almost no permeability. The wellbore cake may be only a fraction of an inch thick but will decrease the injectivity to intolerable levels. In these cases, (and they are the over-riding majority!) the millipore filter test will yield too optimistic "data" because it does not simulate these time-dependent (long term) reactions.
4. Quite often ductile particles are suspended and/or formed in the injected brine. The silica particles are especially prone in this regard. These particles will penetrate into the millipore filter without passing through. This ductility is also pressure and time dependent. These particles may plug the filter but not the sandface. Some geothermal brines cannot be filtered with the millipore filter, i.e., the predicted half-lifetime are zero, whereas, the well may take the fluids for extended periods of time. We had extremely bad experiences in this regard in some geothermal wells in New Mexico.

Any combination of the above-mentioned effects may occur simultaneously, thus rendering the Barkman-Davidson method totally unreliable in geothermal operations. The injection well performance predicted from millipore filter tests is in almost all cases quite different from the well performance experienced in the field. Some "correct" predictions may be explained by the fact that the errors leading to pessimistic and optimistic predictions may cancel by accident.

4.2 PREDICTIONS BASED ON CORE FLOW TESTS

As an alternate to the membrane-filtration tests, core flow tests are proposed and used by some geothermal investigators. There are two types of core tests. These are:

1. Core testing in the field.
2. Core testing in the laboratory.

4.2.1 CORE TESTING IN THE FIELD

Lawrence Livermore Laboratories have utilized some improvements on the membrane filtration tests and they are as follows:

1. Replace the filter with actual cores to account for the difference in the pore geometry of the filter itself and that of the reservoir material.
2. Use of an "incubation cell" to account for some effects of the thermodynamic instability of geothermal brines. A sample of the injection brine is tested through a core by using a "load cell" which by itself is an improvement of the experimental set-up. This "load cell" will keep pressure and temperature changes of the brine at a minimum. An aliquot of the sample is incubated under "in-line" conditions for an extended period of time and then tested again to account for the reaction kinetics which change the particle consistency and geometry in the wellbore.

This method, at least theoretically, could be incorporated into a test procedure that takes into account all the thermodynamic and kinetic factors that make the Barkman-Davidson method in its original form so unreliable for geothermal operations. This method would represent an improvement toward establishing a better relationship between the thermodynamic and kinetic brine conditions in the wellbore and the data obtained with a filter apparatus. However, even this improved method cannot overcome problems caused by the hydrodynamic conditions (low profiles) within the wellbore and many of the basic short-comings of the Barkman-Davidson method mentioned earlier.

In addition, the core testing in the field cannot be comprehensive. It cannot duplicate all the various ways of formation damage in a single test prior to actual injection.

4.2.2 CORE TESTING IN THE LABORATORY

The injectivity predictions can be made in a more productive manner by a combination of laboratory tests coupled with measurements of suspended particles in injection fluids. The

laboratory tests should be conducted using core samples which are representative of the variations in porosity and permeability of the formation in question. A systematic testing of the representative cores with fluids containing appropriate particle suspensions can provide useful information necessary for the designing of the injection operation.

5 METHODS TO REMOVE DAMAGING PARTICLES FROM GEOTHERMAL BRINES

As mentioned above, certain particles suspended in a geothermal brine may have to be removed from this brine prior to reinjection. Depending on the maximum size of the particles that can remain in the brine different particle removal techniques may have to be used. There are basically two different removal techniques for a low temperature (low enthalpy) brine such as the SSDLR brine:

1. Sedimentation.
2. Filtration.

Both methods have pros and cons as described below. Other particle removal techniques such as reactor-clarification are useful for high temperature geothermal brines but may not be economically suitable for low enthalpy geothermal operations.

One requirement is essential for all geothermal reinjection operations: The brine must not be contaminated with oxygen through a contact with air. Any oxygen content in the brine will lead to severe technical problems. The corrosion rates may sky-rocket thus leading to costly maintenance and repair problems. The corrosion products, particularly iron hydroxides and hydroxichlorides, will cause severe injectivity problems even if their concentrations in the reinjected brine is only on the order of one milligram per liter.

This need to keep the brine free of oxygen makes it necessary to enclose all particle removal equipment. This means, settling tanks or filters which are open to air are not suitable for this application.

5.1 FILTER METHODS

Filter seems to offer the best solution for an efficient particle removal. Numerous types of filters suitable for a geothermal operation such as ADARO's SSDLR project exist. It leads beyond the scope of this report to even list the different types.

A proper filter will have to be chosen. Its design not only depends upon the site-specific needs dictated by the pertinent characteristics of the suspended particles but also upon other local conditions and requirements. Cost, availability and

maintenance requirements are not the least important considerations for choosing the filter.

If an operator decides to use a locally made filter, the choice falls in most cases on a sandbed filter. The "reversed" sandbed filters are the better choice. In these filters, the finer grains of the filter material are located near the bottom and the coarser grains near the top. The regular, more conventional type sandbed filters will require a more frequent backwash cycle which will require higher maintenance costs and larger filter sizes.

