

# Universidad Autónoma de Guadalajara

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA MICROPILOTO PARA  
DETERMINAR VELOCIDAD Y CINETICA DE CORROSION  
EN ACEROS DE USO GEOTERMICO”**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
PRESENTA

**BENJAMIN VALDEZ SALAS**

Asesor: I.Q. Ma. del Consuelo López Limón  
GUADALAJARA, JALISCO. 1987



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE

		PAG.
	PRÓLOGO.	1
CAPÍTULO I.-	INTRODUCCIÓN.	2
CAPÍTULO II.-	TEORÍA.	7
CAPÍTULO III.-	DISEÑO EXPERIMENTAL.	42
CAPÍTULO IV.-	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.	58
CAPÍTULO V.-	EXPERIMENTACIÓN.	87
CAPÍTULO VI.-	EVALUACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CÁLCULOS Y DISCUSIÓN.	102
	RESUMEN.	120
	CONCLUSIONES.	130
	BIBLIOGRAFÍA.	131
	APÉNDICE A.	133
	APÉNDICE B.	137
	APÉNDICE C.	144
	APÉNDICE D.	148

## PRÓLOGO

El presente trabajo de tesis, tiene 2 objetivos: El primero es diseñar y construir un sistema para simular las condiciones de los lodos de perforación de un pozo geotérmico y realizar evaluaciones de velocidades de corrosión causada por lodos base-agua, en aceros de herramientas y tuberías usadas en dicha operación.

El segundo objetivo es realizar pruebas electroquímicas utilizando el método de polarización lineal con salmueras sintéticas. Ya que las propiedades de éstas varían de un campo geotérmico a otro, se usarán concentraciones extremas, es decir, una baja y otra alta. Con los resultados aquí obtenidos, se van a realizar cálculos de velocidades de corrosión y de orden de reacción electroquímica, enfocando la reacción  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  como reacción principal.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

Por ser la electricidad una de las bases en las que se apoya un país para su progreso y desarrollo, el hombre se ha preocupado por encontrar diferentes fuentes de energía para generarla.

La geotermia es la nueva energía descubierta apenas a principios de siglo, cuando se vislumbraron sus enormes posibilidades como fuente de energía, no obstante de ser la geotermia el recurso energético más antiguo del planeta.

La energía calorífica del subsuelo, es absorbida por el agua que se filtra a través de los estratos geológicos, el fluido así calentado, se puede presentar en el yacimiento como vapor, mezcla vapor-agua o agua sobrecalentada. Los fluidos se extraen a través de pozos que se construyen expresamente, separando y conduciendo el vapor hacia turbinas, las que han de producir la energía eléctrica.

México cuenta con dos sistemas geotérmicos principales, (Norte y Centro) con varios focos termales clasificados (fig.1), dentro de los cuales se encuentra Cerro Prieto B.C.; Ixtlán de los Hervores, los Negritos y los Azufres, en Michoacán; La Primavera y San Marcos en Jalisco.

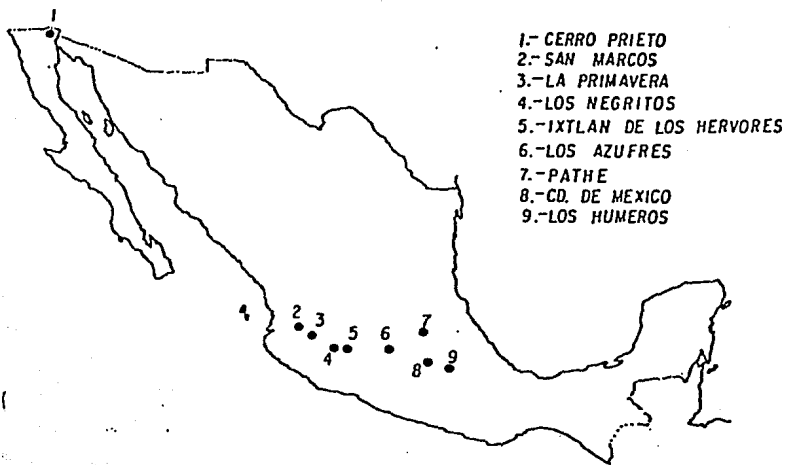


FIGURA 1. AREAS DE DESARROLLO GEOTÉRMICO EN MÉXICO.

El campo de Cerro Prieto es llamado la "Perla Negra" de la geotermia mundial, por que ahí se han registrado las temperaturas y presiones de fondo de pozo más altas del mundo.

### 1.1.- PERFORACIÓN.

El fluido geotérmico es producido de la tierra por medio de pozos perforados en las rocas del yacimiento, y el método de perforación que se use, deberá tener dos requerimientos básicos: 1) Un medio de rompimiento o desmoronamiento de la formación a ser penetrada, y 2) Un medio para remover los recortes o fragmentos de roca que son producidas en la operación de perforación.

En México se usa el método de perforación rotatoria, el cual utiliza el movimiento rotacional de una barrena operando en el agujero, para romper o desmoronar las formaciones. Esta barrena está fijada por medio de uno o más collares a la tubería de perforación, la cual se extiende hasta la superficie.

En la superficie, el movimiento rotacional es impartido a la tubería de perforación por medio de una mesa rotatoria y un empalme especial conocido como la Junta de Kelly.

Los recortes son removidos a la superficie por medio de la circulación de un fluido, comúnmente un fluido base-agua o lodo de perforación. En circulación normal, el fluido de perforación es bombeado hacia abajo a través de la Junta de Kelly, la tubería y la barrena de perforación, retornando a la superficie por el espacio anular que hay entre la tubería de perforación y la pared

del pozo. La figura 2, muestra un equipo moderno de perforación geotérmica.

La corrosión y la erosión, son los principales problemas que ocasionan los lodos en la operación de perforación, estos dos problemas son originados por: La temperatura de operación elevada y el carácter corrosivo y erosivo de los lodos de perforación.

#### 1.2.- LA ALTA TEMPERATURA.

La perforación geotérmica es similar a la petrolera, en cuanto a técnica y método de perforación, pero a condiciones de fondo de pozo, existe una diferencia muy marcada: la temperatura, ya que las temperaturas de los pozos geotérmicos oscilan en el rango de 200 a 300 oC. Estas altas temperaturas alteran las propiedades del flujo y funciones del lodo de perforación.

#### 1.3.- CARACTER CORROSIVO Y EROSIVO.

Los lodos de perforación, durante la operación de perforación sufren cierta contaminación por los gases y salmueras geotérmicas de la formación y por los sólidos arrastrados, como arenas, lutitas, etc., originando su carácter corrosivo y erosivo, lo que ocasiona el desgaste, y algunas veces la pérdida del equipo por efectos de corrosión y erosión. Estos daños se presentan, principalmente, en las barrenas y tuberías de perforación, disminuyendo la vida del equipo y, por lo tanto aumentando el costo de la perforación.



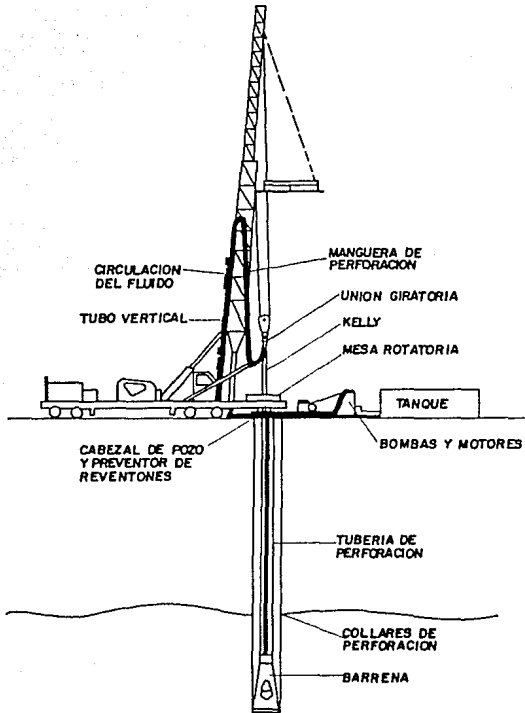


Figura No. 2  
EQUIPO DE PERFORACIÓN GEOTÉRMICA

## CAPÍTULO II

### TEORÍA

En este capítulo se explica brevemente la teoría de corrosión para poder relacionar los lodos de perforación base-aceite con el problema de corrosión en equipos de perforación geotérmica. Así como también las relaciones matemáticas para el cálculo de la velocidad de corrosión. Los conceptos fundamentales de la teoría de transferencia de carga en reacciones de electrodo, las ecuaciones de Tafel y polarización lineal son también explicadas.

#### 2.1.- TEORÍA DE CORROSIÓN.

La corrosión es el ataque destructivo en un metal por reacción espontánea e irreversible con su medio ambiente. En un medio acuoso, la acción es similar a la que se lleva a cabo en una batería para generar corriente eléctrica. Consta de un electrodo central de grafito y un electrodo hueco de zinc, separados por un electrolito, que consiste esencialmente de una solución de cloruro de amonio (figura 3). Un foco conectado a ambos electrodos enciende continuamente, siendo la energía eléctrica suministrada por las reacciones electroquímicas, las que ocurren simultáneamente en ambos electrodos (1). En el polo positivo (carbón) ocurre una reacción de reducción química, y en el polo negativo (zinc) ocurre la oxidación; el zinc metálico se convierte en iones zinc. Entre más grande sea el flujo de electricidad a través de la celda, más grande la cantidad de zinc que se

corroe. Se observa que sólo el zinc se corroe.

Si la celda se pone en corto circuito, la cuba de zinc será perforada por corrosión en cuestión de horas; cuando se desconecta a la izquierda (circuito abierto) el zinc puede permanecer intacto por años. La desaparición lenta del zinc, mientras el circuito está abierto se debe en parte a impurezas encajadas en él. Estas impurezas asumen el mismo papel del electrodo de carbón y permiten el flujo de electricidad acompañado por corrosión del zinc. Las corrientes de esta clase son llamadas "corrientes de acción local", y las celdas correspondientes "celdas de acción local".

Cualquier superficie metálica es un conjunto de electrodos, conectados eléctricamente en corto circuito a través del cuerpo del metal (figura 4). Mientras que el metal permanece seco la corriente de acción local no fluye y no ocurre corrosión. Pero en exposiciones del metal al agua o soluciones acuosas, las celdas de acción local son capaces de funcionar y son acompañadas por conversión química del metal a productos de corrosión. En otras palabras, las corrientes de acción local, pueden presentarse por la corrosión de metales expuestos al agua, a soluciones de sal, a los ácidos o álcalis.

La eliminación de las impurezas de un metal, las que como ya se dijo constituyen los electrodos de las celdas de acción local, podría ayudar a mejorar la resistencia a la corrosión, apreciablemente. Es erróneo suponer que la mayoría de los metales puros, no se corroen del todo. Las celdas de acción local se

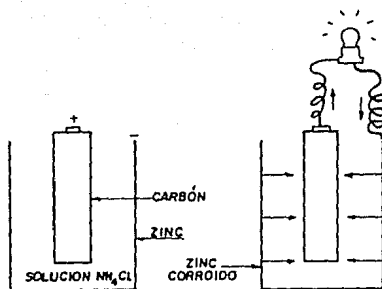


FIGURA 3.- CELDA SECA.

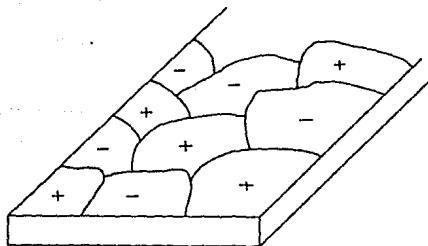


FIGURA 4.- SUPERFICIE METÁLICA AMPLIADA, MUESTRA EL ARREGLO ESQUEMÁTICO DE CELDAS DE ACCIÓN LOCAL.

establecen también cuando hay variaciones en el medio ambiente o en la temperatura. Con acero en agua pura, por ejemplo, los electrodos negativos son comúnmente porciones de la superficie misma del metal, algunas veces cubierta por óxido, y los electrodos positivos son áreas expuestas al oxígeno. El electrodo positivo y negativo, frecuentemente intercambian áreas y se trasladan de lugar en lugar, conforme la reacción procede.

### 2.1.1.- ACERO.

Puesto que el acero es el material sobre el que se realizó esta investigación, se dan a continuación algunas propiedades del mismo. El acero es comúnmente una aleación de hierro y carbono.

El hierro puro es un material dúctil y relativamente débil, pero cuando se alea con pequeñas cantidades de carbono (usualmente de 0.2 a 1.0 por ciento) resulta un material mecánicamente resistente. Sin embargo, como un resultado de la parte reactante del hierro con carbono, tenemos una aleación compuesta por dos materiales, ya que el producto de esta reacción es hierro puro (Fe) y carburo de hierro ( $Fe_3C$ ).

El carburo de hierro está distribuido dentro de la matriz del acero como microislas. En el caso del acero, las islas de carburo de hierro tienen una más baja tendencia a corroerse que el hierro puro. Ambos están en contacto íntimo, permitiendo el flujo electrónico, así que, cuando el acero se coloca en agua o un electrolito, se completa el circuito y el flujo electrónico

aparece en la superficie del metal.

En los componentes del acero, el hierro actúa más frecuentemente como el ánodo y se corroe, mientras que el carburo de hierro actúa como cátodo. La corrosión por medio de una celda de acción local hecha de  $Fe_3C$  y  $Fe$  se ilustra en la figura 5. El hierro va dentro de la solución con el ánodo de hierro puro y los electrones emigran al cátodo de  $Fe_3C$ . Si el exceso de electrones en el cátodo se alejan por cualquier mecanismo, la reacción de corrosión procederá. Si no, entonces la concentración de electrones (carga negativa) también se acumulará en el ánodo y tenderá a mantener los iones de hierro  $Fe^{++}$  cargados positivamente yendo desde dentro de la solución por medio de atracción de cargas opuestas. El acero se fabrica en una gran variedad de calidades.

La metalurgia de aceros usados en perforación es un campo especializado de estudio, en si mismo.

## 2.2.- EL PROCESO DE CORROSION.

La reacción electroquímica que resulta en la corrosión implica el flujo de corriente a través de un circuito eléctrico cerrado. El circuito eléctrico del proceso de corrosión consiste de cuatro partes:

- a) Ánodo.

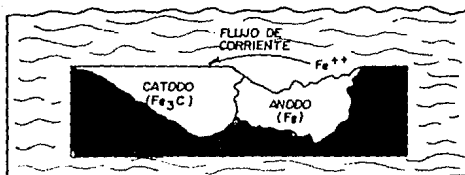


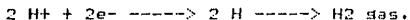
FIGURA 5.- FLUJOS DE CORRIENTE DURANTE LA CORROSIÓN.

- Se denomina así al electrodo positivo, es decir el electrodo que dentro del sistema químico recibe electrones de éste, cediéndolos al exterior. A este fenómeno se le conoce como oxidación, sin embargo trasladado al caso del hierro o cualquier metal, se conoce como corrosión:

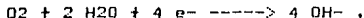


b) Cátodo.

- Es el electrodo negativo, o sea el que, dentro del sistema químico, cede electrones a éste, recibiendo los del exterior. Este proceso equivale a una reacción de reducción. En ausencia de oxígeno y en soluciones ácidas, la reacción puede ser:



o en soluciones neutras o alcalinas con oxígeno presente:



c) Electrólito.

- Es toda sustancia que es conductora de la electricidad, y puede estar dissociada, total o parcialmente, en sus iones cuando se disuelve en un disolvente. La capacidad conductora de la solución va ser directamente proporcional a la concentración de iones en la misma.



d) Conductor electrónico.

- En este tipo de conductores están comprendidos los metales, aleaciones y otros, como el carbono. La corriente pasó a través de ellos sin desplazamiento de materia. En este caso, el ánodo y el cátodo actuarían como conductores externos en el sistema redox.

2.2.1.- ENERGIA PARA EL PROCESO DE CORROSIÓN.

La reacción química  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  no es espontánea, hay que invertir mucha energía para llevarla a cabo, ya que la energía libre (G) del Fe es más alta que la energía libre del FeO. Como consecuencia de esto, el Fe no puede ser estable, sino que tenderá a estar en forma de óxido FeO. En la figura 6, se observa que, para pasar del estado I al estado II, se requiere de una energía de activación G, la cual se obtiene a través de las fluctuaciones térmicas de la materia. Por ser la termodinámica una ciencia que basa su estudio en condiciones de equilibrio, nos da muy poca información sobre la velocidad y cinética de corrosión.

2.3.- MEDIOS CORROSIVOS.

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos, algunos ejemplos son: aire y humedad; agua pura, salina, destilada; atmósfera rural, urbana, industrial; vapor y otros gases; etc. Por regla general, los medios inorgánicos, temperaturas y presiones altas, provocan mayor corrosión.

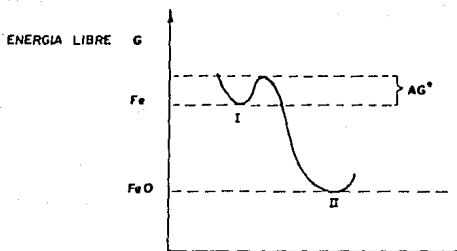


FIGURA 6.- DIAGRAMA DE ENERGÍA LIBRE.

### 2.3.1.- CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN.

A veces se clasifica en corrosión a alta temperatura y a baja temperatura; a veces, en combinación directa (oxidación) y procesos electroquímicos. La clasificación más general es:

--- Corrosión húmeda o "corrosión".

--- Corrosión seca u "oxidación".

La corrosión húmeda sucede cuando el material está en contacto con agua líquida, mientras que la corrosión seca ocurre en contacto con gases, incluyendo también vapor seco. La corrosión es clasificada según la forma en la cual se presenta; las ocho principales formas de corrosión son:

- 1.- Corrosión uniforme.
- 2.- Corrosión galvánica.
- 3.- Corrosión por hendidura.
- 4.- Corrosión por picaduras.
- 5.- Corrosión intergranular.
- 6.- Disolución selectiva.
- 7.- Corrosión - Erosión.

## 8.- Corrosión bajo tensión.

### 2.3.2.- FATIGA POR CORROSIÓN.

Se ha estimado que el 20 por ciento de rupturas en la tubería, son atribuibles a la fatiga por corrosión (1). Las grietas penetran en la pared del tubo y son designadas como rupturas de fatiga por corrosión. Los esfuerzos de flexión en la tubería son difíciles de evitar durante las operaciones de perforación. Cualquier desviación del agujero fuera de la vertical, causa esfuerzos cíclicos conforme la tubería es rotada, y el efecto de estos esfuerzos sobre el metal está influenciado por el grado de corrosividad del lodo en que la tubería está sumersida.

Las grietas por fatiga usualmente comienzan en la superficie de la tubería, pero pueden ser difíciles de detectar por observación visual.

### 2.3.3.- CORROSIÓN POR EROSIÓN.

La corrosión por erosión es un deterioro acelerado por el efecto erosivo de un fluido en movimiento, particularmente cuando contiene sólidos suspendidos. En efecto, cualquier película protectora es arrastrada, permitiendo el avance de la corrosión. Las altas velocidades anulares, flujo turbulento en el espacio anular, y la perforación con aire o aire-vapor, contribuyen a este efecto. Para reducir la corrosión por erosión, se recomiendan velocidades anulares más bajas, lodos de limpieza con bajo contenido de sólidos, y perfiles de flujo laminar.

#### 2.4.- PASIVACIÓN DE LOS METALES.

Es bien sabido que el hierro no es atacado en el ácido nítrico concentrado, comportándose como si se tratara de un metal noble, pues, a pesar de su tendencia termodinámica a reaccionar, permanece prácticamente inalterable. Este fenómeno se conoce como pasivación de los metales. En general, parece que la pasivación se mantiene por una película que recubre al metal, constituida por un óxido o compuesto oxigenado estables.

En el curso de la disolución anódica de los metales, se pueden también observar fenómenos de pasivación. Al aplicar potenciales positivos crecientes a un metal que se disuelve anódicamente, resulta que, al principio, la intensidad de corriente aumenta, pero a un potencial determinado, cae bruscamente a valores extremadamente bajos, que se mantienen durante un intervalo de potencial. Esto indica que el proceso de disolución del metal queda detenido, es decir, el metal se pasiva inhibiendo la reacción. A potenciales más altos, aumenta de nuevo la corriente (4).

#### 2.5.- LODOS DE PERFORACIÓN Y CONTAMINANTES CORROSIVOS.

Los lodos de perforación son los fluidos que se utilizan para extraer hacia la superficie los recortes que hace la barrena en la operación de perforación. El lodo que se utiliza en perforación geotérmica, es base-agua emulsionado, ésto es, además de tener los componentes inertes de la fase sólida, como lo son, la bentonita,

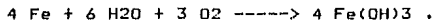
lisnosulfonatos, cromolisnitos, etc., se le agrega cierta cantidad de diesel para obtener un menor rozamiento con la tubería, y mayor facilidad para sondeo.

Los principales contaminantes corrosivos en lodos de perforación, están enlistados en la tabla 1. Estos contaminantes pueden estar en un sistema de lodo dado, uno u otro únicamente, o en varias combinaciones. El efecto corrosivo del medio en el equipo de perforación, dependerá de la concentración y del tipo de contaminantes del lodo.

#### 2.5.1.- OXÍGENO DISUELTO.

El oxígeno es el mayor causante de la corrosión en la tubería de perforación. Este gas se combina con el lodo en la superficie durante la circulación, además de que la adición de agua fría, la remoción de recortes en la criba vibratoria, y el mezclado del lodo aumentan el contenido de oxígeno considerablemente.

La corrosión del acero por oxígeno en un medio acuoso, se escribe químicamente como sigue:



En el ánodo, el elemento hierro llega a ser el ión hierro en solución (  $\text{Fe} \text{ ---->} \text{Fe}^{++} + 2 \text{ e}^-$  ), y en el cátodo, el oxígeno combina con el agua para formar iones oxidrilo.

TABLA 1.  
PRINCIPALES CONTAMINANTES CORROSIVOS EN LOS  
Lodos DE PERFORACION.

*****	
* CONTAMINANTE	* POSIBLE FUENTE
*****	
* Sales Solubles	* Aditivos de lodo, * Formación.
*****	
* Oxígeno	* Aeración superficial.
*****	
* Bióxido de carbono	* Formación, aeración, * composición del agua, * acción bacteriana.
*****	
* Ácido sulfhídrico	* Formación, composición * del agua, degradación * de aditivos del lodo, * actividad bacteriana.
*****	



Hay dos mecanismos importantes por medio de los cuales el oxígeno acelera la corrosión, y éstos son:

a) El oxígeno actúa como un despolarizador, e. i., éste remueve electrones aceptando iones hidrógeno del cátodo, que son acumulados como resultado del proceso de corrosión. Sin oxígeno, el cátodo se puede polarizar fuertemente por el gas hidrógeno.

b) El oxígeno ataca directamente al metal en los sitios anódicos, causando corrosión.

El ataque de oxígeno es frecuentemente evidenciado por picado. Muy pequeñas concentraciones de oxígeno (< 1 ppm) puede causar corrosión severa.

Puesto que la mayoría de los adelgazadores orgánicos para lodos base-agua, reaccionan con el oxígeno, se cree que el oxígeno arrastrado a la superficie se remueve lentamente por estos componentes, conforme el lodo se bombea por la tubería de perforación. Consecuentemente, se ha detectado que la mayor corrosión ocurre a bajas profundidades, en la parte interna de la tubería de perforación.

#### 2.5.2.- BIÓXIDO DE CARBONO DISUELTO.



Cuando el bióxido de carbono disuelto en agua, forma ácido carbónico, disminuye el pH del agua e incrementa su corrosividad. La solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua, como todos los gases, depende de la presión parcial del gas arrastrado en el lodo, siendo más soluble que el oxígeno.

La corrosión por bióxido de carbono, normalmente causa picado severo y grietas cortantes en áreas de fatiga.

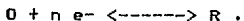
### 2.5.3.- ÁCIDO SULFÚRICO DISUELTO.

La corrosión por ácido sulfúrico puede ser rápida, con estable y profundo picado. Una reacción seguida, es que el hidrógeno liberado durante la reacción de corrosión puede entrar al acero de la tubería y frasilizarlo.

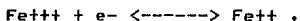
En la ausencia de azufre, el hidrógeno se deposita en la superficie de la tubería como una película de hidrógeno atómico, que se combina con si misma para formar hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>). La molécula de H<sub>2</sub> es grande para entrar al acero. Solamente una pequeña cantidad entra al acero y rara vez causa dificultad, a menos que las condiciones sean severas.

### 2.6.- CINÉTICA ELECTROQUÍMICA: REACCIONES DE ELECTRODO.

Las reacciones elementales en un electrodo pueden dividir el flujo de corriente en un circuito eléctrico externo, sólo si los electrones son adicionados o tomados del electrodo. Tal reacción elemental de electrodo vamos a escribirla en la forma:



Donde O representa alguna especie reducible en la solución, R representa alguna especie oxidable en la solución, y el coeficiente estequiométrico n es el número de electrones transferidos en cada reacción elemental sucedida. Al menos uno de R y O debe ser ión, y frecuentemente ambos lo son, un ejemplo es:



Por cada mol de electrones transferidos cuando la reacción procede hacia adelante, una carga total negativa  $Q = - nF$ , fluye del circuito externo, donde F es la carga eléctrica de un mol de electrones, igual a 96,487 coulombs. La velocidad neta de la reacción general, por unidad de área A de electrodo, será:

$$R_{net} = - dno / dt .$$

Dónde "no" es el número de moles de O que son reducidos en un  $cm^2$  de la superficie del electrodo. El flujo de corriente en el circuito externo es:

$$i_{net.} = dQ / dt .$$

Puesto que  $dQ/dt = nFA(dno/dt)$ , la corriente y la velocidad neta de reacción, son proporcionales una a la otra.

$$i_{net.} = nFA R_{net} .$$

En electroquímica es conveniente considerar la corriente neta como la suma algebraica de corrientes causadas por las reacciones hacia adelante y atrás, que son la reducción y oxidación respectivamente. La corriente resultante de la reacción en la dirección reducción es llamada corriente cática:

$$i_c = nFA R_{red} ,$$

La corriente resultante en la dirección oxidación es llamada corriente anódica:

$$i_a = nFA R_{ox} .$$

El flujo de corriente neta es entonces:

$$i_{net} = i_c - i_a = nFA ( R_{red} - R_{ox} ) .$$

Para propósitos de explicación de esta, tomaremos la reacción más sencilla, de manera que las velocidades sean de primer orden con respecto a la concentración:

$$R_{red} = K_{red} [O]^{x=0} , R_{ox} = K_{ox} [R]^{x=0} .$$

El subíndice  $x=0$  indica que las velocidades dependen de las concentraciones en la interfase electrodo-disolución. Puesto que las velocidades  $R_{red}$  y  $R_{ox}$  están en moles/(cm<sup>2</sup> s), las constantes  $K_{red}$  y  $K_{ox}$  son en cm/s.(7).

