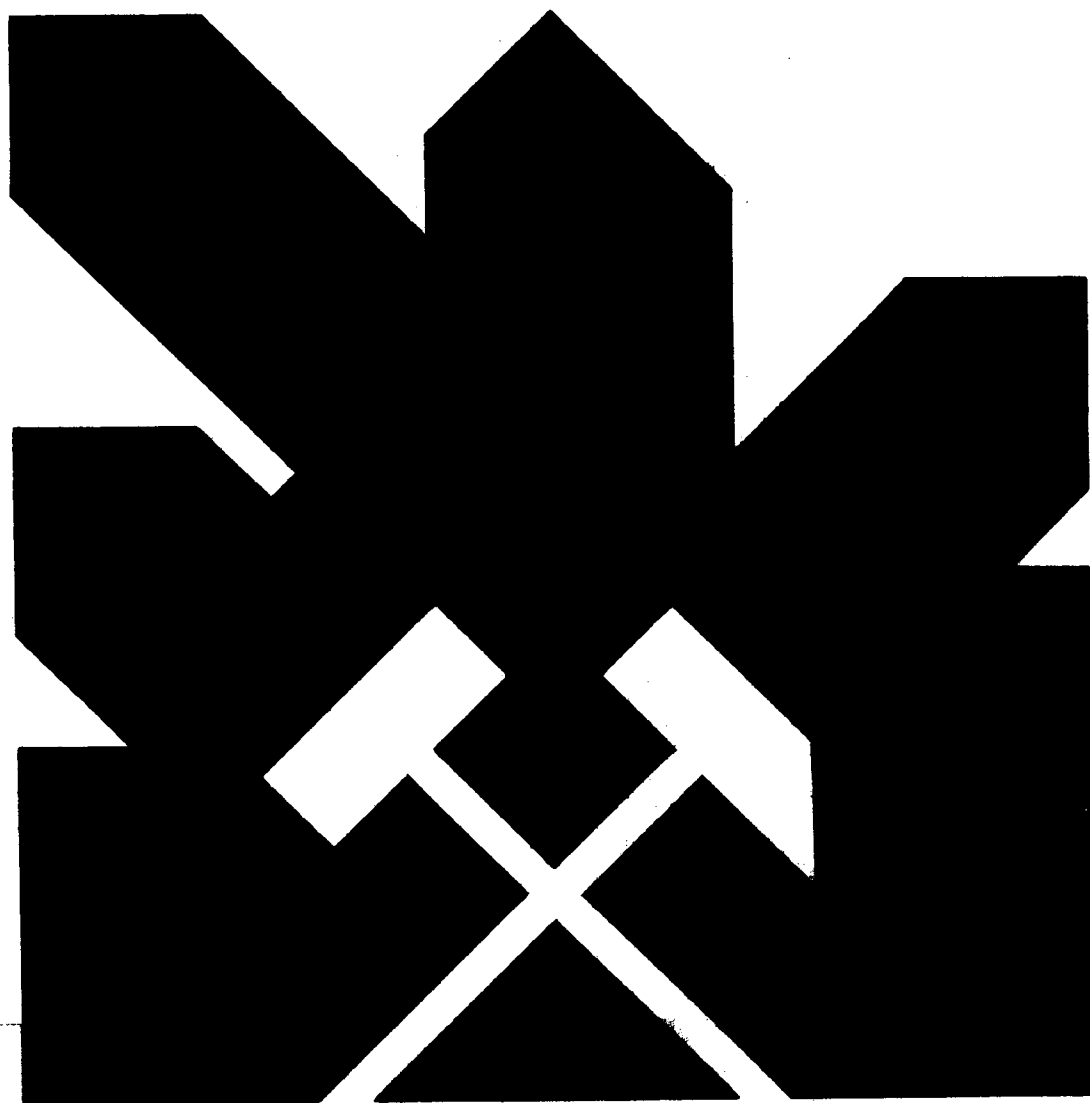


MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
COMISARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

ESTUDIO DE LOS PROBLEMAS DE CORROSION
Y ENCOSTRAMIENTO EN LA EXPLOTACION DE
LOS RECURSOS GEOTERMICOS DE BAJA Y ME
DIA ENTALPIA.



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

00750

RESUMEN

Las aguas geotermales de baja y media entalpia están contenidas en los acuíferos profundos. Por ello estas aguas son reductoras y generalmente tienen una salinidad elevada. Son incrustantes o corrosivas y deben ser explotadas mediante un doblete con intercambiador de temperaturas.

Las aguas geotermales tienen que ser analizadas con el fin de evaluar sus propiedades de incrustación y obturación bajo el efecto de cambios termodinámicos durante el ciclo de explotación. La introducción accidental de oxígeno y micro-organismos, ausentes en el origen, debe tomarse en consideración.

En cuanto a la obturación de los pozos de inyección, son las aguas geotermales ferruginosas las que provocan los problemas más complejos ya que pueden formar hidróxidos férricos en presencia de oxígeno, en forma de precipitado gelatinoso que provoca obturación fuerte y rápida.

La roca almacén detrítica con cemento arcilloso debe ser estudiada con cuidado, sobre todo la posibilidad de dispersar los sedimentos arcillosos en los pozos de inyección.

La corrosión puede originarse por un efecto electroquímico, por un ataque químico o por una acción bacteriana ; es necesario pues determinar el origen para poder remediarlo.

El medio de corrosión está constituido por el agua geotermal que, en presencia de ciertos elementos, incluso en concentraciones débiles, puede tener un caracter corrosivo importante. Los gases disueltos constituyen el factor más importante pero actúan igualmente : el pH, la temperatura, la presión, el flujo, las sales disueltas y la presencia de bacterias.

Algunos materiales utilizados en el circuito del agua geotermal son más resistentes que otros, es necesario elegir los que mejor adaptados estén a cada tipo de corrosión.

Teóricamente es posible combatir la corrosión actuando, ya sea directamente sobre el agua geotermal (solamente en aval del pozo de producción), sobre la concepción de la instalación, o sobre las dos a la vez. Se exponen diferentes métodos.

Deben realizarse ensayos en laboratorio antes y después de un doblote y en el sitio, durante su funcionamiento, con el fin de preveer y controlar la corrosión y la obturación.

Si siempre hay que estudiar los problemas de corrosión y de incrustación antes de la explotación de un doblote, se recomienda estudiar con el mayor cuidado la posibilidad de obturación que puede poner en peligro la explotación del doblote.

SUMARIO

	Paginas
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. AGUAS GEOTERMALES.....	2
2.1 Generalidades.....	2
2.2 Métodos de explotación.....	2
3. EVALUACIÓN DE LAS AGUAS GEOTERMALES DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA CORROSIÓN, INCRUSTACIÓN Y OBTURACIÓN.....	4
3.1 Finalidad de la evaluación.....	4
3.2 Análisis químicos y fisico-químicos que se deben efectuar.....	5
3.3 Análisis biológicos que se deben efectuar.....	6
3.4 Toma de muestras.....	7
4. ENCOSTRAMIENTO Y OBTURACIÓN ORIGINADOS POR AGUAS GEOTERMALES.....	9
4.1 Solubilidad y precipitación.....	9
4.2 Caso de los reservorios détriticos con cemento arcilloso.....	15
5. MECANISMO DE CORROSIÓN EN MEDIO ACUOSO.....	17
5.1 Corrosión electroquímica.....	17
5.2 Ataque químico.....	20
5.3 Corrosión bacteriana.....	21
6. FACTORES DE CORROSIÓN.....	24
6.1 El agua geotermal.....	24
6.2 El material.....	28
7. REMEDIOS CONTRA LA CORROSIÓN LIGADOS AL MEDIO AGRESIVO Y AL MATERIAL.....	30
7.1 Remedios ligados al medio agresivo.....	30
7.2 Remedios ligados al material.....	34
7.3 Remedios ligados al medio y al metal. Inhibidores de corrosión.....	36

	Paginas
7.4 Remedios contra la corrosión exterior.....	38
7.5 Remedios contra micro-organismos introducidos accidentalmente.....	38
8. ENSAYOS EN LABORATORIO.....	39
8.1 Finalidad de los ensayos.....	39
8.2 Ensayos de corrosión.....	39
8.3 Ensayos de contabilidad con el agua geotermal...	40
8.4 Ensayos de compatibilidad con el yacimiento.....	41
9. METODOS DE CONTROL IN SITU.....	43
9.1. Finalidad de los controles in situ.....	43
9.2 Estudio in situ de la corrosion.....	43
9.3 Dosificación del hierro y de los gases disueltos	44
9.4 Detección de bacterias.....	44
10. PROBLEMAS DE OBTURACIÓN LIGADOS A LA CORROSIÓN.....	45
11. EJEMPLOS. CASOS MODELO.....	47
11.1. Francia	47
11.2. Islandia - Reservas de baja entalpia	56
11.3. Klamath Falls, Oregon (Estados Unidos)	60
12. CONCLUSIONES	64

1. INTRODUCCION

El objetivo de este estudio era ver en que medida los problemas de corrosión de una instalación geotérmica a baja y media entalpia pueden resolverse, principalmente en lo que se refiere a los métodos de control y a los materiales utilizados. Han sido analizados igualmente los problemas de incrustación mineral y de obturación.

El estudio se ha efectuado tratando ante todo de resaltar el sentido práctico ligado a los problemas que surgen durante la explotación de aguas termales. Los estudios teóricos necesarios para la comprensión de los fenómenos puestos en evidencia se han reducido al mínimo para no repetir lo que puede encontrarse en los tratados de análisis químicos y de corrosión.

2. AGUAS TERMALES

2.1 GENERALIDADES

Las aguas geotermales de baja y media entalpia estan contenidas en los acuíferos profundos.

Por lo tanto :

- su contenido en oxigeno es practicamente nulo (medio anaerobio) ;
- su contenido en materias en suspensión es muy debil (a parte eventuales cúmulos de arcillas) ;

en cambio, pueden contener :

- sales disueltas susceptibles de precipitar (principalmente componentes de hierro y carbonato cálcico) o que pueden ser corrosivas ;
- hidrógeno sulfurado y gas carbónico disuelto ;
- bacterias (sulfato-reductoras, hierro) ; esta posibilidad disminuye con la profundidad, y no existe teóricamente hacia los 60°C.

2.2 METODOS DE EXPLOTACION

2.2.1 Recuerdo del principio del doblote geotérmico

Las aguas geotermales contenidas en los acuíferos profundos tienen en general una salinidad elevada. Por este hecho y debido a la protección del medio ambiente, no pueden ser enviadas a un medio natural superficial. Por otra parte, estas aguas calientes

subterráneas son susceptibles de provocar incrustaciones o bien pueden ser corrosivas, por ello no pueden circular directamente en las instalaciones de calentamiento concebidas con materiales tradicionales.

Para poder utilizar estas aguas geotermales con toda seguridad, P. Maugis adaptó un procedimiento que consiste en realizar un doblete y en utilizar el potencial calorífico por intermedio de un intercambiador de temperaturas.

El doblote geotérmico es el sistema constituido por uno (o varios) pozos de producción y por uno (o varios) pozos de inyección de agua geotermal de un mismo reservorio geológico. Se extrae un cierto caudal de agua geotermal de los pozos de producción, en superficie este agua cede sus calorías por intermedio de un intercambiador de temperaturas y a continuación se reinyecta a una temperatura más baja por un pozo de inyección.

Sin entrar en consideraciones hidrodinámicas y térmicas, recordemos que es necesario calcular el espaciado de los pozos de producción y de inyección para que la disminución de temperatura en el pozo de producción no sobrepase 1°C al cabo de un tiempo de explotación fijado por adelantado.

Se considerará, a lo largo del presente estudio, la explotación del poder calorífico de las aguas geotermales por doblote geotérmico.

2.2.2 Explotación por pozo único

La explotación de aguas geotermales puede ocasionalmente efectuarse por pozo único sin reinyección cuando las aguas son relativamente dulces y que basta con someterlas a un tratamiento clásico (suavización, deferrilización, eliminación de ciertas sales) sin poner en peligro la rentabilidad de la explotación.