5.2 SEDIMENTATION

A properly designed and operated sedimentation or clarification system offers a lower investment cost and less maintenance problems than any of the suitable filters. As we will show later, we believe that the main fraction of the particles produced with the SSDLR brine can be removed by settling methods. A small filter may be used as a "polisher" downstream of the sedimentation systems. Again, it would be no major problem to build a particle removal system locally in Spain or even Madrid for the SSDLR project.

TABLAS I-1 HASTA I-5

FIGURAS I-1 HASTA I-2

TABLE I- 1PERTINENT PARTICLE CHARACTERISTICS IN AQUEOUS SUSPENSION

- 1) PROPERTIES OF THE PARTICLE MATERIAL
 - a) Chemical Composition of the Particle
 - b) Density of the Particle Material
- 2) PRIMARY PARTICLE PROPERTIES
 - a) Particle Size Parameters
 - b) Particle Shape Parameters
 - c) Particle Size Distribution
 - d) Particle Concentration
- 3) SECONDARY PARTICLE PROPERTIES
 - a) Optical Properties
 - b) Electrical Properties
 - c) Surface Properties

TABLE I- 2

DEFINITIONS OF PARTICLE DIAMETER

<u>NAME</u>	<u>SYMBOL</u>	<u>DEFINITION</u>
1. <u>Equivalent Sphere Diameter</u>		
a. Volume Diameter	d_v	Diameter of a sphere having the same volume as the particle.
b. Surface Diameter	d_s	Diameter of a sphere having the same surface as the particle.
c. Surface to Volume Diameter	d_{sv}	Diameter of a sphere having the same external surface to volume ratio as a sphere.
d. Drag Diameter	d_d	Diameter of a sphere having the same resistance to motion as the particle in a fluid of the same viscosity and the same velocity.
e. Free-Falling Diameter	d_f	Diameter of a sphere having the same density and the same free-falling speed as the particle in a fluid of the same density and viscosity.
f. Stoke's Diameter	d_{st}	The free-falling diameter of a particle in the laminar flow region ($Re \leq 0.2$). Here Re represents the Reynold's number.
g. Sieve Diameter	d_{si}	The width of the minimum square aperature through which the particle will pass.
2. <u>Equivalent Circle Diameters</u>		
h. Projected Area Diameter	d_a	Diameter of a circle having the same area as the projected area of the particle resting in a stable position.
i. Projected Area Diameter	d_p	Diameter of a circle having the same area as the projected area of the particle in random orientation.

j. Perimeter Diameter	d_c	Diameter of a circle having the same perimeter as the projected outline of the particle.
3. <u>Statistical Diameter</u>		
k. Feret's Diameter	d_F	The mean value of the distance between pairs of parallel tangents to the projected outline of the particle.
l. Martin's Diameter	d_M	The mean chord length of the projected outline of the particle.
m. Shear Diameter	d_{sh}	Particle width obtained with an image shearing eyepiece.
n. Maximum Chord Diameter	d_{ch}	Maximum length of a line limited by the contour of the particle.

TABLE I- 3QUALITATIVE DEFINITION OF PARTICLE SHAPE

<u>NAME</u>	<u>DESCRIPTION</u>
Acicular:	Needle-shaped
Angular:	Sharp-edged or having roughly polyhedral shape
Crystalline:	Freely developed in a fluid medium of geometrical shape
Dendrite:	Having a branched crystalline shape
Fibrous:	Regularly or irregularly thread-like
Flakey:	Plate-like
Granular:	Having approximately an equidimensional irregular shape
Irregular:	Lacking any symmetry
Modular:	Having rounded, irregular shape
Spherical:	Global shape

TABLE I- 4

PARTICLE DISTRIBUTION FUNCTIONS

<u>DISTRIBUTION</u>	<u>FUNCTIONAL FORM</u>	<u>COMMENTS</u>
1. NORMAL DISTRIBUTION	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp -(x-x_a)^2/2 \sigma^2$	Rarely fits the actual distribution
2. LOG-NORMAL DISTRIBUTION	$f(x) = \frac{1}{\ln\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp-(\ln x - \ln x_a)^2/2\ln^2 \sigma_g$	Commonly used in particle size work
3. ROSIN-RAMMLER DISTRIBUTION	$F(x) = \exp -(x/x_R)^n$	Widely used in particle size work
4. HARRIS'S THREE PARAMETER DISTRIBUTION	$F(x) = 1-(x/x_0)^s$	Very versatile distribution function

NOMENCLATURE

- $f(x)$ = The particle size distribution function, which represents the frequency of occurrence of particles having a size of units.
- x_g = Arithmetic mean size.
- σ = Standard deviation of the particle sizes.
- x_g = Geometric mean size.
- σ_g = Geometric deviation factor, which by convention is defined as the ratio of the size at 84% frequency of occurrence to the size at 50% frequency of occurrence.
- $F(x)$ = Cumulative fraction over size,
- x_R = A constant, which is a measure of the particle size range.
- n = A constant characteristic of the particle material.
- x_0 = The maximum size of the particles.
- s = An empirical constant characterizing the given particles.

