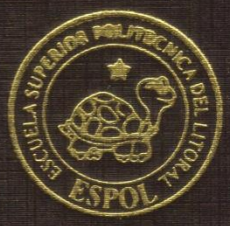


ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Estudio de un sistema de Protección contra la Corrosión, en Tuberías para Combustibles, Mediante Recubrimientos y Protección Catódica"

TESIS DE GRADO

Previo a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Pedro Emilio Requena Vera

Guayaquil - Ecuador

Año - 2002

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Estudio de un sistema de Protección contra la Corrosión , en Tuberías para Combustibles , Mediante Recubrimientos y Protección Catódica "

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Pedro Emilio Requena Vera

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2002

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Ernesto Martínez Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A MI FAMILIA

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden *exclusivamente*; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Pedro Emilio Requena Vera

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

ING. EDUARDO RIVADENEIRA P.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

ING. ERNESTO MARTÍNEZ L.
DIRECTOR DE TESIS

ING. OMAR SERRANO V.
VOCAL

ING. JORGE FELIX N.
VOCAL

RESUMEN

El presente trabajo se realizó para prevenir la corrosión de las tuberías del poliducto Tres Bocas-Salitral, tanto en los tramos aéreos como enterrados, mediante los métodos de recubrimientos y protección catódica.

Las tuberías empleadas en el poliducto, que transportan bunker y gas licuado de petróleo, son de acero de tipo API-5L, grado B SCH40, con diámetro de 14 y 8 pulgadas.

La ejecución del proyecto estuvo a cargo del Consorcio de Compañías SANTOS-CMI, para el cual presté mis servicios en el año 1988, primero en calidad de Asistente de Montaje, y luego como Supervisor de Pintura y Protección Catódica, de acuerdo al avance de la obra.

Las tuberías se sometieron a limpieza usando el método *sandblasting* y luego fueron protegidas con una capa primaria de pintura anticorrosiva. Después se las transportó y ubicó al costado del camino carretero que une las estaciones de Tres Bocas y El Salitral, en una extensión de 4.5 kilómetros.

Las uniones entre las tuberías y el armado de las *liras* de expansión, se hicieron soldadas y sometidas a pruebas de control de calidad, mediante el empleo de radiografía industrial, usando el código API y pruebas hidrostáticas.

La disposición general de la tubería es aérea, soportada por cimientos de concreto y recubierta con una capa de acabado de pintura. Sin embargo, tiene ocho tramos enterrados que corresponden a los cruces de camino en las entradas hacia los campamentos, en la Vía Perimetral y a los caminos vecinales.

La tesis está dividida en tres capítulos, cuya descripción de lo que tratan sigue a continuación:

El primero trata sobre los temas básicos de protección de superficies metálicas mediante recubrimientos y sistemas de protección catódica, describiendo el desarrollo del método galvánico de ánodos de sacrificio, enfocando la atención hacia los principales pasos que se consideran para ejecutar el proyecto.

El segundo capítulo comprende el diseño del proyecto, considerando las condiciones del terreno y del medio. Se hace un análisis de los recubrimientos al que fueron sometidas las tuberías, mediciones preliminares y los requerimientos necesarios de la corriente de protección para la selección y forma de ubicación de los ánodos de sacrificio.

En el tercer capítulo se expone la realización práctica del trabajo, describiendo los materiales empleados, la formación e instalación de las camas o lechos de ánodos y el proceso de mantenimiento. Esto se

complementa con las necesarias recomendaciones a seguir para el buen funcionamiento de la protección.

ÍNDICE GENERAL

	Págs.
RESUMEN	II
INDICE GENERAL	III
INDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE MAPAS Y GRÁFICOS	VI
INTRODUCCIÓN	VII
CAPÍTULO 1	3
1. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN TUBERÍAS PARA COMBUSTIBLE	3
1.1. Recubrimientos	3
1.1.1. Preparación de superficie	5
1.1.2. Recubrimientos a base de pinturas	6
1.1.3. Recubrimientos a base de cintas de Polietileno	12
1.2. Sistemas de protección catódica	15
1.3. Método galvánico por ánodos de sacrificio	22
1.3.1. Parámetros de control	22
1.3.2. Técnicas y métodos de inspección	32
1.3.3. Selección de material anódico	32
1.3.4. Criterio de protección	36

1.3.5. Criterio de ubicación 38

CAPÍTULO 2 39

2. DISEÑO DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN TUBERÍAS PARA COMBUSTIBLE 39

2.1. Condiciones del medio 39

2.1.1. Tuberías aéreas 39

2.1.2. Tuberías enterradas 39

2.2. Aplicación de recubrimientos 43

2.3. Mediciones preliminares y requerimientos de corriente 45

2.3.1. Potencial natural y tramos a proteger 45

2.3.2. Resistividad del suelo 46

2.4. Corriente necesaria para la protección catódica 46

2.5. Selección del ánodo y método de ubicación 50

2.6. Cálculos 51

2.6.1. Cálculo de la masa anódica 51

2.6.2. Cálculo del número de ánodos 51

2.6.3. Cálculo de resistencia para ánodos 52

CAPÍTULO 3 56

3. INSTALACIÓN DEL SISTEMA 56

3.1. Materiales y elementos complementarios 56

3.1.1. Conductores eléctricos 56

3.1.2. Conexiones eléctricas 57

3.1.3. Juntas aislantes 60

3.1.4. Postes de pruebas 60

3.2. Detalles prácticos de la instalación 66

3.3. Instalación de las camas o lechos 67

3.4. Ficha técnica de inspección 78

3.5. Proceso de mantenimiento 83

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 84

BIBLIOGRAFÍA

APENDICES

ABREVIATURAS

NACE	National Association of Corrosion Engineers
SSPC	Steel Structures Printig Council
SP	Surface Preparation
Ohm-cm	Ohmio por cm.
Ohm/volt	Ohmio sobre voltio
V	Voltio
A	Amperio (amp)
mV	Mill voltio
Kg	Kilogramo
Cm	Centímetro
hr	Hora
AWG	American Wire Gauge
L.P.G.	Gas licuado de petróleo

