

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**PROTECCION ANODICA DE UN TANQUE  
PARA ALMACENAR ACIDO SULFURICO  
DE 2'000,000 LITROS DE CAPACIDAD**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO MECANICO**

**WILSON JOSE SILVA VASQUEZ**

**LIMA - PERU**

**-1992-**

## CONTENIDO

PROLOGO .....	06
---------------	----

## CAPITULO 1

INTRODUCCION .....	08
--------------------	----

## CAPITULO 2

FUNDAMENTO TEORICO .....	11
2.1. Diagrama de Pourbaix y Protección .....	12
2.2. Pasividad .....	14

## CAPITULO 3

3. CALCULO DEL SISTEMA DE PROTECCION ANODICA ....	20
3.1. Parámetros de protección anódica .....	20
3.2. Densidad de corriente para la pasividad .....	21
3.2.1. Densidad crítica de corr. para la pasividad..	
3.2.2. Densidad de corriente pasiva .....	
3.3. Variación de potencial en la zona pasiva ....	
3.3.1. Potencial crítico de pasivación .....	
3.3.2. Potencial pasivo .....	24
3.4. Intervalo de trabajo en la protección anódica.	25
3.5. Distribución de la corriente .....	26

3.6.	Problemas causados por Erosión/Corrosión ....	27
3.7.	Condiciones de aplicación .....	30
3.7.1.	Factores que influyen en las condiciones de la solución .....	31
3.7.2.	Composición de la solución .....	
3.7.3.	Efecto de temperatura .....	33
3.7.4.	Efecto de agitación .....	34
3.7.5.	Efecto de hidrógeno .....	35
3.7.6.	Efecto de orden de penetración .....	38
3.8.	Método de cálculo del sistema de protección Anódica .....	39
3.9.	Polarización del Anodo .....	45
3.10.	Instalación del circuito Eléctrico .....	46
3.11.	Polarización del Cátodo .....	49
3.12.	Optimización del sistema .....	
3.13	Velocidad de Corrosión .....	55
3.14.	Instalación del Sistema .....	59
3.15.	Resumen de Equipo y Materiales .....	59

#### CAPITULO 4

4.	FRUEBA EXPERIMENTAL .....	62
4.1.	Laboratorios .....	63
4.2.	Materiales .....	63
4.2.1.	Probetas .....	63
4.2.2.	Preparación de probetas .....	65
4.2.3.1.	Electrólito .....	67

4.2.4.	Potenciostato .....	68
4.3.	Metalografía .....	70
4.4.	Ensayos en probetas .....	71
4.5.	Procedimiento experimental .....	73
4.6.	Resultados de prueba experimental .....	74

## CAPITULO 5

5.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROTECCION ANODICA ...	81
5.1.	Ventajas .....	81
5.2.	Desventajas .....	82

## CAPITULO 6

6.	ANALISIS DEL COSTO .....	84
6.1.	Costo de Energía .....	87
6.2.	Costo de Mantenimiento .....	87
6.3.	Resultado de Costos .....	88

**CONCLUSIONES** .....

**RECOMENDACIONES** ..... 91

**BIBLIOGRAFIA** ..... 92

PLANOS .....	
APENDICES .....	95
Diseño de tanque .....	95
2. Dimensionado del Casco .....	96
3. Diseño del fondo .....	106
4. Diseño de techo .....	108
5. Cálculo de Columna Principal .....	123
6. Cimentación .....	126
7. Tablas :	
conductores Eléctricos .....	130
De Sellos Mecánicos .....	131
Tabla N° 14 .....	132
Tabla N° 15 .....	133

## PROLOGO

La vida actual, con su ritmo vertiginoso y sus exigencias siempre crecientes en el aspecto económico, tecnológico y desarrollo industrial de los países, obliga a los profesionales responsables al estudio, investigar, descubrir, aplicar nuevas tecnologías en la industria y de esta manera disminuir las pérdidas directas e indirectas donde se incluye el costo extra debido al empleo de aleaciones y metales resistentes a la corrosión en aplicaciones donde el acero estructural cumpliría las exigencias mecánicas, pero no será utilizable por insuficiente resistencia a la corrosión en tanques de almacenamientos para ácido sulfúrico a distintos porcentajes de concentración. El presente trabajo se refiere al estudio teórico-practico del método de Protección Anódica en un Tanque para Almacenar Acido Sulfúrico de 2'000,000 de Litros de Capacidad, usando acero estructural de procedencia nacional donde la corrosión abrupta queda controlada.

No cabe duda que el presente trabajo será de gran aporte en beneficio del sector minero-metalúrgico, petrolero, químico e industrial en general donde se trabaje con ácido sulfúrico.

Durante la preparación del presente trabajo se ha consultado a muchos profesores de la UNI a quienes les estoy muy reconocidos por ayuda. En todas mis gestiones de consulta a los siguientes especialistas, DOCTOR WALTER ESTRADA, MAGISTER LEONARDO ALCAYHUAMAN, INGENIERO MARCOS VALENCIA de los cuales obtuve las máximas facilidades que por ello va mi reconocimiento especial.

Finalmente quiero expresar mi estimación al ING. MIGUEL SAENZ LIZARZABURO, quien fue mi asesor en el desarrollo de este trabajo; fue un placer trabajar con él todos los aspectos y sus contribuciones en orientación, concepción y entusiasmo fueron sustanciosos

Wilson J. Silva V.

UNI, Diciembre de 1991.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

#### 1.1. Generalidades

EL presente trabajo tiene como objeto presentar el estudio teórico-práctico del método de protección anódica en un tanque para almacenar ácido sulfúrico.

La parte experimental se desarrolla fundamentalmente en el trazado de las curvas de polarización, haciendo uso del potencióstato, pero previamente se preparará las probetas tanto de acero inoxidable AISI 304 y de acero estructural A-36; así mismo, se prepara el ácido sulfúrico a distintas concentraciones de % en peso, ver tabla Nº 2. Los resultados de la prueba experimental se da de la lectura obtenida en el osciloscopio que se tabula en la tabla Nº 5 y 6.

El cálculo del sistema de protección anódica se basa fundamentalmente en la siguiente fórmula:

$$V = A \cdot c + I (R_1 + R_e)$$

En donde "R<sub>1</sub>" que es la resistencia del electrolito es el más importante constituyente de



"R", es decir las resistencias en el cálculo es decir:  $R_{\infty} \approx 0$ .

La resistencia está dada por la expresión.

$$R = \frac{l}{2\pi L} \ln \left[ \frac{D}{d} \right]$$

Y teniendo en cuenta la condición matemática

$$V_p \geq V_a$$

Además hay que tener en cuenta la aplicación de energía eléctrica de voltaje constante y suficiente tanto para lograr la pasividad como para mantener la pasividad con lo que resulta el siguiente criterio de protección.

$$(C_p - C_a) + (I_a - I_p) R \leq E_T - E_p,$$

Este criterio de protección se determina teniendo en cuenta las tablas N° 6 y 6A, así como la figura N° 9.

Para determinar el tanque que se va a proteger lo calculado en base a las normas API-650, el cual recomienda los materiales y dimensiones que se muestra en el capítulo de apéndice.

Los cálculos se desarrollan en el Sistema Inglés, en algunos casos se hacen cambios al Sistema métrico.

Para completar el trabajo se hacen los cálculos de costos teniendo en cuenta un año de funcionamiento, donde se indica el costo total del tanque de acero estructural protegido anódicamente y el tanque de acero inoxidable sin protección.

## CAPITULO 2

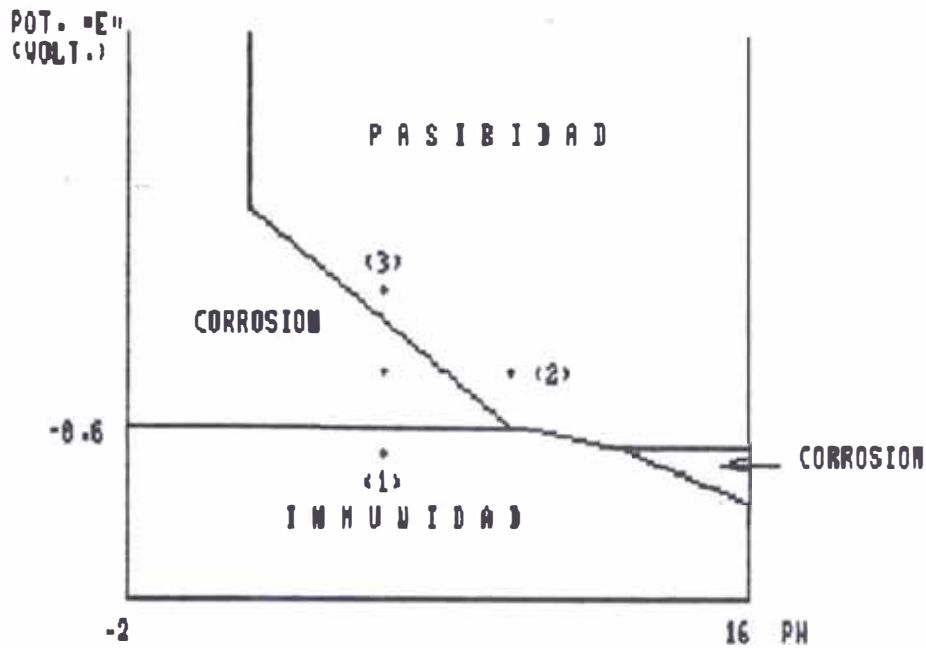
### FUNDAMENTO TEORICO

La protección anódica es un método utilizado para controlar o limitar la velocidad de corrosión de los metales.

Se basa en la aplicación externa de una corriente anódica, a potencial controlado, con el fin de formar sobre la superficie metálica una película protectora.

Este método necesita de un exacto control; si no se ejerce este estricto control, la protección anódica puede originar un aumento considerable de la velocidad de corrosión, lo que conduciría al fallo prematuro.

La protección anódica se basa en la pasivación de la superficie metálica. La densidad de corriente necesaria para producir una película de pasivación de la superficie metálica puede ser muy elevada, pero una vez conseguida la pasivación del metal, la densidad necesaria para conservar dicha película es mucho menor.



**FIGURA # 1**  
**DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL SISTEMA**  
**HIERRO - AGUA A 25 °C**

### 2.1 Diagrama de Pourbaix y Proteccion

Los diagramas de POURBAIX se representan con el potencial y el pH como coordenadas en éste caso muestro las fases en equilibrio de un sistema METAL/AGUA a 25°C. Hay que recordar que éstos diagramas se construyen a partir de datos de potenciales químicos y de solubilidad, por lo que

sólo indican las fases termodinámicamente estables, pero ningún estado metaestable.

En la fig. N<sup>o</sup> 1 muestro al diagrama correspondiente del sistema mencionado; comprende tres zonas denominadas respectivamente, de **INMUNIDAD**, de **CORROSION** y de **PASIVIDAD**.

Para este diagrama, se ha tomado un metal situado en una posición "X", la protección puede conseguirse mediante tres métodos:

- 1.- Disminuyendo el potencial del metal hasta introducirlo en la zona de **INMUNIDAD** (es decir se realiza la protección catódica).
2. Aumentando el pH hasta llevarlo a la zona **PASIVA** (es decir se hace tratamiento de agua).
- 3.- Elevando el potencial hasta los correspondientes a la zona **PASIVA** (es decir se realiza la protección **ANODICA**).

Normalmente, el empleo del tercer método debe tomarse en consideración para el almacenamiento de ácido; donde puede conseguirse la **PASIVIDAD** en condiciones ácidas mediante:

- 1.- El empleo de agentes oxidantes o de inhibidores (que pueden ocasionar contaminación).

Para dicha figura haré mención que a los potenciales indicados por "A", el acero está protegido catódicamente.

Esto es equivalente a disminuir el potencial del acero hasta llevarlo a la zona de inmunidad del diagrama de **POURBAIX**.

Según el potencial se eleva en la dirección anódica y alcanza la zona "B", se produce la corrosión; la reacción anódica es:



Si se sigue elevando el potencial en esta zona, mayor será la velocidad de corrosión. En esta parte del diagrama puede relacionarse con la ecuación de **TAFEL**, donde la sobretensión "n", se relaciona con la densidad de corriente "i", cuando es mayor que 0.05 V. La ecuación de **TAFEL** es:

$$n = a + b \log(i) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

n = Sobretensión

a, b - Constantes

i - Densidad de corriente.

Los iones de hierro producidos forman sulfato ferroso, que probablemente proporcionan una capa aislante a la superficie de hierro. En las discontinuidades de éste depósito se producen

localmente densidades de corriente muy elevadas y sobre toda la superficie se forma una capa pasivante.

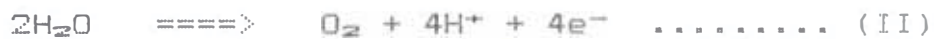
A un potencial situado exactamente por encima del potencial de pasividad,  $E_{pp}$ , le corresponde la densidad crítica de pasivación,  $i_{crit}$ , que corresponde a la máxima velocidad de corrosión.

Al aumentar aún más el potencial, la densidad de corriente disminuye hasta un valor muy bajo que corresponde a la densidad de corriente en estado pasivo, situado en la zona "C"; esta caída en la disminución en la densidad de corriente puede ser muy grande y se produce en un intervalo de potencial muy estrecho.

Esta baja densidad de corriente en la zona pasiva corresponde a una velocidad de corrosión muy baja, lo cual es importante porque significa que las impurezas presentes en electrolito como resultado de la corrosión del hierro son mucho menores que cuando el hierro no se encuentra en tal estado; cabe hacer notar el hecho que la corriente pasa cuando una película pasiva esta presente sobre la superficie del metal significa que la película está disolviéndose y está siendo reformada en la misma proporción o cual corresponde la densidad de corriente pasiva. El intervalo de potencial sobre

el cual ocurre una baja en la densidad de corriente indica que el metal es pasivo y es importante porque esta es la zona "C" sobre la cual la protección anódica puede ser aplicada. Para el caso de los aceros esta zona es estrecha.