TABLE I-5METHODS OF MEASURING PARTICLES IN-LINE IN
VARIOUS PARTICLE SYSTEMS

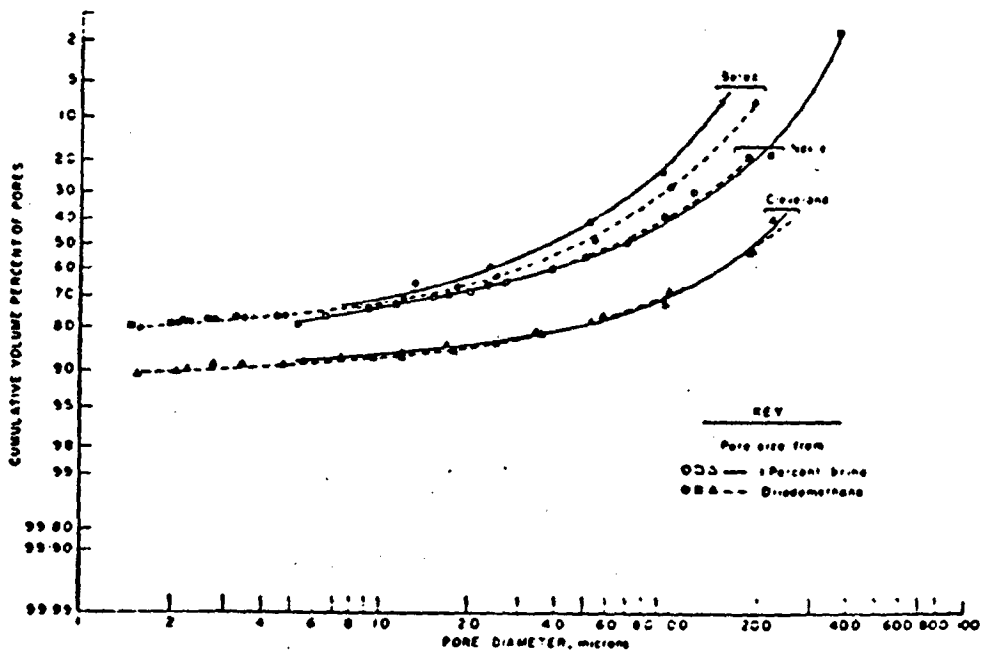
1. SOLID PARTICLES IN GAS

- a. Light Scattering
- b. Light Obscuration
- c. Acoustic Interference
- d. Pressure Drop in a Nozzle
- e. Impact and Momentum Measurement
- f. Electrostatic Capture
- g. Magnetic Flux Variation Measurement

2. SOLID PARTICLES IN LIQUIDS

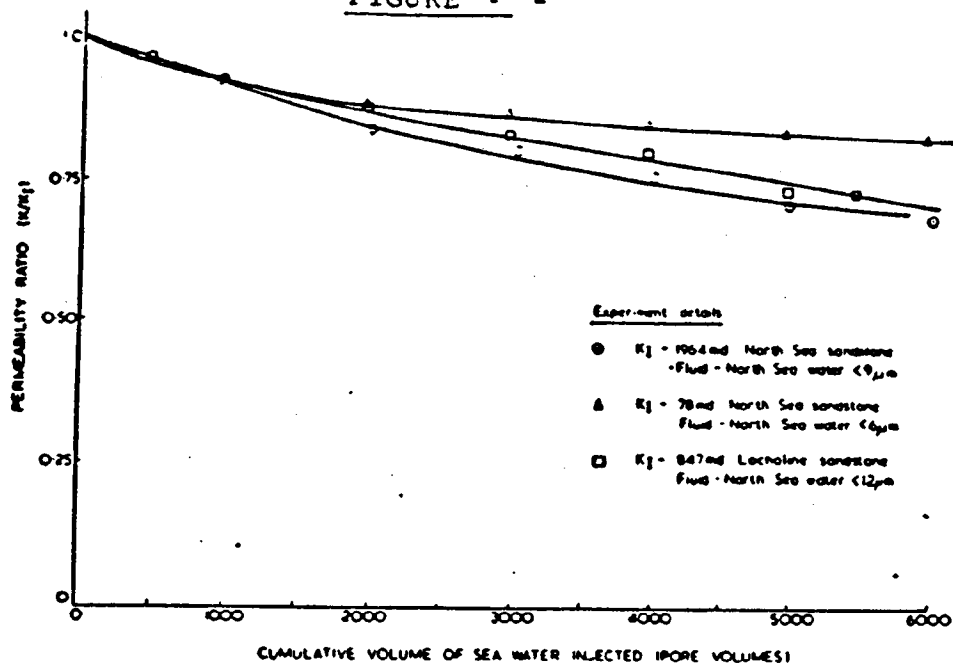
- a. Electrical Resistance Change
- b. Light Scattering
- c. Light Obscuration
- d. X-Ray Absorption
- e. Beta Ray Attenuation
- f. Ultrasonic Attenuation
- g. Ultrasonic Scattering

