

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera



**“Diseño e Instalación de un Sistema de
Evaluación de Desprendimiento Catódico
para Revestimiento de Tuberías
Enterradas”**

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO QUIMICO**

Carmen G. Huamani Baca

Katia M. Quispe Sandoval

Promoción 87 - II

Lima - Perú

1990

A MIS QUERIDOS PADRES

CARMEN HUAMANI

A MIS QUERIDOS PADRES

KATIA QUISPE

I N D I C E

CAPITULO I

	página
Resumen	1
Conclusiones	3
Recomendaciones	3

CAPITULO II

2.1 PROTECCION CATODICA	6
2.1.1 Definición	7
2.1.2 Métodos de aplicación de la Protección Catódica	7
A.- Protección Catódica con Anodo de Sacrificio Ventajas y desventajas	7
B.- Protección Catódica con corriente impresa Ventajas y desventajas	11
2.2 CAMBIO EN LOS REQUERIMIENTOS DE PROTECCION CATODICA	14
2.2.1 Consumo del ánodo	17
2.2.2 Cambio en la resistividad del electrólito	17
2.2.3 Cambio en la corriente requerida para Protección Catódica	18
2.2.4 Resistor Variable	21

CAPITULO III

3.1 GENERALIDADES	24
3.2 PREPARACION DE LA SUPERFICIE METALICA	25
3.2.1 Métodos de preparación de superficie	25
3.3 PROPIEDADES REQUERIDAS POR LOS RECUBRIMIENTOS	29

3.4	CORROSION A TRAVES DEL RECUBRIMIENTO	33
3.4.1	Condiciones para que ocurra la corrosión a través del recubrimiento	36
3.5	CARACTERISTICAS DE UN BUEN RECUBRIMIENTO	36
3.6	LA PROTECCION CATODICA EN ESTRUCTURAS METALICAS RECUBIERTAS	37
3.7	COMPATIBILIDAD DEL RECUBRIMIENTO CON LA PROTECCION CATODICA	39
3.8	RECUBRIMIENTOS USUALES EN SISTEMAS CON PROTECCION CATODICA	43
3.9	RECUBRIMIENTOS MAS USADOS EN PROTECCION CATODICA	43
3.9.1	Tipos, características y limitaciones de los recubrimientos	47
	A.- Epoxi-coaltar	47
	B.- Coaltar ó Bituminoso	47
	C.- Recubrimientos a base de zinc	48
	D.- Coaltar epoxi anticorrosivo zinc	53
	E.- Recubrimiento a base de Poliéster y Estireno	53
3.10	ANTECEDENTES EN LA EVALUACION DE RECUBRIMIENTOS ORGANICOS EN SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA	54

CAPITULO IV

4.1	METODOS DE DETECTAR LOS EFECTOS DE LA PROTECCION CATODICA EN LOS RECUBRIMIENTOS ORGANICOS	57
4.1.1	Medición de la resistividad	57
4.1.2	Ensayo de Desprendimiento Catódico	58
4.1.3	The salt CROCK TEST	59
4.1.4	Ensayo de Impedancia con corriente alterna	59
4.2	SISTEMA DE EVALUACION POR DESPRENDIMIENTO CATODICO CON REFERENCIA A LA NORMA ASTM G8-79	60
4.3	AREA DESPRENDIDA	63

CAPITULO V

5.1 CRITERIO PARA LA PROTECCION CATODICA	64
5.1.1 Medidas de Potencial	64
5.1.2 Medidas de corriente	67
5.1.3 Voltajes de Polarización	68
5.2 TOMA DE MEDIDA Y TECNICAS	69
5.2.1 Curvas de Corriente - Potencial	69
5.2.2 Requerimientos de corriente	71
5.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA	74
5.3.1 Sistema Anodo de Magnesio	74
5.3.2 Sistema corriente impresa	82

CAPITULO VI

6.1 REQUERIMIENTOS PARA PRUEBA DE ENSAYO DE LABORATORIO	90
6.1.1 Materiales	90
6.1.2 Equipos	95
6.2 SELLADO DE ESPECIMENES	101
6.2.1 Selección del sello	101
6.2.2 Control de calidad de los especímenes	102
6.2.3 Procedimiento de sellado	102
6.2.4 Prueba de elección de sellado	103
6.3 PREPARACION DE ESPECIMENES	103
6.4 RECUBRIMIENTOS A EVALUAR	104
6.5 INSTALACION DE MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO	106
6.5.1 Materiales	106
6.5.2 Equipos	106

6.5.3	Funcionamiento	108
6.6	INSTALACION DE MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA	110
6.6.1	Materiales	110
6.6.2	Equipos	110
6.6.3	Funcionamiento	112

CAPITULO VII

7.1	RESULTADOS EXPERIMENTALES	116
7.1.1	Técnica experimental Selección de sellos	117
7.1.2	Desprendimiento Catódico	118
7.1.3	Area Desprendida	120
7.1.4	Voltaje de Polarización	124
7.1.5	Consumo de Corriente versus Tiempo	124
7.2	ANALISIS DE LOS RESULTADOS	124
7.3	OBSERVACIONES	129

CAPITULO VIII

8.1	GENERALIDADES	131
8.2	COSTO DE EQUIPOS DE DESPRENDIMIENTO CATODICO	131
	A.- Equipos principales	131
	B.- Equipos auxiliares	132
	C.- Accesorios complementarios	132
	D.- Cuadro Resumen	133
8.3	COSTO DE MATERIALES Y SERVICIO PARA CADA ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO	134
	A.- Costo de ensayo por ánodo de sacrificio	134
	B.- Costo de ensayo por corriente impresa	135

8.4 COSTO TOTAL POR ENSAYO	135
A.- Por Anodo de Sacrificio	135
B.- Por Corriente Impresa	135

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

C A P I T U L O I

RESUMEN , CONCLUSIONES
Y RECOMENDACIONES

RESUMEN

Generalmente las tuberías de acero, enterradas, están sujetas a problemas de corrosión por suelos

La corrosión se debe preferentemente al oxígeno, sales y agua que contienen los suelos . Como es conocido, el suelo es considerado como un electrólito formándose por consiguiente una celda de corrosión con la consecuente pérdida del material de la tubería

Dentro de las técnicas de protección de tuberías enterradas tenemos comúnmente recubrimientos orgánicos e inorgánicos, recubrimientos metálicos, alteración de suelo y protección catódica

El trabajo de la presente tesis es el " DISEÑO E INSTALACION DE UN SISTEMA DE EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO PARA REVESTIMIENTO DE TUBERIAS ENTERRADAS "; a nivel de Laboratorio

La instalación comprenderá dos métodos de protección catódica, uno que utiliza Anodo de Sacrificio y otro con Corriente Impresa

En cualquiera de los métodos se trata de medir la resistencia que presenta la tubería revestida , al ser sometida en un medio altamente conductor (agua natural con 1 % en peso de cada una de las siguientes sales:

Cloruro de sodio, sulfato de sodio, carbonato de sodio), a una diferencia de potencial durante un determinado intervalo de tiempo. Esta resistencia se mide, bien sea por el cambio en la intensidad de la corriente que pasa a través de la tubería o por el deterioro que sufre el enlace entre el metal y el revestimiento en el área que rodea a una perforación; hecha intencionalmente al revestimiento.

El desarrollo del trabajo está basado, al método codificado por la American Society for Testing Materials como ASTM G-8

La evaluación de estos ensayos en el laboratorio será de gran importancia, mayormente para la industria que utiliza una gran variedad de materiales cuyo uso no ha sido normalizado por el fabricante; lo que impide una clasificación del verdadero comportamiento de estos materiales

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Mediante la implementación de una Planta Piloto se ha podido llevar a cabo la evaluación de los recubrimientos a utilizar conjuntamente con el sistema de protección catódica .
2. A pesar de ser el ensayo de Desprendimiento Catódico un ensayo riguroso por exponer al recubrimiento a un medio muy conductor, comparado con los suelos, requiriendo tiempos de ensayo igual o mayores a 30 días . Tiempos mayores a 30 días son utilizados de preferencia debido a que por referencias en algunos casos el lapso de 30 días es insuficiente Para efectos estrictamente comparativos de varios recubrimientos si es aceptable 30 días

Los valores de corriente, una de las variables principales de evaluación para los sistemas ensayados, corresponden a valores que pueden esperarse para estos tipos de recubrimientos.
- 4.- Un aporte importante de este trabajo ha sido evaluar nuevo recubrimiento recientemente introducido en el mercado, esto es el Pipeline Poliéster, el que expuesto a un medio severo demostró condiciones satisfactorias para utilizarlo conjuntamente con Protección Catódica .

- 5.- En la evaluación económica se observa que el costo por recubrimiento es relativamente menor en el Sistema de Anodos de Sacrificio que en Corriente Impresa, sin embargo ya que los resultados en cuanto a desprendimiento producido son similares en ambos sistemas, es preferible la evaluación de los recubrimiento mediante Corriente Impresa ya que esto permite un mayor control de los consumos de corriente
- 6.- Se ha llevado a cabo la evaluación de tubería desnuda. Comprobándose que a pesar de que se protege la tubería mediante Protección Catódica es muy difícil el control de la corriente debido a la oscilación que presenta, con lo que se confirmaría el uso del sistema dual recubrimiento Protección Catódica en la Industria .
- 7.- El contacto eléctrico del espécimen (zona superior) se debe realizar con cuidado evitando que este no dañe el recubrimiento y una vez que el punto de soldadura se realice se debe recubrir con una pasta epòxica para evitar problemas de corrosión.
- 8.- Antes de aplicar cualquier recubrimiento es absolutamente necesario eliminar toda la cascarilla como óxido y grasa mediante el tratamiento de superficie que indique el fabricante. Una vez que el espécimen reciba este tratamiento y si no se realiza de inmediato el recubrimiento hay que cuidar de proteger el espécimen contra el medio ambiente para evitar que se

pierda adherencia.

- 9.- Los recubrimientos a evaluar deben ser recomendados por el fabricante para protección catódica, lo que incluye que el recubrimiento tenga buena adherencia, baja porosidad y con el espesor característico para su uso.
- 10.- El ánodo de magnesio utilizado es del tipo de aleación AZ- 63 con contenido de 6% de aluminio, 3% de Zinc y un 0.2 % de manganeso este último sirve para contrarrestar los efectos nocivos del hierro aunque el hierro, cobre, níquel, estaño y plomo deben siempre mantenerse en bajos porcentajes. Esta aleación de magnesio cumplió con los requerimientos de ensayo pero en caso de usarse otro tipo de ánodo con aleantes similares ha de realizarse ensayos previos para verificar que el potencial suministrado sea el adecuado.
- 11.- Entre los ánodos inertes existentes para corriente impresa hemos utilizado el ánodo platinizado con alma de cobre, pero también es posible usar el Duriron que es el ánodo que la norma sugiere. En nuestro caso se verificó que el ánodo platinizado se adecua perfectamente al ensayo.
- 12.- La implementación del sistema de evaluación de desprendimiento catódico permitirá a la universidad dar prestación de servicios a la industria para evaluación de los diversos recubrimientos para protección catódica.

C A P I T U L O I I

PROTECCION CATODICA

CAPITULO II

2.1 PROTECCION CATODICA

Aunque la primera aplicación práctica de protección catódica data de muchos decenios , su reconocimiento general y su amplia aplicación industrial ha sido tan sólo en el último cuarto de siglo . La simplicidad del principio con el cual opera , está en contraste con la complejidad de la técnica que es adoptada. Para las diversas necesidades se han creado nuevos materiales de ánodos, los que juntamente con el desarrollo en la ingeniería electrónica han permitido grandes avances en las técnicas empleadas .

Es así como pueden beneficiarse con el Sistema de Protección Catódica :

Estructuras enterradas y sumergidas tales como :
Tanques fuel oil , tuberías de agua, gas, sistemas de distribución de aire, alcantarillado, pozos, bases de torres, muelles, embarcaderos, cables de amarre, tuberías submarinas, líneas de distribución de gas doméstico, etc.

Estructuras sobre tierra tales como: Tanques de almacenamiento de agua fría y caliente, condensadores, etc.

2.1.1 DEFINICION

Es un proceso de naturaleza puramente electroquímica, que en esencia consiste en transformar las microceldas anódicas de la superficie metálica en catódica. Para que esto suceda deberá hacerse una pila galvánica entre la superficie metálica (catódo) y un ánodo, donde ambos deberán estar sumergidos en un electrólito (agua, suelo, concreto etc.) estando en contacto eléctrico.

2.1.2 METODOS DE APLICACION DE LA PROTECCION CATODICA

(1,2,3)

Existen dos procedimientos de aplicación de la protección catódica, uno que utiliza Anodos de Sacrificio y otro mediante Corriente Impresa. La elección de uno ú otro debe hacerse tomando en consideración factores como son: costo de aplicación y mantenimiento, vida útil del sistema, circunstancias experimentales, dimensiones de la estructura, estado de su superficie (desnuda, pobre o bien recubierta), característica de la resistividad del medio y disponibilidad de suministro eléctrico.

A. PROTECCION CATODICA CON ANODO DE SACRIFICIO

Consiste en conectar eléctricamente el metal que se trata de proteger, a otro más activo (menos noble) el cual se sacrifica en beneficio del metal a proteger. Ambos están en un medio común conductor. Debido a la diferen-

cia en potenciales eléctricos de los dos metales, una corriente eléctrica fluye automáticamente desde el ánodo al cátodo a través del medio conductor y retorna vía el alambre conductor.

Para mayor detalle se ilustra la figura N^o 2.1 .

Los diversos ánodos de sacrificio utilizados son:

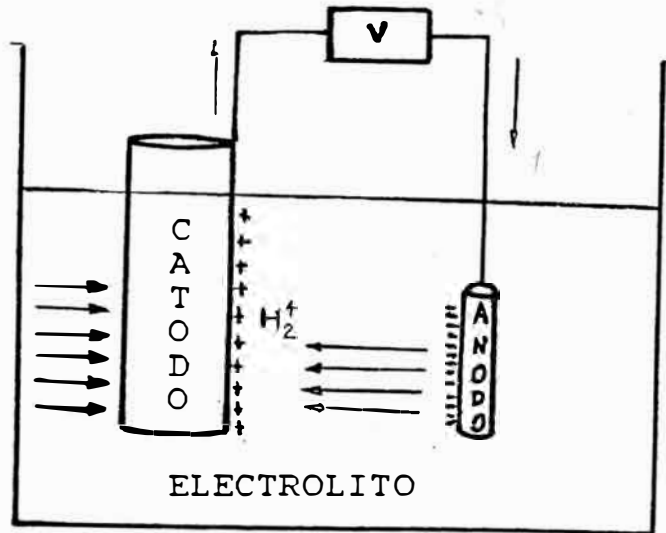
Magnesio, Zinc, Aluminio, etc. (veáse especificaciones de la tabla N^o 2.1).

Las ventajas principales que ofrece este método son :

1. No necesitan una fuente de energía externa.
2. Los costos de instalación son bajos.
3. Raras veces ocasionan problemas de interferencia a estructuras adyacentes.
4. Los costos de mantenimiento son mínimos.
5. Son fáciles de instalar.
6. La distribución de la corriente de protección suele ser buena.

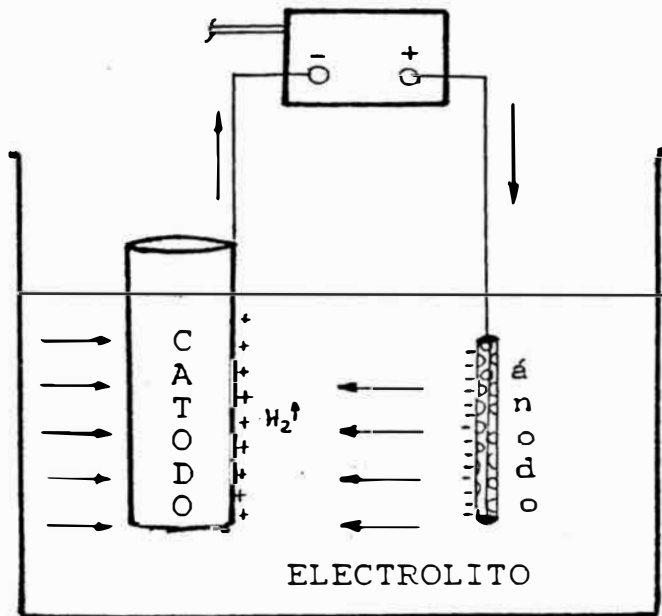
Las desventajas de su utilización son :

1. La corriente suministrada por el par galvánico que va a proporcionar el valor de potencial que adquirirá la estructura a proteger, está limitada en función de la diferencia de electronegatividad entre estructura y ánodo.



F I G U R A N º 2.1

R E C T I F I C A D O R



F I G U R A N º 2.2

T A B L A N º 2.1

ESPECIFICACIONES	ANODOS		
	ZINC	MAGNESIO	ALUMINIO
EFICIENCIA	95%	50%	95%
CONTENIDO TEORICO DE ENERGIA (amp-hr/kg)	820	2204	2981
RENDIMIENTO UTIL (amp-hr/kg)	778	1102	2817
POTENCIAL DE TRABAJO Cu/CuSO4 (volt)	-1.10	-1.45 a -1.70	-1.10

2. Su empleo está limitado por la resistividad del electrólito.
3. Para estructuras desnudas o pobremente recubiertas el ánodo por unidad de superficie a proteger es elevado y en consecuencia el costo de instalación es alto sobre todo cuando la superficie metálica a proteger presenta importantes dimensiones.
4. La elección del tipo de ánodo a utilizar es en ocasiones un problema de tipo técnico y económico que resulta difícil de solucionar en la forma más satisfactoria.

B. PROTECCION CATODICA CON CORRIENTE IMPRESA

El Sistema de Corriente Impresa se desarrolló aproximadamente cien años después que el de Anodo de Sacrificio. Este procedimiento consiste en producir una celda electrolítica en la cual la estructura a ser protegida es el cátodo y el electrodo de corriente impresa es el ánodo. La corriente sale del ánodo hacia el electrólito y como la estructura metálica está conectada al terminal negativo de un rectificador, ésta recibe la corriente del electrólito y permanece así protegida (veáse la figura N^o 2.2).

Para mayor seguridad se debe llevar hacia valores inferiores el potencial de protección,

pero evitando hacerlo demasiado para no exceder la cantidad de la corriente catódica, la cual consumiría un potencial inútil y originaría la formación de hidrógeno sobre la superficie metálica lo que produciría la fragilidad por hidrógeno de la estructura metálica a proteger.

Si la superficie metálica esta recubierta, tenemos otra razón para no trabajar a un potencial muy por debajo del de protección, pues esto trae consigo el deterioro del recubrimiento, es decir, se puede ampollar, cuartear y levantar en poco tiempo.

Las ventajas principales que ofrece este método son :

1. Es aplicable a casi cualquier tipo de electrolito (suelo, agua, concreto etc.).
2. La salida de corriente es alta.
3. Los requerimientos de corriente pueden ser fácilmente monitoreados en el transformador-rectificador o en otras fuente de corriente continua, al igual que las diferencias de potencial.
4. Es aplicable a estructuras metálicas sin revestir, o con recubrimiento pobre, debido a que el sistema puede ser diseñado con una reserva de voltaje y amperaje, para prevenir el deterioro del revestimiento por un aumento en el requerimiento de corriente.

5. Permite proteger estructuras grandes y muy extendidas.
6. Un interruptor de tiempo puede ser incorporado en la fuente de corriente continua para capacitar la determinación de los efectos de interferencia.
7. La instalación de un drenaje forzado sobre el dispersador o estación de protección catódica, que permite el paso de las corrientes vagabundas en dirección de la tubería hacia la estructura que origina las corrientes vagabundas.

Las principales desventajas son:

1. Costos de instalación relativamente alto.
2. Sujeto a la disponibilidad de una adecuada fuente de abastecimiento de corriente alterna ó otra fuente de corriente continua.
3. Altos costos de mantenimiento y requerimientos de inspección.
4. Costo en la electricidad consumida.
5. Sujeto a paros de energía y fallas.
6. Problemas de interferencia con otras líneas cercanas.

Los tipos de ánodos auxiliares se han dividido en dos grupos de acuerdo a sus aplicaciones en los diferentes medios a que van a estar sujetos, uno es usado para estructuras enterra-

das y la otra para estructuras sumergidas (véase especificaciones de la tabla N^o 2.2).

2.2 CAMBIO EN LOS REQUERIMIENTOS DE LA PROTECCION CATODICA (4)

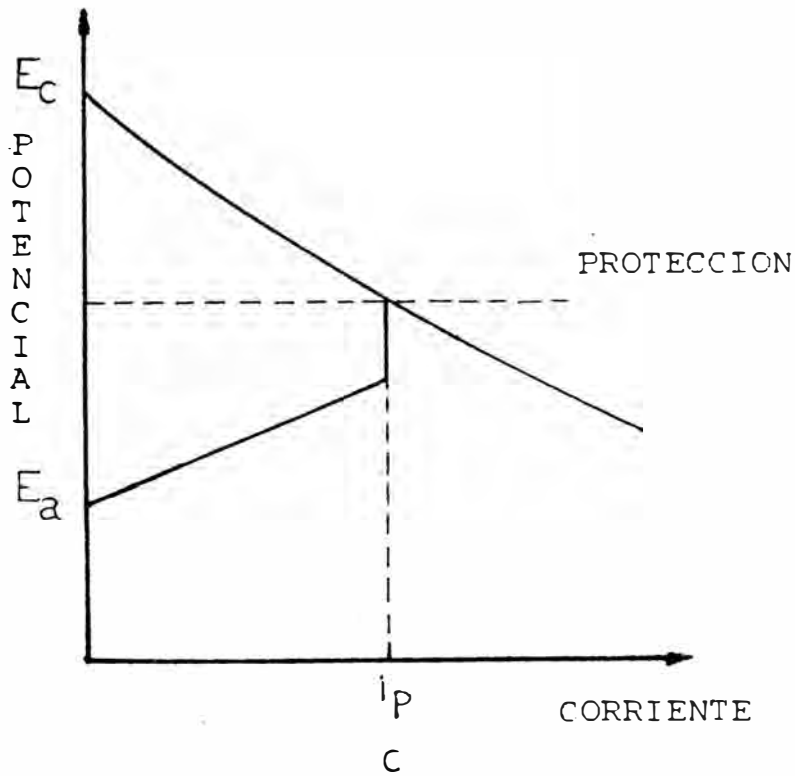
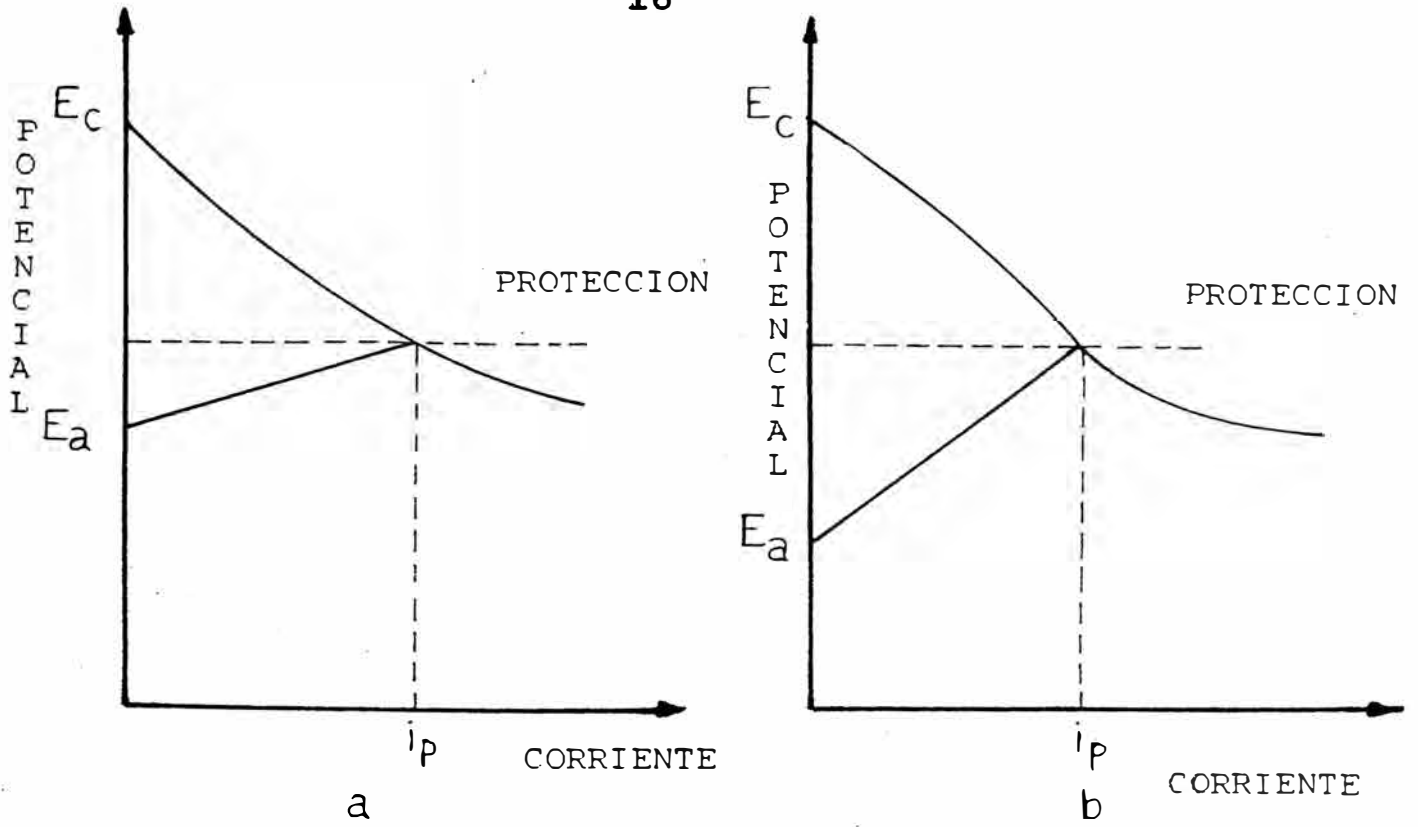
En el caso del sistema de protección catódica por ánodos de magnesio, el diseño basado en los parámetros naturales del ánodo es simple, siempre que éstos se consideren constantes. El consumo del ánodo durante la operación, por ejemplo causa un cambio en la resistencia del ánodo, la estructura puede igualmente ser afectada y sus requerimientos de corriente variar.

Esto puede ocurrir debido a la naturaleza alcalina de la reacción catódica que ocasiona una polarización de las sales de calcio y magnesio o a la alta resistencia del recubrimiento tal como asfalto, o aún más rápidamente bajo la influencia de la electroósmosis.

Es esencial estudiar el efecto de estos cambios y pueden compararse tres casos: ánodos con un alto voltaje con respecto al acero como es el caso del magnesio, ánodos con bajo voltaje y ánodos con alto voltaje y un resistor en el circuito eléctrico. El primer caso puede ocurrir donde se requiera una corta vida en el ánodo en un medio de baja resistividad ó donde la forma y tamaño del ánodo y la resistividad del medio demandan un alto potencial. Las curvas de polarización de los tres casos son ilustrados en la figura N^o 2.3.

T A B L A N O 2.2

ELECTRODOS AUXILIARES : CAPACIDADES MAXIMAS DE CORRIENTE EN Amp/mt ² Y CONSUMOS EN Kg/ Amp-Año			
MATERIAL	CAPACIDAD MAX. DE CORRIENTE EN Amp/mt ²		DESGASTE Kg/Amp-Año
	SUELO	AGUA	
GRUPO 1			
CHATARRA DE ACERO	2	2	7-9
FIERRO SILICIO	30	30-40	0.5-0.9
GRAFITO	10	20	0.9
GRUPO 2			
FLOMO/PLATINO	-	100-200	-
PLATINO	-	⁴ < 10	-
TITANIO/PLATINADO	-	⁴ < 10	-
TANTALIO/PLATINADO	-	⁴ < 10	-
ALUMINIO	-	20	4



- a BAJO DRIVING VOLTAJE
- b ALTO DRIVING VOLTAJE
- c ALTO DRIVING VOLTAJE
CON ANODO RESISTOR

FIGURA No 2.3

2.2.1 CONSUMO DEL ANODO (5)

El consumo del ánodo reducirá su volumen metálico y tenderá a convertir la forma del ánodo a una esfera. Donde la forma del ánodo se asemeje a una esfera, luego la resistencia se incrementará tanto como la inversa del diámetro del ánodo, esto es, para que la resistencia del ánodo aumente al doble, el volumen del mismo debe disminuir en un $1/8$ de su valor original. En ánodos largos el incremento en la resistencia con el consumo del ánodo sería más rápida y la resistencia del ánodo se duplicará cuando quede $1/5$ del metal original. El efecto de este incremento en la resistencia del ánodo será el mismo en ánodos de bajo y alto voltaje. Es por supuesto posible diseñar la forma de un ánodo para un medio determinado, de modo que el consumo de ellos tenga un efecto mínimo en la resistencia del ánodo.

2.2.2 CAMBIO EN LA RESISTIVIDAD DEL ELECTROLITO

Las variaciones en la resistividad del electrolito sobre el área del ánodo afectarán la resistencia de este directamente, un 10% en el incremento de la resistividad causa un 10% en el incremento de la resistencia del ánodo.

Cualquier cambio en la resistencia del ánodo afectará el Sistema de Protección Catódica y el

efecto en las curvas de polarización para los tres sistemas es mostrado en la figura N^o 2.4 .

Los cambios en la resistencia del ánodo afecta más los ánodos de alto voltaje, donde la resistencia del ánodo controla casi completamente la corriente en el circuito, mientras que en el sistema de bajo voltaje, la polarización del cátodo tiene gran influencia en la corriente total, y en ánodos de alto voltaje y resistor, el circuito total es afectado por la suma de la resistencia del ánodo y del resistor.

2.2.3 CAMBIO EN LA CORRIENTE REQUERIDA PARA PROTECCION CATODICA

Probablemente ésta sea la más importante variación en las condiciones que pueden afectar el Sistema de Protección Catódica. La variación en la corriente puede ser desde una disminución de 50% debido a greda marina o un incremento de 20% por deterioro del recubrimiento o daño en la superficie del cátodo.

Los tres sistemas con ánodos son comparados en la figura N^o 2.5 . La fuente de bajo potencial es la mejor en este caso, con la ventaja adicional que no sólo son compensadas las variaciones, sino que una compensación similar se tiene por una instalación mal diseñada.