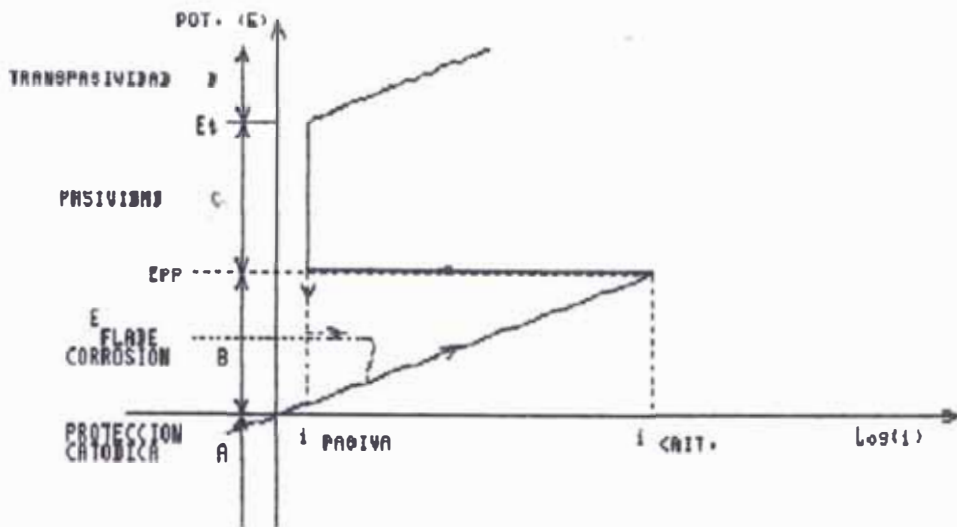
En un potencial más alto ocurre una reacción anódica en esta región, es decir en la zona "D", a la que se denomina transpasiva, la densidad de corriente aumenta de nuevo con el potencial. La reacción normal para el hierro en ácido sulfúrico a un potencial menor que 1.23 V (frente al electrodo de hidrógeno) con un pH = 0 ocurre el desprendimiento de oxígeno, de acuerdo con la siguiente ecuación:



O con ésta otra:







**FIGURA 2**  
**CURVA ESQUEMATICA DE POLARIZACION**

El mecanismo de la consecución de pasividad anódica implica la formación de una película o una capa resistente a la corrosión; la disminución de la densidad de corriente en la detención de Flade corresponde a la formación de una película pasiva; tres teorías son expuestas para explicar la formación y la estructuración de la película pasiva:

- 1.- El hierro se disuelve y reacciona con el oxígeno para formar precipitados de óxido de hierro, los cuales protegen al metal de la corrosión.
- 2.- El oxígeno es absorbido por el metal el cual permite la formación de una monocapa protectora.

3. El oxígeno es absorbido inicialmente luego se forma una estructura amorfa de hierro-oxígeno; el hierro emigra lentamente de la base del metal dentro de la película absorbida de oxígeno.

Cuando la protección anódica es aplicada a superficies grandes, la formación de la película pasiva resulta en una marcada reducción en la densidad de corriente que es continuamente desviada desde las áreas inicialmente pasivada hacia las áreas aún no pasivadas. Esto promueve el crecimiento de la superficie pasiva y responde al emisor excelente de energía eléctrica para la protección anódica en aplicaciones industriales; por esto, es posible pasivar grandes recipientes con un número mínimo de cátodos.

## CAPITULO 3

### 3.1 Parametros de Proteccion Anodica:

La pasividad realizada por la pasivación anódica puede describirse por medio de una curva esquemática potencioestática de polarización anódica tal como se muestra en la figura 3. La figura 3 es esencialmente un diagrama de la corriente fluyendo en la superficie del metal, valores muy activos cercanos al potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) hacia elevados valores de potenciales donde el metal llega a ser pasivo (intervalo de potencial pasivo) y eventualmente hacia la variación de potencial transpasa donde la corrosión vuelve a acelerarse.

La curva "A" en la figura 3 es una curva de polarización potencioestática "de estado estable" determinada con velocidades muy bajas de polarización  $E/T = 1$  mv/seg.

La forma de la curva de polarización está en general afectada por la velocidad de polarización y en altas velocidades la corriente requerida para la pasividad llega a ser grande, según lo mostrado en la curva "B" donde la velocidad de polarización es extremadamente grande  $E / T$  es mucho mayor que 1 mv/seg.

La protección anódica es en principio recomendada para aplicación en problemas prácticos de corrosión. No obstante, cada aplicación tiene que ser estudiada por adelante en el laboratorio o analizada por personal técnico especializado, ya que la forma y la posición relativa de la curva de polarización anódica con respecto al potencial electroquímico y las coordenadas de corriente es afectado por las variables experimentales tales como la naturaleza del ácido, pH, temperatura, la naturaleza del metal o aleación, etc.

Del punto de vista de diseño. ciertos parámetros de protección anódica son muy importantes y su trascendencia es discutida en seguida.

### **3.2 Densidad De Corriente Máxima Para La Pasividad ( $i_m$ ):**

Cuando diseñamos sistemas para la protección anódica de estructuras metálicas contra la corrosión en medio agresivo es necesario tener suficiente capacidad de corriente en el potencióstato o en una fuente de D.C. usada en paralelo para la pasivación rápida durante la aplicación inicial de la pasivación anódica o durante la repasivación en casos de emergencia (e.g.), grupo electrógeno de emergencia, en caso de pérdida de pasividad debido a la pérdida de energía eléctrica  $I_m$  representa la densidad de corriente requerida para la pasivación

de una estructura metálica cuando el potencial electroquímico de la superficie del metal es aumentado muy rápidamente, hasta el potencial de corrosión  $E_{corr}$ , el valor del potencial  $E_p$  cerca al centro de la zona pasiva. Cuando:  $\Delta E / \Delta T$  es mucho mayor que 1 mv/seg.

$$(\Delta E / \Delta T \gg 1 \text{ mv/seg}) \dots\dots\dots (2)$$

**3.2.1 Densidad Crítica de Corriente para la Pasividad ( $i_{crit}$ ):**

Es la densidad mínima de corriente requerida para la pasivación de un metal para pasar por polarización lenta en un medio particular de corrosión se debe cumplir:

$$\Delta E / \Delta T < 1 \text{ mv / seg.} \dots\dots\dots (3)$$

La  $i_{crit}$  tanto como  $i_m$  dependen del metal o de la aleación empleada, de la temperatura, la naturaleza del electrolito agresivo y pH. El  $i_{crit}$  y  $i_m$  corresponden a un cambio en la reacción electroquímica ocurriendo sobre la superficie del metal la disolución activa, a la reacción resultante en la formación de la película pasiva de óxido según el producto principal.

### **3.2.2 Densidad de Corriente Pasiva ( $i_p$ ):**

Esta representa la densidad de corriente necesaria para mantener la película pasiva del óxido sobre la superficie del metal por un período largo de tiempo.  $i_p$  es generalmente más bajo que  $i_{crit}$  en 2 ó 3 órdenes de magnitud y está directamente relacionado a la corrosión del metal pasivo.

### **3.3 Variación del Potencial en la Zona Pasiva ( $E_p$ a $E_t$ ):**

Esto representa la porción plana de la curva de polarización anódica en la zona pasiva, ver figura 3. La magnitud del intervalo pasivo es muy importante y determina la aplicación de la protección anódica en los tanques de almacenamiento.

$E_t$  es el potencial donde la transpasividad (pérdida de pasividad) y la aceleración de la corrosión se da nuevamente.

#### **3.3.1 Potencial Critico de Pasividad ( $E_{cp}$ ):**

Es el potencial electroquímico de la superficie del metal con respecto al electrodo de referencia correspondiente a la densidad crítica de corriente para la pasividad.

### 3.3.2 Potencial Pasivo ( $E_p$ ):

Es el potencial electroquímico de la superficie del metal respecto al electrodo de referencia correspondiente al comienzo del intervalo del potencial pasivo, ver curva de polarización figura 3.

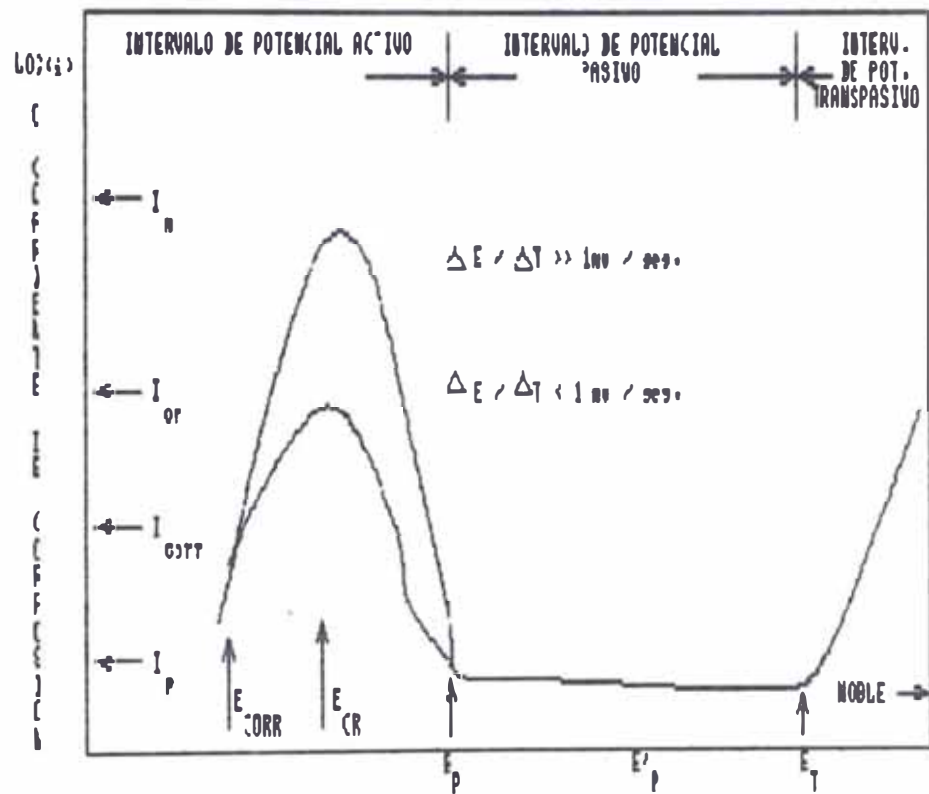


FIGURA # 3

"CURVA ESQUEMATICA DE POLARIZACION ANODICA"  
 POTENCIAL DEL ANODO vs. ELECTRODO DE REFERENCIA

### 3.4 Intervalo de Trabajo en la Potencia Anódica:

Para alcanzar el estado pasivo es necesario aplicar una densidad de corriente ligeramente superior que el valor crítico de pasividad ( $i_{er,t}$ ) y el potencial aplicado debe ser superior al de pasividad  $E_p$ , ver figura 3.

Sin embargo, para mantener el estado pasivo, el potencial debe ser superior al potencial de Flade, ver figura 3.

El potencial de Flade es ligeramente inferior a  $E_p$ . Usualmente, la diferencia entre los potenciales de Flade y de pasivación es unas centésimas de voltio, por lo que estos potenciales se utilizan a veces como sinónimos. El potencial de Flade depende del pH de la solución conforme a la ecuación.

$$E_f - E_{fo} = n 0.059 \text{ pH} \dots\dots\dots (4)$$

donde  $E_{fo}$  es el potencial estándar de Flade a  $\text{pH} = 0$  y el valor de "n" está comprendido entre 1 y 2, de acuerdo con el metal y con su estado. Para fines prácticos es necesario conocer el valor de la densidad crítica de corriente para cada sistema, lo que puede ser difícil de conseguir si no se dispone de un equipo costoso. Como la densidad de corriente requerida para lograr el estado pasivo depende del tiempo, frecuentemente se hace referencia la



cantidad total de corriente por unidad de superficie para conseguir la pasivación. La amplitud del intervalo de potencial sobre el que puede mantenerse el estado pasivo es importante; el potencial mínimo necesario para mantener la pasividad varía de acuerdo con el metal de que se trate, ver tabla 1.

**TABLA Nº 1**

**POTENCIAL MINIMO (O POTENCIAL DE FLADE) REFERIDO A LA ESCALA DE HIDROGENO A pH = 0 Y A 25 °C**

METAL	POTENCIAL (VOL.)
HIERRO	+ 0.58
NIQUEL	+ 0.36
ACERO INOXIDABLE	+ 0.10
CROMO	- 0.22
TITANIO	- 0.24

### **3.5 Distribución de la Corriente y Aplicación de Energía Eléctrica en los Sistemas de Protección Anódica:**

En los diseños de sistemas de protección anódica, es necesario el conocimiento de la corriente y la distribución del potencial en todas las áreas de la superficie a protegerse, es necesario asegurarse que el potencial electroquímico de la superficie del metal sea mantenida en la zona de potencial pasivo.

Para las instalaciones existentes, la corriente y la distribución de potencial pueden aplicarse experimentalmente.

En los tanques de almacenamiento, la distribución uniforme del potencial dentro de la zona pasiva puede realizarse fácilmente en la superficie a ser protegida con el colocado de uno ó más cátodos en el centro geométrico del tanque.