SIMBOLOGÍA

P	Resistividad del suelo
a	Distancia entre electrodos
V	Diferencia de potencial (voltios)
I	Intensidad de corriente (amperios)
Dc	Densidad de corriente
log	Logaritmo
Exp	Exponencial
E	Eficiencia del recubrimiento
F	Factor de corrosión
I	Corriente total
A	Área de la estructura
M	Masa total de ánodos
T	Tiempo de vida
C	Capacidad de corriente
n	Número de ánodo
m	Masa del ánodo
Rh	Resistencia de ánodos horizontales
L	Longitud del ánodo
S	Distancia entre ánodos
d	Diámetro del ánodo
Rth	Resistencia total de ánodos horizontales
f	Factor de ajuste
Rh_1	Resistencia suelo-ánodo con dimensiones de zanja
Rh_2	Resistencia suelo-ánodo con dimensiones del ánodo
R	Resistencia teórica
R'	Resistencia del circuito
E_o	Potencial del ánodo
Ee-s	Potencial estructura-suelo
Lt	Corriente teórica de protección
Φ	Diámetro
π	Pi

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Corrosión causada por una mezcla de diferentes sólidos y humedad	16
Figura 1.2.	Formación de una pila galvánica composición del ánodo.	
Figura 1.3.	Medición del potencial natural de la tubería	20
Figura 1.4.	Vibrogroud, electrodo cobre/sulfato de cobre y potenciómetro instrumentos usados para medir la resistividad del suelo (cortesía ESPOL)	26
Figura 1.5.	Diagrama del circuito para la medición de la resistencia del suelo	31
Figura 2.1.	Vista de tramo aéreo de tubería ∅ 14" y B" del Salitral hacia Tres Bocas	41
Figura 2.2.	Vista de tramos aéreos de muelle de descarga hacia estación de bombeo Tres Bocas	41
Figura 2.3.	Tubería recubierta con pintura afectada por diferentes capas de terreno	42
Figura 2.4.	Tubería recubierta con cinta adhesivas afectada por diferentes capas de terreno	42
Figura 3.1.	Conexiones y aislamientos de cables antes de ser cubiertos con material pétreo	58
Figura 3.2.	Disposición de los cables en un poste de prueba	58
Figura 3.3.	Conexión de cables a la tubería utilizando el método autovulcanizado	59
Figura 3.4.	Aislamientos de bridas y pernos	61
Figura 3.5.	Representación esquemática de la conexión eléctrica	63
Figura 3.6.	Detalle interior del poste potenciométrico	64
Figura 3.7.	Disposición de un potenciómetro – electrodo de referencia conectado a terminales del poste de prueba (potencial del uno abierto)	65
Figura 3.8.	Comprobación de potencial en un poste de prueba	65
Figura 3.9.	Enterramiento y poste de prueba de tubería de 8" de diámetro hacia estación de L.P.G. Salitral	68
Figura 3.10.	Entrada de tubería enterrados en el cruce de la vía Perimetral desde el Salitral	71
Figura 3.11.	Salida de enterramiento de tuberías en el cruce de vía perimetral hacia estación de bombeo Tres Bocas	71
Figura 3.12.	Enterramiento de tubería de 14" en el área de la estación de bombeo Tres Bocas	74
Figura 3.13.	Enterramiento de tubería de 8" en área de la Estación de Bombeo Tres Bocas	74
Figura 3.14.	Enterramiento de tubería de 14" dentro del área del Salitral hacia los tanques de almacenamiento	76

gura 3.15. Entrada de enterramiento de tubería de 14 hacia el campamento del Salitral – Cruce de vía 80
gura 3.16. Salida de enterramiento de tubería de 14" en el campo del Salitral 80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de los recubrimientos protectores	4
Tabla 2	Limpieza de superficie en orden descendente de efectividad	6
Tabla 3	Funciones de los componentes de un sistema de capas	10
Tabla 4	Efecto de la limpieza sobre la durabilidad de la protección por pinturas	11
Tabla 5	Método de preparación de superficies para pintar y vida (años) de los proyectos de pintura	12
Tabla 6	Propiedades físicas de dos tipos de cintas	14
Tabla 7	Eficiencia de los revestimientos	15
Tabla 8	Serie galvánica	27
Tabla 9	Corrosividad del suelo vs. Resistividad	28
Tabla 10	Tramos aéreos	43
Tabla 11	Tramos enterrados	44
Tabla 12	Ubicación y longitud de tramos a proteger	45
Tabla 13	Eficiencia de recubrimiento aplicado en estructuras	48
Tabla 14	Resultado de la intensidad de corriente	49
Tabla 15	Resultado del cálculo de masa total y número de ánodos	52
Tabla 16	Valores para el cálculo de las resistencias	54
Tabla 17	Resultado del cálculo de resistencia	54
Tabla 18	Tipos de cables	56
Tabla 19	Lecturas de potencial de protección	79

INDICE DE PLANOS

Plano 1	Tramo I ∅ 8" curva fuera del campamento
Plano 2	Tramo II y VI ∅ 8" y ∅ 14" cruce perimetral
Plano 3	Tramo VI ∅ 14" dentro del campamento
Plano 4	Tramo III y VII ∅ 8" y ∅ 14" Tres Bocas
Plano 5	Tramo V ∅ 14" malla – campamento
Plano 6	Tramo VIII ∅ 8" y cruce Inecel

INTRODUCCIÓN

PETROECUADOR, con el fin de mejorar la distribución de los derivados del petróleo y, al mismo tiempo, disminuir los costos por transporte hacia las principales ciudades del país, proyectó la creación de un sistema de abastecimiento de bunker (fuel-oil) y gas licuado de petróleo (LPG) para una región que abarca la ciudad de Guayaquil, el resto de la provincia del Guayas y la provincia de El Oro, como complemento del sistema de distribución de productos "blancos" (diesel y gasolina) ya existente, que incluye la estación de descarga y bombeo, ubicada en el Terminal de Tres Bocas, y el campo de almacenamiento y distribución de Pascuales.

El proyecto comprende el muelle, o atracadero para buques, y una estación de bombeo, ambas instalaciones ubicadas en Tres Bocas, a las que se agrega un campo con tanques de almacenamiento y distribución, localizado en El Salitral.

Estas dos estaciones están unidas a través de tuberías. A la altura de la planta termoeléctrica de INECEL, existe una bifurcación de la tubería de bunker, realizada para abastecer a los reservorios de la planta; la tubería que conduce el gas continúa hasta la planta de almacenamiento.