### 2.6.1.- TRATAMIENTO CINÉTICO MÁS RIGUROSO, ECUACIONES DE TAFEL.

Un tratamiento cinético más riguroso de las reacciones electroquímicas en régimen de transferencia de carga, es el criterio de la reversibilidad. La interfase electrodo - disolución, se comporta como un condensador debido a la adsorción de cargas de distinto signo. Según Helmholtz, si un electrodo metálico se carga positivamente, los iones negativos de la disolución son atraídos hacia la superficie de éste, repartiéndose en un plano homogéneo. Otros autores dicen que la capa debe ser un poco más irregular, Stern(2) reorganizó estas teorías y dijo que la doble capa debería estar formada por una primera capa de Helmholtz ( 2 a 3 angstroms) y más allá de esta capa, una más irregular, con un espesor de unos 100 angstroms, y en la cual habrá un exceso de iones de un signo, con respecto a la concentración en el seno de la disolución. Teniendo así una primera capa compuesta y una segunda capa difusa.

Por lo tanto, la energía de activación tendrá una contribución química y otra debida a la doble capa de tipo eléctrica, así tenemos:

$$a) \Delta H_{ox} = \Delta H_{ox}^0 - nF\phi$$

$$b) \Delta H_{red} = \Delta H_{red}^0 + nF\phi$$

Para potenciales de electrodo diferentes a los de equilibrio, E diferente que  $E_{eq}$ , tenemos que:

$$i = i_t + i_- = i_o (e^{\alpha n F N / RT} - e^{-\beta n F N / RT}) \dots\dots\dots 2.1.$$

Dónde:

$$i_- = i_o e^{-\beta n F N / RT} \text{ intensidad c\u00e1todica } \dots\dots\dots 2.2.$$

$$i_t = i_o e^{\alpha n F N / RT} \text{ intensidad \u00e1nodica } \dots\dots\dots 2.3.$$

Aqu\u00ed, N es el sobrepotencial de electrodo, alfa y beta son dos coeficientes de transferencia que se explicar\u00e1n m\u00e1s adelante. Si aumentamos los valores absolutos de la sobretensi\u00f3n, uno de los dos se hace despreciable respecto al otro, por ejemplo; aumentando la sobretensi\u00f3n negativa, la corriente \u00e1nodica se hace despreciable respecto a la c\u00e1todica, quedando pues:

$$i = -i_o e^{-\beta n F N / RT} \dots\dots\dots 2.4.$$

Tomando logaritmos de la expresi\u00f3n anterior:

$$\ln[i] = \ln[i_o] - \beta n F N / RT \dots\dots\dots 2.5.$$

$$N = (RT / \beta n F) \ln[i_o] - (RT / \beta n F) \ln[i] \dots\dots\dots 2.6.$$

Linearizando, obtenemos una ecuaci\u00f3n de la forma siguiente:

$$N = a - b \log(i) \dots\dots\dots 2.6.1.$$

Si, por el contrario, se aumenta la sobretensión positiva, un razonamiento análogo conduce a la expresión:

$$N = -RT/\alpha nF \ln[i_0] + RT/\alpha nF \ln[i] \dots\dots\dots 2.7.$$

y finalmente obtenemos:

$$N = a' + b' \log(i) \dots\dots\dots 2.8.$$

En ambos casos se obtiene la llamada ecuación de Tafel, donde los coeficientes alfa y beta deben cumplir:

$$\alpha + \beta = 1 \dots\dots\dots 2.9.$$

$$\beta = 1 - \alpha \dots\dots\dots 2.10.$$

Despejando de las ecuaciones 2.7 y 2.8, los coeficientes alfa y beta:

$$\beta \text{ Beta} = RT/nFN (\ln[i_0] - \ln[i]) \dots\dots\dots 2.11.$$

$$\alpha \text{ Alfa} = RT/nFN (\ln[i] - \ln[i_0]) \dots\dots\dots 2.12.$$

Estos coeficientes beta y alfa nos indican el grado de reversibilidad (o irreversibilidad) del proceso electroquímico en cuestión, y para ello suele representarse gráficamente la ecuación de Tafel, o mejor, representar  $\log(i)$  en función de la sobretensión, como se muestra en la figura 7.

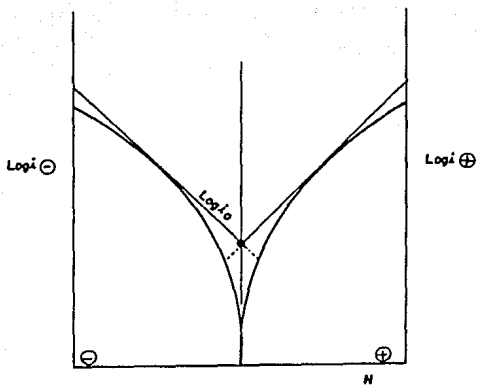


FIGURA 7.- GRAFICA DE LAS ECUACIONES DE TAFEL.

En ella se observa cómo por extrapolación, puede obtenerse el valor de la corriente a una sobretensión nula. Esta es la llamada corriente de canje  $i_0$ . En realidad, la ecuación de Tafel solamente es válida para valores de  $N$  positivos o negativos finitos, pero no próximos a cero, puesto que  $i$  neta en el equilibrio es cero y  $\log(i)$  tiende a infinito, y la figura como se puede observar no es lineal, sino asintótica con el eje  $\log(i)$ , el valor de  $i_0$  obtenido por las ecuaciones de Tafel a  $N=0$  es igual al valor absoluto de las corrientes parciales de oxidación y reducción adoptada en el equilibrio electroquímico.

## 2.7.- DETERMINACION DE LOS ÓRDENES DE REACCIÓN ELECTROQUÍMICA

$Z_0, J$  Y  $Z_r, J$ .

### 2.7.1.- DEFINICIÓN.

Las densidades de corriente parciales anódica ( $i_+$ ) y cátodica ( $i_-$ ) de una reacción lenta de transferencia de carga son, en virtud de las leyes de Faraday, una medida de las velocidades de reacción electroquímica:  $i_+$  e  $i_-$ , por consiguiente, a un potencial dado (8) dependen de las concentraciones  $C_J$  de las especies  $S_J$  presentes en el electrólito, como en una reacción química. Los ordenes de reacción son entonces  $Z_0, J$ ,  $Z_r, J$  y  $Z_a, J$ .

Las siguientes ecuaciones muestran la dependencia de la concentración para las densidades de corriente parciales:



$$i_+ = K_+^{\ddagger} \left( \prod (C_j)^{\nu_j} \right) \exp \left( \alpha z F E / RT \right) \dots \dots \dots 2.13.$$

$$i_- = -K_-^{\ddagger} \left( \prod (C_j)^{\nu_j} \right) \exp \left( -(1-\alpha) z F E / RT \right) \dots \dots 2.13.1.$$

Una expansión de la densidad de corriente anódica  $i_+$  es válida para un electrodo metal/ión.

$$i_+ = K_+^{\ddagger} \left( \prod (C_j)^{\nu_j} + Z_0, J + Z_m, J \right) \exp \left( \alpha z F E / RT \right) \dots 2.13.2.$$

El signo indica que, la variable que le antecede, está elevada a la potencia igual al valor que le sigue.

Estas tres ecuaciones pueden ser consideradas como definiciones de órdenes de reacción electroquímica. Cuando resulta un orden de reacción de valor cero, quiere decir que la densidad de corriente que se trate es independiente de la concentración. En la mayoría de los casos uno de los dos es igual a cero, como es el caso nuestro; esto no sucederá en sistemas complejos.

#### 2.7.2.- DETERMINACIÓN DE $Z_0, J$ Y $Z_r, J$ A PARTIR DE LA DEPENDENCIA DE LA CONCENTRACIÓN Y LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE LA TRANSFERENCIA DE CARGA.

Las consideraciones siguientes están basadas en la suposición que sólo existe transferencia de carga en un cierto rango de potencial y densidad de corriente. El cambio de la concentración de sólo una de las especies  $S_k$ , de todas las  $S_j$  especies presentes en el electrolito, generalmente tienen un efecto en la curva de intensidad de corriente vs. potencial. El estado estacionario de

la curva densidad de corriente vs. potencial con corriente directa y las de densidad de corriente inicial vs. potencial con procesos galvanostáticos y potenciostáticos, requiere primordial consideración. Los órdenes de reacción electroquímica pueden ser determinados de este efecto. La figura 8, muestra el diagrama del comportamiento de la curva densidad de corriente vs. potencial contra el cambio de concentración  $C_k$  de una especie  $S_k$ . En general el potencial de equilibrio  $E_{eq}$ , cambiara como se ve en la figura 8, la densidad de corriente es  $i \ll i_t$ ,  $i^-$ , en los alrededores del potencial de equilibrio  $N \ll RT/zF$ . Aquí la densidad de corriente parcial anódica y cática, son en gran parte, canceladas una a la otra. Para una sobretensión  $N = E - E_{eq} \gg RT/zF$ , en cambio, una densidad de corriente parcial deberá ser enteramente omitida, así también la densidad de corriente de transferencia de carga  $i$  (ecs. 2.13 y 2.13.1), es aproximadamente igual a la densidad de corriente anódica o cática.

En este rango de potencial y sobretensión, los  $i$  debe ser una función lineal del potencial  $E$ , como se muestra en la figura 8. Este rango lineal es de interés en esta discusión.

$$i \approx i_t N \gg RT/zF \quad (a)$$

$$i \approx -N \gg RT/zF \quad (b)$$

Si siguiendo esta relación lineal los  $i$  vs. potencial, una corriente limitante es usualmente formada por una corriente directa de polarización. Esta corriente limitante es evidente por

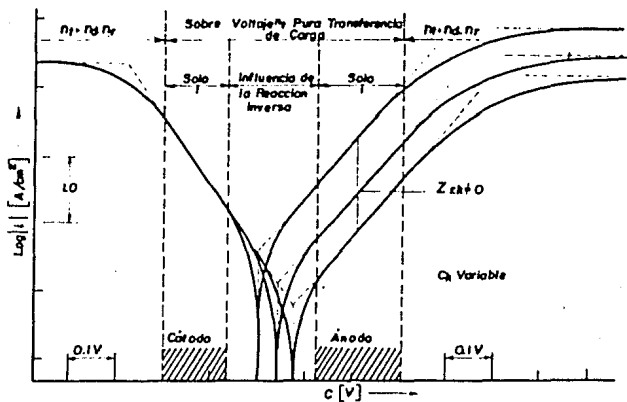


FIGURA 8. GRÁFICA DE DENSIDAD DE CORRIENTE vs. POTENCIAL PARA LA DETERMINACION DE LOS ÓRDENES DE REACCIÓN  $Z_{o,k}$  Y  $Z_{r,k}$  DE REACCIONES ELECTROQUÍMICAS CON CAMBIOS DE CONCENTRACIÓN.

una discontinuidad de la línea recta, como se muestra en la figura 8. La sobretensión de transferencia de carga es, entonces, acompañada por un considerable componente, sobretensión de difusión y reacción. Los efectos posteriores no aparecen en curvas de densidad de corriente inicial vs. potencial, puesto que los componentes de difusión ( $i_{nd}$ ) y ( $i_{nr}$ ) deberán ser eliminados en la evaluación de las funciones del tiempo  $n(t)$  e  $i(t)$ . Los rangos de potencial adecuados para la determinación de  $Z_o, J$  y  $Z_r, J$  son las partes sombreadas de la figura 8.

En el rango anódico, la densidad de corriente parcial  $i^+$  está presente, por lo cual el orden de reacción,  $Z_r, k$ , puede ser determinado por variación de  $C_k$ , de acuerdo a las ecuaciones (2.13) y (2.13.2). Igualmente, de la densidad de corriente  $i^-$  del rango cático, el orden de la reacción  $Z_o, k$ , puede ser determinado por la ecuación 2.13.1. Tomando logaritmos de estas ecuaciones tenemos:

$$(c) \log i^+ = \log K^+ + \alpha z F E / 2.303 RT + \Sigma (Z_r, J \log C_j) + \Sigma (Z_m, J \log C_j)$$

$$(d) \log i^- = \log K^- - (1-\alpha) z F E / 2.303 RT + \Sigma (Z_o, J \log C_j)$$

A partir de la variación de la densidad de corriente con la concentración de una especie de la solución, tenemos como resultado de la diferenciación de las ecs. c y d, el orden de la reacción.

$$(e) \frac{d \log i}{d \log C_k} = \frac{d \log i}{d \log C_k} = Z_{r,k} + Z_{m,k}$$

(N >> RT/zF) Anódico.

$$(f) \frac{d \log i}{d \log C_k} = \frac{d \log i}{d \log C_k} = Z_{o,k}$$

Cátodico (-N >> RT/zF)

La determinación de todos los órdenes de reacción  $Z_{r,J}$  y  $Z_{o,J}$ , es posible variando sucesivamente la concentración de todos los componentes  $S_j$ .

Los coeficientes de la derivada parcial  $(d \log i)/(d \log C_k)$  deberá tomarse de la pendiente de la línea obtenida al graficar  $\log i$  contra  $\log C_k$  a un potencial constante definido,  $E$ , el cuál resulta de la variación de la concentración,  $C_k$ , mientras mantenemos constantes todas las otras concentraciones  $C_j$  ( $j$  diferente  $k$ ). Tales líneas rectas son mostradas en la figura 9.

El valor de  $Z_{r,k}$  puede ser determinado de las líneas rectas para los potenciales  $E_1, E_2, E_3$ , los cuales son equivalentes a un sobrevoltaje anódico,  $N > 0$ , y a una densidad de corriente anódica,  $i > 0$ , y varía respecto a la concentración, según el orden obtenido. Todas las líneas para  $N > 0$  deben ser paralelas entre sí, puesto que el orden de reacción se aplica a todas ellas. Por otro lado, las líneas de los potenciales  $E_4$  y  $E_5$ , corresponden a un sobrevoltaje  $N < 0$ . La densidad de corriente,  $i < 0$ , según la figura 9, es independiente de la concentración, por eso se obtienen líneas rectas de pendiente cero, correspondiendo a la

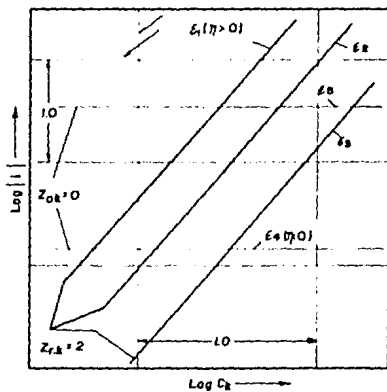


FIGURA 9. GRÁFICAS DE  $\text{LOG } |i|$  VS.  $\text{LOG } C_k$ .

reacción cátodica un orden,  $Z_{o,k} = 0$ .

## 2.8.- POLARIZACIÓN LINEAL.

La técnica electroquímica de polarización lineal es usada para realizar mediciones de velocidades de corrosión absolutas y es también llamada "resistencia de polarización".

Las mediciones de polarización lineal pueden ser hechas rápidamente (usualmente en 10 min). Pueden hacerse excelentes correlaciones entre velocidades de corrosión obtenidas por este método y las determinaciones convencionales de pérdida de peso.

Una medición de polarización lineal es ejecutada por observación a través de un rango de potencial, el cual está muy cercano al potencial de corrosión  $E_{corr}$ . El rango de potencial es generalmente  $\pm 25$  mV sobre  $E_{corr}$ . La corriente resultante es graficada vs. potencial, como se muestra en la figura 10. La corriente de corrosión,  $i_{corr}$ , es relacionada a la pendiente de la gráfica por la siguiente ecuación:

$$\Delta E / \Delta i = B_a B_c / 2.3 i_{corr} (B_a + B_c) \dots\dots\dots 2a.$$

Dónde:

$\Delta E / \Delta i$  = Pendiente de la gráfica de polarización y tiene unidades de resistencia; de aquí, resistencia de polarización.

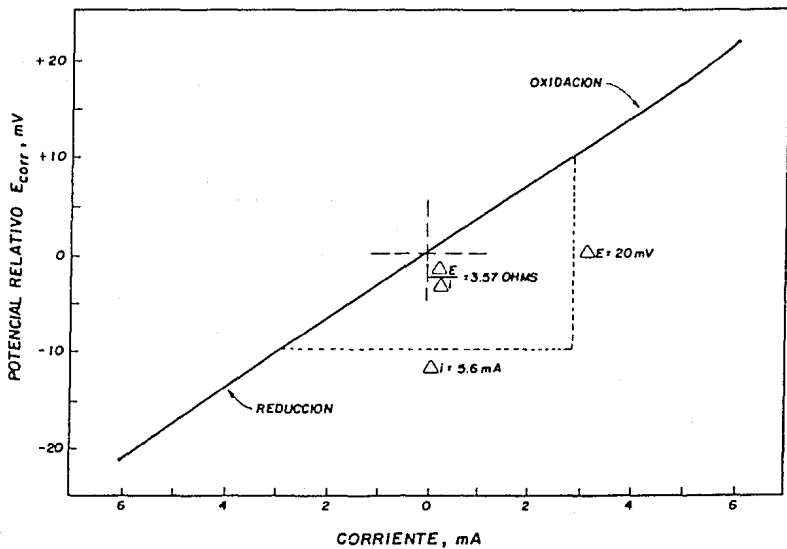


FIGURA 10.- GRÁFICA DE MEDICIONES EXPERIMENTALES DE  
POLARIZACIÓN LINEAL.



$B_a, B_c$  = Pendientes catódica y anódica de Tafel.

$i_{corr}$  = Corriente de corrosión (microA).

Despejando  $i_{corr}$  de la ecuación 2a:

$$i_{corr} = \frac{B_a B_c \Delta i}{2.3 (B_a + B_c) \Delta E} \dots\dots\dots 2b.$$

La corriente de corrosión puede ser relacionada directamente a la velocidad de corrosión, por la siguiente ecuación:

$$V_c = 0.0033 I_{corr}(P.e)/d \dots\dots\dots 2c.$$

Dónde:

$V_c$  = Velocidad de corrosión en (mm/año).

$P.e$  = Peso equivalente de la especie corroyéndose, (g).

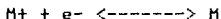
$d$  = Densidad de la especie corroyéndose, (g/cm<sup>3</sup>).

$I_{corr}$  = Densidad de corriente de corrosión, (microA/cm<sup>2</sup>).

### 2.8.1.- POLARIZACIÓN LINEAL Y LA TEORÍA ELECTROQUÍMICA DE CORROSIÓN.

Stern y Geary (6), nos proveen de un firme fondo teórico sobre mediciones de polarización lineal. A continuación daremos un breve resumen sobre estos aspectos teóricos.

En un sistema corroyéndose, dos reacciones electroquímicas coexistiendo, están presentes:



M es el metal corroyéndose y Z es usualmente una especie en solución. El potencial de corrosión es el potencial al cuál la velocidad de oxidación de M (definido por  $i_{o,m}$ ), es igual a la velocidad de reducción de  $Z^{+}$  (definido por  $i_{r,z}$ ). Los términos "velocidad" y "corriente" son usados intercambiamente, puesto que de acuerdo a la ecuación 2c., son directamente proporcionales.

Como la corriente neta es la diferencia entre las corrientes de oxidación y reducción, la corriente medida con un mecanismo externo, será cero.

$$i_{\text{med.}} = i_{o,m} - i_{r,z} = 0 \text{ a } E_{\text{corr}} \text{ ..... } 2e.$$

$$i_{\text{corr}} = i_{o,m} = i_{r,z}$$

Para calcular la velocidad de corrosión debe ser determinada la  $i_{\text{corr}}$ . Cuando un potencial es impuesto sobre un espécimen metálico, con una fuente de voltaje externa, tal como un potencióstato, una corriente fluirá, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$i_{med} = i_{o,r} - i_{r,z} \dots\dots\dots 2f.$$

Las corrientes anódica y cátodica obedecen las ecuaciones de Tafel.

$$N = B_a \log i_{o,r} / i_{corr} \dots\dots\dots 2g.$$

$$N = -B_c \log i_{r,z} / i_{corr} \dots\dots\dots 2g.1.$$

Donde:

N = Sobrevoltaje, la diferencia entre el potencial aplicado al espécimen y el potencial de corrosión;  $N = E_{ap} - E_{corr}$ .

Rearreglando las ecuaciones 2g y 2g.1 obtenemos:

$$\log i_{o,r} / i_{corr} = N / B_a \dots\dots\dots 2h.$$

$$\log i_{r,z} / i_{corr} = -N / B_c \dots\dots\dots 2h.1.$$

Puesto que  $\log x = y$ , las ecuaciones 2h y 2h.1 pueden ser reescritas como:

$$10^{N/B_a} = i_{o,r} / i_{corr} \dots\dots\dots 2i.$$

$$10^{-N/B_c} = i_{r,z} / i_{corr} \dots\dots\dots 2i.1.$$

Sustituyendo en la ec. 2e:

$$i_{med} = i_{corr} (10^{N/B_a} - 10^{-N/B_c}) \dots\dots\dots 2j.$$

$10^{\pm X}$  puede ser aproximado por la siguiente serie de potencias:

$$10^{\pm X} = 1 + 2.3 x + (2.3x)^2/2! + \dots + (2.3 x)^{\pm N}/n!$$

Si  $x$  en estas series, es pequeño, el tercer y último término pueden ser omitidos, sin un error significativo; substituyendo  $x$  por  $N/Ba$  y  $-N/Bc$ , nos da:

$$10^{+N/Ba} = 1 + 2.3 N/Ba \dots\dots\dots 2k.$$

$$10^{-N/Bc} = 1 - 2.3 N/Bc \dots\dots\dots 2k.1.$$

Substituyendo en la ec.2J.

$$i_{med} = 2.3 i_{corr} N ( Ba + Bc/BaBc )$$

Rearreglamos para la resistencia de polarización:

$$N/i_{med} = BaBc/2.3i_{corr} ( Ba + Bc ) \dots\dots\dots 2l.$$

la cual es idéntica a la ecuación 2a.

Esta ecuación es válida sólo si la suposición tomada en la serie de potencias es válida, esto es, que  $N/B$  sea un valor pequeño. Un valor típico de  $R$  es 100 mV/decada. El sobrevoltaje deberá ser menor que 10 mV. Para realizar estos cálculos se usaron los ajustes computarizados CORBET y CORFIT (apéndices A y B).

### CAPÍTULO III

#### DISEÑO EXPERIMENTAL

##### 3.1.- OBJETIVOS:

a) Un diseño de experimentos para avalar la funcionalidad de este equipo, comparando pruebas de corrosión por el método gravimétrico (por pérdida de peso), como electroquímicas (polarización lineal). b) Efectuar mediciones mediante un diseño parecido al anterior para calcular el orden de la reacción  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  en una celda de vidrio, usando soluciones de  $NaCl$  a diferentes concentraciones.

##### 3.2.- PLAN DE PRUEBAS.

Se hicieron pruebas gravimétricas a tres diferentes temperaturas y sus respectivas presiones de saturación, con ventilación controlada y a dos tiempos diferentes, en tres atmósferas distintas (aire, nitrógeno, oxígeno).

Se usaron cuñones gravimétricos y probetas tensionadas mecánicamente para las pruebas de corrosión en lodos de perforación ya que este método es más representativo de las condiciones de operación de construcción de pozos.

Para las pruebas electroquímicas tanto en salmueras geotérmicas sintéticas, para cálculos de velocidad de corrosión, como en soluciones de NaCl, para cálculo de orden de reacción, se uso el método de Polarización lineal. Se usaron 2 salmueras geotérmicas sintéticas (baja y alta salinidad) con y sin presencia de oxígeno, y temperaturas de 150, 200 y 250 oC. Las soluciones de NaCl fueron a seis distintas concentraciones(9) y a una temperatura de 40 oC. A continuación se muestran los procedimientos a seguir para la realización de las pruebas antes mencionadas.

### 3.2.1.- PRUEBAS DE CORROSIÓN USANDO COMO MEDIO CORROSIVO

#### LABOS DE PERFORACIÓN GEOTÉRMICA.

##### 1.- PREPARACIÓN DEL ESPECTIMEN DE PRUEBA.

1.1. A la tubería seleccionada para prueba, se le corta un anillo de aproximadamente 4cm. de ancho, teniendo cuidado de no provocar un calentamiento excesivo y dañar la estructura del acero.

1.2.- Seccionar cada 3 cm. y cortar, para obtener los cupones, carearlos en torno hasta que adquieran una forma plana.

1.3.- El cupón se perfora por el centro y se le da un acabado a lija 120. El óxido que se queda en el orificio, es removido por medio de un cepillo de alambre.

1.4.- Se toman datos de medidas de las dimensiones del cupón, figura 11, usando un vernier.

1.5.- El cupón es pasado por vapores de benceno para eliminar la grasa que haya quedado después del manejo, secar con aire seco y de aquí en adelante, el manejo del cupón deberá ser usando suantes limpios.

1.6.- Pesar el cupón en una balanza analítica para tener una precisión de  $\pm 0.5$  ms.

## 2.- CONDICIONES DE PRUEBA.

- Composición del medio.
- Temperatura de la solución.
- Presión de operación.
- Aereación de la solución.
- Velocidad de la solución.
- Volumen de la solución.
- Duración de la prueba.

## 3.- SOPORTES PARA MUESTRAS.

En la figura 12, se muestra el portacupones, el cuál debe tener una capacidad para tres cupones, ofreciendo un libre contacto entre éstos y la solución; se muestra también la forma en

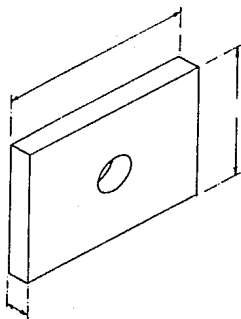


FIGURA 11.- CUPÓN GRAVIMÉTRICO.