FIGURE I-1

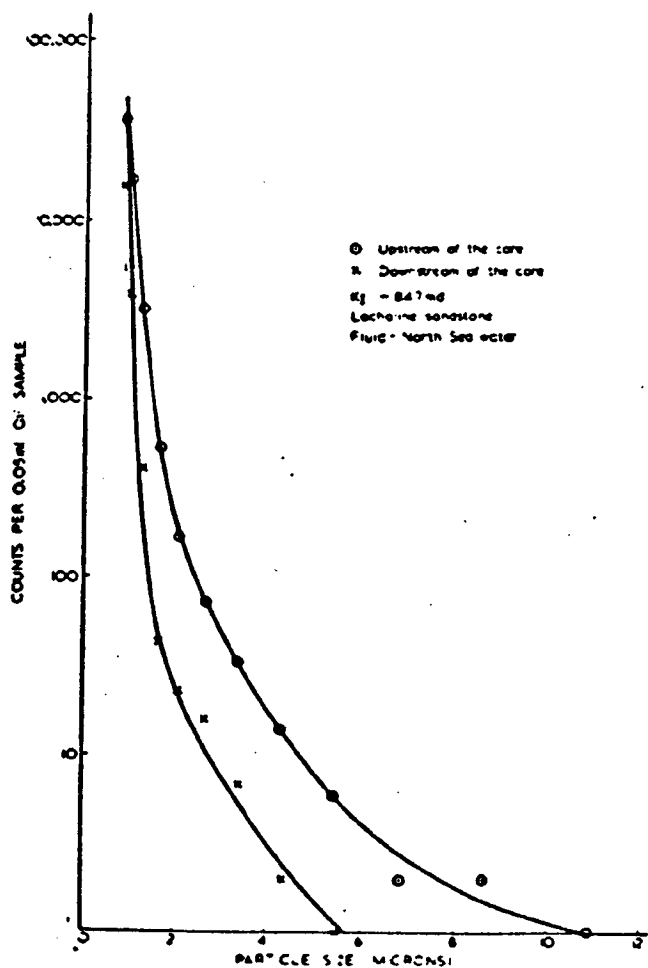


Volume percent pore size distributions measured with 1% brine and difodmethane.

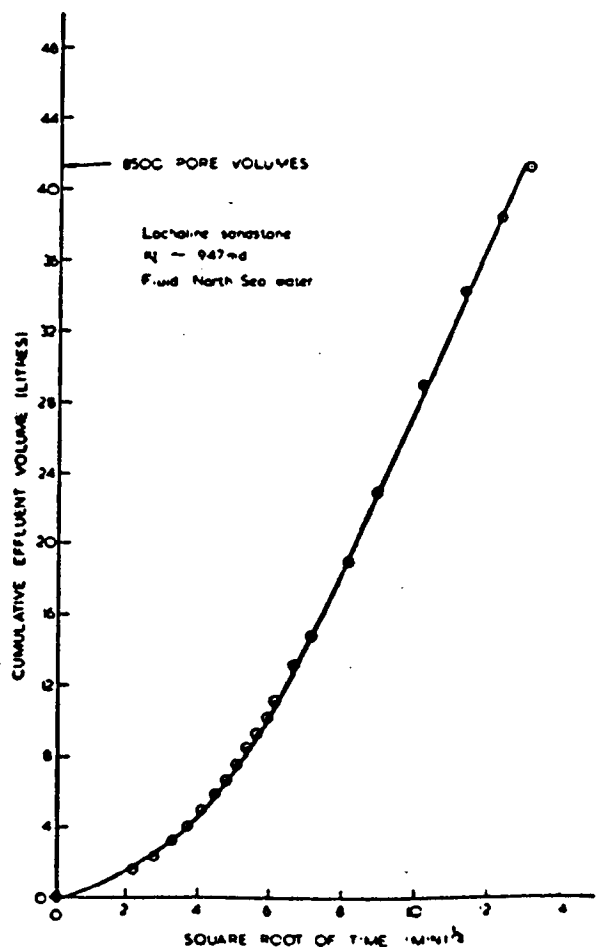
FIGURE I- 2



Permeability reduction in sandstone systems resulting from injected North Sea water



Particle size analysis of sea water before and after core



Egerton and Davidson plot of constant pressure plugging test

APENDICE II

RETIRADA DE LAS PARTICULAS DEL FLUIDO GEOTERMICO DE
SAN SEBASTIAN DE LOS REYES.

APENDICE II

RETIRADA DE LAS PARTICULAS DEL FLUIDO GEOTERMICO DE SANSEBASTIAN DE LOS REYES

En el capítulo 9 de este informe, "Interpretación de las pruebas sobre el testigo", se recomienda que se saquen de la salmuera enfriada, antes de la reinyección, todas las partículas de un tamaño mayor a aproximadamente 2 micrones, y esto mediante dos métodos diferentes :

I - Sedimentación

2 - Filtración

Aunque la filtración sea sin duda el método más eficaz, se sugiere que todas las partículas mayores a aproximadamente 13 micrones sean retiradas utilizando un depósito de descanso adecuado, en ausencia de aire.