Para esta red de tuberías de acero es de suma importancia la protección contra la corrosión, puesto que están expuestas al ataque de diferentes agentes corrosivos, cuando estos agentes se localizan en zonas del sistema de tuberías, ocasionando su deterioro. Con esta protección se conserva una inversión de alto costo, se impide el deterioro del medio ambiente y se evitan tragedias que podrían ocurrir a causa de fugas y derrames de los productos transportados.

Por estas razones y cumpliendo con normas establecidas para el proyecto, se realizó el correspondiente estudio y selección del método más conveniente para este caso.

CAPITULO 1

1. PROTECCION CONTRA LA CORROSION EN TUBERIAS PARA COMBUSTIBLE

1.1. Recubrimientos

Antes de aplicar cualquier tipo de recubrimiento es importante realizar una buena limpieza de la superficie que podría estar expuesta a la corrosión.

Un buen recubrimiento para las tuberías metálicas debe tener las siguientes características principales:

- Resistencia eléctrica al agua y a los productos químicos.
- Resistencia a la manipulación y al impacto.
- Resistencia a las contracciones y expansiones mecánicas del suelo y la tubería.
- Buena adherencia a la superficie metálica y ser de fácil aplicación.
- Ductibilidad, durabilidad y estabilidad ante los cambios de temperatura.

Entre los recubrimientos utilizados se tiene:

- Pinturas
- Cintas
- Materiales bituminosos

- Espuma de poliuretano

La Tabla 1, a continuación, muestra la clasificación de los recubrimientos protectores.

TABLA 1

CLASIFICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

FORMACIÓN BÁSICA DE CAPAS	CAPAS GENÉRICAS DE MATERIALES
CAPAS NATURALES DE CAPAS SINTÉTICAS DE OXIDACIÓN- AIRE	Barnices fenólicos Alquílicas Vinil- alquílicas Epóxicas Alquílicas con silicón Uralquílicas
LACAS Y SOLVENTES	Nitrocelusosas Polivinílicas cloroacetatos Copolímeros Polímeros acrílicos Caucho clorohidratado Alquitrán de hulla Asfalto
CAPAS CURATIVAS	Epóxicas Epóxico de alquitrán Poliuretano Poliéster Silicón
CAPAS DE TIPO EMULSIÓN	Acetato de vinil Acrílico Vinil acrílico Epóxico
CAPAS DE ALTO CONDENSADO	Fenólicas puras Fenólicas epóxicas
CAPAS SÓLIDAS 100%	Enamel con alquitrán Asfalto Poliéster Capas con polvo epóxico Capas con polvo vinílico Plástisols

1.1.1. Preparación de superficies

La limpieza de la superficie es un factor de mucha importancia, aún mayor que la calidad de la pintura que se aplicará. Esto significa que una apropiada preparación, aún con el uso de pinturas mediocres, tendrá mejor resultado que si se emplea pintura de calidad superior sobre una superficie mal preparada.

La preparación de superficie incluye:

Eliminación de suciedad, grasas y aceites que hay en la superficie, mediante solventes y soluciones alcalinas.

Eliminación completa de herrumbre y cascarilla de laminación, mediante el decapado y chorreado con arena.

Las especificaciones de limpieza se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2

LIMPIEZA DE SUPERFICIES EN ORDEN DESCENDENTE DE EFECTIVIDAD

#	TIPO	ESPECIFICACIÓN
1	Chorreado de arena-blanco	NACE # 1 SSPC SP 5-63
2	Chorreado de arena-casi blanco	NACE # 2 SSPC SP 10-63
3	Chorreado de arena-comercial	NACE # 3 SSPC SP 6-63
4	Decapado con ácido	SSPC SP 8-63
5	Limpieza a cepillo	NACE # 4 SSPC SP 7-63
6	Limpieza con flama y arenado	SSPC SP 4-63
7	Limpieza con herramientas mecánicas	SSPC SP 3-63
8	Limpieza con cepillo/alambre a mano	SSPC SP 2-63
9	Limpieza con solventes y franelas	SSPC SP 1-63

Recubrimientos a base de pinturas

Luego de realizar la limpieza de la superficie metálica, se debe aplicar una capa de fosfatizante para obtener una mejor adherencia de la pintura al metal, así como una buena resistencia al desprendimiento de la película, ante las ralladuras, arañazos o debido a otros posibles defectos del recubrimiento.

Después de secarse la primera capa, se deben aplicar varias capas adicionales de pintura, ya sea de recubrimiento o de acabado. Cuando el acero esté expuesto a un medio ambiente corrosivo, se considera recomendable y necesario un mínimo

de cuatro capas en total, con un espesor combinado no inferior a 0.13 mm.

Las pinturas son una mezcla de partículas insolubles, que constituyen los pigmentos, suspendidas en un vehículo orgánico.

Los pigmentos son, por lo general, óxidos metálicos como TiO_2, Pb_3O_4 y Fe_2O_3 u otros compuestos como CrO_4Zn, CO_3Pb, SO_4Ba y ciertas arcillas.

Los vehículos pueden ser: aceites naturales, tales como el aceite de linaza y el de tung. Cuando son utilizados como secantes estos aceites expuestos al aire se oxidan y se polimerizan solidificándose. Este proceso se puede acelerar si se añaden pequeñas cantidades de catalizadores, tales como jabones de plomo, manganeso o cobalto.

Cuando la pintura está expuesta a contacto continuo con el agua o se requiere resistencia a los ácidos, se emplean resinas sintéticas.

Entre las resinas naturales se tiene:

Los barnices, que están compuestos de una mezcla de aceite secante, resinas disueltas y un diluyente volátil.

Las lacas, que se conforman de resinas disueltas en un disolvente volátil y a veces contienen pigmentos.

Las Alkidis, que son productos a base de aceites naturales que químicamente reaccionan con resinas sintéticas.

Las resinas sintéticas comprenden fórmulas, a base de fenolformaldehidos y siliconas, que se utilizan para aplicarlas en superficies que estarán sometidas a altas temperaturas.