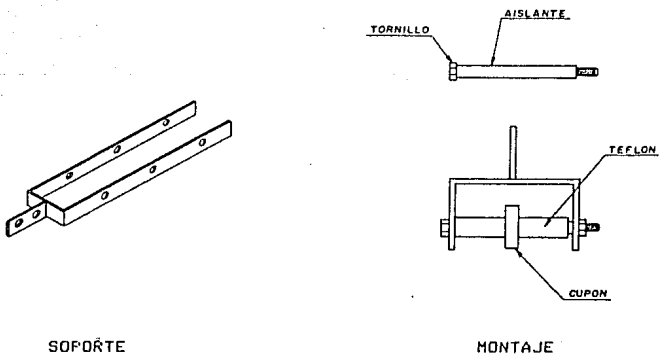


FIGURA 12.- SOPORTAMIENTO Y MONTAJE DE CUPONES GRAVIMÉTRICOS.



que deben ser montados para evitar contacto metal-metal, ya sea con el soporte (tornillo) o el portacupones, para ello se usó aislantes inertes y resistentes a altas temperaturas (fibra de vidrio y teflon).

#### 4.- MÉTODO DE LIMPIEZA DESPUES DE LA PRUEBA.

Usar metodos electroquímicos, teniendo cuidado de seleccionar una solución que no vaya a alterar los resultados.

#### 5.- PREPARACIÓN DE PROBETAS TENSIONADAS.

Esté tipo de probetas nos sirven para ver si hubo efectos de corrosión bajo tensión, su forma y dimensiones se muestran en la figura 13. Las muestras son maquinadas en torno, montadas en un soporte (ver fig.13) y tensadas al 80 por ciento de su limite elástico. La evaluación de la prueba se hace por medio de un analisis metalográfico.

#### 6.- OBSERVACIÓN VISUAL DEL CUPÓN DESPUES DE LA PRUEBA.

Hacer una cuidadosa observación visual en el cupón para detectar cualquier picadura que pueda presentarse, reportando promedio de éstas por unidad de área y profundidad, observar también si hubo fragilización por hidrógeno.

#### 7.- CÁLCULO DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN.

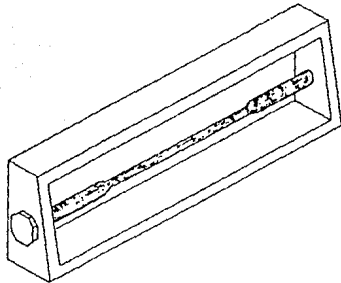
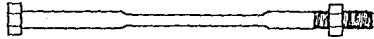


FIGURA 13.- PROBETAS DE TENSION Y SOPORTE.

La velocidad de corrosión en las mediciones con el método gravimétrico, es una relación de la pérdida de peso, área, densidad y tiempo que el metal estuvo expuesto al medio corrosivo, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Vel. de corrosión} = (K W) / (S T D) \dots\dots\dots 3.1.$$

Donde:

K = Constante con valor de 8.76 E4 cuando la velocidad es en mm/año y 3.45 E6, cuando es en milésimas de pulgada por año (mpy).

T = Tiempo de prueba en horas.

S = Área en cm<sup>2</sup> y se calcula con la siguiente ecuación:

$$S = 2( (A B) + (A C) + (B C) ) - 2.54 \dots\dots\dots 3.2$$

2.54 es el valor del área ocupada por el aislante.

W = Pérdida de peso en g.

D = Densidad del material 7.86 g/cm<sup>3</sup>.

#### B.- REPORTE DE DATOS.

Debe contener los siguientes datos:

- Especimen de que se trata.

- Temperatura de operación.
- Atmósfera de trabajo.
- Presión de operación.
- Dimensiones de cada espécimen probado.
- Velocidad de corrosión de cada espécimen en mm/año y en mpy.
- Velocidad promedio de corrosión en mm/año y mpy.

### 3.2.2.- PRUEBAS DE POLARIZACION LINEAL UTILIZANDO COMO MEDIO CORROSIVO SALMUERAS GEOTERMICAS SINTETICAS.

#### 1.- APARATOS:

1.1.- La celda a usar para realizar este experimento, es el equipo autoclave que se diseñó para las pruebas de lodos, el cual cuenta con los accesorios necesarios para introducir y montar los electrodos de trabajo, auxiliares y de referencia. Además de una entrada y salida para burbujeo de gases, para las pruebas a temperaturas de 250 oC, se harán en un autoclave de material Hastelloy el cual es propio para estas pruebas, el autoclave diseñado es de acero inoxidable, pero no es adecuado para temperaturas mayores de 200 oC.

### 1.2.- PORTAELECTRODOS:

Los electrodos auxiliares y de trabajo son montados como se muestra en la figura 14; los especimenes son forrados con teflon encosible dejando descubierta una superficie conocida de trabajo, mientras que los electrodos auxiliares no requieren este tratamiento.

### 1.3.- POTENCIOSTATO:

Deberá ser usado un potenciostato que mantenga un potencial de electrodo con 1 mV de un valor prefijado sobre un amplio rango de corrientes aplicadas. El potenciostato debe dar una salida de corriente anódica de hasta 1 E6 microA.

### 1.4.- INSTRUMENTO PARA MEDICION DE POTENCIAL:

Un circuito para medición de potencial con una impedancia de entrada entre 1 E11 y 1 E14 ohms, con la sensibilidad y precisión suficiente para detectar cambios de 1.0 mV.

### 1.5.- ELECTRODOS:

1.5.1.- ELECTRODO DE TRABAJO: De unos 12mm de largo por 8.5mm de diámetro; es montado como se muestra en la figura 14.

1.5.2.- ELECTRODOS AUXILIARES: Son usados dos electrodos de acero inoxidable, como electrodos auxiliares, de 2cm de largo por 1 cm de diámetro; son montados de la misma manera que los de trabajo, sólo que aquí se puede prescindir del recubrimiento de

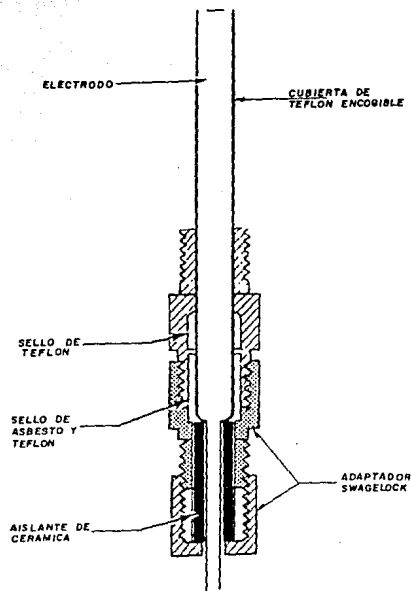


FIGURA 14.- PORTAELECTRODOS.

teflon.

### 1.5.3.- ELECTRODO DE REFERENCIA:

El electrodo  $Ag/AgCl$ , modificado para trabajar a altas presiones y temperaturas. Hay que revisar su potencial a intervalos periódicos para asegurarnos de su precisión.

### 2.- CONDICIONES DE PRUEBA.

- Solución de prueba.
- Temperatura de operación.
- Presiones de operación.
- Agitación.
- Aereación.
- Potencial de barrido.

### 3.- PREPARACION DEL ESPECIMEN:

3.1.- Medir las dimensiones del electrodo para poder calcular su área.

3.2.- Dar un acabado superficial a los electrodos de trabajo con papel SiC (lija) grado 240, para emparejarlo y, finalmente a grado 600 para dejar una superficie libre de rayas excesivas.

3.3.- Montar los electrodos como ya se indicó anteriormente.

4.- REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES:

Usar un graficador X-Y y papel semilogaritmico.

5.- REPORTE DE DATOS:

Debe contener los valores de las pendientes catódica y anódica,  $I_{corr}$ , y velocidad de corrosión (mm/año) y resistencia de polarización, éstos se calcularán con los ajustes computarizados CORBET Y CORFIT (apendices A y B).

3.2.3.- PRUEBAS DE POLARIZACION LINEAL PARA CALCULAR EL ORDEN DE REACCION ELECTROQUIMICA  $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$  EN SOLUCIONES DE NaCl.

1.- EQUIPO: Usar celda de vidrio con el arreglo que se muestra en la figura 15.

2.- PORTAELECTRODOS: Usar un soporte de vidrio.

3.- CONDICIONES DE PRUEBA.

- Solución de prueba.

- Concentración.

- Temperatura de operación.



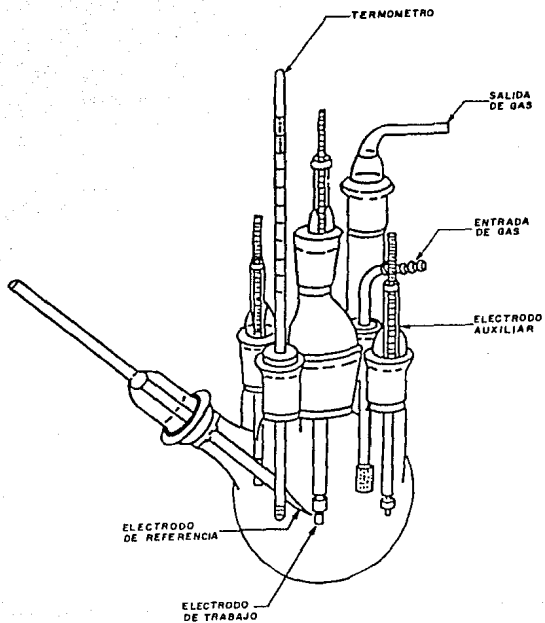


FIGURA 15.- ARREGLO PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS EN CELDA DE VIDRIO.

- Aereación.

4.- PREPARACION DE ESPECIMENES.

Se sigue el mismo procedimiento que en el proceso anterior, lo único que cambia es el portaelectrodo.

5.- REPORTE DE DATOS.

Debe contener datos de concentración de la solución vs. los del valor absoluto de  $i$ , a un potencial dado. Gráfica de los mismos y valor de las pendientes u órdenes de reacción anódico y catódico.

3.2.4.- PRUEBAS TOTALES PROPUESTAS.

- PRUEBAS GRAVIMETRICAS:

Tiempos: ----- 2

Temperaturas: -- 3

Medios: ----- 3

Aceros: ----- 2

-----  
Total ----- 36

- PRUEBAS ELECTROQUIMICAS PARA CALCULO DE VELOCIDAD DE CORROSION.

Concentraciones:---- 2

Temperaturas: ----- 3

Aceros: ----- 2

Medios: ----- 2

-----

Total ----- 24

- PRUEBAS ELECTROQUIMICAS PARA CALCULO DE ORDEN DE REACCION.

Concentraciones: ----- 6

Aceros: ----- 2

-----

Total ----- 12

3.3.- EQUIPO:

Se realizaron los cálculos necesarios para ver si el diseño de un tanque con agitación, del cual se dispone, es capaz de cubrir los requisitos de las pruebas anteriormente mencionadas. Basándonos en que el tanque es de acero inoxidable y cuenta con una chaqueta por la cual se puede hacer pasar un fluido calefactor, también se cuenta con una resistencia calefactora y

una bomba de pistón. Esté equipo debe satisfacer las condiciones de temperatura, asitación y presiones de hasta 20 kg/cm<sup>2</sup>, necesarias para realizar la experimentación. En el siguiente capítulo se trata el cálculo del diseño del tanque autoclave, asitación, sistema de calefacción, bombeo de fluido calefactor, sistema de purga y sistemas de control de temperatura y calefacción.

## CAPITULO IV

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.

El análisis de las necesidades y el plan de experimentos, nos dio como resultado el sistema que se muestra en la figura 16. En el capítulo anterior se mencionó la existencia de un tanque de acero inoxidable con agitación, el cual bien podría ajustarse a nuestras necesidades, se realizaron los cálculos sobre el diseño del mismo para comprobar si ésto era posible, además se hicieron cálculos sobre agitación, sistema de calefacción, tanque para carga del fluido calefactor y purgado de líneas. Finalmente, se muestran fotografías del detalle del equipo ya construido.

#### 4.1- DISEÑO DEL TANQUE AUTOCLAVE.

##### A) CONSIDERACIONES.

1.- Los cálculos son para ver si es posible adaptar un tanque ya construido a nuestras necesidades.

2.- Su uso principal será la investigación a nivel laboratorio.

3.- Debe cumplir con los requisitos de operación, dando un márgen de seguridad.

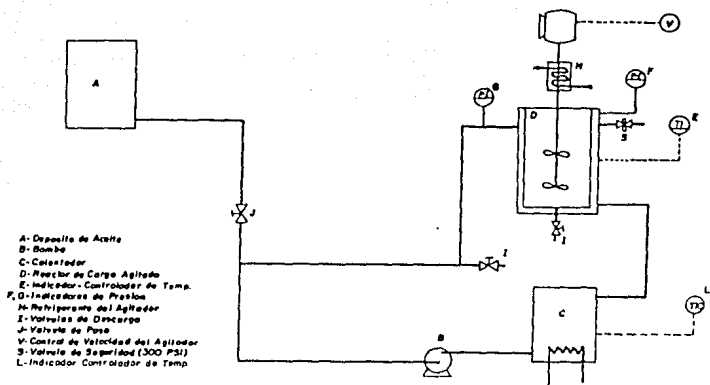


FIGURA 16. SISTEMA MICROPILOTO PARA REALIZAR MEDICIONES DE VELOCIDADES DE CORROSION.

4.-Como es un proceso intermitente, hay que tomar en cuenta factores de diseño que faciliten la carga y descarga del mismo.

B) DIMENSIONES DEL AUTOCLAVE.

-- Longitud de la coraza cilindrica L = 0.457 m.

-- Diámetro de la coraza D = 0.228 m.

-- Diámetro interno Do = 0.203 m.

-- Volumen V = 16.5 l.

C) FORMULAS DE DISEÑO:

Todos los cálculos fueron realizados usando las fórmulas para diseño de recipientes a presión, Sección VIII del código ASME (10).

-- Presión de diseño; Es igual a la presión de operación más un diez por ciento de la misma, para factor de seguridad.

$$P_{\text{diseño}} = P_{\text{op.}} + 0.1 P_{\text{op.}} \dots\dots\dots 4.1.$$

---- DISEÑO TANQUES A PRESION DE CORAZA CILINDRICA Y TAPA ELIPSOIDAL.

Coraza cilindrica:

$$t = PR / ( SE - 0.6P ) \dots\dots\dots 4.2.$$

$$P = SEt / ( R + 0.6t ) \dots\dots\dots 4.3.$$

Cabeza elipsoidal:

$$t = PD / ( 2SE - 0.2 P ) \dots\dots\dots 4.4.$$

$$P = 2 SEt / ( D + 0.2t ) \dots\dots\dots 4.5.$$

Donde:

t = Espesor en cm.

P = Presión de diseño en kg/cm<sup>2</sup>.

E = Eficiencia en las Juntas.

S = Esfuerzo permisible en kg/cm<sup>2</sup>.

R = Radio interno en cm.

D = Diámetro interno en cm.

D) CONDICIONES DE OPERACIÓN Y DISEÑO:

CONDICION ----- OPERACION ----- DISEÑO

Temperatura ----- 200 oC ----- 340 oC

Presión ----- 19 kg/cm<sup>2</sup> ----- 20.9 kg/cm<sup>2</sup>

Volumen ----- 15 l ----- 16.5 l



#### E) SELECCIÓN DE MATERIALES:

Se usó acero inoxidable para la parte interior del recipiente y acero al carbono para la parte externa; el espacio por el cual pasará el fluido calefactor es el que queda entre ambos materiales; a continuación, se dan las especificaciones de los materiales según el código ASME, y el esfuerzo permisible de cada uno en  $\text{kg/cm}^2$ , a una temperatura de 340  $^{\circ}\text{C}$ .

Acero inoxidable SA-240 316 ,  $S = 794.5 \text{ kg/cm}^2$ .

Acero al carbón SA-515 70 ,  $S = 1230.4 \text{ kg/cm}^2$ .

#### F) CÁLCULO DE ESPESORES:

F.1.- Tapa o cabeza; Como la presión  $P > 7 \text{ kg/cm}^2$  se seleccionaron tapas semielípticas (figura 17). El valor para la eficiencia en las Juntas que se tomó fue de 0.85, y al espesor calculado se le agregó 0.158 cm, por tolerancia a la corrosión. Cuenta, además, con cuatro entradas de 1.25 cm de diámetro para introducir los electrodos en las pruebas electroquímicas, otra salida para conectar un manómetro de Bourdon y una para la válvula de seguridad.

-- Tapa exterior, material: acero al carbón SA-515-70.

$D = \text{Diámetro externo} = 0.254 \text{ m}$

$D_i = \text{Diámetro interno} = 0.203 \text{ m}$

$h = \text{Altura} = 0.1016 \text{ m}$

Usando la ecuación 4.4 y  $D = 22.86 \text{ cm}$ .

$$t = 20.9 \times 22.86 / (2 \times 1230.4 \times 0.85 - .2 \times 20.9) \text{ (cm)} = 0.2286 \text{ cm.}$$

$$t = 0.2286 + 0.158 \text{ (por corrosión)} = 0.386 \text{ cm.}$$

Se usó placa de  $0.476 \text{ cm}$  (3/16 de pulgada), la medida en pulgadas es por que así se encuentra comercialmente.

-- Tapa interior, material: acero inoxidable SA-240-316.

Usando la ecuación 4.4 nuevamente, pero ahora con un valor  $D = 20.3 \text{ cm}$ .

$$t = 20.9 \times 20.3 / (2 \times 794.5 \times 0.85 - 0.2 \times 20.9) \text{ (cm)} = 0.315 \text{ cm.}$$

$$t = 0.315 \text{ cm} + 0.158 \text{ cm (tolerancia corr.)} = 0.473 \text{ cm.}$$

Se usó placa de  $0.635 \text{ cm}$  (1/4 de pulgada).

#### F.2.- Coraza cilíndrica:

Haciendo uso de la ecuación 4.2 y usando acero al carbón SA-515-70 para la coraza exterior y acero inoxidable SA-240-316 para la coraza interior (figura 18), tenemos:

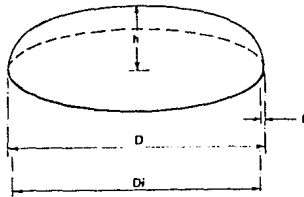


FIGURA 17. TAPA SEMIELIPTICA.

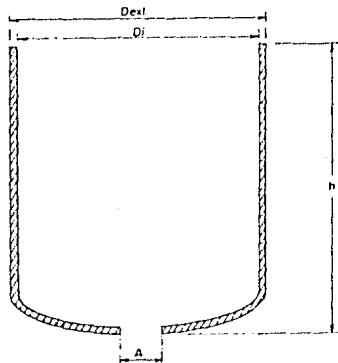


FIGURA 18. CORAZA CILINDRICA.

- Coraza interior;  $E = 0.85$  ,  $R = 10.15$  cm.

$$t = 20.9 \times 10.15 / (794.5 \times 0.85 - 0.6 \times 20.9) \text{ (cm)} = 0.32 \text{ cm.}$$

$t = 0.32$  cm +  $0.158$  cm =  $0.478$  cm. , se uso placa de  $0.635$  cm (1/4 de pulgada).

- Coraza exterior;  $E = 0.85$  ,  $R = 11.43$  cm.

$$t = 20.9 \times 11.43 / (1230.4 \times 0.85 - 12.54) \text{ (cm)} = 0.2311 \text{ cm.}$$

$t = 0.2311$  cm +  $0.158$  cm =  $0.389$  cm , se uso placa  $0.476$  cm (3/16 de pulgada).

Las medidas de la coraza cilíndrica, siguiendo la notación usada en la figura 18, son las siguientes:

Altura ,  $L = 50.8$  cm.

Diámetro interno ,  $D = 20.32$  cm.

Relación altura-díametro ,  $L/D = 2.5$ .

Volumen ,  $V = 15.7$  l.

El fondo del tanque es redondeado para evitar que el fluido se acumule y permitir que la agitación sea buena, manteniendo así una mezcla homogénea durante la operación, tiene además, una válvula de compuerta de 5 cm de diámetro para la descarga.

#### G.- SELECCIÓN Y DIMENSIÓN DE LAS BRIDAS:

Se seleccionó la brida tipo postiza o loca soldada, según el ANSI (Instituto Nacional de Estándares Americano), con la única diferencia que esta brida tiene 16 tornillos, en vez de los 14 convencionales, el empaque que eligimos fue de teflon y con un diámetro externo de 0.26 m por 0.203 m de diámetro interno. A continuación se muestran las dimensiones y medidas de la brida; en la figura 19, se muestra la forma de ésta; el material de que está construida es acero forjado SA-181.

B: Diámetro interno de la brida = 0.203 m.

G: Diámetro externo de la base superior = 0.28 m.

K: Diámetro externo de la base inferior = 0.254 m.

J: Espesor de la brida = 0.035 m.

H: Diámetro externo de la brida = 0.381 m.

S: Diámetro del círculo de tornillos = 0.33 m.

Número de tornillos = 16.

Diámetro del tornillo = 0.015 m.

Longitud tornillo = 0.1016 m

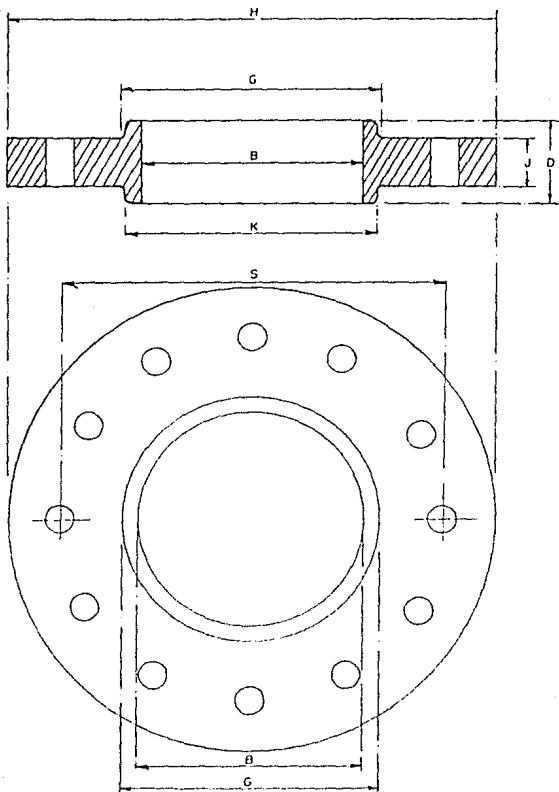


FIGURA 19.- BRIDA.

A estas bridas están soldados los soportes para cabeza y tanque, como se puede apreciar en la figura 20. Estas placas de apoyo son del mismo material que la brida. Para facilitar la operación de carga y descarga del equipo autoclave, se adaptó un sato hidráulico con capacidad de 1/2 tonelada, el cual está soldado a los apoyos del tanque que se deslizan a lo largo de los rieles del soporte principal, como se puede apreciar en la figura 20. También se puso una válvula de 5 cm de diámetro (2 pulgadas) para descarga del tanque, en la parte inferior del mismo.

#### 4.2.- SISTEMA DE AGITACIÓN:

Como la relación altura/diámetro del tanque (L/D) es de 2.5, fue necesario usar dos agitadores tipo turbina de seis palas planas, montados sobre un mismo eje. En la figura 21, se puede apreciar la forma de estos agitadores, el diámetro del rodete es de 0.127 m, y es esta distancia la misma a la cual se colocaran uno del otro. Como se dijo anteriormente, el fondo del tanque no es plano, sino redondeado, con el fin de eliminar bordes rectos o resiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido.

En la figura 22, se puede observar cómo los dos rodetes están sobre un eje suspendido de la parte superior, por medio de una chumacera; para evitar fugas, se le hizo un estopero usando fibra de asbesto grafitado como empaque y un refrigerante con baleros en su interior, para mayor seguridad. El eje cuenta con una polea que está conectada por medio de una banda a un motor eléctrico con una potencia de 2 H.P y 1500 rev/min, la relación de la polea del

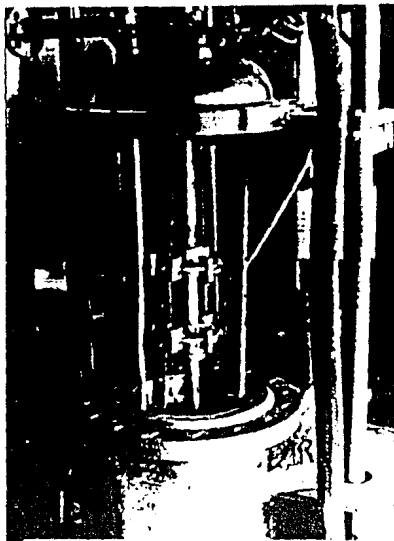


FIGURA 20.- SOPORTAMIENTO DEL TANQUE AUTOCLAVE.