Tales depósitos de descanso se construyen corrientemente en todo el mundo, por diferentes compañías especializadas en instalaciones de agua potable y en el tratamiento de aguas industriales. Una de estas compañías es DEGREMONT, la cual tiene sucursales y compañías licenciadas en más de 80 países, entre ellos España.

Dégremont France estima que un depósito de descanso cerrado, de 15 metros de diámetro, capaz de tratar 200 metros cúbicos de salmuera geotérmica enfriada por hora, convendría y costaría aproximadamente 500.000 FF.

Un taller de filtración, compuesto de filtros de arena y antracita, sin contaminación por aire, que pueda eliminar todas las partículas mayores a 2 o 3 micrones antes de la reinyección de la salmuera geotérmica enfriada, necesitaría tres unidades de filtros de capa de arena, estando uno de ellos usualmente en limpiamiento ; la capacidad de cada una de las unidades será aproximadamente de 70 metros cúbicos por hora.

Semejantes talleres de filtración son construídos corrientemente en todo el mundo para el agua potable e industrias químicas y de petróleo. DEGREMONT de Francia, con sus 80 sucursales en muchos países, está especializada en la instalación de semejantes equipos de filtración. Han estimado, sobre la base de los parámetros dados en este informe, que se necesitan tres unidades de filtros de capa de arena y antracita, de 2 m de diámetro, completadas por un equipo de limpiamiento y fuera de todo contacto con el aire, para tratar el fluido geotérmico enfriado del pozo N° I de San Sebastián de los Reyes, antes de la reinyección. El costo de este taller de filtración está estimado entre 2.300.000 de FF y 2.500.000 de FF.

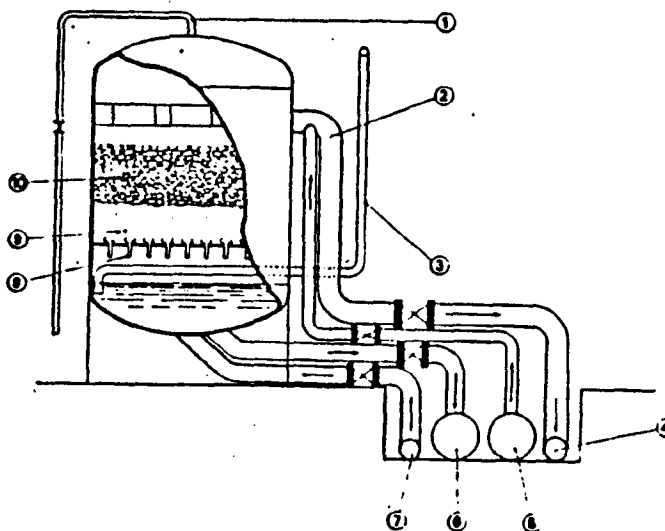
Este conduce al costo total estimado para el equipo de eliminación de partículas (depósito de descanso y unidad de filtración), entre 2.800.000 FF y 3.000.000 FF.

Este costo total representa aproximadamente el 10 % del costo total de la instalación de un proyecto habitual de calefacción geotérmica, incluyendo los pozos, las bombas de fondo y todas las instalaciones de superficie.

Algunos ejemplos de equipos de retirada de partículas, como es utilizada en las industrias de agua potable y del petróleo, están dibujados en las figuras II-1 a II-5.

DEGREMONT France considera la posibilidad de realizar la totalidad de la retirada de partículas, solamente con las tres unidades de filtros de arena y antracita. Este equipo habrá de ser dibujado y construido por DEGREMONT ESPAÑA. El costo mencionado es el costo estimado en Francia. Se puede que este costo sea más bajo en España.