3. EVALUACION DE LAS AGUAS GEOTERMALES DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA CORROSION, INCRUSTACION Y OBTURACION.

3.1 FINALIDAD DE LA EVALUACION

Es necesario precisar exactamente lo que se busca cuando se analiza un agua geotermal.

Se trata de determinar :

- a) las propiedades de incrustación o de obturación del agua geotermal bajo el efecto de cambios de temperatura, de presión, de su composición iónica y de su pH ;
- b) las propiedades corrosivas del agua geotermal en relación con los materiales de la instalación con los que estará en contacto, esencialmente serán su composición iónica, su pH, sus gases disueltos, sus posibilidades de inhibición ;
- c) los problemas potenciales de obturación o de corrosión que puede provocar su mantenimiento bajo la acción accidental de agentes exteriores, es decir :
 - la presencia de bacterias sulfato-reductoras o de hierro, cuya proliferación puede engendrar problemas de obturación o corrosión ;
 - la oxidación del agua geotermal cuando pasa por las bombas de superficie o durante los trabajos de mantenimiento.

Para evaluar las aguas geotermales, conviene pues efectuar un cierto número de análisis y de medidas bien precisas.

3.2 ANALISIS QUIMICOS Y FISICO-QUIMICOS QUE SE DEBEN EFECTUAR

a) En la sonda, durante la toma de muestras

Es indispensable durante la toma de muestras determinar los parámetros que pueden variar después del muestro y antes de los análisis efectuados en el laboratorio.

Son :

- el pH ;
- la resistividad (verificar que varía poco entre la toma de muestras y el laboratorio) ;
- la temperatura (en el fondo y en el cabezal) ;
- el contenido en gases disueltos (O₂, CO₂ y H₂S) ;
- la dureza y alcalinidad que depende del contenido en gases disueltos ;

Accesoriamente :

- la turbidez.

b) En el laboratorio

Los análisis efectuados en la sonda deben completarse por los siguientes análisis de laboratorio :

- sílice (sílice total y sílice disuelta) ;
- sulfatos ;
- cloruros ;
- iodo de ioduros y bromo de bromuros ;
- carbonatos y bicarbonatos ;
- fosfatos ;
- nitrógeno total ;
- nitritos ;
- nitratos ;
- calcio ;

- magnesio ;
- sodio ;
- aluminio ;
- hierro (Fe^{++} et Fe^{+++}) ;
- manganeso ;
- bario ;
- estroncio ;
- potasio.

3.3 ANALISIS BIOLÓGICOS QUE SE DEBEN EFECTUAR

El inventario biológico de un agua geotérmica es necesario para evaluar :

- la existencia y la acuidad de un posible taponamiento del reservorio por organismos vivientes,
- las posibilidades de corrosión por micro-organismos.

Las sucesivas etapas del inventario biológico son las siguientes :

- inventario general de la flora,
- flora aerobia total,
- flora anaerobia total,
- flora esporulada total,
- flora heterótrofa total (pseudomas y bacillus),
- flora sulfato-reductora,
- flora sulfato-reductora esporulada,
- flora organo-reductora (componentes azufrados),
- bacterias de hierro.

Cada etapa requiere una metodología y un medio de cultivo apropiado que permita una numeración de micro-organismos presentes.

Muy a menudo al comienzo no hay micro-organismos, pero se pueden producir contaminaciones accidentales. Por lo tanto hay que realizar análisis biológicos a intervalos regulares (principalmente para detectar eventuales bacterias sulfato-reductoras).

3.4 TOMA DE MUESTRAS

3.4.1 Recipientes para la toma de muestras

Para los análisis físico-químicos, las muestras pueden ser tomadas en frascos de plástico estable (polietileno de alta presión).

Para la averiguación y dosificación de los oligo-elementos, las muestras se efectuarán en frascos de cristal neutro (cristal de química, pyrex) del tipo plasma o con tapón esmerilado.

Estos frascos nunca deberán ser taponados con corcho o con tapones en caucho sin estabilizar ya que podrían contaminer la muestra.

Si los plazos de encaminamiento hacia el laboratorio de análisis lo permiten, las muestras se rodearán de vidrio en cajas isotérmicas para limitar la evolución, a veces rápida, de las muestras.

Precauciones tratando de las condiciones estériles del muestro sólo se preveerán cuando haya que hacer un análisis de bacterias.

3.4.2 Toma de muestras para análisis en laboratorio

A. En superficie

a) Toma de muestras para un análisis mineral completo

Utilizar dos frascos de plástico estable de 2 000 cm³ previamente lavados y secados. Rellenar los por el fondo con un tubo

dejando desbordar ampliamente (3 o 4 veces el volumen), y cerrar rápidamente sin que entre aire.

b) Toma de muestras para la determinación de hierro ferroso

Utilizar dos frascos de plástico estable de 1 000 cm³, previamente lavados con agua destilada y secados.

Meter en cada uno aproximadamente 5 cm³ de ácido clorídrico, y cambiar el aire por intrógeno. Rellenarlos por el fondo con una probeta no metálica. Hacer desbordar de 50 cm³ aproximadamente y tapar rápidamente el frasco sin retener el aire.

Si no hay nitrógeno disponible, rellenar el vaso haciendolo desbordar (3 o 4 veces el volumen del frasco). Retirar la probeta. Introducir con una pipeta el ácido clorídrico de 5 a 10 cm bajo la superficie del líquido. Taponar el frasco.

c) Toma de muestras para la determinación de sulfuros

Utilizar dos frascos de 1 000 cm³ previamente lavados y secados. Meter en uno de los frascos 10 g de acetato de zinc o de cadmio y anotarlo sobre el frasco.

Rellenar los dos frascos por el fondo con una probeta no metálica.

B. En el fondo

Una muestra de fondo se obtiene mediante un tomador de muestras que permita mantenerla bajo presión.

4. ENCOSTRAMIENTO Y OBTURACION ORIGINADOS POR AGUAS GEOTERMALES

Las aguas geotermales pueden producir depósitos de materia mineral, sobre todo en los pozos de producción y pueden provocar obturaciones, sobre todo en los pozos de inyección.

4.1 SOLUBILIDAD Y PRECIPITACION

La solubilidad de una sal viene regulada por la ley de acción de masas (ley de Guldberg y Waage).

Toda variación de las condiciones termodinámicas de una solución hará variar el producto de la solubilidad y podrá, por lo tanto, provocar precipitaciones o solubilizaciones.

4.1.1 Efecto de la temperatura

La temperatura tiene gran influencia sobre la solubilidad.

Generalmente, un aumento de temperatura provoca mayor solubilidad en proporciones que pueden llegar a ser considerables.

No obstante existen algunas excepciones :

- las sales corrientes, CO_3Ca y $(\text{CO}_3)_2 \text{CaMg}$, disminuyen su solubilidad al aumentar la temperatura.
- el SO_4Ca tiene un máximo de solubilidad a 30°C .

Por lo tanto, para rocas almacenes calcareas, las aguas geotermales generalmente se saturan en CO_3Ca a la temperatura del reservorio.

En el pozo de producción la temperatura varía muy poco (1°C entre el fondo y la superficie después de varios meses de producción y de algunos °C al comenzar la producción), el agua geotermal puede llegar a ser algo agresiva ; de esta manera y bajo el efecto de temperatura, no ocurre nada.

En cambio, en los pozos de inyección, al bajar la temperatura de varias decenas de °C, el agua geotermal se subsatura en CO_3Ca y por lo tanto queda agresiva.

Llegando al almacén calcareo, el agua geotermal inyectada disuelve la caliza hasta saturarse en CO_3Ca a la temperatura de inyección. Al penetrar más en el reservorio calcareo, el agua geotermal inyectada se recalienta y depositará mineral formando incrustaciones de CO_3Ca . Por lo tanto, en los pozos de inyección, la porosidad aumenta cerca del pozo y disminuye alejándose de él.

4.1.2 Efecto de la presión

La solubilidad de las sales varía generalmente poco con la presión, pero no por ello deja de ser despreciable.

Por ejemplo :

- la solubilidad del ClNa a 24°C pasa de 359 g/l a 370 g/l cuando la presión varía de 1 a 1 000 kg/cm² ;
- la solubilidad del SO_4Ca aumenta de 3 % cuando la presión pasa de 1 a 60 kg/cm² ;
- la solubilidad del CO_3Ca aumenta de 10 % cuando la presión pasa de 1 a 180 kg/cm².

Tomando el ejemplo anterior (almacén calcareo con aguas geotermales saturadas en CO_3Ca a la temperatura del pozo de inyección).

En el pozo de producción para un reservorio situado a 1 800 m de profundidad, la presión del agua geotermal producida pasa de

180 a 1 kg/cm². La solubilidad del CO₃Ca disminuye de 10 % : el agua geotermal es entonces incrustante y debería depositar CO₃Ca en el casing. Teóricamente es lo que debería ocurrir. Pero las medidas efectuadas en los pozos de producción del doblete geotérmico de la ZUP de Almont, situado en la cuenca de Paris (Francia), han revelado que en realidad no había depósito calcareo.

La ausencia de depósito calcareo se explica por cuatro fenómenos convergentes :

- debil sobresaturación en CO₃Ca,
- caudal rápido (100 m³/h en un casing de 7"),
- cinética de precipitación del CO₃Ca directamente proporcional a la superficie del CO₃Ca en contacto con el agua,
- debil cantidad de gas libre (0 a 5 %), las burbujas de gas pueden catalizar la reacción de precipitación.

En los pozos de inyección, la presión aumenta aproximadamente de 1 a 180 kg/cm². La solubilidad del CO₃Ca aumenta de 10 % : el efecto de la presión viene a sumarse a la temperatura. No obstante, en los pozos de inyección de la ZUP de Almont, no se observó ningún taponamiento, sin duda porque el CO₃Ca se deposita bajo forma de un precipitado cristalino que tiene un poder de obturación debil o nulo.

4.1.3 Influencia de la fuerza iónica

La precipitación es una interacción entre iones, por lo tanto el medio donde evolucionan ejercerá cierta influencia sobre la interacción. Es pues natural que el número de iones en solución, al igual que la carga eléctrica, tenga un efecto sobre la solubilidad y precipitación de la sal.

4.1.4 Influencia del potencial de oxidación Eh y del pH

Una reacción de oxígeno corresponde a :

- una fijación de oxígeno,
- una liberación de hidrógeno,
- una pérdida de electrones,
- un aumento de electricidad positiva.

Una reacción de óxido-reducción consiste en una transferencia de electrones según la reacción :



La energía oxidante o reductora se evalúa por la medida de la fuerza eléctrica capaz de oponerse a este movimiento de electrones. Esta fuerza electromotriz se mide mediante un electrodo según el potencial de óxido-reducción del hidrógeno.

La precipitación o solubilización de las sales presentes en un agua pueden determinarse por el conocimiento del par de valores Eh y pH que permite definir los dominios de estabilidad de diversas especies salinas.

Este mismo par de valores permite igualmente determinar el comportamiento de un agua frente a la corrosión.

Las aguas geotermales son reductoras pero accidentalmente se puede introducir oxígeno (aire) en el circuito del doblote.

4.1.5 Influencia de los gases disueltos

El coeficiente de solubilidad de un gas en el agua disminuye rápidamente cuando la temperatura aumenta, y se anula teóricamente en el punto de ebullición.

En cuanto a la presión, la solubilidad de un gas disuelto en el agua es proporcional a la presión parcial de un gas considerado en su fase gaseosa (ley de Henry).

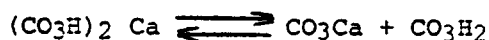
a) Caso de un gas carbónico

El fenómeno se complica cuando el gas disuelto en el agua reacciona químicamente. Es el caso de un gas carbónico :



Si el agua contiene Ca o Mg, caso muy corriente, existen dominios de estabilidad para los bicarbonatos en función del gas carbónico libre disuelto en el agua.