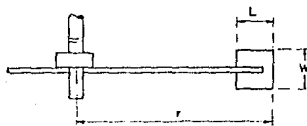
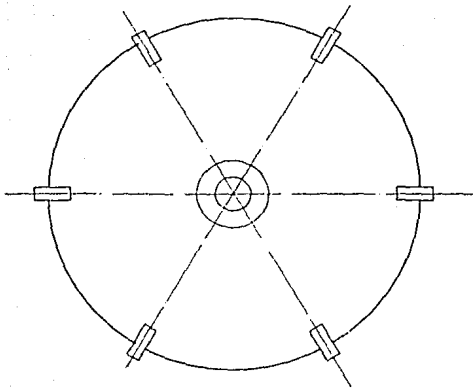


FIGURA 21.- AGITADOR TIPO TURBINA DE 6 PALAS PLANAS

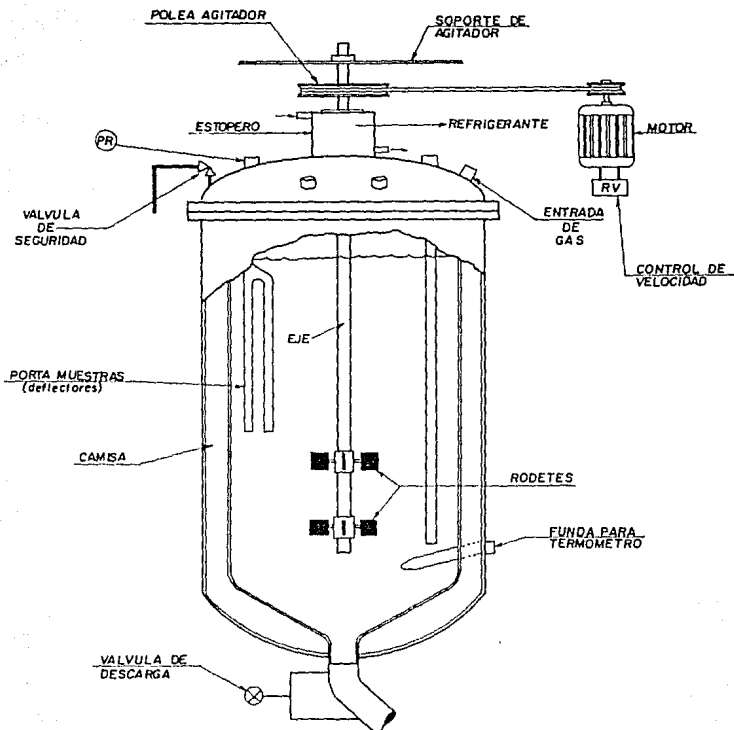


FIGURA 22.- TANQUE AUTOCLAVE.

agitador a la polea del motor es de 3:1, por lo cual el agitador girará a razón de 1/3 de la velocidad del motor. Debido a que se necesita poner portamuestras en el interior del tanque, se optó por que fueran cuatro de ellos, y así poder manejar el modelo de tanque agitado con cuatro placas deflectoras con agitador tipo turbina de seis palas planas. Los cálculos siguientes se hicieron para saber si el agitador es capaz de dar una velocidad al fluido de 100 m/min (11).

#### 4.2.1.- CALCULO DEL AGITADOR:

Si la velocidad periférica del giro del rodete se representa por  $v$ , entonces:

$$v = \pi D n \dots\dots\dots 4.6.$$

Considerando el grupo adimensional  $n(D)^2 d / \mu$ , ( número de Reynolds) y sustituyendo el valor de  $(\pi)Dn$  tenemos que:

$$Re = n (D^2) d / \mu = (nD)D d / \pi \mu = vDd / \pi \mu \dots\dots 4.7.$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

D = Diámetro del rodete en m.

$\mu$  = Viscosidad del fluido en centipoises.

$v$  = Velocidad periférica del rodete en m/min.

$d$  = Densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$ .

$n$  = Número de revoluciones por unidad de tiempo.

$\pi$  = 3.1416.

El factor Potencia para este modelo de tanque agitado está dado por la siguiente ecuación (11).

$$\text{Pot} = K_t (n^3)(D^5) d / g_c \dots\dots\dots 4.8.$$

Donde:

Pot = Potencia requerida por el agitador en H.P. (caballos de fuerza)

$K_t$  = Constante y tiene el valor de 6.30 para este modelo (11).

$g_c$  = 9.81  $\text{m/s}^2$ .

----- Propiedades del fluido (lodo de perforación geotérmica).

Densidad ,  $d$  = 1080  $\text{kg/m}^3$ .

Viscosidad ,  $\mu$  = 12 E-03  $\text{kg/m s}$  .

De la ecuación 4.7 y para un diámetro del rodete  $D = 0.127\text{m}$ ,

$$Re = n ((0.127)^2) \times 1080 / 12 \text{ E-03} = 1451.61 \text{ (s/rev)} \times n \text{ (rev/s)}$$

De la ecuación 4.6 despejamos  $n$  y calculamos su valor para una velocidad de 100 m/min, tomando en cuenta el factor de 3 de la relación de poleas.

$$n = 3 \sqrt{\pi D} = 3 (100 \text{ m/min}) / \pi (0.127 \text{ m}) 60 \text{ s/min} = 12.53 \text{ rev/s}$$

La potencia requerida, según la ecuación 4.8, será;

$$Pot = 6.3 (n^3) (3.304 \text{ E-05 m}^5) 1080 \text{ Kg/m}^3 / 9.81 \text{ m/s}^2 (78 \text{ Kg-f m/sH.P)}$$

$$Pot = 3.01 \text{ E-04 } n^3 = 3.01 \text{ E-04 } ((12.53)^3) = 0.5936 \text{ H.P}$$

El valor de aproximadamente 0.6 H.P requeridos, nos indica que, ya que el agitador cuenta con una potencia de 2 H.P, bastará con trabajarlo a la mitad de su capacidad para lograr la velocidad = 100 m/min, para ello usamos un controlador de velocidad variable en el motor.

#### 4.3.- SISTEMA DE CALENTAMIENTO:

Se utilizó una resistencia eléctrica del tipo de inmersión para calentar un fluido y, posteriormente éste se hizo pasar por la camisa del autoclave por medio de una bomba de pistón. La resistencia usada está hecha con cubierta de acero, de manera que

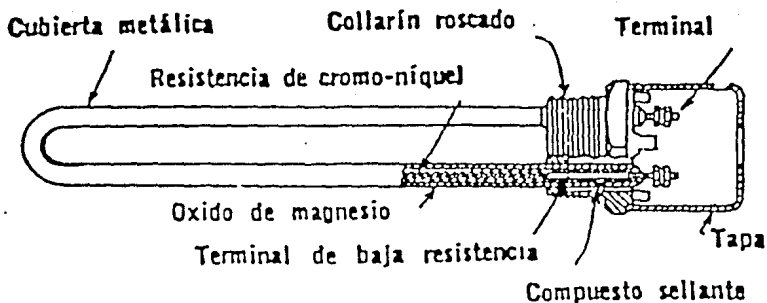


FIGURA 23.- VISTA SECCIONAL DE UN CALENTADOR DE  
INMERSION DE DOS TERMINALES.

puede operar a temperaturas de hasta 450 oC y es el recomendado para calentar aceites o derivados orgánicos (12). El fluido que se usó fue aceite de maíz, ya que es barato y trabaja sin tener problemas de degradación a temperaturas sobre los 320 oC . La capacidad de la resistencia es de 7.5 kw/h (ver figura 23).

#### 4.3.1.- BALANCE DE CALOR:

Balance general;

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Fuentes} - \text{Pozos}$$

Como la reacción en el autoclave no produce, ni consume energía, los términos de fuentes y pozos del balance general pueden ser eliminados, quedando el balance para el sistema de la forma siguiente:

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} \dots\dots\dots 4.9.$$

Donde el término "salidas" representa la transferencia de calor a la autoclave, así tenemos:

$$(H_2 - H_1) m = Q_{ent.} - Q_{sal.}$$

$$m C_p [ ( T_2 - T_1 ) - ( T_1 - T_{ref} ) ] = Q_{ent.} - Q_{sal.} \dots\dots 4.10.$$

Donde:

T<sub>2</sub> = Temperatura final del fluido en el autoclave oC.

$T_1$  = Temperatura inicial del fluido en el autoclave oC.

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia oC.

$m$  = Masa del fluido a calentar dentro del autoclave kg.

$C_p$  = Capacidad calorífica del fluido del lodo cal/kg oC.

$Q_{ent}$  = Energía del fluido calefactor en kcal.

$Q_{sal}$  = Energía perdida por el sistema en kcal.

Si  $T_1$  es igual a  $T_{ref}$ , entonces el término  $(T_1 - T_{ref})$  de la ecuación 4.10 se hace cero, quedando:

$$m C_p ( T_2 - T_1 ) = Q_{ent} - Q_{sal} \dots\dots\dots 4.11$$

Ahora bien, el término de la izquierda, en la ec. 4.11, representa el calor latente del lodo dentro del autoclave, sustituyendo los valores de las propiedades de dicho fluido, tenemos la siguiente ecuación:

Datos: volumen= 15 l, densidad = 1.12 kg/l ,  $T_1= 30$  oC , la masa se puede calcular por el producto de la densidad y el volumen  $m=vd$ ,  $m= 16.8$  kg,  $C_p= .940$  kcal/kg oC,

$$H_{lodo} = 15.792 ( T_2 - 30 ) \text{ kcal} \dots\dots\dots 4.12.$$

Para el calor de entrada tenemos que:



$$Q_{ent} = 5940.66 \times t \text{ kcal.} \dots\dots\dots 4.13.$$

donde  $t$  es el tiempo requerido para que la resistencia caliente el aceite a la temperatura deseada, ésto es, 10 °C sobre la temperatura de operación de prueba en el autoclave. A continuación se muestran los valores de temperatura de aceite, tiempo y calor de entrada necesario para cada una de las pruebas a realizar:

T aceite °C	Tiempo h	Q <sub>ent</sub> kcal
135	0.3333	1980.018
160	0.4200	2495.070
210	0.5750	3415.870

Sustituyendo las ecuaciones 4.12 y 4.13 en la ecuación 4.11 , y despejando  $Q_{sal}$  tenemos:

$$Q_{sal} = -[ 15.792 ( T_2 - 30 ) - 5940.65 \times t ] \dots\dots 4.14.$$

En la cual, dando el valor de las temperaturas de operación y el valor de  $Q_{ent}$  calculado, obtendremos los valores de  $Q_{sal}$  o energía pérdida por el sistema, dichos valores se muestran a continuación:

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

T2 oC -----	Qsal, kcal
125 -----	479.77
150 -----	600.00
200 -----	731.00

#### 4.3.1.- TANQUE PARA CALENTAMIENTO DE ACEITE:

Se construyó un tanque, en el cual va montada la resistencia eléctrica para calentar el aceite, como no va a trabajar a presiones superiores a la atmosférica, se construyó de un tramo de tubería de acero al carbono de 20.32 cm de diámetro por 38.1 cm de altura en el cuerpo principal, en la parte inferior lleva un segundo tanque, soldado al primero, de 10.16 cm de diámetro por 17.18 cm de alto, en el cual está montada la resistencia. Este tanque cuenta con una entrada y salida para el aceite y un orificio con tarón roscado. La figura 24, muestra la forma y dimensiones del tanque, los valores de diámetros y altura ya fueron dados antes, los de las entradas son los siguientes:

a = diámetro de la salida del aceite = 3.175 cm.

b = diámetro de la entrada del aceite = 3.175 cm.

c = diámetro (entrada opcional) = 2.54 cm.

El volumen de este tanque es de 13.8 l y cuenta con otro tanque auxiliar para carga de aceite, que también es usado para purgar el aire que pueda haber en la tubería. Este tanque no lleva tapa en la parte superior y tiene el mismo diámetro y altura que el tanque principal de calentamiento. La diferencia es que la salida es de un diámetro de 1.27cm (figura 25). Para evitar derramamientos y ayudar a purgar la tubería, dicho tanque se instaló a una distancia de 1.30 m sobre el nivel de la succión de la bomba.

#### 4.4.- FLUJO DEL FLUIDO CALEFACTOR:

Se utilizó una bomba de pistón con un gasto de 10 l/min, para evitar fugas, se le cambiaron los sellos de neopreno originales, por unos de teflon; la bomba es impulsada por un motor eléctrico de 1 H.P y 1200 r.p.m, el cual cuenta con un sistema de engranes para reducir la velocidad a razón de 20:1. Toda la tubería usada para la conducción del aceite es de acero al carbono, cédula 40, de 0.127cm de diámetro y con dos válvulas de paso, una para carga de aceite y otra para descarga, como se ve en el diagrama de flujo del equipo.

#### 4.5.- AISLAMIENTO:

A excepción de la tapa del autoclave, todo el equipo fue aislado por una capa de fibra de vidrio de 2 cm de espesor, esto con el fin de disminuir las pérdidas de calor.

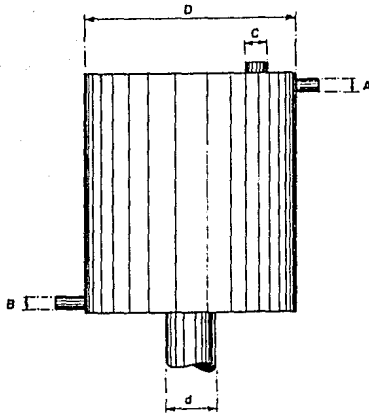


FIGURA 24.- TANQUE PARA CALENTAMIENTO DE ACEITE.

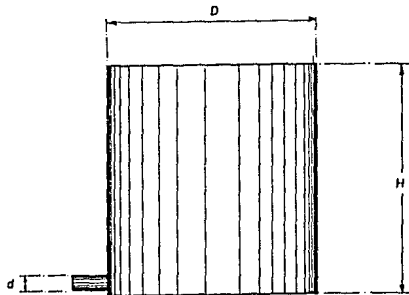


FIGURA 25.- TANQUE PARA CARGA DE ACEITE.

#### 4.6.- ACCESORIOS PARA SEGURIDAD Y PROTECCION DEL EQUIPO.

Una válvula de alivio con una presión de ruptura 22 kg/cm<sup>2</sup>, la que fue instalada en el autoclave para seguridad del operador.

Para protección de todos los equipos eléctricos se usaron protectores térmicos.

#### 4.7.- INSTRUMENTACION:

Se instalo un control de velocidad variable al agitador.

Un indicador de temperatura con termopar tipo J (hierro - constantan) para monitorear la temperatura del autoclave.

Para ver la presión de operación del autoclave se le puso un manómetro de caratula con capacidad de 21 kg/cm<sup>2</sup>.

Un controlador indicador de temperatura con termopar tipo J (hierro - constantan), se usó para controlar el elemento calefactor.

#### 4.8.- INSTRUCCIONES PARA OPERACION DEL EQUIPO:

##### ----CARGA:

1.- Una vez que se montaron las muestras en el autoclave, se carga el fluido de prueba, cuidando el nivel del mismo para evitar derrames.

2.- Subir el tanque y atornillar la brida, cuidando que el empaque esté bien colocado.

3.- Colocar las líneas de entrada y salida de aceite, cargar el aceite y encender la bomba y el elemento calefactor.

4.- Burbujear el medio con el gas requerido por la prueba, por espacio no mayor de 20 minutos, una vez hecho esto, cerrar la entrada de gas y tapar la salida en el autoclave.

5.- Encender el agitador, asegurándose de que el controlador variable esté en la posición requerida y no olvidar el refrigerante del agitador.

6.- Ayudar a que las líneas se purguen rápido con la válvula de descarga del aceite, cuidando que éste no pierda volumen.

7.- Una vez en condiciones de operación, revisar periódicamente para detectar algún problema que pudiera presentarse.

-----DESCARGA:

1.- Apagar bomba y elemento calefactor, sacando el aceite del sistema por medio de la válvula de descarga.

2.- Descargar el fluido contenido en el autoclave poniendo un recipiente debajo de la válvula de descarga, abriendo ésta lentamente (no se haga esto a temperaturas superiores a 150 oC).

3.- Desatornillar la brida y bajar, abriendo lentamente, la válvula del sato hidráulico.

4.- Una vez retiradas las muestras, lavar bien el autoclave, quedando así listo para una nueva carga.

El tiempo estimado para estas operaciones es de 40 minutos para carga y de 30 minutos para descarga.

#### 4.9.- DETALLE FINAL DEL EQUIPO.

En las figuras 26 y 27, se puede apreciar el aspecto final del equipo ya construido.

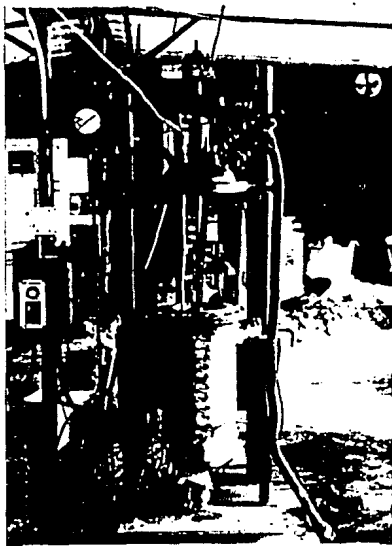


FIGURA 26.- VISTA FRONTAL DEL EQUIPO.



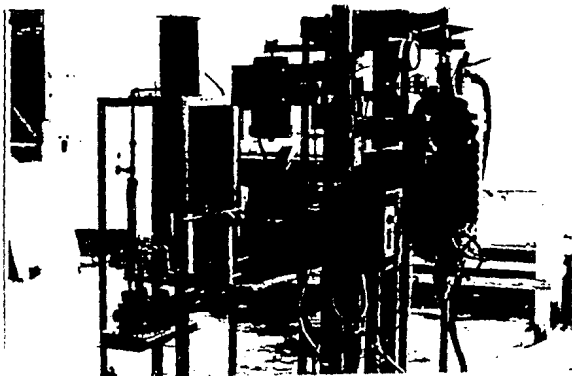


FIGURA 27.- VISTA LATERAL DEL EQUIPO.

## CAPITULO V

### EXPERIMENTACIÓN

#### 5.1.- PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL.

La primera etapa experimental está constituida por tres series de pruebas, las que fueron realizadas en cupones gravimétricos de dos aceros usados en la perforación de pozos geotérmicos y el medio corrosivo usado fue lodo de perforación. Las tablas 5.1 y 5.2 muestran la composición química de los aceros y lodo de perforación respectivamente, los aceros usados son construidos bajo normas A.P.I (Instituto Americano del Petróleo), grado E, con la diferencia que uno de ellos es reconstruido (está identificado para las pruebas como S-Humeros), y el otro era nuevo (está identificado como R-Humeros), sus propiedades mecánicas son mostradas también en la tabla 5.1. Además de los cupones gravimétricos, se usaron muestras tensionadas, con el objeto de detectar si hubo corrosión combinada con esfuerzos mecánicos, en el material.

El lodo de perforación para estas pruebas es el mismo que se usa en los campos geotérmicos de México. Las condiciones de prueba fueron las siguientes.

TABLA 5.1.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
LOS ACEROS S Y R NORMA A.P.I GRADO "E".

* %	* ACERO: S-HUMEROS (RECONSTRUIDO)	* ACERO: R-HUMEROS ( SIN USO )
* Cr	* 0.4554	* 0.3364
* Mo	* 0.5018	* 0.4299
* Ni	* 0.0424	* 0.0896
* Cu	* 0.0291	* 0.1933
* Al	* 0.0345	* -----
* Si	* 0.2366	* 0.2348
* P	* 0.0235	* 0.0177
* S	* 0.0029	* 0.00263
* Mn	* 1.0350	* 0.975
* Residuos * insolubles:	* 1.3300	* 1.7650
* Limite elástico:	* 52.7 kg/mm <sup>2</sup>	
* Esfuerzo permisible:	* 70.3 kg/mm <sup>2</sup>	

TABLA 5.2  
 COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES FÍSICAS DEL  
 LODO DE PERFORACIÓN Y EL AGUA USADA PARA PREPARARLO.

*****			
* ms/l	* LODO	* AGUA PARA LODO	* *
* Na	* 8310	* 2043	* *
* K	* 832	* 513	* *
* Ca	* 171	* 31.2	* *
* Fe	* 3.99	* 1.03	* *
* Cl	* 12337	* 3841	* *
* CO3--	* no analizado	* 0.9	* *
* Densidad (a 28 oC)	* 1.092 g/cm3	* 1.00 g/cm3	* *
* pH (a 28 oC)	* 8.094	* 6.71	* *
*****			

5.1.1.- CONDICIONES DE PRUEBA.

a) Solución: Lodo de perforación para pozos geotérmicos. Estos lodos consisten en cuatro componentes básicos:

AGUA: Fase continua.

ARCILLAS: En general, son arcillas comerciales.

AGENTES: Químicos.

DIESEL : Fase dispersa del fluido de perforación, en un 6-10 por ciento

La viscosidad de este lodo era de 10 a 12 cp, y su densidad de 1.02 a 1.08 g/cm<sup>3</sup>.

b) Temperaturas y presiones de operación.

Cada serie de pruebas fue llevada a cabo a las temperaturas y presiones que se muestran a continuación.

TEMPERATURA °C ----- PRESION kg/cm<sup>2</sup>

125 ----- 4

150 ----- 7

200 ----- 20

c) Aeración.

Cada serie de Pruebas se realizó con diferentes niveles de agresividad. Para lograr esto, se usaron tres gases: Nitrógeno, Oxígeno, Aire, de manera que, burbujeando y saturando la solución (lodo) con estos gases, aumentará o disminuirá el poder corrosivo del medio, los niveles cualitativos de agresividad son de la siguiente manera:

ATMOSFERA ----- AGRESIVIDAD

- Nitrógeno ----- Bajo

- Aire ----- Medio

- Oxígeno ----- Alto

d) Asitación : 250 r.p.m .

e) Duración de la Prueba.

Las tres series de Pruebas fueron realizadas a dos tiempos cada una y estos fueron de 50 y 100 horas.

f) Volumen de la solución.

Se usaron cargas de 15 l de lodo nuevo en cada prueba, con el fin de evitar errores por uso de lodo degradado o contaminado.

d) Especímenes.

Se usaron tres cupones gravimétricos y dos probetas de tensión de cada acero en cada una de las pruebas, las probetas fueron tensadas al 80 por ciento del límite elástico del material. La preparación de muestras se explicó en el capítulo III.

5.1.2.- LIMPIEZA DE CUPONES.

Se usó un método electroquímico para la limpieza de los cupones gravimétricos después de cada prueba, la solución elegida fue NaOH al 20 por ciento, ya que ésta no ataca al metal, los cupones conformaron el cátodo y el ánodo fue un electrodo de grafito, el arreglo se muestra en la figura 28. La intensidad de corriente aplicada fue de 10 A, para seis cupones en limpieza.

5.1.3.- EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

Después de terminar la prueba los cupones fueron limpiados y sometidos a una observación visual para detectar si hubo fragilización por hidrógeno o picaduras, reportando éstas en número de picaduras por  $m^2$ , en caso que se presentaran.

Las velocidades de corrosión fueron calculadas usando la ecuación 3.1, por medio del programa VELCOR (apéndice C), el reporte de éstas contiene los valores de las dimensiones, peso original y final de cada cupón, con sus respectivas velocidades de corrosión, así como las condiciones de prueba y acero de que se trata, para las pruebas bajo tensión, las probetas fueron

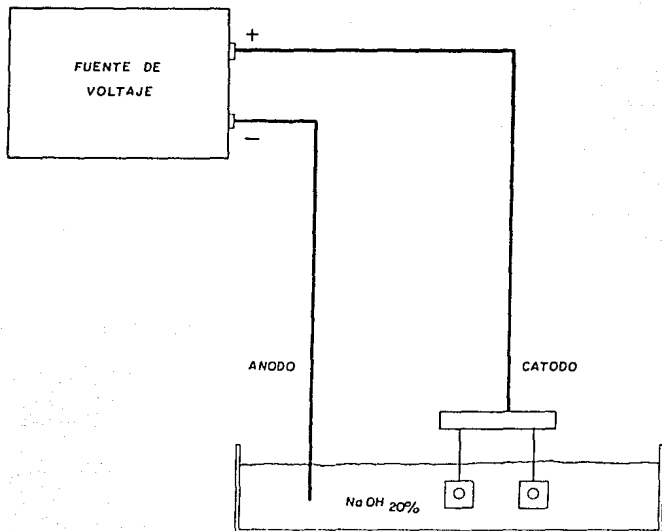


FIGURA 28.- ESQUEMA DEL SISTEMA DE LIMPIEZA  
ELECTRÓQUÍMICA.



sometidas a análisis metalográfico . Todos los resultados y la discusión de los mismos son presentados en el siguiente capítulo, en el cual se presentan tablas que muestran el tipo de ataque que sufrió el cupón, para los resultados de análisis metalográfico solo se reportó si hubo o no corrosión por esfuerzo.

## 5.2.- SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL.

Se realizaron experimentos de polarización lineal a 150 y 200 oC, en el autoclave construido y pruebas a 250 oC se llevaron a cabo en un autoclave de Hastelloy de 1 l de capacidad. Todas las pruebas se hicieron usando salmueras geotérmicas sintéticas de baja y alta salinidad (9), la composición de éstas es mostrada en la tabla 5.3. Los aceros usados para la elaboración de electrodos de trabajo fueron los mismos de la primera etapa.

### 5.2.1.- CONDICIONES DE PRUEBA.

#### a) Aeración:

Se establecieron condiciones con y sin oxígeno, para cada prueba, para mantener la concentración de oxígeno se inyectó aire a la solución, mientras que para condiciones sin presencia de oxígeno se uso nitrógeno.

#### b) Temperaturas y presiones de operación:

TABLA 5.3.  
COMPOSICION DE LAS SALMUERAS GEOTÉRMICAS  
SINTÉTICAS (9).

```
*****
*                               |                               *
*           SIN OXIGENO       |           OXIGENO       *
*                               |                               *
*-----|-----|-----|-----|
*                               |                               *
*                               |           BAJA SALINIDAD           *
*-----|-----|-----|-----|
*                               |                               *
*           3% NaCl           |           3% NaCl           *
*           450 mg/l SiO2 (como SiO3=) |           450 mg/l SiO2 (como SiO3=) *
*           0.5 mg/l S--      |           700 mg/l SO4--      *
*           pH= 6 a 25 oC     |           pH= 6 a 25 oC     *
*           atmosfera de nitrogeno |           burbujeo de aire   *
*-----|-----|-----|-----|
*                               |                               *
*                               |           ALTA SALINIDAD           *
*-----|-----|-----|-----|
*                               |                               *
*           20% NaCl          |           20% NaCl          *
*           450 mg/l SiO2 (como SiO3=) |           450 mg/l SiO2 (como SiO3=) *
*           0.5 mg/l S--      |           700 mg/l SO4--      *
*           pH= 5.5 a 25 oC   |           pH= 5.5 a 25 oC   *
*           atmosfera de nitrogeno |           burbujeo de aire   *
*-----|-----|-----|-----|
*****
```

Todas las Pruebas fueron llevadas a cabo a 150, 200 y 250 °C, y las presiones fueron las de saturación correspondientes.

c) Agitación : 750 r.p.m.

d) Electrodo de trabajo:

Se usaron electrodos preparados como se indicó en el apartado 3.2.2.

e) Electrodo de referencia y auxiliares:

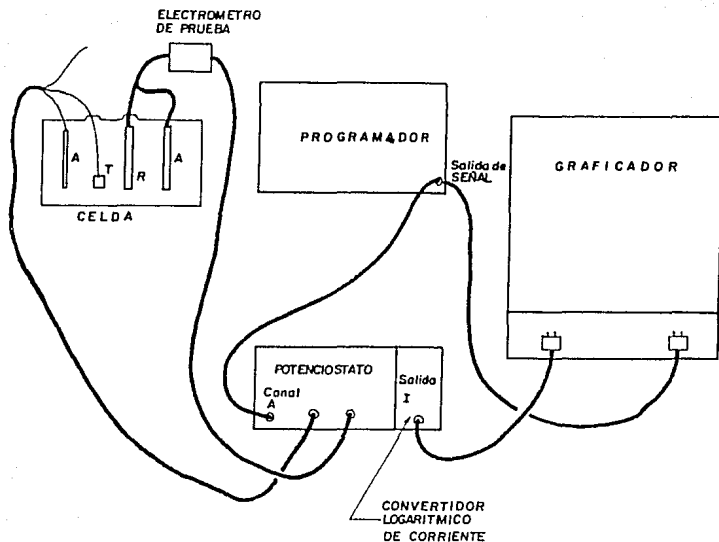
Como electrodo de referencia se utilizó el  $Ag/AgCl$ , y los auxiliares se hicieron de acero inoxidable.