Desafortunadamente el material requerido para operar este sistema en suelos de alta resistividad

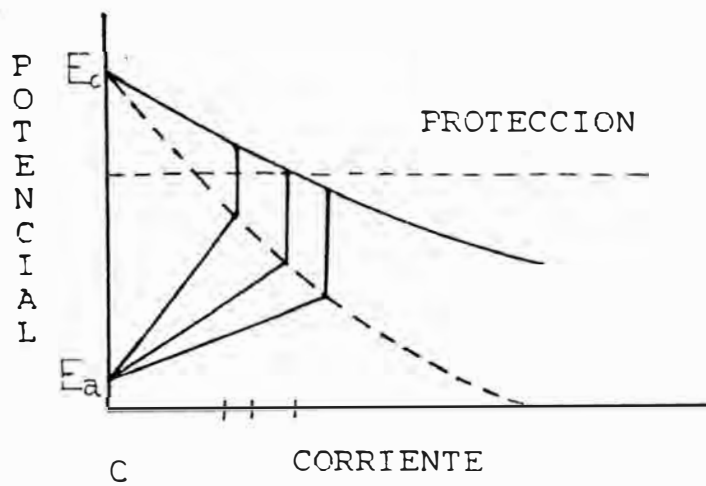
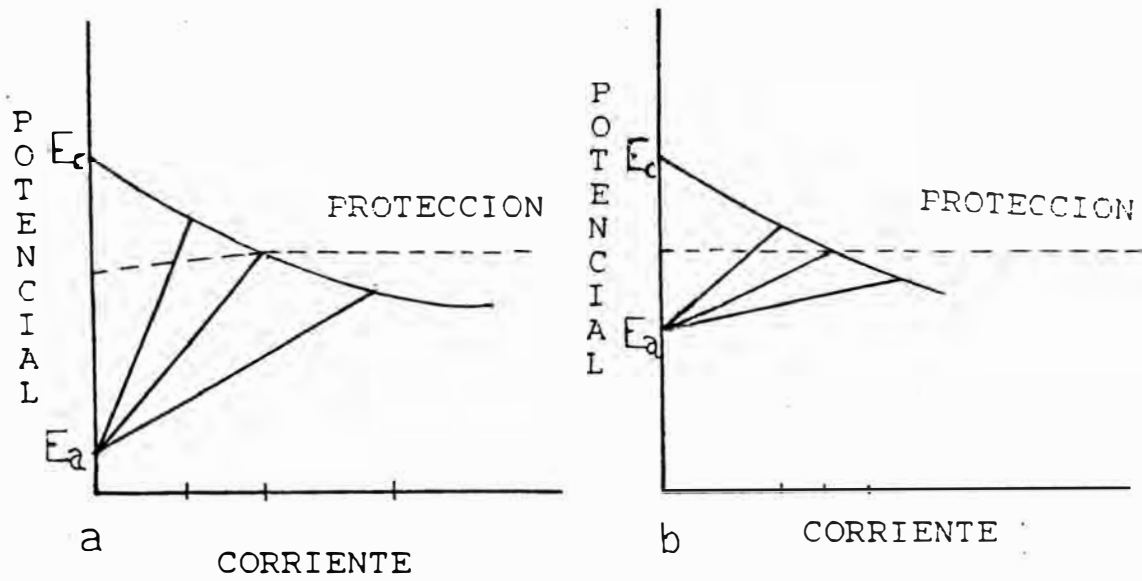
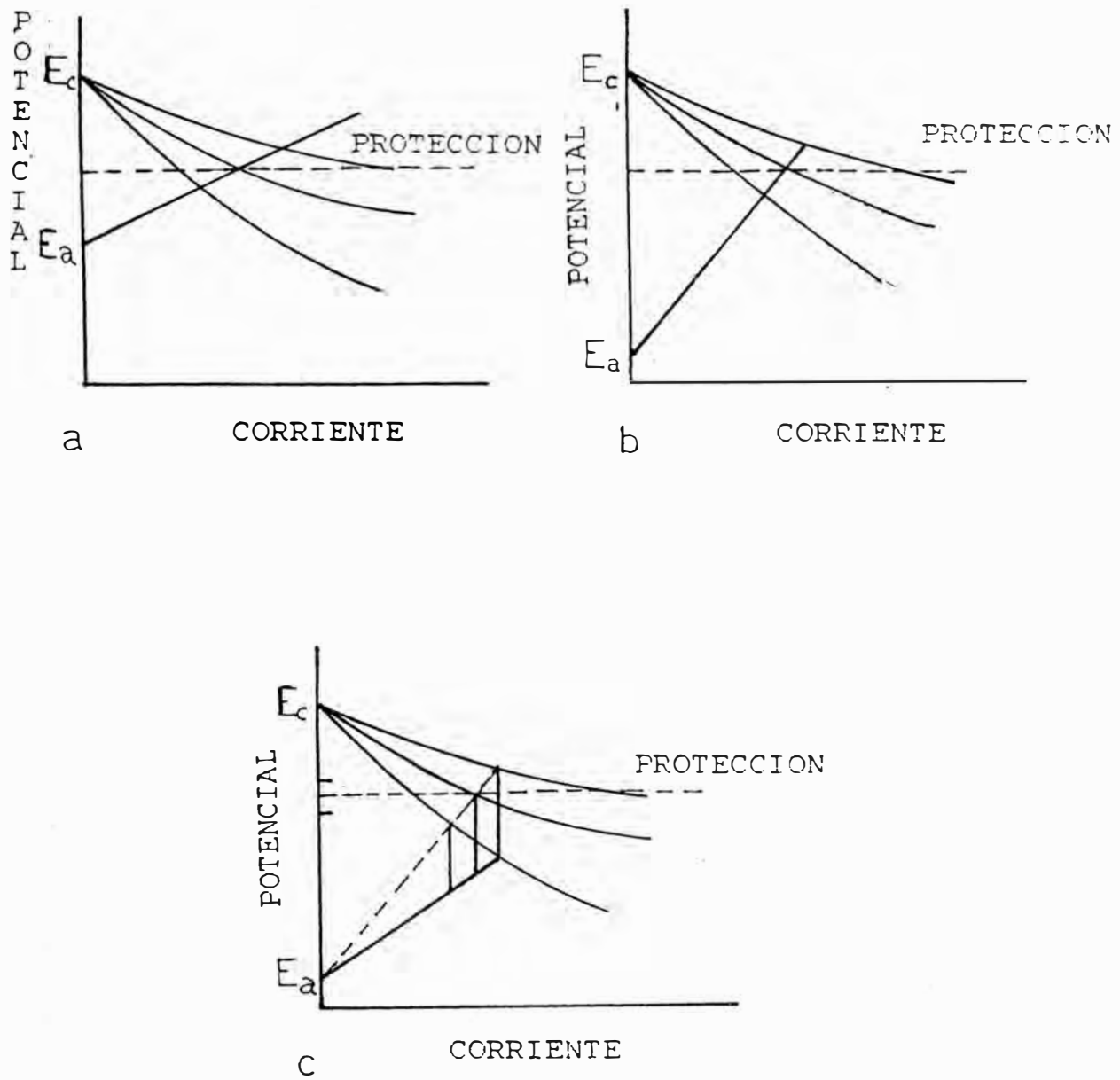


FIGURA Nº 2.4



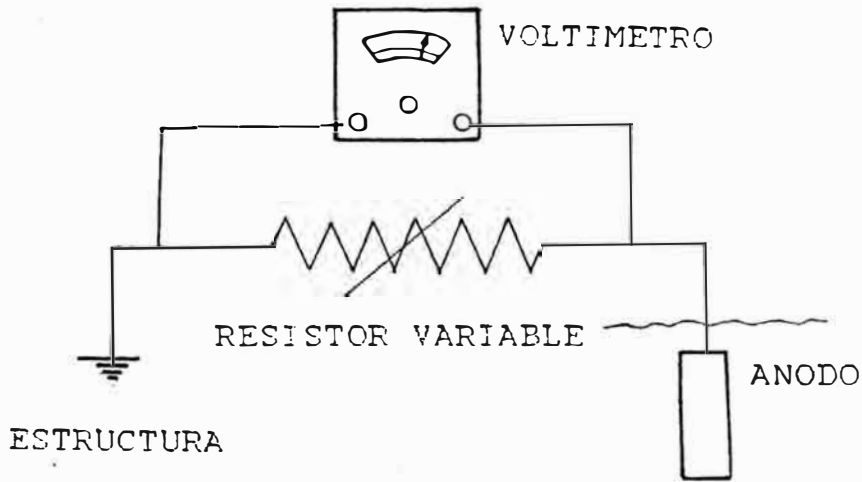
F I G U R A N o 2.5

a menudo se excluye. En esta clase de electrólito una alta resistencia del ánodo será inevitable y deberá usarse un ánodo de alto voltaje. Sin embargo en algunos casos de medios de alta resistividad, la polarización catódica medida a un punto remoto será tan alta, que mientras que la protección será lograda por un potencial oscilante de 300 mV. relativo a una media celda cercana este puede transmitir de 600 mV. a un electrodo remoto además el metal del ánodo con un potencial de 600 mV. relativo al acero protegido sólo tendrá 300 mV, al cátodo polarizado y actuará como un ánodo de bajo voltaje bajo tales condiciones.

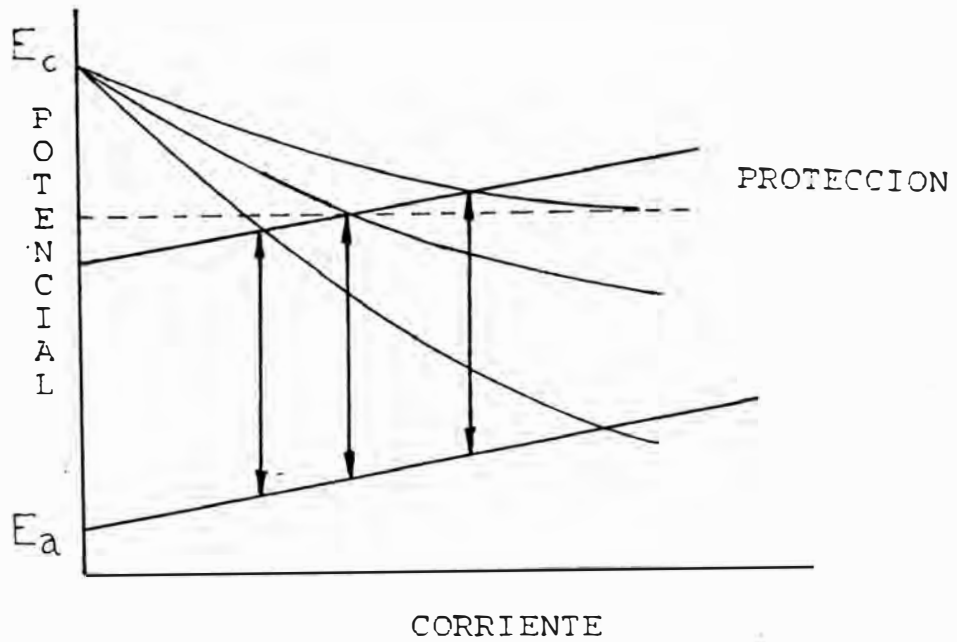
Cada caso necesita ser considerado por sus propio méritos y las simples relaciones mostradas en las figuras N^o 2.3, N^o 2.4 y N^o 2.5 determinan el grado y tipo de la protección requerida.

2.2.4 RESISTOR VARIABLE

El tercer caso considerado tiene un resistor fijo ubicado entre el ánodo y el cátodo. Este puede ser reemplazado por un resistor variable que reducirá manual o automáticamente el potencial del ánodo en una cantidad fija. La figura N^o 2.6 muestra un circuito simple que puede lograr esto y el resultado de mantener un potencial constante. Implica que un ánodo de alto voltaje puede ser usado con una curva de baja polarización (figura N^o



F I G U R A N º 2.6



F I G U R A N º 2.7

2.7). La ventaja de este sistema es que los ánodos de alto voltaje tienen la peculiaridad de operar en un amplio rango de electrólitos. Mientras que el control manual, excepto en pocos casos consume tiempo, diseño modernos pueden lograr esto automáticamente.

C A P I T U L O I I I

RECUBRIMIENTOS Y PROTECCION CATODICA
EN TUBERIAS METALICAS ENTERRADAS

CAPITULO III

3.1 GENERALIDADES (4)

Como el criterio de protección catódica es un cambio en el potencial, luego la densidad de corriente requerida para lograr esto dependerá en el estado resistivo de la interfase metal-electrólito. Esta resistencia puede ser grandemente incrementada revisitando la superficie con un recubrimiento aislante tal como una pintura.

En un suelo típico una tubería desnuda puede requerir 2mA/pie² para ser protegida mientras que una tubería similar, revestida por modernas técnicas, requerirá de 20 micro-Amp/pie² ó lo que es lo mismo 1% que cuando la tubería está desnuda.

La densidad de corriente requerida por una tubería con recubrimiento, protección catódica, disminuye debido a que se hacen menores los valores de los componentes de la densidad de corriente, esto es :

1. La densidad de corriente requerida para sobrellevar la caída óhmica, a través del material de revestimiento y
2. La densidad de corriente requerida para polarizar algunas vacantes, áreas dañadas o imperfecciones (grietas).

3.2 PREPARACION DE LA SUPERFICIE METALICA (1,6)

Los diferentes tratamientos mecánicos, físicos o químicos a los que se somete una superficie metálica, sobre la cual se va aplicar un recubrimiento, tienen por finalidad asegurar una adherencia buena, que dependerá de dos factores que a su vez están íntimamente ligados al estado superficial del metal.

El primer factor, es de naturaleza física-química, consiste en la atracción polar entre el soporte (superficie del metal) y las moléculas de los constituyentes de la pintura.

El segundo factor, es el relativo a la adherencia mecánica de la película de pintura sobre el metal. Esta adherencia se ve favorecida por la rugosidad o la porosidad del soporte y que se opone fuertemente al deslizamiento.

El tratamiento Superficial, del metal debe asegurar una estructura rugosa y microporosa destinada a mejorar la adherencia mecánica de la pintura.

3.2.1 METODOS DE PREPARACION DE SUPERFICIE

Existen dos métodos de preparación de superficie, el primero involucra procedimientos químicos y el otro procedimientos mecánicos de limpieza (las especificaciones de uno y otro se muestran en el cuadro Nº 3.1). Una apreciación de las diferentes tratamientos de superficie se muestra en el figura Nº 3.1 .

C U A D R O N º 3.1

A.	PROCEDIMIENTOS QUIMICOS
<p>1. Limpieza con Solventes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tratamiento previo que extrae la mayor parte de las grasas de la superficie metalica. 	
<p>2. Limpieza con Alcalis :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sistema eficiente barato y seguro. - Los alcalis se disuelven en agua y se aplican en caliente, para limpiar las grasas y aceites por saponificacion. 	
<p>3. Limpieza con Vapor :</p> <ul style="list-style-type: none"> - De facil aplicacion , permite limpiar zonas de dificil acceso. 	
<p>4. Limpieza con Acido Ortofosforico :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Usa solucion de acido ortofosforico con disolventes de aceites tales como alcoholes, eteres y detergentes. - Elimina la capa de oxido superficial dejando al metal ligeramente rugoso, lo que permite una mejor adherencia a la pintura. 	
<p>5. Decapado Quimico :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Usa la accion disolvente de soluciones acuosas de acidos minerales. 	

B. PROCEDIMIENTOS MECANICOS DE LIMPIEZA

1. Preparacion Manual :

- Utiliza cepillos de acero como:cinceles raspadores, hojas de esmeril, etc.
- Puede quedar en la superficie tratada restos de calamina .
- No permite la limpieza de las cavidades hechas por la corrosion.

2. Preparacion con Herramientas a Motor :

- Las herramientas son semejantes a las usadas en la preparacion manual, solo que accionadas por motor electrico o neumatico.
- La terminacion de la superficie es muy irregular y por tanto no es buena base para la adherencia de la pintura.

3. Limpieza con Llama :

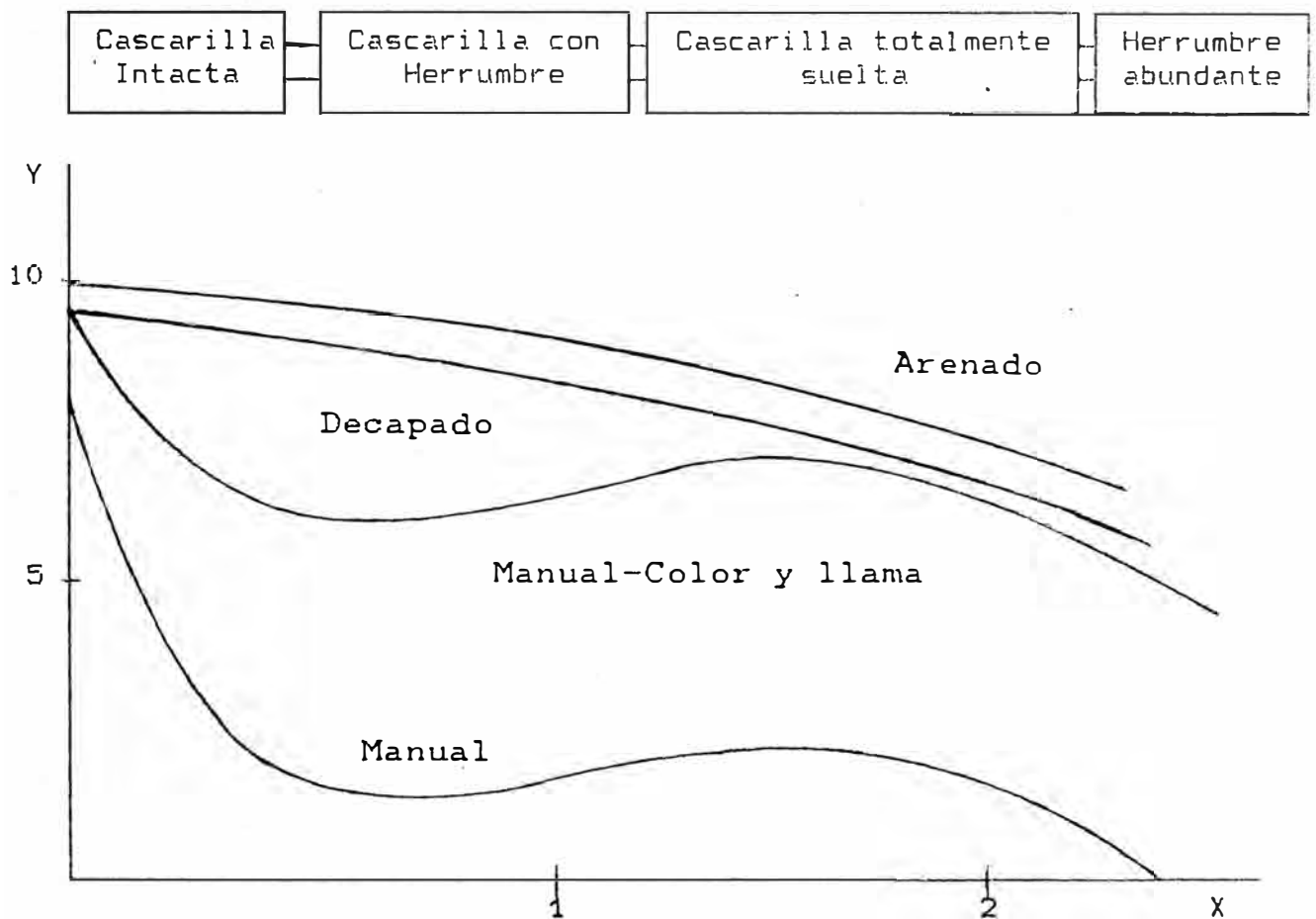
- Aplica la llama reductora de un soplete oxiacetilenico a la superficie metalica
- Elimina la calamina de laminacion y la herrumbre formada.

4. Limpieza por Chorreado a Presion :

- Usa el impacto a una elevada presión de partículas abrasivas (3 a 9 atms.)
- Elimina toda la capa de laminación e incluso algo del metal base .
- La superficie que queda permite una excelente adherencia de los sistemas de pinturas.

FIGURA Nº 3.1

DURACION DEL ENVEJECIMIENTO A LA INTEMPERIE ANTES
DE LA PREPARACION DE LA SUPERFICIE



Eje X : Razon de vida
Eje Y : Duracion de la proteccion (años)

Se observa claramente una mejor performance de la pintura cuando la preparacion de la superficie se realiza mediante Arenado.

Asimismo, cuanto menos es el tiempo de envejecimiento a la intemperie de la superficie metalica o de menor grado inicial de oxidacion; mayor es la duracion de la pintura.

Ampliaremos uno de los procedimientos mecánicos de limpieza más usado industrialmente, que es el de Limpieza por Chorreado a Presión, presentando el cuadro N^o 3.2 .

Las Normas establecidas para el Tratamiento de Superficie se detallan en el cuadro N^o 3.3 .

3.3 PROPIEDADES REQUERIDAS POR LOS RECUBRIMIENTOS (3,6)

La finalidad en aplicar un recubrimiento a un metal enterrado, tal como una tubería, es de prevenir el contacto eléctrico con un electrólito tal como el suelo y/o agua. Las propiedades requeridas de tales recubrimientos son:

- 1. Fácil aplicación:** Debe ser posible de aplicar el recubrimiento en la fábrica o en el campo, a una velocidad razonable, y usar la tubería rápidamente después que el recubrimiento haya sido aplicado, sin dañar el recubrimiento
- 2. Buena adhesión con el metal:** Debe tener una excelente unión al acero. La aplicación de una primera capa es usada frecuentemente para ayudar a la adhesión.
- 3. Resistente al Impacto:** Debe resistir al impacto sin resquebrajarse.
- 4. Flexibilidad:** Debe ser lo suficientemente flexible, para resistir la deformación que ocurre en la flexión, ensayo o colocación, así como cualquier expansión o contracción originada por cam-

CUADRO Nº 3.2

LIMPIEZA POR CHORREADO A PRESION
Componentes principales :
<ul style="list-style-type: none"> - Arena ; es preferible usar arena silíceas y el tamaño de grano debe estar entre 0.6 y 1.2 mm., la arena debe ser dura y la proporción de partículas que se rompan en la operación no debe ser superior al 10 % .
<ul style="list-style-type: none"> - Manguera para el aire y para el chorreado ; aquí se trabaja normalmente a una presión de 7 Kg/cm² (presión de la boquilla de chorreado.
<ul style="list-style-type: none"> - Boquilla de chorreado ; cuando se dispone de la cantidad suficiente de aire a la presión correcta se debe utilizar la boquilla de mayor tamaño , ya que la velocidad de limpieza es rápida .
<ul style="list-style-type: none"> - Compresor de aire ; cuanto mayor sea la presión de aire , la limpieza será efectuada con mayor rapidez . La capacidad del compresor debe ser la suficiente teniendo en cuenta el tamaño de la boquilla y el número de ellas que trabajan simultáneamente .

CUADRO Nº 3.3

NORMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LIMPIEZA POR CHORREADO A PRESION			
NORMA	ESCALA SUECA	DESCRIPCION DE LA SUPERFICIE	USOS
SSPC-SP-5-63	Sa 3	<ul style="list-style-type: none"> - La superficie debe quedar de color uniforme, gris claro metálico y ligeramente rugosa, exenta de cascarilla de laminación, grasas, etc. - El tono de color dependerá del tipo de abrasivo . 	<ul style="list-style-type: none"> - Aunque con este grado de limpieza se alcanzan los mejores resultados, sólo es exigido en algunos casos, debido a la tolerancia que los imprimantes tienen a la presencia de pequeñas cantidades cascarillas ó óxidos.
SSPC-SP-10-63	Sa 2 1/2	<ul style="list-style-type: none"> - La superficie queda con el mismo aspecto que con la norma anterior, a excepción de que se permite la presencia de alguna sombra o ligeras coloraciones. - El 95% de la superficie tendrá el mismo aspecto que en la limpieza hasta metal blanco . 	<ul style="list-style-type: none"> - Este grado de limpieza es suficiente para la mayor parte de los casos de protección en atmósferas químicas de alta humedad, marinas, etc.
SSPC-SP-6-63	Sa 2	<ul style="list-style-type: none"> - Con este grado de limpieza quedan eliminadas las sustancias extrañas al metal. Pero se permite la presencia de ligeras coloraciones, sombras y ligeros residuos de herrumbre . 	<ul style="list-style-type: none"> - Es suficiente esta limpieza en la mayor parte de las pinturas de imprimación y debe ser utilizada siempre que las condiciones de servicio sean de una severidad superior a la de la atmósfera normal. - También se usa en casos en que la superficie no ha sido limpiada e imprimada en talleres si no a pie de obra .
SSPC-SP-7-36	--	<ul style="list-style-type: none"> - Aquí solamente se eliminan los restos de cascarilla, herrumbre o pintura vieja que no están adheridas firmemente al soporte . 	<ul style="list-style-type: none"> - No debe ser utilizada cuando las pinturas de imprimación tengan características de humectación muy limitadas .

bios en la temperatura. No debe producir agrietamiento, durante el enfriamiento después de la aplicación o curación del recubrimiento.

5. **Resistencia a la tensión del suelo:** Los recubrimientos están a menudo sujetos a muy altas tensiones originados por ejemplo, por la contracción del suelo arcilloso en clima seco, y deben poder resistir tal tensión sin daño.
6. **Resistencia al flujo:** No debe fluir por tensiones del suelo, y debe tener suficiente resistencia para no ser desplazado de la superficie inferior de las tuberías de gran diámetro.
7. **Resistencia al Agua:** Deben tener una despreciable adsorción del agua, y deben ser altamente resistentes al agua o a la transmisión de vapor de agua.
8. **Alta Resistencia Eléctrica:** Debe ser un aislante y no debe contener ningún material conductor.
9. **Estabilidad Química y Física:** No deben desarrollar efectos de envejecimiento, por ejemplo: alteraciones originados por adsorción de los constituyentes de peso molecular bajo o endurecimiento con resultado de agrietamiento por alguna causa incluyendo oxidación. Debe ser estable a temperatura de operación.
10. **Resistencia a las Bacterias:** Resistente a las bacterias del suelo.

11. Resistencia a Organismos Marinos: En el caso de líneas submarinas, el recubrimiento no debe ser fácilmente penetrado por vida marina, por ejemplo: horadadores, almejas, mejillones, lapas etc.

Estas características cubren la idea general de un recubrimiento de tubería, pero obviamente al modificarse las condiciones se imponen requerimientos que son más o menos estrictos, esto claro también se aplica a otros tipos de estructuras enterradas.

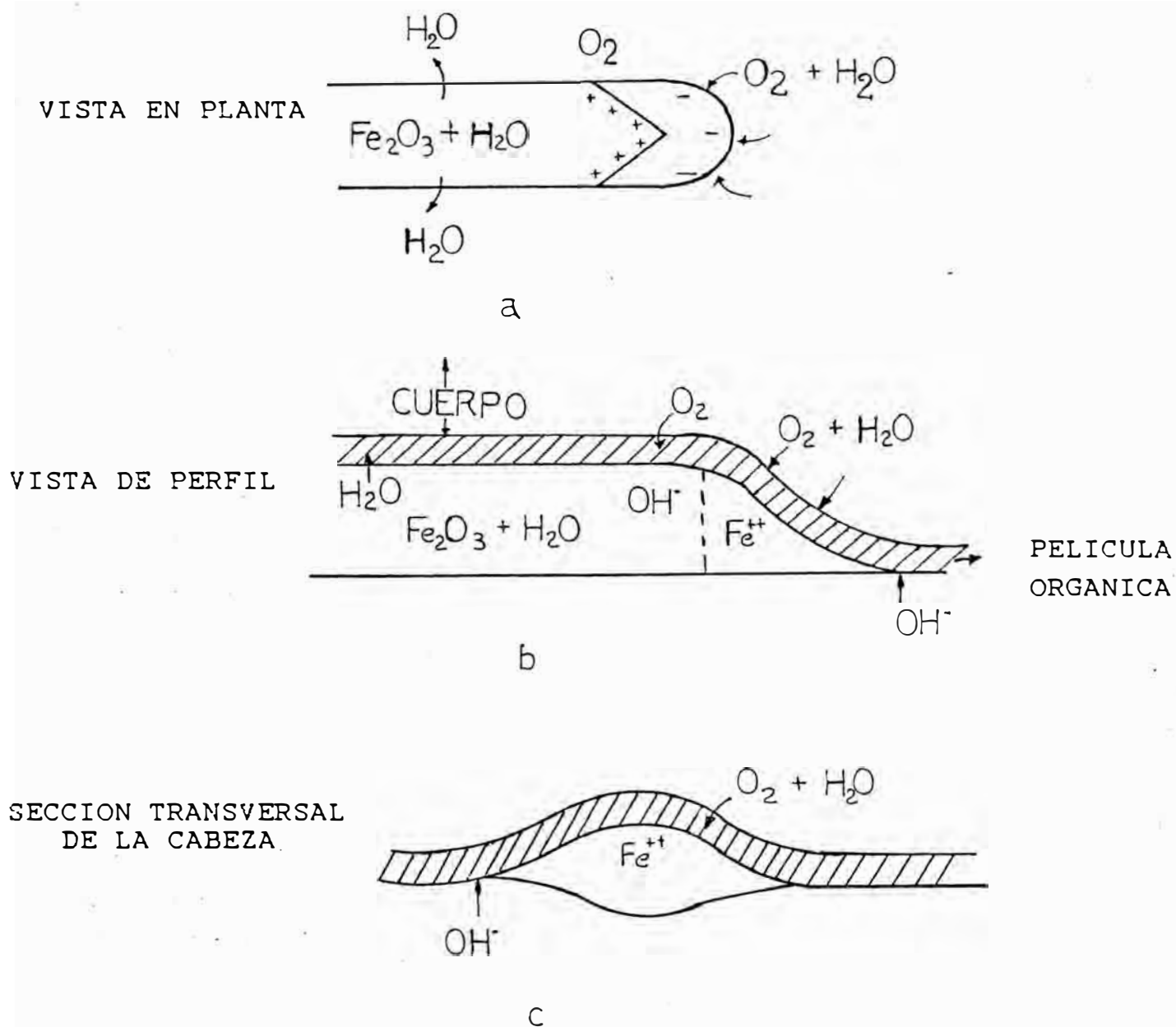
3.4 CORROSION A TRAVES DEL RECUBRIMIENTO (9)

La mayoría de los recubrimientos orgánicos son usados en estructuras metálicas, que están sometidos a un medio corrosivo, tales como estructuras enterradas o sumergidas en agua de mar o agua dulce.

Los metales recubiertos con sustancias orgánicas pueden sufrir un tipo de corrosión denominada corrosión Filiforme.

En la figura N^o 3.2, se muestran vistas esquemáticas de un filamento o hebra filiforme. La punta o cabeza está formada por una solución relativamente concentrada de iones ferrosos, la que es causa de que esta zona del hilo adsorva agua de la atmósfera (ver figura N^o 3.2a).

El oxígeno también se difunde a través de la película alcanzando las más altas concentraciones en la superficie del metal, en la interfase de la



VISTA ESQUEMATICA DE UN FILAMENTO FILIFORME SOBRE HIERRO MOSTRANDO LOS DETALLES DE LA PILA DE AERACION DIFERENCIAL

F I G U R A N o 3.2

cabeza del cuerpo y en la periferia de la cabeza, mientras que en el centro de la cabeza las concentraciones son más bajas (ver figura Nº 3.2b) .

Lo anterior establece una pila de aereación diferencial con formación de catódo, donde hay acumulación de iones OH^- en todas las regiones donde la película hace contacto con el metal y en el extremo de la cabeza o punta. El ánodo se localiza en la parte central de la cabeza, donde hay formación de iones ferrosos (ver figura Nº 3.2c).

Los filamentos o hilos formados sobre el acero, son por lo general de 0.1 a 0.5 mm. de ancho . El hilo tiene el color rojo característico del Fe_2O_3 , salvo en la punta que es verde o azul, por la presencia de iones ferrosos. Los hilos siguen direcciones al azar, y si la punta de un hilo se aproxima a otro, al tocarlo se desvía o detiene su crecimiento. Es probable que los iones OH^- liberados tengan un papel importante en deteriorar la película de pintura por la propiedad que tienen los álcalis de destruir la unión entre recubrimiento y metal. Además se difunden hacia el centro de la cabeza reaccionando con Fe^{++} para formar $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ que a su vez se óxida por la acción del O_2 a $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Los tratamientos superficiales a base de fosfatos y de capas de recubrimientos de imprimación de cromatos sirven para limitar la corrosión Filiforme, pero no evitan su aparición.

3.4.1 CONDICIONES PARA QUE OCURRA LA CORROSION A TRAVES DEL RECUBRIMIENTO.

1. Si en la interfase metal-recubrimiento están presentes contaminantes iónicos, el paso del agua puede ocasionar la formación de un electrólito en la interfase, completando la celda de corrosión. Esto trae como consecuencia la formación de burbujas, pérdida de adhesión del recubrimiento al metal y hasta la aparición de huecos en el recubrimiento orgánico.
2. Si no existen contaminantes iónicos en la interfase metal-recubrimiento, y el recubrimiento es permeable al agua y a las sales, también se pueden presentar los fenómenos señalados.
3. La adsorción del agua y de iones por parte del revestimiento pueden ocasionar serios cambios en las propiedades físicas y eléctricas de éste.
4. La presencia de defectos en las películas ya sea por daños mecánicos que sufre el recubrimiento de una tubería durante su transporte, instalación y uso, ocasiona que el metal quede expuesta al medio ambiente y así se inicie la corrosión en esta zona de defectos .

3.5 CARACTERISTICAS DE UN BUEN RECUBRIMIENTO

1. **Impermeabilidad:** Las capas deben amortiguar o anular la difusión del agua, de los electrólitos y del oxígeno. En general todos los recubrimientos

son permeables en cierto grado, y su eficacia radica en aplicar capas múltiples bien adherentes que sellen con efectividad los poros y otros defectos.

- 2. Inhibición de la Corrosión:** La capa de imprimación debe comportarse como inhibidor de la corrosión, de tal manera que cuando el agua alcanza la superficie metálica disuelva cierta cantidad de pigmento que la hace menos corrosiva. La solubilidad debe ser tal, que proporcione la cantidad mínima de iones inhibidores necesarios para reducir la velocidad de la corrosión y que no desaparezca del recubrimiento en poco tiempo. Podemos citar por ejemplo el CrO_4Zn (ión inhibidor CrO_4^{-2}), rojo de plomo ó minio Pb_3O_4 (ión inhibidor PbO_4^{-4}).

- 3. Proporcionar larga vida a bajo costo:** La durabilidad del recubrimiento depende del medio al cual va a estar expuesto, también depende del espesor final de la película y de la correcta selección de ésta.

El costo se determina por el rendimiento y el tiempo de durabilidad antes que por el costo por galón de recubrimiento orgánico .

3.6 LA PROTECCION CATODICA EN ESTRUCTURAS METALICAS RECUBIERTAS. (4)

Dado que la mayoría de los recubrimientos orgánicos son permeables tanto al oxígeno como al agua, estos pueden penetrar hacia la interfase metal-recubrimiento. Podemos decir que un recubrimiento orgáni-

co por sí sólo, no asegura la completa protección de la tubería contra la corrosión. Es en este punto, es donde interviene la protección catódica para compensar las deficiencias del recubrimiento como barrera de protección.

Si no se aplica Protección Catódica, las áreas dañadas se volverán ánodos y las áreas recubiertas cátodos. La corrosión total de la estructura metálica sería menor, pero la concentración de la corriente de corrosión en los ánodos tendería a profundizar las vacantes, y donde esto sucede la corrosión es crítica. Es por eso que los recubrimientos pueden causar fallas, más rápida que las que ocurriría en su ausencia. Por otro lado, usando tal recubrimiento se reducirán grandemente los costos de protección catódica.

El costo total de combinar recubrimiento y protección catódica, puede ser mayor o menor que el costo de la protección catódica solamente, en concordancia con la dificultad y costo de revestir la estructura.

En la mayoría de los casos el costo mínimo estará donde la protección catódica es aplicada como complemento y no, como el sustituto de un recubrimiento.

VENTAJAS

1. Es más fácil proteger catódicamente estructuras metálicas más largas y a mayor distancia cuando están recubiertas, porque la distribución de co-

riente es mejor.

2. El recubrimiento aislante reduce considerablemente la cantidad de corriente requerida, puesto que esta fluye únicamente a las áreas descubiertas del recubrimiento. Esto hace que se reduzcan sustancialmente la cantidad de ánodos de sacrificio o de corriente impresa requerida, y se reduzca los costos a su vez.

3.7 COMPATIBILIDAD DEL RECUBRIMIENTO CON LA PROTECCION CATODICA (4,8)

Debido a la protección catódica ciertos recubrimientos se modifican, ellos se contraen y endurecen, agrietándose, cambiando de color, etc. Se destacan tres causas que originan estos fenómenos:

- a. Alcalinidad
- b. Electroósmosis
- c. Sobreprotección

En el sistema conjugado de protección catódica y recubrimiento son numerosos los factores que pueden afectar comportamiento del recubrimiento (Ver cuadro N^o 3.4).

- a. **Alcalinidad:** Cualquier sistema de protección catódica produce álcali en la inmediata vecindad del metal proporcionalmente a la corriente que fluye, esta es tanto mayor cuanto más elevado es el potencial catódico (más negativo).

La formación del álcali obedece a las siguientes reacciones electroquímicas:

C U A D R O N 3.4

FACTORES CON INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO DE PINTURA EN AGUA DE MAR	
ETAPA DE PROTECCION	FACTORES
PREPARACION SUPERFICIAL	<ul style="list-style-type: none"> - Grado de Preparacion Superficial (Norma sueca SIS 055900-L967) - Tipo de Imprimacion - Envejecimiento de la Imprimacion a la atmosfera - Estado de la Imprimacion al recibir el sistema completo de pinturas
P I N T U R A	<ul style="list-style-type: none"> - Modo de aplicaci3n - Esquema del sistema de pintura (Pinturas anticorrosivas e antiin crustante) - Caracteristicas Quimicas <ul style="list-style-type: none"> Estructura molecular del vehiculo Caracter polimero de la capa Tipo y Naturaleza del pigmento Actitud hacia la saponificacion - Caracteristicas Fisicas <ul style="list-style-type: none"> Tiempo de secado Flexibilidad Alargamiento Adherencia Tenacidad a la rotura mecanica
PROTECCION CATODICA	<ul style="list-style-type: none"> - Modalidad empleada - Potencial de Proteccion - Control de Potencial
INMERSION EN AGUA DE MAR	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura - Conductividad - Agitaci3n - Presion Hidraulica

- Cuando el potencial normal de protección del hierro, con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄, es (-0.85 V. a -1.0 V.) .