Las reacciones :



demuestran que hace falta una cierta cantidad de gas carbónico libre (o de CO_3H_2) presente en el agua para que los bicarbonatos no se transformen en carbonatos que entonces precipitarían.

Esta cantidad es llamada "gas carbónico equilibrante".

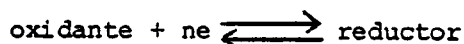
Un agua que contenga una cantidad de gas carbónico superior a la cantidad equilibrante será un agua agresiva.

Por el contrario, un agua que contenga menor cantidad de CO_2 que la cantidad equilibrante será un agua "incrustante".

b) Caso del hidrógeno sulfurado y del oxígeno

Para el hidrógeno sulfurado, los mismos fenómenos de reacción entre el ácido y sus sulfuros intervienen modificando la solubilidad. Además, la cantidad de hidrógeno sulfurado, que es reductor, dependerá del potencial de oxidoreducción del agua.

En efecto, un par oxidante-reductor da lugar a la reacción :



dependiendo del potencial del agua, el equilibrio de esta reacción se desplazará en un sentido o en el otro, favoreciendo o inhibiendo la solubilización del hidrógeno sulfurado o del oxígeno.

c) Caso de la presencia accidental de oxígeno en presencia de hierro ferroso

Las aguas geotermales contienen a veces hierro en forma de Fe^{++} (ya que el medio es reductor). La introducción de oxígeno (aire) por inexperiencia (air-lift) o accidental (bombas de superficie, mantenimiento,...) en un doblete reacciona con el Fe^{++} transformándolo en Fe^{+++} que precipita en forma de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. El hidróxido férrico se presenta en forma de precipitado gelatinoso caracterizado por provocar tapones fuertes y muy rápidamente.

Si no se presta atención a esta posible reacción del oxígeno frente al Fe^{++} , el pozo de inyección de un doblete, extrayendo aguas ricas en hierro, será rápidamente obstruido.

Esta introducción accidental de oxígeno se puede remediar inyectando un reductor (metabisulfito de sodio por ejemplo) en superficie con una bomba dosificadora.

Se recomienda proscribir los ensayos por air-lift para aguas geotermales que contengan hierro.

4.2 CASO DE LOS RESERVORIOS DETRITICOS CON CEMENTO ARCILLOSO

La permeabilidad de un sedimento arcilloso (principalmente areniscas o arenas con cemento arcilloso) es función de la fuerza con la que las partículas de arcilla se encuentran unidas entre sí. La permeabilidad no se verá afectada si las partículas están unidas en un agregado compacto ya que están orientadas y son muy grandes para que sean transportadas por las aguas. Las partículas que son transportadas disminuyen la velocidad del flujo de los fluidos formando revestimientos filtrantes microscópicos a lo largo de canalículos de comunicación de los poros.

En todo sistema arcilla-agua, existen ciertos factores que favorecen la dispersión de partículas arcillosas y otras que facilitan su unión formando agregados. La resultante de estos factores opuestos determina la aptitud de las partículas para dispersarse o, al contrario, unirse. De esta manera, todo fluido que transcurre a través de una formación arcillosa provoca una disminución de permeabilidad si los factores de dispersión son superiores a los factores de unión.

La combinación, intercambio de cationes e hidrólisis (las arcillas sódicas se hidrolizan mejor que las arcillas cálcicas y se dispersan disminuyendo así la permeabilidad del medio arcilloso) de las arcillas podrá en ciertos casos provocar una dispersión de las arcillas provocando una disminución de la permeabilidad del medio.

La disminución de la concentración de iones Ca^{++} del agua geotermal puede provocar la dispersión de las arcillas en el pozo de inyección de un doblote, lo que llevaría consigo una disminución de permeabilidad del reservorio alrededor del pozo de inyección.

Esto se puede remediar inyectando en superficie "tensio-activos" con una bomba dosificadora.

5. MECANISMO DE CORROSION EN MEDIO ACUOSO

En el caso del hierro que constituye la base de materiales utilizados en una instalación de geotermia de baja o media entalpia, el estado de oxidación es más estable que el de reducción (en condiciones normales), es decir que el hierro tenderá a volver a este estado de oxidación y por lo tanto a corroerse. Sólomente los productos de corrosión, dependiendo de que puedan o no formar una capa protectora, tenderán a frenar o anular el fenómeno.

La reacción de oxidación del hierro se puede esquematizar de la siguiente manera :



oxidacion que puede proseguir :



La aparición de iones Fe^{++} o Fe^{+++} depende de las circunstancias de corrosión que determinarán el tipo.

La corrosión puede producirse de 3 maneras diferentes :

- corrosión electroquímica,
- ataque químico,
- corrosión bacteriana.

5.1 CORROSION ELECTROQUÍMICA

La corrosión electroquímica de un metal en medio acuoso es un ataque por intercambio de partículas cargadas eléctricamente.

5.1.1 Funcionamiento de una pila de corrosión

La reacción :



muestra que todo fenómeno de corrosión va acompañado del paso de una corriente eléctrica. Para que la transmisión de corriente se produzca, es necesario que exista un medio conductor y una diferencia de potencial entre dos puntos, es decir existe una pila.

Para que una pila de corrosión pueda funcionar, es necesario que exista :

- un electrolito y una unión conductora entre los dos electrodos,
- una diferencia de potencial entre los dos electrodos,
- en el electrolito, un elemento susceptible de reducirse en el cátodo (el electrodo atacado es el ánodo).

5.1.2 Constitución de pilas en las instalaciones mecánicas

En las instalaciones metálicas, la constitución de una pila resulta de una heterogeneidad física o química ya sea a nivel del metal o a nivel del medio.

a) Corrosión galvánica

El caso más sencillo es el de acoplamiento de 2 materiales conductores distintos, por ejemplo acero inox y un acero normal en contacto con agua salada.

El potencial tomado por el inox (cátodo) es mayor al tomado por el acero (ánodo).

El acero se corroe tanto más cuanto más conductor sea el medio.

b) Corrosión debida a heterogeneidades de superficies metálicas

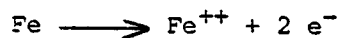
Otro caso de corrosión electroquímica es el ocasionado por heterogeneidades del metal, debido ya sea por una discontinuidad del depósito de corrosión o por una discontinuidad del revestimiento de protección.

La corrosión en los puntos de soldadura es del mismo tipo.

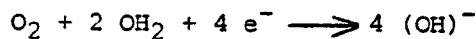
El cátodo (inclusión noble, depósito de corrosión, depósito protector, puntos de soldadura más nobles que el material metálico) lleva consigo una corrosión localizada del acero en su entorno. Esta puede agravarse con el procedimiento de aereación diferencial.

c) Papel del oxígeno (en función del pH)

El oxígeno actúa como un despolinizador catódico ya que permite a los electrones que resultan de la reacción :



de descargarse :



Los pH bajos aumentan la corrosión por O_2 , mientras que los pH altos la retrasan.

Cualquiera que sea la cantidad de oxígeno disuelto, el ataque se producirá siempre de la misma forma (desporalización) pero puede producirse de manera muy diferente. Si hay poco oxígeno (0,1 ppm) se producirán sucesivos agujeros sin depósito en los bordes, si hay cantidades de oxígeno elevadas (más de 1 ppm) habrá formación de pustulas de óxidos bajo las cuales se desarrollan corrosiones localizadas (superficies de ataque reducidas pero penetración importante en el metal, pudiéndose producir perforaciones).

d) Papel de la temperatura

Una diferencia de temperatura puede llevar consigo, en un metal, la aparición de una superficie anódica y de otra catódica. Esto se producía a veces en geotermia de alta entalpía.

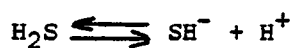
5.2 ATAQUE QUIMICO

El ataque químico viene generalmente causado por la presencia de gases disueltos (CO₂ o H₂S).

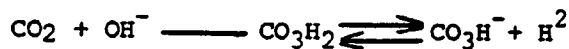
Estos gases pasan en solución, ya sea directamente (caso de H₂S), o en forma hidratada (caso del CO₂ que da CO₃H₂).

Se llega a una ionización que será :

- para el H₂S :

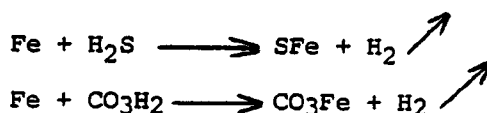


- para el CO₂ :



Esto implica un aumento de la concentración en H⁺ y por lo tanto una disminución de pH.

El ataque del hierro puede escribirse como sigue :



El ataque químico en medio acuoso se debe a la elevación de la concentración de iones H⁺ en el medio.

En presencia de H₂S, y dependiendo de las condiciones, puede producirse un ataque generalizado con depósito de SFe, o problemas de fragilización del metal (dependiendo de las características mecánicas).

Con el CO₃Fe, no es frecuente encontrar depósitos de corrosión en las proximidades de cráteros, ya que las condiciones de pH no favorecen la precipitación de CO₃Fe aunque es bastante insoluble.

5.3 CORROSION BACTERIANA

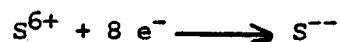
5.3.1 Bacterias sulfatoreductoras

Las bacterias sulfatoreductoras son bacterias anaerobias pero pueden sobrevivir en presencia de oxígeno libre.

La corrosión bacteriana se debe aquí, a la reducción de sulfatos por las bacterias sulfatoreductoras pero también por el fenómeno electroquímico engendrado.

Las bacterias sulfatoreductoras realizan su metabolismo reduciendo los sulfatos a sulfuros.

El fenómeno de reducción es el siguiente :



Desde el punto de vista químico, esto se traduce por :



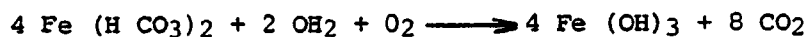
Esta reacción química utiliza el hidrógeno que las bacterias encuentran en abundancia cerca de los cátodos. Las bacterias se instalan cerca de los cátodos participando activamente a la despolarización catódica al adsorber el hidrógeno y activando así el fenómeno electroquímico. El producto del metabolismo S^{--} reacciona sobre el producto de oxidación Fe^{++} dando SFe que precipita cerca del ánodo. Las bacterias contribuyendo evacuando los iones Fe^{++} , cuyo depósito podría frenar el fenómeno de corrosión : activan igualmente el fenómeno anódico. De esta manera se tienen todas las condiciones para que la corrosión continúe.

La zona de pH más favorable para la proliferación de bacterias sulfatoreductoras se sitúa entre 5.5 y 9.5.

5.3.2 Bacterias ferruginosas (grupo de los crenotrix y leptotrix)

Estas bacterias ferruginosas aseguran su metabolismo por oxidación del hierro ferroso (Fe^{++}) en hierro férrico (Fe^{+++}). No necesitan elementos orgánicos porque pueden utilizar el CO_2 disuelto como fuente carbonada.

La reacción puede escribirse :



Esta reacción produce muy poco energía y por ello, el consumo y por consiguiente la precipitación de hierro férrico es muy importante. De aquí resulta un gran acumulación de hidróxido férrico retenido en la vaina filamentosa que rodea las células. La acumulación es cada vez más espesa y el oxígeno debe difundir a través del revestimiento. En cierto momento el consumo de oxígeno es más rápido que la velocidad de difusión. Las condiciones entonces son anaerobias y permiten la proliferación de bacterias anaerobias.

6. FACTORES DE CORROSION

6.1 EL AGUA GEOTERMAL

El medio de corrosión está constituido por agua geotermal que incluso en concentraciones débiles, debido a la presencia de ciertos elementos, puede tener un caracter corrosivo importante. Los gases disueltos constituyen el factor más importante.

6.1.1 El pH

El pH de un agua depende principalmente de la cantidad de gas disuelto que tenga (CO₂, H₂S). Y depende también de la naturaleza del gas disuelto.