#### 5.2.2.- MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS.

Mediciones electroquímicas fueron hechas usando un potenciostato con un potencial de barrido de 1 mV/s, las mediciones de corriente a este potencial de barrido fueron ejecutadas hasta  $\pm 200$  mV sobre el potencial de corrosión en cada prueba, en la figura 29 se muestra el arreglo potencioestático usado. Los datos de potencial y corriente fueron registrados por un graficador x-y.

#### 5.2.3.- EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

Los datos de las gráficas de polarización fueron ajustadas por los programas de computadora CORBET Y CORFIT (Apéndices A y B), y se calcularon las pendientes catódica y anódica, densidad de corriente de corrosión, velocidad de corrosión y resistencia de



- A ELECTRODOS AUXILIARES
- T ELECTRODO DE TRABAJO
- R ELECTRODO DE REFERENCIA

FIGURA 29.- ARREGLO POTENCIOSTÁTICO E INSTRUMENTACIÓN  
PARA MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS DE POLARIZACIÓN  
LINEAL.

Polarización, los cálculos de pendientes de tafel y resistencia de polarización, son de interés para la parte de cinética de este trabajo. Los resultados son reportados en el siguiente capítulo.

### 5.3.- TERCERA ETAPA EXPERIMENTAL.

Las pruebas de polarización lineal fueron realizadas sobre los aceros S-Humeros y R-Humeros para calcular el orden de la reacción electroquímica  $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$ , en soluciones de cloruro de sodio. Las concentraciones de las soluciones usadas son mostradas en la tabla 5.4. Las pruebas se hicieron en una celda de vidrio para evitar interferencias, como lo sería el material de que está construido el autoclave. En la figura 30 se muestra un esquema del arreglo usado.

#### 5.3.1.- CONDICIONES DE PRUEBA.

##### a) Aeración:

Se mantuvo una condición de atmósfera inerte mediante burbujeo de nitrógeno a lo largo de toda la prueba, esto mismo sirvió para agitar la solución.

##### b) Temperatura :

Las pruebas fueron realizadas a una temperatura de 40 °C, y se mantuvo constante mediante un baño de temperatura.

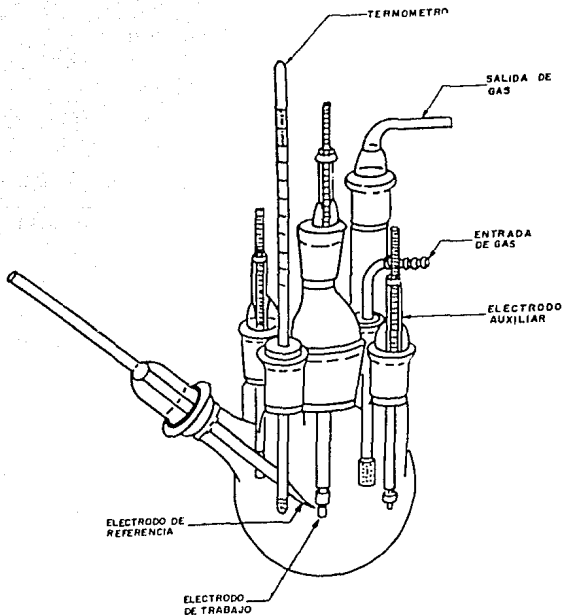


FIGURA 30.- ARREGLO ELECTROQUÍMICO PARA PRUEBAS EN CELDA DE VIDRIO.

TABLE 5.4.  
COMPOSICIÓN DE LAS SOLUCIONES DE  
NaCl USADAS EN LAS PRUEBAS PARA  
CÁLCULO DE ORDEN DE REACCIÓN.

SOLUCION No.	CONCENTRACION (mg/l) NaCl
1	200,000
2	150,000
3	100,000
4	75,000
5	50,000
6	20,000

c) Electrodo :

Los electrodos usados fueron los mismos que se mencionaron en la segunda etapa, solo que se prepararon de acuerdo al procedimiento del apartado 3.2.3.

5.3.2.- EVALUACION DE RESULTADOS.

Se hicieron mediciones electroquímicas con un potencióstato a un potencial de barrido de 1 mV/s, las mediciones de corriente se llevaron a cabo hasta  $\pm 100$  mV sobre el potencial de corrosión, datos de corriente fueron leídos a potenciales constantes para cada concentración. Se hizo un análisis de regresión lineal para datos de  $\log i$  vs. los  $C_k$ , para calcular las pendientes, que, como indicamos en el capítulo II, son proporcionales al orden de reacción; los resultados son presentados en el capítulo VI.



CAPÍTULO VI  
EVALUACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES  
CÁLCULOS Y DISCUSIÓN

Las velocidades de corrosión y los valores promedio fueron calculadas a cada tiempo de prueba y graficadas contra temperatura, para una observación de la tendencia de los resultados (figuras 31-36). Los cupones fueron inspeccionados con el fin de detectar algún tipo de corrosión, como los siguientes:

- Frasilización por hidrógeno.
- Corrosión general que presenta el espécimen.
- Presencia de picaduras.

Estos resultados son mostrados en las tablas 6 y 6.1. Como se esperaba, las velocidades de corrosión fueron más altas después de tiempos cortos y más bajas después de tiempos de exposición largos.

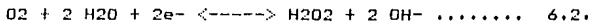
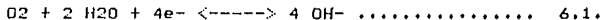
Se puede observar en la tabla 6, que en las pruebas de 50 horas de duración en atmósfera de nitrógeno, se presentó frasilización por hidrógeno en ambos aceros, pero en la prueba a 100 horas, este fenómeno ya no se presentó y sí, en cambio, los cupones mostraron corrosión general y corrosión por erosión, lo cual explica el porqué no se presentó la frasilización por hidrógeno en dicha prueba. En las primeras 50 horas se formaron las ampollas, pero en las restantes, la erosión se encargó de

horrarlas y por eso no se pudieron apreciar, el efecto erosivo solo se presentó en las pruebas a 100 horas y en todos los medios.

Aún cuando las velocidades de corrosión son muy bajas (menores de 0.5 mm/año), la presencia de fragilización por hidrógeno nos indica que no es recomendable usar medio inerte en la operación de perforación. La tendencia de las velocidades de corrosión en este medio es aumentar conforme aumenta la temperatura, como se aprecia en las figuras 31 y 32.

Para las pruebas en medio con alta concentración de oxígeno, las velocidades más bajas se obtuvieron a la temperatura más alta, ésto sucedió en las pruebas de 50 y 100 horas, la explicación es la siguiente:

En el capítulo II, ya se habló del efecto del oxígeno disuelto, para las condiciones de pH entre 5 y 12 las reacciones que se suceden son (4):



La reacción para el peróxido en el mismo rango de pH es:



Como se puede observar el oxígeno reactivo se disuelve con los átomos de hidrógeno absorbidos al azar sobre la superficie del hierro, la oxidación procede tan rápidamente como el oxígeno

alcanza la superficie del metal.

Si bien la solubilidad del oxígeno en agua decrece conforme la temperatura aumenta, los adelgazadores del lodo empiezan a reaccionar con él, de manera que aunque la erosión remueva la capa pasivadora, el oxígeno se consume en otras reacciones, disminuyendo así la velocidad de corrosión.

También se presentó el fenómeno de corrosión por hendidura y ésta se presentó en el área de contacto del cupón con el aislante de teflón; esto se debió a que la concentración de oxígeno en esta área estaba más limitada con respecto a la demás superficie, lo cual propició que se formara la celda de aereación diferencial.

Las pruebas en presencia de aire, las cuales representaron las condiciones más reales de la operación de perforación, dieron los siguientes resultados.

- A 50 horas no definen bien la tendencia de las velocidades de corrosión y esto se debe a la formación de capas pasivadoras a una temperatura media y rompimiento de las mismas a temperaturas altas, al igual que en el medio anterior.

- Las pruebas a 100 horas definieron la tendencia de las velocidades y éstas disminuyen conforme la temperatura aumenta, lo cual se explica, como ya se dijo anteriormente, el oxígeno se consume en otras reacciones conforme aumenta la temperatura. En este caso, el comportamiento fue diferente al de oxígeno puro, porque aquí se manejó una concentración mucho más baja.

FIGURA 31.  
ACERO S-GRADO "E" LADOS DE PERFORACIÓN EN ATM. (N<sub>2</sub>)

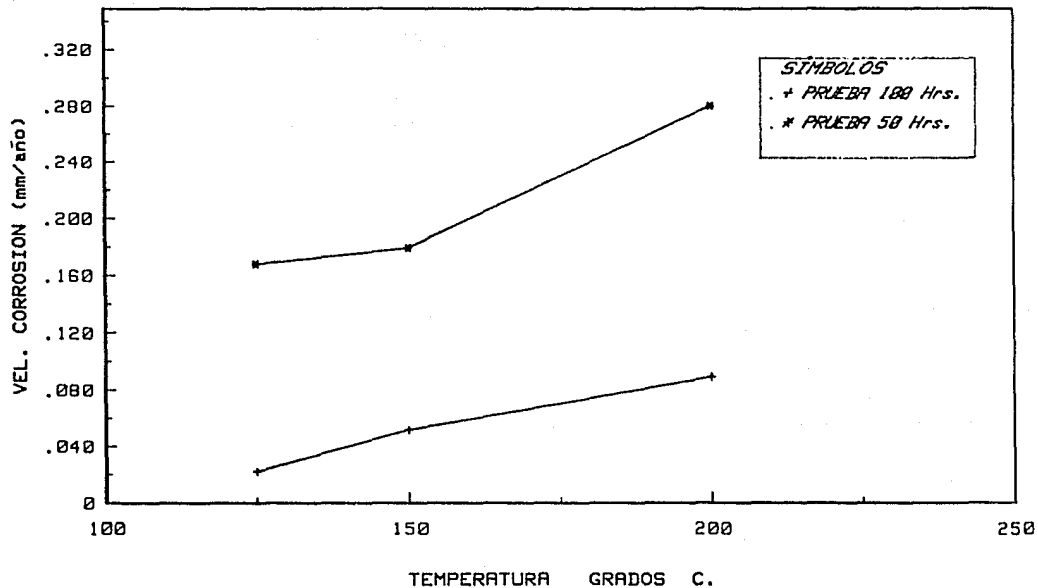


FIGURA 32.  
ACERO R-GRADO "E" LODOS DE PERFORACIÓN EN ATM. (N<sub>2</sub>)

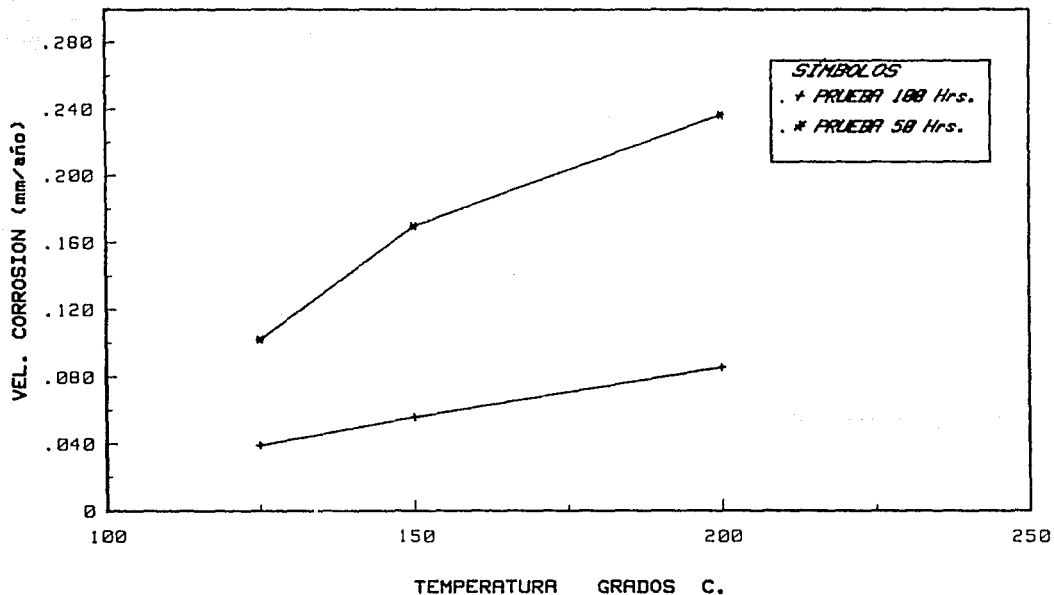


FIGURA 33.  
ACERO S-GRADO"E" LODOS DE PERFORACIÓN EN ATM.(O2)

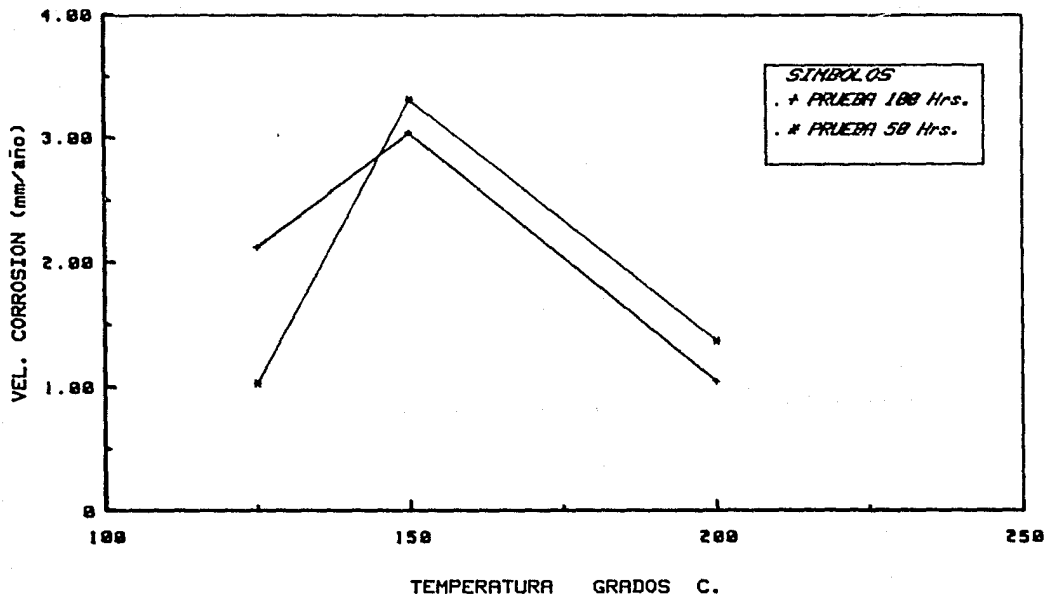


FIGURA 34  
ACERO R-GRADO"E" LODOS DE PERFORACIÓN EN ATM.(O2)

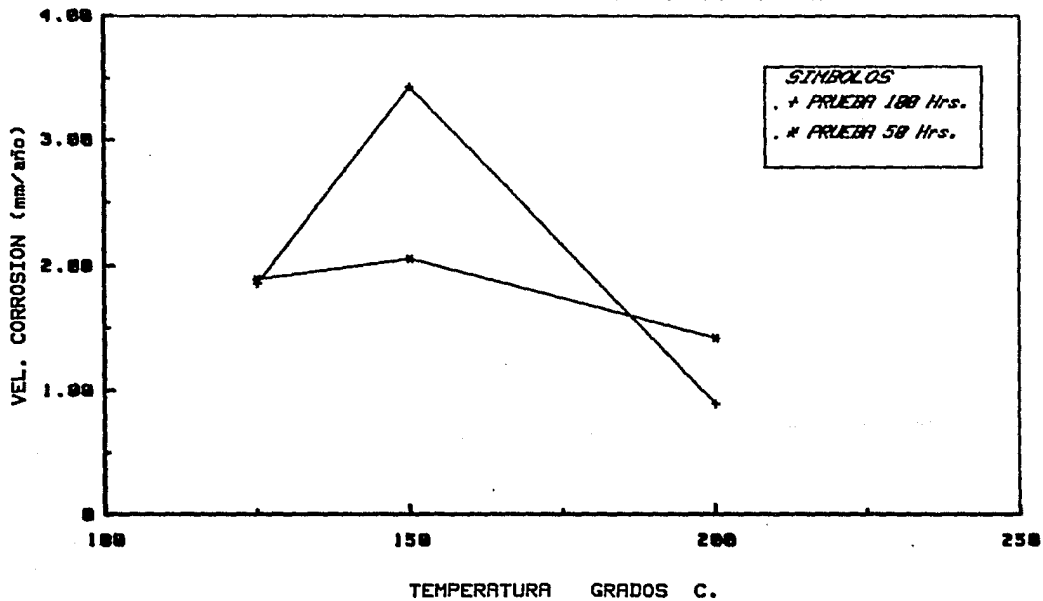


FIGURA 35.  
ACERO S-GRADO E\* LODOS DE PERFORACIÓN EN AIRE.

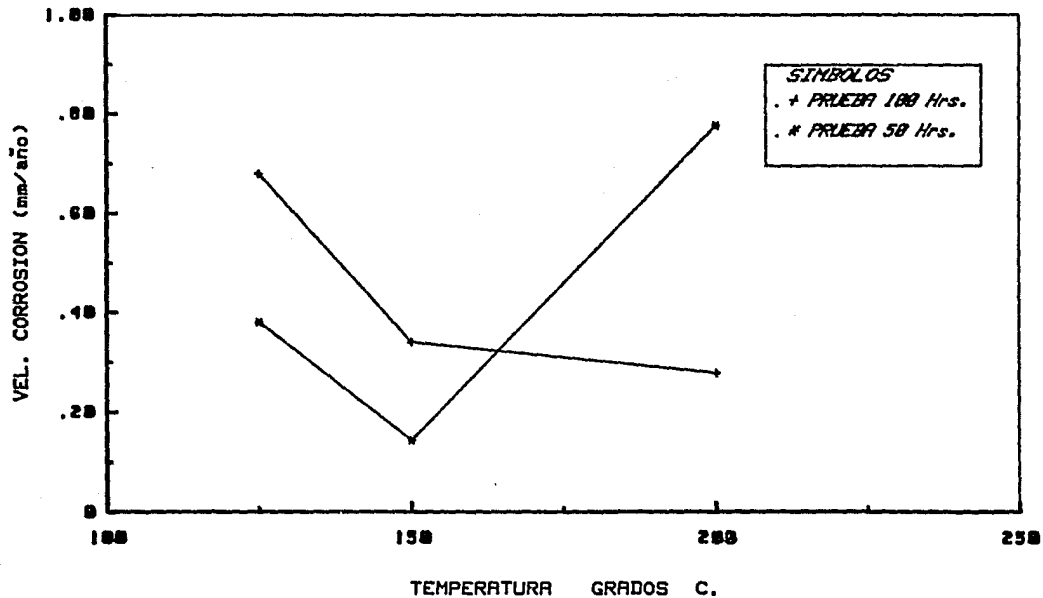




FIGURA 36.  
ACERO R-GRADO "E" LODOS DE PERFORACIÓN EN AIRE.

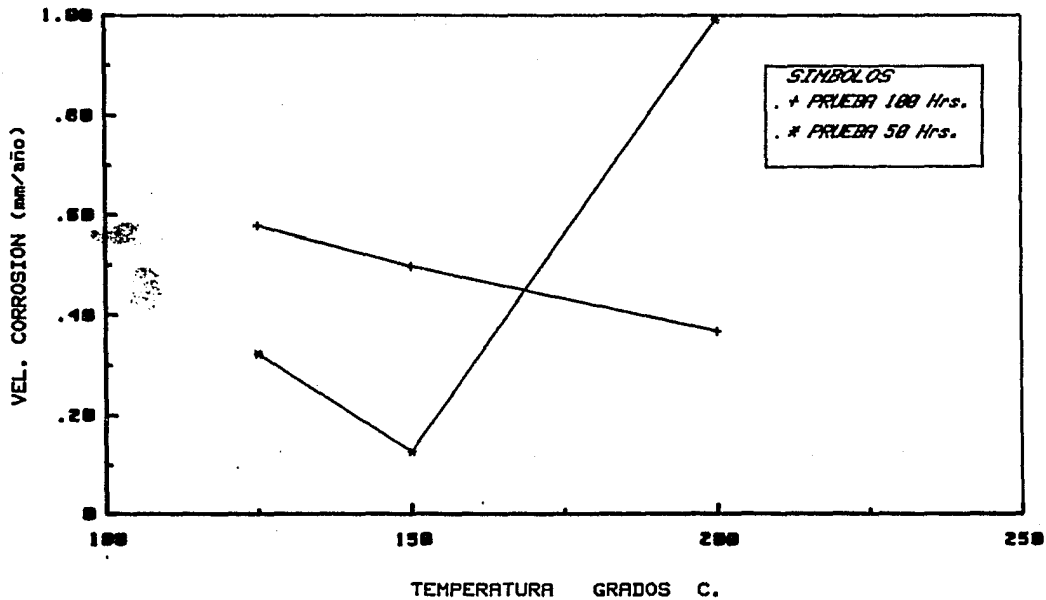


TABLA 6.  
 CONDICIONES DE LOS CUPONES SOMETIDOS A CORROSION  
 EN LODOS DE PERFORACIÓN DURANTE 50 HORAS.  
 ACEROS: S-HUMEROS Y R-HUMEROS.

MEDIO	TEMPERATURA oC.	FRAGILIZACION POR HIDROGENO	TIPO DE CORROSION
NITROGENO	125	SI	----
	150	SI	----
	200	SI	----
OXIGENO	125	NO	GENERAL
	150	NO	GENERAL
	200	NO	GENERAL
AIRE	125	NO	GENERAL
	150	NO	GENERAL
	200	NO	GENERAL

\*  
 \* NOTA: Solamente 2 cupones del acero S-Humeros presentaron \*  
 \* picaduras en la prueba a 200 oC. en nitrógeno y la \*  
 \* densidad de estas fue de 5 E+04 picaduras/ m2 (9). \*  
 \*  
 \*\*\*\*\*

TABLA 6.1.  
CONDICIONES DE LOS CUPONES SOMETIDOS A CORROSIÓN  
EN LODOS DE PERFORACIÓN DURANTE 100 HORAS.

ACEROS: S-HUMEROS Y R-HUMEROS.

MEDIO	TEMPERATURA oC.	FRAGILIZACION POR HIDROGENO	TIPO DE CORROSION
NITROGENO	125	NO	CORROSION-EROSION
	150	NO	CORROSION-EROSION
	200	NO	CORROSION-EROSION
OXIGENO	125	NO	CORROSION-EROSION
	150	NO	CORROSION-EROSION, HENDIDURA
	200	NO	CORROSION-EROSION, HENDIDURA
AIRE	125	NO	CORROSION-EROSION
	150	NO	CORROSION-EROSION
	200	NO	CORROSION-EROSION, HENDIDURA

NOTA: No se presentaron picaduras, razón por la cual no se reportan.

No se presentó el fenómeno de fragilización por hidrógeno, ya que al igual que el caso anterior el oxígeno reacciona con éste.

Los valores de las velocidades de corrosión, todas menores de 1 mm/año, nos indican que el lodo pasa la prueba de corrosión, siempre y cuando no se trabaje en atmósfera inerte o con altas concentraciones de oxígeno y su mayor efecto sobre la tubería y herramientas es de tipo erosivo. Los reportes de cada prueba se muestran en el apéndice D.

El análisis metalográfico reveló, que no hubo corrosión por esfuerzos en ninguna de las pruebas.

En las mediciones de polarización lineal en salmueras isotérmicas sintéticas, se usaron 2 velocidades de barrido (10 y 1 mV/s), la velocidad de 10 mV/s fue usada para ver la tendencia de la curva de polarización de una manera más o menos rápida y la velocidad de barrido de 1mV/s, es la recomendada por ASTM (13) para obtener condiciones de estado estacionario en pruebas de este tipo. Los datos de ambos lados de la curva de polarización, catódico y anódico, fueron usados para obtener los valores de densidad de corriente de corrosión, pendientes de Tafel y velocidad de corrosión, mediante los ajustes computarizados CORBET Y CORFIT (Apéndice A y B).

En las tablas 6.2 y 6.3 se muestran los valores obtenidos en las pruebas en ausencia de oxígeno, ambos aceros tienen la misma tendencia a aumentar la velocidad de corrosión conforme aumenta la

temperatura, siendo ésta más baja en la salmuera de baja salinidad.

Los resultados de las mediciones efectuadas en presencia de oxígeno son mostrados en las tablas 6.4 y 6.5 para salmueras de baja y alta salinidad respectivamente. En ellas se puede observar como la velocidad de corrosión del acero S-Humeros tiende a disminuir conforme la temperatura aumenta en la solución; el acero R-Humeros tuvo un comportamiento más uniforme, aumentando la velocidad de corrosión conforme la temperatura aumenta, con un factor de 3 cada 50 oC en salmuera de baja salinidad, mientras que en alta salinidad tiene un aumento brusco de 150 a 200 oC y luego una disminución a 250 oC. Las curvas de polarización obtenidas para el acero R-Humeros indican que hay pasivación en un rango de potencial de 75 a 150 mV, sobre el potencial de corrosión. Los resultados obtenidos para este acero en baja salinidad, fueron comparados con las mediciones por gravimetría, las velocidades concuerdan bastante bien; el factor para las mediciones electroquímicas fue de 5.