Las resinas vinílicas presentan buena resistencia a la penetración del agua. Debido a su resistencia hacia los álcalis, se las utiliza para pintar estructuras que serán protegidas catódicamente, ya que los productos alcalinos desintegran y saponifican a las pinturas a base de aceite de linaza y tung, al reaccionar con la humedad del suelo en el cátodo.

Las resinas epóxicas también son resistentes a los álcalis y otros medios químicos, pero poseen el defecto característico de no adherirse bien a las superficies metálicas. Estas resinas son la base de mezclas plásticas que, con catalizadores

adecuados, solidifican en el lugar de aplicación en corto tiempo.

El empleo de alquitrán de hulla y asfalto, combinados con solventes y aplicados en gruesas capas, ha dado buenos resultados sobre todo por su bajo costo. Se los emplea contra el ataque de aguas naturales y de mar.

La Tabla 3, en la página siguiente, describe resumidamente las funciones de los componentes de un sistema de capas.

TABLA 3

FUNCIONES DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CAPAS

CAPA	FUNCION PRINCIPAL	REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS	REQUERIMIENTOS
PRIMARIA	ADHESION	ADHESIÓN	ADHESION COHESION RESISTENCIA FLEXIBILIDAD LIGADURA INTERNA
INTERMEDIA LACAS Y SOLVENTES	GRUESO O ESPESOR DE CAPA Y ESTRUCTURA	LIGADURA AL PRIMARIO	COHESION LIGADURA INTER-CAPAS
		LIGADURA A LA ULTIMA CAPA	ESPESOR TENSIONES RESISTENCIA QUIMICA RESISTENCIA ELECTRICA
FINAL	RESISTENCIA A LA ATMOSFERA	RESISTENCIA AL MEDIO AMBIENTE	SELLAR SUPERFICIES TENSION RESISTENCIA
		LIGADURA CON LA CAPA INTERMEDIA	FLEXIBILIDAD APARIENCIA DUREZA O TENACIDAD

La Tabla 4, a continuación, muestra el efecto de la limpieza sobre la durabilidad de la protección con pintura.

TABLA 4

EFECTO DE LA LIMPIEZA SOBRE LA DURABILIDAD DE LA PROTECCION POR PINTURAS

CAPA	DURABILIDAD EN AÑOS	
	4 CAPAS	2 CAPAS
	2 capas de minio rojo y dos capas de óxido de hierro rojo	2 capas de óxido de hierro rojo
Sin limpiar, salida de fabrica	8,2	3,0
Expuesta a la intem-perie y frotada con cepillo de acero	2,3	1,2
Decapado	9,5	4,6
Chorreado de arena	10,4	6,0

La Tabla 5, en la página siguiente, muestra la duración de los proyectos de pintura de acuerdo al tipo de pintura empleada y a las condiciones de la superficie protegida.

TABLA 5

METODO DE PREPARACION DE SUPERFICIES PARA PINTAR Y VIDA (AÑOS) DE LOS PROYECTOS DE PINTURA

PROYECTO DE PINTURA 2 CAPAS	Sobre superficies a la intemperie	Sobre superficies decapadas	Sobre superficies a la intemperie y calor
Negro bituminoso	2,6	13,1	2,2
Cromado de minio	2,7	14,5	7,5
Micaceous iron ore	0,6	15,0	0,6
Minio rojo	1,1	13,1	5,9
Oxido rojo	1,8	8,1	2,8
Oxido rojo y cromato de Zn	3,7	9,6	5,3
Minio blanco	2,2	7,0	1,7
PROMEDIO	2,1	11,5	3,7

Recubrimientos a base de cintas de polietileno

Los recubrimientos con cintas plásticas, a base de polietileno adhesivo, presentan la ventaja de ser aplicados en frío y poseer elementos compatibles con la pintura base o primaria. Actuando juntas trabajan bien contra las condiciones ambientales, la corrosión mecánica, química y electrolítica.

El polietileno, seleccionado por su estabilidad química, permite ofrecer una máxima protección contra la corrosión química y electrolítica, resistencia a la abrasión, al encogimiento por efecto del frío, calor y presión, así como al estiramiento y doblado.

Para obtener óptimos resultados se debe realizar primero una buena limpieza de la superficie y, a continuación, colocar una capa de pintura compatible, que permita la adherencia de la cinta que actúa como envolvente primario. Además de las propiedades antes mencionadas, la cinta posee alta resistividad dieléctrica, manteniendo su flexibilidad. Se la utiliza en espesores de 15, 18, 20, y 25 milésimas de pulgada.

Las cintas usadas como envolventes secundarios duplican la protección mecánica, incrementando la resistencia a la corrosión, resisten el castigo que sufre la tubería durante el relleno de la zanja (colocación de lastre o concreto, impacto de piedras o cualquier otro elemento que se introduzca. Los espesores utilizados pueden ser de 15, 20, o 40 milésimas de pulgada.

La colocación de las cintas se puede realizar en forma mecánica o a mano, directamente en el campo de trabajo sobre las zanjas, de acuerdo a las normas y especificaciones establecidas.

La Tabla 6 describe las propiedades de dos grupos de cintas.

TABLA 6

PROPIEDADES FÍSICAS DE DOS TIPOS DE CINTA

Espesor total (mm)	0,3	0,50
Espesor de respaldo (mm)	0,2	0,225
Espesor de adherencia (mm)	0,1	0,275
Esfuerzo tensible (kg/cm)	4,46	5,4
Elongación (%)	100	200
Adhesión al primer (kg/cm)	0,55	2,2
Resistencia eléctrica (ohm/2.54 cm)	1X10exp12	1x10exp12
Esfuerzo dieléctrico (volt/micrón)	40	40
Tensión de vapor de agua (gr/m2/24hr)	0,15 a 3	0,15 a 3,1
Aplicación normal (tp amb. gr C)	-34 a 70	-34 a 72
Aplicación de servicio (tp operación)	-34 a 70	-34 a 72
Resistencia a hidrocarburos alifáticos	Excelente	Excelente
Resistencia a hidrocarburos aromáticos	Regular	Regular
Método de inspección	ASTM D-1.000	ASTM D-1.000
Garantía (polietileno)	Baja densidad	Alta y baja
Adhesión	Res.sintética	Res.sintética
	Caucho	Caucho Butílico
Color	Negro	Negro

La Tabla 7, que se presenta a continuación, muestra la eficiencia de los revestimientos.