En el caso de un agua que sólo contenga CO₂ disuelto, de iones CO₃H⁻, H⁻, OH⁻ y Ca⁺⁺, la velocidad inicial de ataque depende unicamente del pH. La cantidad de iones ferrosos que pasan en solución es generalmente igual a la mitad de la cantidad de moléculas de CO₂ en solución (CO₂ equilibrante, CO₂ excedente). Además, las aguas geotermales son generalmente saladas lo que agrava la corrosión. Entre el pH 1 y 5 la velocidad de corrosión decrece rapidamente, entre 6 y 9 continúa decreciendo pero más lentamente y entre 10 y 14 decrece rapidamente. Generalmente las aguas geotermales de baja y media entalpía tienen un pH entre 5 y 8.

La cantidad x de iones Fe⁺⁺ que pueden pasar en solución en un medio de pH dado es :

$$x = 10^{13} (H^+)^2$$

$$\text{o } \log x = 13 - 2 \text{ pH}$$

Así pues, en un medio estático no renovado, es esta última relación la que determinará el carácter corrosivo del agua, mientras que en un sistema dinámico, el medio siendo renovado muy rápidamente, el ataque del acero está bajo control del pH, es decir que el carácter "velocidad de ataque" es primordial.

6.1.2 Los gases disueltos

Los principales gases encontrados son el CO₂, el H₂S y accidentalmente el oxígeno.

La solubilidad de los gases disueltos viene regulada por la presión, la temperatura y la cantidad de gases disueltos.

Si a temperaturas poco elevadas, estos gases no son peligrosos en medio seco, en medio húmedo tienen un poder corrosivo.

El CO₂ y el H₂S disminuyen el pH ya que estos gases se comportan como verdaderos ácidos y las sales formadas son de carácter agravante actuando de cátodo respecto al ánodo constituido por hierro.

El oxígeno, cuando está presente, tiene un importante papel ya que además de su acción en las pilas de aereación diferencial puede actuar de despolarizador catódico. Ahora bien, entre los pH 5 y 12, es el porcentaje de despolarización (oxígeno) quien regula el porcentaje de corrosión. Se admite en general que el porcentaje de corrosión es proporcional a la concentración de oxígeno.

El porcentaje de corrosión del H₂S en agua destilada aumenta rápidamente entre 0 y 150 ppm, tiende a estabilizarse entre 150 ppm y 400 ppm a un valor máximo y disminuye progresivamente hasta 1 600 ppm, concentración a partir de la cual hay estabilización ya que a partir de estos valores elevados de H₂S disuelto, los sulfuros formados son protectores. En general los productos de corrosión tienen gran importancia en los fenómenos evolutivos de corrosión.

6.1.3 La temperatura

Se admite que el porcentaje de corrosión se multiplica por 2 o 3 cada 30°C de aumento en el agua, mientras que en los ácidos la corrosión es una función exponencial de la temperatura. Naturalmente en el caso del agua hay que tener en cuenta de que la solubilidad del oxígeno disminuye a medida que la temperatura aumenta, y el aumento del porcentaje de corrosión por 2 o 3 supone cantidades constantes de oxígeno.

6.1.4 La presión

La presión no parece tener un efecto directo sobre la corrosión. Actúa simplemente sobre la cantidad de gas disuelto (y por lo tanto tiene un papel considerable en la corrosión).

En medios agresivos que contengan materias susceptibles de reaccionar con los productos de corrosión para dar compuestos insolubles protectores, la presión favorece el ataque cuando esta es baja, lo disminuye cuando la presión es grande.

6.1.5 La velocidad de circulación

En el caso de hierro atacado por una solución neutra, la velocidad de circulación aumenta primero la corrosión, a continuación ocurre lo contrario, lleva consigo una disminución seguida de un nuevo aumento.

En el caso de medios ácidos, la corrosión se intensifica muy debilmente.

6.1.6 Las sales disueltas

Las sales disueltas actúan debido a la disminución de resistividad del agua, pero a este fenómeno conviene asociar la disminución

de solubilidad de los gases con la de la resistividad del agua.

Todas las sales no llevan consigo el mismo grado de corrosión :

- los principales aniones pueden clasificarse por orden de corrosividad creciente :

- . bicarbonato (inhibidor),
- . fosfato mono-acído,
- . nitrato,
- . sulfato,
- . fluoruro,
- . ioduro,
- . bromuro,
- . cloruro,

la influencia de los aniones depende también del metal ;

- los cationes también pueden clasificarse por orden de corrosividad creciente :

- . magnesio,
- . cadmio,
- . manganeso,
- . calcio,
- . estroncio,
- . bario,
- . litio,
- . sodio,
- . potasio,
- . aluminio,
- . amonio,
- . cromo trivalente,
- . hierro férrico.

6.1.7 Presencia de bacterias

Hemos visto que habrá interdependencia entre los fenómenos electroquímicos y los fenomenos bacterianos. En ciertos casos, la presencia de bacterias puede multiplicar por 4 la velocidad de corrosión en un procedimiento únicamente electroquímico.

6.1.8 Interdependencia de diversos factores

Muy a menudo es difícil atribuir a un factor en particular la causa de la corrosión, porque son siempre varios factores los que intervienen creando condiciones tales para que el ataque se produzca. La modificación de un factor puede llevar consigo una disminución importante del ataque.

6.2 EL MATERIAL (cf 7.2)

Los materiales utilizables son :

- el acero que es el que generalmente se emplea ;
- el metal plastificado que plantea problemas en las juntas y representa un lugar de corrosión acelerado donde el revestimiento plastico es imperfecto ;
- el metal cubierto de cemento ;
- el plástico.

6.2.1 El metal

El metal origina ciertos casos de corrosión electroquímica por :

- la naturaleza del metal que debe resistir al medio corrovisio y no estar acoplado a otro metal que tenga en el mismo medio, un potencial muy diferente.

- la heterogeneidad del metal, factor importante de corrosión
cuya heterogeneidad puede proceder de :

- . precipitaciones preferenciales (en el caso de aleaciones),
- . inclusiones o impurezas,
- . diferentes concentraciones en elementos aditivos,
- . procedimientos de fragilización local,
- . diferencias del estado de superficie metálica,
- . defectos de fabricación,
- . fisuración,
- . diferencias notables de temperatura en una débil porción del metal,
- . tensiones internas debidas a la fragilización del metal, a los tratamientos térmicos, a las soldaduras,
- . la estructura y forma de la instalación,
- . presencia de sollicitaciones periódicas pudiendo llevar consigo casos de fatiga de corrosión.

Habrá que tener en cuenta, para la elección de un metal, las posibilidades de obtención del metal mas homogéneo posible.

6.2.2 Tubos cementados y revestimientos plastificados

Los tubos cementados y los revestimientos plastificados no plantean ningún problema de corrosión salvo que el revestimiento sea continuo y adherente.

6.2.3 Tubos plastificados

Los tubos plastificados, cuando pueden utilizarse, no plantean ningún problema de corrosión.

7. REMEDIOS CONTRA LA CORROSION LIGADOS AL MEDIO AGRESIVO Y AL MATERIAL

La corrosión surge por factores que dependen del agua geotermal (pH, temperatura, sales disueltas, gases disueltos) y por factores propios a la concepción de la instalación (materiales empleados). Se podrá por lo tanto luchar contra la corrosión actuando ya sea directamente sobre el agua geotermal (sólo en aval del pozo de producción), sobre la concepción de la instalación, o sobre los dos a la vez. En las instalaciones que existen actualmente en Francia sólo se ha actuado sobre la concepción de las instalaciones.

7.1 REMEDIOS LIGADOS AL MEDIO AGRESIVO

El elemento principal de corrosión es el gas disuelto. Ahora bien, la solubilidad de los gases es función de la temperatura, de la presión y de la cantidad de sales disueltas.

La presencia de oxígeno en el circuito de un doblete no puede ocurrir accidentalmente en las instalaciones de superficie (bombas e intercambiadores de temperaturas) ni en el pozo de inyección.

7.1.1 Remedios físicos : eliminación de gas

Los sistemas de eliminación se basan en :

- el aumento de temperatura,
- el vacío,
- la modificación de la atmósfera gaseosa por encima del agua.

No es probable que la eliminación de gas, para la geotermia de baja y media entalpía, pueda ser realizada en condiciones económicamente rentables.

a) Gas carbónico

Para el CO_2 , una cantidad residual no despreciable es tolerable y útil ya que puede ser igual al CO_2 equilibrante evitando las precipitaciones de CO_3Ca .

b) Hidrógeno sulfurado

Para SH_2 , se toleran algunos ppm, se puede hacer un tratamiento por un inhibidor de corrosión.

c) Oxígeno

Concentraciones inferiores a 1 ppm de oxígeno pueden originar fenómenos de corrosión importantes.

Ya que el oxígeno presente es accidental, generalmente no se eliminará el gas, pero se efectuará un tratamiento químico preventivo.

7.1.2 Remedios químicos

- a) Para el CO_2 y el SH_2 se puede modificar el pH. Por lo general no hay que prever un tratamiento químico para eliminar estos gases. En ausencia de oxígeno no hay que eliminar el CO_2 y H_2S , incluso para cantidades de 100 ppm de H_2S , ya que los materiales que se utilizan son conocidos y han hecho prueba de eficacia. Por otra parte, la presencia de H_2S garantiza la ausencia de hierro disuelto y permite, en ciertos casos, constituir un revestimiento protector y autocicatrizante.

La presencia simultanea de oxígeno y de SH₂, origen de fuerte corrosión, no se prevee ya que en régimen estable estos dos gases no pueden coexistir : precipita azufre.

b) Para eliminar el oxígeno

El oxígeno en principio debe quedar excluido en el circuito de un doblote de geotermia. Conviene pues preveer en una instalación los posibles lugares de entrada de aire. Las estopas de las bombas plantean un problema muy particular.

Existen diferentes métodos para eliminar el oxígeno inyectando productos en aval del pozo de producción mediante bombas dosificadoras, principalmente :

. Eliminación por sulfito de sodio

El oxígeno disuelto reacciona sobre el sulfito de sodio para transformarlo en sulfato de sodio soluble por la reacción :



Se necesitan en principio 7.9 ppm de sulfito anhidro por ppm de oxígeno, en la práctica con 10 ppm se elimina 1 ppm de oxígeno.

La velocidad de reacción es lenta a temperatura ambiente. Las sales divalentes de cobalto y de cobre son buenos catalizadores de la reacción. Se desaconseja el cobre ya que puede originar corrosión. Se utiliza generalmente de 1 a 5.10⁻³ ppm de una sal divalente de cobalto (cloruro de cobalto hexahidratado CoCl₂, 6 OH₂).

En buenas condiciones de utilización, es posible disminuir la cantidad de oxígeno a 0.04 ppm, incluso menos (cantidad necesaria para dominar la corrosión si hubiera otros factores de corrosión además del oxígeno).

El sulfito de sodio siendo reductor reacciona con todos los agentes oxidantes y en particular con el cloro y los cromatos. Si el agua contiene hidrógeno sulfurado, el efecto del sulfito de sodio es nulo.

Cuando el agua geotermal se encuentra fuertemente concentrada en CaCl_2 existe un riesgo de que el sulfito de calcio precipite.

Eliminación por hidracina

La hidracina y sus compuestos se utilizan a alta temperatura para eliminar el oxígeno de las aguas de alimentación de las calderas. El procedimiento se utiliza por medio de tapones sincronizados en las entradas de aire que han sido detectadas.

La reacción :



libera nitrógeno y agua y por tanto no carga el agua que hay que tratar.

La presencia de hidrógeno sulfurado no impide la reacción.

La reacción a temperatura ambiente es muy lenta y la investigación de un catalizador es necesaria. Desgraciadamente las sales de cobre, que son las más eficaces, originan problemas de corrosión. Por otra parte los iones Fe^{++} y Cu^{++} catalizan la descomposición de la hidracina en nitrógeno e hidrógeno. La eficacia de la hidracina es por lo general problemática. El producto comercial de base es el hidrato de hidracina, $\text{N}_2\text{H}_4, \text{OH}_2$.