### **3.6 Problemas Causados por Erosión - Corrosión Debajo de Boquetes de Entrada de Acido:**

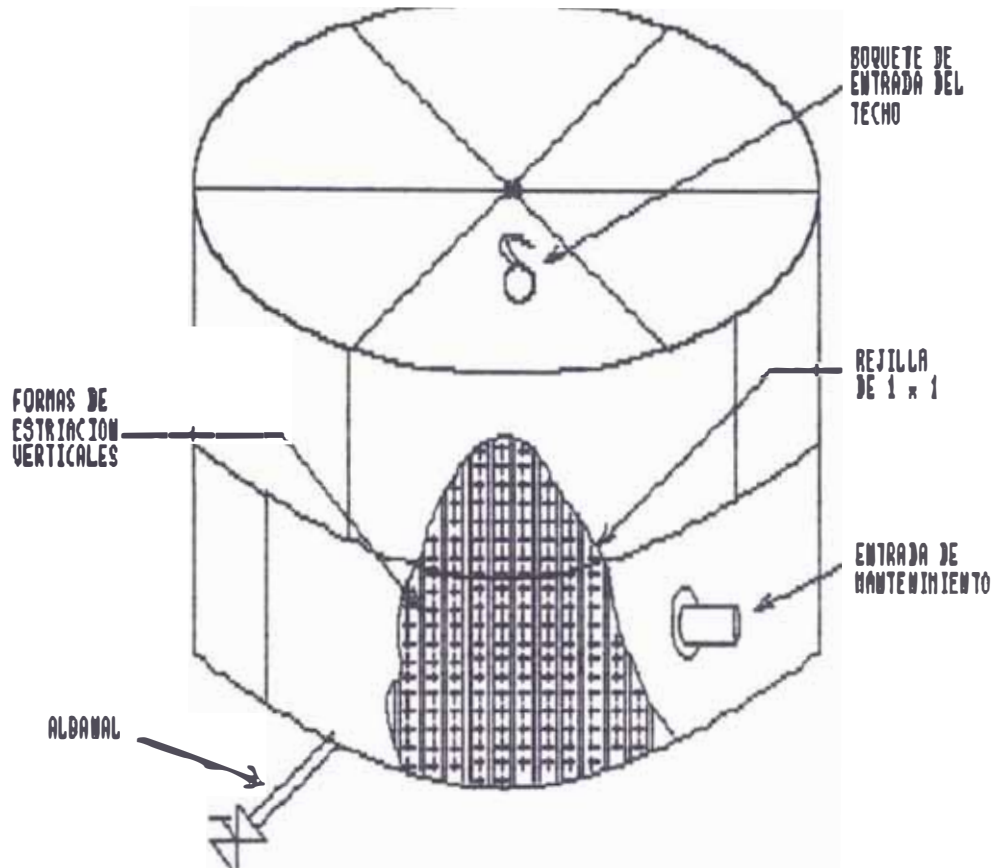
El acero estructural tiene a una **relativa** resistencia a la corrosión en ácido sulfúrico concentrado, que permite la formación de una película blanda de sulfato ferroso; cuando la velocidad del ácido en contacto con el acero es alta, esta película blanda es erosionada lo que a su vez permite sobrevenir una considerable velocidad de corrosión.

Tal es el caso cuando la entrada del ácido es colocado muy cercana a la pared lateral del tanque de almacenamiento y no se ha colocado tubo de depresión. Esto es un error muy común en el diseño del tanque y es remarcable cuando los operadores han hecho reparación de remendado en las paredes laterales del tanque corroído.

Es también un comentario la **escasez** de comunicación entre propietarios, contratistas, y constructores de tanques de almacenamiento porque el problema no fue percatado sobre la base de largo tiempo y los cambios de diseño no avisados para su corrección.

En un filete, soldando un parche en la pared exterior del tanque no es una buena práctica para evitar la corrosión-erosión si bien el filete soldado es entonces el grueso efectivo del tanque y no puede ser manipulado por el espesor; al separar el parche de la pared original se observa que la velocidad de corrosión se acelera entre el parche y la pared original del tanque. La reparación ampliamente satisfactoria resulta soldando a los extremos del fondo una plancha nueva en la cara interior del tanque.

La solución para disminuir éstos problemas es simple: Colocando el tubo de entrada de ácido lo más lejos de la pared lateral como fuera posible, lo recomendable es a una distancia no menor de 245 cm.



**FIGURA # 4**  
**MODELO DEL TANQUE Y ESTRIBACION DE LA PARED LATERAL**  
**BAJO EL ALBANAL DE ENTRADA**

### **3.7 Condicion de Aplicacion:**

Para proteger contra la corrosión los tanques de almacenamiento; mediante el método de la protección anódica; deben reunir las siguientes condiciones:

- 1. Alcanzar el Estado Pasivo:** Todos los métodos de protección conocidos hasta la actualidad, son muy efectivos **sobre** todo cuando se trata de proteger sistemas que contienen ácidos fuertes. Por esto el método de protección anódica en los tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico concentrado tiene un mejor comportamiento cuando se conoce y aplica el valor de la densidad crítica de la corriente para cada sistema; en la amplitud del intervalo de potencial sobre el que puede mantenerse el estado pasivo.
- 2. Distribucion de la Corriente:** Para **conseguir** la protección anódica de las instalaciones industriales es necesario que la corriente aplicada se distribuya en todas las superficies en las que se precise protección contra la corrosión incluso en los resquicios existentes en el sistema a proteger.

**3. Proporcionar Larga Vida a Bajo Costo:** En los sistemas donde se aplique protección anódica es necesario conocer el valor de la densidad de la corriente, lo que obliga a disponer de un equipo costoso.

Las inversiones en materiales de aleaciones especiales para la construcción de tanques de almacenamiento para ácido sulfúrico concentrado resulte muy elevadas y las velocidades de corrosión demasiado grande, esto hace de que la solución se contamine; por todo esto, en lo que se refiere al aspecto económico se está estudiando recomendar el uso de acero estructural protegido anódicamente que permitiría una larga vida del tanque; lo arriba mencionado hace posible el rescate de la inversión en el equipo y otras ventajas mayores.

### **3.7.1 Factores que Influyen en las Condiciones de Aplicación:**

Los factores que influyen en las condiciones de aplicación de la protección anódica en tanques de almacenamiento básicamente están dados por:

- 1: Materiales a usarse
- 2: Composición de la solución (Electrolito).
- 3: Efecto de la temperatura.

4: Efecto de agitación.

5: Efecto del hidrógeno.

6: Efecto en el poder de penetración.

### **1. Materiales a Usarse:**

En nuestro país se usa acero inoxidable AISI 304 y 316 en la construcción de tanques para almacenar ácido sulfúrico concentrado; en éste trabajo lo que busco de establecer es el rango de potencial de pasivación para el acero estructural A-36 que se obtiene en las curvas de polarización anódica, según se ve en tablas N<sup>o</sup> 6, 6A y figura N<sup>o</sup> 9.

### **3.7.2 Composición de la Solución:**

La densidad de la corriente necesaria para conseguir y mantener la pasividad de los materiales que se usan en la construcción de los tanques de almacenamiento depende del electrólito. Esto se muestra en la tabla N<sup>o</sup>5, 5A para un acero inoxidable 304. La concentración del electrólito también es importante.

La composición de la película sobresaturada que se forma sobre la superficie de **hierro** que se corroe en ácido sulfúrico

depende de la concentración. Se recomienda tener en cuenta las siguientes composiciones para distintas concentraciones de ácido sulfúrico: 0 - 25 %,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 60 - 70 %,  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; 78 - 85 %,  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , y 96 %,  $\text{FeSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{SO}_4$ . Estas diferentes composiciones influyen sobre la facilidad de pasivación. Estas se consiguen facilmente con concentración mayores que 78%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con poca pérdida de hierro, pero con 60 y 70 % de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , antes de la pasivación se produce una corrosión mucho más elevada.

Así mismo, se observa que la protección anódica es efectiva para el acero en ácido sulfúrico; como se ilustra en las tablas Nº 6, 6A y figura Nº 9.

### 3.7.3 Efecto de la Temperatura:

La protección anódica puede aplicarse a electrolitos a temperaturas elevadas y este método es aplicable en aceros en contacto con ácido sulfúrico concentrado a temperatura de hasta 120°C. En general, conforme asciende la temperatura aumenta la velocidad de corrosión y la densidad de corriente necesaria para alcanzar y mantener la pasividad, mientras que disminuye el intervalo de potencial en el que



la protección anódica puede aplicarse. Una variación en la temperatura ambiental al pasar del invierno al verano puede duplicar las necesidades de protección que se precisan para la protección anódica del tanque de almacenaje. La densidad de corriente necesaria para conseguir y mantener la pasividad aumenta también al aumentar la temperatura.

Los límites de la temperatura para el acero inoxidable son considerablemente más altos.

Las fluctuaciones de temperatura vistas en algunos procesos grupales no presentan problemas severos para la protección anódica porque es posible el control de corrosión en grandes intervalos de temperatura sin modificar el ajuste del equipo de control.

#### **3.7.4 Efecto de Agitación:**

La influencia de la agitación puede ser importante; aumenta la velocidad de corrosión y la densidad de corriente necesaria para mantener la pasividad. Es importante mencionar que la protección anódica es factible en sistemas muy agitados.

### 3.7.5 Efecto del Hidrógeno:

La erosión por corrosión es frecuentemente observada alrededor de los soportes y desniveles de las uniones de las planchas de los tanques de almacenamiento construídos; proyectándose desde la pared lateral.

A las ranuras verticales sobre la pared lateral debajo de la entrada del ácido no es posible detectar desde el exterior del tanque por examen ultrasónico. La detección puede ser difícil a menos que la superficie esté cepillada y limpia de la herrumbre que se forma cuando el tanque es lavado.

Las estriás se encuentran comunmente en el lado del agujero de entrada de ácido; las estriás también se presentan en las salidas montadas lateralmente y en las líneas de producto.

El mecanismo de estas estriaciones ha sido recientemente investigado por los Laboratorios de Químicas C.I.L. Ellos han confirmado que las burbujas de hidrógeno producidas por la corrosión del acero son responsables de las ranuras. Aparentemente las burbujas fluyen a lo largo de líneas preferenciales y destruyen

localmente las películas blandas protectoras; la corrosión continúa en una alta proporción a lo largo de estas líneas. Las estriaciones no son producidas si las burbujas quedan libres al salir fuera de la superficie sobre la cual se han producido. Esto explica porque en la garganta de un agujero lateral, las ranuras no son vistas en la mitad inferior de dichas gargantas; si bien el hidrógeno producido por corrosión es responsable de la ranuración, usando la protección anódica se logrará suspender completamente la estriación.

En todos los tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico se presenta ampollamiento en las planchas del piso y paredes laterales. El tamaño de estas ampollas se presenta entre 5 y 30 cm de diámetro. En algunos casos ellas se han roto y en estos casos la velocidad de corrosión es acelerada dentro de la ampolla.

Se explica la formación de estas ampollas; porque en el proceso de corrosión, el hidrógeno es primero producido en forma atómica. Entonces, dos de estos átomos se combinan para formar una molécula gaseosa de hidrógeno. Algunos de los átomos de hidrógeno, sin embargo, no se combinan y permanecen como

hidrógeno atómico que se difunde dentro del acero.

Si hay una laminación en la plancha; estos átomos de hidrógeno se difunden hacia ella y ahí se combinan formándose gas de hidrógeno. Este gas atrapado dentro de la plancha y las presiones de muchos miles de atmósferas se propaga lentamente hasta las protuberancias del **acero** para formar una ampolla y eventualmente romperse.

Al igual que las ranuraciones producidas por el hidrógeno, el ampollamiento puede ser prevenido por la supresión de la producción de hidrógeno en la reacción de corrosión; así en el tanque de almacenamiento protegido anódicamente, cualquier hidrógeno es evolucionado en los cátodos suspendidos en el ácido sulfúrico.

#### **3.7.6 Efecto del Poder de Penetración:**

Para conseguir la protección anódica de una instalación industrial es necesario que la corriente aplicada alcance todas las superficies en las que se precise protección.

La protección anódica de superficies es especialmente difícil cuando en ellas existen

resquicios, que con frecuencia se presentan en las zonas roscadas de los tubos, tuercas, agujeros de pernos y soldaduras imperfectas. A lo largo de la hendidura existe un acusado gradiente de potencial entre la superficie pasiva y el extremo de la grieta que no esta pasiva y, en consecuencia, se corroe a gran velocidad. La capacidad para conseguir la pasivación depende principalmente de la densidad crítica de corriente anódica, así como de los materiales usados en la construcción del tanque, la concentración de la solución y la geometría del resquicio.

La pasivación de un recipiente se consigue en forma muy rápida si la densidad de corriente aplicada es mayor que el valor crítico. Pero para pasivar toda la superficie de un recipiente grande en el mismo tiempo se precisa una elevada densidad de corriente. Sin embargo, incluso con una corriente inferior, la pasividad se logra en zonas locales en las que la densidad de corriente es superior al valor crítico y cuando estas zonas se han pasivado, otras reciben una densidad de corriente más elevada y, a su vez, se pasivan.

En la práctica se puede usar un método complementario para pasivar el tanque, es decir el recipiente de acero estructural se pasiva en contacto con ácido nítrico mediante un llenado o lavado con éste ácido y después el tanque se emplea para contener ácido sulfúrico concentrado pues con éste ácido es más difícil conseguir la pasividad del tanque.

### **3.8 Método de Cálculo del Sistema de Protección Anódica:**

Cuando al sistema de protección anódica se le aplica un voltaje por una fuente de energía eléctrica, el ánodo y el cátodo llegan a ser polarizados, cada uno de los dos electrodos cambian su potencial en direcciones opuestas.