El equipo cumplió con los requisitos de la experimentación, pero hubo problemas con el estopero que sella la entrada del agitador, ya que a la temperatura de 200 oC hubo fugas de vapor por el mismo, el problema se resolvió poniendo un anillo de asbesto grafitado nuevo en cada prueba a dicha temperatura, las mediciones de polarización lineal pueden ser llevadas a cabo en el mismo siempre y cuando no se rebasen los límites de temperatura y

presión de operación.

Las mediciones de polarización lineal en soluciones de NaCl a diferentes concentraciones, para calcular los órdenes de reacción electroquímica, se llevaron a cabo en celda de vidrio, también se le burbujé nitrógeno y se tuvo cuidado de no contaminar la solución. Las tablas 6.6-9 muestran los resultados obtenidos. La velocidad de barrido usada fue de 1 mV/s y la temperatura se mantuvo constante a 40 °C, las curvas de polarización fueron obtenidas para cada acero y concentración, fijando los potenciales, se llevaron datos de densidad de corriente a cada concentración para dichos potenciales, esto se hizo en ambos lados de la curva catódico y anódico. Los valores del logaritmo del valor absoluto de la densidad de corriente fueron graficados contra los del logaritmo de la concentración, como se muestra en las figuras 37-40, los datos experimentales fueron ajustados por regresión lineal, como se observa en las líneas discontinuas de las figuras 37-40, el valor de las pendientes, como ya se dijo en el capítulo II, es proporcional al orden de reacción electroquímica, los órdenes obtenidos, fueron los siguientes:

$Z_{r,k} = 0$  .....orden catódico.

$Z_{r,k} = 2$  .....orden anódico.

Así, tenemos que la densidad de corriente anódica es proporcional al cuadrado de la concentración de NaCl, mientras que las líneas paralelas de pendiente cero, nos indican que la

densidad de corriente cátodica es independiente de la concentración. Las correlaciones obtenidas fueron buenas. En los casos en que algún dato dispersaba mucho los demás, se optó por eliminarlo. Las mediciones de este tipo pueden ser realizadas para mezclas de multicomponentes como lo son las salmueras geotérmicas sintéticas, pero habra que ver los efectos de la temperatura.

TABLA 6.2.  
 PARÁMETROS CINÉTICOS Y DE CORROSIÓN OBTENIDOS POR  
 POLARIZACIÓN LINEAL.

```

*****
*
* SOLUCIÓN: SALMUERA GEOTÉRMICA SINTÉTICA
* CONCENTRACIÓN: BAJA SALINIDAD
* ATMÓSFERA: INERTE (AUSENCIA DE OXIGENO)
*
*****
* ACERO: R-HUMEROS
*
*-----*
* T      BC      BA      Icorr,      Rp,      Vel. corr.
* oC     (mV)    (mV)    (mA/cm2)   (mV/mA)  (mm/año)
*-----*
* 150    142     64      75         258     0,870
*-----*
* 200    138     293     131        310     1,520
*-----*
* 250    120     400     430        95      5,000
*-----*
*****
* ACERO: S-HUMEROS
*
*-----*
* T      BC      BA      Icorr,      Rp,      Vel. corr.
* oC     (mV)    (mV)    (mA/cm2)   (mV/mA)  (mm/año)
*-----*
* 150    178,84   105     841.62     34,13   9,775
*-----*
* 200    343,80   482,55  2233,4     39,04   26,94
*-----*
* 250    210     1700,0  2520       31,22   30,00
*-----*
*****
* I= Temperatura.
* BC= Pendiente catódica de Tafel.
* BA= Pendiente anódica de Tafel.
* Rp= Resistencia de polarización.
* Icorr.= Densidad de corriente de corrosión.
* Vel. corr.= Velocidad de corrosión.
*****
    
```



TABLA 6.3.

PARÁMETROS CINÉTICOS Y DE CORROSIÓN OBTENIDOS POR  
POLARIZACIÓN LINEAL.

```

*****
*
* SOLUCIÓN: SALMUERA GEOTÉRMICA SINTÉTICA
* CONCENTRACIÓN: ALTA SALINIDAD
* ATMÓSFERA: INERTE (AUSENCIA DE OXÍGENO)
*
*****
* ACERO: R-HUMEROS
*
*-----*
* T      BC      BA      Icorr.      Rp.      Vel. corr.
*  oC    (mV)    (mV)    (mA/cm2)    (mV/mA)    (mm/año)
*-----*
* 150    195.25   1476.9   151.75      493.63     5.7337
*-----*
* 200    100.62   292.65   53.78       604.62     7.0229
*-----*
* 250    125.67   541.61   42.15      1058.84    12.2059
*-----*
*****
* ACERO: S-HUMEROS
*
*-----*
* T      BC      BA      Icorr.      Rp.      Vel. corr.
*  oC    (mV)    (mV)    (mA/cm2)    (mV/mA)    (mm/año)
*-----*
* 150    42.32     165.23   8028.53     1.82       93.25
*-----*
* 200    132.55    259.10   15400.4     2.47       178.881
*-----*
* 250    196.32    485.73   25928       3.922      301.17
*-----*
*****
* T= Temperatura.
* RC= Pendiente catódica de Tafel.
* BA= Pendiente anódica de Tafel.
* Rp= Resistencia de polarización.
* Icorr.= Densidad de corriente de corrosión.
* Vel. corr.= Velocidad de corrosión.
*****

```

TABLA 6.4.  
PARÁMETROS CINÉTICOS Y DE CORROSIÓN OBTENIDOS POR  
POLARIZACIÓN LINEAL.

```

*****
*
* SOLUCIÓN: SALMUERA GEOTÉRMICA SINTÉTICA
* CONCENTRACION: BAJA SALINIDAD
* ATMÓSFERA: OXÍGENO
*
*****
* ACERO: R-HUMEROS
*
*-----*
* T BC BA Icorr. Rp. Vel. corr.
* oC (mV) (mV) (mA/cm2) (mV/mA) (mm/año)
*-----*
* 150 120.6 132.64 150.24 182.6 2.1297
*-----*
* 200 190.8 336.8 657.95 113 7.6422
*-----*
* 250 214.7 1104.88 1711.35 46.14 19.878
*-----*
*****
* ACERO: S-HUMEROS
*
*-----*
* T BC BA Icorr. Rp. Vel. corr.
* oC (mV) (mV) (mA/cm2) (mV/mA) (mm/año)
*-----*
* 150 180.30 454.29 50993.48 12.43 592.30
*-----*
* 200 97.12 428.86 2439.50 10.15 283.35
*-----*
* 250 54.13 52.5 6122.83 1.77 71.22
*-----*
*****
* T= Temperatura.
* BC= Pendiente catódica de Tafel.
* BA= Pendiente anódica de Tafel.
* Rp= Resistencia de Polarización.
* Icorr.= Densidad de corriente de corrosión.
* Vel. corr.= Velocidad de corrosión.
*****

```

TABLA 6.5.

PARÁMETROS CINÉTICOS Y DE CORROSIÓN OBTENIDOS POR  
POLARIZACIÓN LINEAL.

```

*****
*
* SOLUCIÓN: SALMUERA GEOTÉRMICA SINTÉTICA
* CONCENTRACIÓN: ALTA SALINIDAD
* ATMÓSFERA: OXÍGENO
*
*****
* ACERO: R-HUMEROS
*
* T      BC      BA      Icorr.      Rp.      Vel. corr.
* oC     (mV)    (mV)    (mA/cm2)   (mV/mA)  (mm/año)
*-----*-----*-----*-----*-----*
* 150    146.69   245.06   338.7      117.66   3.9341
*-----*-----*-----*-----*
* 200    114.24   252.39   1255.46    27.24    14.5827
*-----*-----*-----*-----*
* 250    126.94   190.49   1368.22    24.18    15.8924
*-----*-----*-----*-----*
*****
* ACERO: S-HUMEROS
*
* T      BC      BA      Icorr.      Rp.      Vel. corr.
* oC     (mV)    (mV)    (mA/cm2)   (mV/mA)  (mm/año)
*-----*-----*-----*-----*
* 150    62.47    301.94   44.023     .51      511.347
*-----*-----*-----*-----*
* 200    171.38   923.73   102717     0.610    1193.1
*-----*-----*-----*-----*
* 250    293.1    41563.6  2153       0.876    250.56
*-----*-----*-----*-----*
*****
* T= Temperatura.
* BC= Pendiente catódica de Tafel.
* BA= Pendiente anódica de Tafel.
* Rp= Resistencia de polarización.
* Icorr.= Densidad de corriente de corrosión.
* Vel. corr.= Velocidad de corrosión.
*****

```



TABLA 6.7.

DATOS OBTENIDOS POR POLARIZACION LINEAL EN CELDA DE VIDRIO PARA CALCULO DEL ORDEN DE REACCION ELECTROQUIMICA ANODICA EN SOLUCIONES DE NaCl PARA EL ACERO R-HUMERDS A 40 oC.

```

*****
*
* CONCENTRACION      POTENCIALES FIJOS PARA LECTURA DE DATOS
* SOLUCION           (mV)
*
* (ms/l)            log Ck.      25      75      100
*                   log |i|    log |i|    log |i|
*-----|-----|-----|-----|
* 200,000           5.301      3.653    3.954    4.100
*-----|-----|-----|-----|
* 150,000           5.176      3.342    3.845    3.900
*-----|-----|-----|-----|
* 100,000           5.000      3.051    3.602    3.700
*-----|-----|-----|-----|
* 75,000            4.875      3.000    3.300    3.530
*-----|-----|-----|-----|
* 50,000            4.689      2.100    2.900    3.150
*-----|-----|-----|-----|
* 25,000            4.397      1.900    2.200    2.300
*
*****
* RESULTADOS DE LA REGRESION LINEAL. LOG. |i| Vs. LOG. Ck.
*-----|-----|-----|
* potencial= 25 mV.   pendiente= 2.04   correlacion= 0.97
* potencial= 75 mV.   pendiente= 1.99   correlacion= 0.99
* potencial= 100 mV.  pendiente= 1.943  correlacion= 0.978
*
*****

```

TABLA 6.8.

DATOS OBTENIDOS POR POLARIZACIÓN LINEAL EN CELDA DE VIDRIO  
PARA CÁLCULO DEL ORDEN DE REACCIÓN ELECTROQUÍMICA CATODICA  
EN SOLUCIONES DE NaCl, PARA EL ACERO S-HUMEROS A 40 °C.

```

*****
*
* CONCENTRACIÓN      | POTENCIALES FIJOS PARA LECTURA DE DATOS
* SOLUCIÓN           | (mV)
*                   | -----
* (ms/l)            | los Ck.      | - 75         | - 100
*                   |               | los lii     | los lii
* -----
* 200,000           | 5.301        | 2.903        | 3.000
* -----
* 150,000           | 5.176        | 2.903        | 2.998
* -----
* 100,000           | 5.000        | 2.903        | 3.000
* -----
* 75,000            | 4.875        | 2.903        | 3.000
* -----
* 50,000            | 4.698        | 2.903        | 3.000
* -----
* 25,000            | 4.397        | -----      | -----
* -----
* RESULTADOS DE LA REGRESION LINEAL. LOG. lii Vs. LOG. Ck.
* -----
* potencial= -75 mV.      pendiente= 0.020
* potencial= -100 mV.    pendiente= 0.000
* -----
*
* NOTA: Los valores leidos a una concentración de 25,000
* ms/l no fueron tomados en cuenta.
*
*****
    
```

TABLA 6.9.

DATOS OBTENIDOS POR POLARIZACIÓN LINEAL EN CELDA DE VIDRIO PARA CÁLCULO DEL ORDEN DE REACCIÓN ELECTROQUÍMICA ANÓDICA EN SOLUCIONES DE NaCl PARA EL ACERO S-HUMEROS A 40 °C.

```

*****
*
* CONCENTRACIÓN          POTENCIAL FIJO PARA LECTURA DE DATOS
* SOLUCIÓN                (mV)
*
* (mg/l)                  log Ck.          log ii
*-----|-----|-----
* 200,000                 5.301                3.562
*-----|-----|-----
* 150,000                 5.176                3.255
*-----|-----|-----
* 100,000                 5.000                2.908
*-----|-----|-----
* 75,000                  4.875                2.600
*-----|-----|-----
* 50,000                  4.689                2.400
*-----|-----|-----
* 25,000                  4.397                -----
*-----|-----|-----
* RESULTADOS DE LA REGRESION LINEAL, LOG ii Vs. LOG Ck.
*-----|-----|-----
*
*                               potencial= 100 mV.
* correlación= 0.992           pendiente (orden de rxn.)= 1.96
*-----|-----|-----
*
*   NOTA: El dato a 25,000 mg/l no fue tomado en cuenta.
*-----|-----|-----
*****

```

FIGURA 37. ORDEN DE REACCIÓN CATÓDICA.  
ACERO IR: DENSIDAD DE CORRIENTE  $V_{\infty}$ . CONCENTRACIÓN.

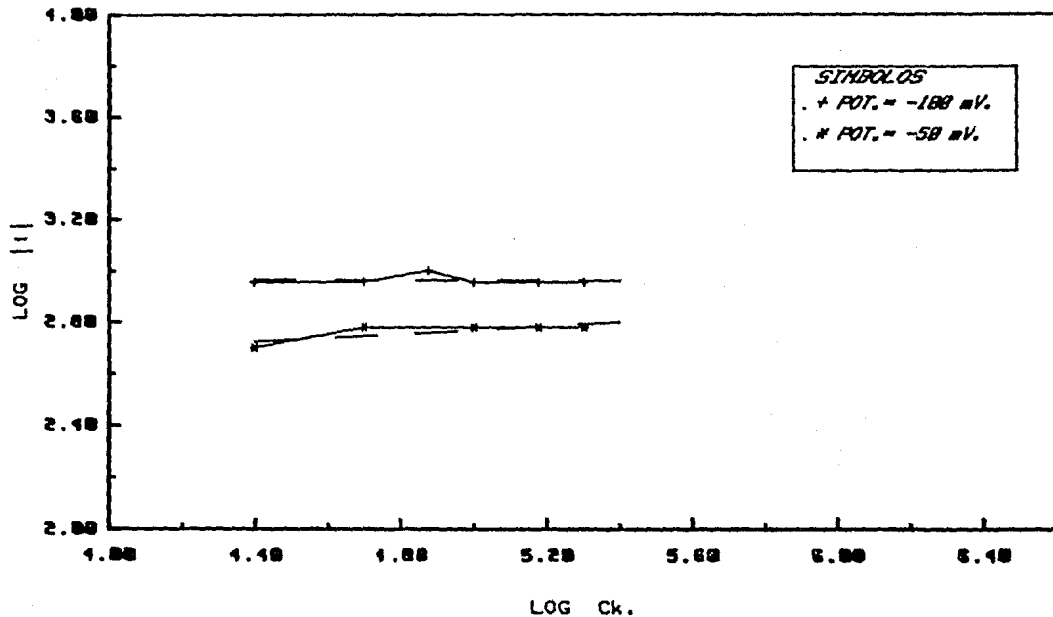




FIGURA 38. ORDEN DE REACCIÓN ANÓDICA.  
 ACERO R: DENSIDAD DE CORRIENTE  $V_{\alpha}$ . CONCENTRACIÓN.

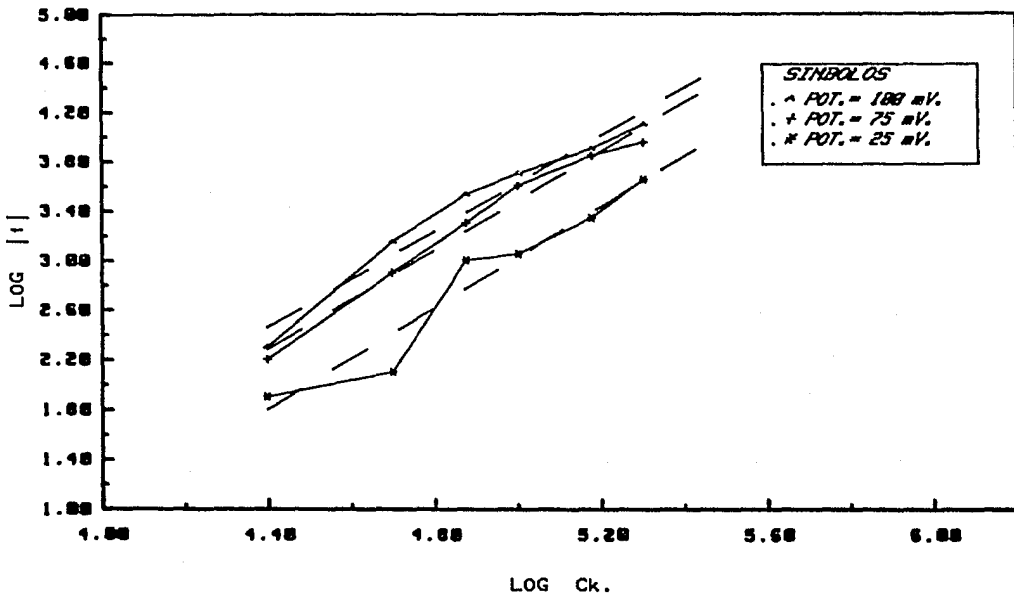


FIGURA 39. ORDEN DE REACCIÓN CATÓDICA.  
ACERO S; DENSIDAD DE CORRIENTE Vs. CONCENTRACIÓN.

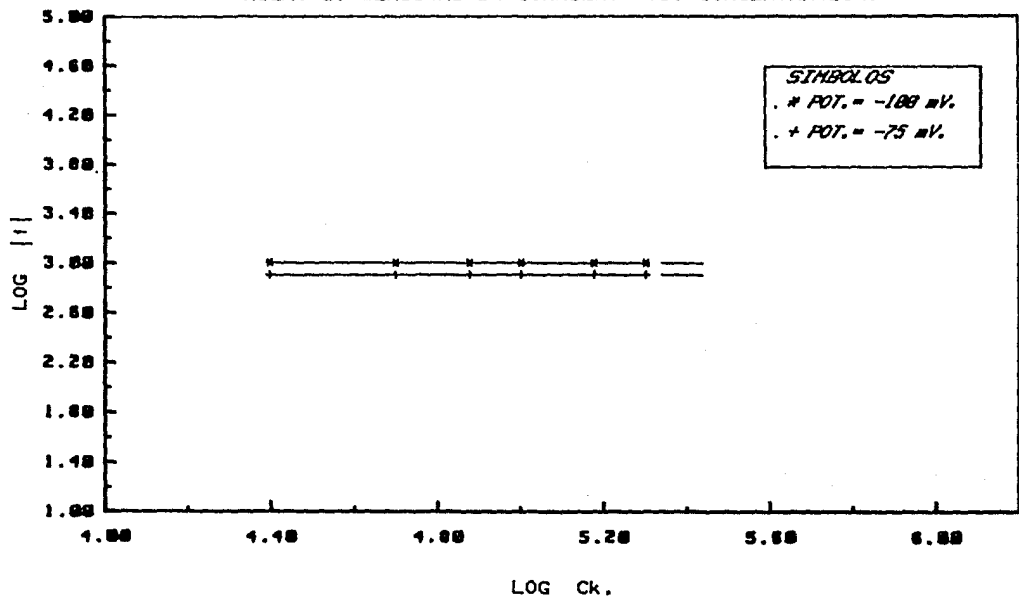
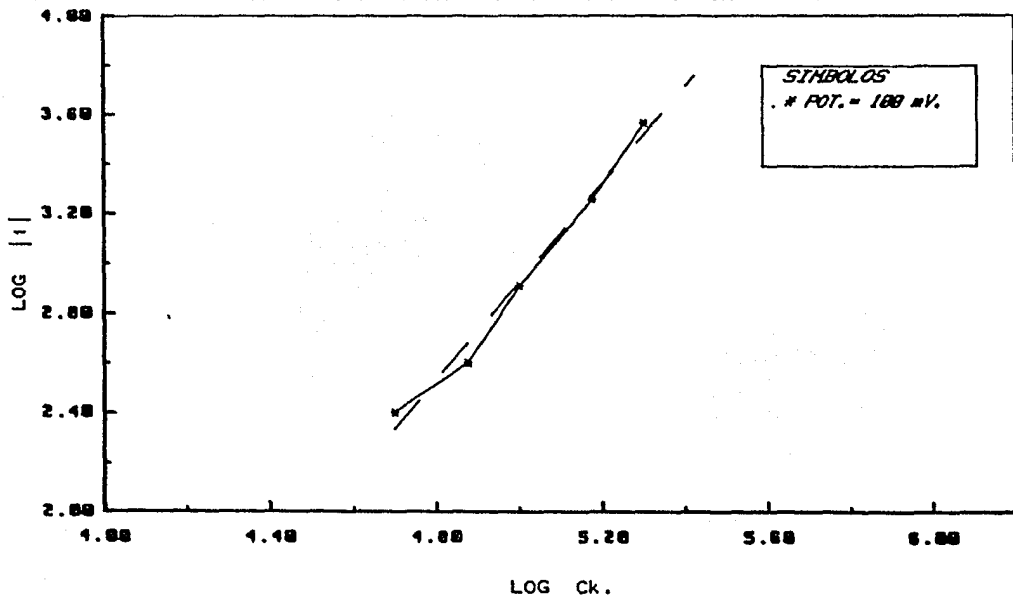


FIGURA 40. ORDEN DE REACCIÓN ANÓDICA.  
ACERO S: DENSIDAD DE CORRIENTE  $V_s$ . CONCENTRACIÓN.



## RESUMEN

Las mediciones gravimétricas realizadas en lodos de perforación geotérmica, nos indican que los aceros pasaron la prueba de corrosión. Los medios inertes en la operación de perforación, no son recomendables ya que favorecen la fragilización por hidrógeno de los aceros usados. El lodo de perforación usado en los campos geotérmicos de México es adecuado para la operación de construcción de pozos. Su mayor efecto en la corrosión es de tipo erosivo. El equipo cumplió con los requisitos de la experimentación, no obstante, se recomienda diseñar un nuevo sello para el agitador, para evitar cualquier tipo de fugas. La congruencia de los datos obtenidos en las mediciones de polarización lineal con los de gravimetría, en los aceros probados, nos da un respaldo más fuerte sobre la funcionalidad del equipo y las técnicas de medición usadas. El equipo no deberá operarse a temperaturas mayores de 200 °C, ni a presiones mayores de 21 kg/cm<sup>2</sup>.

Los ordenes de reacción electroquímica para los aceros S-Humeros y R-Humeros, fueron obtenidos en soluciones de NaCl, quedando de segundo orden con respecto a la reacción anódica e independiente de la concentración para la reacción catódica, se recomienda hacer pruebas con sistemas de multicomponentes para mayor validación del método empleado.

## CONCLUSIONES

1.- El equipo cumplió con los requisitos de la experimentación, ya que los resultados obtenidos fueron los esperados, además, la congruencia de los resultados obtenidos por el método gravimétrico, con los obtenidos mediante la técnica de polarización lineal, es bastante aceptable.

2.- El uso de la técnica de polarización lineal para calcular los órdenes de reacción electroquímica, fue acertado, ya que los resultados concuerdan con lo que se esperaba; sin embargo para validar esto se deben realizar pruebas en soluciones multicomponentes y, de ser posible, a temperaturas superiores a 40 °C.

### BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Fontana, G. Mars and Greene, D. Norbert.  
Corrosion Engineering,  
Mc Graw Hill, 1978.
- 2.- Sanchez Batanero, P.  
Química Electroanalítica. Fundamentos y Aplicaciones.  
Alhambra, Madrid, 1981.
- 3.- Vetter, K. J.  
Electrochemical Kinetics, Theoretical and Experimental  
Aspects, Chapter 3, Academic Press, New York, 1967.
- 4.- Costa, M. J.  
Fundamentos de Electrólisis. Cinética Electroquímica y  
sus Aplicaciones, Alhambra, Madrid, 1980.
- 5.- Barnart, S.  
Electrochemical Techniques for Corrosion, Section 1,  
NACE, 1977.
- 6.- Stern, M. and Geary, A. L.  
J. Electrochem. Soc., 104, 56 (1957).
- 7.- Gardiner, W. C.  
Rates and Mechanisms of Chemical Reactions, Chapter 7,  
W. A. Benjamin, 1969.
- 8.- Vetter, K. J.  
Z. Elektrochem. 59, 596 (1955).
- 9.- Danielson, M. J.  
Application of Linear Polarization Techniques to the  
Measurement of Corrosion Rate in Simulated Geothermal

Brines, Geothermal Scaling and Corrosion, ASTM STP 717.  
L. A. Casper and T. R. Pinchback, Eds., American Society  
for Testing and Materials, 1980, pp.41-56.

10.-ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Section VIII, Division 1, ASME, 1977.

11.-Mc Cabe y Smith.

Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Capítulo 7,  
Editorial Revéte, Barcelona, 1968.

12.-Kern, D. Q.

Procesos de Transferencia de Calor, C.E.C.S.A.  
México, 1974.

13.-Standard Reference Method for Making Potentiostatic and  
Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.  
American Society for Testing Materials, Method G5-72.

APÉNDICE A.