- c) Para mantener en solución sales insolubles (carbonato o sulfato de calcio, sales de hierro principalmente), se puede considerar la utilización de agentes "complexants" o "séquestrants". Estos agentes tienen la propiedad de formar compuestos complejos con cationes cuyas condiciones de precipitación se ven modificadas favorablemente.

Los más utilizados son los polifosfatos, las sales solubles de amino-ácidos, los ácidos polibásicos.

7.2 REMEDIOS LIGADOS AL MATERIAL

7.2.1 Revestimientos de protección del metal

a) Protección sin modificación de la superficie del metal

Los tipos de revestimientos que no modifican la superficie están constituidos por capas no metálicas.

Este modo de protección se diferencia del de los inhibidores de corrosión, que también forman una capa protectora, porque en este último caso puede restaurarse permanentemente por la inyección continua de ínfimas cantidades de inhibidores (y sólo en aval del pozo de producción) mientras que no es posible efectuar la misma operación con los revestimientos protectores.

Los plásticos permitan aumentar la resistencia de la corrosión y de la erosión. Los principales plásticos utilizados son el PVC, el polietileno poliamide, el acetato de celulosa, el "epoxy" y los derivados fluorados.

Las discontinuidades del revestimiento llevan consigo una activación de la corrosión, allí donde el revestimiento existe.

Estas partes son también puntos de desgarre del revestimiento. De todas maneras, siempre existen problemas en las juntas cualquiera que sea el revestimiento utilizado.

b) Protección con modificación de la superficie del metal

Se trata de revestimientos metalicos aplicados mediante :

- procedimientos fisico-químicos :

- . cementación,
- . nitruración,
- . cianurización,
- . "shérrardisation",
- . cromilización,
- . calorización,
- . sulfonitruración,
- . carbonitruración,

- procedimientos electro-químicos :

- . anodización.

- procedimientos químicos :

- . fosfatación,
- . oxidación pasiva.

7.2.2 Elección de un material adaptado

Cuando un problema está bien definido es posible elegir un tipo de metal que convenga al problema.

- a) De esta manera, en presencia de hidrógeno sulfurado, se recomienda utilizar aceros que tengan una dureza Rockwell C inferior o igual a 22 :

- para los tubos del casing, Vallourec ha logrado aceros al cromo que resisten muy bien al hidrógeno sulfurado, pero durante la utilización nos hemos dado cuenta que los tubos de acero clásicos K 55 y N 80 resisten muy bien a la corrosión del hidrógeno sulfurado ;

- para los intercambiadores de temperatura, el titaneo, aunque es muy costoso, se utiliza corrientemente.

b) No obstante conviene no asociar metales que tengan un potencial diferente, en el medio considerado.

c) El material de bombeo está constituido por diferentes aceros. Los fabricantes de este tipo de material conocen bastante la resistencia de los diferentes materiales que utilizan en los medios corrosivos, por ello es preferible consultarles.

Los materiales que resisten a las salmueras cargadas en hidrógeno son :

- el bronce de aluminio,
- el acero inox 316 forjado,
- el bronce de aluminio forjado al níquel,
- el "Ni-Resist".

d) Los plásticos PRFV (plásticos reforzados con fibra de vidrio) se pueden utilizar hasta 140 bars y 150°C.

7.3 REMEDIOS LIGADOS AL MEDIO Y AL METAL. INHIBIDORES DE CORROSION

Los inhibidores de corrosión son sustancias que mezcladas en pequeñas dosis al medio agresivo disminuyen o anulan su agresividad sin modificar las otras propiedades.

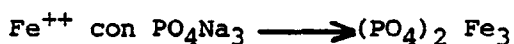
7.3.1 Diferentes tipos de inhibidores

Se distinguen tres tipos de inhibidores en función de sus modos de acción que consiste esencialmente en establecer una película que será eficaz si es continua y no porosa.

a) Inhibición por formación de un precipitado insoluble en el medio agresivo en la superficie del metal.

El inhibidor reacciona con alguno de los productos de la corrosión (catódico o anódico) para formar un precipitado aniómico, catiónico o mixto.

Ejemplo de inhibidor anódico :



Ejemplo de inhibidor catódico :



Ejemplo de inhibidor mixto :



b) Inhibición por formación o crecimiento de una película de óxido en la superficie del metal.

Es el caso de los cromatos, nitritos, molidatos por ejemplo, pero no es una acción generalizada de todos los oxidantes.

Son inhibidores los que llevan el potencial del metal suficientemente alto para que el metal se encuentre en la zona de pasividad del metal.

c) Inhibición por adsorción del inhibidor en la superficie del metal

Este tipo de acción es típico de los inhibidores orgánicos. Una capa monomolecular del inhibidor adsorbe en la superficie

del metal y suprime el contacto con el medio agresivo. La adsorción es función de la naturaleza química del inhibidor ; puede hacerse en sitios catódicos, pero generalmente los inhibidores orgánicos son de tipo catiónico.

7.4 REMEDIOS CONTRA LA CORROSION EXTERIOR

No hay que olvidar mencionar la corrosión provocada en las columnas del "tubing" por las aguas agresivas contenidas en los terrenos conductores atravesados.

Las columnas del "tubing" están protegidas en principio por el cemento. Pero la cementación casi nunca es perfecta y para evitar todo riesgo de corrosión se aplica una protección catódica a las columnas interiores de los tubing de los pozos de producción y de inyección.

7.5 REMEDIOS CONTRA MICRO-ORGANISMOS INTRODUCIDOS ACCIDENTALMENTE

Como ya hemos visto, los micro-organismos (principalmente las bacterias sulfato-reductoras y las bacterias ferruginosas) introducidas accidentalmente pueden proliferar (sobre todo entre 30°C y 40°C, en el pozo de inyección) y provocar a la vez corrosión y taponamiento.

La elección del "biocida" no es siempre fácil porque la actividad del inhibidor varía con :

- la resistencia de micro-organismos,
- el pH del medio,
- el potencial de óxido-reducción,
- el porcentaje de productos disueltos en el agua geotermal.

Cuando un pozo de inyección se tapone por micro-organismos, después de tratarlo con "biocida", será casi siempre indispensable proceder a un "back-flow" haciendo fluir el pozo. A continuación siempre es necesario proceder a un mantenimiento.

8. ENSAYOS EN LABORATORIO

8.1 FINALIDAD DE LOS ENSAYOS

8.1.1 Antes de la realización de la instalación

Si se conoce la composición del agua geotermal, los ensayos de laboratorio tienen por finalidad de efectuar una elección entre :

- los materiales,
- los modos de protección,

que pueden ser utilizados.

8.1.2 Durante el funcionamiento de la instalación

Los ensayos de laboratorio durante el funcionamiento de la instalación tienen por finalidad :

- controlar la corrosión e investigar diferentes medios para remediarla ;
- verificar la contabilidad de los aditivos con el agua geotermal ;
- verificar la contabilidad de los aditivos con el yacimiento ;
- probar los bactericidios empleados desde el punto de vista de su eficacia y de su contabilidad con el agua geotermal y con el yacimiento.

8.2 ENSAYOS DE CORROSION

8.2.1 Ensayos de corrosión por cupos

Estos ensayos consisten en observar la pérdida de peso del material que se quiere comprobar, en el medio agresivo y en presencia, o no, de medios de protección.

Estos ensayos por pérdida de peso son más precisos mientras mayor sea el tiempo de ensayo.

Es difícil dar un método preciso ya que cada ensayo depende de los medios materiales de que se dispone. No obstante es preciso trabajar con el fluido más representativo posible del medio agresivo constituido por el agua geotermal (composición, presiones, temperaturas) y con probetas metálicas suficientemente grandes.

Las probetas rectangulares deben guardar una relación l/L que varíe de $1/1$ a $1/4$: normalmente se toma $2 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$.

Las probetas circulares deben tener un diámetro por lo menos de $2,5 \text{ cm}$.

El tiempo del ensayo tiene que ser suficientemente largo, 8 días hasta varios meses, lo que implica que se tenga una cantidad de fluido agresivo suficiente y de esta manera se asegura que el fluido no se modifica a lo largo del tiempo.

8.2.2 Ensayos de corrosión por vía electroquímica

Estos ensayos consisten en observar el comportamiento electroquímico del metal en el medio agresivo y en presencia ó no de medios de protección.

Los ensayos electroquímicos son rápidos, pero muy a menudo son difíciles de interpretar.

8.3 ENSAYOS DE CONTABILIDAD CON EL AGUA GEOTERMAL

Los productos eventualmente añadidos al agua geotermal, como los aditivos anticorrosivos, los reductores, los bactericidios, pueden ser incompatibles con el agua geotermal y formar precipitados del tipo espumas y fenómenos de floculación.

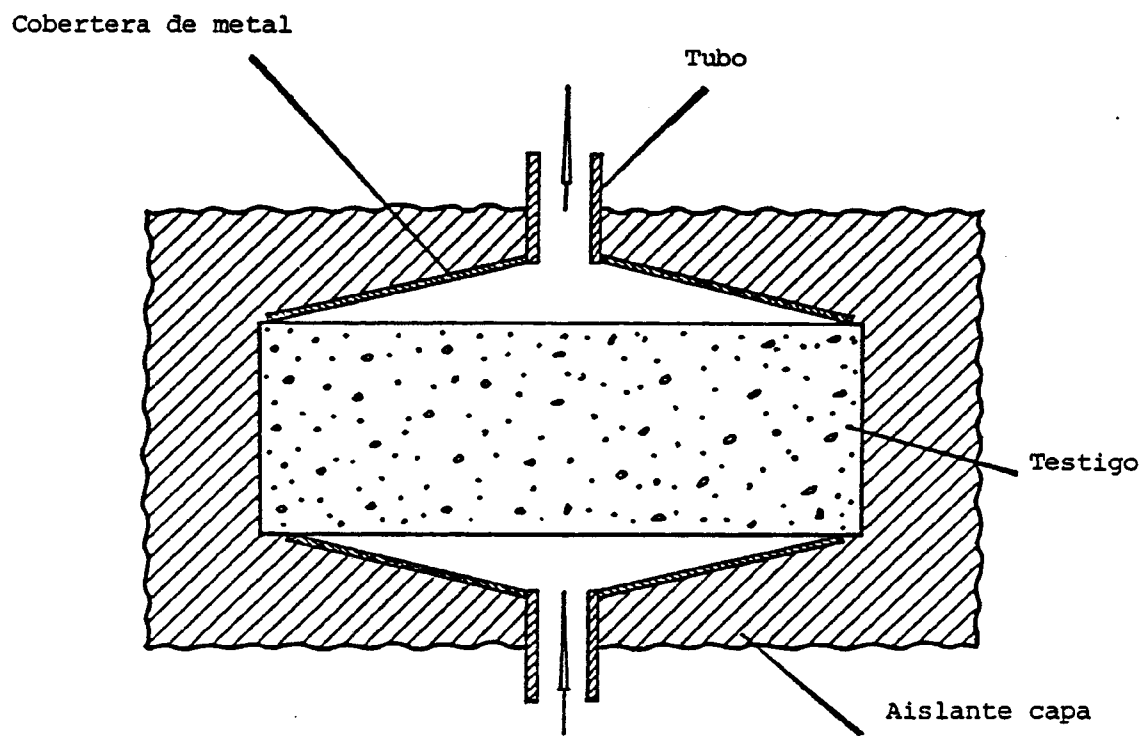


Fig. 1 - Esquema de la unidad de filtración.

Habrá que asegurar la no-reactividad de estos productos para el ensayo siguiente :

El agua geotermal y el/los productos añadidos se mezclan, en las proporciones de utilización, en un recipiente en las condiciones de presión y temperatura requeridas. Si al cabo de 8 horas, no se produce precipitación, de "floc" o de espuma, se admite que los productos añadidos son compatibles con el agua geotermal.