Empezaré dando una breve nomenclatura de los parámetros usados en el método de cálculo del sistema de protección anódica:

$V$  = potencial aplicado por la fuente de energía eléctrica (o voltaje de trabajo)

$A$  = potencial en el ánodo (es la suma total de todos los componentes de la polarización anódica)

$E_p$  = potencial más bajo en el intervalo pasivo (menos noble) aproximadamente igual al potencial de Flade

$E_t$  = potencial más alto en el intervalo pasivo (más noble).

$i$  = densidad de la corriente en el ánodo

$I$  = corriente total aplicada en el circuito

$C$  = potencial en el cátodo (es la suma total de todos los componentes de la polarización catódica)

$R = R_1 + R_e$  (resistencia óhmica del circuito)

$R_1$  = resistencia de la celda electroquímica incluyendo electrólito y película de su superficie

$R_e$  = resistencia en ohmios del circuito externo

Cuota A = valores durante los procesos de pasivación

Cuota F = valores cuando la superficie se pasiva al potencial  $E_t$ .

El potencial aplicado por la fuente de energía durante la protección anódica es distribuido como sigue:

$$V = A - C + I(R_1 + R_e) \dots\dots\dots(5)$$

Generalmente la resistencia del electrólito es el más importante constituyente de "R"; luego, todas las otras fuentes de resistencias serán ignoradas y la ecuación (5) puede escribirse:

$$V = A - C + IR \quad \dots\dots\dots(6)$$

En el caso de un pequeño cátodo en un gran recipiente, la resistencia del electrólito es concentrada en los alrededores del cátodo, así las variaciones de tamaño de los tanques de almacenamiento necesitan ser grandes antes que se altere significativamente la resistencia.

Así, para un tanque de almacenamiento cilíndrico de longitud L, respecto de los radios  $r_2$  y  $r_1$ , la resistencia está dada por la expresión:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

Usando la ecuación (6) es posible obtener el potencial aplicado por la fuente de energía durante la pasivación a la densidad de corriente necesaria mínima.

Por otro lado la protección anódica en tanques de almacenamiento, se puede chequear rápidamente para determinar si es posible aplicar el método o no, sin el uso, de un electrodo de referencia con



una fuente de energía de potencial variable controlado, si cumple la siguiente condición matemática:

$$V_F \geq V_A \dots\dots\dots(8)$$

Donde  $V_A$  es el potencial aplicado al ánodo y está en su valor máximo permisible,  $V_F$  es el potencial aplicado que se necesitó para alcanzar la pasividad de las superficies protegidas. Así, un potencial  $V_A$  menor o igual que  $V_F$  también podría aplicarse por una fuente de energía eléctrica de voltaje constante teniendo suficiente capacidad de corriente de consumo máximo durante la pasivación; para determinar los valores de  $V_F$  y  $V_A$  nos remitimos a la ecuación (6) de donde resultan:

$$V_F = E_T - C_F + I_F R \dots\dots\dots(9)$$

$$V_A = E_F - C_A + I_A R \dots\dots\dots(10)$$

Haciendo las combinaciones de las ecuaciones (8), (9), y (10) es evidente que para aplicar este método simplificado de protección anódica el siguiente criterio puede ser satisfecho:

$$(C_F - C_A) + (I_A - I_F) R \leq E_T - E_F \dots\dots\dots(11)$$

para las condiciones antes mencionadas. En la práctica diversas condiciones deben satisfacerse:

- a) El cambio de polarización catódica ( $C_F - C_A$ ), debe ser pequeña, usualmente implica que la polarización catódica total debe ser pequeña.
- b) La resistencia óhmica debe ser baja.
- c) La diferencia entre la corriente crítica y la pasiva debe ser pequeña.
- d) El intervalo de potencial pasivo debe ser grande.

TABLA NO 7

CONCENTRACION % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	RESISTIVIDAD ( $\rho$ ) $\Omega\text{-m}$
80	$6 \times 10^{-2}$
98	$13 \times 10^{-2}$
oleo (>100)	$28 \times 10^{-2}$

TABLA NO 8

METAL	RESISTIVIDAD ( $\rho$ )
Cobre Comercial	$1.72 \times 10^{-6}$
Carbón	$3500 \times 10^{-6}$
Hierro	$1.72 \times 10^{-6}$

TABLA Nº 9

SUSTANCIA METAL	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
Acero	7.8
Cobre	8.6
Hierro	7.8
Oro	19.3
Platino	21.4
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	--

### Cálculo de la Resistencia del Cátodo:

Haciendo uso de la tabla Nº8 se tiene:

$$R_e = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots(12)$$

$$= 1.72 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$$

$$h = 11 \text{ pies}$$

$$d = \frac{1}{12} \text{ pies}$$

$$R_e = \frac{1.72 \times 10^{-8} \Omega\text{-m} \times 11 / 0.3048 \text{ pie}^2/\text{m}}{\pi \times \left[ \frac{1}{12} \right]^2 \times \frac{1}{4} \text{ pie}^2}$$

$$R_e = 11,380.96 \times 10^{-8} \Omega$$

En la ecuación (5)  $R_e$  es despreciable.

### Cálculo de la Resistencia del Electrólito.

Haciendo uso de la ecuación (7) y tablas N<sup>o</sup> 7 y 10 se tiene:

$$R = R_e = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \left[ \frac{D}{d} \right]$$

De la tabla N<sup>o</sup>7

$$= 13 \times 10^{-2} \Omega\text{-m}$$

Datos:

$$L = 11 \text{ pies}$$

$$D = D_{\text{tanque}} = 86.75 \text{ pies}$$

$$d = d_{\text{catodo}} = \frac{1}{12} \text{ pies}$$

$$R = \frac{13 \times 10^{-2}}{2\pi \times 11 \times 0.3048} \operatorname{Ln} \left[ \frac{86.75}{\frac{1}{12}} \right]$$

$$R = 0.043 \Omega$$

### 3.9 Polarización del Anodo:

Area interior ( $A_1$ ) del tanque de almacenamiento, considerado hasta el nivel de la superficie del líquido cuando está lleno con ácido sulfúrico.

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} + \pi DH = \pi D \left[ \frac{D}{4} + H \right] \dots\dots\dots(13)$$

$$A_1 = \pi \times 86.686 \left[ \frac{86.686}{4} + 12 \right]$$

$$A_1 = 9169.83 \text{ pie}^2 \times \frac{929.03 \text{ cm}^2}{1 \text{ pie}^2}$$

$$A_1 = 8519047.47 \text{ cm}^2$$

$$A_1 = 8.52 \times 10^6 \text{ cm}^2$$

Area del cátodo ( $A_c$ ), zona total revestida con platino.

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d h$$

$$A_c = \pi d \left[ \frac{d}{4} + h \right] \dots \dots \dots (14)$$

**TABLA Nº 10**

AREA CATODO PARA  $h = 11$

Ac		d	
1.44	pie <sup>2</sup>	1,338.97 cm <sup>2</sup>	1/2
2.163	pie <sup>2</sup>	2,009.41 cm <sup>2</sup>	3/4
2.885	pie <sup>2</sup>	2,680.25 cm <sup>2</sup>	1
4.332	pie <sup>2</sup>	4,024.52 cm <sup>2</sup>	1 1/2
5.781	pie <sup>2</sup>	5,371.10 cm <sup>2</sup>	2

TABLA N<sup>o</sup> 11

Trabajando con tabla N<sup>o</sup> 10 y ecuación N<sup>o</sup> 7 se forma tabla N<sup>o</sup> 11, usando criterio figura N<sup>o</sup> 10A

d DIAMETRO ELECTRODO (Pu1)	R = R <sub>1</sub> RESISTENCIA ELECTROLITO (Ω)	* Re RESISTENCIA EXTERNA (Ω)
1/2	4.715x10 <sup>-2</sup>	4.55x10 <sup>-4</sup>
3/4	4.465x10 <sup>-2</sup>	-----
1	4.287x10 <sup>-2</sup>	1.14x10 <sup>-4</sup>
1 1/2	4.037x10 <sup>-2</sup>	-----
2	3.859x10 <sup>-2</sup>	-----
3	3.609x10 <sup>-2</sup>	-----
4	3.432x10 <sup>-2</sup>	-----

\* Re: No se tiene en cuenta para los cálculos.

Trabajando en Tanque de Acero Estructural A-36 Y con Acido Sulfúrico Concentrado (95% - 98%)

Corriente (i<sub>a</sub>) en el ánodo para alcanzar la pasividad:

$$I_a = i_a \times A_1$$

Area interior del tanque (A<sub>1</sub>)

Densidad de corriente (i<sub>a</sub>) para alcanzar la pasividad:

$$A_1 = 8.52 \times 10^6 \text{ cm}^2$$

$$i_a = 2.40 \times 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

$$I_a = 2.40 \times 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \times 8.52 \times 10^6 \text{ cm}^2$$

$$I_a = 20.45 \text{ A}$$

$$A_2 = 0.31 \text{ V}$$

Corriente en ánodo para mantener la pasividad,

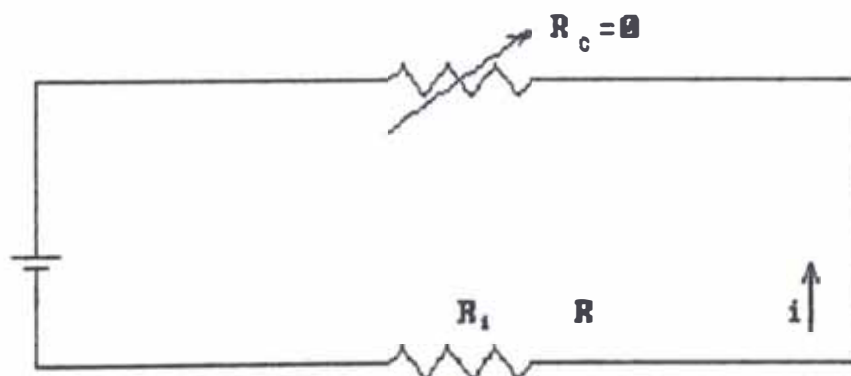
$$I_p = 3.31 \times 10^{-9} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \times 8.52 \times 10^6 \text{ cm}^2$$

$$I_p = 0.282 \text{ A}$$

$$A_1 = -0.195 \text{ V}$$

### 3.10 Instalación del Circuito Eléctrico:

En el sistema la intensidad de corriente va a pasar a través de la resistencia interna ( $R_i$ ) y de la resistencia externa ( $R_e$ ) ya que la instalación es en serie, ver figura 10A.



**FIGURA # 10A**  
**CIRCUITO DE INSTALACION**

### 3.11 Polarización del Cátodo:

En este caso he tomado la curva de equilibrio de polarización obtenida en el laboratorio por los investigadores de la materia -P. Neufeld y R.C. Willomson Imperial College, University of London- de una probeta de cobre revestida con platino que hace de ánodo y el cátodo es la probeta normal de platino, uso ácido sulfúrico a 96%, la Figura N<sup>o</sup>10 muestra los resultados de corriente por unidad de superficie en escala logarítmica y el potencial en el cátodo en mV.

Analizando la aplicación práctica, real en nuestro caso la corriente que circula en el ánodo y cátodo es la misma.

Luego la densidad de corriente para alcanzar y mantener la pasividad. Se calcula y se compara con los valores de la Figura N<sup>o</sup> 10, permitiendo leer los potenciales para alcanzar y mantener la pasividad en el cátodo.

Densidad de corriente en el cátodo para alcanzar la pasividad ( $i_a$ ).

$$i_a = I_a / A_c$$

$$A_c = \text{Area cátodo, con } d = 1 \text{ pul,}$$

$$L = 11 \text{ pies}$$

$$A_c = 2680.25 \text{ cm}^2$$



$$i_a = 20.45 \text{ A} / 2680.25 \text{ cm}^2$$

$$i_a = 7.6 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2.$$

Densidad de corriente en el cátodo para mantener la pasividad ( $i_p$ ):

$$i_p = 0.282 \text{ A} / 2680.25 \text{ cm}^2$$

$$i_p = 1.1 \times 10^{-4} \text{ A /cm}^2$$

Potencial en cátodo, ver curva de polarización

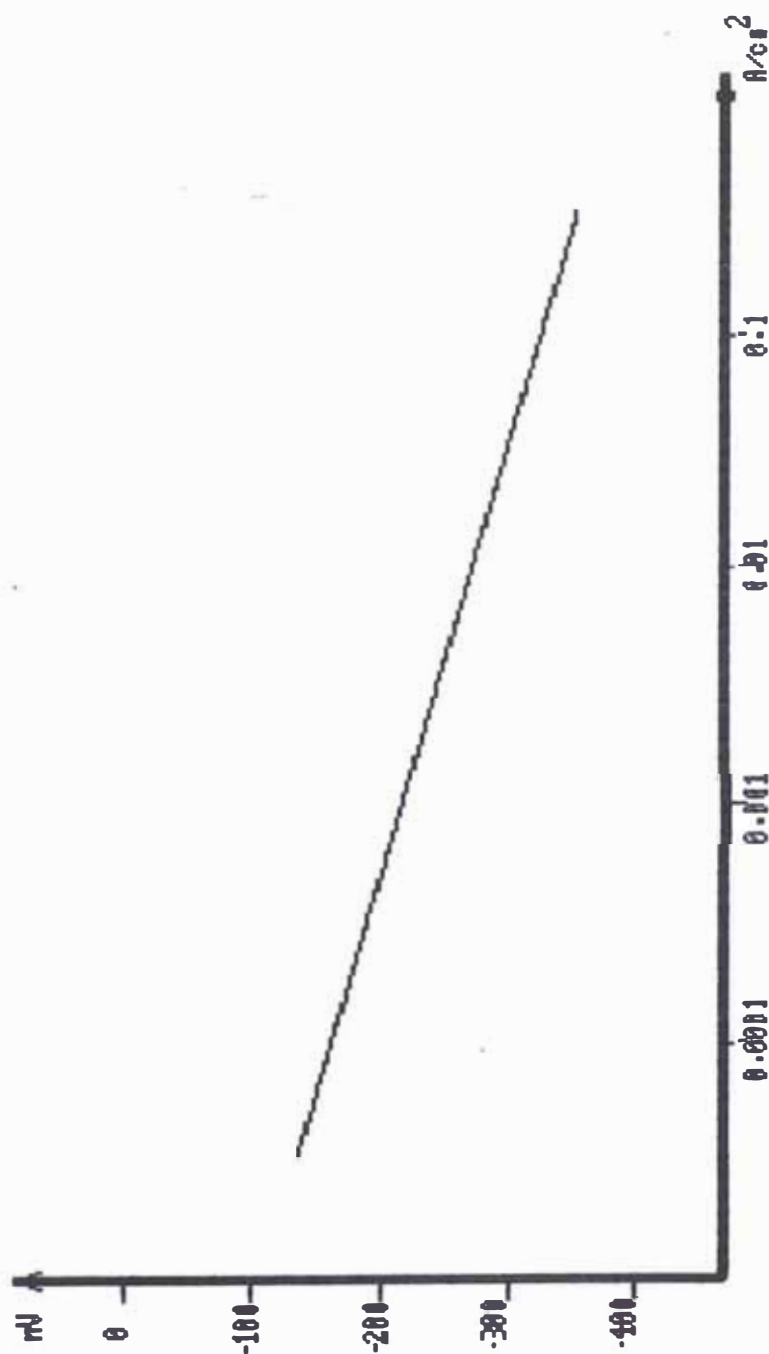


FIGURA #10

CURVA DE POLARIZACION DE EQUILIBRIO EXPERIMENTAL,  
TIEMPO DE EQUILIBRIO 1 min. APROX, AREA  
MUESTRA 1.6 cm<sup>2</sup> ACIDO SULFURICO 96 %