AJUSTE COMPUTARIZADO CORBET



```
1 REM*****
2 REM* AJUSTE COMPUTARIZADO CORNET PARA CALCULO DE PARAMETROS CINE- *
3 REM* TICOS Y VELOCIDADES DE CORROSION, A PARTIR DE DATOS OBTENI-- *
4 REM* DOS EN CELDA AUTOCLAVE POR EL METODO DE POLARIZACION LINEAL. *
5 REM* --PROPIEDAD DEL LAB.ELECTROQUIMICA IIE,CENTRO CERRO PRIETO--- *
6 REM* FECHA:20-OCT-86 REVISARON: RAMON AYALA Y BENJAMIN VALDEZ. *
7 REM* TRABAJO: TESIS PROFESIONAL BENJAMIN VALDEZ SALAS *
8 REM*****
9 DEF FNA(X)=INT(X*100+.5)/100 \ L1=LOG(10)
10 DIM R(65),D(3,65),M(3,4),P(65),I1(65),I2(65),P2(65)
11 J1%="MUESTRA:" \ J2%="TEMP:"
12 J3%="PRESION:" \ J4%="AGITACION:" \ I2%=" oC" \ I3%=" Psid"
13 I4%=" " \ I5%="POZO:" \ I6%="Pot. Equi.:" \ I1%=" mV"
14 PRINT " OPCIONES " \ PRINT
15 PRINT"1.-No se tienen ni se desean guardar los datos"
16 PRINT"2.-No se tienen y se desean guardar los datos"
17 PRINT"3.-Se tienen guardados los datos"
18 INPUT T1% \ PRINT"Se desea imprimir los resultados (Y/N)";
19 INPUT Y% \ IF Y% <> "Y" GOTO 230
20 PRINT J1% \ INPUT J5% \ J5%=LEN(J1%+J5%)
21 PRINT J2%+"(+I2%+)"; \ INPUT J6% \ J6%=LEN(J2%+J6%+I2%)
22 PRINT J3%+"(+I3%+)"; \ INPUT J7%
23 PRINT J4%+"(+I4%+)"; \ INPUT J8%
24 PRINT I5% \ INPUT J9% \ J7%=LEN(I5%+J9%)
25 FOR IZ=1 TO (J6%-J5%) \ J5%=J5%+ " " \ NEXT IZ
26 FOR IZ=1 TO (J6%-J7%) \ J9%=J9%+ " " \ NEXT IZ
27 ON T1% GOTO 490,420,300
28 PRINT "Nombre del archivo "; \ input N%
29 OPEN N% FOR INPUT AS FILE #1
30 INPUT #1,N% \INPUT #1,E1
31 FOR K=1 TO N% \ PRINT "(E,I)=";
32 INPUT #1,E \ INPUT #1,I3
33 PRINT E+E1,"",I3 \ PRINT "Se queda el dato Y/N: " \ input Y1%
34 IF Y1% <> "Y" GO TO 380
35 K1%=K1%+1 \ I1(K1%)=I3 \ P(K1%)=E
36 I2(K)=I3 \ P2(K)=E \ NEXT K
37 N=K1%
38 CLOSE #1
39 GOTO 520
40 PRINT"Nombre del archivo: "; \ input N%
41 OPEN N% FOR OUTPUT AS FILE #1
42 PRINT"DATA PTS. (Min. 3, Max. 40)="; \ INPUT N \ PRINT #1,N
43 PRINT"POT. CORROSION"; \ INPUT E1 \ PRINT #1,E1
44 FOR K=1 TO N \ PRINT"(E,I)="; \ INPUT P(K),I1(K) \ NEXT K
45 GOTO 520
46 PRINT"DATA PTS. min3; " \ input N\
47 PRINT"POTENCIAL DE CORROSION =" \ INPUT E1
48 FOR K=1 TO N \ PRINT"(E,I)="; \ INPUT P(K),I1(K) \ NEXT K
49 V(1)=500 \ V(2)=500 \ V(3)=500
50 I7%=STR%(E1) \ FOR K1=1 TO N-1 \ FOR K2= (K1+1) TO N
51 IF P(K1)>P(K2) GOTO 580
52 GOTO 610
53 X1=P(K1) \ Y1=ABS(I1(K1)) \ P(K1)=P(K2) \ I1(K1)=ABS(I1(K2))
54 P(K2)=X1 \ I1(K2)=Y1 \ NEXT K2 \ NEXT K1
55 IF T1%<>2 GOTO 660
56 FOR K=1 TO N \ PRINT #1,P(K) \ PRINT #1,I1(K) \ NEXT K
57 CLOSE #1
58 GOSUB 830
59 GOSUB 930
60 GOSUB 1000
```

```

690 C=0 \ FOR I=1 TO 3
700 IF ABS(C1(I))-1.0000E-01 THEN C=C+1
710 IF C1(I)>0 THEN IF -C1(I)-V(I)/2 THEN C1(I)=-V(I)/2
720 IF C1(I)>0 THEN IF C1(I)-V(I)*2 THEN C1(I)=2*V(I)
730 V(I)=V(I)+C1(I)
740 IF V(I)>1.00000E+06 THEN B20
750 NEXT I \ IF C=3 THEN GOTO B00
760 GOTO 660
770 REM---- CALCULA Y MUESTRA LOS RESULTADOS-----
780 REM----SI NO ES ASI DA UN MENSAJE VER LINEA B20---
800 PRINT \ PRINT "BC =";FNA(V(1)) \ PRINT "BA=";FNA(V(2))
810 PRINT "ICORR=";FNA(V(3)) \ PRINT"AV. DEV.=";FNA(F1*100/N);"%
811 RS%=STR$(.0116154*FNA(V(3))) \ PRINT"Vel Corr=";R5%; " mm/año"
812 GOTO 1220
820 PRINT"PROGRAMA DIVERGIENDO ----> REVISE SUS DATOS!" GOTO 1620
830 C=0 \ F1=0
840 FOR I=1 TO N \ G1=-SGN(P(I)) \ P=P(I)
850 D(1,I)=G1*V(3)*P*LI*(10^(-P/V(1)))/V(1)^2
860 D(2,I)=G1*V(3)*P*LI*(10^(P/V(2)))/V(2)^2
870 D(3,I)=G1*(10^(-P/V(1))-10^(P/V(2)))
880 R(I)=G1*V(3)*(10^(-P/V(1))-10^(P/V(2)))-I1(I)
890 IF ABS(R(I))<.3 THEN C=C+1
900 F1=F1+ABS(R(I))/I1(I) \ NEXT I
910 IF C=N THEN B00
920 RETURN
930 C=INT(N/3) \ C2=N-3*C
940 FOR K=1 TO 3 \ FOR I=1 TO 3
950 IF C2<>0 GOTO 970
960 E=I*C+1-C \ F=I*C \ GOTO 1030
970 ON C2 GOTO 980,1000
980 E=I*C+1-C \ F=I*C \ IF I=3 THEN F=F+1
990 GOTO 1030
1000 E=I*C+1-C \ F=I*C
1010 IF I=2 THEN F=F+1
1020 IF I=3 THEN E=E+1 \ F=F+2
1030 S1=0 \ S2=0
1040 FOR J=E TO F \ S1=S1+D(K,J) \ S2=S2+R(J) \ NEXT J
1050 M(I,K)=S1 \ M(I,4)=-S2
1060 NEXT I \ NEXT K \ RETURN
1090 D2=M(1,1)*M(2,2)*M(3,3)-M(3,2)*M(2,3))-M(1,2)*(M(2,1)*M(3,3)-M(3,1)*M(2,3))
1100 D1=M(1,3)*(M(2,1)*M(3,2)-M(3,1)*M(2,2))
1120 D=D1+D2
1130 H2=(M(1,4)*(M(2,2)*M(3,3)-M(3,2)*M(2,3))-M(1,2)*(M(2,4)*M(3,3)-M(3,4)*M(2,3))
1140 H1=M(1,3)*(M(2,4)*M(3,2)-M(3,4)*M(2,2))
1145 C1(1)=(H1+H2)/D
1150 H4=(M(1,1)*(M(2,4)*M(3,3)-M(3,4)*M(2,3))-M(1,4)*(M(2,1)*M(3,3)-M(3,1)*M(2,3))
1160 H3=M(1,3)*(M(2,1)*M(3,4)-M(3,1)*M(2,4))
1170 C1(2)=(H3+H4)/D
1180 H6=(M(1,1)*(M(2,2)*M(3,4)-M(3,2)*M(2,4))-M(1,2)*(M(2,1)*M(3,4)-M(3,1)*M(2,4))
1190 H5=M(1,4)*(M(2,1)*M(3,2)-M(3,1)*M(2,2))
1200 C1(3)=(H5+H6)/D \ RETURN
1220 IF Y<>"Y" GOTO 1580
1221 INPUT "NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS ";M$
1222 OPEN M$ FOR OUTPUT AS FILE #1
1230 TX(1)=20 \ TX(2)=3 \ TX(3)=17 \ TX(4)=21
1240 FOR K5=1 TO 4 \ FOR T=1 TO TX(K5) \ K%=K%+" " \ NEXT T \ PRINT #1,K%
1250 K%=" " \ NEXT K5
1255 T2%=" "
1257 REM---FORMATO DE IMPRESION DE RESULTADOS EN EL ARCHIVO-----

```

```

1270 PRINT #1," RESULTADOS DE VELOCIDAD DE CORROSION EN" \ PRINT #1
1280 PRINT #1," FLUIDO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO, B.C." \ PRINT #1
1290 PRINT #1," OBTENIDOS EN CELDA AUTOCLAVE" \ PRINT #1 \ PRINT #1
1300 PRINT #1,"      *+J1+J5+*"      *+J3+J7+J13 \ PRINT #1
1310 PRINT #1,"      *+J2+J6+I2+*"      *+J4+J8+I4 \ PRINT #1
1320 PRINT #1,"      *+I5+J9+*"      *+I6+I7+I1 \ PRINT #1 \ PRINT #1
1330 PRINT #1,I2+*      *+I2+*No*I2+*Pot.*+I2+*      Cor." \ PRINT #1
1340 PRINT #1,I2+*      *+I2+*      *+I2+* mV+I2+*microA/cm2 \ PRINT #1 \ PRINT #1
1350 K1Z=1
1360 FOR K6Z=1 TO N9
1370 K6%=STR$(K6Z) \ I1%=STR$(I2(K6Z)) \ P%=STR$(P2(K6Z))
1380 IF P2(K6Z)=P(K1Z) THEN K1Z=K1Z+1 \ P2%="" \ GOTO 1460
1390 P2%="*"
1460 PRINT #1,"      *+P2+*"      *+K6+*"      *+P+*"      *+I1$
1470 NEXT K6Z
1480 PRINT #1
1490 PRINT #1,"      PARAMETROS DE CORROSION" \ PRINT #1
1500 PRINT #1,"      Obtenidos con el programa CORBET" \ PRINT #1
1510 R1%=STR$(FNA(V(1))) \ R2%=STR$(FNA(V(2))) \ R3%=STR$(FNA(V(3)))
1520 R4%=STR$(FNA(F1*100/N)) \ W=.0116154*FNA(V(3)) \ R5%=STR$(W)
1530 PRINT #1,"      BC="+R1+*"      mV" \ PRINT #1
1540 PRINT #1,"      BA="+R2+*"      mV" \ PRINT #1
1550 PRINT #1,"      Icorr="+R3+*"      microA/cm2" \ PRINT #1
1560 PRINT #1,"      Vel.Corr.="+R5+*"      mm/ano" \ PRINT #1
1570 PRINT #1,"      Des.Pr.="+R4+*"      %" \ PRINT #1
1575 CLOSE #1
1578 REM----DECISION EN CASO QUE DESEE ENCADENARSE AL AJUSTE CORFIT--
1580 PRINT "DESEA ENCADENARSE AL CORFIT.BAS [S/N]";
1590 INPUT Y1$
1600 IF Y1$<>"S" GOTO 1620
1610 CHAIN "CORFIT"
1620 END

```

APÉNDICE D.

AJUSTE COMPUTARIZADO CORFIT.

```

10 REM*****
20 REM*
30 REM* PROGRAMA PARA REALIZAR LOS CALCULOS DE CINETICA Y VELOCIDAD DE *
40 REM* CORROSION EN ACEROS DE USO GEOTERMICO, CON DATOS OBTENIDOS EN - *
50 REM* CELDA AUTOCLAVE. *
60 REM* PROPIEDAD DEL LABORATORIO DE ELECTROQUIMICA IIE CERRO PRIETO BC*
70 REM* IMPLEMENTARON: BENJAMIN VALDEZ S. Y RAMON AYALA DELGADO. *
72 REM* TRABAJO: TESIS PROFESIONAL BENJAMIN VALDEZ SALAS *
76 REM*****C O R F I T*****
80 DISPLAY=CLEAR \ MOVE-CURSOR=(1)
90 DEF FNA(X)=INT(X*100+.5)/100
125 DATA 1,ELECTRODE,100
100 DIM A0(60),A1(60),A2(60),A3(60,3),A4(60),A5(6),A6(10),A7(2),A8(3),A9(4)
110 DIM H2(9),B(3,3),B0(3,3),B1(3),B2(3),B3(4),B4(4),B5(9),B6(4),B7(4),B8(4)
120 DIM B9(4)
130 PRINT* OPCIONES !!!!!!!!!!!!!!! *
140 PRINT*1.-NO SE TIENEN NI SE DESEAN GUARDAR LOS DATOS*
150 PRINT*2.-NO SE TIENEN Y SE DESEAN GUARDAR LOS DATOS*
160 PRINT*3.-SE TIENEN GUARDADOS LOS DATOS*
170 INPUT T1X
180 CX=60
190 ON T1X GO TO 200,210,240
200 PRINT*CUANTOS DATOS (Minimo 3)*; \ INPUT C2X \ GO TO 270
210 PRINT*NOBRE DEL ARCHIVO*; \ INPUT N$
220 OPEN N$ FOR OUTPUT AS FILE #1X
230 PRINT*CUANTOS DATOS (Minimo 3)*; \ INPUT C2X \ PRINT #1X,C2X \ GO TO 270
240 PRINT*NOBRE DEL ARCHIVO*; \ INPUT N$
250 OPEN N$ FOR INPUT AS FILE #1X
260 INPUT #1X,C2X \ PRINT *CUANTOS DATOS (Minimo 3)*;C2X
270 COX=30
280 A=LOG(10) \ D0=-1.37773E+37
290 A7$(1)="POLARIZACION" \ A7$(2)="CORRIENTE" *
300 B6$(1)=" BA=" \ B6$(2)=" BC=" \ B6$(3)=" RP="
310 B6$(4)=" Icorr=" \ B6$(5)=" Vel.corr=" \ B7$(1)="mV"
320 B7$(2)=" mV" \ B7$(3)=" mV/mA" \ B7$(4)=" microA/cm2" \ B7$(5)=" mm/ano"
330 B8$(1)=" B8$(2)=" B8$(3)=" B8$(4)=" B8$(5)="
340 READ C1%,C3%,C4X
350 PRINT C1%,C2%,C3%,C4X
360 C8=-1.000E+37 \ C9=-1.000E+37 \ DX=0
370 IF CX>C2X THEN 410
380 PRINT*EL NUMERO DE PUNTOS EXCEDE LA DIMENSION*
390 PRINT*DE LOS ARREGLOS O ES MENOR QUE 3 *
400 GO TO 2080
410 IF C2X>2 THEN 430
420 GO TO 380
430 IF C1%="I" THEN 460
440 PRINT*NO EXISTE LA LETRA I EN LA COLUMNA 1*
450 GO TO 2080
460 FOR KX=1 TO CX
470 A1(KX)=D0 \ A0(KX)=B0
480 NEXT KX
490 JSX=C2X
500 CSX=0 \ N6X=0
510 ON T1X GO TO 520,530,540
520 PRINT*POTENCIAL DE CORROSION*; \ INPUT E \ GO TO 550
530 PRINT*POTENCIAL DE CORROSION*; \ INPUT E \ PRINT #1X,E \ GO TO 550
540 PRINT*POTENCIAL DE CORROSION*; \ INPUT #1X,E \ PRINT E
550 C6X=B \ C4X=10
560 ON T1X GO TO 570,620,670

```

```
80 N6Z=N6Z+1 \ IF C2Z<N6Z GO TO 720
90 PRINT*(E,I)="; \ INPUT A5(J1Z),A5(J1Z+1) \ A5(J1Z)=A5(J1Z)-E
00 NEXT J1Z
10 GO TO 720
20 FOR J1Z=1 TO 6 STEP 2
30 N6Z=N6Z+1 \ IF C2Z<N6Z GO TO 720
40 PRINT*(E,I)="; \ INPUT A5(J1Z),A5(J1Z+1)
41 REM PRINT #1Z,A5(J1Z) \ REM PRINT #1Z,A5(J1Z+1) \ A5(J1Z)=A5(J1Z)-E
50 NEXT J1Z
60 GO TO 720
70 FOR J1Z=1 TO 6 STEP 2
80 N6Z=N6Z+1 \ IF C2Z<N6Z GO TO 720
90 INPUT #1Z,A5(J1Z) \ INPUT #1Z,A5(J1Z+1)
00 PRINT*(E,I)=";A5(J1Z)+E;";A5(J1Z+1)
10 NEXT J1Z
20 FOR KZ=1 TO 3
30 CSZ=CSZ+1
40 IF C2Z<CSZ THEN 080
50 A0(CSZ)=A5(2*KZ-1) \ C7Z=1
60 IF CB<A0(CSZ) THEN 770
770 CB=A0(CSZ)
780 A1(CSZ)=A5(2*KZ)
790 C7Z=2
800 IF C9<A1(CSZ) THEN 810
810 C9=A1(CSZ)
920 IF A0(CSZ)*A1(CSZ)<>0 THEN 860
30 PRINT*EL PUNTO*;CSZ;*VA SER EXCLUIDO POR QUE NO SE ACEPTA CERO*
40 CSZ=CSZ-1 \ C2Z=C2Z-1
50 IF C2Z<3 THEN 380
60 NEXT KZ
70 IF CSZ<C2Z THEN 550
80 IF C6Z=8 THEN 910
90 IF C6Z=9 THEN 910
00 C6Z=9
10 FOR KZ=1 TO C2Z
20 IF A0(KZ)<>D0 THEN 940
30 GO TO 960
40 IF A1(KZ)<>D0 THEN 960
50 GO TO 930
60 IF KZ=1 THEN 990
70 IF A0(KZ)<A0(KZ-1) THEN 990
80 IF A1(KZ)>A1(KZ-1) THEN 990
90 NEXT KZ
95 REM***** MUESTRA LOS DATOS GUARDADOS EN ARCHIVO *****
000 PRINT* POLARIZACION (MV) CORRIENTE (MICROAMPS) *
010 FOR K1Z=1 TO C2Z-1
020 FOR K2Z=(K1Z+1) TO C2Z
1030 IF A0(K1Z)>A0(K2Z) GO TO 1050
1040 GO TO 1070
1050 X1=A0(K1Z) \ Y1=ABS(A1(K1Z))
1060 A0(K1Z)=A0(K2Z) \ A1(K1Z)=ABS(A1(K2Z)) \ A0(K2Z)=X1 \ A1(K2Z)=Y1
1070 NEXT K2Z
1080 NEXT K1Z
1090 FOR KZ=1 TO C2Z
1100 PRINT KZ,A0(KZ),A1(KZ)
1110 IF T1Z<>2 GO TO 1130
1120 PRINT #1Z,A0(KZ) \ PRINT #1Z,A1(KZ)
1130 A1(KZ)=SGN(A0(KZ))*ABS(A1(KZ))
1140 NEXT KZ
```

```
1160 PRINT'SE ENCONTRO UN ERROR,SE TERMINA ESTE TRABAJO'
1170 GO TO 2080
1180 FOR KZ=1 TO C2Z
1190 A0(KZ)=A*A0(KZ) \ A3(KZ,1)=1 \ A3(KZ,2)=A0(KZ)
1200 NEXT KZ
1210 AB(1)=0 \ AB(2)=0 \ AB(3)=.01 \ IZ=0
1220 FOR KZ=1 TO C2Z
1230 A2(KZ)=A0(KZ)*AB(3)
1240 IF A2(KZ)=0 THEN A2(KZ)=1^-20
1250 GOSUB 3030
1260 IF G4<>0 THEN 1280
1270 GOTO 2080
1280 G9=.5*(G4-1/G4)
1290 IF ABS(A2(KZ))<1.000E-12 THEN G9=A2(KZ)
1300 IF G9<>0 THEN 1320
1310 GO TO 2080
1320 H1=(EXP(A2(KZ))-EXP(-A2(KZ)))/(EXP(A2(KZ))+EXP(-A2(KZ)))
1330 IF H1<>0 THEN 1350
1340 GO TO 2080
1350 IF AB(3)<>0 THEN 1370
1360 GO TO 2080
1370 A3(KZ,3)=(A2(KZ)/H1-1)/AB(3)
1380 A4(KZ)=- (AB(1)+AB(2)*A0(KZ)) \ A4(KZ)=A4(KZ)+LOG(A1(KZ)*AB(3)/G9)
1390 NEXT KZ
1400 FOR D4Z=1 TO 3
1410 FOR D5Z=1 TO 3
1420 B(D4Z,D5Z)=0
1430 FOR KZ=1 TO C2Z
1440 B(D4Z,D5Z)=B(D4Z,D5Z)+A3(KZ,D4Z)*A3(KZ,D5Z)
1450 NEXT KZ
1460 NEXT D5Z
1470 NEXT D4Z
1480 B1=0
1490 GOSUB 2090
1500 FOR D4Z=1 TO 3
1510 FOR D5Z=1 TO 3
1520 B0(D4Z,D5Z)=B(D4Z,D5Z)
1530 NEXT D5Z
1540 NEXT D4Z
1550 B1(1)=0 \ B1(2)=0 \ B1(3)=0
1560 FOR KZ=1 TO C2Z
1570 B1(1)=B1(1)+A4(KZ)
1580 B1(2)=B1(2)+A4(KZ)*A0(KZ)
1590 B1(3)=B1(3)+A4(KZ)*A3(KZ,3)
1600 NEXT KZ
1610 FOR D4Z=1 TO 3
1620 B2(D4Z)=0
1630 FOR D5Z=1 TO 3
1640 B2(D4Z)=B2(D4Z)+B0(D4Z,D5Z)*B1(D5Z)
1650 NEXT D5Z
1660 NEXT D4Z
1670 D6=ABS(B2(1))
1680 FOR D4Z=2 TO 3
1690 D7=ABS(B2(D4Z))
1700 IF D7<=D6 THEN 1730
1710 D6=D7
1720 NEXT D4Z
1730 FOR D4Z=1 TO 3
1740 AB(D4Z)=AB(D4Z)+B2(D4Z)
```

```
1760 IX=IX+1
1770 IF IX>C0Z THEN 2060
1780 IF D6>1.000E-06 THEN 1220
1790 E7(2)=1/(AB(3)-AB(2)) \ E7(1)=1/(AB(3)+AB(2))
1800 E7(4)=.5*(EXP(AB(1)))/AB(3) \ E7(3)=1000/(A*EXP(AB(1)))
1810 B3(3)=E7(3)*SQR(B0(1,1))
1820 B3(4)=E7(4)*SQR(B0(1,1))+(-2*B0(1,3)+B0(3,3)/AB(3))/AB(3)
1830 B3(1)=E7(1)^2*SQR(B0(2,2)+B0(2,3)+B0(3,2)+B0(3,3))
1840 B3(2)=E7(2)^2*SQR(B0(2,2)-B0(2,3)-B0(3,2)+B0(3,3))
1850 DBZ=C2Z-3 \ D9=0
1860 FOR I8Z=1 TO C2Z
1870 E=0
1880 FOR I9Z=1 TO 3
1890 E=E+A3(I8Z,I9Z)*B2(I9Z)
1900 NEXT I9Z
1910 D9=D9+(A4(I8Z)-E)^2
1920 NEXT I8Z
1930 E0=SQR(D9/DBZ)
1940 FOR I9Z=1 TO 4
1950 B4(I9Z)=E0*B3(I9Z)
1960 NEXT I9Z
1970 FOR E1Z=1 TO 4
1980 PRINT
1990 E7(E1Z)=FNA(E7(E1Z)) \ B4(E1Z)=FNA(B4(E1Z))
2000 PRINT
2010 PRINT B6$(E1Z); " = " ; E7(E1Z); " + " ; B4(E1Z); B7$(E1Z); B8$(E1Z)
2020 NEXT E1Z
2030 R9$=STR$(.0116154*E7(4)) \ R0$=STR$(.0116154*B4(4))
2031 PRINT B6$(5); " = " ; R9$; " + " ; R0$; B7$(5); B8$(5)
2032 PRINT "QUIERE IMPRIMIR SI/NO?" \ INPUT M$
2033 IF M$<>"SI" THEN 2050
2034 PRINT "DE NOMBRE ARCHIVO DE RESULTADOS="; \ INPUT Z$
2035 OPEN Z$ FOR OUTPUT AS FILE #1Z
2036 REM***** SE ABRE UN ARCHIVO PARA RESULTADOS *****
2037 PRINT #1Z,"!!!!!!!!!! RESULTADOS DE AJUSTE CORFIT !!!!!!!!!!!!!!!"
2038 PRINT #1Z
2039 R1$=STR$(E7(1)) \ R2$=STR$(E7(2)) \ R3$=STR$(E7(3)) \ R4$=STR$(E7(4))
2040 R5$=STR$(B4(1)) \ R6$=STR$(B4(2)) \ R7$=STR$(B4(3)) \ R8$=STR$(B4(4))
2041 PRINT #1Z,B6$(2)+R2$+"+"+R6$+B7$(2)+B8$(2)
2042 PRINT #1Z
2043 PRINT #1Z,B6$(1)+R1$+"+"+R5$+B7$(1)+B8$(1)
2044 PRINT #1Z
2045 PRINT #1Z,B6$(4)+R4$+"+"+R8$+B7$(4)+B8$(4)
2046 PRINT #1Z
2047 PRINT #1Z,B6$(5)+R9$+"+"+R0$+B7$(5)+B8$(5)
2048 PRINT #1Z
2049 PRINT #1Z,B6$(3)+R3$+"+"+R7$+B7$(3)+B8$(3)
2050 GO TO 2080
2060 PRINT "NO SE ENCONTRO SOLUCION DESPUES DE";C0Z;" ITERACIONES"
2070 IF C6Z=8 THEN 340
2080 GO TO 3340
2090 E3Z=3
2100 G1Z=3
2110 G0Z=-3
2120 H2(1)=B(1,1) \ H2(2)=B(1,2) \ H2(3)=B(1,3) \ H2(4)=B(2,1) \ H2(5)=B(2,2)
2130 H2(6)=B(2,3) \ H2(7)=B(3,1) \ H2(8)=B(3,2) \ H2(9)=B(3,3)
2140 GZ=G1Z \ EBZ=E3Z \ F9Z=ABS(G0Z) \ D3Z=1 \ FZ=1
2150 IF D1<0 THEN FZ=0
2160 D1=1
```



```
2180 FOR IX=1 TO GX
2190 G7Z(IX)=IX
2200 NEXT IX
2210 IF G0Z<0 THEN 2230
2220 GO TO 2340
2230 F9Z=GZ
2240 E6Z=0
2250 FOR JZ=1 TO GX
2260 E5Z=E6Z
2270 FOR IX=1 TO GX
2280 E5Z=E5Z+1 \ B5(E5Z)=0
2290 NEXT IX
2300 E5Z=E6Z+JZ \ B5(E5Z)=1 \ E6Z=E6Z+E8Z
2310 NEXT JZ
2320 FOR K1=1 TO GX
2330 NEXT K1
2340 FOR LZ=1 TO GX
2350 F8Z=LX+1 \ F7Z=E0Z*(LZ-1) \ F6Z=LZ*E8Z
2360 FOR IX=LZ TO GX
2370 E9=0 \ E5Z=IX+F7Z \ E6Z=E5Z
2380 FOR JZ=LX TO GX
2390 IF E9>=ABS(H2(E5Z)) THEN 2410
2400 G5=H2(E5Z) \ E9=ABS(G5) \ F3Z=JZ \ E5Z=E5Z+E8Z
2410 NEXT JZ
2420 IF G5=0 THEN 2910
2430 D1=D1*G5 \ N2Z=LOG(ABS(D1))/.693148 \ G2Z=G2Z+N2Z \ D1=D1/2^N2Z
2440 FOR JZ=LZ TO GX
2450 H2(E6Z)=H2(E6Z)/G5 \ E6Z=E6Z+E8Z
2460 NEXT JZ
2470 IF FZ=0 THEN 2520
2480 E5Z=IX
2490 FOR JZ=1 TO F9Z
2500 B5(E5Z)=B5(E5Z)/G5 \ E5Z=E5Z+E8Z
2510 NEXT JZ
2520 IF IX=LZ THEN F4Z=F3Z
2530 NEXT IX
2540 IF F4Z=LZ THEN 2650
2550 IF FZ=0 THEN 2570
2560 E4Z=G7Z(LZ) \ G7Z(LZ)=G7Z(F4Z) \ G7Z(F4Z)=E4Z
2570 E7Z=F6Z-E8Z
2580 E4Z=E8Z*F4Z-E8Z
2590 FOR IX=1 TO GX
2600 E5Z=E7Z+IX \ E6Z=E4Z+IX \ G6=H2(E5Z) \ H2(E5Z)=H2(E6Z) \ H2(E6Z)=G6
2610 NEXT IX
2620 B1=-B1
2630 E7Z=F6Z-E8Z
2640 FOR IX=1 TO GX
2650 F1Z=E7Z+IX \ G5=H2(F1Z)
2660 IF IX=LZ THEN 2800
2670 IF G5=0 THEN 2800
2680 E5Z=LZ \ E6Z=IX
2690 FOR JZ=1 TO GX
2700 IF JZ<F8Z THEN 2740
2710 G6=G5*H2(E5Z)
2720 H2(E6Z)=H2(E6Z)-G6
2730 IF ABS(H2(E6Z))<ABS(G6*2.000E-12) THEN H2(E6Z)=0
2740 IF FZ=0 THEN 2770
2750 IF JZ>F9Z THEN 2770
2760 B5(E6Z)=B5(E6Z)-G5*B5(E5Z)
```

```
2780 E6Z=E6Z+E8Z
2790 NEXT JZ
2800 NEXT IZ
2810 NEXT LZ
2820 IF FZ=0 THEN 2940
2830 FOR LZ=1 TO GZ
2840 E5Z=G7Z(LZ)
2850 E6Z=LZ
2860 FOR JZ=1 TO F9Z
2870 H2(E5Z)=B5(E6Z) \ E5Z=E5Z+E8Z \ E6Z=E6Z+E8Z
2880 NEXT JZ
2890 NEXT LZ
2900 GO TO 2940
2910 D1=-0
2920 D3Z=3
2930 GO TO 3150
2940 IF G2Z>=-970 THEN 2960
2950 GO TO 2970
2960 IF G2Z<=1067 THEN 3010
2970 D3Z=2 \ G6=(G2Z*.693147)/2.30258 \ N2Z=G6 \ G6=G6-N2Z \ D1=D1*10^G6
2980 IF FZ<>0 GO TO 3150
2990 PRINT*EL VALOR DE LA DETERMINANTE =';D1;' E ';N2Z
3000 GO TO 3150
3010 D1=D1*2^G2Z
3020 GO TO 3150
3030 W1=100
3040 W2=ABS(A2(KZ))
3050 W3=A2(KZ)
3060 IF W1<W2 THEN 3120
3070 IF W2<W3 THEN 3100
3080 W9=W3
3090 GO TO 3130
3100 W9=W2
3110 GO TO 3130
3120 IF W1<W3 THEN W9=W1
3130 G4=EXP(W9)
3140 RETURN
3150 B(1,1)=H2(1) \ B(1,2)=H2(2) \ B(1,3)=H2(3) \ B(2,1)=H2(4) \ B(2,2)=H2(5)
3160 B(2,3)=H2(6) \ B(3,1)=H2(7) \ B(3,2)=H2(8) \ B(3,3)=H2(9)
3170 RETURN
3340 END
```