- A potenciales superiores a -1.0 Voltios.



La alcalinización puede tener efectos beneficiosos. Si se tiene en cuenta la posibilidad de que los organismos marinos que se fijan en la superficie del metal no sobrevivan en el medio alcalino, por lo que entonces la protección catódica actuaría de antiincrustante. Además el sobrepasarse el producto de solubilidad de los compuestos alcalino térreos CO₃Ca y Mg(OH)₂, la película de precipitado que ellos forman atenúa la corrosión y disminuye la corriente de protección al impedir la difusión del oxígeno y reducir la superficie metálica expuesta al agua de mar.

Por otro lado la alcalinización puede tener efectos desastrosos al saponificar y deteriorar los recubrimientos de baja resistencia a los álcalis. Los recubrimientos de sólo moderada resistencia a los álcalis toleran la protección catódica por ánodos de sacrificio (sistema de baja salida) . Mientras que para protección catódica por corriente impresa (sistema de alta salida),

los recubrimientos deberán poseer una mayor resistencia a los álcalis .

Resisten moderadamente a los álcalis los recubrimientos convencionales a base de aceites naturales (aceite de linaza) y resinas reactantes, como son las oleorresinosas, alquídicas, las basadas en ésteres, algunas fenólicas al 100%, las basadas en urea formaldehído y melamina formaldehído, las que contengan pigmentos sensibles a los álcalis etc. Por otra parte, presentan resistencia a los álcalis las pinturas fabricadas a base de materiales bituminosos, alquitran y resinas sintéticas como las vinílicas, epoxicas, de cloro-caucho, poliuretano, poliéster, etc.

- b. Sobreprotección:** Según sea la densidad de corriente aplicada el proceso catódico puede conducir a la formación de iones oxhidrilo exclusivamente o a una producción concomitante de iones oxhidrilo y desprendimiento de hidrógeno en la interfase acero/recubrimiento. A potenciales más negativos que - 1.0 voltio, del orden de -1.2 a -1.5 voltios respecto al electrodo de Ag/AgCl, son suficientes para la formación de hidrógeno debajo del recubrimiento originándose un ampollamiento de esta o la destrucción completa del recubrimiento protector. El hidrógeno producido puede, así mismo, provocar reacciones de reducción en ciertas resinas presen-

tes en la capa de pintura, con una pérdida de adherencia del recubrimiento protector.

c. **Electroósmosis:** Aquí el agua se ve forzada a pasar a través del recubrimiento en la dirección del flujo de corriente, dando lugar a ampollas de humedad y a una pérdida sensible de adherencia. Esta penetración de moléculas de agua es igualmente posible con recubrimientos de alta resistencia química, si bien los recubrimientos delgados, relativamente permeables, son los más vulnerables. La electroósmosis aparece cuando se aplica protección catódica a una superficie sumergida y se acentúa con el voltaje aplicado.

3.8 RECUBRIMIENTOS USUALES EN SISTEMAS CON PROTECCION CATODICA

Sólo nos dedicaremos exclusivamente en la línea de recubrimiento orgánicos, del cual se tiene una clasificación de acuerdo al mayor tipo de resina contenido en el vehículo. Lo más usados en el mercado nacional se detallan en la cuadro Nº 3.5 .

3.9 RECUBRIMIENTOS MAS USADOS EN PROTECCION CATODICA

El uso de recubrimientos disminuye notablemente los requerimientos de corriente en el sistema de protección catódica, por esta razón se vió la necesidad de hacer un sistema conjugado de ambos para suplir las deficiencias que presentan los recubrimientos, ya que no son completamente impermeables

CUADRO Nº 3.5

TIPO GENÉRICO	DESCRIPCIÓN	Nº DE COMPONENTES	MECANISMO DE CURADO	INMERSIÓN	TIPO DE SERVICIO	T I P O S DISPONIBLES	ESPESOR DE PELICULA	PREPARACION DE SUPERFICIE
(A) BASE ACEITE U OLEORESINOSA	Aceite, con secantes para acelerar su reacción	Uno	Reacciona con el oxígeno del aire	No recomen- dable	Uso común habitacio- nes ca- seras	Primer	50 micras (2 mils)	Limpieza con solventes
(B) ALQUIDI- CA	Resina con aceite y componente poliester	Uno	Reacciona con el oxígeno del aire	No recomen- dable	Exposi- ción normal	Primer Capa inter- media .Alto espesor Acabado	4.5 - 5.5 mils	-Limpieza mecánica -Arenado comercial SP-6
(C) FENOLICA	Formados por reacción del fenol y for- maldehído .	Uno	Reacciona con el oxígeno del aire	No recomen- dable	Uso normal	Primer	2 mils	Arenado comercial
(D) CAUCHO CLORADO	-Caucho Clorado -Termoplástico	Uno	Evaporaci- ón de sol- vente	Algunos tipos adecuados para in- mersión	-Normal semiseve- ro -Severo	-Alto espesor -Capa de aca- bado	5 a 6 mils	Arenado co- mercial al blanco SP-10
(E) EPOXICA								
EPOXICOS CATALIZA- DOS	Catalizado por amina ó poliamida	Dos	Polimeri- zación química por enlace cruzado	Intermiten- te ó conti- nua . Agua fresca y salada	Normal Semisevero Severo	Primer alto espesor Capa de aca- bado.	6 - 8 mils	-Arenado cer- cano al blanco SP-10 -Arenado al SPC SP 563
EPOXICOS HORNEADOS	Requiere de calor para convertirse en un film sólido	Uno	Con el calor	No recomen- dables	Normal	Primer alto espesor	2 mils	Arenado Comercial

TIPO GENERICO	DESCRIPCION	Nº DE COMPONENTES	MECANISMO DE CURADO	INMERSION	TIPO DE SERVICIO	T I P O S DISPONIBLES	ESPEJOR DE PELICULA	PREPARACION DE SUPERFICIE
EPOXICOS ESTERES	Resina epóxi termoendure- cible. Curado por enlace cruzado quí- mico con aceites se- cantes.	Dos	Oxidación	Recomenda- ble	Normal Semisevero Severo	Primer alto espesor	5 - 6 mils	-Arenado Comercial -Arenado cer- cano al blanco SP-10
(F) BITUMI- NOSAS	De Coal-tar ó asfalto disuelto en solventes hidrocarbona- dos aromáti- cos	Uno	Evaporación de solventes	Buena	Normal Semisevero Severo	Primer alto espesor	20 mils	Arenado Comercial
(G) VINILICAS	Polivinil clorado termoplástico	Uno	Evaporación de solventes	Algunos ti- pos adecua- dos para inmersión	Normal Semisevero Severo	Primer alto espesor Capa de aca- bado	8 mils	Metal Blanco
(H) ACRILICAS	Son resinas termoplásti- cas derivadas del gas natu- ral	Dos	Reacción química por enlace cruzado	No recomenda- ble	Normal Semisevero	Primer Capa de aca- bado	2 mils	Metal Blanco
(I) COALTAR EPOXICO	Resina termo- endurecible modificada con pich de coaltar	Dos	Reacción química por enlace cruzado	Excelente	Normal Semisevero Severo	Primer alto espesor Capa de aca- bado	14 - 16 mils	Arenado al metal blanco
(J) URETANO ALIFATICO	Resina termo- endurecible	Dos	Reacción química por enlace cruzado	No recomenda- ble	Normal Semisevero Severo	Primer alto espesor Capa de aca- bado	2 mils	Arenado cercano al blanco

TIPO GENERICO	DESCRIPCION	Nº DE COMPONENTES	MECANISMO DE CURADO	INMERSION	TIPO DE SERVICIO	T I P O S DISPONIBLES	ESPEJOR DE PELICULA	PREPARACION DE SUPERFICIE
(K) EPOXI RICO EN ZINC	Epoxi termo- endurecible altamente mezclado con polvo de zinc	Tres	Reacción química por enlace cruzado	No recomenda- ble	Normal Semisevero Severo	Primer	6 - 8 mils	Arenado metal blanco
(L) INORGANICO RICO EN ZINC	Silicato Al- quidico di- suelto en alcohol, alta- mente mezcla- do con polvo de zinc	Dos	Hidrolisis	Algunos tipos ade- cuados pa- ra inmer- sión	Normal Semisevero Severo	Primer	3 a 4 mils	Arenado cercano al blanco
(M) POLIESTER	A base de poliéster y estireno con cargas	Dos	Curado con peróxido de metil etil ceto- na	Excelente	Severo	Capa de acabado	1.5 - 9 mils	Arenado a metal blanco

hacia el medio corrosivo.

3.9.1 TIPOS, CARACTERISTICAS Y LIMITACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS

Los recubrimientos desarrollados para estructuras metálicas enterradas y sumergidas son :

1. **EPOXI-COALTAR:** Son productos de dos componentes y en general están formuladas para dejar películas gruesas, por lo que estas pinturas de resina epoxi necesitan un elevado grado de preparación de superficie preferiblemente por chorreado de arena . Una vez asegurado el anclaje al acero la protección conseguida es de elevada calidad.

APLICACION: Por su extrema dureza es recomendado para ambientes de alta abrasión, muestra excelente resistencia a la inmersión en agua dulce, así como para superficies enterradas con su debida protección catódica.

Es requerido en mantenimiento industrial de plantas químicas, pesqueras, refinerías de petróleo, embarcaciones, oleoductos, etc.

2. **COALTAR O BITUMINOSO:** Es el producido por la destilación destructiva del carbón bituminoso que se disuelve con solventes de hidrocarburos aromáticos, y se obtiene por el mecanismo de curado por evaporación de solventes . Requiere de un tratamiento de superficie (arenado al metal blanco) para adherirse con mayor facili-

dad y lograr mayor durabilidad.

Se obtienen películas gruesas, las cuales se agrietan cuando se exponen al exterior debido al ataque de la radiación ultravioleta, por esta razón son usados en superficies enterradas con la debida protección catódica para prolongar la vida del metal.

APLICACION: Para cubrir tuberías de una planta industrial, petroleras y tanques enterrados con protección catódica.

También se usan en protección catódica en concreto armado, para superficies sumergidas en condiciones normales, en agua dulce, etc.

3. RECUBRIMIENTOS A BASE DE ZINC

Estas pueden ser:

PIGMENTADAS: Con polvo de zinc más óxido de zinc, en concentración suficiente para asegurar el contacto eléctrico entre las propias partículas de zinc y el acero sobre el que se están aplicando. Las partículas de zinc se convierten en ánodos de cualquier celda de corrosión que pueda formarse en la interfase metal-recubrimiento corroyéndose como ánodo de sacrificio.

IMPRIMACION: Mediante una resina epóxica de buena adherencia al metal, en este caso el zinc y óxido de zinc reaccionan aparentemente de antemano con los ácidos orgánicos del vehículo, lo que asegura que no se formarán en la inter-

fase pintura-metal, jabones de aluminio ó otros productos que debiliten la adherencia de la pintura con el metal.

Existen dos tipos fundamentales de pinturas a base de zinc:

A. Zinc Rich (tipo inorgánico)

Características principales

Ofrece protección con una sola capa en numerosas condiciones ambientales.

Protección de larga duración cuando se usan en conjunción con adecuadas pinturas de acabado.

Suministra protección catódica.

Excelente resistencia al calor (hasta 300 °C) y a la abrasión.

Insoluble en compuestos hidrocarbonados.

Excelente resistencia a solventes e hidrocarburos.

Preparación de la Superficie:

Chorroado a metal blanco.

Mecanismo de Curado:

Evaporación del solvente y polimerización debido a la adsorción de la humedad.

Principales Limitaciones

Requieren una excelente preparación de superficie.

Aplicación sofisticada.

- No son adecuadas para condiciones de servicio ácidas (pH= 5.5) o caústicas (pH 10.5), a no ser que estén recubiertas con pinturas de acabado adecuadas.
- Requiere chorro de arena al metal blanco.
- Resistencia limitada a productos alcalinos y ácidos.
- Difícil aplicación, solamente a pistola.
- Alto costo.

B. Zinc Rich Epoxi (tipo orgánico)

Características principales :

- Proveen protección catódica.
- Excelente durabilidad al exterior
- Resistencia al calor (hasta 200°C) y a la abrasión.
- Ofrece excelente protección en una sola mano bajo condiciones de exposición normal.
- Costo inferior a los Zinc Rich inorgánicos

Preparación de la Superficie:

Chorroado al metal blanco.

Mecanismo de Curado:

Polimerización.

Principales Limitaciones:

- Requiere chorro de arena al metal blanco.
- Resistencia limitada a productos ácidos, alcalinos y solventes.

— Para mejor aplicación se utiliza pistola.

Otras características se resumen en la tabla Nº 3.1 .

APLICACION

El costo del polvo superfino de Zinc usado como pigmento hace caro este tipo de recubrimiento, pero a la vez lo hace extremadamente útil en la protección y mantenimiento de estructuras.

Las pinturas ricas en Zinc han sido ampliamente utilizadas para proteger el casco de los barcos de la corrosión. Algunas pinturas han sido especialmente formuladas, tal que ellas pueden ser aplicadas a superficies húmedas, pudiendo también estar en contacto permanente con el agua de mar (se han reportado buenos resultados de los recubrimientos ricos en zinc con pinturas de caucho clorado sobre el fondo de los barcos).

Estas pinturas son particularmente valiosas para renovar otros recubrimientos de Zinc los cuales han sido dañadas o gastados despues de muchos años de servicio.

También son utilizados para acabados de barcos y yates. Aplicandose estas en los fondos de los barcos de acero de las embarcaciones comerciales, con una imprimación de resina

T A B L A N O 3.1

TIPOS Y CARACTERISTICAS DE RECUBRIMIENTOS A BASE DE ZINC.					
SISTEMA	MEDIO CORR.	PREPARACION SUPERFICIE	ACABADO	ESPESOR PELICULA	TEMPERATURA LIMITE
ZINC RICH INORG.	MODE- RADO	MINIMO ARENADO SF-10	NINGUNO	3-4 MILS	399°C
ZINC RICH EPOXY/ EPOXY	MODE- RADO	MINIMO ARENADO SF-10	EPOXY	6-8 MILS	140°C
ZINC RICH EPOXY/ EPOXY HB	SEVE- RO	MINIMO ARENADO SF-5	EPOXY HB	10-12 MILS	140°C
ZINC RICH INORG.	SEVE- RO	MINIMO ARENADO SF-5	CAUCHO CLORADO VINILI- CO EPOXY	10-12 MILS	66-140 °C

alquitrán de hulla . Se aplica también sobre superficies de madera, tanto expuestas a la atmósfera industrial como aquellas que han adsorbido componentes ácidos. Las pinturas ricas en zinc sellan la superficie y aseguran que los subsecuentes recubrimientos y acabados permanezcan intactos.

4. COAL TAR EPOXI ANTICORROSIVO ZINC

La primera capa de imprimación es de pintura epóxica rica en zinc (92 a 94 % en peso) a una superficie metálica debidamente preparada.

Este recubrimiento evita la corrosión del acero mediante protección catódica, actuando inicialmente como ánodo de sacrificio el cual se va a oxidar en vez del metal, posteriormente la capa de zinc actuará como barrera de alta impermeabilidad a los agentes externos.

Se aplica una segunda capa de acabado, de un sistema de coal-tar epóxico, la cual le da larga duración mayor resistencia a medios corrosivos.

5. RECUBRIMIENTOS A BASE DE POLIESTER Y ESTIRENO

Recientemente en el Perú se ha introducido este tipo de recubrimiento a base de poliéster con cargas, entre sus propiedades está el de proveer muy buena resistencia al agua, ácidos y humedad.

Los componentes de este recubrimiento son:
Poliéster no saturado y estireno, curado con
peróxido de metil etil cetona (0.5%), con un
contenido de sólidos de un 100 % en volumen.

Se emplean en estructuras marinas como
plataformas, pilotes, lanchones, barcos con
protección catódica etc.

3.10 ANTECEDENTES EN LA EVALUACION DE RECUBRIMIENTOS ORGANICOS EN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA (9,10,11).

Se han realizado estudios en el CENIM por el Dr.
M. Morcillo y S. Feliu en los que se analiza los
efectos e influencia del tipo de imprimación sobre
los recubrimientos y así como el estudio de algunas
variables en el sistema dual recubrimiento y Protec-
ción Catódica . Son importantes estos ensayos por
cuanto amplían el conocimiento que tenemos de los
recubrimientos de un modo práctico, al analizar el
tipo de pintura que se adhiere a determinado impri-
mante o el recubrimiento que es afectado por poten-
ciales y espesores altos . Para mayor información
las especificaciones de las pinturas ensayadas se
muestran en el Anexo N^o 6, las conclusiones a las
que llegaron las detallaremos a continuación .

Por ejemplo, al aplicar las pinturas anticorro-
sivas sobre la superficie de acero pólida de acuerdo
con la recomendación ISO-R-1514-1970 se hizo patente
una falta de adherencia y un rápido deterioro del

recubrimiento anticorrosivo, en cambio el estado de los demás recubrimientos es excelente cuando se aplicaron imprimaciones tipo Wash Primer, Silicato de Zinc, Epóxica y Epóxi Aluminio sobre el acero base o se aplicó chorreado hasta el grado ASA-3 .

Asimismo se ensayó una serie de experimentos aplicando los 7 recubrimientos anticorrosivos dados anteriormente a los imprimantes Wash Primer, Sílica-to de Zinc, epóxi rico en zinc y epóxi aluminio. Esto se hizo para determinar que el periodo de tiempo (envejecimiento) que transcurre desde que las planchas son tratadas por chorreadas e imprima-das se lleven a recubrir, afecta el aspecto de la capa de imprimación observándose una ligera oxida-ción . Pero la aportación principal de los estudios realizados son en lo referente al ensayo de un intervalo amplio de potenciales (rango desde -0.85 Volt. a -1.5 Volt.) para ver la influencia de esta variable en el comportamiento de los sistemas de pinturas, y , por otro lado analizar el efecto de espesores de recubrimiento más gruesos (de hasta 250 μm).

Los recubrimientos ensayados fueron : Epóxi, Alquitrán, clorocaucho y vinílica aluminio . A la probeta se le realizó una vacante con el fin de provocar en una región localizada de la probeta una mayor densidad de corriente sin alterar el potencial

de protección aplicado en esa zona ; los recubrimientos ya mencionados ya tuvieron un espesor de 150 μm , y el recubrimiento que toleró perfectamente potenciales de hasta -1.0 volts. fue el de epóxi-alquitrán, asimismo potenciales más negativos motivaron en los 3 recubrimientos el ampollamiento de la película en círculos concéntricos alrededor de la vacante .

El recubrimiento vinílico aluminio es el que se muestra más sensible incluso a un potencial de -0.85 volts. , originandose un ampollamiento que afecta irregularmente a toda la superficie pintada .

En cuanto al espesor de los recubrimientos, el pasar de un espesor de 150 μm a 250 μm supone una mejora muy notable en el comportamiento del recubrimiento bajo potenciales catódicos no superiores a -1.0 volts. . A potenciales más negativos como -1.5 volts. el espesor de 250 μm no ha sido suficiente para evitar la aparición de graves daños en el recubrimiento en zonas cercanas a la vacante .

C A P I T U L O I V

METODOS DE DETECTAR LOS EFECTOS DE LA PROTECCION
CATODICA EN TUBERIAS METALICAS ENTERRADAS

CAPITULO IV

4.1 METODOS DE DETECTAR LOS EFECTOS DE LA PROTECCION CATODICA EN LOS RECUBRIMIENTOS ORGANICOS (7)

Existe un buen número de ensayos de laboratorio, para detectar el papel que desempeña un recubrimiento en relación a la protección catódica. Estos ensayos están basados en medidas de resistividad, de desprendimiento catódico y de impedancia.

4.1.1 MEDICION DE RESISTIVIDAD

La importancia de medir esta propiedad se deriva del hecho, de que en los recubrimientos de alta resistividad fuga menos corriente, lo cual contribuye a disminuir los costos operacionales de la protección catódica.

Uno de los métodos usados es el ASTM D-257, el cual consiste en aplicar un alto voltaje a un determinado volumen de material y medir la corriente. Sin embargo, por ser una medición en condiciones secas, no permite conocer como se comportaría el recubrimiento en condiciones húmedas.

Un método más general ha sido propuesto en el Ensayo DIN - 30670, en donde la resistividad de los especímenes recubiertos, se mide en solucio-

nes salinas.

A pesar de que los valores de resistividad ($\Omega\text{-cm.}$) a 25°C , son importantes para determinar el comportamiento del revestimiento al paso de la corriente, no indican realmente, ni permiten pronosticar el comportamiento de un material sometido a protección catódica.

4.1.2 ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO

La American Society for Testing Materials (ASTM) ha normalizado dos métodos codificados como ASTM G-8 (baja temperatura) y ASTM G-42 (alta temperatura) con el fin de simular en el laboratorio el comportamiento de una tubería recubierta bajo protección catódica, tanto con ánodo de sacrificio como con corriente impresa. En cualquiera de los métodos se trata de medir la resistencia que presenta la tubería recubierta, en un medio altamente conductor, y al someterse a una diferencia de potencial durante un intervalo de tiempo determinado. Esta resistencia es medida, teniendo en cuenta la intensidad de corriente que pasa a través de la tubería, o por el deterioro que sufre la unión metal/recubrimiento en los bordes de una perforación hecha intencionalmente en el recubrimiento. El medio altamente conductor consiste de agua potable con 1% en peso de cada una de las siguientes sales: cloruro de

sodio, carbonato de sodio y sulfato de sodio.

Este ensayo es el más usado para calificar el recubrimiento de tuberías.

4.1.3 THE SALT CROCK TEST

También la British Gas Engineering Standard (ps/cw 6) ha normalizado un método para medir el desprendimiento del recubrimiento. Este método a veces conocido como the Salt Crock Test, difiere substancialmente de los métodos de la ASTM en lo siguiente:

- El tamaño de la celda es menor, lo que limita el volumen de electrólito utilizado.
- El electrólito es agua destilada con 3% en peso de agua destilada.

4.1.4 ENSAYO DE IMPEDANCIA CON CORRIENTE ALTERNA (12)

Permite una predicción aproximada del comportamiento en servicio de los sistemas de pinturas protectoras. Las medidas de impedancia de corriente alterna hacen posible seguir la penetración del electrólito en el recubrimiento y detectar el inicio de la corrosión en la interfase metal-recubrimiento.

Las técnicas de impedancia de corriente alterna han aumentado su uso, debido al número de ventajas que tienen sobre las técnicas tradicionales de corriente continua. Una de las principales ventajas de las técnicas de impedancia de co-

corriente alterna, es la posibilidad de estudiar las reacciones de corrosión en medios de baja conductividad, donde las medidas de corriente continua no son posibles, a menos que la caída óhmica sea eliminada.

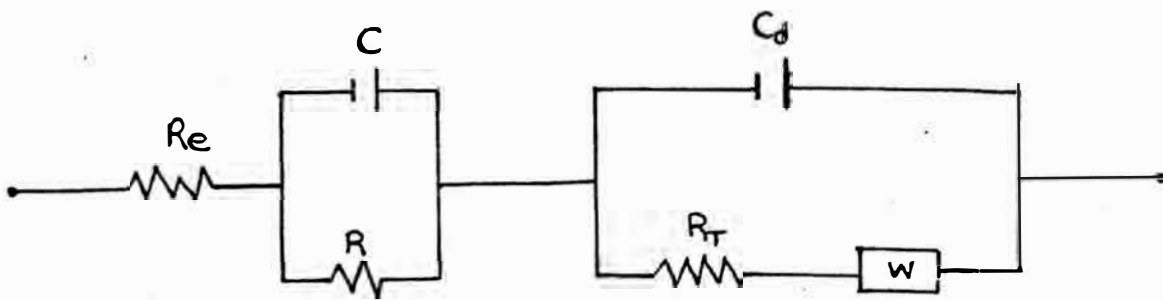
Esta técnica de impedancia permite la medición de los parámetros que caracterizan el comportamiento de la corrosión, con ayuda de la elaboración del diagrama de impedancia complejo del sistema que se estudia. Así se tiene que para el sistema de corrosión más simple, el diagrama de impedancia complejo corresponde un semicírculo (véase fig. N^o 4.1).

En esta técnica el uso de señales de corriente alterna muy pequeñas, no perturban los procesos que se producen en los electrodos, permitiendo el estudio de las reacciones de oxidación u reducción que se llevan a cabo.

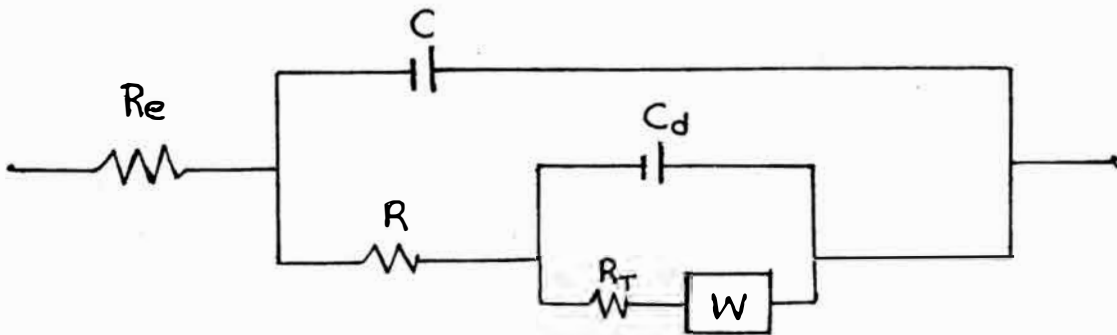
4.2 SISTEMA DE EVALUACION POR DESPRENDIMIENTO CATODICO CON REFERENCIA A LA NORMA ASTM G8-79 (13)

Estos métodos utilizan procedimientos acelerados para determinar características comparativas de sistemas con recubrimientos aislantes, que se usan en la superficie externa de tuberías de acero, con el fin de prevenir o mitigar la corrosión que puede ocurrir en el servicio subterráneo (suelos naturales), y en donde las tuberías pueden o no recibir protección catódica.

C I R C U I T O S E Q U I V A L E N T E S



PARA UN SISTEMA DE PINTURA SIN DEFECTOS



SISTEMA DE PINTURA DETERIORADA EN EL QUE LA SOLUCION PENETRA HASTA EL METAL BASE

F I G U R A N º 4 . 1

Las bases importantes a considerar para el diseño del sistema son:

1. El potencial óptimo es de -1.5 Voltios con respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 . El rango de potencial de trabajo es desde -1.45 V a -1.53 V.
2. El tamaño más apropiado de la vacante es el de 1/8 a 1/4 pulgada de radio, siendo la de 1/8 más apropiada para recubrimientos muy delgados. Las vacantes mayores de 1/4 de pulgada permiten el paso de demasiada corriente.
3. La resistividad del electrólito es importante. Para ensayos de laboratorio, ésta debe estar por debajo de 1000 Ohm-cm.
4. El área sumergida no será menor que 36 pulgadas cuadradas. El área correspondiente a un pie cuadrado ha sido encontrada como preferible.
5. La duración del período de ensayo será de 30 días. Opcionalmente otros periodos de ensayos pueden ser usados.
6. El electrólito consistirá de agua potable con la adición de uno por ciento en peso de cada una de las siguientes sales (grado técnico y calculadas en base anhidra).
 - Cloruro de sodio.
 - Carbonato de sodio.
 - Sulfato de sodio.

Debe usarse soluciones recién preparadas para cada ensayo.

4.3 AREA DESPRENDIDA (7)

Los límites de aceptación de un sistema de recubrimiento para Ensayos de Desprendimiento Catódico, se han definido en base al diámetro de área desprendida. Especificaciones dadas por los fabricantes extranjeros (Referencia: INTEVEP, Caracas, Venezuela), indican que, para considerar un recubrimiento apto para su uso en protección catódica en estructuras enterradas, los diámetros de desprendimiento deben ser inferiores a los 3 centímetros para 30 días de ensayo.

C A P I T U L O V

DISEÑO DE LA INSTALACION DE UN SISTEMA
DE PROTECCIONA CATODICA

CAPITULO V

5.1 CRITERIO PARA LA PROTECCION CATODICA (4,14)

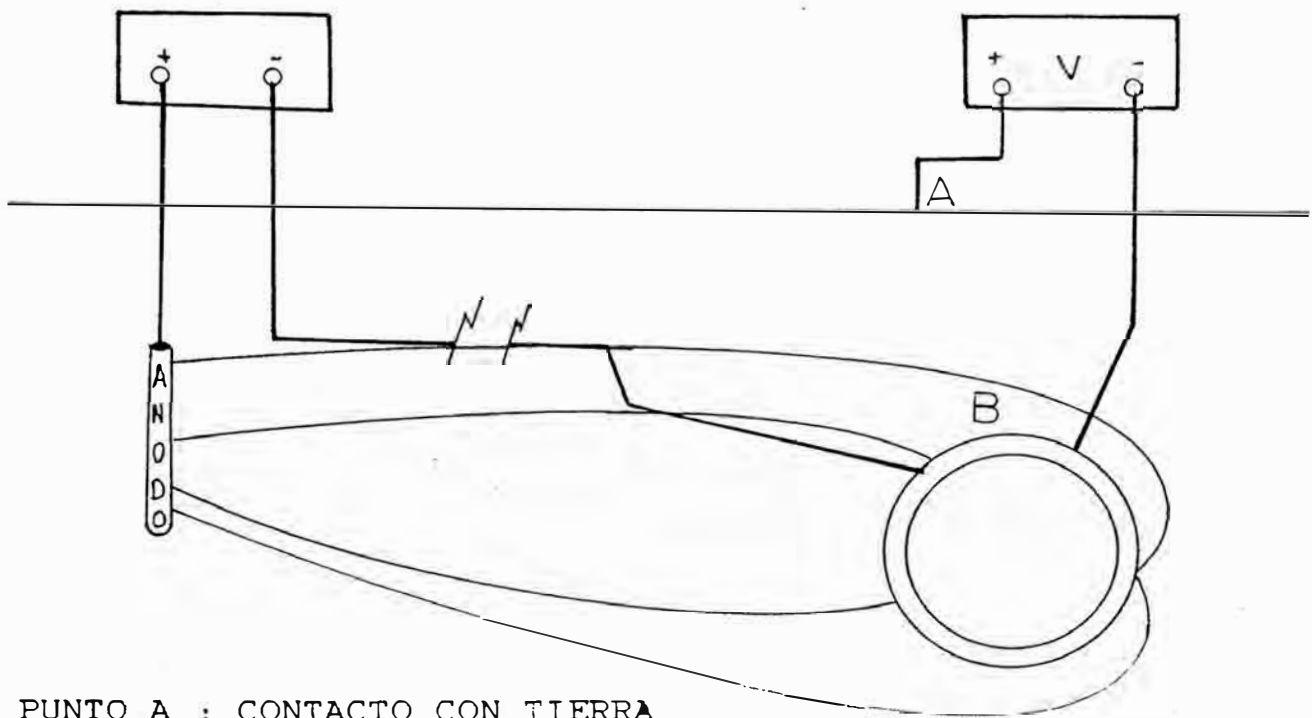
La protección catódica puede ser obtenida bajo condiciones prácticas de polarización y medio, incluyendo la presencia de bacterias sulfato reductoras. Varios criterios han sido desarrollados para determinar si se ha obtenido o no la protección necesaria. Esos criterios en los casos más comunes involucran medidas de potencial, pero también es posible usar otros métodos como indicación de protección.

5.1.1 MEDIDAS DE POTENCIAL

Cuando una tubería es protegida catódicamente, hay un flujo de corriente hacia la tubería desde el medio. Esto causa un cambio en el potencial, que representa a una combinación de la caída de voltaje a través de la resistencia entre la tubería y el medio y el potencial de polarización desarrollado en la superficie de la tubería. La resistencia entre la tubería y el medio incluye la resistencia del recubrimiento si la hubiera. El resultado neto es que la tubería se vuelva más negativa con respecto a su medio. Esto es ilustrado en la figura N^o 5.1 .

CAMBIO DE POTENCIAL TUBERIA - MEDIO CON FLUJO
DE CORRIENTE DE PROTECCION CATODICA

FUENTE DE ENERGIA



PUNTO A : CONTACTO CON TIERRA
PUNTO B : CONTACTO CON LA TUBERIA

F I G U R A N º 5.1

Si las áreas catódicas en una tubería que se corroe, son polarizadas al potencial en circuito abierto de las áreas anódicas, la corrosión será disminuida notablemente. Idealmente los potenciales debieran ser medidos a través de la interfase entre la tubería y el medio, en los terminales marcados como "Potencial de Polarización" en el circuito equivalente mostrado en la figura N^o 5.2. En la práctica, lo usual es medir el potencial entre la tubería y la tierra en la superficie directamente sobre la tubería. Este potencial tomado incluye el de polarización, más un potencial creado por el flujo de corriente a través de una porción de la resistencia entre la tubería y la tierra.

Asumiendo que la medida de potencial es un razonable acercamiento a un criterio de protección, la siguiente interrogante es: ¿qué potencial indica protección y cómo es medido? Se ha establecido que las áreas altamente catódicas en una tubería de acero en contacto con suelo o agua tendrán un potencial de alrededor de -0.8 voltios (ref. al Cu/CuSO₄). El valor práctico es de -0.85 voltios, para permitir caídas de potencial debido al medio (entre un punto del suelo y la tubería) y para permitir algún exceso en el potencial de la mayor parte de las áreas altamente catódicas.

Antes de la aplicación de la protección catódica, las lecturas tomadas desde punto a punto sobre una tubería de acero desnuda pueden variar desde un valor alto de -0.1 a -0.3 voltios (en las áreas más anódicas) a un valor bajo de -0.8 volt. (en las áreas más catódicas).

Las mediciones de potencial hechas a lo largo de una tubería recubierta, antes de la aplicación de la protección catódica, no mostrará el rango de variación de punto a punto como en las líneas desnudas, esto es debido a que sólo muy pequeñas áreas de acero están expuestas al medio. Típicamente una nueva tubería de acero recubierta puede tener potenciales promedio en el orden de -0.7 voltios o más altos.