$$C_A = - 0.24 \text{ V}$$

$$C_P = - 0.11 \text{ V}$$

Para determinar si el método es aplicable directamente, debe cumplir lo siguiente:

$$(C_P - C_A) + (i_A - i_P)R \leq A_2 - A_1$$

$$R = 4.287 \times 10^{-2} \Omega$$

$$(-0.11 + 0.24) + (7.6 \times 10^{-3} - 1.1 \times 10^{-4}) \times 4.287 \times 10^{-2} \leq 0.31 + 0.195$$

$$0.12 \leq 0.505 \text{ V OK!!}$$

### 3.12 Optimización del Sistema:

Cambio el área revestido con platino del cátodo.

$$A_C = 1338.97 \text{ cm}^2, \text{ para } d = 1/2 \text{ pul, } L = 11 \text{ pie}$$

$$R = 4.715 \times 10^{-2} \Omega$$

luego:

$$i_A = 20.45 \text{ A} / 1338.97 \text{ cm}^2 = 1.53 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$$

$$i_P = 0.282 \text{ A} / 1338.97 \text{ cm}^2 = 2.1 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$$

$$C_A = - 0.25 \text{ V}$$

$$C_P = - 0.12 \text{ V}$$

Debe cumplir:

$$(-0.12 + 0.25) + (1.53 \times 10^{-2} - 2.1 \times 10^{-4}) 4.715 \times 10^{-2} \leq 0.31 + 0.195$$

$$0.1307 \leq 0.505 \text{ V OK!}$$

2º Cambiando la longitud del cátodo

$$L = 5 \text{ pies, } d = 1/2 \text{ pul.}$$

$$A_C = \pi \times \frac{0.5}{12} \left[ \frac{0.5}{12} + 5 \right] = 6.6 \times 10^{-1} \text{ pie}^2$$

$$A_c = 613.16 \text{ cm}^2$$

$$R = \frac{13 \times 10^{-2}}{2\pi \times 5 \times 0.3048} \ln \left[ \frac{86.686}{0.5/12} \right] = 10.4 \times 10^{-2} \Omega$$

$$R = 0.104 \Omega$$

Luego:

$$i_a = 20.45 \text{ A} / 613.16 \text{ cm}^2 = 0.0334 \text{ A} / \text{cm}^2$$

$$i_p = 0.282 \text{ A} / 613.16 \text{ cm}^2 = 0.00046 \text{ A} / \text{cm}^2$$

$$C_a = -0.26 \text{ V}$$

$$C_p = -0.13 \text{ V}$$

Debe cumplir:

$$(-0.13 + 0.26) + (0.0334 - 0.00046) \times 0.104 \leq 0.505 \text{ V}$$

$$0.153 \leq 0.505 \text{ V OK!}$$

30 Bajando la longitud del cátodo hasta

$$L = 1 \text{ pie}, d = 1/2 \text{ pul.}$$

$$A_c = \pi \times \frac{0.5}{12} \left[ \frac{0.5}{12} + 1 \right] = 1.36 \times 10^{-1} \text{ pie}^2$$

$$A_c = 126.35 \text{ cm}^2$$

$$R = \frac{13 \times 10^{-2}}{2\pi \times 1 \times 0.3048} \ln \left[ \frac{86.686}{0.5/12} \right] = 0.519 \Omega$$

$$R = 0.519 \Omega$$

Luego :

$$i_a = 20.45 / 126.35 = 0.162 \text{ A} / \text{cm}^2$$

$$i_p = 0.282 / 126.35 = 0.0022 \text{ A} / \text{cm}^2$$

$$C_a = -0.33 \text{ V}$$

$$C_p = -0.18 \text{ V}$$

Debe cumplir:

$$(-0.18 + 0.33) + (0.162 - 0.0022) \times 0.519 \leq 0.505 \text{ V}$$

$$0.223 \leq 0.505 \text{ V}$$

Por tanto, es posible aplicar la protección anódica.

El potencial máximo aplicado que se requiere para conseguir la pasividad está dada por:

$$V_a = A_1 - C_a + I_a R$$

$$V_a = -0.195 + 0.32 + 20.45 \times 0.519$$

$$V_a = 10.7 \text{ V}$$

La corriente máxima necesaria para lograr la pasividad está dada por:

$$10.7 = -0.195 + 0.32 + I \times 0.519$$

$$I = 21 \text{ A.}$$

**TABLA Nº 12**

Diámetro Cátodo (pul)	Longitud Cátodo (pie)	Resisten Interna ( $\Omega$ )	Potencial Máximo (V)	Corriente Máxima (A)
1/2	1	0.519	10.7	21
1/2	5	0.104	2.2	21
1/2	11	0.04715	1.4	29
1	11	0.04287	0.9	21

El potencial mínimo óptimo aplicado que se requiere para mantener la pasividad, está dado por:

$$V_p = A_2 - C_p + I_p R$$

$$V_p = 0.31 + 0.13 + 0.282 \times 0.104 = 0.469 \text{ V}$$

$$V_p = 0.47 \text{ V}$$

Corriente mínima óptima que se requiere para mantener la pasividad está dado por:

$$0.47 = 0.31 + 0.13 + I_p \times 0.104$$

$$I_p = 0.29 \text{ A}$$

### 3.13 Velocidad de Corrosión:

Conociendo la intensidad de corriente a que se disuelve un metal o aleación, se puede calcular la velocidad de corrosión expresado en  $\text{gr/m}^2 \cdot \text{año}$ ,  $\text{mm/año}$ ; interviniendo la Ley de Faraday.

La Ley de Faraday establece que para disolver un equivalente gramo de un metal se precisan 96500 coulombios aproximadamente y se llama constante de Faraday.

El cual permite relacionar la velocidad corrosiva del metal o aleación con la intensidad de corriente que circula por la pila de corrosión.

La velocidad de corrosión está dado por:

$$V_{\text{corr. disol.}} = \frac{P.\text{eq.metal}}{F} \times I_{\text{corr.}} \dots\dots\dots(15)$$

$$V_{\text{corr. Penet.}} = \frac{P.\text{eq.metal}}{D.F} \times I_{\text{corr.}} \dots\dots\dots(16)$$

19 En nuestro medio el ácido sulfúrico concentrado (95 - 98%) se almacena en tanques de acero inoxidable AISI 304. Esto es porque a esa concentración el ácido no ataca prácticamente al acero inoxidable AISI 304, es decir:

$$V_{\text{corr}} \approx 0$$

20 El acero estructural A.36 tiene un peso equivalente gramo de 27.9 y una densidad de 7.8 gr/cm<sup>3</sup>.

Luego:

$$V_{\text{corr.}} = \frac{27.9}{96500} \times \frac{21}{8.52 \times 10^6} = 7.13 \times 10^{-10} \text{ gr/cm}^2\text{-s}$$

$$V_{\text{corr.}} = 1.1 \times 10^{-7} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2\text{-h}} = 9.38 \text{ gr/m}^2\text{-año} \dots\dots(*)$$

$$V_{\text{corr.}} = \frac{V_{\text{corr. disol.}}}{D} = \frac{7.13 \times 10^{-10}}{7.8} = 9.14 \times 10^{-11} \text{ mm/s}$$

$$V_{\text{corr. Penet.}} = 2.87 \times 10^{-2} \text{ mm/año.}$$

### Vida Teórica del Tanque:

Sólo se daría si es que se hiciera un tratamiento perfecto y se cumple la Ley Parabólica, me refiero a la relación conocida del Filling y Bedworth:

$$\text{Relación de F y B} = \frac{W. d}{w. D} \dots\dots\dots (17A)$$

W = Peso molecular del óxido,

w = Peso formula del metal,

D = Densidad del óxido,

d = Densidad del metal;

Si:  $P$  y  $B < 1$  Tiene óxido poroso, no forma película protectora.  
 $P$  y  $B > 1$  El óxido es continuo.

TABLA Nº 13

RELACIONES DE PILLING Y BEDWORTH PARA OXIDOS			
Aluminio	1.28	Hierro	2.06
Bario	0.78	Litio	0.60
Cadmio	1.32	Magnesio	0.84
Calcio	0.78	Manganeso	2.07
Cesio	0.42	Niquel	1.68
Cinc	1.59	Plomo	1.31
Circonio	1.55	Potasio	0.51
Cobalto	2.10	Silicio	2.04
Cobre	1.70	Sodio	0.32
Cromo	3.92	Torio	1.36
Estaño	1.33	Volframio	3.30
Estroncio	0.69		

$$\frac{dy}{dt} = K \frac{1}{y} \dots\dots\dots (17)$$

y = Espesor de la capa de óxido,

t = Tiempo,

K = Constante

$$y \, dy = K \, dt \implies Y^2 = Kt \dots\dots\dots (2*)$$

$$\boxed{Y^2 = Kt.} \dots\dots\dots (18)$$



donde:

$$Y : \text{gr/cm}^2$$

$$t : \text{Horas}$$

$$K : \text{Cte.}$$

$$t = 1 \text{ año} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 8760 \text{ horas}$$

de (\*):

$$y = 1.1 \times 10^{-7} \text{ gr/cm}^2$$

$$t = 1 \text{ h}$$

$$k = ?$$

Luego :

$$(1.1 \times 10^{-7})^2 = K \times 1$$

$$k = 1.21 \times 10^{-14}$$

Asumiendo que el peso del hierro en óxido es igual al peso del acero en  $1 \text{ cm}^2$ , cuando se perfora la plancha.

$$W = 7.8 \text{ gr/cm}^3 \times 1 \text{ cm}^2 \times (5/16 \times 2.54 \text{ cm})$$

$$W = 6.19 \text{ gr.}$$

$$y = 6.19 \text{ gr/cm}^2$$

$$k = 1.21 \times 10^{-14}$$

$$t = ?$$

$$\therefore t = (6.19)^2 / 1.21 \times 10^{-14} = 3.17 \times 10^{14} \text{ h. de vida.}$$

### 3.14 Instalación del Sistema de Protección Anódica:

Generalmente la disposición del cátodo es el centro geométrico del tanque y se coloca interiormente y se completa el sistema de protección anódica instalando el banco de baterías, fuente de generación de energía con transformador y su rectificador de corriente alterna a continua conectando con el cable tipo WS para soldadora. Ver planos N<sup>o</sup> I y II.

### 3.15 Resumen:

Sobre la base de cálculos se necesita en la instalación y construcción del tanque de acero estructural A-36 lo siguiente:

- 1 Banco de 4 baterías de 12 V cada batería conectada en paralelo (energía de emergencia).
- 1 Cargador de baterías.
- 1 Fuente de generación de energía con transformador y rectificador de corriente alterna a corriente continua.
  - Voltaje ajustable 0 a 12 V
  - Corriente continua 0 a 50 A
  - Escala de precisión 0.1
- 1 Multitester digital para control de mayor precisión.
- 25 metros (82 pies) cable para soldadora tipo WS, normas de fabricación ASTM B174.

1 Cátodo.

1 barra de cobre 17' x 1/2"

- Preparar la barra de cobre cilindrando con torno hasta 3/8" de diámetro a lo largo de 11' - 10"

- Revestir con platino (5' - 2") x 1/2' incluyendo la sección del extremo.

- Revestir con resina resistente el ácido sulfúrico los (11' - 10") x 3/8" + 2" x 1/2" ;

Ver plano N<sup>o</sup> I.