8.4 ENSAYOS DE COMPATIBILIDAD CON EL YACIMIENTO

Para estudiar la compatibilidad de los productos añadidos al agua geotermal con la roca almacén, se hace pasar el agua geotermal con los productos añadidos a través de una unidad de filtración (cf. fig. 1).

Una unidad de filtración está constituida por un trozo de testigo de la roca almacén, lavada y desengrasada, que se fija entre dos tapaderas de metal, inatacable por el agua geotermal, con sus aditivos y sobre la cual se ha colocado un tubo del mismo metal. Se recubre el conjunto con una capa de metal (metolux por ejemplo) que se adhiere fuertemente a la roca y al metal : de esta manera el único camino que puede tomar el flúido es pasando a través de los poros del testigo.

Previamente, la unidad de filtración se comprueba con aire o agua destilada (no hacerlo en una roca almacen con cemento arcilloso ya que las arcillas son hidrolizables) para averiguar las perdidas eventuales, luego se satura con agua de formación (solamente agua geotermal). Por fin se hace pasar el agua geotermal con sus aditivos durante 24 horas, a la presión y temperatura requeridas. Se establece entonces un gráfico caudal-tiempo. Si el caudal no cambia con el tiempo, los productos añadidos son compatibles con

el yacimiento. Si el caudal disminuye con el tiempo, los productos añadidos son incompatibles, mientras que si el caudal aumenta con el tiempo significa que la permeabilidad aumentará a medida que se vaya haciendo la inyección : los productos añadidos actúan entonces como estimulantes del almacén.

9. METODOS DE CONTROL IN SITU

9.1 FINALIDAD DE LOS CONTROLES IN SITU

Los controles efectuados in situ tienen la finalidad :

- de estudiar la corrosión in situ,
- de dosificar el hierro eventualmente presente en el agua geotermal,
- de buscar el oxígeno introducido accidentalmente,
- de detectar la presencia eventual de micro-organismos (bacterias).

9.2 ESTUDIO IN SITU DE LA CORROSION

9.2.1 "Caliper" del tubing

Los caliper de producción efectuados por empresas de servicios especializadas permitan medir variaciones de espesor en el tubing con un precisión de 0.01 mm.

Un caliper testigo tiene que ser registrado en cada pozo, previamente a la exploración de la instalación, al cabo de un año de explotación y después, cada dos años.

9.2.2 Manguillos-testigos

Se constituyen los manguillos con trozos de casing de 30 a 50 cm de largo y se suelda una correa en cada una de las extremidades para poder desmontarlos facilmente.

Se coloca el manguillo-testigo más abajo del cabezal de producción y otro un pozo más arriba del cabezal de inyección.

Previamente se habrán pesado estos manquillos-testigo y luego se desmontarán periódicamente, cada 2 o 3 meses, se observarán, limpiarán y se volverán a pesar. Esto permite seguir la evolución de posibles corrosiones e incrustaciones.

9.3 DOSIFICACIÓN DEL HIERRO Y DE LOS GASES DISUELTOS

Al comenzar la explotación de una instalación, las dosificaciones tienen que ser frecuentes.

Para efectuar las dosis, es necesario tomar muestras en varios puntos del circuito :

- cabezal de producción,
- a la salida de los intercambiadores de temperatura,
- cabezal de inyección.

Nos parece necesario efectuar al mismo tiempo que la dosificación del hierro, la de los gases disueltos.

9.4 DETECCIÓN DE BACTERIAS

Si, por lo general, no hay bacterias en las aguas geotermales, en la primera fase de explotación de una instalación, pueden introducirse accidentalmente durante los trabajos de mantenimiento. Por lo tanto es necesario hacer un muestreo mensual de agua geotermal en el cabezal de inyección para poder detectar la presencia de bacterias y poder remediar lo más pronto posible.

10. PROBLEMAS DE OBTURACION LIGADOS A LA CORROSION

Los productos de corrosión pueden dividirse en 2 tipos de productos : los productos solubles no peligrosos desde el punto de vista de obturación y los productos insolubles que pueden originar un taponamiento.

Los productos insolubles pueden clasificarse en 2 tipos :

- productos de tipo coloidal, peligrosos ya que originan tapones,
- productos pulverulentos, menos peligrosos.

Los productos que podrían ser molestos son :

- El sulfuro de hierro, muy insoluble, que precipita rápidamente sobre la pared del metal y puede despegarse en escamas. Se puede neutralizar por simple filtración sobre cartucho.
- El carbonato de hierro, muy insoluble, pero cuyas condiciones de pH ligadas a la cantidad de CO_2 favorecen su estado en solución. No plantea ningún problema.
- El hidróxido de hierro, muy insoluble, pero que aparece en forma coloidal y tiende a taponar los filtros de seguridad. Aunque el hierro provenga del ataque del metal o incluso del agua, el coloide solo aparece en presencia de oxígeno. Para remediar este fenómeno, se puede eliminar el oxígeno o secuestrar el hierro.
- Las bacterias sulfato-reductoras se manifiestan por la producción de sulfuro de hierro. Pero pueden proliferar en la formación originando la precipitación in situ de sulfuro de hierro y obstrucción. El remedio será la inyección de una bactericida o una estimulación con ácido clorídrico.

- Las bacterias del hierro que provocan la formación de filamentos de hidróxido de hierro.

Se utiliza igualmente ácido clorídrico para atacar estos filamentos.

11.- EJEMPLOS. CASOS MODELO

Hemos agrupado en este capítulo los datos sobre instalaciones existentes de geotermia de baja y media entalpia en las que se han realizado estudios o se han presentado problemas de corrosión, incrustación, colmatación. Citaremos también la experiencia adquirida en estos temas en instalaciones de inyección de aguas industriales residuales en Francia.

11.1.- FRANCIA

11.1.1.- JONZAC

Objetivo

Asegurar la alimentación mediante energía geotérmica de una red de calefacción urbana en la ciudad de JONZAC (5.000 habitantes). La energía calorífica aportada por la geotermia se estima en 18 000 kwh/año, es decir una economía de 2 300 TEP/año, gracias a la utilización de varias bombas de calor.

La expulsión del agua se hará a 20°C sin pozo de reinyección.

Situación de la instalación

El sondeo comenzó en Octubre de 1979 y terminó en Febrero de 1980. Se perforó el almacén triásico constituido

por areniscas, arenas, dolomias y arcillas entre 1630 y 1870 metros. Las características obtenidas tras completación son : 40 m³/h a 56°C y 5,9 g/l de salinidad, valores inferiores a los previstos.

Se supone un efecto de colmatación del acuífero originado por la utilización de un tapon bentonítico carbonatado sobre la totalidad de la altura de tal acuífero. Los ensayos de producción del pozo no han permitido alcanzar las características previstas.

11.1.2.- CRONEMBOURG

Objetivo

Producir mediante energía geotérmica 70 000 Mwh/año para calefacción de 4 200 viviendas existentes y conseguir una economía de aproximadamente 7 100 TEP/año.

Situación de la instalación

El sondeo de producción se realizó entre el 4 de Mayo y el 25 de Noviembre de 1980. Se perforaron las areniscas del Trias entre 2 700 y 3 200 metros. El caudal máximo obtenido mediante inyección de aire ("air-lift") no sobrepasó los 16 m³/h de un agua a 140°C con una salinidad de 56 gr/l. Estas características difieren ampliamente de las constatadas en los sondeos de exploración petrolífera realizados en la región.

Por otro lado las pérdidas de circulación parciales y totales, presentes entre 2 840 y 3 200 metros, permiten suponer que las características medidas no son equivalentes de las verdaderas del acuífero. Un "liner" de 600 metros, colocado

precipitadamente entre 2 600 y 3 200 metros, impide toda investigación complementaria del almacén colmatado por la invasión de un lodo de perforación inadaptado a la perforación de las areniscas de la formación almacén.

La única solución posible sería la realización de una desviación del sondeo por encima del techo del almacén.

11.1.3.- MELLERAY

Objetivo

Cubrir mediante energía geotérmica el 85 % de los requerimientos caloríficos necesarios para 16 hectareas de invernaderos. La economía prevista es de 2 800 TEP/año.

Situación del proyecto

La realización del doblete terminó en Diciembre de 1980.

El periodo de prueba, en curso, comenzó en Marzo de 1981.

Las características obtenidas son :

- potencia del Trias : 180 metros (1 436 a 1 618 metros),
- almacén triásico formado por areniscas más o menos arcillosas,
- pozo de producción (vertical) : 160 a 170 m³/h a 70°C, salinidad 38 gr/l,
- pozo de reinyección (desviado) : 90 m³/h a 44 bars y 45°C,
- distancia entre pozos : 600 m. en superficie y 1 000 m al nivel del Trias.

Los problemas encontrados son :

- caudal de producción inferior al previsto, pero compensado por una mayor temperatura,
- caudal de reinyección notablemente inferior al caudal de producción por lo que se realiza actualmente una expulsión parcial al río Loire. Este problema está siendo estudiado.

11.1.4.- ZUP de l'Almont (MELUN)

Esta primera instalación mundial de doblete geotérmico con intercambiadores de temperatura, para calefacción urbana, ha sido realizada a título experimental a partir de 1969.

Datos geológicos

El acuífero geotérmico está constituido con calizas del Jurásico medio cuyo techo fue encontrado en la profundidad vertical de 1 720 metros.

En el pozo de producción el acuífero ha sido atravesado a lo largo de 160 metros, mientras que en el pozo de inyección ha sido perforado solo a lo largo de 120 metros.

La temperatura del agua geotérmica es de 71°C.

La presión estática del yacimiento, medida en la cabeza de pozo, es de + 7 kg/cm².

El agua geotérmica tiene una salinidad en gramos/litro equivalentes de ClNa de 10 g/l y contiene además 20 mg/l de anhídrido sulfúrico.

Problemas con los intercambiadores de temperatura

Los intercambiadores de temperatura instalados en principio eran de acero corriente. Tras un año de funcionamiento, fueron corroidos y se reemplazaron por intercambiadores de titanio.

Estudio de la influencia de la temperatura y la presión en el incrustamiento y colmatación.

Las aguas geotérmicas están saturadas en CO_3Ca a la temperatura y presión del yacimiento.

Teóricamente (véase 4.1.1. y 4.1.2.), el pozo de producción debería encostrarse por depósito de CO_3Ca , cuya solubilidad disminuye 10 % cuando la presión pasa de aproximadamente 180 a 1 kg/cm^2 , mientras que la porosidad del almacén debería aumentar cerca del pozo de inyección y disminuir al alejarse del mismo.

Pero las medidas efectuadas en el pozo de producción del doblete geotérmico de la ZUP de l'Almont, situado en la cuenca de Paris, han mostrado realmente que no hay depósito calizo incrustante.

La ausencia de costra carbonatada ha sido explicada mediante cuatro fenómenos convergentes :

- la débil sobresaturación en CO_3Ca ,
- el caudal muy rápido (100 m^3/h en tubería de 7"),
- la cinética de precipitación del CO_3Ca directamente proporcional a la superficie de CO_3Ca en contacto con el agua,
- la débil cantidad de gas libre (0 a 5 %), disminuyendo el poder de catalización en la reacción de precipitación por las burbujas de gas.

En el pozo de inyección la presión crece de 1 a 180 kg/cm² aproximadamente. La solubilidad del CO₃Ca aumenta del 10 % : el efecto de la presión se añade al de la temperatura. Sin embargo, en el pozo de inyección de la ZUP d'Almont, no se ha producido ninguna colmatación, probablemente porque el CO₃Ca se deposita en forma de un precipitado finamente cristalino que tiene una acción colmatante débil o prácticamente nula.

11.1.5.- Sondeo de inyección controlada de aguas industriales residuales SEIF.I.1.

El sondeo de inyección SEIF.I.1. fué realizado en 1970 por la "Société des Engrais de l'Ile de France" para inyectar aguas residuales de su fábrica de Grandpuits situada a 60 km al Sureste de Paris.

Las aguas residuales contienen 5 a 6 g/l de nitrato, cloruro y sulfato amónico.