5.1.2 MEDIDAS DE CORRIENTE

Cuando se desea proteger catódicamente una tubería desnuda enterrada, la experiencia ha demostrado que requerirá una corriente protectora de aproximadamente un miliamperio por cada pie cuadrado de superficie expuesta, si la tubería es nueva, y 3 miliamperios si la tubería es usada. Pero éstas son guías generales, en casos especiales debe ser medida y utilizada la corriente real de protección.

Como indicativo de protección, pueden usarse mediciones de corriente de tierra en las áreas

catódicas de las tuberías desnudas, para determinar que la corriente esté fluyendo a la tubería en esos puntos cuando la protección catódica es aplicada.

5.1.3 VOLTAJES DE POLARIZACION

Cuando en una pila galvánica fluye corriente, el potencial del ánodo aumenta y el del cátodo disminuye. Esta variación del potencial causado por una corriente neta aplicada o extraída de un electrodo, medido en voltios, se denomina Polarización.

Los voltajes de polarización pueden ser usados para determinar un criterio de potencial límite para recubrimientos orgánicos de sistemas enterrados o sumergidos protegidos catódicamente. Este potencial límite es para evitar el daño que se produce por la evolución de gas hidrógeno.

Cuando la estructura se ha polarizado a un nivel estable de protección (potencial e intensidad de corriente), es posible aplicar el criterio de protección, midiendo el potencial de la estructura inmediatamente a la desconexión de la corriente. Usualmente esto puede usarse exitosamente después de un considerable período de operación de la protección catódica. Si en tuberías de acero este potencial está por encima de -1.2 voltios (ref. Cu/CuSO₄), el peligro de

daño del recubrimiento por aplicar corrientes altas de protección, es leve. Pero si el potencial está por debajo de -1.2 voltios, puede esperarse un daño al recubrimiento.

Algunos prefieren usar un criterio oscilatorio, que es el potencial inmediato a la desconexión de corriente comparado con el que se tiene después de algún tiempo. Estos potenciales llamados "instant-off" son usados en estructuras donde hay interés sobre la suficiencia de protección en todos los puntos.

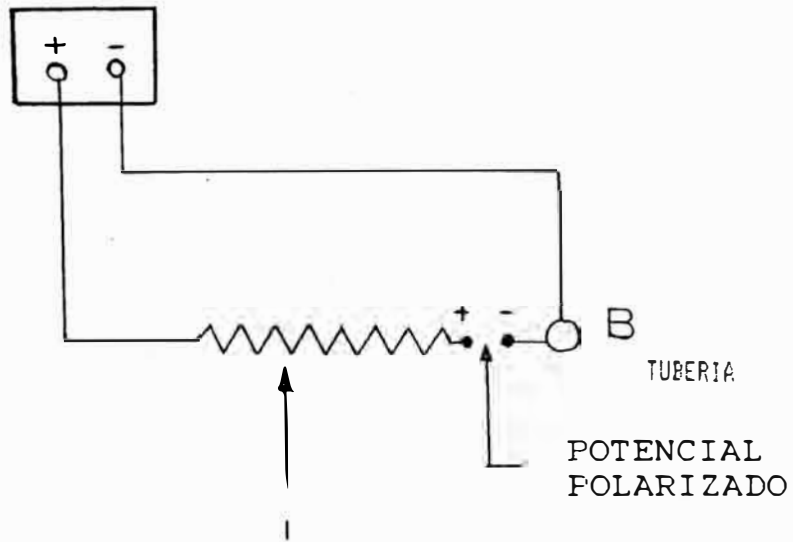
5.2 TOMA DE MEDIDAS Y TECNICAS

5.2.1 CURVAS DE CORRIENTE - POTENCIAL

Son usadas para determinar la cantidad de corriente requerida para alcanzar la protección catódica en una sección de tubería. Esencialmente consiste en aplicar incrementos de corriente protectora y medir el potencial de polarización correspondiente (en el punto que está investigando). El potencial en voltios (con respecto a un electrodo de referencia remoto) es plotado contra el logaritmo de la corriente total aplicada. El ploteo es continuado hasta que se note una desviación definida en la curva. Esto se ilustra en la figura N^o 5.3 .

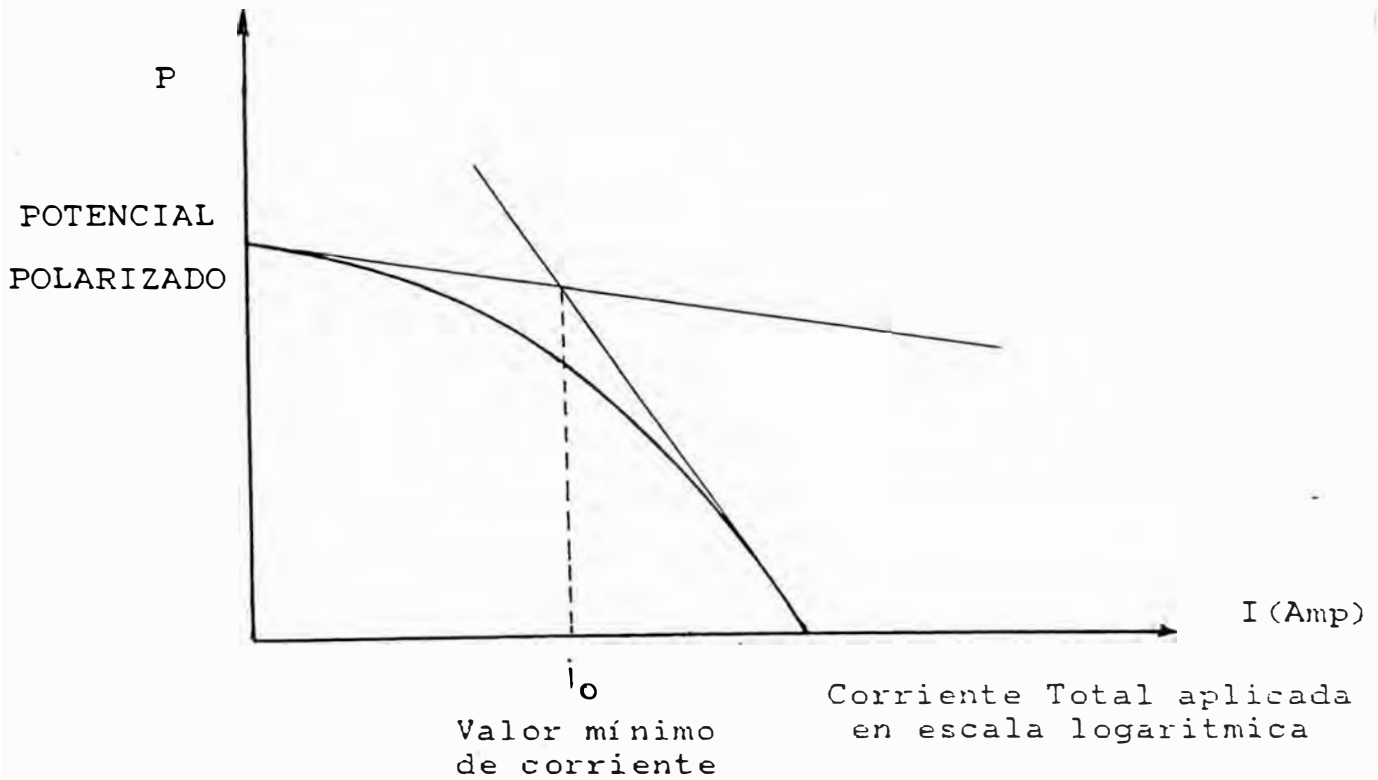
La corriente que fluye en el punto de la desviación es indicativo de la corriente externa

FUENTE DE ENERGIA



COMBINACION DE RESISTENCIA ANODO - TIERRA Y
RESISTENCIA TUBERIA - MEDIO

F I G U R A N o 5.2



F I G U R A N o 5.3

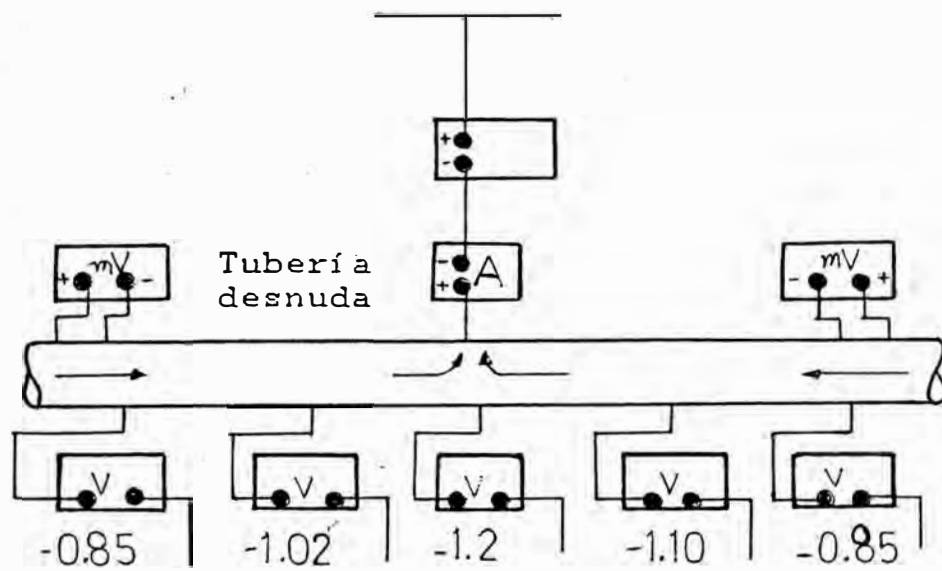
que se requiere (desde la fuente) para proteger la tubería en el punto donde las medidas de potencial han sido tomadas. El punto de desviación puede ser más definido en algunas estructuras. Esto dependerá del tamaño de tubería, número de áreas anódicas y catódicas en la estructura, homogeneidad del medio, etc.

Este criterio requiere una considerable cantidad de tiempo y técnicas cuidadosas de ensayo para obtener una determinación en un punto a lo largo de la tubería.

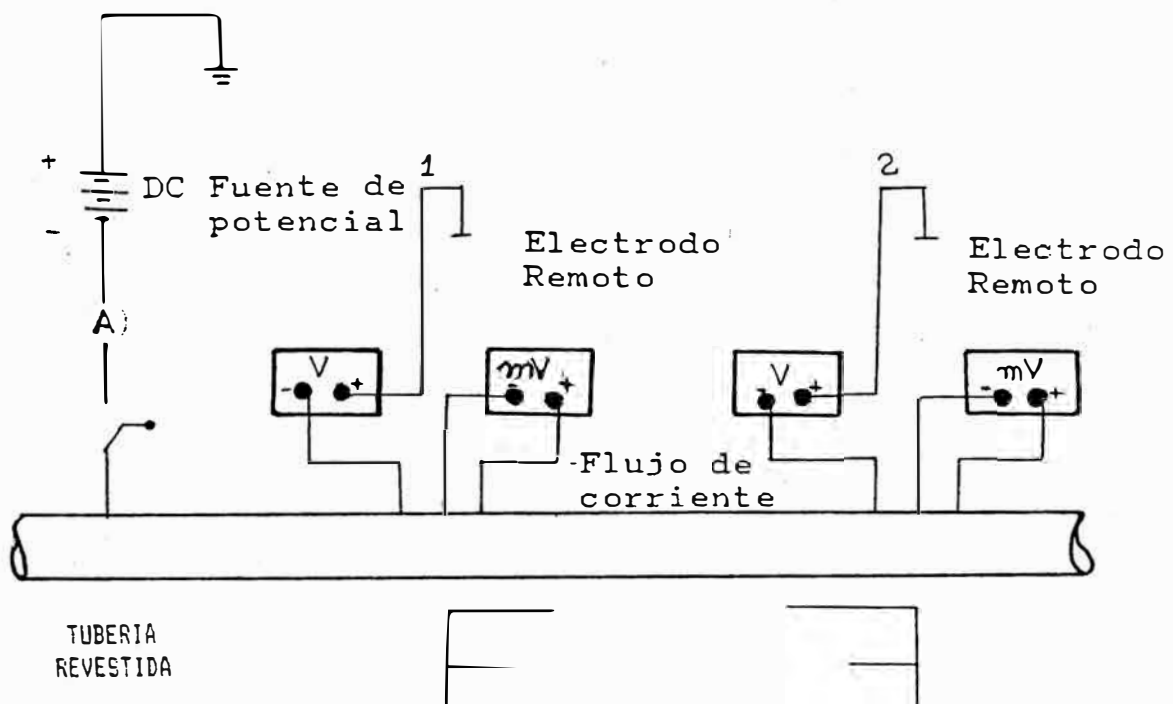
5.2.2 REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE

La obtención de la data de requerimientos de corriente puede ser determinada aplicando una fuente temporal de protección catódica y midiendo la corriente requerida para lograr el potencial deseado. La figura N^o 5.4 muestra tal ensayo.

Cuando se trabaja con tuberías, se permitiría que la corriente fluya constantemente para que la línea se polarize en algún grado dependiendo de la duración del ensayo. La polarización total puede tomar semanas, pero si durante el ensayo, el aumento en los potenciales protectores es ploteado versus el tiempo a un rendimiento de corriente fijo, la extensión de la curva puede dar una aproximación de los potenciales que serían obtenidos con polarización completa. La



F I G U R A N o 5.4



F I G U R A N o 5.5

corriente que fluye en la sección de la tubería protegida, puede ser medido por la caída de voltaje a través de la longitud conocida de la tubería en uno u otro lado. Estos dos valores pueden luego ser restados de la corriente total con el objeto de obtener el flujo neto en la sección protegida.

Al diseñar el ensayo para tubería desnuda se necesita de una fuente de corriente que tenga suficiente capacidad para abastecer al menos 3 mA/pie² de superficie de tubería más el 25 por ciento. El voltaje de la fuente debe ser suficiente para forzar la corriente necesaria a través del lecho temporal de ánodos. En tubería recubierta los requerimientos de corriente serán menores, lo que hace posible ensayar varios miles de tubería en una sola vez. Los ensayos se realizan según se ilustra en la figura N^o 5.5. Un interruptor de corriente es usado para apagar y prender la corriente a un intervalo conveniente de tiempo (30 seg. prendido y 15 seg. apagado). Los ensayos pueden tomarse sección por sección y continuarse en cada dirección desde una unidad temporal hasta que los cambios en los potenciales y corrientes observados no sean muy grandes.

5.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA

El diseño del sistema de protección catódica se hará en base a los dos tipos de ánodos utilizados en la experiencia. La cuadro Nº 5.1 muestra los pasos a seguir de modo general.

5.3.1 SISTEMA ANODO DE MAGNESIO

Las siguientes consideraciones han de tomarse en cuenta para el diseño :

- 1.- Tipo: Condición y área superficial de la estructura a ser protegida. El cálculo del área puede ser obtenido del diámetro y longitud del tubo.
- 2.- Continuidad eléctrica, esto implica corriente continua.
- 3.- Estimado del Requerimiento de Corriente, puede ser deseable hacer ensayos específicos para determinar los requerimientos de corriente de una sección de tubería. Tal ensayo consiste en forzar corriente directa desde un lecho temporal de ánodos a la sección de tubería y determinar la corriente que será necesaria para proteger tal sección. Sin embargo, si un sistema con ánodos galvánicos será instalado, no se requerirán ensayos hasta que la instalación de los ánodos sea hecha. El rendimiento de corriente de los ánodos ya existentes, se determina dividiendo el

C U A D R O N° 5.1

PASOS EN EL DISEÑO DE LA INSTALACION DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA	
ANODOS DE SACRIFICIO Y CORRIENTE IMPRESA	
1. Establecer la resistividad del suelo o agua 2. Estimar los requerimientos de corriente totales que dependerán de la agresividad del medio, naturaleza del recubrimiento, área de la estructura. 3. Establecer la continuidad eléctrica de la estructura.	
ANODO DE SACRIFICIO	CORRIENTE IMPRESA
5. Seleccionar el ánodo de metal adecuado y tamaño que dará una vida optima y mejor rendimiento.	5. Seleccionar la ubicación adecuada del lecho de ánodos que puede ser en: -Suelos de baja resistividad . -Fuente de energia cercana. -En puntos donde los problemas de interferencia no sean significativos. -En una ubicación donde el lecho y los cables estén inmunes de disturbios.

6. Determinar el número total de ánodos requeridos	6. Determinar si los ánodos serán instalados vertical u horizontalmente.
7. Deducir el espaciamiento de los ánodos que dará una distribución de corriente uniforme.	7. Determinar las resistencias que serán las del: -Cátodo (usualmente insignificante). -Cable (dependerá de la corriente, tamaño y longitud del cable). -Anodo (depende del diseño del lecho). -Considera los efectos de la caída de voltaje del cátodo en puntos remotos.
8. Seleccionar la ubicación de los puntos de ensayo (usualmente estará en la mitad de la distancia entre los ánodos y la línea).	8. Decidir el voltaje a utilizar.
	9. Determinar el material óptimo del ánodo.
	10. Deducir el número y tamaño óptimo de los ánodos.
	11. Decidir el espaciamiento entre ánodos.

potencial neto (entre los ánodos y la línea de tubería) entre la resistencia del ánodo a tierra.

$$I_a = \frac{E_d}{R_a} = \frac{E_a - E_{cu}}{R_a}$$

I_a [amperios]

donde:

E_a = Potencial del circuito abierto entre el ánodo y el electrodo de referencia.

E_{cu} = Potencial del circuito cerrado entre el cátodo y el electrodo de referencia.

R_a = Resistencia ánodo-tierra [ohmios]

E_d = Voltaje entre el ánodo y el cátodo para sistema protegido [voltios].

Es posible obtener también el requerimiento de corriente teórico aproximado, partiendo de la densidad de corriente requerida para el electrólito dado, de la siguiente forma:

$$I_t = \text{Densidad de corriente) (Área Superficial)} \\ \text{[amperio]} = \text{[amperio/m}^2\text{]} \quad \text{[m}^2\text{]}$$

La Tabla N^o 5.1 muestra valores típicos para acero libres de influencia galvánica adversa y en varios electrólitos.

4.- Establecimiento de la Resistividad del Electrólito, esta información es necesaria para hallar el rendimiento de corriente de los

TABLA Nº 5.1

VALORES TÍPICOS DE REQUERIMIENTO DE CORRIENTE PARA ACERO LIBRE DE INFLUENCIA GALVANICA ADVERSA EN VARIOS AMBIENTES

AMBIENTE	DENSIDAD DE CORRIENTE REQUERIDA PARA UNA ADECUADA PROTECCION CATODICA BASADA SOBRE UN AREA SUPERFFICIAL
ACERO DESNUDO	
Suelo neutro , estéril	4.3 - 16.1
Suelo neutro , bien aereado	21.5 - 32.3
Suelo bien aereado , seco	5.4 - 16.1
Suelo húmedo, condc. severa/mod.	26.9 - 64.6
Suelo altamente ácido	53.8 - 161.4
Suelo con bact. sulf. reduct.	451.9
Suelo caliente	53.8 - 269.0
Concreto seco	5.4 - 16.1
Concreto húmedo	53.8 - 269.0
Agua fresca estacionaria	53.8
Agua fresca en movimiento	53.8 - 64.6
Agua fresca y turbul. con Oxi.	53.8 - 161.4
Agua caliente	53.8 - 161.4

AMBIENTE	DENSIDAD DE CORRIENTE REQUERIDA PARA UNA ADECUADA PROTECCION CATODICA BASADA SOBRE UN AREA SUPERFFICIAL
Agua contaminada de desague	538.0 - 1614.0
Agua de mar	53.8 - 269.0
Comp.Quim., (ác.d.y álcal.)	53.8 - 269.0
Agua de interc.de calor	1345.0 sobretodo
ACEROS BIEN RECUBIERTOS	
Suelos	0.01 - 0.2
ACEROS BIEN RECUBIERTOS CON POROS DETECTADOS Y ALTO VOLTAJE	
Suelos	0.01

ánodos junto con sus posiciones, fuente de voltaje y energía, también dá una indicación de la agresividad del medio. El método más práctico es el de Wenner o método de los 4 puntos. El valor de resistividad para el agua de mar es de 25 ohm-cm.

5.- Resistencia total del circuito, ésta puede ser obtenida a partir del voltaje (E_d) entre el ánodo y el cátodo (E_d) del siguiente modo:

$$R_t = \frac{E_d}{I_t}$$

donde:

R_t = Resistencia total del circuito.

I_t = Corriente total.

También es posible obtener la resistencia total del circuito de la suma de las resistencias: Resistencia ánodo-medio (R_a), Resistencia del electrólito (R_e) y Resistencia del metal-medio (R_m).

Resistencia del ánodo-medio: Esta puede variar independientemente del cátodo y así la forma y tamaño del ánodo pueden controlar la corriente útil que fluye en un determinado electrólito. Las ecuaciones generales para ánodos verticales y horizontales simples está en función de la resistividad del suelo (ρ), longitud (l) y diámetro del ánodo (d).

$$R_a = \frac{0.00521 (\rho)}{l} \left(\ln \left[\frac{8 l}{d} \right] - 1 \right)$$

donde:

(ρ) = ohm-cm

l = pies

d = cms

La resistencia del electrólito ó la resistencia del medio podemos obtenerla a partir de la resistividad (R), longitud de separación del ánodo-cátodo (L) y el área del cátodo (A), de la siguiente forma:

$$R = \frac{L}{A}$$

Resistencia del metal-medio: se asume el valor práctico de 2 ohm-cm.

Luego la resistencia total del circuito será:

$$R_t = R_{\text{ánodo}} + R_{\text{electrólito}} + R_{\text{metal-medio}}$$

6.- Vida útil del ánodo: estará dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Vida} = \frac{C (\text{Amp-Año/Kg}) \times W (\text{Kg}) \times \text{Rend.} \times \text{Fact}}{\text{Intensidad de Corriente (Amp)}}$$

Las características del ánodo utilizado, tales como Capacidad de Corriente (C), Rendimiento de Corriente (Rend) y Factor de Utilización (Fact), se hallan en la Tabla Nº 2.1. El peso del ánodo utilizado (W) fue de 0.25 Kg.

7.- Disposición geométrica del sistema: se estudiará la disposición más adecuada para lograr la distribución más uniforme posible de la corriente de protección, de modo de no crear zonas desfavorecidas. Ver Plano N^o 1.

8.- Se dispondrá la instalación de equipos para obtener las mediciones de control.

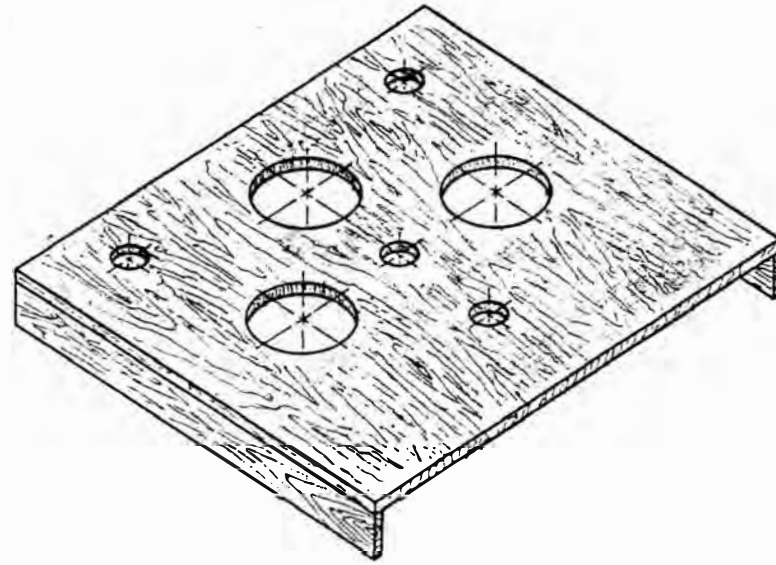
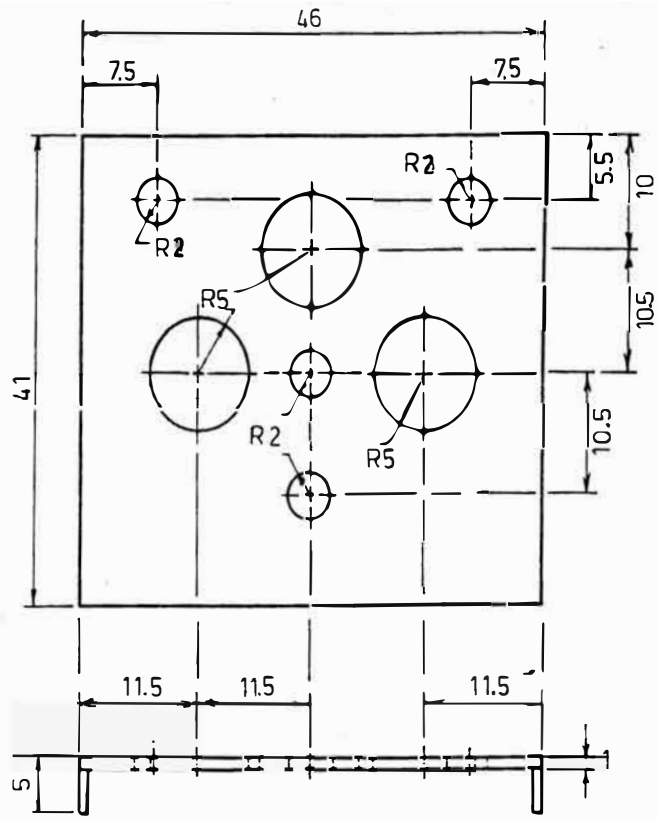
Los datos utilizados para el diseño del sistema de protección, así como los resultados obtenidos se encuentran en las Tablas N^o 5.2 y N^o 5.3 respectivamente, tanto para la tubería desnuda como para la tubería recubierta.

5.3.2 SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA

Los siguientes factores han de ser tomados en cuenta cuando se diseñe un sistema de protección catódica por corriente impresa.

1.- Tipo y condición de la estructura: estructura con sin recubrimiento, condición, tamaño y longitud.

2.- Disponibilidad de la fuente de corriente: esto es muy importante, la máxima corriente desde una unidad de energía estará limitada por consideraciones prácticas de ingeniería. Los rectificadores que abastecen de electricidad de corriente continua son los más convenientes y populares, sin embargo también pueden usarse generadores de corriente



NOTA

- Las medidas en centímetros.
- Juntas encoladas y clavadas.
- Material: madera terciada.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	Dis. por: C. Huamaní K. Quispe
EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERIAS	Dib. por: A.H.S.
SISTEMA: ANODO DE SACRIFICIO PLANO N°1: Distribución Geométrica de los Anodos	Rev. y Aprob.:
FECHA:	Firma:
ESCALA: 1:5	

T A B L A N O 5.2

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA CON ANODO DE SACRIFICIO-TUBERIA DESNUDA		
DATOS	TABLA	LABORATORIO
Resistividad del agua salada (ohmio-cm)	25	34
Densidad de corriente (mA/ft ²)	25	—
RESULTADOS	TEORICO	LABORATORIO
Requerimientos de corriente (mA)	9.2	161.4
Resistencia total (ohmio)	16.29	4.18
Resistencias parciales (ohmio)		
Resistencia del ánodo/medio	—	0.929
Resistencia del Electrolito	—	1.259
Resistencia del Metal/medio	—	2
Vida del ánodo (años)	3	—

T A B L A N º 5.3

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA CON ANODO DE SACRIFICIO-TUBERIA RECUBIERTA		
DATOS	TABLA	LABORATORIO
Resistividad del agua salada (ohmio-cm)	25	34
Densidad de corriente (mA/ft ²)	2.3-3.25	25-35
RESULTADO	TEORICO	LABORATORIO
Requerimiento de corriente (mA)	1.2	161.46
Resistencia Total	125	4.2
Resistencias parciales (ohmio)		
Resistencia ánodo/medio	-	0.929
Resistencia electrolito	-	1.250
Resistencia metal/medio	-	2
Vida del anodo (años)	22	-

alterna.

3.- Resistividad del medio: puede obtenerse de tablas para el medio utilizado, o experimentalmente por medio de una conductímetro, en el caso de ensayo en laboratorio.

4.- Requerimiento de voltaje: durante la prueba llevada a cabo, el voltaje se estableció en un valor fijo, dado en la Norma ASTM G 8-79.

5.- Resistencia del circuito: La resistencia total debe ser considerada y los componentes críticos externos a la fuente de potencia serán:

- Resistencia del ánodo-electrólito: Al ser usado el ánodo con rectificador, la resistencia debe ser lo suficientemente bajo para obtener el rendimiento deseado con el voltaje adecuado.

- Resistencia del ánodo: Determina el voltaje requerido para producir el flujo de corriente deseado y además la potencia consumida. Este valor se obtiene de la fórmula dada anteriormente para hallar la resistencia del ánodo.

- Resistencia del medio: En tuberías pequeñas este valor se desprecia.

- Resistencia de cable: Alimentador positivo (fuente de potencia, terminal positivo del ánodo) y resistencia del cable negativo de

retorno (fuente de potencia, terminal negativo a la estructura).

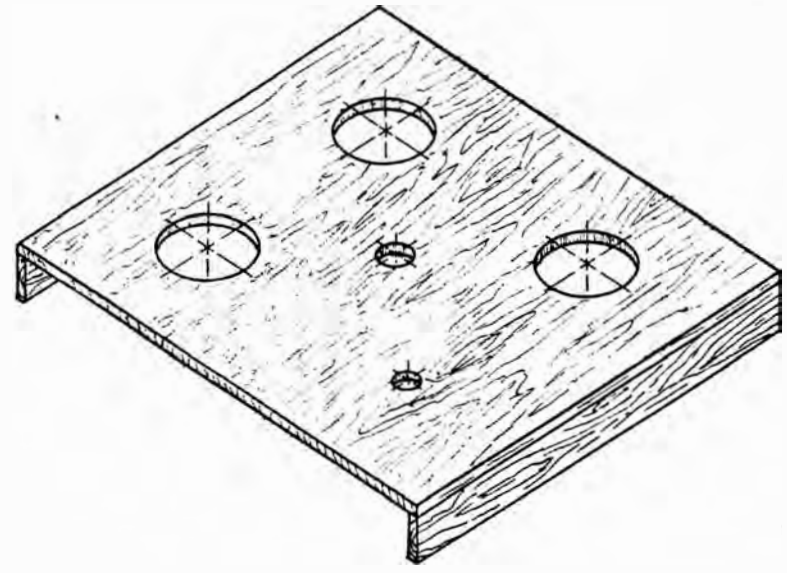
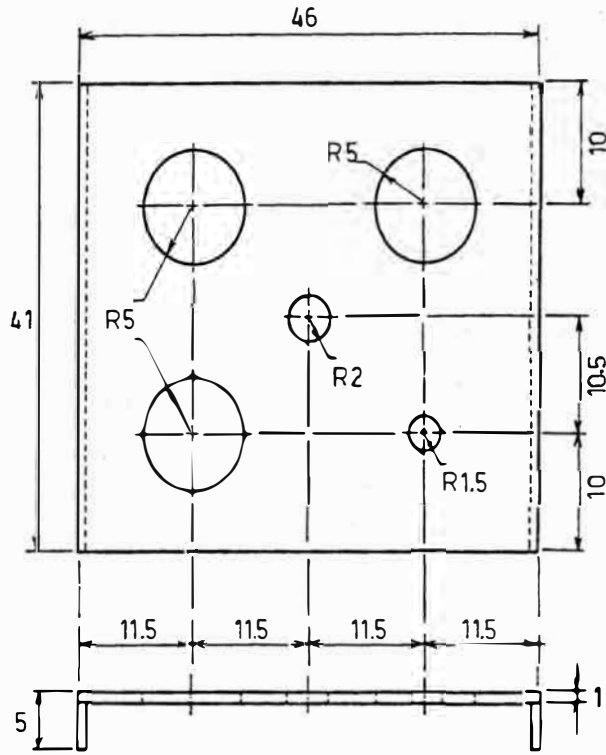
Resistencia de todas las conexiones y ajustes.

6.- Configuración de la estructura a proteger con respecto al ánodo, deben estar debidamente espaciados. Ver Plano N^o 2.

7.- Posición del ánodo, vertical u horizontal, guardando en mente la conveniencia de la ubicación más uniformemente conductora.

8.- Vida del ánodo: Esto permite calcular y seleccionar ánodos para lograr la vida deseada. El ánodo utilizado en este caso es una ánodo platinizado.

Los datos utilizados, así como los resultados del sistema de corriente impresa se encuentran en la Tabla N^o 5.4 .



NOTA

- Las medidas están en centímetros.
- Las juntas encoladas y clavadas.
- Material: madera terciada.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA		Dis. por: C. Huamani K. Quispe
EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERIAS		Dib. por: A.H.S.
SISTEMA: CORRIENTE IMPRESA PLANO: N°2: Distribución Geométrica		Rev. Aprob.:
FECHA:	ESCALA: 1:5	Firma:

T A B L A N O 5.4

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA CON CORRIENTE IMPRESA-TUBERIA RECUBIERTA		
DATOS	TABLA	LABORATORIO
Resistividad del medio (ohmio-cm)	25	34
Densidad de corriente (mA/ft ²)	2.3-3.25	25-35
Potenciostato		
Corriente drenada (mA)	-	500
Voltaje (volt.)	-	10
Potencial P/S ON (volt.)	-	1.5
RESULTADOS	TEORICO	LABORATORIO
Requerimiento de corriente (Amp.)	0.25	0.5
Resistencia total del circuito (Ω)	20	13.166
Resistencias parciales (ohmio)		
Resistencia ánodo/medio	-	1.6
Resistencia electrolito	-	1.2
Resistencia cable	-	0
Vida del ánodo (años)	42	-

C A P I T U L O VI

REQUERIMIENTOS Y TECNICA EXPERIMENTAL PARA EL
ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO

CAPITULO VI

6.1 REQUERIMIENTOS PARA PRUEBA DE ENSAYO DE LABORATORIO

Las técnicas, materiales y condiciones experimentales utilizados en el desarrollo de la presente tesis estuvieron fundamentados en las recomendaciones de la Norma ASTM G8-79 para ensayos a temperatura de 25°C.

6.1.1 MATERIALES

1. ELECTROLITO

El electrólito empleado, fue una solución formada por agua normal y la adición de 1% en peso de cada una de las siguientes sales anhidras de grado técnico:

- Cloruro de sodio.
- Sulfato de sodio.
- Carbonato de sodio.