APÉNDICE C.  
PROGRAMA VELCOR.

```
5 REM *****
8 REM * INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS CENTRO CERRO PRIETO B.C. **
10 REM ***** PROGRAMA PARA CALCULAR VELOCIDADES DE CORROSION *****
20 REM ***** EN ACEROS POR EL METODO DE GRAVIMETRIA *****
30 REM ***** TESIS PROFESIONAL - BENJAMIN VALDEZ SALAS *****
45 REM *****
50 DIM A(60),B(60),C(60),P(60),Q(60)
60 PRINT "LOS DATOS A,B,C,SON EN CENTIMETROS"
70 PRINT "ESTAN ALMACENADOS LOS DATOS (SI/NO)"
80 INPUT Y$
90 PRINT "NOMBRE DEL ARCHIVO QUE DESEA UTILIZAR"
100 INPUT N$
110 PRINT "TIPO DE ACERO"
120 INPUT J$
130 PRINT"TEMPERATURA (grados C)"
140 INPUT H$
150 PRINT "ATMOSFERA"
160 INPUT W$
170 PRINT"PRESION (Kg/cm2)"
180 INPUT L$
190 IF Y$<>"NO" GO TO 1260
200 OPEN N$ FOR OUTPUT AS FILE #12
210 PRINT"# DE CUFONES"
220 INPUT N2
230 PRINT"TIEMPO DE EXPOSICION (HORAS)"
240 INPUT T
250 PRINT #12
260 FOR IZ=1 TO N2
270 PRINT "No.;"TAB(5);"ALTURA";TAB(14);"BASE";TAB(23);"ESPESOR";TAB(38);
280 PRINT"PESO";TAB(50);"PESO"
290 PRINT TAB(6);"(cm)";TAB(14);"(cm)";TAB(24);"(cm)";TAB(33);"ORIGINAL( g)";
300 PRINT TAB(48);"FINAL (g)"
310 PRINT IZ
320 INPUT A(IZ),B(IZ),C(IZ),Q(IZ),P(IZ)
330 NEXT IZ
340 PRINT"LOS DATOS SON LOS SIGUIENTES"
350 PRINT
360 PRINT "No.;"TAB(5);"ALTURA";TAB(14);"BASE";TAB(23);"ESPESOR";
370 PRINT TAB(38);"PESO";TAB(50);"PESO"
380 PRINT TAB(6);"(cm)";TAB(14);"(cm)";TAB(24);"(cm)";TAB(33);"ORIGINAL( g)";
390 PRINT TAB(48);"FINAL (g)"
400 FOR IZ=1 TO N2
410 PRINT IZ;TAB(5);A(IZ);TAB(13);B(IZ);TAB(23);C(IZ);TAB(37);Q(IZ);
420 PRINT TAB(49);P(IZ)
430 NEXT IZ
440 PRINT
450 PRINT"DESEA CORREGIR ALGUN DATO (SI/NO)"
460 INPUT Y1$
470 IF Y1$<>"SI" GO TO 530
480 PRINT"QUE # DE DATO DESEA CAMBIAR"
490 INPUT JX
500 PRINT"NUEVOS VALORES DE ALTURA,BASE,ESPESOR,PESO ORIGINAL,PESO FINAL"
510 INPUT A(JX),B(JX),C(JX),Q(JX),P(JX)
520 GOTO 450
530 PRINT
540 P=0
550 V=0
560 PRINT"RESULTADOS DE VELOCIDADES DE CORROSION"
570 PRINT "No.;"TAB(5);"VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)";TAB(42);
```

```

590 PRINT
600 FOR IZ=1 TO NZ
610 S=(2*((A(IZ)*B(IZ))+C(IZ)*C(IZ))+A(IZ)*E(IZ)))-2.5335
620 REM----->LOS VALORES A,B,C SON LAS DIMENSIONES DEL COPON-----
630 REM----->EL VALOR 2.5335 ES EL AREA OCUPADA POR AISLANTES-----
640 L=R(IZ)-P(IZ)
650 F1=(3.45000E+06*L)/(S*T*7.06)
660 V1=(87600*L)/(S*T*7.06)
670 F=PI*F1
680 V=V1*V1
690 PRINT IZ;TAB(14);F1;TAB(40);V1
700 NEXT IZ
710 PRINT #1Z,*          CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE
720 PRINT #1Z,*          USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION
730 PRINT #1Z,*          DE POZOS GEOTERMICOS
740 PRINT #1Z,*          ACERO:";J$
750 PRINT #1Z,*          TEMPERATURA:";H$;" C"
760 PRINT #1Z,*          ATMSHOSFERA :";W$
770 PRINT #1Z,*          PRESION      :";L$;" Kg/cm2"
780 PRINT #1Z,*          TIEMPO      :";T;" Horas"
790 PRINT #1Z,*
800 PRINT #1Z,*
810 PRINT #1Z,*
820 PRINT #1Z,*
830 PRINT #1Z,*
840 PRINT #1Z,*
850 PRINT #1Z,*
860 PRINT #1Z,*
870 PRINT #1Z,*
880 PRINT #1Z,TAB(9);"No. ";TAB(14);"ALTURA";TAB(23);"BASE";TAB(32);"ESPESOR";
890 PRINT #1Z,TAB(47);"PESO";TAB(59);"PESO"
900 PRINT #1Z,*
910 PRINT #1Z,TAB(15);"(cm)";TAB(23);"(cm)";TAB(33);"(cm)";TAB(42);
920 PRINT #1Z,"ORIGINAL(ϑ)";TAB(57);"FINAL(ϑ)"
930 PRINT #1Z,*
940 FOR IZ=1 TO NZ
950 PRINT #1Z,TAB(9);IZ;TAB(14);A(IZ);TAB(23);B(IZ);TAB(33);C(IZ);TAB(43);R(IZ);
960 PRINT #1Z,TAB(59);F(IZ)
970 PRINT #1Z,*
980 NEXT IZ
990 PRINT #1Z,*
1000 PRINT #1Z,TAB(9);"VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)  VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
1010 PRINT #1Z,*
1020 FOR IZ=1 TO NZ
1030 L=R(IZ)-P(IZ)
1040 F1=(3.45000E+06*L)/(S*T*7.06)
1050 V1=(87600*L)/(S*T*7.06)
1060 PRINT #1Z,TAB(15);F1;TAB(45);V1
1070 PRINT #1Z,*
1080 NEXT IZ
1090 MO=F/NZ
1100 M1=V/NZ
1110 PRINT #1Z,*
1120 PRINT"VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION(mpy)=";MO
1130 PRINT"VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION(mm/año)=";M1
1140 PRINT #1Z,TAB(12);"VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)=";MO
1150 PRINT #1Z,*
1160 PRINT #1Z,TAB(12);"VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)=";M1
1170 CLOSE #1Z

```



APÉNDICE D.

RESULTADOS OBTENIDOS DE CORRER EL PROGRAMA MELCOR  
ALIMENTANDO DATOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACEROS-HUMEROS GRADO: "E"

TEMPERATURA: 125 C

ATMOSFERA : NITROGENO

PRESION : 4 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.855	2.08	.504	22.8705	22.8607
2	2.955	2.195	.499	23.3639	23.3502
3	2.851	2.571	.61	31.5308	31.5177

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
6.00862	.152567
7.71920	.196000
6.13606	.155803

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 6.6213

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = .168123



CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:150 C

ATSMOSFERA :NITROGENO

PRESION : 7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	2.924	2.24	.557	26.4249	26.41
2	2.972	1.948	.475	20.0687	20.0563
3	2.975	2.445	.429	22.718	22.708

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
7.84917	.199301
6.53294	.16588
5.26795	.13376

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 7.07296

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .179592

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LUDOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:200 C

ATSMOSFERA :NITROGENO

PRESION :20 Kg/cm2

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESFESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.844	2.12	.545	23.3717	23.3515
2	2.901	2.205	.53	24.7105	24.6901
3	2.93	2.286	.499	23.6812	23.6633

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
11.0365	.280231
11.1459	.283009
9.77976	.248321

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 11.0267

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .279983

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:°E°

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION : 4 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPEJOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.911	2.502	.441	23.6312	23.6281
2	2.719	2.195	.545	23.3149	23.3135
3	2.959	2.305	.558	27.6035	27.5981

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)      VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)

.801596

.203536E-01

.416352

.105717E-01

1.39564

.354372E-01

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= .873975

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .221914E-01

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:150 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION :7 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.07	2.705	.544	33.205	33.1964
2	2.78	2.615	.539	28.1734	28.1664
3	3.095	2.55	.522	30.2917	30.2805

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)      VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)

1.97225

.050078

1.60491

.407508E-01

2.56786

.652013E-01

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 2.04884

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .520228E-01

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:\*E\*

TEMPERATURA:200 C

ATSMOSFERA :NITROGENO

PRESION :20 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.065	2.705	.535	32.3982	32.3867
2	2.782	2.615	.535	27.7805	27.7637
3	3.087	2.545	.522	29.8108	29.7939

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
2.49643	.633875E-01
4.14477	.105241
3.8923	.988305E-01

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 3.51116

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .089153

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LUDOS DE PERFORACION  
DE FOZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION :4 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPEJOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.501	2.235	.662	26.4352	26.4296
2	2.502	2.155	.695	26.4715	26.4642
3	2.665	2.395	.682	31.115	31.1064

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)      VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)

3.29570      .836821E-01

4.35330      .110537

4.40642      .111885

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 4.01849

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .102035

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LIOJOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:150 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION :7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.88	1.931	.651	26.1231	26.1133
2	2.785	2.131	.645	27.7008	27.689
3	2.525	2.141	.711	27.4212	27.4082

VELOCIDAD DE CORROSION (MPY)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
5.76857	.146472
6.94631	.176376
7.6525	.194307

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (MPY)= 6.68411

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .169718

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS

TEMPERATURA:200 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION :20 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.25	2.2	.566	19.7833	19.7675
2	2.54	2.13	.656	25.4194	25.4035
3	2.261	2.432	.671	31.0223	31.0086

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
11.1825	.283938
9.45516	.240079
8.14736	.206872

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 9.67111

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .245562



CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION :4 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.503	2.386	.679	29.4762	29.4725
2	2.25	2.14	.465	15.8184	15.813
3	2.305	1.83	.65	19.611	19.6071

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
1.01198	.256943E-01
2.10184	.533684E-01
1.51802	.385444E-01

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 1.54334

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .391874E-01

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:150 C

ATSMOSFERA :NITROGENO

PRESION :7 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.15	2.8	.58	37.4239	37.4139
2	3.11	2.685	.55	33.5869	33.5755
3	3.025	2.585	.645	36.9036	36.8934

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)      VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)

1.99480      .506505E-01

2.4594      .624474E-01

2.20095      .055885

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 2.21044

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .056126

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:200 C

ATMOSFERA :NITROGENO

PRESION :20 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	2.615	2.43	.666	30.6074	30.5976
2	3.143	2.8	.56	36.4259	36.4073
3	3.025	2.59	.64	36.2382	36.2204

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
2.54597	.064645
3.75830	.954281
3.84423	.09761

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 3.38283

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .858946E-01

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :OXIGENO

PRESION :4 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

Nó.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.91	2.241	.557	26.3127	26.2531
2	2.976	1.942	.475	19.9343	19.8694
3	2.975	2.44	.426	22.5569	22.4673

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
32.2025	.817671
41.5939	1.05512
47.3887	1.20326

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 40.3952

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 1.02569

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS

ACERO: S-HUMEROS GRADO: \*E\*

TEMPERATURA: 150 C

ATMOSFERA : OXIGENO

PRESION : 7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(г)	PESO FINAL(г)
1	3.18	3.132	.599	42.2019	41.7783
2	3.332	2.242	.607	33.2685	32.911
3	3.317	3.025	.48	34.6096	34.4015

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
149.056	3.78473
163.679	4.15601
77.3336	1.9636

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 130.023

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = 3.30145

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LOS OZOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:200 C

ATMOSFERA :OXIGENO

PRESION :20 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	3.058	2.692	.502	31.904	31.7944
2	2.769	2.601	.51	27.2197	27.1144
3	3.081	2.54	.505	29.3182	29.1915

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
48.8301	1.23986
53.2038	1.35295
59.1772	1.50259

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 53.7637

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 1.36513

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATSMOSFERA :OXIGENO

PRESION :4 Ks/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	3.727	2.4	.577	38.2576	37.9444
2	3.757	2.622	.501	37.1667	36.806
3	3.25	2.695	.5	30.0346	29.4552

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
61.2987	1.55645
67.1996	1.70628
121.514	3.0854

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 83.3374

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 2.11604

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO: S-HUMEROS GRADO: "E"

TEMPERATURA: 150 C

ATMOSFERA : OXIGENO

PRESION : 7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.105	2.344	.56	28.8342	28.5116
2	3.223	2.38	.561	31.8014	31.4132
3	3.291	2.586	.541	32.4877	31.5837

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
78.1207	1.98359
89.2363	2.26583
190.762	4.8437

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 119.373

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = 3.03104



CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO: \*E\*

TEMPERATURA: 200 C

ATMOSFERA : OXIGENO

PRESION : 20 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA	BASE	ESPESOR	PESO	PESO
	(cm)	(cm)	(cm)	ORIGINAL(g)	FINAL(g)
1	3.482	2.174	.556	29.8291	29.7007
2	3.014	2.42	.578	30.1911	30.0269
3	3.61	2.175	.51	28.8916	28.6563

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
29.8263	.75732
39.3066	.99804
54.1567	1.37511

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 41.0964

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = 1.04349

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LUDIOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATSMOSFERA :OXIGENO

FRESION : 4 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	2.615	2.43	.665	30.434	30.3751
2	3.136	2.8	.56	36.1991	35.8372
3	3.025	2.59	.64	36.0807	35.9743

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
30.6225	.777545
146.564	3.72146
45.9594	1.16697

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 74.382

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 1.88866

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LUDOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:150 C

ATMOSFERA :OXIGENO

PRESION :7 Kg/cm2

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.02	2.459	.616	33.2484	33.0858
2	3.226	2.425	.56	31.9531	31.8128
3	2.956	2.736	.539	31.6572	31.4224

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
74.855	1.90068
63.3508	1.60850
104.22	2.64627

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 80.8086

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 2.05184

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODO DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO: "E"

TEMPERATURA: 200 C  
ATMOSFERA : OXIGENO  
PRESION : 20 Kg/cm<sup>2</sup>  
TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.516	2.151	.685	26.386	26.3177
2	2.661	2.386	.684	31.0587	30.9664
3	3.114	2.676	.546	33.1719	32.9885

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
40.862	1.03678
47.4701	1.20533
78.7095	1.99854

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 55.6705

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = 1.41355

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :OXIGENO

PRESION :4 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPEJOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.162	2.338	.841	45.7875	45.5108
2	3.574	2.151	.853	48.2618	47.8694
3	3.234	2.557	.5	26.0282	25.6382

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
56.4813	1.43413
76.1814	1.93434
86.4727	2.19566

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 73.0451

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 1.85471

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:150 C

ATMOSFERA :OXIGENO

PRESION :7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.436	2.69	.55	37.604	36.963
2	3.241	2.665	.48	30.6707	30.0389
3	2.917	2.9	.381	22.2389	21.619

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
123.995	3.14040
135.068	3.44986
144.595	3.67145

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 134.819

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= 3.42323

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS

ACERO:R-HUMEROS GRADO: \*E\*

TEMPERATURA:200 C

ATMOSFERA :OXIGENO

PRESION :20 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.397	2.234	.954	52.9025	52.752
2	3.219	2.24	.94	49.3717	49.2102
3	3.271	2.3	1.017	55.5331	55.2974

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
28.2443	.717173
32.0024	.812582
43.3876	1.10167

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 34.5449

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .877141

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO: S-HUMEROS GRABO: "E"

TEMPERATURA: 125 C  
ATMOSFERA : AIRE  
PRESION : 14 Kg/cm<sup>2</sup>  
TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL (g)	PESO FINAL (g)
1	2.915	2.518	.432	22.9653	22.9336
2	2.897	2.19	.53	24.5332	24.5057
3	2.836	2.52	.594	30.1722	30.1459

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)

16.5246

15.5274

12.7389

VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)

.419582

.394261

.323457

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 14.9303

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = .3791



CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACEROS-HUMEROS GRADO: "E"

TEMPERATURA: 150 C

ATMOSFERA : AIRE

PRESION : 7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPEJOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	2.9	2.487	.422	21.9555	21.9476
2	2.91	2.183	.501	23.4315	23.4205
3	2.82	2.5	.566	29.1209	29.1083

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
4.21915	.10713
6.32168	.160516
6.28869	.159678

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 5.60984

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = .142441

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO: S-HUMEROS GRADO: \*E\*

TEMPERATURA: 200 C

ATMOSFERA : AIRE

PRESION : 20 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL (g)	PESO FINAL (g)
1	2.805	2.5	.545	27.8265	27.8078
2	3.36	2.862	.506	36.8247	36.7372
3	3.335	2.84	.539	37.6447	37.5168

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)      VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)

9.50317      .241298

33.4022      .848125

48.6769      1.23597

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 30.5274

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = .775131

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:125 C

ATSMOSFERA :AIRE

PRESION :4 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPEJOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.714	2.379	.561	36.7365	36.4875
2	2.89	2.484	.414	21.5465	21.4357
3	2.885	2.17	.504	22.6679	22.666

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
49.7378	1.26910
29.8847	.758812
.552844	.140374E-01

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 26.7251

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .678586

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO: S-HUMEROS GRABO: 'E'

TEMPERATURA: 150 C

ATMOSFERA : AIRE

PRESION : 17 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL (g)	PESO FINAL (g)
1	2.836	3.49	.53	27.0529	26.9145
2	3.355	2.846	.52	36.2702	36.1945
3	3.32	2.836	.525	36.719	36.7175

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION (mm/año)
25.3464	.643578
14.4387	.366617
.289838	.735936E-02

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy) = 13.3583

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año) = .339185

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:S-HUMEROS GRADO:\*E\*

TEMPERATURA:200 C

ATSMOSFERA :AIRE

PRESION :20 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	3.704	2.366	.545	35.5178	35.4408
2	2.883	2.476	.406	21.1287	21.0841
3	2.875	2.157	.494	22.3179	22.3011

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
15.8397	.397112
12.1631	.30883
4.95972	.126162

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 10.9239

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .277371

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO Lodos DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:"E"

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :AIRE

PRESION : 4 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.392	2.22	.93	50.8961	50.8602
2	3.21	2.227	.915	47.2031	47.1747
3	3.253	2.285	.985	52.6426	52.609

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
13.7230	.348446
11.4805	.291506
12.6905	.322229

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 12.6314

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .320727

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:150 C

ATMOSFERA :AIRE

PRESION :7 Kg/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.385	2.21	.913	49.7827	49.7735
2	3.192	2.209	.897	45.96	45.948
3	3.234	2.264	.965	51.0241	51.0076

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
3.56696	.905647E-01
4.95429	.125796
6.37591	.161893

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 4.96572

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .126086

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO: \*E\*

TEMPERATURA:200 C

ATMOSFERA :AIRE

PRESION :20 Kg/cm2

TIEMPO : 50 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.367	2.194	.9	48.484	48.461
2	3.176	2.193	.88	44.6411	44.5361
3	3.212	2.252	.946	49.314	49.1524

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
9.06692	.230221
44.2191	1.12278
63.697	1.61735

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 38.9971

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .990187



CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO: \*E\*

TEMPERATURA:125 C

ATMOSFERA :AIRE

PRESION :4 K<sub>a</sub>/cm<sup>2</sup>

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(ϑ)	PESO FINAL(ϑ)
1	3.15	2.316	.828	44.3147	44.0972
2	3.556	2.125	.835	46.2218	46.1108
3	2.65	2.37	.67	29.9126	29.9094

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
45.2265	1.14834
22.0799	.56378
.83798	.212774E-01

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 22.7145

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .576752

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION

DE POZOS GEOTERMICOS

ACERO:R-HUMEROS GRABO:"E"

TEMPERATURA:150 C

ATSMOSFERA :AIRE

PRESION :7 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPESOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.36	2.189	.885	47.7922	47.6627
2	3.172	2.19	.874	44.1685	44.0361
3	3.205	2.237	.934	48.3013	48.2782

VELOCIDAD DE CORROSION (mpy)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
25.8703	.656881
28.0306	.711732
4.61515	.117185

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mpy)= 19.4948

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .494998

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION EN AUTOCLAVE  
USANDO COMO MEDIO CORROSIVO LODOS DE PERFORACION  
DE POZOS GEOTERMICOS  
ACERO:R-HUMEROS GRADO:'E'

TEMPERATURA:200 C

ATMOSFERA :AIRE

PRESION :20 Kg/cm2

TIEMPO : 100 Horas

No.	ALTURA (cm)	BASE (cm)	ESPEJOR (cm)	PESO ORIGINAL(g)	PESO FINAL(g)
1	3.13	2.3	.805	42.4489	42.3482
2	3.55	2.125	.824	45.7117	45.6725
3	2.645	2.365	.665	29.4519	29.3992

VELOCIDAD DE CORROSION (MPY)	VELOCIDAD DE CORROSION(mm/año)
21.4487	.54461
7.85434	.199432
13.9007	.352957

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (MPY)= 14.4012

VELOCIDAD PROMEDIO DE CORROSION (mm/año)= .365666