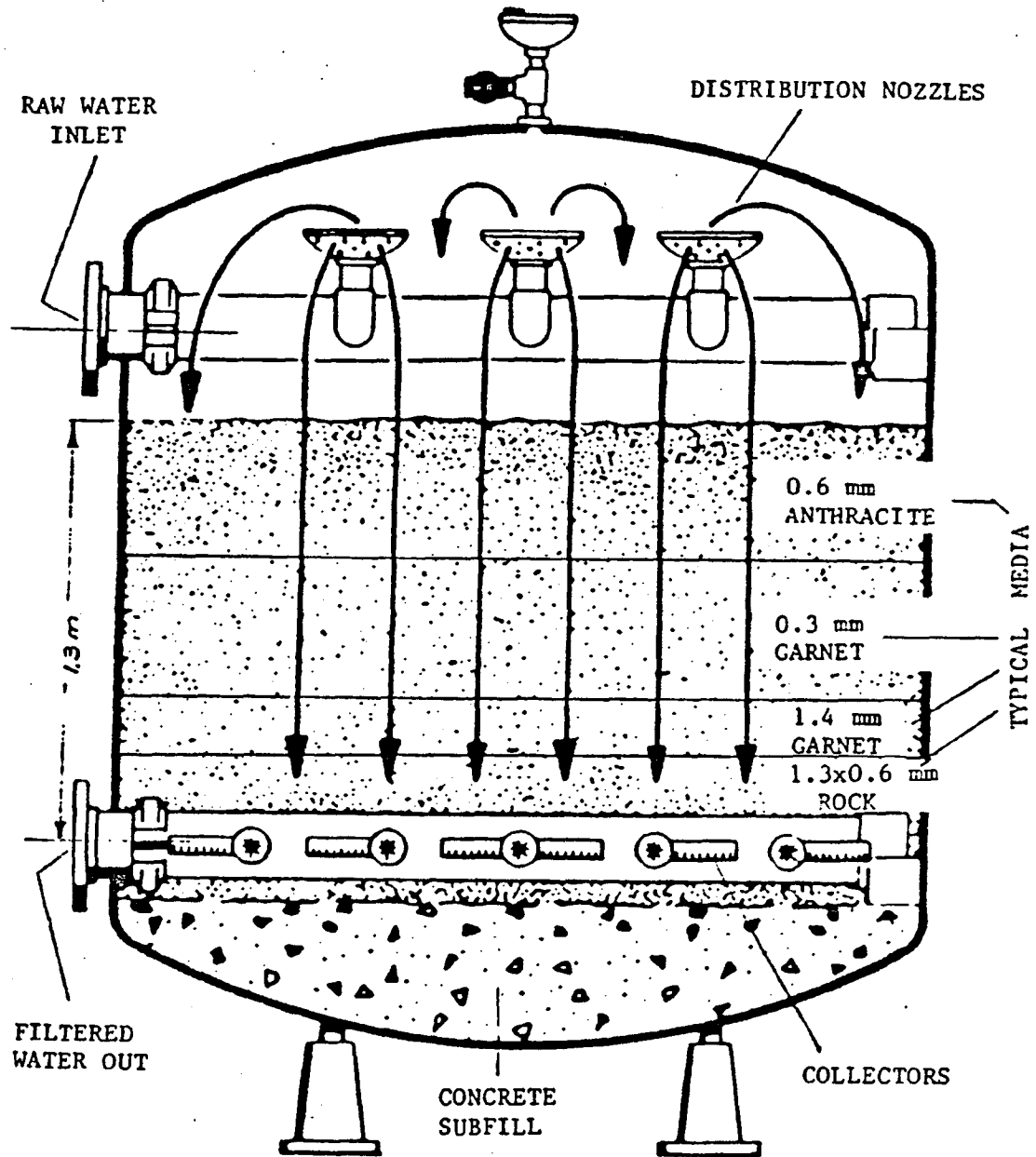
FIGURAS II-1 HASTA II-5



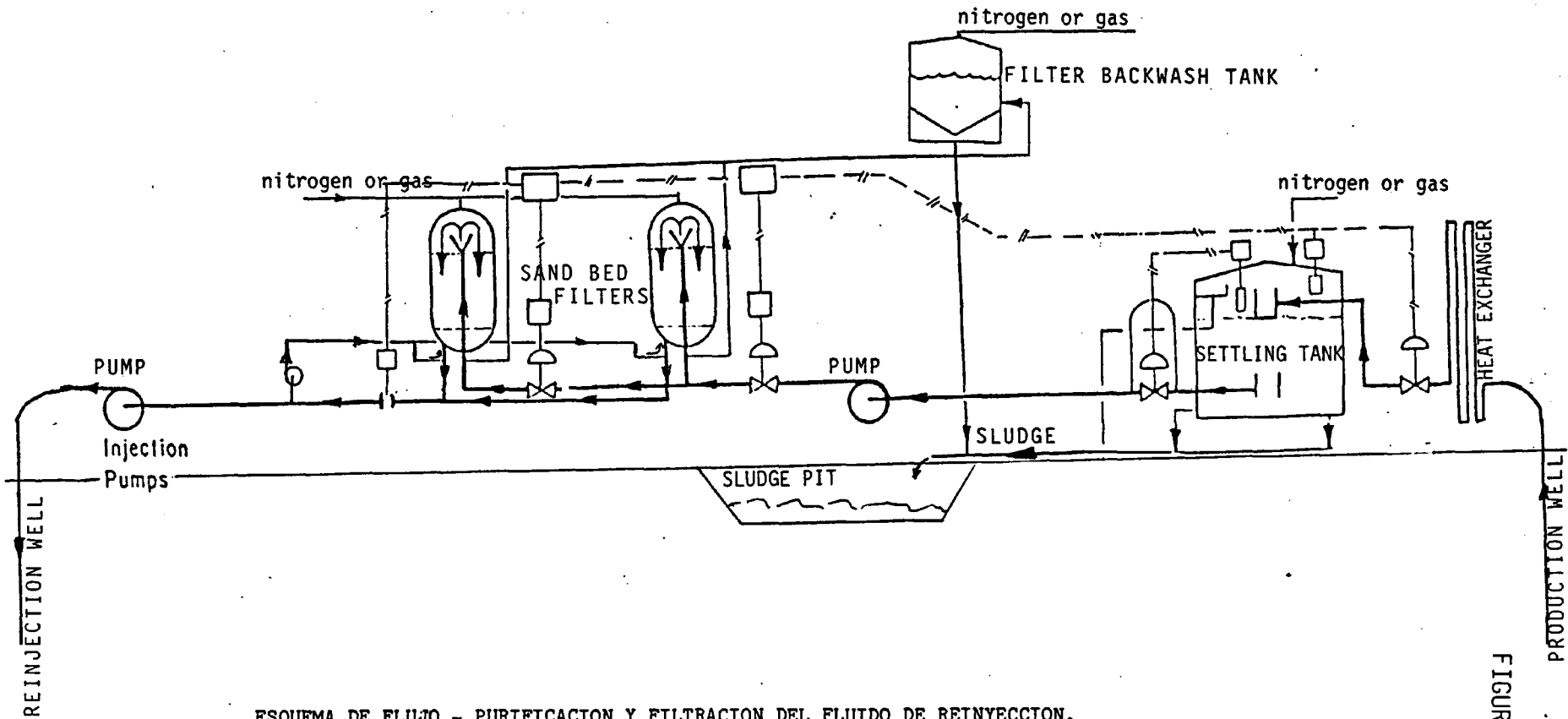
- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1. Vent. | 6. Filtered water outlet. |
| 2. Wash-water outlet | 7. Wash-water inlet. |
| 3. Air inlet pipe. | 8. Floor complete with nozzles. |
| 4. Wash-water discharge. | 9. Sand. |
| 5. Raw water inlet. | 10. Anthracite. |