Para cada ensayo se preparó solución fresca.

2. ANODO DE SACRIFICIO

Se utilizaron ánodos de sacrificio, hechos con aleación de magnesio (aluminio 6%, zinc 3%), estos ánodos proporcionan un potencial en solución de -1.45 a -1.65 voltios con respecto a un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄.

El área superficial de los ánodos de sacrificio fue aproximadamente un tercio del área total del espécimen expuesto al electrolito.

Las dimensiones de los ánodos de sacrificio utilizados fueron de 16 cm. de largo por 3 cm. de diámetro. En la tabla N^o 6.1 aparece el número de ánodos utilizados de acuerdo con la capacidad de la celda.

En la parte superior de cada ánodo de sacrificio se fijó un perno y una tuerca de bronce, esto se utilizó como ajuste del alambre 14 AWG aislado eléctricamente (vease para mayor especificación la Fig N^o 6.1 . La zona de unión se selló con pasta epóxica (pasta X de la fabrica de Masilla Lebetón) .

3. ANODO DE CORRIENTE IMPRESA (15)

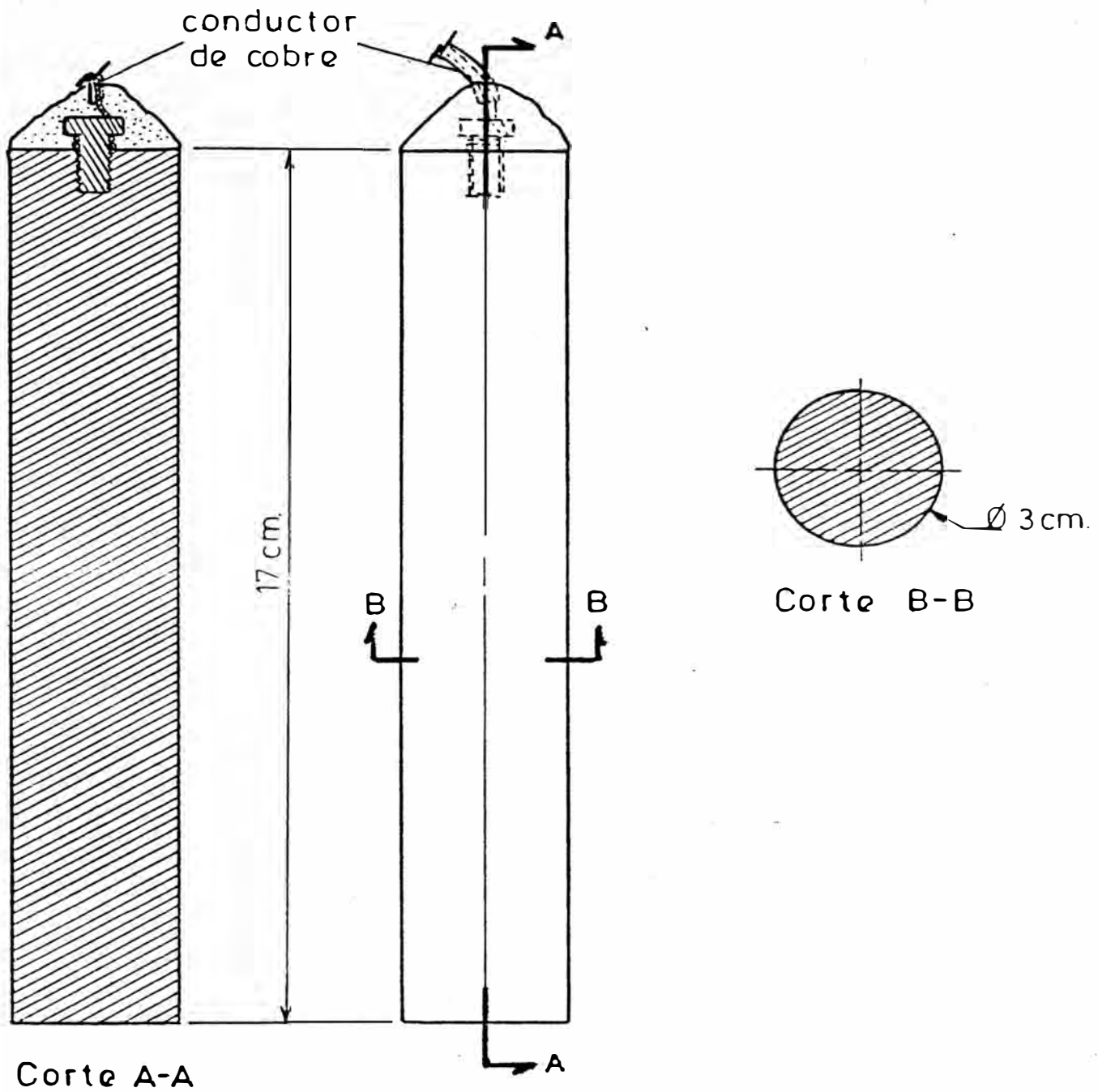
Los ánodos de corriente impresa fueron elaborados de alambre platinizado con alma de cobre (Cobre 60%, Niobio 40%), el espesor de platino es de 63.5 μ m. Las dimensiones de los ánodos son: 20 cm. de largo, 0.160 cm. de diámetro (veáse la fig. N^o 6.2).

El número de ánodos utilizados en cada ensayo se determinó en base a requerimientos de voltaje y se ubicaron en las celdas de modo tal, de obtener la misma diferencia de potencial en todos los puntos (veáse tabla N^o 6.1).

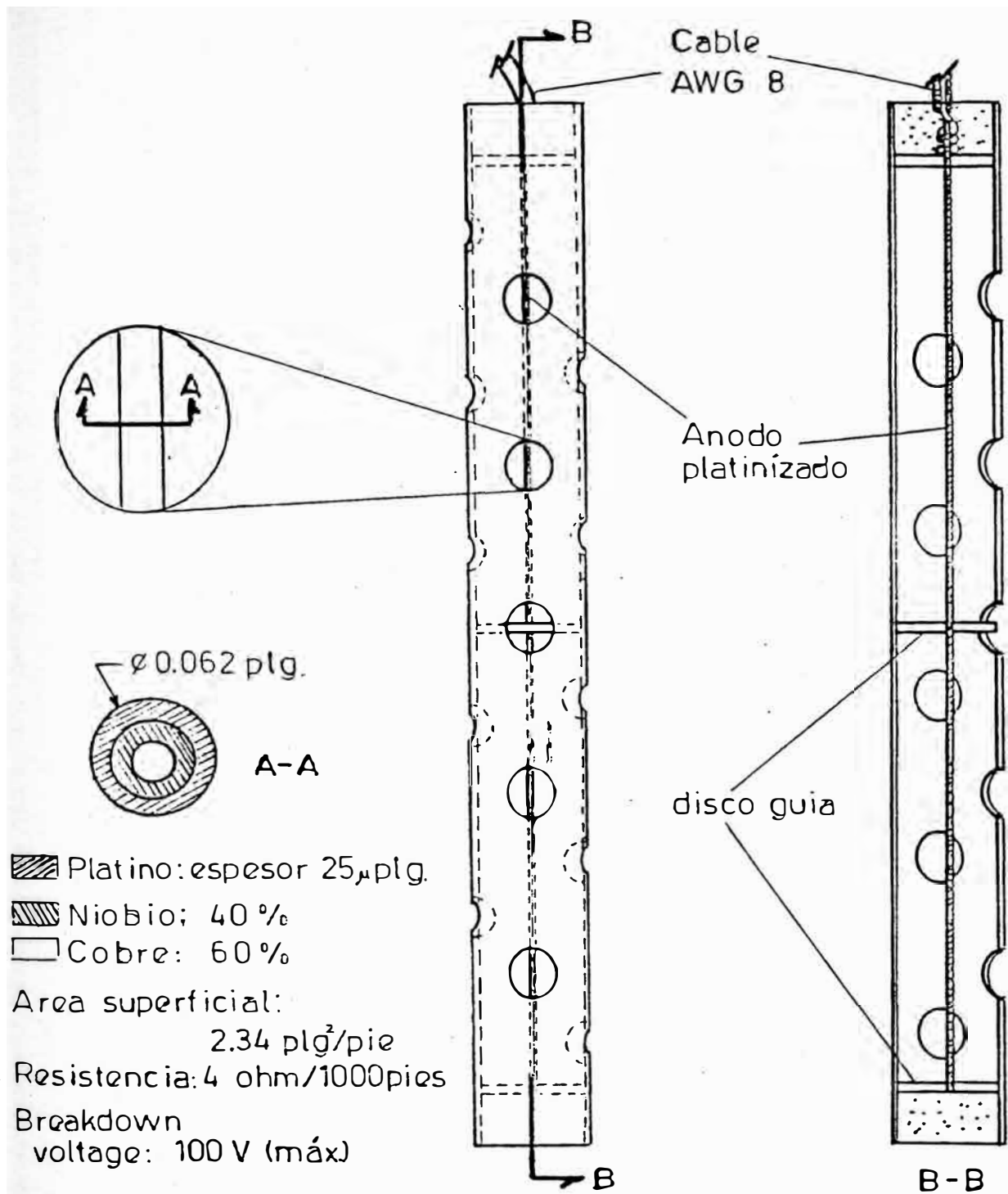
T A B L A N O 6.1

CANTIDAD DE ANODOS DE SACRIFICIO UTILIZADOS SEGUN EL NUMERO DE ESPECIMENES EN CADA CELDA		
Nº DE ESPECIMENES	Nº DE ANODOS DE SACRIFICIO	AREA SUPERFICIAL TOTAL PROPORCIONADO (cm ²)
2	2	302
3	3	452

CANTIDAD DE ANODOS DE CORRIENTE IMPRESA UTILIZADOS SEGUN EL NUMERO DE ESPECIMENES EN CADA CELDA	
Nº DE ESPECIMENES	Nº DE ANODOS DE CORRIENTE IMPRESA
2	1
3	1



F I G U R A N º 6.1



F I G U R A N º 6.2

4. MUESTRAS DE ENSAYO

Los especímenes empleados fueron tubos de acero (fierro negro sin costura) de 2 pulg. y 4 pulg. de diámetro, con longitud de 30 a 35 cms. Estas probetas recibieron el tratamiento de arenado como limpieza previa al recubrimiento. En el cuadro Nº 6.1 aparecen las características generales de los sistemas de recubrimiento utilizados .

5. SUSPENSION DE LOS ESPECIMENES

Se preparó un soporte de madera para que sirviera de apoyo a los especímenes, ~~estos~~ últimos van a estar colocados verticalmente a la celda de ensayo y sujetos, por medio de cuñas, de modo que se guarde la distancia requerida entre el fondo de la celda y la parte inferior del espécimen

6. SELLO DE LOS ESPECIMENES

La parte inferior de cada espécimen se selló con un material no conductor . Los diversos sellos que se encuentran en el mercado se muestran en el Cuadro Nº 6.2 .

6.1.2 EQUIPOS

1. DETECTOR DE FALLAS

Se utilizó este equipo con el fin de detectar posibles microgrietas en los especímenes. Para la medición se conecta uno de los termi-

CODIFICACION Y CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS
DE RECUBRIMIENTOS UTILIZADOS EN EL ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO
CATODICO.

CODIGO	NOMBRE COMERCIAL	TIPO DE IMPRIMACION	COMPOSICION DEL RECUBRIMIENTO	PREPARACION DE SUPERFICIE	ESPESOR PROMEDIO (MILS)
T.F	PIPELINE COATING	—	Poliester y Estireno curado con peróxido de metil etil cetona, color mostaza oscuro o blanco.	Arenado a metal blanco. SSPC SP 5-63 Para uso en inmersión. Para uso en la supe Arenado, cercano a blanco SSPC SP 10-63	1.5-4
T.Z	COAL TAR EPOXI ZINC	Resina epoxi poliamida con polvo de zinc.	Base de resinas epoxi-poliamida y elevada cantidad de zinc en polvo 51.0 ± 2% acabado de cal tar epoxi.	SSPC-SP-5 SSPC-SP-10	3 Acabado
S.C	ESMALTE BITUMINOSO EPOXI-COAL TAR	—	Es un esmalte epoxico amina a base de alquitran de hulla (coal tar)	Minimo arenado comercial. SSPC-SP-6 Optima es el arenado al metal blanco SSPC-SP-5	6 Por capa

CUADRO Nº 6.2

MASILLAS UTILIZADAS PARA SELLO				
TIPO	DESCRIPCION	PROPORCION EN VOLUMEN	RESISTENCIA QUIMICA	USOS
M-1	Masilla a base de resinas sintéticas. 1° fase: base 2° fase: endurecedor.	fase(1):3 fase(2):1	Anti-ácida Anti-álkalis	Reparaciones de tanques de fierro, concreto, recubrimiento poliester.
M-2	Base de resina epóxica 1° fase: base 2° fase: endurecedor.	fase(1):2 fase(2):1	A los ácidos y álcalinos.	Da protección Antigalvánica, anticorrosiva en los cascos de las embarcaciones.
M-3	Base de resinas epóxica y pigmento. 1° fase: base 2° fase: endurecedor.	fase(1):2 fase(2):1	Resiste a los ácidos y bases fuertes.	Revestir tanques de acero, concreto, eternit, madera.
M-4	Es una masilla plástica libre solvente, no secante.	Sólo un componente	Insoluble en agua y soluble en alifáticos y aromáticos.	-Automotriz (junto de lunas) -Electricidad (sellar conectores) -Refrigeración -Construcción
M-5	Es un adhesivo epóxico 1° fase: base 2° fase: endurecedor.	fase(1):1 fase(2):1	Resistencia a álkalis, agua, aceite, solventes alifáticos.	Es un gran adhesivos para fierro metales, lozas, cerámica
M-6	Base de resina plástica. 1° fase: base 2° fase: endurecedor.	fase(1):1 fase(2):1	Resistencia a los ácidos y álkalis, gasolina, bencina, kerosene.	Reemplaza absolutamente a la soldadura en superficie metálica.

nales de la fuente directamente al espécimen, el otro terminal consiste en un abanico de metal similar a una escobilla, la cual se pasa sobre el espécimen durante la prueba, al detectar una falla el equipo emite una alarma audible (en la punta de la escobilla se genera un arco eléctrico).

Rango del Equipo: 5 - 7.5 K volt

Marca: Elcometer Instruments LTD. Manchester England .

2. MEDIDOR DE ESPESOR

Es necesario realizar medidas no destructivas del espesor del recubrimiento en la zona que estará sometida a ensayo. Para esto se utilizó el micrómetro, el cual utiliza un resorte sensor de corriente de Eddy (corriente parásita), debidamente calibrado. Los valores de los espesores promedios de los sistemas de recubrimientos aparecen en el cuadro N^o 6.1, marca EDDY medidor de corriente 256 FF, con una precisión $\pm 1\%$ a $\pm 3\%$.

3. MEDIDOR DE RESISTENCIA

La resistencia inicial del sistema sello-recubrimiento para los diferentes especímenes, se midió con un Megómetro capaz de medir desde 0 a 5,000 MegaOhmios con una apreciación de ± 0.1 .

4. ELECTRODO DE ACERO INOXIDABLE

Para efectuar las medidas de resistencia se utilizó un electrodo de acero inoxidable.

5. FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA

Se utilizó un Potenciostato OP-01-Modelo UNI, el cual cumplía las especificaciones requeridas de acuerdo a la norma .

El Potenciostato suplía un voltaje constante de 10 voltios y una corriente drenada de entre: 300 a 500 mAmp.

6. VOLTIMETROS

Se usaron dos tipos diferentes de voltímetro para corriente continua:

- Multimeter YF-1030°C cuyo rango es de 200 milivoltios hasta 1,000 voltios con apreciación de ± 0.01 .
- Keithley 177 microvoltios DMM, su rango es de 20 milivoltios hasta 1,200 voltios, apreciación de 0.003%.

7. ELECTRODO DE REFERENCIA

Se utilizó un electrodo de calomel con una solución saturada de cloruro de potasio. Las medidas realizadas se convierten a las del electrodo de Cu/CuSO₄ por diferencia de -0.072 voltios a las lecturas tomadas .

8. CAJA DE RESISTENCIA

Se construyó un equipo con resistencias de 1 Ohm. $\pm 1\%$ precisión.

La caja se fabricó como máximo para tres pares: espécimen-ánodo usando por tanto tres resistencias. Vease el plano de instalación eléctrica del sistema de protección catódica.

9. CAJA DE CONTROLADORES

Se fabricó una caja con un divisor de voltaje de 100 Ohm y 25 Watt de potencia. Este equipo era regulable para cada espécimen a evaluar con corriente impresa.

10. CONDUCTIMETRO

Se usó para evaluar la resistividad del electrólito de una forma indirecta .

6
Rango: 0.1 - 10 μ s/cm

11. CABLES Y TERMINALES

Las conexiones se realizaron mediante cables 14 AWG .

Se fabricaron tres tipos de cables :

Cable 1: Con un extremo soldado al espécimen y el otro a una banana .

Cable 2: Con un extremo soldado a un cocodrilo y el otro a una banana .

Cable 3: Con ambos extremos soldados a bananas .

12. CELDAS DE ENSAYO

Para construir las celdas de ensayo se utilizaron planchas de polimetil-metacrilato cristalinos de 1/8 pulgada de espesor, se eligió este material por su propiedad no conducto-

ra y no reactiva con el electrólito o con los productos de la corrosión.

Las dimensiones de las celdas se calcularon en base al número de especímenes a ensayar y a los requerimientos especificados por la Norma ASTM G8 . Estos requerimientos son:

- Separación espécimen-fondo de la celda 2.5cm.
- Separación espécimen-especimen: 4 cm.
- Separación espécimen-ánodo: 4cm.
- Separación espécimen-pared de la celda: 4cm.
- Separación espécimen-electrodo de referencia: 4cm.

Las dimensiones de las celdas son de 40 x 40 cms con una altura de 35 cm. .

6.2 SELLADO DE ESPECIMENES

6.2.1 SELECCION DEL SELLO

Con el fin de evaluar en condiciones críticas el comportamiento de los diferentes adhesivos comerciales disponibles (sellos), se prepararon especímenes recubiertos con una pintura plástica (Ver especificaciones en el anexo N^o 2), a los cuales se les selló en la parte inferior con los diferentes adhesivos a seleccionar .

Se escogió la pintura plástica por su baja propiedad de adherencia, lo que aseguraba que cualquier sello que lograra adherirse a él, cumpliendo con las condiciones de la norma, serviría como material de sellado.

Para la selección del sello se tuvo en cuenta que el sistema sello-recubrimiento proporcionará una resistencia mayor de 1000 MegaOhm.

6.2.2 CONTROL DE CALIDAD DE LOS ESPECIMENES

Se realiza este control para evitar que el ensayo falle, por una mala aplicación de la pintura plástica.

El control se realizó mediante un detector de fallas. También se hizo la medición de espesor promedio con el fin de disponer de especímenes en iguales condiciones.

6.2.3 PROCEDIMIENTO DE SELLADO

Se realiza del siguiente modo :

1. Se limpia la zona inferior del espécimen hasta una altura de 2.5 cms, eliminando así el óxido y grasa.
2. Se confecciona una tapa de jebe impermeable de diámetro ligeramente menor al del tubo y se pega en la zona ya limpia.
3. Se mezcla la masilla con el catalizador y se cubre la zona que va a estar sellada. Esto se realiza cuidadosamente, evitando que queden burbujas de aire atrapadas en la masilla.
4. Una vez que la masilla seca, se inspecciona el sello y si es necesario se retoca.

6.2.4 PRUEBA DE ELECCION DE SELLADO

Luego del control de calidad y sellado del espécimen se evalúa la resistencia del sello-recubrimiento del siguiente modo :

- Se hace un punto de unión en la parte superior del espécimen con un cable conductor 14 AWG, posteriormente se protege esta zona con pasta epóxica para evitar la corrosión .
- Se evalúa la resistencia mediante un megohmetro conectando el terminal positivo al espécimen y el terminal negativo al electrodo de referencia, la lectura no debe ser menor de 1000 MegaOhm . La prueba tiene una duración de 7 días a lo largo de los cuales la lectura no debe sufrir mayor cambio.

6.3 PREPARACION DE LOS ESPECIMENES

Para la preparación de los especímenes de ensayo deben realizarse los siguientes pasos :

1. A la probeta recubierta se le limpia con esmeril (cuchilla) la zona superior para luego colocar el terminal (cable eléctrico) .
2. Se procede al sellado de la parte inferior del tubo según 6.2.3 .
3. Se mide la resistencia inicial del tubo recubierto con el mismo procedimiento usado en 6.2.4 , pero en este caso la prueba es inmediata, y como resultado de ello la lectura no debe ser menor a

1000 megaohm para que la eficiencia del sellorrecubrimiento sea satisfactoria

4. El recubrimiento se perfora en la mitad de la longitud, con una vacante de 1/4 de pulg. de diámetro que dejará el metal al descubierto

6.4 RECUBRIMIENTOS A EVALUAR

A. PIPELINE COALTING POLIESTER (T.P)

Recientemente en el Perú se ha introducido este tipo de recubrimiento a base de poliéster con cargas, entre sus propiedades esta el de proveer muy buena resistencia al agua, ácidos y humedad. Es resistente a la corrosión y a los productos como: Hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico petróleo gasolina, ácido nítrico (10%), ácido acético (25%), ácido sulfúrico, aguarras, ácido muriático.

Los componentes de este recubrimiento son: Poliéster y estireno curado con peróxido de metil etil cetona (0.5%), con un contenido de sólidos de un 100% en volumen.

Se emplean en estructuras marinas como plataformas, pilotes, lanchones, barcos.

B. COALTAR-EPOXICO Y ANTICORROSIVO-ZINC (T.Z)

La primera capa que se le da a la tubería es un producto epóxico catalizado de tres componentes: Resina epóxica, Catalizador (poliamida), Polvo de Zinc metálico (92 a 94 % en peso).

Este recubrimiento evita la corrosión del acero mediante protección catódica, actuando inicialmente como ánodo de sacrificio el cual se va a oxidar en vez del metal, posteriormente la capa de zinc actuará como barrera de alta impermeabilidad a los agentes externos.

Su empleo es en lugares donde la corrosión es severa como pintado de embarcaciones, estructuras metálicas expuestas a ambientes corrosivos, tanques de productos químicos, etc. Además puede usarse sobre acero y concreto.

C. ESMALTE BITUMINOSO EPOXI - COALTAR (S.C)

Este esmalte está formulado de epóxi-amina a base de alquitrán de hulla (coaltar), es de alto espesor por lo que forma una barrera de alta impermeabilidad contra varios ambientes corrosivos. Por su extrema dureza es recomendado para ambientes de alta abrasión, es usado además en el mantenimiento industrial de plantas químicas, pesqueras, refinerías de petróleo, embarcaciones, oleoductos, etc.

Muestra excelente resistencia a la inmersión en agua dulce y en agua de mar, así como para superficies enterradas.

Se recomienda su uso en superficies de acero, concreto, etc.

El cuadro N^o6.1 muestra las características de los tres recubrimientos mencionados anteriormente.

6.5 INSTALACION DE MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO.

La instalación va a estar referida a la evaluación de tres especímenes por recubrimiento .

6.5.1 MATERIALES

1. Anodo de Magnesio: Un total de tres, serán pesados antes de empezar la prueba.
2. Se procederá a realizar la vacante de 6.5 mm. de diámetro a cada probeta.
3. La suspensión de las probetas se lleva a cabo con un soporte de madera y las cuñas respectivas (ver plano N^o 3), fijando el área que va a estar expuesta al electrólito.
4. El volumen de la cubeta es de 35 litros de solución fresca, se evaluará la conductividad y el pH de la solución antes de poner en marcha el sistema.

6.5.2 EQUIPOS

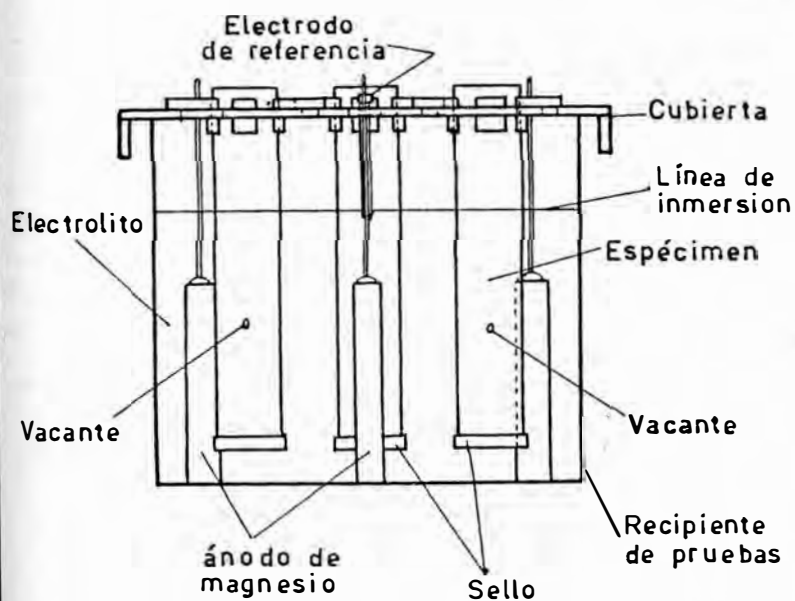
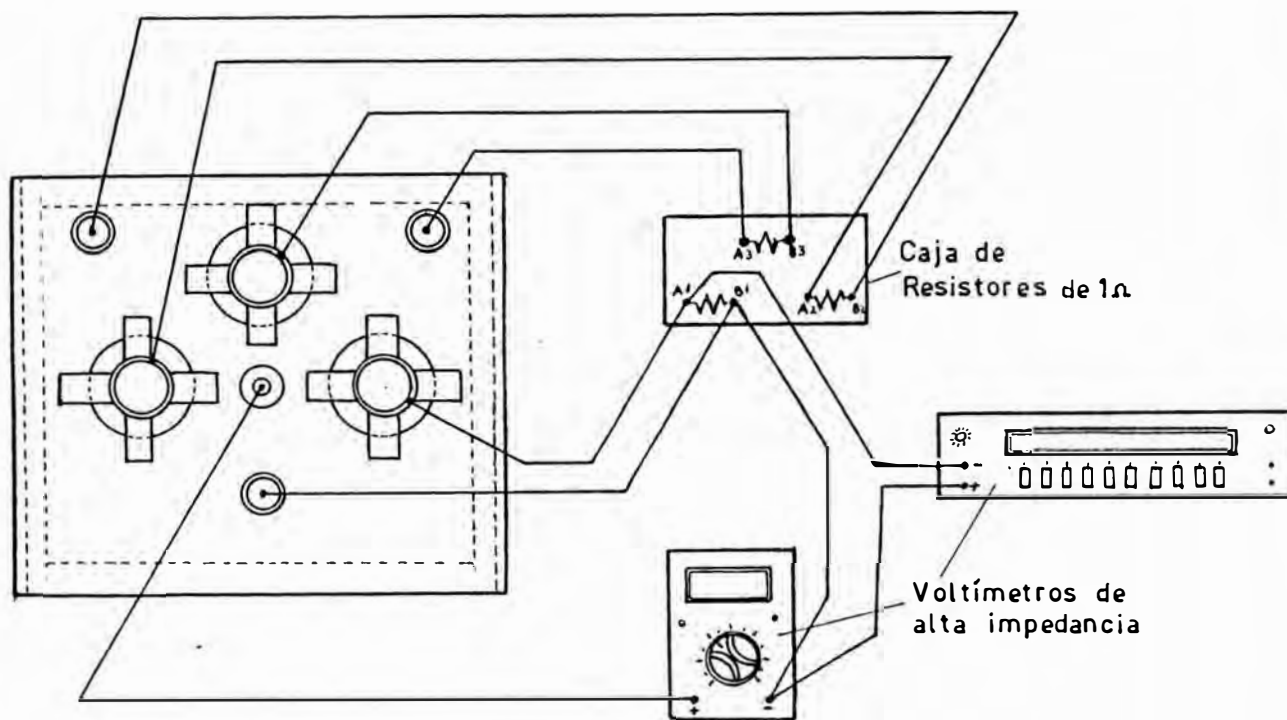
1. Caja de resistencia

A cada resistencia se coloca en ambos extremos bananas de modo que sirva para evaluar indirectamente la corriente del sistema.

Se coloca ésto debido a que no se cuenta con un amperímetro cero resistencia.

2. Voltímetros

Se utilizaron dos voltímetros que tienen las siguientes funciones.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	Dis.por: C. Huamaní K. Quispe
EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERIAS	Dib.por: A.H.S.
SISTEMA: ANODO DE SACRIFICIO PLANO N° 3: Instalación Eléctrica	Rev.y Aprob.:
FECHA :	Firma:
ESCALA : -	

Voltímetro N° 1 : Mide la diferencia de potencial que existe entre el electrodo de referencia de calomel y la probeta (-1.5 voltios).

Voltímetro N° 2 : Mide la diferencia de potencial que existe entre la probeta-ánodo de magnesio, para que así de una manera indirecta, se pueda calcular la cantidad de corriente en (mA) requerida por la probeta, con el valor de la resistencia aproximadamente un ohmio.

3. Cables de conexión: Un total de cuatro cables libres, que sirven de unión.

6.5.3 FUNCIONAMIENTO

El plano del circuito eléctrico para ánodos de sacrificio (plano N° 4) , se ha dividido en tres sistemas.

Sistema N° 1:

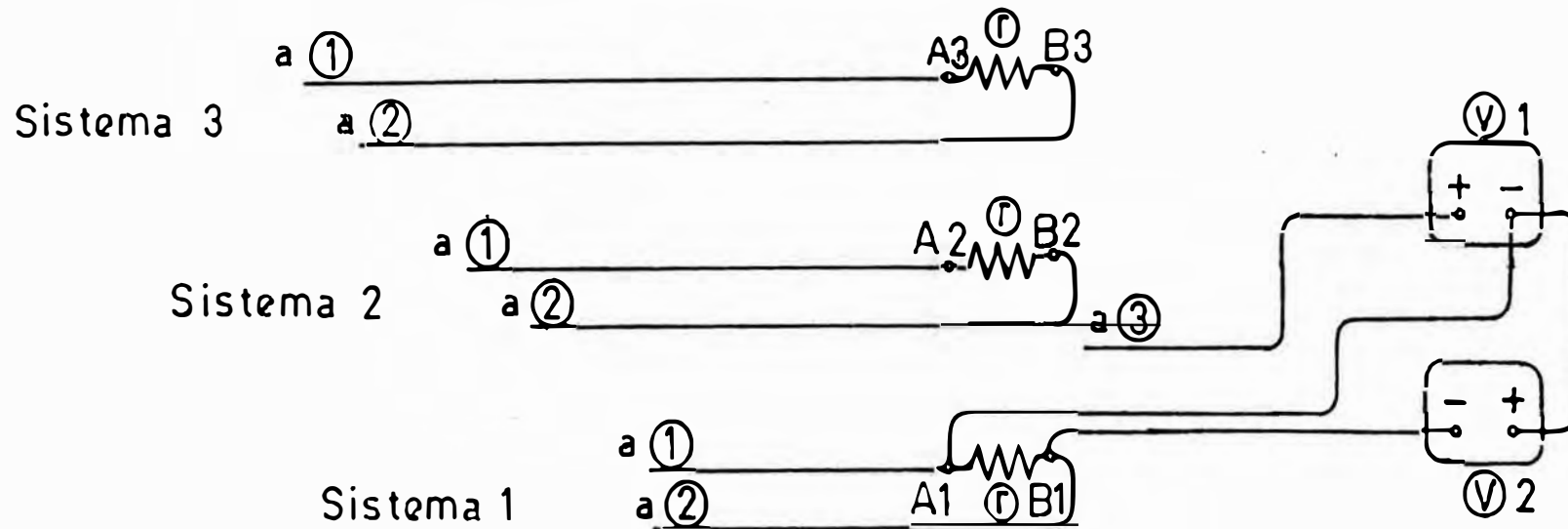
Se seguirán los siguientes pasos:

1. La probeta se unirá con el ánodo mediante los puntos A1-B1.

2. Para la lectura de diferencia de potencial entre el electrodo de referencia-probeta N° 1 .

Voltímetro N° 1 : Del lado positivo deberá partir un cable que una al electrodo de referencia N° 1 y del lado negativo de dicho voltímetro saldrá otro cable que se unirá al lado A1.

3. Para calcular la diferencia de potencial entre probeta-ánodo.



- ① Probeta con una vacante.
- ② Anodo de magnesio.
- ③ Electrodo de referencia.
- Ⓥ Voltmetro de alta impedancia.
- ① Resistor de 1 Ohm.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO
PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERIAS

SISTEMA: ANODO DE SACRIFICIO
PLANO N° 4: Circuito Eléctrico

FECHA:

ESCALA: -

Voltímetro N^o 2 : Del lado negativo sale un cable que inserta en el lado B1 y otro cable que sale del terminal positivo de esté voltímetro, se une al voltímetro N^o 1 en el lado negativo.

Para evaluación de los sistemas N^o 2 y N^o3: Sólo se hace el traslado de los cables de los puntos A1-B1 a A2-B2 y A3-B3. Tomando las lecturas respectivas para cada una de las siguientes evaluaciones.

6.6 INSTALACION DE MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA

Para este ensayo se tendrá tres probetas por recubrimiento, con los requisitos que requiere la norma ASTM G8.