#### Peso de Platino (M)

$$D = \frac{M}{V} \implies M = DV \dots\dots\dots (19)$$

$$V = A_L \cdot e + A_F \cdot e = \pi d \cdot L \cdot e + \frac{\pi d^2 \cdot e}{4}$$

e : Espesor de platino,

e = 0.0001 pul, recomendación

$$V = \pi \cdot d \cdot e \cdot \left( L + \frac{d}{4} \right) \dots\dots\dots (20)$$

$$L = 62 \text{ pul.}$$

$$d = 1/2 \text{ pul.}$$

$$V = \pi \times 0.5 \times 0.0001 \left( 62 + \frac{0.5}{4} \right) \text{ pul}^3$$

$$V = 0.0098 \text{ pul}^3 \times \frac{16.387 \text{ cm}^3}{1 \text{ pul}^3} = 0.1606 \text{ cm}^3$$

$$V = 0.1606 \text{ cm}^3$$

$$D = 21.4 \text{ gr/cm}^3$$

luego:

$$M = 21.4 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times 0.1606 \text{ cm}^3$$

$$M = 3.5 \text{ gr.}$$

- Anillos de Rigidez (2 anillos atiesadores).

Usar:

28 L 20' x 3" x 3/8"

- Fondo Tanque:

Usar:

50 Ft. 20 x 6 x 5/16

4 Ft 8 x 4 x 5/16

- Casco tanque:

Usar:

28 Ft 20 x 6 x 5/16

- Tapa Tanque

Usar:

50 Ft 20 x 6 x 5/16

5 Ft 8 x 4 x 5/16

Total Planchas: 128 5/16 x 6x20 y 9 5/16 x 4 x 8

- Bridas para Monhole.

2 juegos.

- Sistema para control nivel de líquido.

1 juego.

- Vigas

Exteriores: 48 [ 7" x 9.8 # x 22.35"

Interiores: 24 [ 7" x 9.8 # x 22.343'

Polígono exterior: 8 [ 15" x 33 # x 19.52'

- Columnas:

Exteriores: 8I 20' x 8.2 # 6"

Arriostres: 8 [ 19.52 x 8.2 # 6"

Principal : 2 [ 15.612' x 8.2 # x 6"

- Escalera: 1 escalera de gato

- Cimentación: piso para sentar el tanque.

## CAPITULO 4

### 4.0 PRUEBA EXPERIMENTAL

El presente trabajo de protección anódica en tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico se ha desarrollado usando técnicas electroquímicas, fundamentalmente el trazado de curvas de polarización.

Las dificultades que presenta son muchas; pues se busca construir tanques de almacenamiento con materiales de producción nacional. Por ello se ha realizado la prueba experimental con probetas de acero inoxidable AISI 304 y con probetas de planchas de acero estructural, además no siempre se tendrá ácido sulfúrico al 95 ó 98% de pureza; se realizaron los ensayos en etapas con las siguientes concentraciones, como se muestra en la tabla Nº 2.

TABLA Nº 2

ACIDO SULFURICO	
Nº	CONCENTRACIONES (% EN PESO)
01	95 - 98
02	80
03	67
04	40

#### **4.1 Laboratorios:**

Las pruebas de laboratorio fueron desarrolladas en el Laboratorio de corrosión de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Es necesario mencionar que el laboratorio cuenta con el instrumental mínimo necesario para poder evaluar y estudiar problemas relacionados a la físico-química de superficies, corrosión, inhibición, pasivación, en lo referente a problemas relacionados con la metalurgia física de aleaciones de base de hierro. La preparación de las probetas se realizó en el laboratorio de materiales de fabricación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### **4.2 Materiales:**

##### **4.2.1 Probetas:**

En todas las pruebas de laboratorio se utilizaron como probetas de trabajo las siguientes:

Probetas de plancha de acero inoxidable AISI  
304

- Probetas de plancha de acero estructural

El primer acero es importado de Japón y el segundo es producido por Sider-Ferú; las

probetas fueron preparadas mediante operaciones de banco; pulidos con lijas de finura creciente y sometidas a limpieza con agua y acetona.

#### **Composición química de la probeta:**

La composición química del acero inoxidable SAE 304 es:

C % : 0.08 máx.,  
Mn % : 2.00 máx.,  
Si % : 1.00 máx.,  
Cr % : 18 a 20,  
Ni % : 8 a 12 ,  
otros % : 0.

- La composición química del acero estructural producido por Sider-Perú es:

TABLA Nº 3

ACERO ESTRUCTURAL: A36				
DESIGNACION SIDER PERU			EQUIVALENCIA APROXIMADA	
			ITINTEC 341-083	ASTM
Z C O M P O S I C I O N  C U C H A R A  Q U I M I C A	PG - E24		EG - 26	A - 36
	C. M A X	0.25	0.25	0.25
	P M A X	0.040	0.040	0.040
	S M A X	0.050	0.050	0.050

#### 4.2.2 Preparación de Probetas:

Se prepararon las probetas de acuerdo al material existente.

Numero: probetas de acero 140x.304 : 8

Dimensiones: se dan en la figura Nº 6 y tabla



Forma: triangular redondeada en los vértices  
ver figura N<sup>o</sup> 6 y 7

Número de probetas estructurales: 8.

Dimensiones: se dan en la figura N<sup>o</sup> 6 y tabla  
N<sup>o</sup> 4

Forma: rectangular redondeada en los vértices  
ver figuras N<sup>o</sup> 6 y 7

#### 4.2.3 Celda Elctrolítica:

La celda electrolítica con múltiples entradas preparada exclusivamente para esta prueba es de vidrio de 60 mm.ϕ x 80 mm.H, con tapa hermética.

Electrodo de referencia: La semipila de calomelano.

El calomelano es el electrodo de referencia normal para el uso en el laboratorio se compone de mercurio en equilibrio con  $Hg_2^{++}$ , estando determinada su actividad por la solubilidad del  $Cl_2Hg_2$  (cloruro de mercurioso o calomelanos).

la reacción de semipila es:



$$E^o = - 0.268 \text{ V}$$

Como el ácido sulfúrico es muy corrosivo, para proteger el bulbo del calomelanos, se prepara la sustancia química de igual característica que la envolvente del bulbo del calomelano, haciendo uso del agar-agar con cloruro de potasio que luego se deposita en una probeta de vidrio preparada especialmente para este fin y trabaja como puente salino. Luego, cada vez que se hacen las pruebas o ensayos se coloca el calomelano en contacto con la sustancia química.

#### **4.2.3.1 Electrólito:**

Es muy importante conocer el comportamiento del ácido sulfúrico en sus diferentes concentraciones en porcentaje en peso y usos. Según menciona el autor Choppin (# 16) El ácido sulfúrico es al mismo tiempo un ácido fuerte, cuando está concentrado tiene la propiedad adicional de su gran afinidad por el agua. Forma cuatro hidratos cristalinos,  $H_2SO_4 \cdot xH_2O$ , en donde x vale 1, 2, 3, ó 4; el ácido sulfúrico se usa en la metalurgia en el decapado del hierro,

acero y en el procesado de metales no ferrosos, etc.

El ácido sulfúrico concentrado que se produce en la industria tiene las siguientes características:

Concentración	95 a 98%
Aspecto configuración a prueba	A CS
Gravedad específica	1.84

Este ácido sulfúrico con sus características es manipulable y transportable; pero al cambiar las características anteriores, es decir si se baja la concentración por ejemplo, el ácido se vuelve más corrosivo; y el punto crítico de concentración de mayor corrosividad es a 67%.

# POTENCIOSTATO WENKING POS-MODEL 73

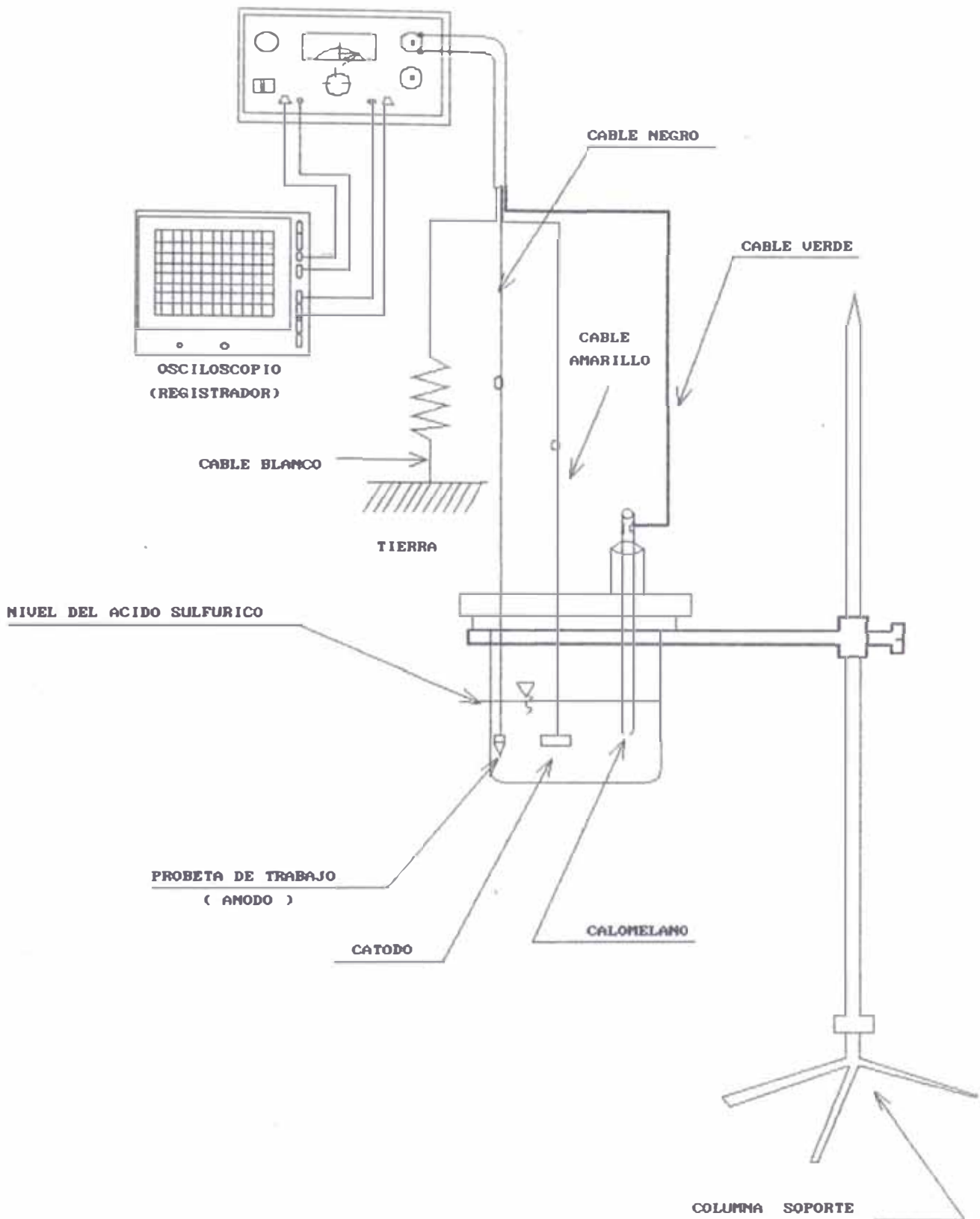


FIGURA # 5

DISPOSICION DE EQUIPOS PARA MEDIDAS ELECTRICAS  
Y/O DETERMINACION DE CURVAS DE POLARIZACION

#### 4.2.4 Potenciostato:

Wenking : Modelo Pos-73

Características:

Impedancia de entrada: Mayor que  $10^8$  mega-ohm

Límites de operación: + 80 volt., + 1.2 amp.

+ 6.5 volt., + 1.0 amp.

Potencia máxima de entrada : 65 watts

Registro de corriente: Desde 0.01 micro-amp.

hasta 1 amp.

Barrido de potenciales:

Máximo rango de barrido: + 10 volt.

Modalidades: Barrido unidireccional de retorno simple y cíclico.

Velocidad de barrido: Desde 0.01 m volt/seg.

hasta 10 K volt/seg.

La conexión a la celda electroquímica se hace teniendo en cuenta el color de los terminales de los conductores eléctricos de salida del potenciostato, siguiendo el siguiente orden:

<b>Electrodo</b>	<b>Color de terminales</b>
Calomelanos (de referencia)	verde
De control (de platino)	Amarillo
De trabajo	Negro
Tierra	Blanco

Después de haber completado la conexión del potenciostato a la celda electroquímica se pasa a la parte de manejo y control de intensidad de corriente y potencial según la necesidad que va en función al tipo de material utilizado en la probeta de trabajo (ánodo).

#### **4.3 Metalografía:**

SISTEMAS DE FULIDO: Buehler/ecomet

MANUAL: lijas adhesivas abrasivas.

MECANICO: Fulidora de disco con velocidad, paños microlat, abrasivo alúmina.