UNIDAD DE FILTRACION CON CAUDAL MUY ALTO.

FABRICADO POR MEDIASUR - FRANCIA

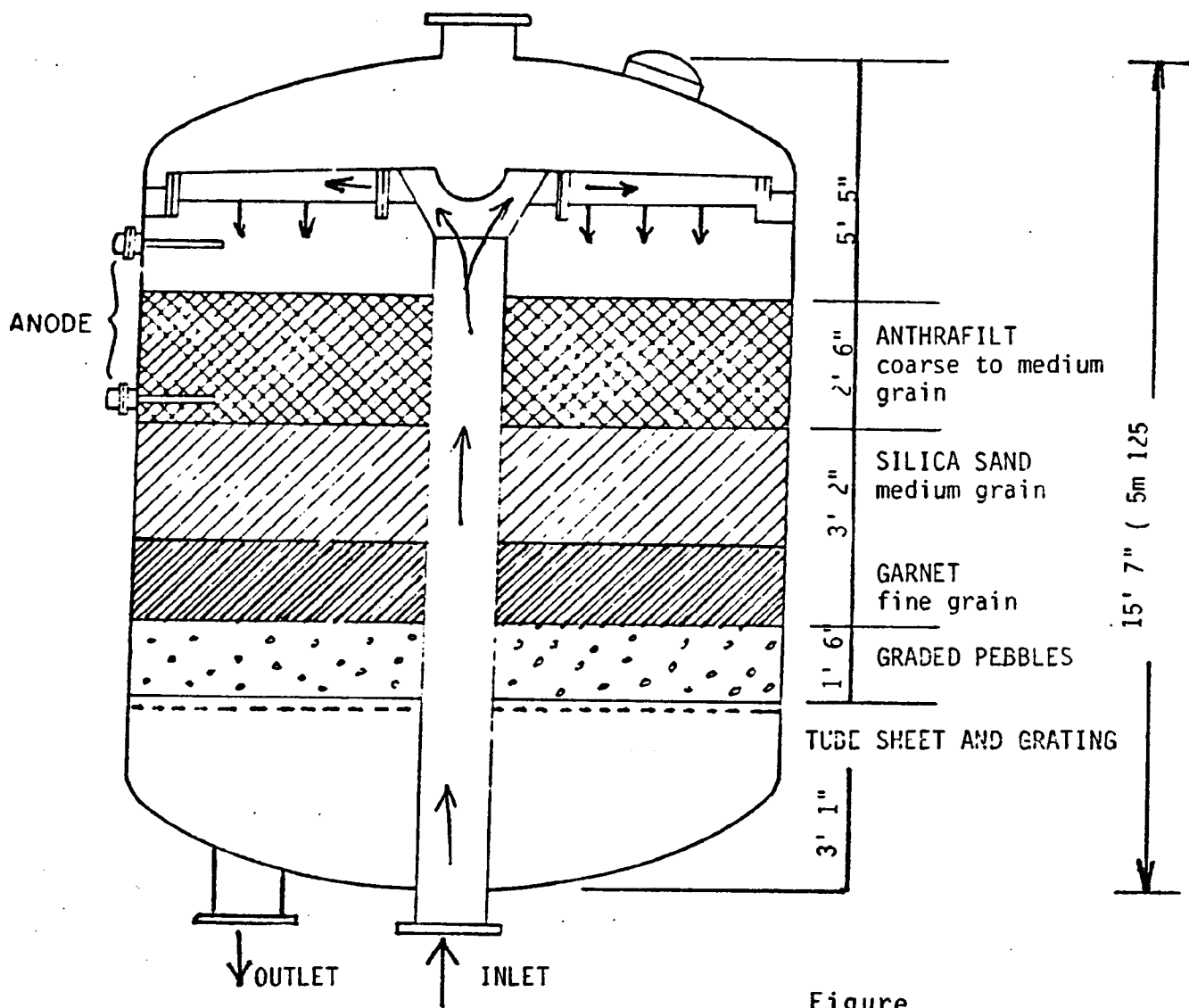


FILTRO CON FLUJO HACIA ABAJO, VARIAS CAPAS DE FILTRACION Y MUY ALTO CAUDAL (FABRICADO POR BAKER FILTRATION CO.).