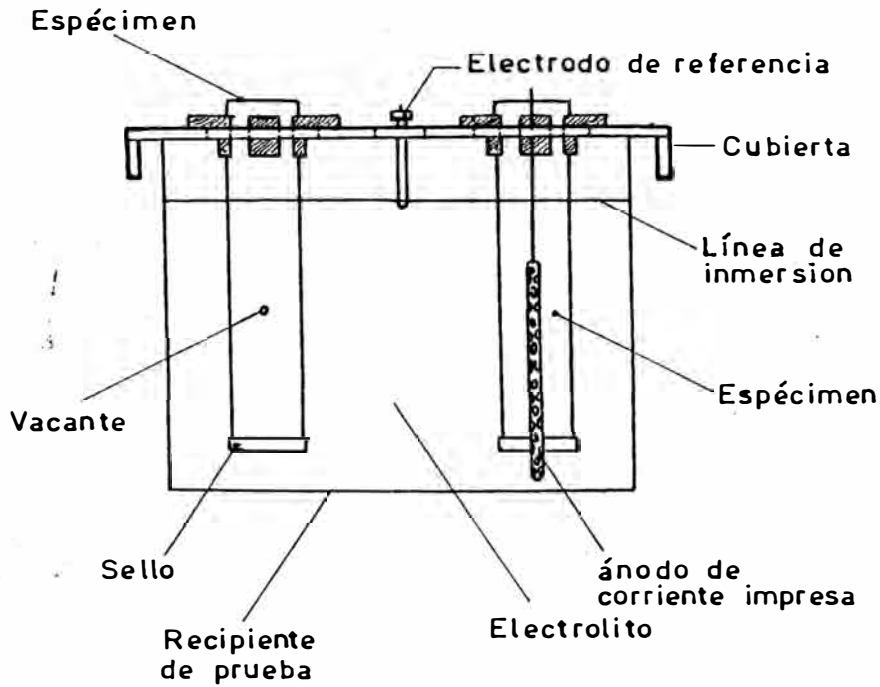
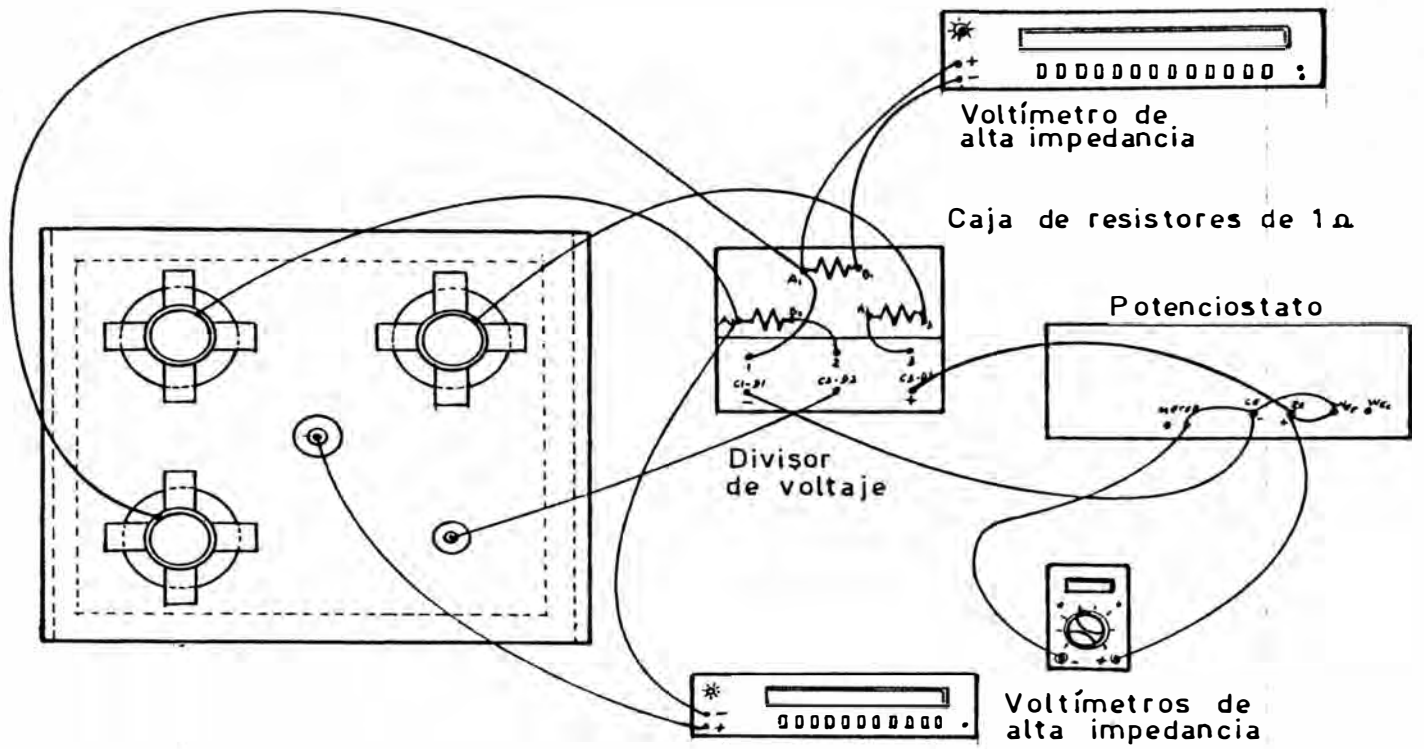
6.6.1 MATERIALES

1. Anodo auxiliar Será uno no consumible platinizado A-40.
2. La Suspensión de las probetas se hará con soporte de madera y con cuñas para cada probeta .
(ver plano N^o 5).
3. La cubeta estará con una solución fresca, un volumen de 38 litros.

6.6.2 EQUIPOS

1. Potenciostato UNI

Tiene un suministro de corriente alterna de 220 voltios el cual lo transforma a corriente



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA		Dis. por: C. Huamani K. Quispe
EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERIAS		Dib. por: A.H.S.
SISTEMA: CORRIENTE IMPRESA		Rev. y Aprob.:
PLANO N° 5: Instalación Eléctrica		Firma:
FECHA:	ESCALA: -	

continua, con salida de 300 a 500 mA como máximo.

2. Caja de resistencia

Con tres sistemas fijos para su evaluación.

3. Voltímetros

Se requiere de tres para diferentes evaluaciones.

Voltímetro N^o 1 : Mide la diferencia de potencial entre la probeta-electrodo de referencia.

Voltímetro N^o 2 : Mide la diferencia de voltaje de probeta-ánodo, para luego calcular de una forma indirecta la corriente requerida por la probeta.

Voltímetro N^o 3 : Mide la diferencia de voltaje que da el potencióstato UNI al sistema.

Cables: Un total de ocho de diferentes tamaños.

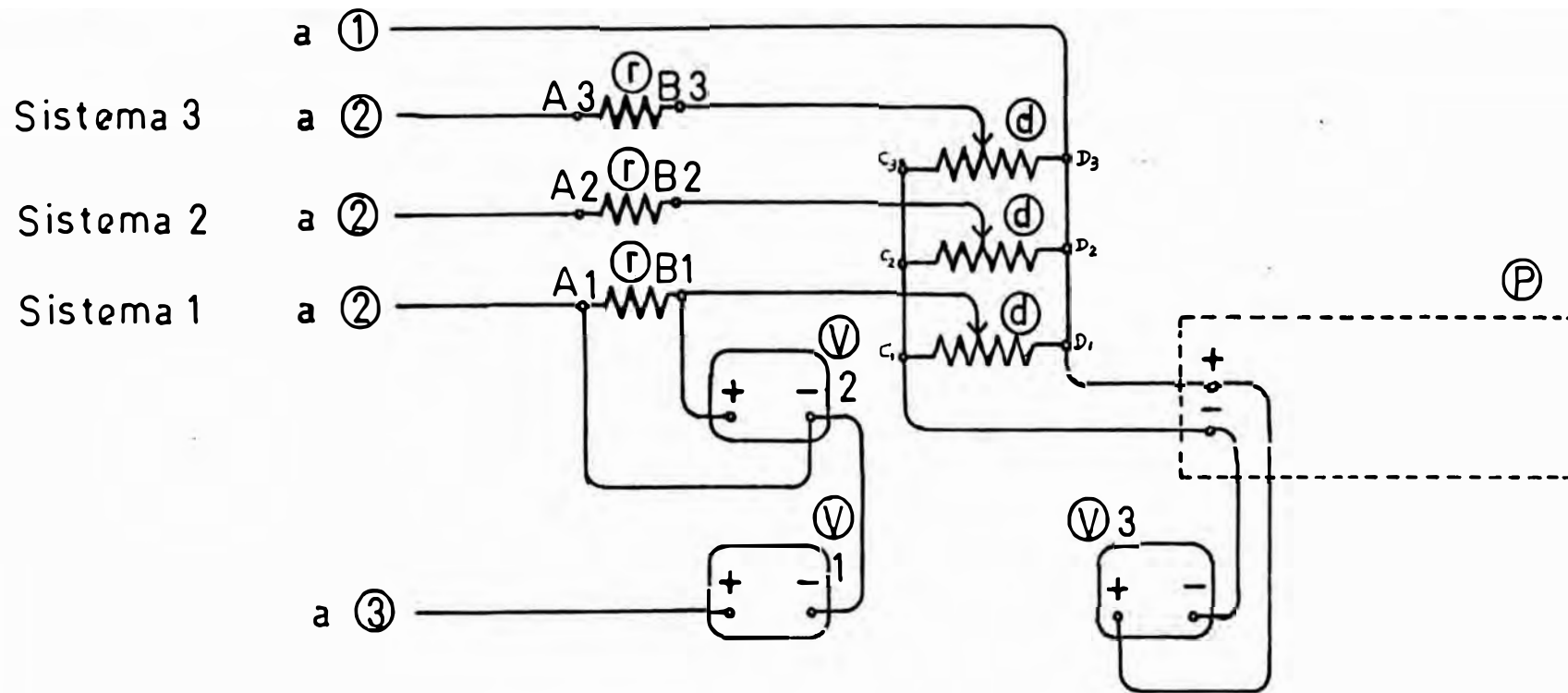
6.6.3 FUNCIONAMIENTO

El sistema se ha dividido en tres partes según el plano de instalación eléctrica para corriente impresa (plano N^o 6) .

Sistema N^o 1

Se siguen los siguientes pasos:

1. Para determinar la diferencia de potencial del potencióstato: Del lado positivo saldrá un cable que llega al lado positivo del voltímetro N^o 3 y del lado negativo (potencióstato) sale otro cable que une lado negativo del voltímetro N^o 3) .



- ① Anodo para corriente impresa.
- ② Probeta
- ③ Electr6do de referencia
- (d) Divisor de voltaje
- (R) Resistor de 1 ohm
- (P) Potenciostato
- (V) Volt6metro de alta impedancia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
EVALUACION DE DESPRENDIMIENTO CATODICO PARA RECUBRIMIENTOS DE TUBERIAS	
SISTEMA: CORRIENTE IMPRESA PLANO N°6: Circuito El6ctrico	
FECHA :	ESCALA : -

2. El divisor de voltaje para el sistema: Del lado positivo (potenciostato) sale un cable que une al lado D1, lado negativo (potenciostato) sale para unirse al lado C1.
3. Se hace la unión del ánodo auxiliar N^o 1 con el punto D1.
4. Evaluar la diferencia de potencial entre probeta-ánodo auxiliar:

Voltímetro N^o 2 : Del lado positivo sale un cable al punto B1 y de este parte un cable que une al divisor de voltaje tramo C1-D1. Del lado negativo del este voltímetro, se desprende un cable que une el lado A1.

5. Calcular la diferencia de potencial de probeta-electrodo de referencia.

Voltímetro N^o 1 : Del lado positivo sale un cable que une al electrodo de referencia N^o 3 y este voltímetro, y del lado negativo sale un cable que une el lado negativo del voltímetro N^o 2.

6. Una vez chequeado todo el sistema, se hace la conexión de la probeta al sistema mediante el punto A1.

Sistemas N^o 2 y N^o 3

1. Evaluar la diferencia de potencial probeta-ánodo auxiliar, se hace un traslado de los dos cables del punto A1-B1 a A2-B2 y A3-B3.

2. Calcular la diferencia de potencial probeta-electrodo de referencia, se hace el traslado de un sólo cable A1 a A2 y A3.
3. Cada controlador es regulable e independiente de los otros.

C A P I T U L O V I I

EVALUACION EXPERIMENTAL
DEL ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO

CAPITULO VII

7.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el ensayo de protección catódica, se ha sometido al recubrimiento a un esfuerzo eléctrico o potencial de esfuerzo producido mediante un ánodo de sacrificio o mediante corriente impresa, para ello se fijó el valor del potencial en 1.5 ± 0.02 volt, medido con un electrodo de Cu / CuSO₄ y transformado a un electrodo calomelano según indica la norma

Es así como se puede evaluar el comportamiento de cada recubrimiento, mediante la medición de

1. El paso de corriente entre el espécimen y el ánodo a diferentes intervalos de tiempo
2. El potencial de polarización entre el espécimen y el electrodo de calomel, por desconexión entre el ánodo y el espécimen
3. El área de recubrimiento desprendida

Estos tres puntos, así como la prueba de resistencia para la selección de sello serán discutidos y analizados mas adelante a su vez el presente capitulo mostrará los resultados experimentales obtenidos

En el Anexo Nº 1, se muestran las vistas fotográficas obtenidas en el transcurso del ensayo de des-

prendimiento catódico .

7.1.1 TECNICA EXPERIMENTAL SELECCION DEL SELLO

Para la selección del **sello** se evaluaron especímenes recubiertos con una pintura plástica de poca adherencia (Anexo N^o 2) .

Se experimentaron tres resinas disponibles en el mercado :

1. Epoline Rojo (Anexo 3)
2. Masilla Blanca (Anexo 4)
3. Pasta negra (Anexo 5)

El procedimiento llevado a cabo es el que se detalla en 6.2.4 .

Durante la realización de **estos** ensayos se tomaron lecturas de la resistencia de cada **sistema** de sello-recubrimiento, las cuales aparecen en la tabla N^o 7.1 . El ohmímetro usado aplica una diferencia de potencial de 2000 voltios - valor constante - por tanto la variación de la resistencia de un espécimen a otro, se debe al diferente paso de corriente a través del espécimen .

Al fin del ensayo, se sacaron los especímenes del electrólito y se inspeccionaron visualmente para conocer el efecto del ensayo sobre cada uno de los diferentes sellos .

EPOLINE ROJO

Esta masilla conserva su color original así como su textura , su **adhesión** es buena al terminar el

ensayo, no sufriendo deterioros ni cambios en la dureza .

MASILLA BLANCA

Este material se resblandecio un poco por lo que no presentó mostró las condiciones suficientes para obtener de ella una buena adhesión .

PASTA NEGRA

Este material inicialmente duro y de color negro, no sufrio cambio aparente. Su adhesión era buena al terminar el ensayo . Sin embargo debido a la carga metálica que posee esta resina es muy conductora lo que es un factor limitante para su selección .

Cabe resaltar que las tres masillas usadas tuvieron el mismo grado de dificultad en su aplicación y un tiempo de curado que varió entre 4 y 24 horas .

Después de estas observaciones y en base a la resistencia mostrada en la tabla Nº 7.1 , el sistema sello-recubrimiento del Epoline rojo fue escogido para el ensayo de protección catódica .

7.1.2 DESPRENDIMIENTO CATODICO

En todos los ensayos realizados se midió tanto el pH como la conductividad del electrólito. El pH se mantuvo entre 9.8 y 10.2, mientras que la resistividad del electrólito varió entre 38 y 43 ohm-cm. , lo que es común .

T A B L A N º 7.1

PRUEBA DE SELLADO		
MASILLA	VOLTAJE (voltios)	RESISTENCIA (Mega-ohm)
EPOLINE ROJO	2000	1500
MASILLA BLANCA	2000	13
PASTA NEGRA	2000	0

Teniendo en cuenta la norma ASTM-G8 que contempla dos tipos de tratamiento : Anodo de sacrificio y Corriente Impresa, se han evaluado los recubrimientos que se detallan en el cuadro N^o 7.1

Para determinar el efecto del ensayo de desprendimiento catódico sobre los recubrimientos se tomaron lecturas de consumo de corriente, las tablas N^o 7.2 y N^o 7.3 muestran los datos obtenidos tanto para el sistema de Anodo de Sacrificio como para el de Corriente Impresa .

El procedimiento llevado a cabo para el sistema de Anodo de sacrificio es el que se detalla en 6.5.1 y para Corriente Impresa en 6.6.1 .

Las Tablas N^o 7.2 y N^o 7.3 , agrupan los siguientes datos :

- Resistencia inicial de cada tubería (megohm)
- Espesor (μ / mils)
- Consumo de corriente : (mÁmp) los valores se tomaron al inicio de la prueba, a los 10, 20 y 30 días

7.1.3 AREA DESPRENDIDA

Otra de las formas de evaluar el ensayo de desprendimiento catódico es por medición del área desprendida del recubrimiento adyacente a la perforación inicial hecha al mismo .

En nuestro caso los recubrimientos evaluados mostraron diámetros de desprendimiento inferiores

CUADRO Nº 7.1
SISTEMAS EVALUADOS

RECUBRIMIENTO	FABRICANTE	TIPO DE PROTEC. CATODICA	ESPESOR PROMEDIO	TRATAMIENTO DE SUPERFICIE
T.P. POLIESTER Y ESTIRENO	F1	C.I.	35 mils	SSPC-SP 5 SSPC-SP 10
T.Z. COALTAR EPOXI-ZINC	F1	C.I.	16 mils	SSPC-SP
		A.S.	10 mils	SSPC-SP 10
S.C. ESMALTE BITUMINOSO EPOXI-COALTAR	F2	C.I.	17 mils	SSPC-SP 6
		A.S.	16 mils	SSPC-SP 5
T.D. TUBERIA DESNUDA	C.I. y A.S.	SSPC-SP 5

Teniendo en cuenta la norma ASTM G-8 que contempla dos tipos de tratamientos :

- A. Anodos de Sacrificio (A.S.)
- B. Corriente Impresa (C.I.)

T A B L A N º 7.2

ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO A 30 DIAS -1.5 volt. (Cu/CuSO4) POR ANODO DE SACRIFICIO						
CODIGO	RESISTENCIA (Megaohm)	ESPESOR μ /mils.	CONSUMO DE CORRIENTE (mA)			
			INICIAL	10 DIAS	20 DIAS	30 DIAS
* TD-1	-	----	108	74.18	71.53	69.53
SC-1	4000	422/16.6	3.33	1.27	0.90	0.88
SC-2	4000	421/16.5	1.96	1.24	1.14	1.04
SC-3	4000	420/16.5	2.79	1.27	1.27	1.27
TZ-1	5000	306/12.0	1.30	0.98	0.74	0.60
TZ-2	2000	229/9.0	3.80	1.07	1.04	0.99

* Las numeraciones 1, 2 y 3 se refieren al numero de especimenes utilizados por recubrimiento .

T A B L A N º 7.3

ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO A 30 DIAS -1.5 volt. (Cu/CuSO4) POR CORRIENTE IMPRESA						
CODIGO	RESISTENCIA (Megaohm)	ESPESOR μ /mils.	CONSUMO DE CORRIENTE (mA)			
			INICIAL	10 Dias	20 Dias	30 Dias
TD-1	-	-	-	-	-	-
SC-1	>5000	407/15.9	1.88	1.26	1.17	1.11
SC-2	>5000	471/18.5	1.73	1.27	1.17	1.12
SC-3	>5000	415/16.3	1.89	1.14	1.10	1.08
TP-1	5000	911/35.8	2.40	1.54	1.34	1.20
TP-2	4000	861/33.8	2.22	1.42	1.08	0.98
TP-3	5000	906/35.6	2.39	1.58	1.35	1.31
TZ-1	1500	408/16.0	2.92	2.67	2.28	2.28
TZ-2	1500	414/16.3	3.53	2.81	2.48	2.48

a 6.5 mm. para 30 días de ensayo, por lo que no se consideró ubicar en tablas tales datos

Según el punto 4.3 consideramos a los recubrimientos evaluados como aceptables

7.1.4 VOLTAJES DE POLARIZACION

En las tablas N^o 7.4 y N^o 7.5 se detallan los potenciales de polarización obtenidos por desconexión entre el ánodo y el espécimen

El tiempo transcurrido para alcanzar dicho potencial de polarización es variable entre un espécimen a otro, pero se han tomado intervalos de 5 minutos como tiempo conveniente para lograr la estabilización del potencial en todos los especímenes

7.1.5 CONSUMO DE CORRIENTE VERSUS TIEMPO

Los gráficos N^o 1 y N^o 2 muestran los valores de consumo de corriente a lo largo de los 30 días de ensayo, tanto para Anodo de Sacrificio como para Corriente Impresa

En estos gráficos se consideró trazar curvas de sólo un espécimen de prueba por recubrimiento para visualizar la disminución de corriente que sucede en el transcurso del ensayo

7.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Se examinaron con un microscopio estereo 50 x todos los especímenes al finalizar cada prueba de

T A B L A N º 7.4

POTENCIAL DE POLARIZACION OFF (VOLTIOS)						
ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO POR ANODO SACRIFICIO						
TIEMPO (SEG)	0	1	2	3	4	5
TD-1	-1.337	-1.024	-1.007	-0.995	-0.988	-0.982
SC-1	-1.495	-1.152	-1.142	-1.132	-1.127	-1.122
SC-2	-1.496	-1.157	-1.146	-1.135	-1.126	-1.121
SC-3	-1.497	-1.162	-1.152	-1.142	-1.136	-1.131
TZ-1	-1.485	-1.107	-1.082	-1.071	-1.060	-1.053
TZ-2	-1.512	-1.145	-1.126	-1.113	-1.106	-1.099

T A B L A N º 7.5

POTENCIAL DE POLARIZACION OFF (VOLTIOS)						
ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO POR CORRIENTE IMPRESA						
TIEMPO (Seg)	0	1	2	3	4	5
TD-1	-	-	-	-	-	-
TP-1	-1.496	-1.143	-1.122	-1.113	-1.106	-1.100
TP-2	-1.496	-1.129	-1.108	-1.097	-1.085	-1.081
TP-3	-1.493	-1.140	-1.111	-1.103	-1.096	-1.090
SC-1	-1.495	-1.071	-1.061	-1.058	-1.055	-1.040
SC-2	-1.498	-1.080	-1.050	-1.047	-1.042	-1.039
SC-3	-1.497	-1.059	-1.042	-1.037	-1.030	-1.027
TZ-1	-1.498	-1.139	-1.117	-1.103	-1.094	-1.086
TZ-2	-1.426	-1.131	-1.107	-1.092	-1.082	-1.073

GRAFICO N°1

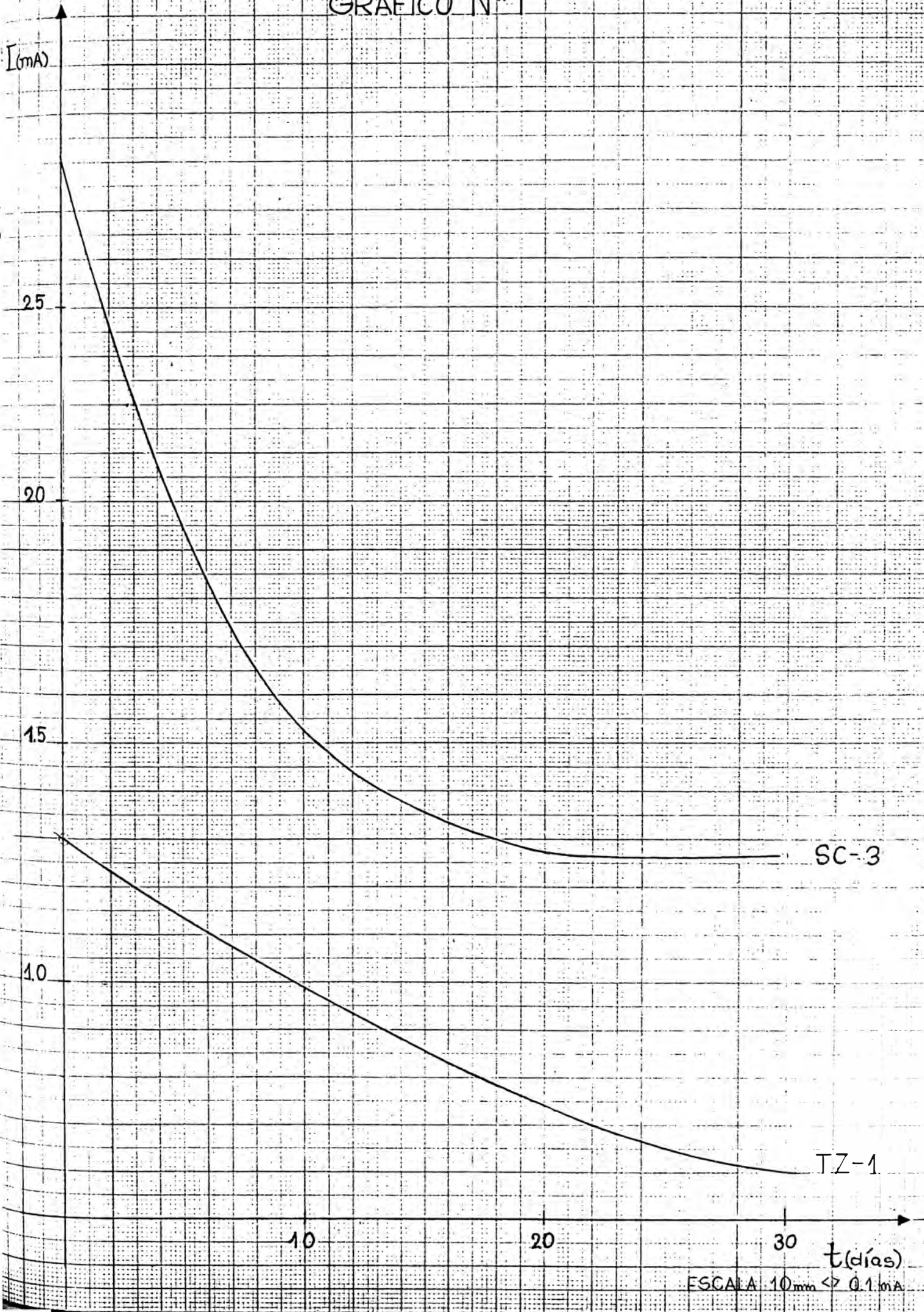
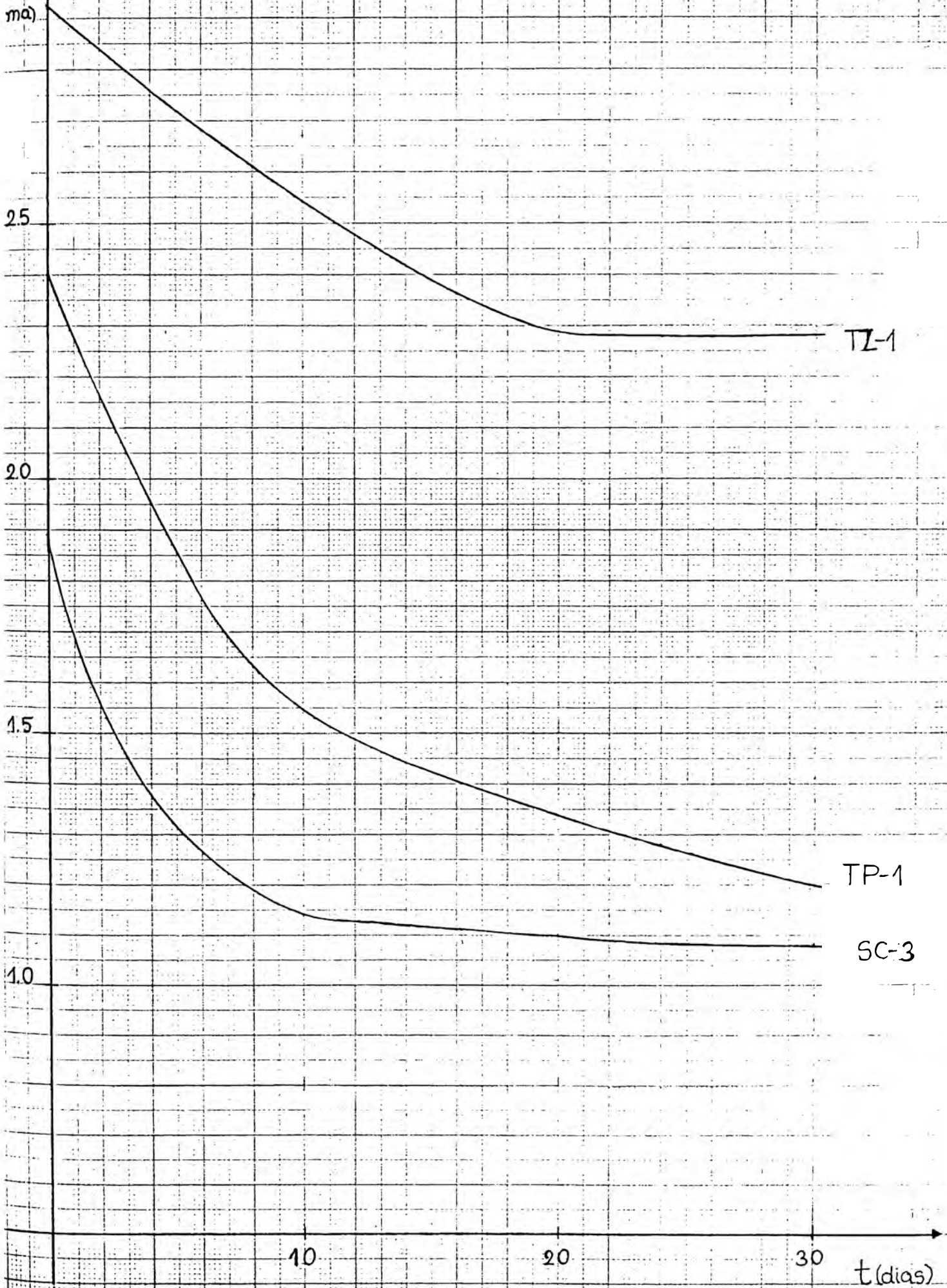


GRAFICO N° 2



ESCALA 10mm <-> 0.1 ma

ensayo y se pudo observar que ningún recubrimiento presentaba microperforaciones ni ampollamiento. Para examinar los alrededores de la vacante se aumentó el área con una cuchilla y mediante el microscópio se comprobó que la superficie del metal no presentaba depósitos de óxido

7.3 OBSERVACIONES

- 1.- Según se aprecia en las tablas N^o 7.2 y N^o 7.3 , los valores de resistencia inicial de los diferentes especímenes no presentan correlación con los valores de corriente requeridos por los especímenes durante el ensayo. Es muy posible que el valor de resistencia inicial si guarde una correlación con las lecturas de corriente inicial para tiempos muy cortos Pero la medición de las corrientes, inmediatamente al inicio del ensayo, no es recomendado en la norma por las mismas fluctuaciones que se producen
- 2.- Inicialmente en los ensayos se observó la evolución de hidrógeno con gran intensidad sin que hubiera ningún deterioro en el recubrimiento. En el transcurso del ensayo la intensidad de evolución de hidrógeno disminuyó
- 3.- Transcurridos los 10 días de inmersión se inicia la formación de depósitos calcáreos sobre la superficie metálica de la vacante, esto pudo enmascarar el verdadero consumo de corriente

4.- Siempre existe absorción de agua y de iones por el recubrimiento, lo que ocasiona cambios en la resistividad y a su vez puede traer como consecuencia las diversas corrientes halladas en un mismo tipo de recubrimiento al mismo tiempo de ensayo .

5.- En los sistemas ensayados existen una tendencia a la disminución de la corriente requerida, a medida que aumenta el tiempo de ensayo. El porcentaje de disminución de corriente en el sistema ánodo de sacrificio es de :

SC : 41.6 %

TZ : 36.1 %

y para el sistema de corriente impresa de :

TP : 49.6 %

SC : 60.3 %

TZ : 74.1 %

Como se puede apreciar el porcentaje de disminución de corriente es mayor en corriente impresa .

CAPITULO VIII

8.1 GENERALIDADES

Los costos de los componentes más importantes se expresarán en Dólares a Febrero de 1990 (1\$ = 13,000)

8.2 COSTO DE EQUIPOS DE DESPRENDIMIENTO CATODICO

Los equipos utilizados en el ensayo de desprendimiento catódico se subdividirán en equipos principales y equipos auxiliares, y la capacidad de evaluación es la vista en el Capitulo VII , es decir 3 especímenes para ánodos de sacrificio y 2 para corriente impresa .

A. EQUIPOS PRINCIPALES

EQUIPOS PRINCIPALES	COSTO (\$)
Potenciostato (OP-01 UNI)	1,500
Multimetro (Kethley Mod 177)	1,230
2 Multimetro (YF 1030-C)	180
Megámetro Modelo 1000 AEMC	2,000
Conductímetro (NF-1481-55)	259
pH metro (NF-5985-80)	292
Electrodo ref. Calomel sat.	1,245
Balanza de 2 platillos	60
2 Anodo platinizado	50
SUMA TOTAL	6,816

B. EQUIPOS AUXILIARES

EQUIPOS AUXILIARES	COSTO (\$)
Caja acrilica (40x40x35 cm3)	21
Tuberia fierro negro sin costura SCH 40	33
2 Cajas de resistencias	9
Caja de Controladores	10
SUMA TOTAL	73

C. ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS

ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS	COSTO (\$)
Soporte de Madera	20
Cables 14 AWG	2
Bananas, pernos de bronce, hojas de sierra y lijas.	10
SUMA TOTAL	32

D.- CUADRO RESUMEN DE COSTO DE EQUIPOS DE DESPRENDIMIENTO
CATODICO

EQUIPOS Y ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS	COSTO (\$)
A. EQUIPOS PRINCIPALES	6816
B. EQUIPOS AUXILIARES	73
C. ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS	32
COSTO TOTAL	6921

8.3 COSTOS DE MATERIALES Y SERVICIO PARA CADA ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO CATODICO.

El costo ha deducir se hara en base a pruebas de ensayo de 30 días para tuberia con recubrimiento orgánico y con una longitud sumergida por probeta de 18 cms.

El volumen de la cubeta para cada ensayo fue de 35 lts. de solución salina y por cada ensayo se evaluó un promedio de tres probetas.

El sello recomendado para la prueba de Desprendimiento Catódico es el epoline rojo.

Los costos de materiales y servicios se deducirán tanto para Anodo de Sacrificio como para Corriente Impresa.

A. COSTO DE ENSAYO POR ANODO DE SACRIFICIO.

MATERIALES Y SERVICIOS	COSTO (\$)
ELECTROLITO Sales (Na ₂ CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄)	2.0
ANODO DE MAGNESIO	1.5
SELLO Tapones de jebe Pasta Moldeadora Epoline-rojo	1.0 1.0 13.0
SERVICIOS Agua	1.0
SUPERVISION	30.0
TOTAL	49.5

B. COSTO DE ENSAYO POR CORRIENTE IMPRESA

MATERIALES Y SERVICIOS	COSTO (\$)
ELECTROLITO Sales (Na ₂ CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄)	2.0
SELLO Tapones de jebe Pasta moldeadora Epoline-rojo	1.0 1.0 13.0
SERVICIOS Agua Electricidad	1.0 8.0
SUPERVISION Y MANO DE OBRA	35.0
TOTAL	61.0

8.4 COSTO TOTAL POR ENSAYO

Este es el costo total necesario para evaluar un recubrimiento con tres especímenes de prueba . La evaluación de la Depreciación se detalla en el Anexo No 7 .