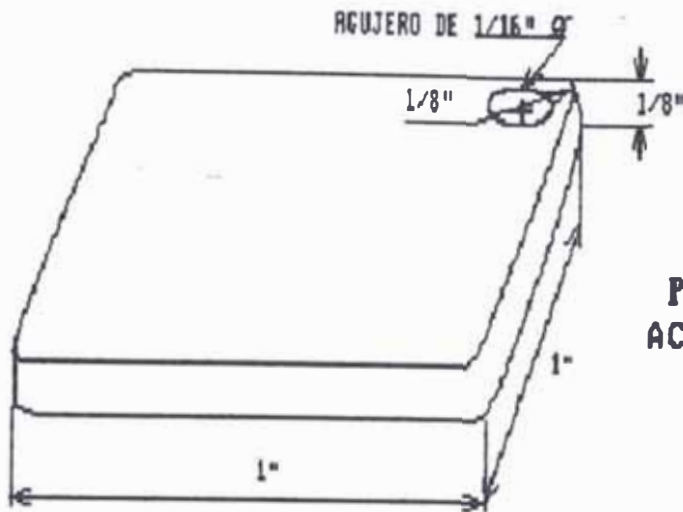
METALOGRAFIA OPTICA

MICROSCOPICO METALOGRAFICO: Ortholux

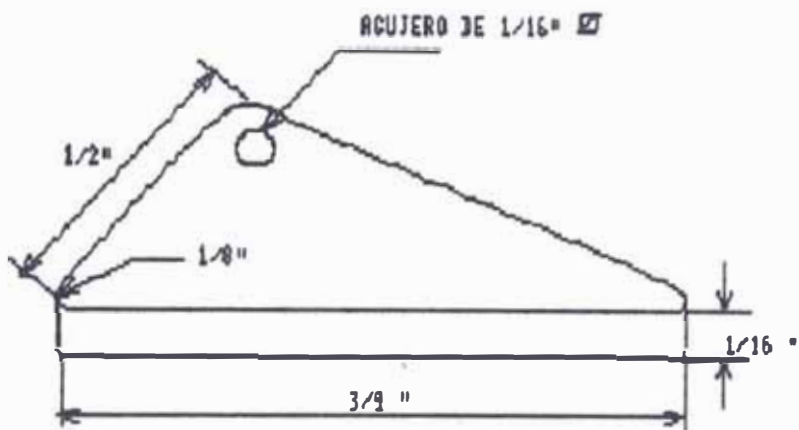
AUMENTOS: 50,100

#### **4.4 Ensayos en Probetas:**

En las probetas se pasó brocas de 1/16"Ø como se muestra en la figura N° 6 y en el agujero se instala el conductor eléctrico, las probetas preparadas se conservan en ambiente de laboratorio hasta su uso introduciéndolas en el electrolito (ácido sulfúrico).



**PLANCHA DE  
ACERO ESTRUC.  
A-36**



**PLANCHA DE ACERO INOX. 304**

**FIGURA # 6**

#### 4.5 Procedimiento Experimental:

##### Curvas de Polarización:

Las probetas de acero preparadas, limpiadas con agua destilada y acetona se colocan en la celda electrolítica de ácido sulfúrico, una probeta preparada de plancha de acero INOX.304 y una probeta preparada de plancha de acero estructural A36 independientemente para las concentraciones de 95 ó 98%, 80%, 67%, y 40% respectivamente.

Con el potencióstato Wenking Pos-model y el osciloscopio acoplado; a una velocidad de barrido variable desde 1 mV/seg a 100 mV/seg, en el rango de 0 mV a 2000 mV, se trazarán las curvas de polarización; estas curvas de polarización  $I(\text{corriente})$  en función del potencial  $E$ , se registrarán una vez diariamente con velocidades de activación en el rango arriba mencionadas. Las curvas obtenidas siguieron la tendencia de las curvas estudiadas por investigadores en el campo de corrosión, con lo cual permite establecer la aplicación o no del método de protección Anódica para dichos materiales de probetas.



#### 4.6 Resultados de Prueba Experimental:

Las figuras N<sup>o</sup> 8 y 9 representa las curvas de polarización de las pruebas con las probetas del acero INOX.304 y probetas de acero estructural A36 con electrolito a distintas concentraciones. Ver tabla N<sup>o</sup> 5, 5A , 6 y 6A.

La tendencia de las curvas mostradas en el osciloscopio, muestra el comportamiento del acero en el electrolito a la respectiva concentración del 95% ó 80% ó 67% ó 40% de ácido sulfúrico aplicado.

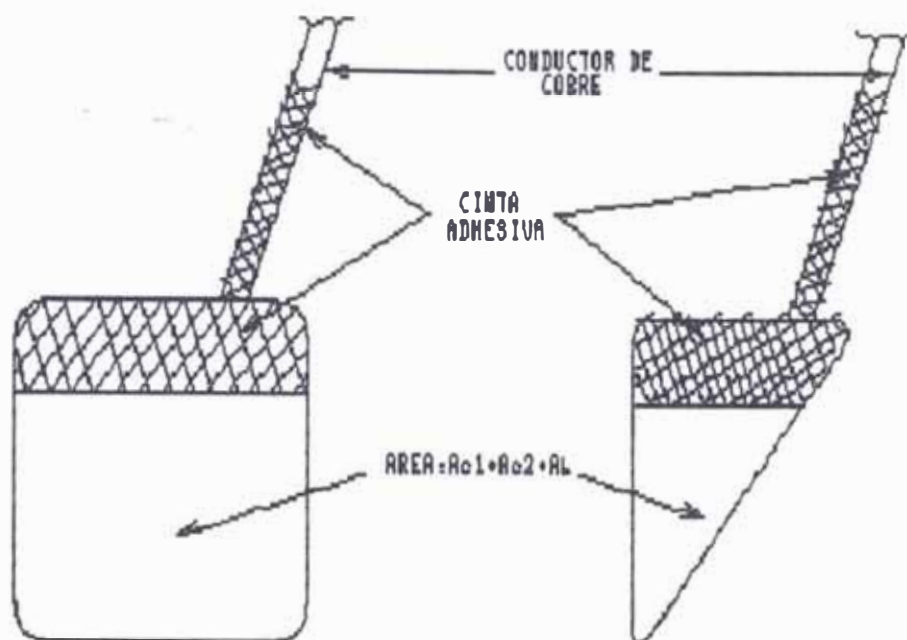
La figura N<sup>o</sup> 9 corresponde al acero estructural en ácido sulfúrico ver tablas N<sup>o</sup> 6 y 6A, al realizar las pruebas experimentales, aplicando la corriente, se observó al inicio formación y desprendimiento de burbujas de oxígeno alrededor del electrodo de trabajo, evidenciando ésto la ruptura de la capa pasiva ya que las burbujas que se desprenda son de **oxígeno** dando lugar al paso de una **aparente** pasividad a la transpasividad.

Con las figuras N<sup>o</sup> 8 y 9 obtenidas en el laboratorio se pueden resumir las tablas 5 y 6 respectivamente; posteriormente con las tablas N<sup>o</sup> 4, 5 y 6 se obtuvieron las tablas N<sup>o</sup> 5A y 6A respectivamente, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$i = \frac{I}{\text{Area}} \dots\dots\dots (20B)$$

TABLA Nº 4

Nº	PROBETAS A-36 AREAS (Cm <sup>2</sup> )	PROBETAS AISI 304 ACERA (Cm <sup>2</sup> )
1	6.6532	3.6292
2	7.0564	3.8311
3	7.2580	4.2337
4	7.6613	3.4274



PROBETA DE ACERO A - 36

PROBETA DE ACERO AISI 304

$$A_{rea} = A_{o1} + A_{o2} + A_b \dots\dots\dots (20A)$$

$A_{o1}$  = Área cara lateral

$A_{o2}$  = Área cara posterior

$A_b$  = Área del Borde

### FIGURA 8 7

### ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS

T A B L A No 5

A C E R O I N O X I D A B L E A I S I 3 0 4						
PROBETA Nº	ACIDO SULFURICO (% a 24°C)	CORRIENTE PARA ALCANZAR LA PASIVIDAD (A)	CORRIENTE PARA MANTENER LA PASIVIDAD (A)	POTENCIAL DE REPOSO (mv)	POTENCIAL FLADE (mv)	POTENCIAL TRANSPASIVO (mv)
1	95-98	$4.5 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-9}$	-900	-610	590
2	80	$6.0 \times 10^{-6}$	$5.8 \times 10^{-9}$	-880	-700	595
3	67	$9.0 \times 10^{-9}$	$6.0 \times 10^{-9}$	-950	-710	380
4	40	$7.5 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-9}$	-920	-680	450

T A B L A No 5 A

A C E R O I N O X I D A B L E A I S I 3 0 4			
PROBETA Nº	ACIDO SULFURICO (% a 24°C)	DENSIDAD DE CORRIEN- TE PARA ALCANZAR LA PASIVIDAD (A/cm <sup>2</sup> )	DENSIDAD DE CORRIEN- TE PARA MANTENER LA PASIVIDAD (A/cm <sup>2</sup> )
1	95-98	$1.24 \times 10^{-6}$	$4.96 \times 10^{-10}$
2	80	$1.57 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-9}$
3	67	$2.13 \times 10^{-9}$	$1.42 \times 10^{-9}$
4	40	$2.19 \times 10^{-6}$	$1.87 \times 10^{-9}$

T A B L A No 6

A C E R O E S T R U C T U R A L A-36						
PROBETA Nº	ACIDO SULFURICO (% a 24°C)	CORRIENTE PARA ALCANZAR LA PASIVIDAD (A)	CORRIENTE PARA MANTENER LA PASIVIDAD (A)	POTENCIAL DE REPOSO (mv)	POTENCIAL FLADE (mv)	POTENCIAL TRANSPASIVO (mv)
1	95-98	$1.6 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-7}$	-410	-195	310
2	80	$5.4 \times 10^{-9}$	$8.1 \times 10^{-7}$	-420	-265	225
3	67	$1.2 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-6}$	-450	-280	250
4	40	$7.0 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-6}$	-430	-270	280

T A B L A No 6 A

A C E R O E S T R U C T U R A L A-36			
PROBETA Nº	ACIDO SULFURICO (% a 24°C)	DENSIDAD DE CORRIEN- TE PARA ALCANZAR LA PASIVIDAD (A/cm <sup>2</sup> )	DENSIDAD DE CORRIEN- TE PARA MANTENER LA PASIVIDAD (A/cm <sup>2</sup> )
1	95-98	$2.40 \times 10^{-6}$	$3.31 \times 10^{-9}$
2	80	$7.65 \times 10^{-6}$	$1.15 \times 10^{-7}$
3	67	$1.65 \times 10^{-9}$	$8.54 \times 10^{-7}$
4	40	$9.14 \times 10^{-6}$	$1.44 \times 10^{-7}$

**CURVAS DE POLARIZACION DEL ACERO  
INOX. AISI 304 A LAS CONCENTRACIONES  
96,80,67 Y 40% DE ACIDO SULFURICO**

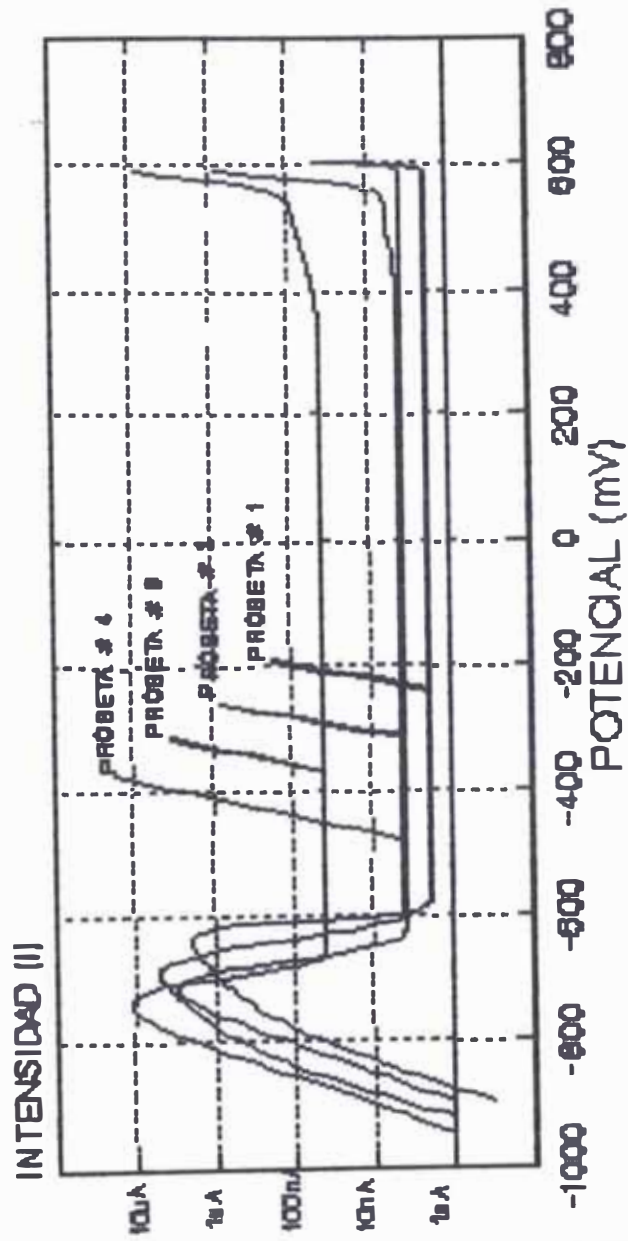


FIGURA # 9

**CURVAS DE POLARIZACION DE ACERO ESTRUCTURAL A-36 EN ACIDO SULFURICO A LAS CONCENTRACIONES 0.6, 0.67 Y 40%**

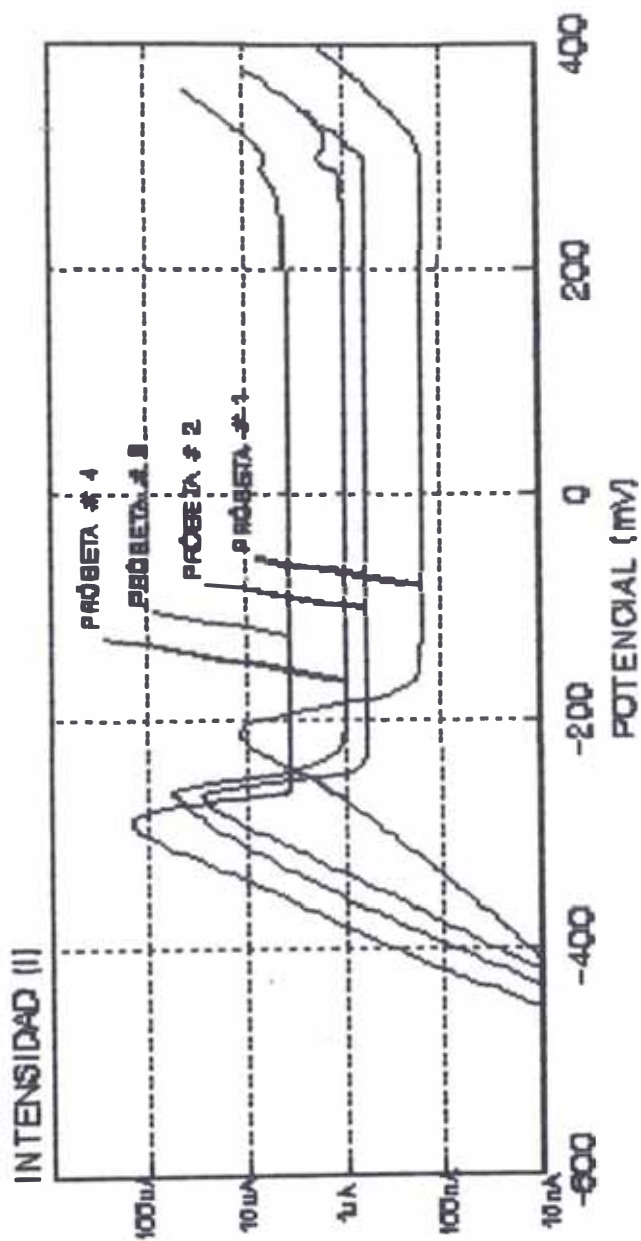


FIGURA #9

## CAPITULO 5

### 5.0 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROTECCION ANODICA

#### 5.1 Ventajas:

De la bibliografía revisada y de las pruebas experimentales realizadas se deslumbran las siguientes ventajas que tendra que el tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico de 2'000,000 de litros de capacidad, sea protegido anódicamente contra la corrosión:

1.- El tanque en estudio, requiere de una densidad de corriente muy pequeña lo que hace bajar notablemente los costos en su operación o trabajo.