El almacén geológico seleccionado para la inyección fué el Jurásico medio cuyo techo fué localizado a 1 846 metros de profundidad y atravesado a lo largo de 140 metros.

Una tubería de 7" fué colocada a 1 850 metros y hasta la superficie. El almacén se dejó en pozo abierto.

La inyección se realiza a través de un "tubing" de 4"1/2 anclado mediante un "packer" situado a 1 840 m.

El "tubing" de inyección es de acero J 55, es decir un acero con bajo contenido en carbono y tratado al aluminio.

Los engarces de los tubos han sido reconidos a 650°C con el fin de obtener una textura homogénea. El "tubing" fué especialmente estudiado y concebido para resistir a la corrosión fragilizante bajo tensión de nitrato amónico, que realiza la misma acción que el SH₂.

Las aguas residuales, tras homogeneización, regulación del pH y filtrado, son inyectadas con un caudal de 92 m³/h con dos bombas triplex. No se toman medidas especiales para desairear las aguas residuales inyectadas.

Para controlar la corrosión superficial del "tubing", la Administración impuso el registro de un diametrador al comienzo de la inyección, otro tras un año de inyección y finalmente uno cada dos años. En cada registro de diametrador se midió la profundidad a la que se tocaba el fondo del pozo.

La profundidad del pozo ha disminuido con el tiempo, lo que indica un depósito de fondo debido a la inyección :

Fecha de Medida	Profundidad del fondo del pozo (m)
Marzo 1971	1980
Marzo 1972	1972
Oct. 1973	1966
Oct. 1975	1955
Mayo 1977	1950
Sept. 1979	1914

El jefe de laboratorio de la Fabrica de Grandpuits ha calculado que la pérdida de espesor del "tubing" por corrosión superficial (medida con los diametradores), y en consecuencia la pérdida de peso o de volumen, corresponde al volumen del depósito en el fondo del pozo. Todo esto podrá verificarse en el momento del cambio del "tubing" que está previsto para finales de 1982.

Este ejemplo muestra el importante papel del oxígeno en la corrosión y en la colmatación.

11.1.6.- Sondeo piloto de inyección controlada de aguas industriales residuales en Lorena (TD 1)

El almacén está formado por las "Areniscas de los Vosgos" (Trias) localizadas entre 1 082 y 1 223 metros de profundidad.

La composición química del agua del yacimiento viene dada en el cuadro siguiente :

Iones	Concentración mg/l
Cl ⁻	8 440
SO ₄ ⁻⁻	528
Ca ⁺⁺	1 536
Na ⁺	3 666
Fe ⁺⁺	1,65
pH	6,35

Se entubó el sondeo en el techo de las "Areniscas de Los Vosgos" y el almacén se dejó en pozo abierto.

Para calcular la transmisividad del almacén, se realizaron ensayos de flujo mediante "air-lift" durante ocho días en Diciembre de 1976. Los caudales oscilaron entre 40 y 115 m³/h. El hierro ferroso contenido por el agua del yacimiento, en contacto con el aire inyectado por "air-lift", se transformó en hierro férrico que precipitó en la tubería en forma de hidróxido férrico, Fe(OH)₃.

Cuando en 1978 comenzaron los ensayos de inyección controlada de aguas industriales residuales, el sondeo fué colmatado rápidamente por el Fe(OH)₃ que se había depositado sobre la tubería y que se depositó también sobre la pared del almacén. Haciendo producir el pozo, podía limpiarse la pared del almacén. Se decidió pues proceder a la limpieza del pozo (tubería y pared del almacén) antes de proseguir los ensayos de inyección. La operación de limpieza es costosa al necesitar un equipo ligero de perforación.

Una vez realizada la operación de limpieza, los ensayos de inyección pudieron efectuarse normalmente. Sobre la cabeza de pozo, una bomba dosificadora inyectaba un reductor con el fin de eliminar el oxígeno que pudiera encontrarse en las aguas residuales inyectadas, ya que el oxígeno reacciona en el almacén con el hierro ferroso Fe⁺⁺ transformándolo en hierro férrico que precipita en forma de Fe(OH)₃. Pese a esta precaución, se comprobó un aumento de la presión de inyección (en consecuencia un aumento del "skin effect") cada vez que se procedía a un cambio de filtro que implicaba la introducción de un exceso de aire.

Todo esto muestra el importante papel en la colmatación del hierro ferroso Fe⁺⁺, contenido en el agua del yacimiento

incluso en muy débil concentración.

Cuando hay hierro ferroso en el agua del yacimiento, debe evitarse la realización de ensayos de caudal mediante "air-lift". Además, debe inyectarse siempre un reductor con bomba dosificadora previamente a la inyección de las aguas residuales.

Finalmente hay que señalar que las aguas residuales desestabilizaban las arcillas contenidas en las "Areniscas de los Vosgos". Se pudo solucionar este problema inyectando un tensio-activo con bomba dosificadora.

11.2.- ISLANDIA - RESERVAS DE BAJA ENTALPIA

Las temperaturas de los fluidos de baja entalpia varían entre 50 y 120°C y la profundidad de los almacenes no supera los 1 000 metros.

La calefacción mediante aguas geotérmicas comenzó hacia 1920 y, en 1980, aproximadamente el 70 % de la población utilizaba la geotermia de baja entalpia para tal fin.

La figura 2 muestra las localidades donde la geotermia de baja entalpia se utiliza para calefacción.

En la mayor parte de las localidades, el agua geotermal se utiliza directamente en los radiadores y como agua caliente sanitaria. No obstante, se utilizan intercambiadores de temperatura en Selfoss.

Las aguas geotermiales no son ni muy corrosivas ni muy incrustantes dada su débil concentración en sales disueltas y su elevado pH que varía entre 7,90 y 10,25.

La composición media de las aguas geotérmicas utilizadas está expresada en el cuadro 1.

En 1972 se emprendió un estudio sistemático de la corrosión en las aguas geotérmicas empleadas para calefacción.

Cada elemento de prueba estaba integrado por tres tubos de aproximadamente 45 cm de largo colocados en serie. Los tres tubos eran respectivamente un tubo de cobre de 1,8 cm de diámetro, un tubo de acero dulce de 1,9 cm de diámetro y un tubo de acero galvanizado de 1,9 cm de diámetro. Un contador de agua media el flujo que circulaba a través de cada elemento de prueba. Se fijó el caudal en 5 litros por minuto aproximadamente.

Dos muestras tipo "pastilla" para corrosión en acero al carbono se colocaron en cada tubo. El examen del primer tubo con sus muestras se efectuó al cabo de un año, el del segundo tubo con sus muestras al cabo de dos años y el del tercer tubo con sus muestras al cabo de tres años, aproximadamente. Las muestras fueron utilizadas para determinar la corrosión superficial por pérdida de peso. La profundidad de los huecos se midió también en todas las muestras. Los tubos se cortaron en el sentido de la longitud y se examinaron también. Los productos de corrosión y de incrustación fueron pesados y analizados. Se tomaron muestras del agua geotérmica utilizada en los ensayos antes y después del ensayo de cada tubo. Tales muestras fueron analizadas.

Los resultados del estudio sistemático de corrosión están expresados en los cuadros 2 y 3. Las temperaturas y la composición de las aguas geotérmicas utilizadas en cada elemento de prueba se muestran en el cuadro 2, mientras que la velocidad de corrosión superficial y la velocidad de "picado" del acero al carbono se agrupan en el cuadro 3.

Elementos o iones	Concentración mg/l
Oxígeno (O ₂)	0,0 - 4,1
Bisulfuros (SH ⁻)	0,0 - 2,4
Sodio (Na ⁺)	32,0 - 337
Potasio (K ⁺)	0,3 - 9,3
Calcio (Ca ⁺⁺)	1,9 - 105
Magnesio (Mg ⁺⁺)	0,0 - 0,2
Cloruros (Cl ⁻)	7,7 - 528
Sulfatos (SO ₄ ⁻⁻)	2,1 - 180
Carbonatos (CO ₃ ⁻⁻)	0,6 - 13,7
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	13,7 - 131
Fluoruros (F ⁻)	0,1 - 5,0
Sílice (SiO ₂)	54,0 - 186
Total sales disueltos	< 153 - 1 382

CUADRO 1

Elementos o iones	Concentración mg/l
Oxígeno (O ₂)	0,0 - 4,1
Bisulfuros (SH ⁻)	0,0 - 2,4
Sodio (Na ⁺)	32,0 - 337
Potasio (K ⁺)	0,3 - 9,3
Calcio (Ca ⁺⁺)	1,9 - 105
Magnesio (Mg ⁺⁺)	0,0 - 0,2
Cloruros (Cl ⁻)	7,7 - 528
Sulfatos (SO ₄ ⁻⁻)	2,1 - 180
Carbonatos (CO ₃ ⁻⁻)	0,6 - 13,7
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	13,7 - 131
Fluoruros (F ⁻)	0,1 - 5,0
Sílice (SiO ₂)	54,0 - 186
Total sales disueltos	153 - 1 382

CUADRO 1

Lugares	Duración prueba (días)	Corrosión superficial (10^{-3} mm/año)	Huecos (Picado) (10^{-3} mm/año)	Profundidad max. de picado (10^{-3} mm)
Selfoss	259	16	320	227
	707	17	335	650
Dalvik	279	56	274	210
	448	56	244	300
	672	51	272	498
Hrisey	342	230	701	655
Olafsfjordur	390	38	190	203
	838	30	140	322
Hunavellir	278	0	0	0
	671	2	239	439
	841	5	259	599
Husavik	280	1	120	92
	672	0	81	151
Reykjahlid	283	3	61	46
	688	16	84	160
Reykir	280	1	51	38
	645	1	0	0
Storutjarnir	443	3	170	206
Saudarkrokur	279	5	200	153
	672	8	31	250
Bolholt	250	1	51	33
	616	2	66	109
Mogilsa	294	41	510	411
	722	23	228	452
Hvammstangi	388	5	105	111
	782	5	121	259
Seltjarnarnes	279	0	0	0
	593	0	0	0

El contenido en oxígeno y en anhídrido sulfúrico de las aguas geotérmicas de baja entalpia influye en la corrosión. Recordemos que el oxígeno y el anhídrido sulfúrico no pueden coexistir en equilibrio en un mismo fluido ; en consecuencia las aguas analizadas pueden así dividirse en aguas que contienen oxígeno y aguas que contienen SH₂. Las aguas geotérmicas de Selfoss, Dalvic, Hrisey y Olafsfjordur son aguas con oxígeno, mientras que las de otros lugares son aguas con SH₂.

Los resultados de este estudio muestran que :

- La corrosión superficial y "picado" son más importantes en presencia de aguas geotérmicas con oxígeno que en presencia de aguas con SH₂.
- Para aguas geotérmicas con el mismo contenido en oxígeno, la corrosión aumenta con la temperatura. El oxígeno puede estar presente (?) en el agua producida o bien deberse a contaminación por aire superficial.
- En Mogilsa donde las aguas geotérmicas contienen SH₂ y presentan el pH más bajo encontrado (7,9), la importancia de la corrosión superficial y del "picado" es similar a la que tiene lugar en presencia de aguas geotérmicas que contienen oxígeno.
- En la mayor parte de las aguas geotérmicas que contienen SH₂, la velocidad de "picado" tiene tendencia a decrecer con el tiempo. El "picado" no parece progresar a partir del final del segundo año.
- En el caso de las aguas geotérmicas que contienen oxígeno, la velocidad del "picado" se mantiene constante o disminuye escasamente con el tiempo. La profundidad de "picado"

es aproximadamente dos veces mayor que en el caso de las aguas geotérmicas que contienen SH_2 .

- La sílice puede actuar como inhibidor de corrosión, pero a baja concentración puede también provocar el "picado".
- Los cloruros pueden igualmente dar lugar al "picado".
- El aumento de pH disminuye la velocidad de corrosión del acero al carbono.

Los datos sobre los materiales empleados son escasos y poco ilustrativos.