TABLA 7

EFICIENCIA DE LOS REVESTIMIENTOS

TIPO DE REVESTIMIENTO		EFICIENCIA	
		INICIAL	FINAL
Esmalte a base de alquitran hulla	SIMPLE	95%	90%
	DOBLE	98%	94%
Esmalte a base de asfalto de petróleo	SIMPLE	95%	75%
	DOBLE	98%	85%
Cintas plásticas	UNA CAPA	40%	30%
	DOS CAPAS	50%	40%
Espuma de poliuretano		95%	90%

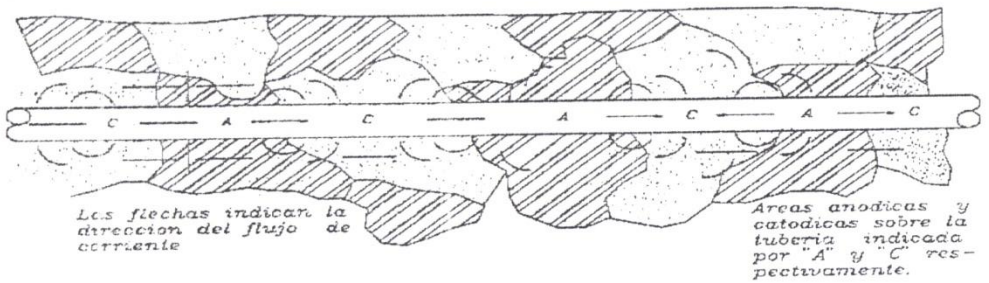
1.2 Sistemas de protección catódica

Para evitar el ataque corrosivo y realizar el control en las instalaciones enterradas, es importante hacer un estudio previo para efectuar una adecuada aplicación de las técnicas para combatir la corrosión. Para esto es necesario revisar los diversos tipos de corrosión a los que están expuestas las tuberías metálicas enterradas.

En la mayoría de los casos la corrosión se produce por una reacción electroquímica, en la que intervienen metales, sustancias químicas y agua, que conforman pilas capaces de generar una corriente eléctrica. Las sustancias químicas y el agua forman el electrolito. Ver Fig. N° 1.

Tubería

Superficie de la tierra



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P. Reguena	24/10/94		ESCALA:
REVISO	Ing. Martinez			MATERIAL
COMPROBÓ	Ing. Martinez			

CORROSIÓN CAUSADA POR UNA MEZCLA DE DIFERENTES SÓLIDOS Y HUMEDAD

Fig. 1.

Es importante señalar que los suelos, por más secos que parezcan, contienen humedad y funcionan como buenos electrolitos para el paso de corriente.

Los factores que pueden causar corrosión en tuberías enterradas de acero o de hierro fundido pueden ser:

El contacto eléctrico entre dos metales diferentes, debido a que existe una diferencia de potencial entre ellos y el suelo. Esta diferencia de potencial se denomina natural y puede ser medida por medio de un voltímetro y un electrodo de referencia.

La heterogeneidad del acero, porque los aceros para tubería varían de acuerdo al fabricante. Los aceros en las tuberías presentan diferencias en sus composiciones químicas, tensiones internas debido a los procesos de conformación y métodos de soldadura a que son sometidas.

La heterogeneidad del suelo, debido a lo cual los problemas de corrosión se agravan. Variaciones en factores tales como el grado de aireación, resistividad eléctrica, composición química y grado de humedad, entre otros, dan origen a las pilas de corrosión en la superficie de los metales enterrados en ellos.

La electrólisis, causada por fuentes externas de fuerza electromotriz, que es resultado de otros sistemas de electrificación, tales como instalaciones industriales, centrales de generación o redes eléctricas.

La combinación de algunos o de todos los factores expuestos anteriormente, actuando al mismo tiempo.

Las instalaciones de tuberías son construidas a lo largo de zonas con suelos que pueden ser de alta o de baja resistividad, siendo este factor el de mayor importancia, debido a que un valor bajo de resistividad permite que la pila de corrosión funcione con más severidad sobre las superficies metálicas.

Otro aspecto que contribuye al proceso de corrosión de tuberías enterradas es la falta de oxígeno en los suelos, sobre todo cuando las tuberías son de gran diámetro.

Se tienen dos métodos para la aplicación de la protección catódica: el método galvánico por ánodos de sacrificio y el método de corrientes impresas.

En ambos métodos existe un suministro de corriente continua en cantidad tal que, penetrando en una tubería de acero enterrada, es

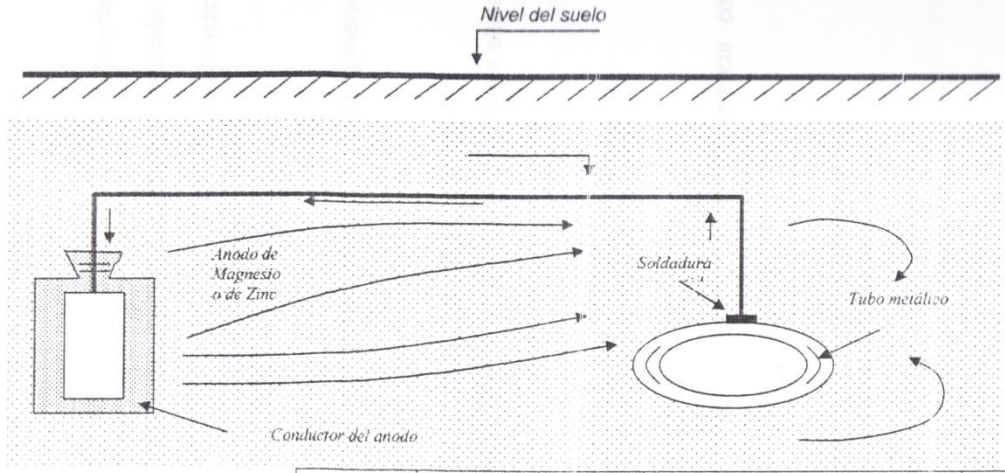
suficiente para eliminar las pilas de corrosión que normalmente existen en ellas.

En la práctica se selecciona el método que será utilizado, dependiendo del análisis de varias consideraciones técnicas y económicas, teniendo cada cual una ventajas y desventajas.