La corriente aplicada con este método al tanque de almacenamiento nos indica la medida directa de la protección anódica. Para esto es necesario hacer la regulación continua de corriente para aumentar la seguridad en la protección.

3. La velocidad reducida de formación de la película en la superficie del tanque de almacenamiento mantiene la calidad del producto,



al mismo tiempo reduce la contaminación del ácido sulfúrico almacenado.

- 4.- Se consigue bajar los costos porque al sustituir las planchas de acero inoxidable AISI 304 por planchas de acero estructural A36 protegido anódicamente resulta más barato e igualmente su el mantenimiento porque se reducen los costos de renovación.
- 5.- El método puede aplicarse tanto a tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico que están operando como tanque de almacenamiento nuevos.
- 6.- Las condiciones de operación pueden establecerse rápidamente y con precisión en el laboratorio.

## **5.2 Desventajas:**

De los estudios realizados al tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico se consignan las siguientes desventajas:

- 1.- Al aplicar el método de protección anódica con potenciales situados muy cercanamente por debajo de aquellos potenciales los que comienza la pasividad, la velocidad de corrosión es muy **alta**, lo que quiere decir que la falla del suministro de corriente eléctrica es muy

peligroso y riesgoso, ya que la rotura del tanque de almacenamiento que contiene ácido sulfúrico podría resultar catastrófico. Pero para contrarrestar esta falla de suministro eléctrico y eliminar éste problema se instala un sistema de emergencia de suministro eléctrico que entre en servicio automáticamente.

El costo de la instalación del sistema de protección anódica en el tanque de almacenamiento es elevado, referido principalmente al sistema de suministro de corriente eléctrica, cátodo y elevada densidad de corriente que puede ser precisa para conseguir la pasivación, aunque dicho costo se compensa en cierta medida gracias al empleo de materiales de construcción del tanque de almacenamiento a base de planchas de acero estructural que son mucho más baratos.

3. El método de protección anódica aplicado al tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico depende del paso de una corriente electrolítica por el medio corrosivo; por esta razón la protección anódica no puede aplicarse por encima de la línea de agua.

4.- Costos de instalación relativamente elevados.

## CAPITULO 6

### 6.0 ANALISIS DEL COSTO

Para hacer el análisis del costo a la aplicación del Método de Protección anódica de un tanque para almacenar ácido sulfúrico de 2'000,000 de litros de capacidad, se tiene que tener en consideración si el sistema aplicado para controlar la corrosión debe ser económicamente viable. En éste caso las inversiones de capital en planchas de acero inoxidable AISI 304 para la construcción del tanque de almacenamiento resultan prohibitivas; por lo cual al hacer el cambio de material, la inversión de capital en planchas de acero estructural resulta mucho más económica pero éste tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico sin la aplicación del método tiene una velocidad de corrosión muy elevada lo que conduciría a la contaminación del ácido sulfúrico. Luego, es un buen recurso en lo referente al aspecto económico utilizar en el trabajo de dicho tanque de almacenamiento el método de protección anódico.

Este hecho puede ilustrarse comparando costos de un tanque construido con materiales de acero inoxidable AISI 304 con el tanque construido con

materiales de acero estructural A36 protegido anódicamente.

Dado que se trata de la construcción de un solo tanque y por lo tanto no existe fabricación en serie, el ANALISIS DE COSTO será reducido a la DETERMINACION DE COSTOS DE INSTALACION y CONSTRUCCION.

#### Costo de Energía

Asumiendo 5% del tiempo de un año que se usa en conseguir la pasivación y el 95% del tiempo está la superficie del tanque pasivado; por tanto:

$$t = 1\text{año} = 365 \text{ d} \times \frac{24 \text{ h}}{1\text{d}} = 8760 \text{ h.}$$

$$t_a = \frac{5}{100} \times 8760 \text{ h.}$$

$$t_a = 438 \text{ h.}$$

$$t_p = \frac{95}{100} \times 8760 \text{ h.}$$

$$t_p = 8322 \text{ h.}$$

**Potencia:** para lograr la pasivación

$$P_a = V_a I_a \dots\dots\dots(21)$$

$$P_a = 10.7 \text{ V} \times 21 \text{ A}$$

$$P_a = 225 \text{ W} = 0.225 \text{ Kw}$$

**Energía:**

$$E_a = P_a \cdot t_a \dots\dots\dots (22)$$

$$E_a = 0.225 \text{ Kw} \times 438 \text{ h}$$

$$E_a = 98.55 \text{ Kw-h}$$

**Costo:**

Costo de energía de uso industrial 0.80 \$ /Kw-h

$$\text{Costo}_a = E_a \times \$ /\text{Kw-h} \dots\dots\dots (23)$$

$$\text{Costo}_a = 98.55 \text{ Kw-h} \times 0.80 \$ /\text{Kw-h}$$

$$\text{Costo}_a = 78.84 \$$$

**Potencia :** Par mantener la pasividad .

$$P_p = V_p \cdot I_p \dots\dots\dots (24)$$

$$P_p = 0.47\text{V} \times 0.29\text{A}$$

$$P_p = 0.14\text{W} = 0.00014 \text{ Kw}$$

**Energía:**

$$E_p = P_p \cdot t_p \dots\dots\dots (25)$$

$$E_p = 0.00014 \text{ Kw} \times 8322 \text{ h}$$

$$E_p = 1.17 \text{ Kw-h}$$

**Costo:**

$$\text{Costo}_p = E_p \times \frac{\$}{\text{Kw-h}} \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{Costo}_p = 1.17 \text{ Kw-h} \times 0.80 \frac{\$}{\text{Kw-h}}$$

$$\text{Costo}_p = 0.94 \$.$$

### 6.1 Costo de Energía para Funcionamiento de 1 Año es:

$$\text{Costo} = \text{costo}_a + \text{costo}_e \dots\dots\dots(27)$$

$$\text{Costo} = 78.84 + 0.94$$

$$\text{Costo} = 79.78 \$ \approx 80 \$ \text{ USA}$$

### 6.2 Costo de Mantenimiento Durante un Año

Viene ser el costo de un técnico calificado

Sueldo mes: 300 \$-USA

$$\text{Costo anual sueldo} = \text{meses/año} \times \text{sueldo /mes} \dots(27)$$

$$\text{Costo anual sueldo: } 14 \times 300 = 4,200 \$ \text{ /año}$$

Nota:

Costo de soldadura.

$$\text{EG011: } 2.46 \$ \text{ /kg} + \text{IGV}$$

$$\text{INOX.E-125: } 18.69 \$ \text{ /kg} + \text{IGV}$$

#### Densidad.

$$\text{Acero Inox.304: } 7.9 \text{ gr /cm}^3$$

$$\text{Acero estructural: } 7.86 \text{ gr /cm}^3$$

TABLA Nº 16

COSTO EN \$ - USA POR AÑO DE FUNCIONAMIENTO DEL TANQUE		
DESCRIPCION	ACERO A-36	ACERO INOXIDABLE AISI 304
COSTO TANQUE INSTALADO	329,196	1'130.786
SISTEMA DE PROTECCION ANODICA	920	-----
FORRO DE RESINA	-----	524
ENERGIA ELECTRICA	80	-----
MANTENIMIENTO	4,200	-----
COSTO TOTAL	334,396	1'131,310

### 6.3 Resultado de Costos:

Al comparar costos, hay un ahorro de:

$$\text{Ah} = \text{Costo tanque acero AISI 304} - \text{Costo Tanque protegido} \dots\dots\dots (29)$$

$$\text{Ah} = 1'131,310 - 334,396 = 796,914$$

$$\text{Ah} = 796,914 \quad \$ - \text{USA}$$

- O el costo es: 3.383 veces mayor para el caso del tanque de acero inoxidable AISI 304, por lo que se recomienda usar acero estructural protegido anódicamente.

- Los gastos son netos sin considerar el I.G.V.

## CONCLUSIONES

- 1.- El método de protección anódica sólo es aplicable en metales que muestran en la curva potencioestática la transición activa-pasiva cuando se esté trabajando en ácido sulfúrico de ahí la importancia de obtener el rango de potencial en la zona pasiva en el acero estructural.
2. En las condiciones ambientales de realización de las pruebas experimentales se consigue la pasivación del acero estructural A36 en un margen amplio de potencial, lo que permitiría la aplicación de protección anódica y su control; así como el control del comportamiento del tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico en cuestión.
- 3.- Del experimento se inferiría que la protección anódica del tanque sería efectiva, cuando la construcción de dicho tanque esté hecho con materiales que sean de la misma composición química en su totalidad.
- 4.- La densidad de corriente necesaria para mantener la pasividad de  $1.7 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>, da lugar a costos bajos de mantenimiento, pues con menos de 1 A se protege el tanque de almacenamiento.



- 5.- Para el caso de tanques de almacenamiento usados, para aplicar el método se tiene que incluir en el diseño del sistema un electrodo de referencia.
- 6.- La variación de la concentración de ácido sulfúrico influencia sobre las curvas de polarización del acero estructural A-36.

## RECOMENDACIONES

- 1.- En la instalación de las probetas en la etapa de la prueba experimental se aísla con cinta adhesiva la sección donde está el agujero de instalación del conductor, para evitar que la curva potencioestática sea alterada por el material del conductor.
2. La sección aislada con cinta adhesiva no se tiene en cuenta en el cálculo del área que se utiliza en la determinación de la densidad de corriente ( $A\text{-cm}^2$ ).
- 3.- El cátodo se reviste con platino dos pulgadas extras. Estas dos pulgadas se revisten con resina el resto de la barra de cobre no revestido con platino para darle mayor seguridad al cátodo y evitar filtraciones de ácido por capilaridad.
- 4.- El nivel de la superficie del ácido sulfúrico puede bajar desde los 12 pies hasta 2 pies sobre la base del tanque.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 H. A. WEBSTER  
Como proteger anódicamente la corrosión.  
Procesos químicos de Canadá  
Edición: Marzo de 1963
  
- 2 R. WALKER  
Protección Anódica  
Facultad de Metalurgia, Universidad de Surrey.  
Edición Agosto 1970.
  
- 3 J. D. SUDBURY Y C. E. LOCKE.  
Control Anódica de Corrosión  
Continental oil Co Ponga City, Okla  
Volumen 43 - III  
Edición 1963
  
- 4 P. NEUFELD Y R.C. WILLAMSON  
Protección Anódica en tanques  
ICI División de Agricultura,  
Volumen 5  
Edición 1965, Londres Inglaterra.
  
- 5 ULICK R: EVANS  
Corrosión y Oxidación de Metales  
Ediciones Edward Arnold Ltd, London  
Edición 1971.
  
- 6 UHLIG H. HERBERT  
Corrosión y Control de Corrosión  
Ediciones Urmo, Espartero 10 - Bilbao  
Cambridge, Massachusetts, Noviembre  
de 1962
  
- 7 NORMAS API 650  
Instituto Americano del Petróleo, División de  
Refinación  
Edición: 1979.

- 8 METALS HANDBOOK  
Propiedades y Selección de metales,  
Volumen 1  
Edición 1982.
  
- 9 LIBRO ANUAL DE ASTM STANDARS  
Designación F 483 - 77, Vol 25  
Edición 1977
  
- 10 MANUAL DE AISC  
Acero de Construcción  
Adición: 1976.
  
- 11 SIDERFERU  
Catálogo de productos  
Edición 1978, Lima.
  
- 12 ACEROS AREQUIFA S.A.  
Manual Técnico y Lista de productos  
Edición 1981, Lima.
  
- 13 CATALOGO DURAMETALLIC  
Selección de Sellos Mecánicos  
Edición: Durametalllic Corporation  
1981.
  
- 14 FRANCIS W. SEARS Y MARK W. ZEMANSKY  
Física General.  
Ediciones aguilar S.A. 1969, Madrid.
  
- 15 RICARDO CRESPO ZARATE  
Introducción al diseño Eléctrico  
Edición: 1983, Lima.
  
- 16 GREGORY R. CHOPPIN  
Química  
Publicaciones Cultural S.A.  
Ediciones: 1970, México.