En general, la red de distribución y las tuberías de calefacción en los inmuebles son de acero al carbono. Sin embargo en Husavik, se utilizan conducciones de amianto para la distribución.

En la región de Reykjavik, se observó una importante corrosión cuando, en 1943, comenzaron a utilizarse las aguas geotérmicas de Reykir. La corrosión se debía a la presencia de oxígeno disuelto (1 a 2,6 mg/l) debido tanto a la producción por "air-lift" como a la contaminación directa por aire. Los materiales en acero al carbono y en acero inoxidable fueron corroidos rápidamente, al igual que los revestimientos de zinc de los aceros galvanizados. Se pudo inhibir la corrosión añadiendo 10 mg/l de sulfito sódico por mg/l de oxígeno.

En 1948, las aguas geotérmicas de Reykjahlid que contienen SH_2 se mezclaron con las de Reykir. Los iones SH^- eliminaron el oxígeno y se depositó una capa protectora de óxido de hierro y de sílice sobre los materiales en contacto directo con las aguas termales mezcladas.

En Olafsfjordur, las conducciones en acero al carbono han resistido más de veinte años. Sin embargo una decena de radiadores sufrieron corrosiones similares a las de las muestras tipo "pastilla".

En Mogilsa, el alto contenido en SH^- y un débil pH provocó la perforación de las placas de cobre de los intercambiadores de temperatura.

En el caso de las aguas geotérmicas que contienen SH_2 , la vida de los radiadores poco espesos en acero al carbono es de 10 a 20 años y la de los tubos de cobre para la distribución de agua caliente sanitaria sobrepasa los 20 años.

11.3.- KLAMATH FALLS, OREGON (ESTADOS UNIDOS)

Klamath Falls está situada en el sur del estado de Oregon a una treintena de kilómetros al norte del límite con California (véase plano 2).

Las aguas termales artesianas se utilizan desde hace más de cien años. Las viviendas han sido calentadas con tales aguas desde antes del comienzo del siglo XX.

La temperatura de las aguas geotérmicas producidas está comprendida entre 22 y 99°C. La profundidad de los sondeos varía entre 60 y 600 metros.

No hemos podido obtener información referente a la litología de los almacenes explotados.

Algo más de 500 viviendas son calentadas por 450 sondeos. Se utilizan generalmente intercambiadores de temperatura situados en el fondo del pozo y constituido por tubos en U de acero

En Olafsfjordur, las conducciones en acero al carbono han resistido más de veinte años. Sin embargo una decena de radiadores sufrieron corrosiones similares a las de las muestras tipo "pastilla".

En Mogilsa, el alto contenido en SH^- y un débil pH provocó la perforación de las placas de cobre de los intercambiadores de temperatura.

En el caso de las aguas geotérmicas que contienen SH_2 , la vida de los radiadores poco espesos en acero al carbono es de 10 a 20 años y la de los tubos de cobre para la distribución de agua caliente sanitaria sobrepasa los 20 años.

11.3.- KLAMATH FALLS, OREGON (ESTADOS UNIDOS)

Klamath Falls está situada en el sur del estado de Oregon a una treintena de kilómetros al norte del límite con California (véase plano 2).

Las aguas termales artesianas se utilizan desde hace más de cien años. Las viviendas han sido calentadas con tales aguas desde antes del comienzo del siglo XX.

La temperatura de las aguas geotérmicas producidas está comprendida entre 22 y 99°C. La profundidad de los sondeos varía entre 60 y 600 metros.

No hemos podido obtener información referente a la litología de los almacenes explotados.

Algo más de 500 viviendas son calentadas por 450 sondeos. Se utilizan generalmente intercambiadores de temperatura situados en el fondo del pozo y constituido por tubos en U de acero

de 2" de diametro en lo que circula el agua del sistema urbano. En algunos casos, no obstante, el agua geotérmica se bombea mediante bombas sumergidas utilizándose entonces intercambiadores de temperatura de placas en superficie.

La composición química de las aguas geotérmicas está expresada en el cuadro 4. Señalemos que el pH de tales aguas varia entre 7,65 y 8,71.

La presencia de anhídrido sulfúrico y, en algunas instalaciones, de oxígeno, provocan la corrosión de los compuestos de cobre y hierro. Además, el bajo contenido en cloruros de estas aguas geotérmicas atenua su acción corrosiva con respecto al acero inoxidable. Finalmente la baja concentración en silice reduce al minimo el encostramiento por la misma.

En el campo de la corrosión, se estudió el comportamiento de los materiales por observación a lo largo de la explotación geotérmica. No obstante, se ensayaron muestras de distintos materiales aunque de forma limitada.

Las muestras para corrosión, constituidas por pequeños discos de 56 milímetros de diametro aproximadamente fueron introducidos en seis pozos durante 191 o 192 días. Las muestras fueron sumergidas, puestas en el limite agua-aire y situadas en el aire por encima de la superficie del agua. Los resultados obtenidos se muestran en los cuadros 5,6,7.

La maxima corrosión aparece en las muestras colocadas en el limite agua-aire (agua geotérmica aireada). Para los aceros al carbono, que son los más comúnmente empleados, la velocidad de corrosión superficial es de 0,223 mm/año en las muestras colocadas en el contacto agua-aire, contra

0,015 mm/año y 0,018 mm/año en las muestras sumergidas y colocadas en el aire respectivamente.

Se debe considerar la corrosión por "picado" y por grietas cuando se calcula la ingeniería de una instalación geotérmica. En el presente caso, las muestras de acero-Corten se perforaron si se las colocaba en el contacto agua-aire. La corrosión en grietas mostró una profundidad de 0,500 mm en los 6 meses que fué controlada. La velocidad de corrosión por picado de muestras de aluminio-6061 sumergidas sobrepasó los 3,683 mm/año.

Finalmente, se comprobó que los aceros inoxidable presentaban en conjunto la máxima resistencia a la corrosión.

Materiales utilizados

En general los sondeos tienen un diametro de 8 a 12" y son entubados con tubería de acero al carbono AISI 1010. El espesor de los tubos utilizados es de 1/4". Se estima en al menos cincuenta años la vida de estas tuberías.

Los intercambiadores de fondo de pozo son de acero al carbono AISI 1010, en general. Los ensayos y la experiencia indican que estos intercambiadores solo duran entre 5 y 20 años, dada la corrosión que se produce al nivel del contacto aire-agua.

Las bombas sumergidas se comportan como los intercambiadores de fondo de pozo, aunque en general los problemas no son achacables directamente a la corrosión sino al entorpecimiento por los residuos de corrosión.

0,015 mm/año y 0,018 mm/año en las muestras sumergidas y colocadas en el aire respectivamente.

Se debe considerar la corrosión por "picado" y por grietas cuando se calcula la ingeniería de una instalación geotérmica. En el presente caso, las muestras de acero-Corten se perforaron si se las colocaba en el contacto agua-aire. La corrosión en grietas mostró una profundidad de 0,500 mm en los 6 meses que fué controlada. La velocidad de corrosión por picado de muestras de aluminio-6061 sumergidas sobrepasó los 3,683 mm/año.

Finalmente, se comprobó que los aceros inoxidableables presentaban en conjunto la máxima resistencia a la corrosión.

Materiales utilizados

En general los sondeos tienen un diámetro de 8 a 12" y son entubados con tubería de acero al carbono AISI 1010. El espesor de los tubos utilizados es de 1/4". Se estima en al menos cincuenta años la vida de estas tuberías.

Los intercambiadores de fondo de pozo son de acero al carbono AISI 1010, en general. Los ensayos y la experiencia indican que estos intercambiadores solo duran entre 5 y 20 años, dada la corrosión que se produce al nivel del contacto aire-agua.

Las bombas sumergidas se comportan como los intercambiadores de fondo de pozo, aunque en general los problemas no son achacables directamente a la corrosión sino al entorpecimiento por los residuos de corrosión.

Para la conducción del agua de los pozos hasta los locales a calentar, se utilizan tuberías enterradas de acero al carbono, mientras que las conducciones de distribución en el interior de los inmuebles son de cobre. Los tubos enterrados han sido corroidos por la sal utilizada para fundir la nieve en invierno.

Las placas de los intercambiadores de temperatura son generalmente de aleaciones a base de cobre y se corroen a una velocidad media de 0,150 mm/año, lo que es relativamente importante dado el bajo espesor de las placas (0,711 mm).

Elementos o iones	Concentración mg/l
Cloruros (Cl^-)	47,5 - 61
Sulfatos (SO_4^{--})	325 - 413
Bicarbonatos (CO_3H^-)	0 - 84,2
Carbonatos (CO_3^{--})	14 - 23
Anhídrido Sulfúrico (SH_2)	ε - 1,5
Amonio (NH_4^+)	0,54 - 1,3
Oxígeno (O_2)	0 - 0,06
Silicio (Si_4^+)	43 - 67,4
Sodio (Na^+)	197 - 331
Calcio (Ca^{++})	13 - 29
Nitratos ($NO_3^-.$)	4,8 - 5,0
Potasio (K^+)	3,5 - 4,8
Fluoruros (F^-)	1,3 - 1,6
Hierro (Fe^{++})	0,01 - 0,3
Total sales disueltos	791 - 816

MUESTRAS EN EL CONTACTO AGUA-AIRE			
Materiales ensayados	Corrosión superficial (10^{-3} mm/año)	"Picado" (10^{-3} mm/año)	Corrosion en grieta (10^{-3} mm/año)
<u>Hierros colados</u>			
Gris	320	965	432
Ni-Résist tipo 2	58	584	533
<u>Aceros</u>			
AISI 1010	223	1 753	914
Corten	213	> 2 362	965
<u>Aceros inoxidables</u>			
Tipo 304	5	102	25
Tipo 316	3	25	25
Carpenter 20 Cb3	0	25	25
<u>Otras aleaciones</u>			
Incoloy 800	3	25	0
Bronce rojo	91	483	203
Cobre	117	381	102
Aluminio 6061	38	965	1 981

CUADRO 6

MUESTRAS COLOCADAS EN EL AIRE			
Materiales ensayados	Corrosión superficial (10 ⁻³ mm/año)	"Picado" (10 ⁻³ mm/año)	Corrosión en grieta (10 ⁻³ mm/año)
<u>Hierros colados</u>			
Gris	69	0	0
Ni-Résist tipo 2	5	0	
<u>Aceros</u>			
AISI 1010	18	152	279
Corten	38	254	330
<u>Aceros inoxidables</u>			
Tipo 304	0	0	0
Tipo 316	0	0	0
Carpenter 20 Cb3	0	0	0
<u>Otras aleaciones</u>			
Incoloy 800	0	0	0
Bronce rojo	3	0	0
Cobre	3	25	76
Aluminio 6061	8	51	0

CUADRO 7

I . CONCLUSIONES

La explotación de aguas geotermales a baja y media entalpia plantea numerosos problemas teóricos de incrustación, obstrucción y corrosión.

En general, se saben resolver los problemas de corrosión utilizando los materiales adaptados y ciertos aditivos. Los problemas de corrosión sólo son un problema de coste que no debe obligar a inversiones o a gastos de mantenimiento que puedan afectar la rentabilidad económica de una explotación.

Los problemas de encostramiento no parecen haberse planteado en la práctica durante la explotación de aguas geotermales.

En cambio, los problemas de obstrucción se han descuidado hasta ahora en Francia, aunque pueden poner en peligro la explotación de un doblete geotérmico. Esto ocurre ya que los primeros dobletes realizados y puestos en funcionamiento explotan aguas de formación del Jurásico medio de la Cuenca de Paris, que es un almacén calcáreo a la vez con permeabilidad de matriz fuerte y fisurado y en el que se puede inyectar cualquier cosa sin tomar ninguna precaución. Pero desde luego no se recomienda lo mismo al explotar aguas geotermales ferruginosas o que no provengan de rocas almacenes detríticas con cemento arcilloso.

Recomendamos por lo tanto de siempre estudiar los problemas de corrosión e incrustación con la instalación de un doblete pero sobre todo de estudiar la posible obstrucción.