Protección catódica con ánodos galvánicos

Los ánodos galvánicos o de sacrificio son un método escogido cuando se precisa poca cantidad de corriente para proteger una estructura (revestimiento de poca cantidad y estructura de pequeñas dimensiones) y cuando el suelo posee baja resistividad eléctrica.

Cuando un ánodo galvánico está ligado a una estructura metálica enterrada, surge una pila galvánica, conforme se muestra en la Fig. 1.2.



	NOMBRE	FECHA		
DIBUJO	P. Requena	24/10/94	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
REVISO	Ing. Martinez			ESCALA:
COMPROBÓ	Ing. Martinez			MATERIAL
			FORMACIÓN DE UNA PILA CALVÁNICA COMPOSICIÓN DEL ÁNODO	Fig.1.2

El ánodo está constituido por un metal electronegativo con relación a la estructura, ligado a ella dentro de un electrolito como el suelo o el agua, que adquiere un comportamiento anódico, liberando una corriente de protección.

La corriente emitida por el ánodo penetra en la tubería a través del suelo o del agua, bloquea la corriente de corrosión y retorna a su punto inicial, cerrando un circuito por medio de los alambres de cobre.

Las principales ventajas en utilizar los ánodos galvánicos para proteger una tubería enterrada son:

No se requiere fuente o suministro de corriente alterna en el lugar.

Los costos de mantenimiento son mínimos.

Rara vez aparecen problemas de interferencia con otras estructuras metálicas enterradas.

Los costos de instalación son bajos.

Las desventajas son las siguientes:

b) potencial estructura-suelo.

c) resistividad eléctrica del suelo.

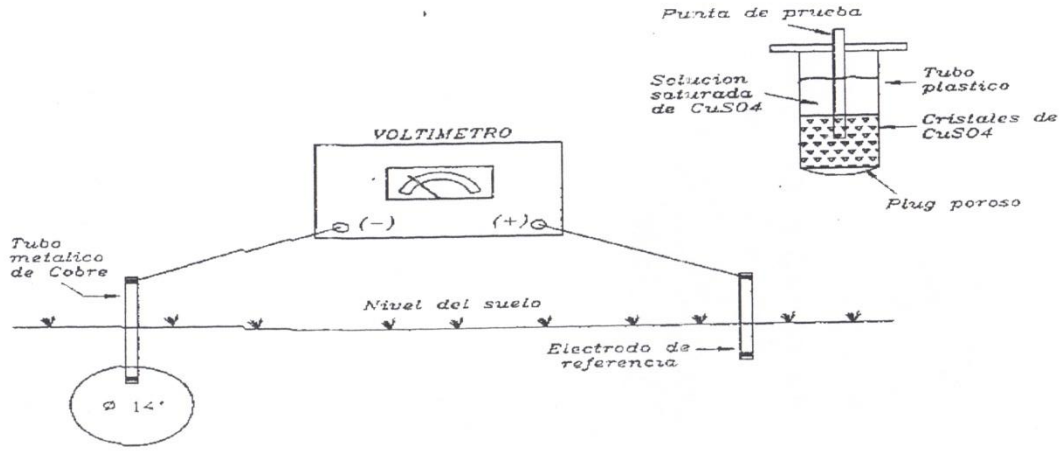
d) pH del suelo.

A continuación se revisan en detalle estos parámetros.

Potencial natural de la estructura que se protegerá. Es importante realizar esta medición de potencial de la tubería expuesta a procesos corrosivos, por ser de utilidad básica en el estudio de los recursos de defensa. Puede obtenerse fácilmente, estableciendo la diferencia de potencial existente entre la tubería enterrada en un medio corrosivo y un electrodo de referencia apropiado.

El empleo del electrodo de referencia es necesario porque constituye por sí solo un potencial de media celda, tal como lo es el potencial de la celda estructura-suelo o, independientemente, el potencial de media celda entre el sistema de los ánodos y el suelo. Hay que tener presente que para medir la diferencia de potencial de éstos se requiere una celda completa, unión metálica y unión electrolítica. El electrodo de referencia que generalmente se utiliza es el de cobre/sulfato de cobre ($Cu/CuS0_4$).

Para realizar esta medición se emplea un voltímetro de alta resistencia interna (50.000 ohm/volt) con la finalidad de que la lectura no sea influenciada por la resistencia del circuito instalado. Puesto que los voltajes que se miden son negativos, lo que se hace es invertir la polaridad para obtener lecturas positivas en el voltímetro, entre la estructura que se desea probar y el terminal positivo al electrodo de referencia. Ver Fig. 1.3.



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P. Requena	24/10/94		ESCALA:
REVISO	Ing. Martínez			MATERIAL
COMPROBÓ	Ing. Martínez			
			MEDICIÓN DEL POTENCIAL NATURAL DE LA TUBERIA	Fig.1.3

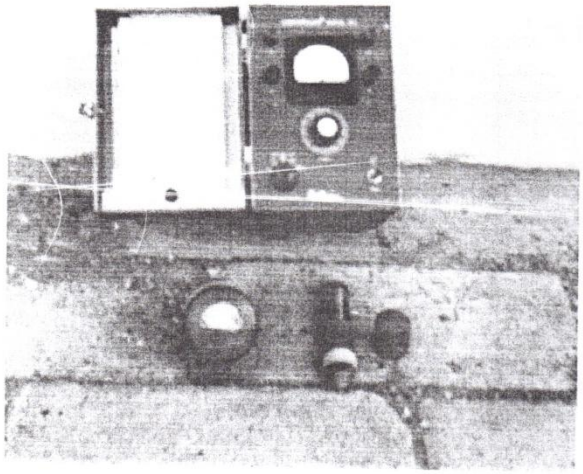


FIG. 1.4. Vibrogroud, electrodo cobre/sulfato de cobre y potenciómetro instrumentos usados para medir la resistividad del suelo (cortesía ESPOL)

El potencial natural es el valor obtenido de estas mediciones, cuando la estructura está originalmente sin protección catódica. Este potencial puede ser conocido para la mayoría de los metales, aunque su valor sea diferente de acuerdo al medio donde se lo tome. En la Tabla 8, se presenta la Serie Galvánica que sirve de referencia para conocer el potencial de media celda de distintos metales.