A. ANODO DE SACRIFICIO

MATERIALES, SERVICIOS Y SUPERVISION	49.5
DEPRECIACION	35.5
	<hr/>
TOTAL	\$ 85.0

B. CORRIENTE IMPRESA

MATERIALES, SERVICIOS Y SUPERVISION	61.0
DEPRECIACION	57.0
	<hr/>
TOTAL	\$ 118.0

BIBLIOGRAFIA

- 1.- HERBERT H. UHLIG, "Corrosión y control de Corrosión" traducido por Eduardo Aguilar - URMO S.A. Ediciones Espartero 10 Bilbao Impreso en España 1975
- 2.- OLADIS T. DE RINCON , "Oxidación destructiva de una aleación por el medio ambiental que lo rodea". Universidad de Zulia, Facultad de Ing.Escuela de Ing. Química
- 3.- SHREIR INDEX S., "Corrosion Control", Department of Metallurgy and Materials City of London Politechnic Second Edition 1976 by Newnes-Butter worths . Reported 1977 - 1979
- 4.- JOHN MORGAN , "Cathodic Protection" Published by National Association of Corrosion Engineers 1440 South Creek drive Houston Texas . Edición 1987
- 5.- G. REEDL , "Anodes Dissoltion and Change of Shape" Materials Perfomance 1981 National Association of Corrosion Engineers
- 6.- F. FANCUTT, J.C. HUDSON, A.T.S. RUDROM, J.F. STANNERS. "Protección por pintura de Estructuras Metálicas" Versión Española de Alberto Sanchez S. y Luis J. Morhn.Editorial Blume 1967
- 7.- INTEVEP S.A. Centro de Investigación y Desarrollo. Filial de Petroleos S.A. INT-01129.84
- 8.- M. MORCILLO Y S. FELIU , "Protección del caso de los buques" , Revista Metalúrgica Julio 1975 Num.481

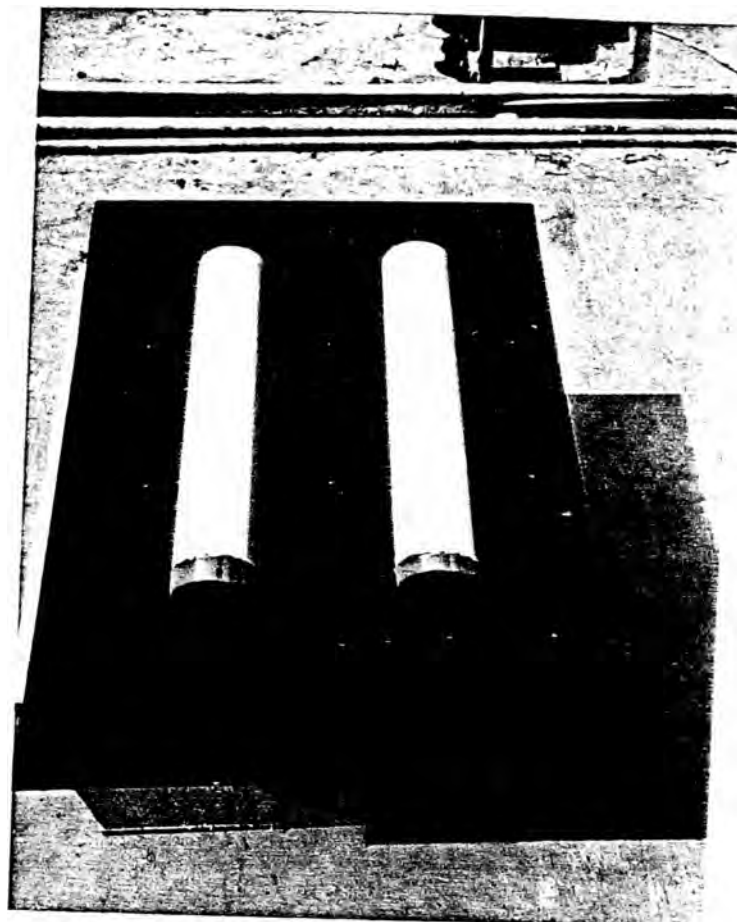
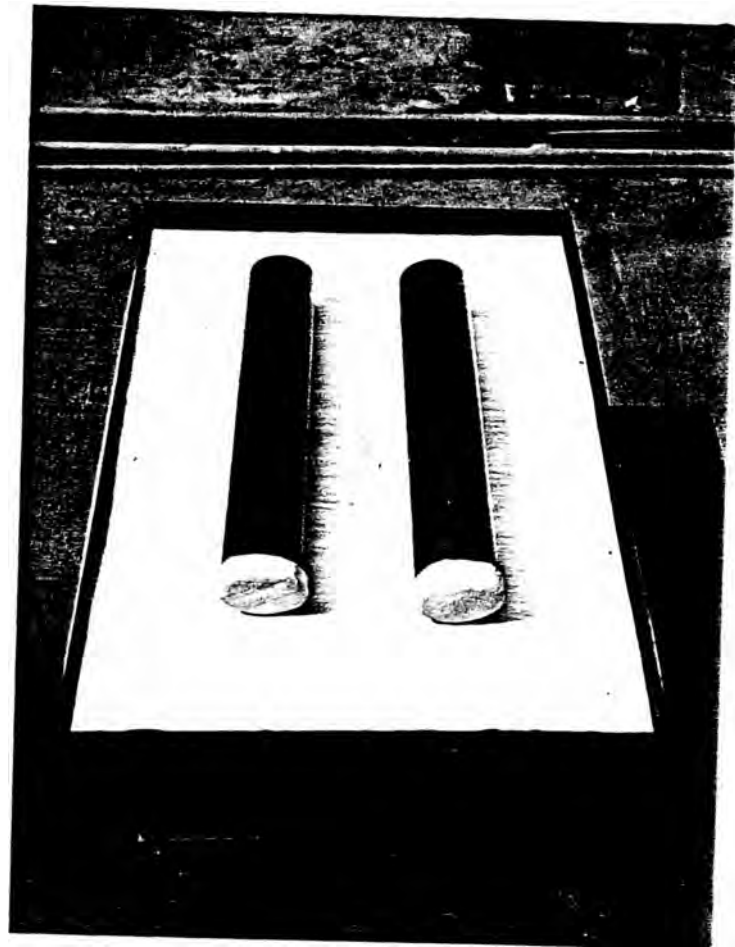
- 9.- M. MORCILLO Y S.FELIU ." Efecto del espesor y continuidad de los Recubrimientos de Pintura sobre acero en conjunción con la Protección Catódica" Publicado en el Vol.11 Número 6 de la Revista Metalúrgia Nov. Dic. 1975
- 10.- M. MORCILLO Y S. FELIU , "Efecto del Envejecimiento de la Imprimación y otras variables en el comportamiento de los recubrimientos de pintura sobre acero en Agua de mar" Revista Metal CENIM , Vol.11 (1975) Num. 5
- 11.- M. MORCILLO Y S. FELIU, "Estudio de algunas variables en el sistema dual anticorrosivo pintura y protección catódica" . Enero - Febrero C.P.
- 12.- M. MORCILLO , S. FELIU y J.M.BASTIDAS, "Método de la Impedancia Faradaica para el estudio de la corrosión" Segunda Parte Rev. Metal Madrid 1983
- 13.- NORMA ASTM G8 - 79 , "Desprendimiento Catódico en Tuberías Recubiertas
- 14.- A.W. PEABODY , "Control of pipeline Corrosion".National Association of Corrosion Engineers west top South Houston Texas
- 15.- Paper Number 37 of the International Corrosión Forum, Sponsored by the NACE "PL Anodes - Today's Alternative for Underground Impressed Current Systems March 22 - 26 1982 . Alberto Thomas Convention Center Houston Texas

C A P I T U L O V I I I

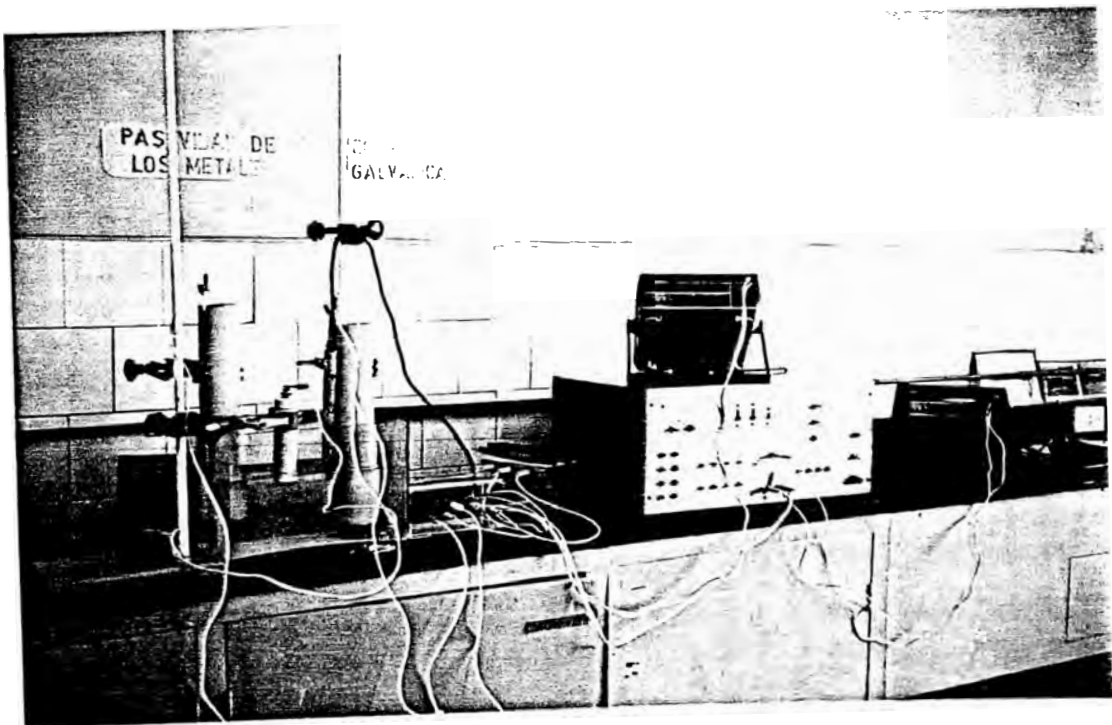
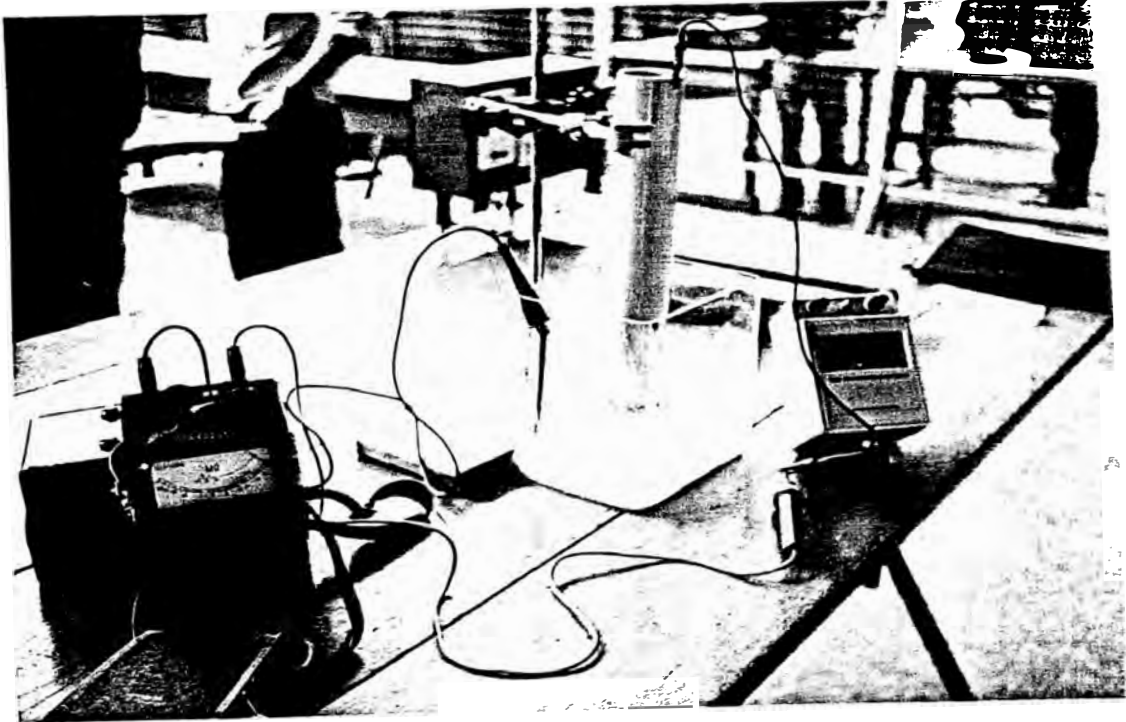
EVALUACION ECONOMICA

A N E X O N º 1

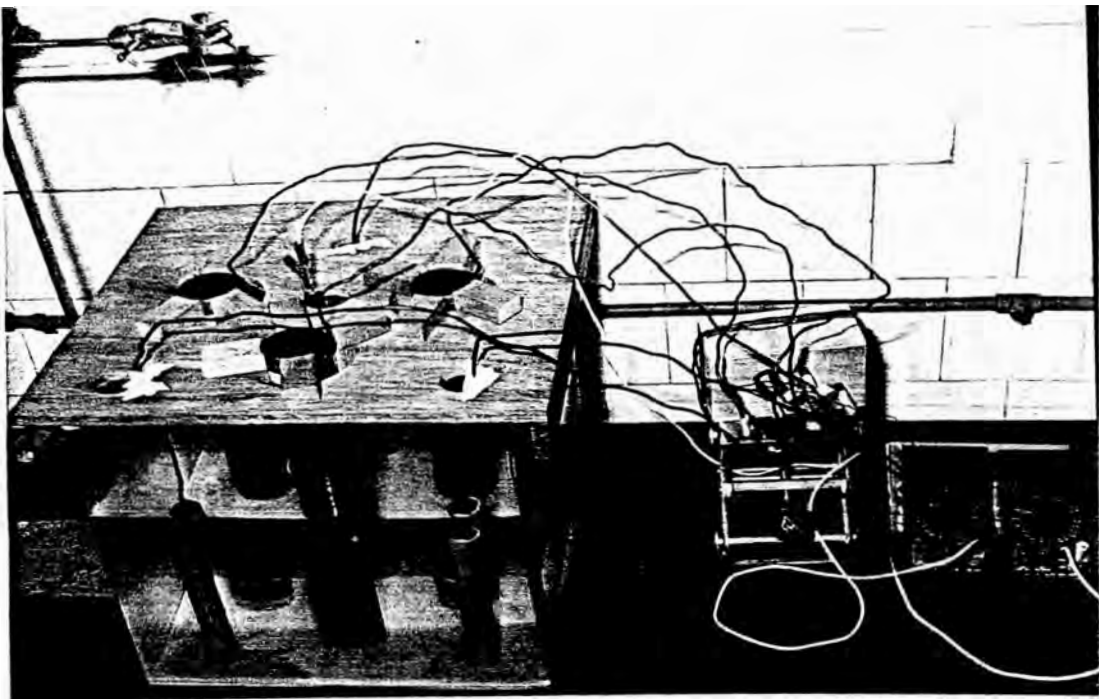
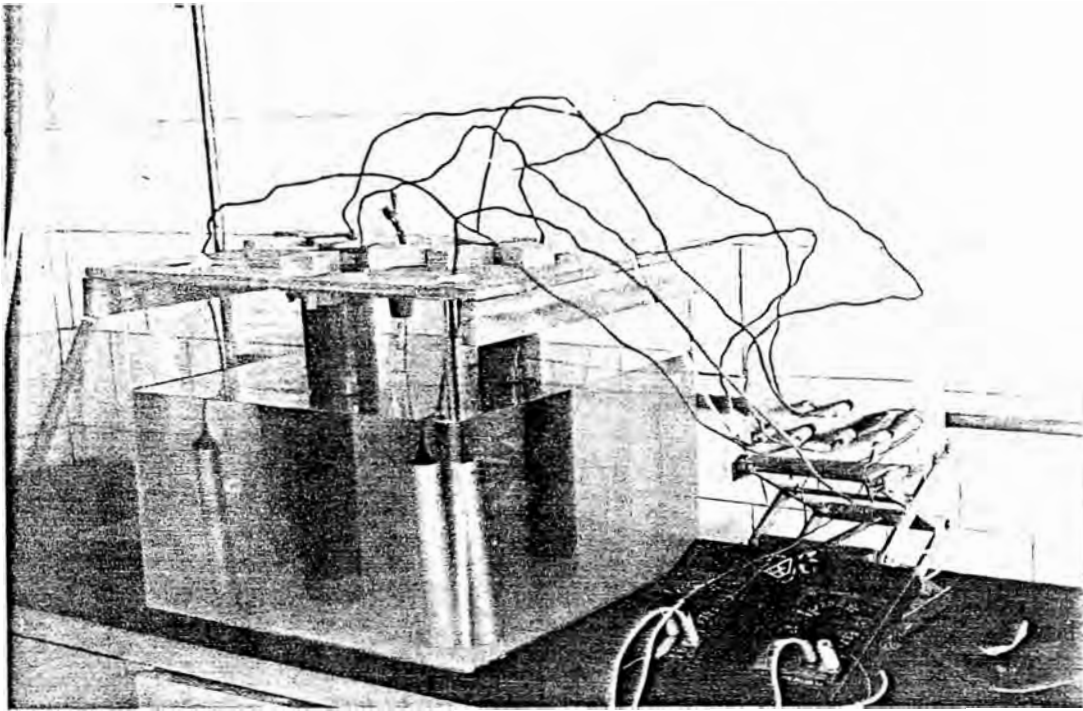
PRUEBA DE ENSAYO DE SELLADO



FRUEBA DE RESISTENCIA DE SELLO

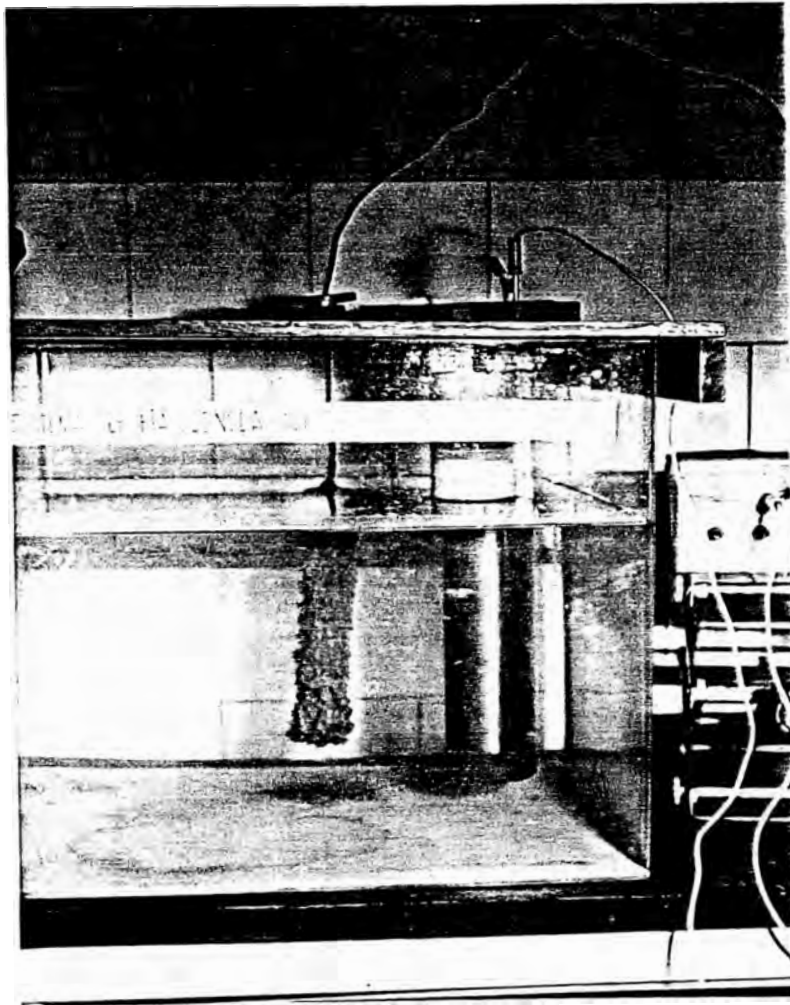


SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO

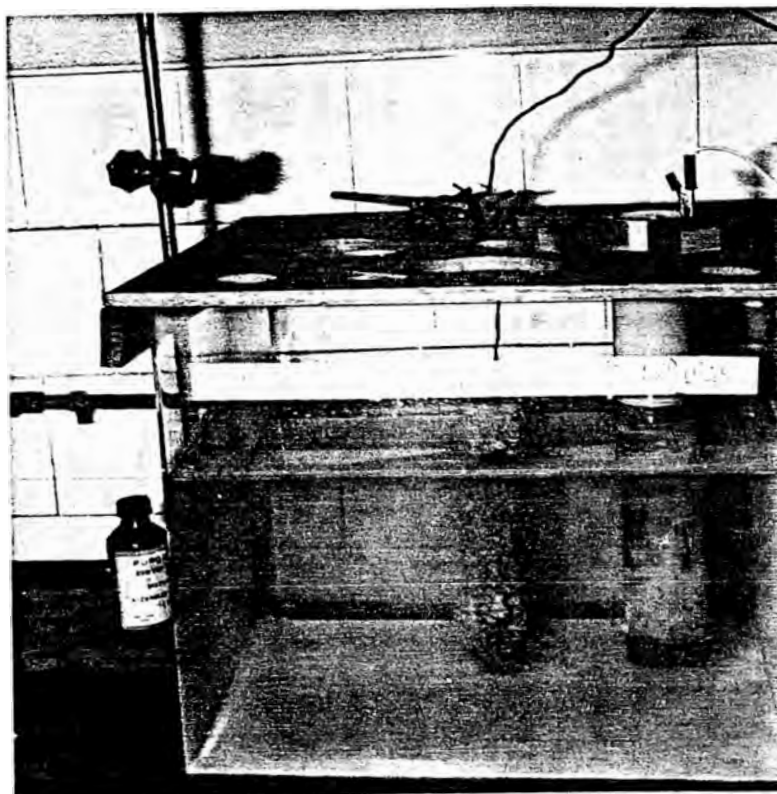


MONTAJE DE LOS EQUIPOS

SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO
TUBERIA DESNUDA



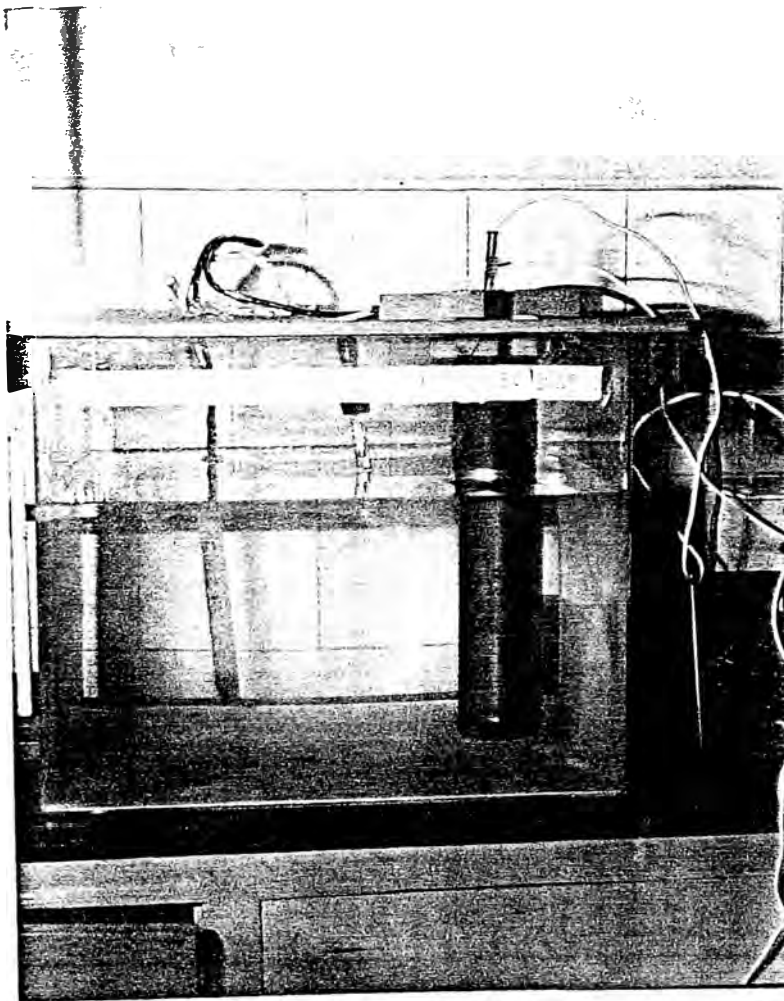
6 DIAS



20 DIAS

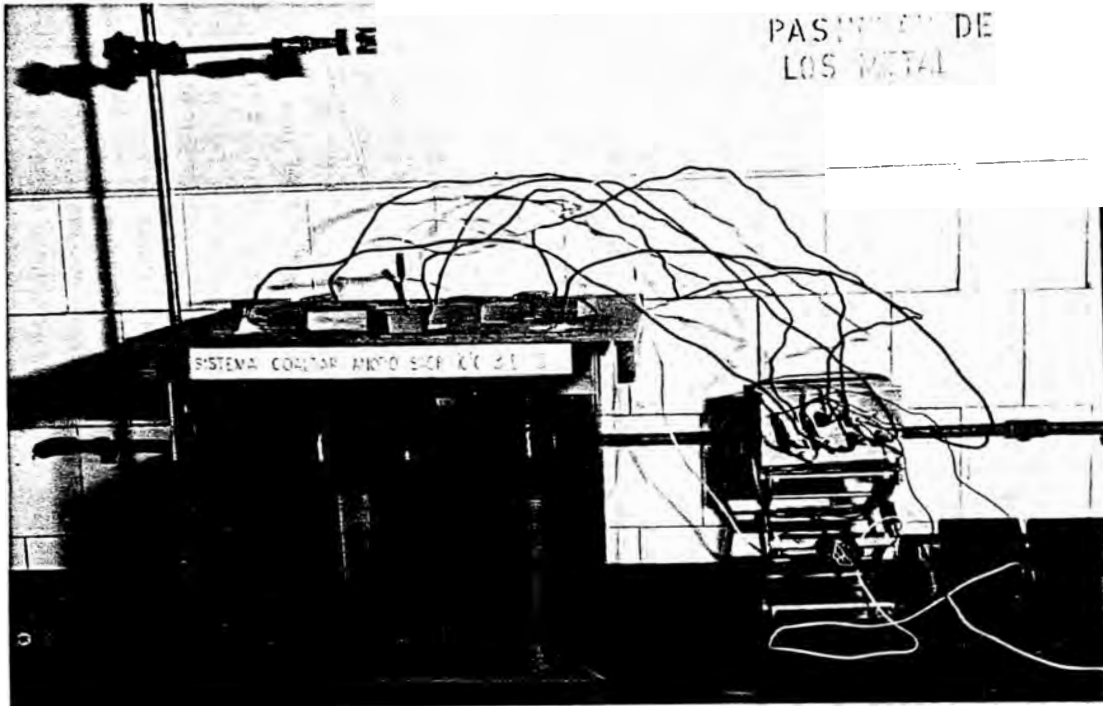
SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA

TUBERIA DESNUDA

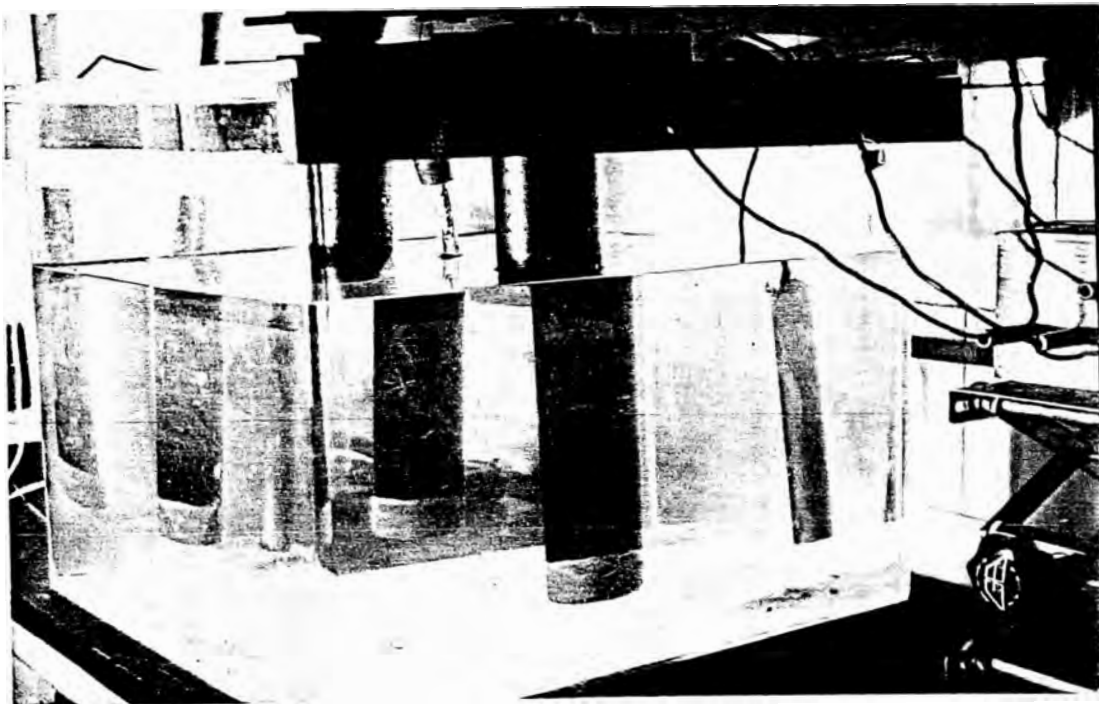


30 DIAS

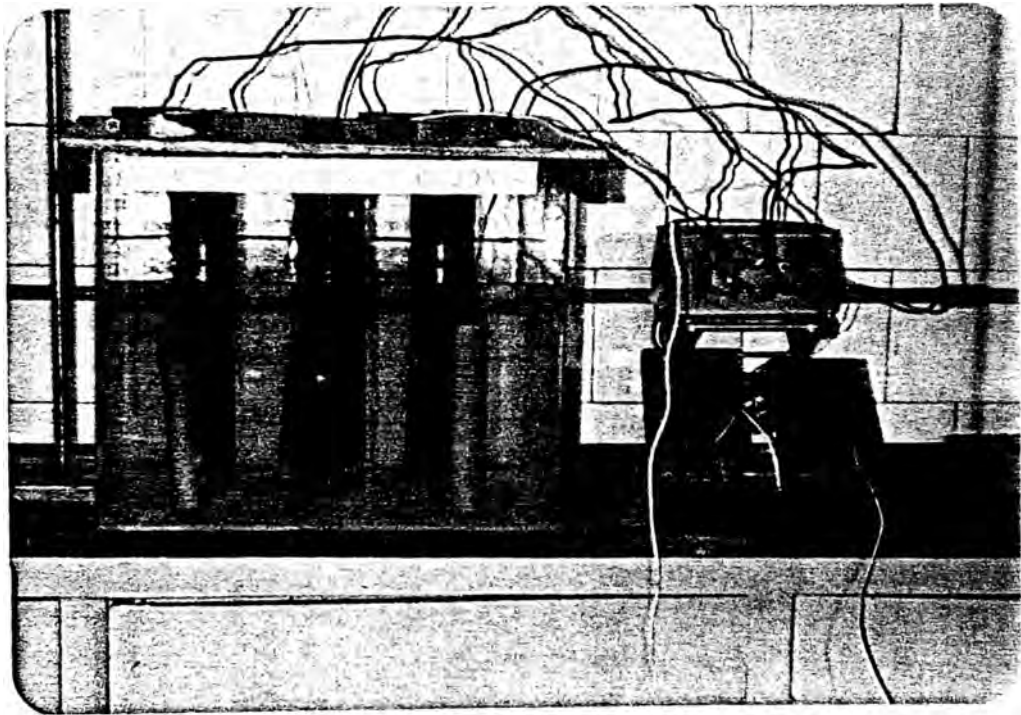
SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO
RECUBRIMIENTO COAL-TAR (SC)