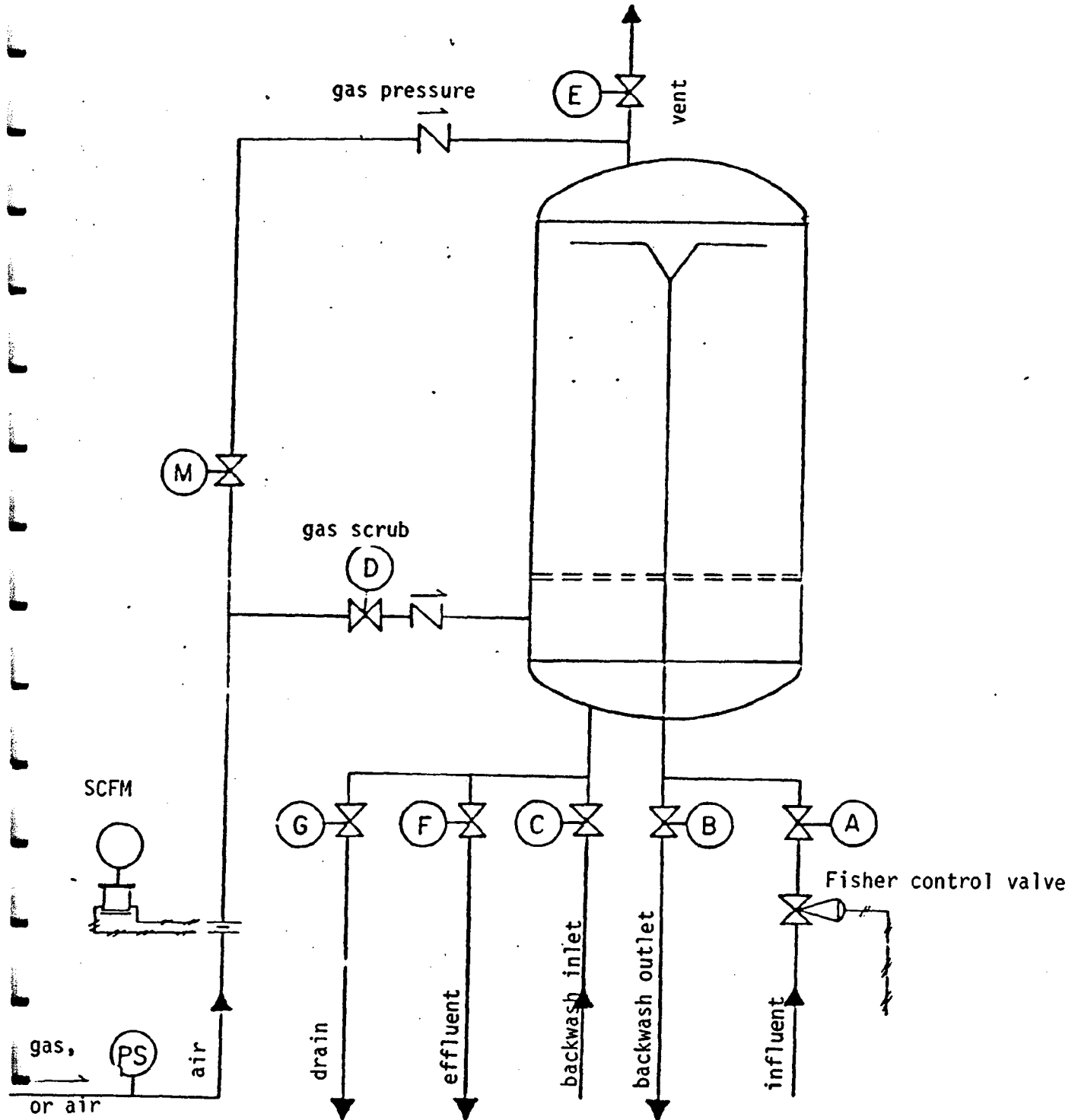
ESQUEMA DE FLUJO - PURIFICACION Y FILTRACION DEL FLUIDO DE REINYECCION.

FILTRO PARA RETIRADA DE PARTICULAS CON MUY ALTA PRESION.



Figure

CAPACIDAD 260 METROS CUBICOS POR HORA
(FABRICADO POR DELAVAL - U.S.A.)



LIMPIADA POR INVERSION DE FLUJO DEL FILTRO
DE MUY ALTA PRESION.