TABLA 8

SERIE GALVÁNICA

METAL	VOLTIOS
Magnesio puro comercial	- 1,75
Aleación de Mn (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	- 1,60
Zinc	- 1,10
Aluminio puro comercial	- 0,80
Aleación de Al (5% Zn)	- 1,05
Acero blando (limpio y brillante)	- 0,50 a - 0,80
Acero blando (oxidado)	- 0,20 a - 0,50
Hierro colado	- 0,50
Plomo	- 0,50
Acero blando en concreto	- 0,20
Cobre, latón, bronce	- 0,20
Hierro colado con silicio	- 0,20
Carbón, grafito, coke	+ 0,30

Potencial estructura-suelo. Si se aplica protección catódica a una estructura, es importante saber si dicha estructura quedará realmente protegida en toda su extensión.

Existen ciertos criterios para asumir que una estructura se encuentra sin riesgo de corrosión, basados en valores que han sido obtenidos con la experiencia profesional que se va desarrollando a través del tiempo.

Bajo estos criterios la estructura estará protegida contra la corrosión, cuando posea un valor de potencial menor o igual que el potencial máximo establecido.

Esto significa que la medición del potencial estructura-suelo se realiza cuando el sistema de protección catódica ya ha sido diseñado e instalado, de tal manera que se verifique el potencial máximo de protección. La tabla 9 presenta una guía del significado de las determinaciones de resistividad y la corrosividad del suelo.

TABLA 9

CORROSIVIDAD DEL SUELO VS. RESISTIVIDAD

RESISTIVIDAD	GRADO DE CORROSIÓN
Ohm/centímetro	**Descripción**
Debajo de 500	muy corrosivo
500 a 1.000	corrosivo
1.000 a 2.000	moderadamente corrosivo
2.000a 10.000	suavemente corrosivo
Más de 10.000	progresivamente menos corrosivo

Empleado el electrodo de $Cu/CuS0_4$, o el de Ag/AGCl, el potencial normal de la tubería enterrada y no protegida debe estar en el rango de –500 a –600 mV.

Resistividad eléctrica del suelo. La resistividad eléctrica es recíproca de la conductividad (capacidad para conducir la corriente eléctrica). Los alambres conductores poseen una resistividad perfectamente definida, por ser elementos homogéneos. En cambio, los conductores como el suelo y el agua poseen una resistividad difícil de conocer, dadas las condiciones de heterogeneidad de los mismos, por lo cual su resistividad depende de la concentración de sales y del contenido de humedad.

El grado de resistividad del medio es cuantificado, midiendo la capacidad de éste para conducir electricidad, usando para ello el método de Wenner.

Este método emplea cuatro electrodos de cobre, hincados en línea sobre el suelo, a distancias equidistantes para representar la profundidad del suelo. Los electrodos de los extremos, que se denominan electrodos de corriente C_1 y C_2, van conectados a una fuente de corriente continua que está en

serie con un amperímetro. Los dos electrodos interiores, que se denominan electrodos de tensión P_1 y P_2, se conectan a un voltímetro de alta resistencia interna. Ver Fig. 1.5.

Antes de cerrar el circuito, como primer paso se mide el potencial inicial que tienen los electrodos interiores. Luego se cierra el circuito. Entonces una corriente fluye a tierra desde los electrodos C_1 y C_2, creando un campo eléctrico en el medio y, consecuentemente, una diferencia de potencial entre los electrodos P_1 y P_2. Midiendo la intensidad de corriente y la caída de potencial originada por la misma, el valor de resistividad se lo obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P = 2\Pi a \, V/I$$

donde:

P = resistividad del suelo (Ohm-cm)

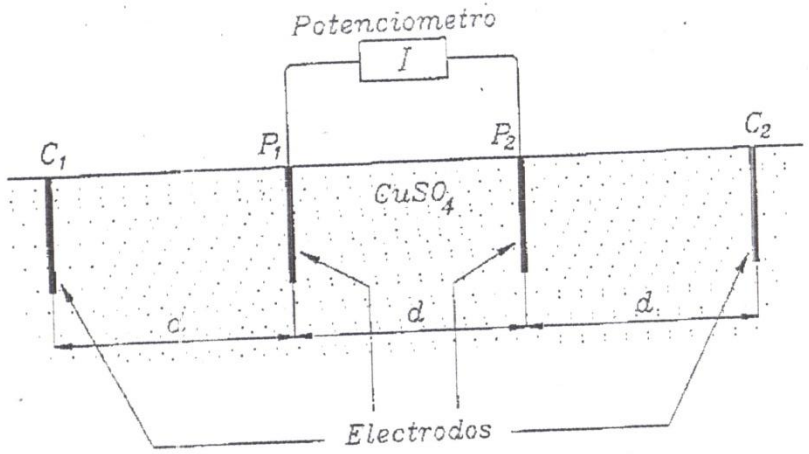
a = distancia entre electrodos (cm)

V = diferencia de potencial (V)

I = intensidad de corriente (A)

Π = valor de Pi (3.1416)

De acuerdo a los valores obtenidos de las mediciones de la resistividad del terreno, se establece el grado de corrosividad del suelo, tal como se indica en la Tabla 9.



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P. Requena	24/10/94		ESCALA:
REVISO	Ing. Martínez			MATERIAL
COMPROBÓ	Ing. Martínez			
			DIAGRAMA DEL CIRCUITO PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO	Fig.1.5

Técnicas y métodos de inspección

Para calcular y dimensionar un sistema de protección galvánica, se debe obtener información técnica respecto a la tubería que se va a proteger. Esta información se agrega a las mediciones obtenidas directamente en el campo o zona donde se realizará la instalación, que son datos fundamentales. La información más importante es la siguiente:

- Tipo del material de la tubería.
- Especificación de los revestimientos.
- Mapas y diseños de la instalación.
- Existencia de otros sistemas de protección cercanos.
- Presencia de fuentes de energía eléctrica en las proximidades.

Después de analizar esta información se realiza la medición directa en el campo, con los instrumentos apropiados de acuerdo a la situación.

1.3.3 Selección de material anódico

Los materiales utilizados para fabricar los ánodos son escogidos de acuerdo al valor del potencial que presentan en la

Serie Galvánica. Metales como magnesio, aluminio y zinc, están en la parte superior de la lista, por encima del hierro. Esta es la razón por la cual esos metales y sus aleaciones son útiles como ánodos galvánicos.