3 DIAS

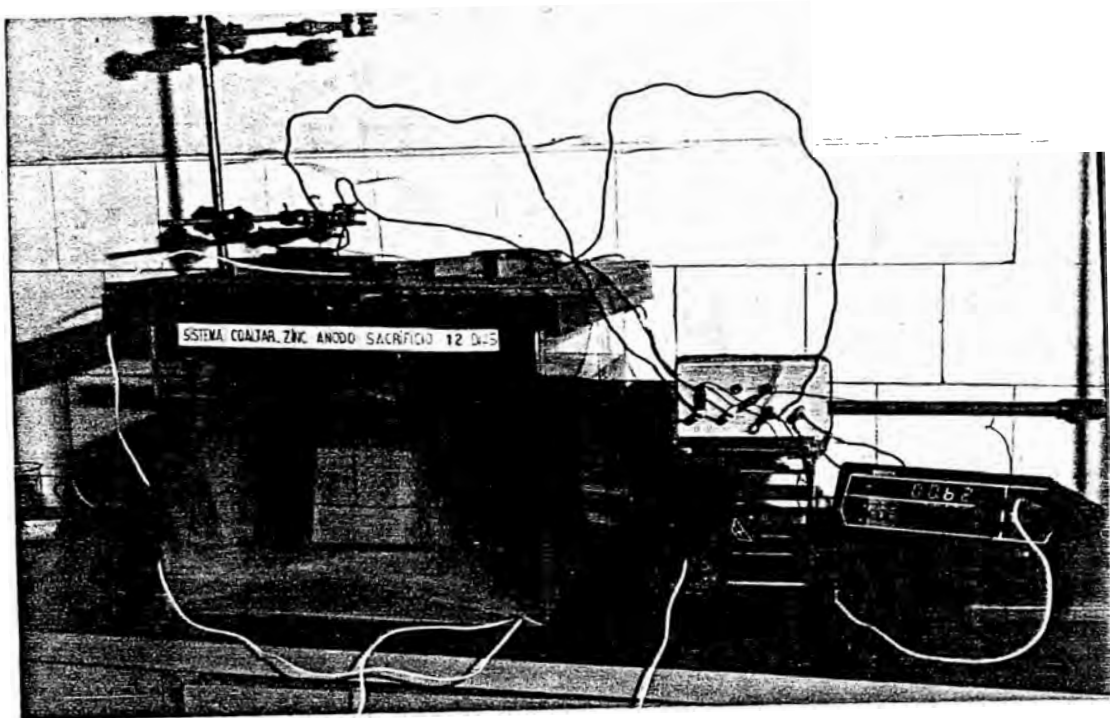


12 DIAS



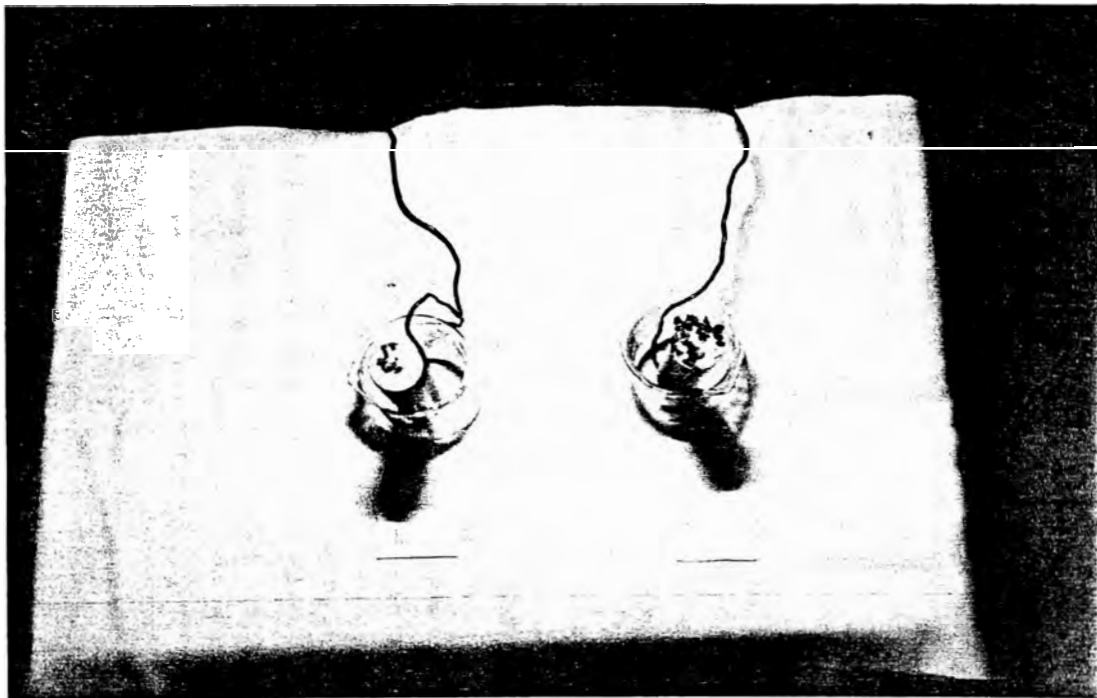
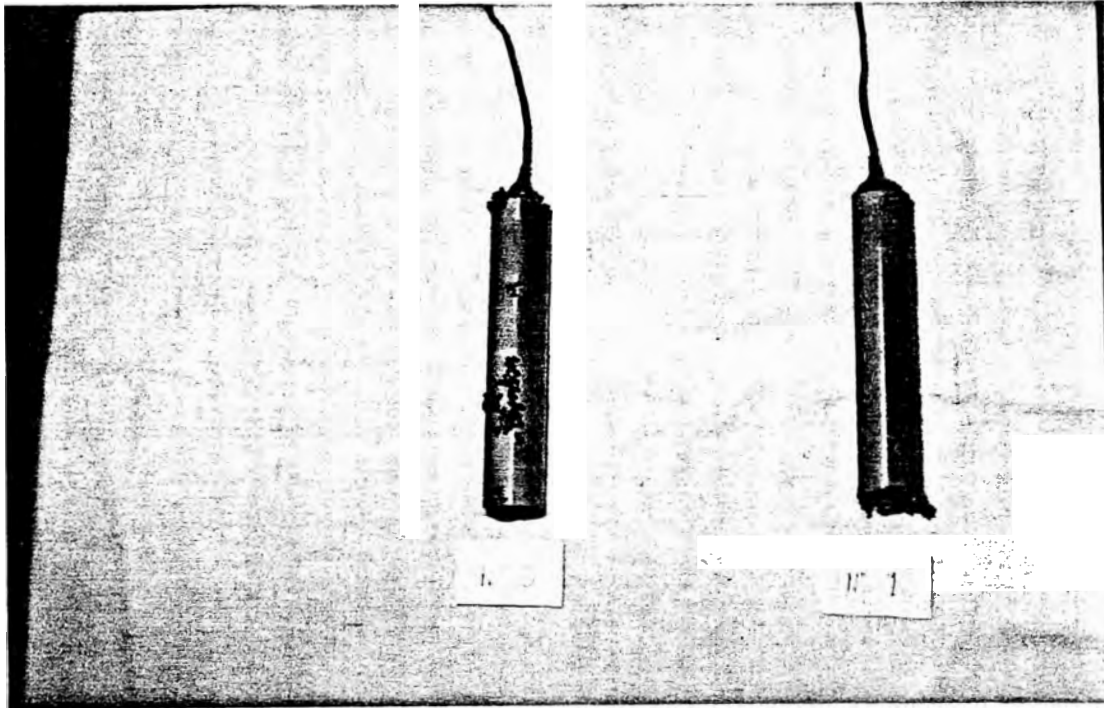
30 DIAS

SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO
RECUBRIMIENTO COAL-TAR ZINC (TZ)

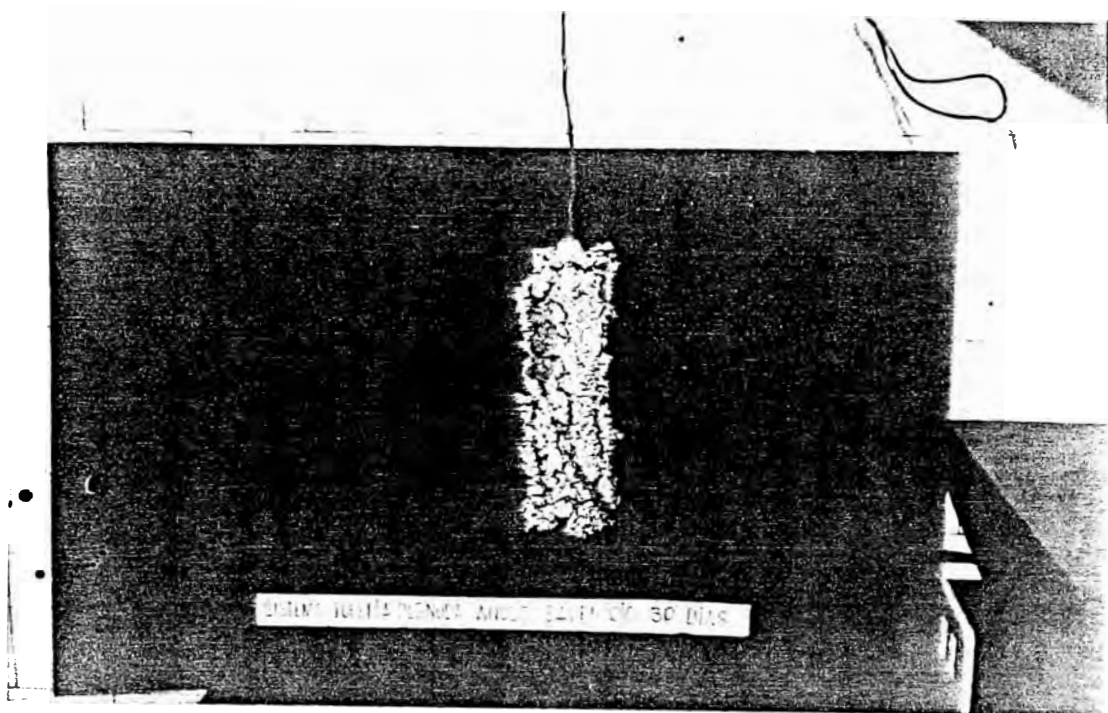


12 DIAS

ANODOS DE SACRIFICIO (Mg)

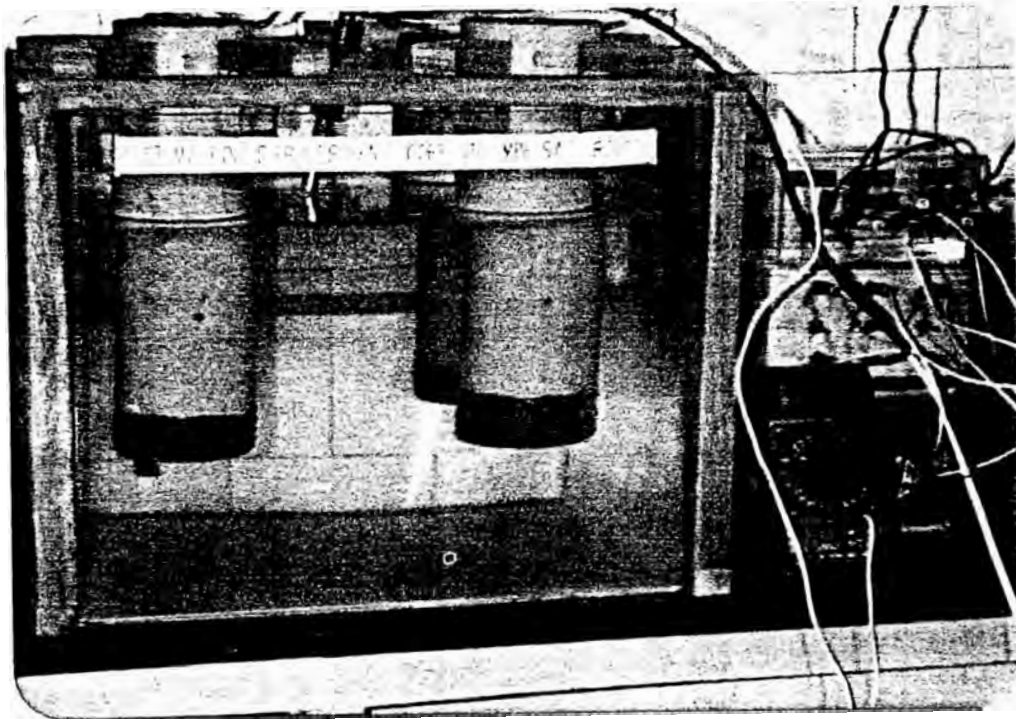


DETERIORO DEL ANODO DE SACRIFICIO AL CABO DE 30 DIAS
EN EL SISTEMA DE TUBERIA RECUBIERTA

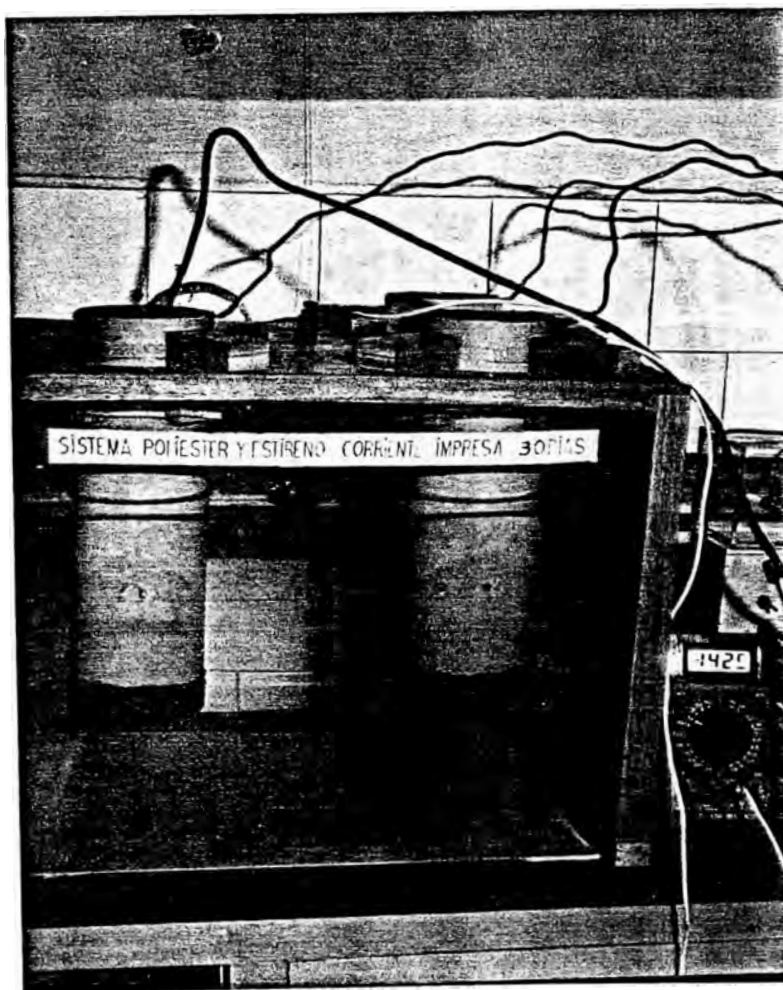


DETERIORO DEL ANODO DE SACRIFICIO AL CABO DE 30 DIAS
EN EL SISTEMA DE TUBERIA DESNUDA

RECUBRIMIENTO SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA
POLIESTER Y ESTIRENO AL CABO DE 30 DIAS (TP)

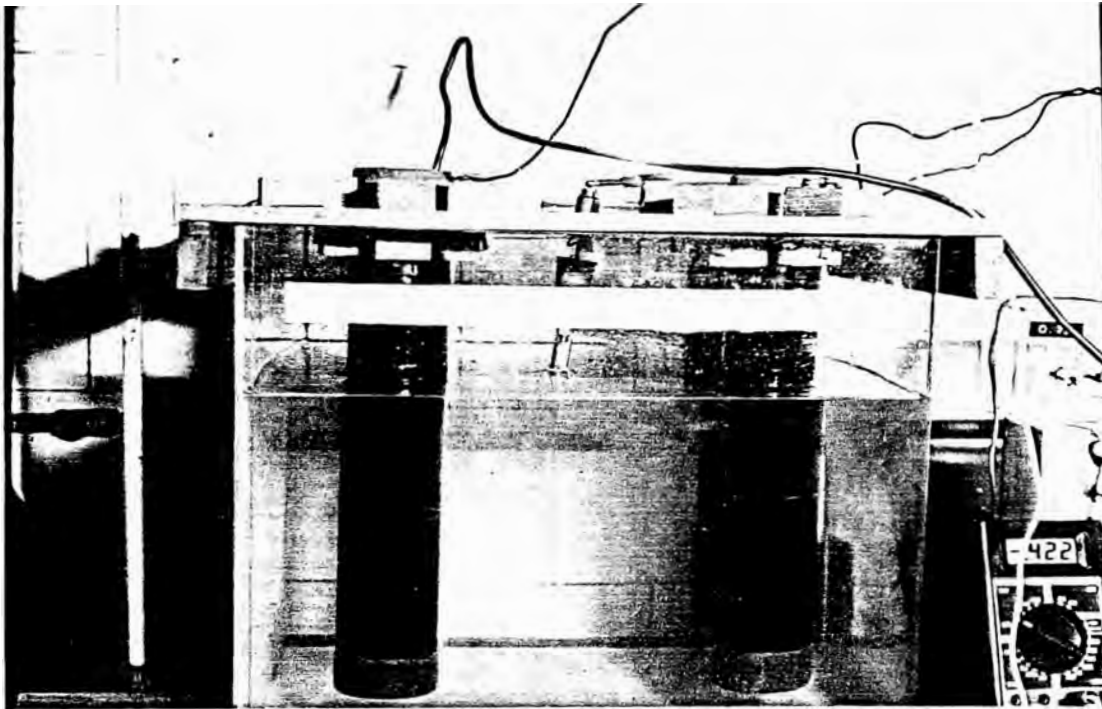


8 DIAS

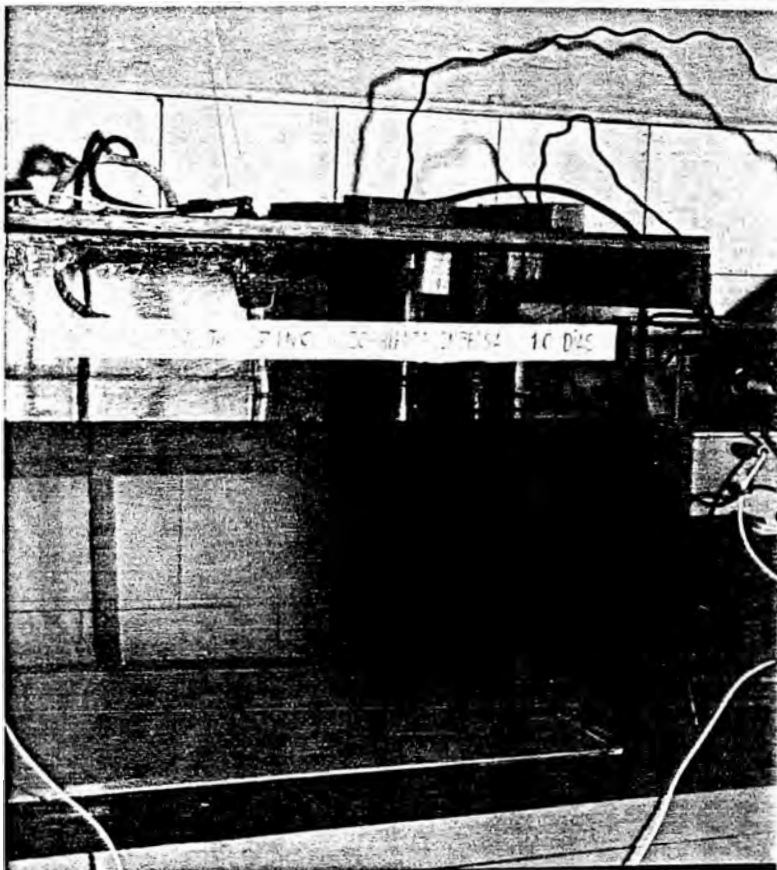


30 DIAS

SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA
RECUBRIMIENTO COAL-TAR EPOXI (SC)



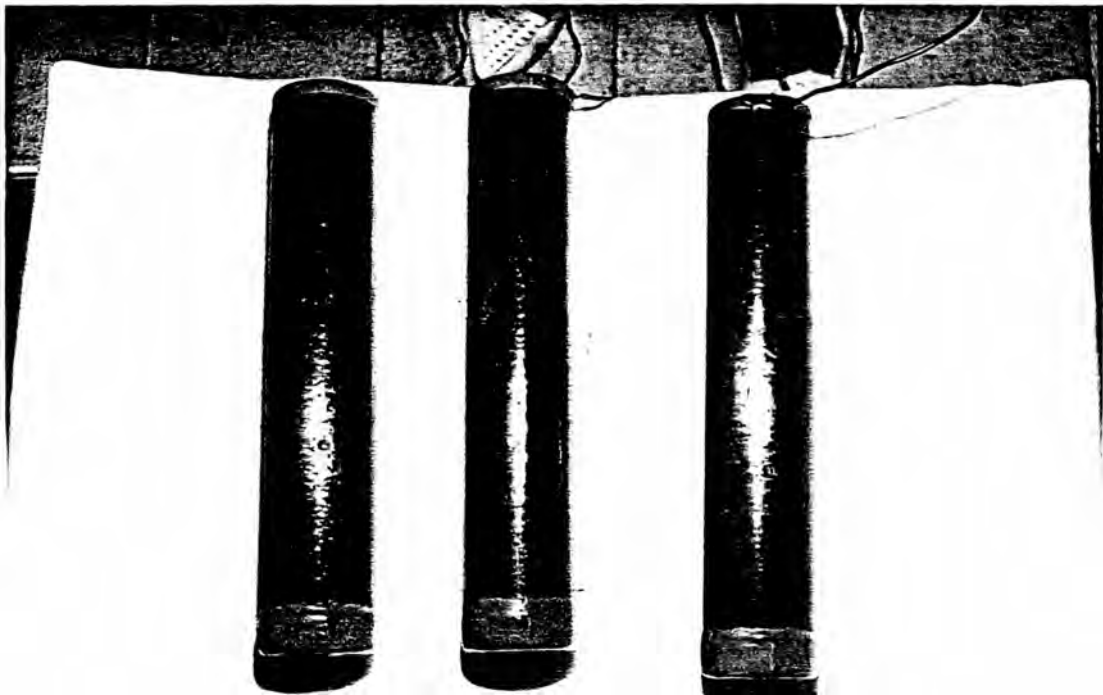
30 DIAS



10 DIAS

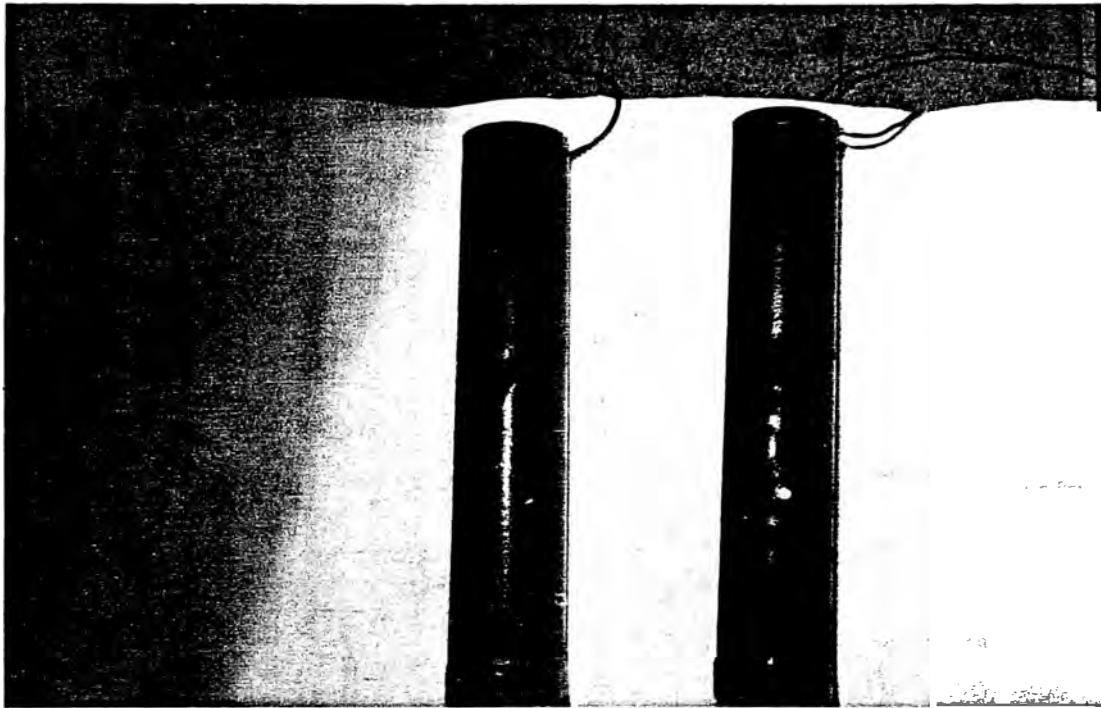
SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA
RECUBRIMIENTO COAL-TAR ZINC (TZ)

SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO
RECUBRIMIENTO : COAL-TAR AL CABO DE 30 DIAS (SC)



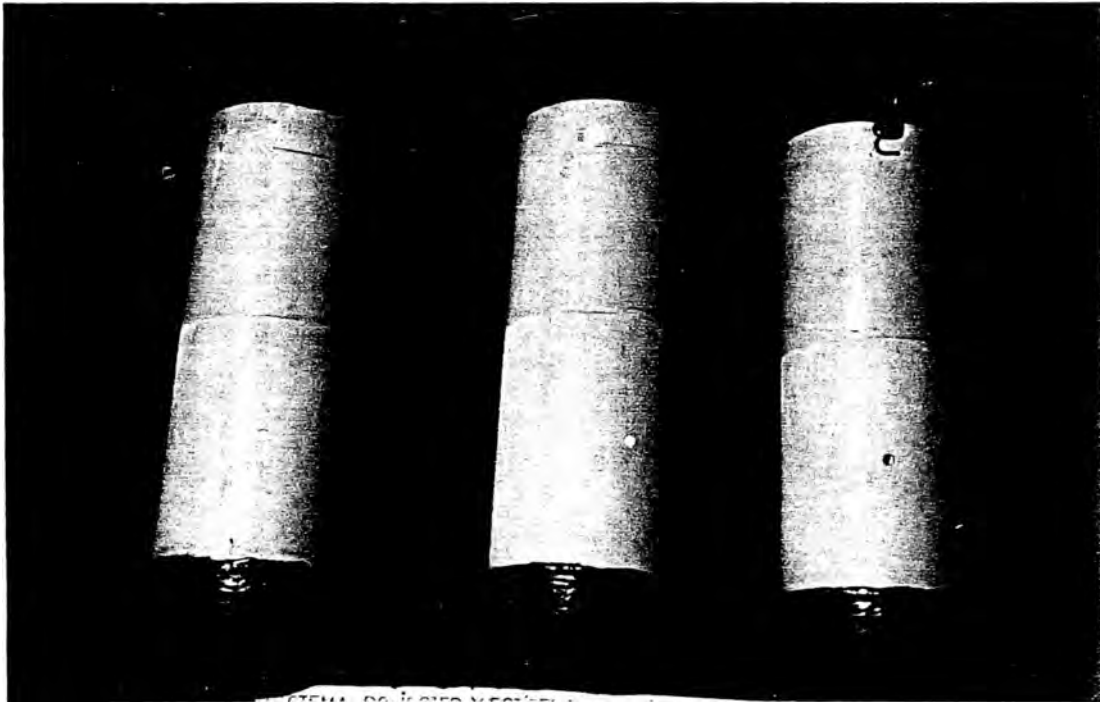
SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA
RECUBRIMIENTO : COAL-TAR AL CABO DE 30 DIAS (SC)

SISTEMA DE ANODO DE SACRIFICIO
RECUBRIMIENTO COAL-TAR ZINC AL CABO DE 30 DIAS (TZ)



SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA
RECUBRIMIENTO COAL-TAR ZINC AL CABO DE 20 DIAS (TZ)

SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA
RECUBRIMIENTO POLIESTER Y ESTIRENO (TP)



A N E X O N º 2

DISTECK S.A.

Esta pintura está compuesta de polvos de plásticos de fraguado térmico, sus especificaciones principales son

- * Forma física Polvo
- * Tamaño de partícula 30 a 70 micrones
- * Gravedad específica 1.2 a 1.8 (dependiendo del color)
- * Revestimiento 106 a 160 pies²/lb/mils
- * Temperatura de horneado 360° F - 425° F

El rendimiento de ésta pintura en función a su resistencia, a la intemperie, humedad, abrasión en arena es excelente, además presenta

- * Resistencia al impacto directo 100 160 lb/pulg
- * Resistencia al impacto inverso 90 140 lb/pulg
- * Resistencia a la inmersión en agua con de
NaCl : 500 hrs.
- * Resistencia a la temperatura Hasta 250° C
- * Resistencia al alcohol 4 hrs. de contacto directo
ablanda (recupera)
- * Resistencia al ácido sulfúrico al 30% 65 hrs. de
contacto directo
- * Resistencia al hidróxido de sodio al 20% 65 hrs. más
pérdida de brillo

PROCESO

Sistema de fosfatizado en caliente que consiste en tres baños en spray

BAÑO 1 : Fosfatiza el material con fosfato de fierro en caliente, de tal modo que permite darle una capa anticorrosiva al material que puede durar 48 hrs. al medio ambiente sin que se presenten rasgos de oxidación .

BAÑO 2 : Enjuague con agua limpia .

BAÑO 3 : Realiza el sellado del fosfatizado en caliente

HORNO DE SECADO :

Realiza el secado del material antes que ingrese a la cabina .

CABINA DE PINTURA

En la cual se le aplica la pintura en polvo al material por medio de equipos electrostáticos obteniéndose una capa uniforme y bien adherido en el material .

HORNO DE CURADO

Provee el fraguado térmico de la pintura en el material .

APLICACION

Las aplicaciones típicas que se dan a éste recubrimiento incluyen muebles y equipos de jardín, equipos marinos, toldas metálicas, paneles, ventanas, puertas, estantería y en general todo material expuesta a la intemperie .

Las aplicaciones para uso interior incluyen aquellos materiales que requieren buena resistencia contra el calor y retención del calor

A N E X O N º 3

EPOLINE SERIE 164

El Epoline 164 STEELCOLIN es un recubrimiento fabricado a base de resinas epóxicas y pigmentos inorgánicos muy resistentes; es un compuesto al 100% de sólidos y que no contiene solventes .

Es completamente impermeable, resistente a la humedad, así como a cualquier solución corrosiva, aceites solventes etc. Da protección antigalvánica y anticorrosiva a los cascos de embarcaciones de metal .

USOS

Para revestir tanques de acero, fierro, concreto, eternit, madera, etc., destinados a contener tanto materias corrosivas, como sustancias de diversa naturaleza, alimentos : leche, vinos, agua potable, jugos de fermentación .

Se le emplea también para revestir cascos de embarcaciones de metal, tuberías o conexiones .

APLICACION

Se puede aplicar directamente sobre todo tipo de superficies pero en ciertos casos, cuando se aplica sobre metal se recomienda darle antes una mano de Epozinc Primer Steelcolin a fin de obtener una mayor adherencia .

Esto revestimiento no se puede adelgazar y el diluyente es sólo para la limpieza del equipo .

A N E X O N º 4

MASILLA BLANCA

La Masilla Blanca de STEELCOLIN es un adhesivo epóxico para todo tipo de superficie desde vidrio hasta acero. Está compuesto a base de resinas epóxicas e inhibidores de corrosión con un contenido de 100 % de sólidos.

Es cuatro veces más fuerte que el concreto. Se mantiene flexible, soportando los movimientos de superficie sin rajarse.

Tiene gran adherencia, no encoge, no tiene olor y no es inflamable, ni antes, ni durante, ni después de la aplicación.

USOS

Es recomendable para reparar superficies, en especial aquella que van a estar expuestas a un ataque químico o corrosivo.

Para forrar o encofrar tanques, para reforzar y masillar los cascos de las embarcaciones inclusive las de fibra de vidrio, para adherir metales sobre concreto, para muros y pisos, para sellar tuberías de ventilación y de agua, para componer fallas de rajaduras en los edificios, piscinas, tanques de eternit, concreto o de madera etc.

APLICACION

Se puede aplicar mediante una espátula o badilejo y al espesor deseado luego se puede emparejar o pulir con agua mientras esté fresco , pero no se debe mezclar nunca con agua el material

Después que haya fraguado se puede lijar para obtener una superficie pareja

A N E X O N º 5

PASTA NEGRA

Es una masilla a base de resinas sintéticas. Por su adherencia y sus cualidades antiácidos, antiálcalis su empleo es múltiple. Se usa en reparaciones de tanques, de fierro, concreto, recubrimiento de poliéster.

PREPARACION

La pasta negra se presenta en dos envases en la proporción de tres a uno en volumen. Se mezclan las dos fases amasando bien sobre una plancha de fierro, madera o cemento, por unos 20 minutos. Se prepara en pequeñas proporciones, ya que una vez mezcladas las fases el proceso de fraguado continúa, y no es posible detenerlo.

La pasta negra comienza a reaccionar desde que empieza la mezcla. El tiempo de trabajo es de 4 horas, después de las cuales empieza a endurecer.

CUALIDADES

Químicas Resistencia a los ácidos y alcális

Mecánicas : Resistencia a la tracción y Flexión

Térmicas Resistencia a la dilatación Térmica

SECAMIENTO Y REPINTADO

Endurece a las 12 horas y se puede someter a cualquier prueba después de 8 a 15 días de fraguado

Después de 12 horas de aplicado se puede repintar matando previamente el brillo de la superficie tratada

RENDIMIENTO

Su rendimiento estará en función del espesor de la capa que se aplique; en condiciones normales (10 mils) rinde hasta 10 o 12 m² por juego de 3/4 galón

COLORES

Rojo óxido, negro, amarillo, gris y blanco

A N E X O N º 6

PINTURAS DE IMPRIMACION	
TIPO	ESPESOR MEDIO EN MICRAS
WASH PRIMER	10 - 15
SILICATO DE CINC	20 - 30
EPOXI RICA EN CINC CURADA CON FOLIAMIDA	15 - 25
EPOXI ALUMINIO	10 - 20
EPOXI-OXIDO DE HIERRO	20 - 30
PINTURAS ANTICORROSIVAS	
TIPO	ESPESOR MEDIO EN MICRAS
OLEORESINOSA	150 - 200
VINILICA FIGMENTADA CON OXIDO DE PLOMO	80 - 110
EPOXI - ALQUITRAN	120 - 190
ALQUITRAN MODIFICADA	70 - 100
BITUMINOSA FIGMENTADA CON ALUMINIO	120 - 140
CLOROCAUCHO	70 - 90
VINILICA FIGMENTADA CON ALUMINIO	70 - 80

A N E X O N.º 7

CALCULO DE LA DEPRECIACION

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Inversión de equipos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Siendo las pruebas de 30 días, el número de pruebas a considerar en un año es de 12.

A) .- ANODO DE SACRIFICIO

Inversión por 10 años:

Equipos principales	4,036.0
Equipos auxiliares	31.5
Accesorios complementarios.....	16.0

Total en dólares	\$ 4,083.5

Inversión por año :

Inversión de equipos	\$ 408.35
----------------------------	-----------

Anodo de magnesio que se consume por prueba \$ 1.50

Inversión de equipos por prueba = (408.35/12) \$ 34.00

Total de depreciacion mensual

(sistema ánodo de sacrificio)	\$ 35.50
-------------------------------	----------

B) .- CORRIENTE IMPRESA

Inversión por 10 años :

Equipos principales	\$ 6,816
Equipos auxiliares	\$ 73
Accesorios complementarios ..	\$ 32

Total en dólares	\$ 6,921

Inversión por año :

Inversión de equipos ... \$ 692.10

Total de depreciación mensual $(692.10/12)$.. \$ 57.00
(sistema de corriente impresa)