La decisión sobre el tipo de ánodo que se usará depende esencialmente del análisis técnico económico, dentro del cual está el costo anual de la protección realizada. Los ánodos que se encuentran en el mercado local varían en dimensiones según el fabricante, que tienen un tipo para cada aplicación específica. La selección del material de un ánodo está basada en sus características (potencial de ánodo abierto, capacidad de corriente, eficiencia del ánodo, etc..

Cualquier variación que se produzca en la composición de una aleación, cambiará estas características.

Entre los requerimientos para que un metal sea un buen material para ánodo galvánico, se tiene:

a) El potencial entre el ánodo y la tubería en proceso de corrosión debe ser suficientemente grande como para superar la propia pila ánodo / cátodo de la tubería.

b) El material del ánodo debe tener suficiente contenido de energía eléctrica como para asegurar la duración razonable de una cantidad práctica de material del ánodo.

c) El ánodo debe tener buena eficiencia, lo que significa que se tendría disponible un alto porcentaje del contenido de la energía eléctrica como una salida de corriente satisfactoria para la protección catódica.

d) Debido al limitado voltaje de impulsión, es preciso considerar la forma de los ánodos. Al tratarse de suelos de alta resistividad, se prefiere ánodos delgados y largos, que tienen menor resistencia que los ánodos cortos y gruesos.

e) La naturaleza del medio influye bastante en el comportamiento del ánodo. Así se tiene, por ejemplo, que los fosfatos, carbonatos y bicarbonatos pueden formar películas que tienden a pasivarlos, dejando de producir la cantidad útil de corriente. Los cloruros presentes en el electrolito tienden a incrementar la auto corrosión del magnesio, pues afectan su eficiencia en cuanto tiene que ver con su drenaje de corriente. El aluminio se ve

afectado por la conformación de una capa de hidróxido de aluminio en su superficie, lo que neutraliza la salida de corriente.

A continuación se detallan algunos aspectos que ayudan a seleccionar, de una mejor manera, el material del ánodo que se debe utilizar para un proyecto catódico en tuberías enterradas:

- El ánodo de aluminio, que posee buenas propiedades electroquímicas, tiene un uso que sólo se recomienda para sistemas en que el electrolito es totalmente líquido, sobre todo si es agua de mar. No son recomendados para protección de estructuras o tuberías enterradas, debido a los fenómenos químicos que ocurren en su superficie.
- Los ánodos de zinc, que son más conocidos y probados que los de aluminio, se usan para la protección de estructuras marítimas, aunque también pueden proteger tuberías o estructuras enterradas en suelos de baja resistividad (de hasta 1.000 ohm-cm) en virtud de su bajo potencial.
- Los ánodos de magnesio, con respecto a los de zinc, tienen mayor capacidad de corriente por kilogramo de masa consumida. Este tipo de ánodos tiene un potencial más

final, o la mejor respuesta al problema de la corriente que es necesaria para alcanzar la atención.

La NACE (National Association of Corrosion Engineers - Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión), establece que un voltaje negativo catódico de por lo menos 0,85 V, medido entre la tubería y un electrodo de referencia de Cu/CuS04 saturado, contactando el electrolito, es un criterio aconsejable y recomendado. Este criterio es válido solamente si la estructura entera es de hierro o de acero, y que no hay presencia de un área más activa a dicho valor.

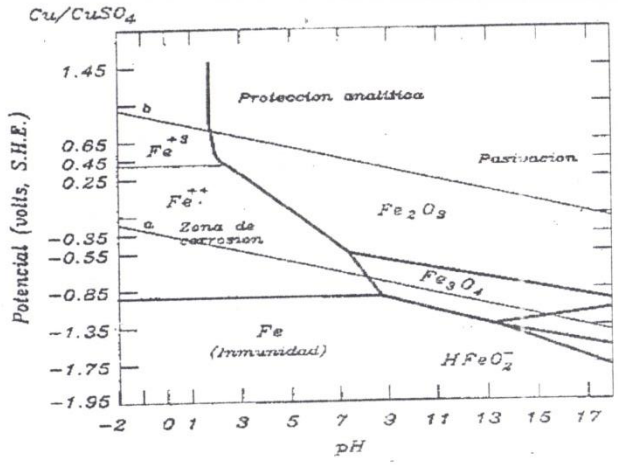
Otro criterio, también establecido por la NACE, se refiere al cambio de voltaje mínimo negativo (catódico) de 300 mV, producido por la aplicación de la corriente protectora. El cambio de voltaje es medido entre la superficie de la tubería y un electrodo de referencia como el $Cu/CuS0_4$ saturado, en contacto con el electrolito. Este criterio se aplica a tuberías o estructuras que no estén en contacto con metales disímiles.

Todos los criterios indicados tienen sus limitaciones y pueden llevar a suposiciones erróneas. Cuando se hace el análisis definitivo se recurre a la experiencia y a la inventiva del

ingeniero para establecer el criterio válido para la aplicación particular con la cual se trabaja. Ver Fig. 1.6.

1.3.5. Criterio de ubicación

Se trata de establecer una protección acorde con la longitud de la tubería, por lo cual es necesario definir los puntos de difusión de corriente hacia la misma. Esto significa que la ubicación de los lechos anódicos dependerá no sólo de la capacidad del electrolito en conducir la corriente, sino también de las facilidades físicas y topográficas del medio. Esto implica que los ánodos no siempre se ubicarán cercanos a la estructura.



	NOMBRE	FECHA
DIBUJO	P. Requena	24/10/94
REVISO	Ing. Martinez	
COMPROBÓ	Ing. Martinez	

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPOL

ESCALA:

MATERIAL

DIAGRAMA POURBAIX PARA EL HIERRO

Fig. 1.5.

CAPITULO 2

2. DISEÑO DE LA PROTECCION CONTRA LA CORROSIÓN EN TUBERÍAS PARA COMBUSTIBLE

2.1 Condiciones del medio

Los terrenos por donde corren las dos tuberías corresponden, en general, a la clasificación de pantanos de manglar. Por esta razón, tanto los tramos aéreos como los enterrados se ven afectados por esta condición ambiental.

2.1.1 Tuberías aéreas

Estos tramos comprenden el 85% de la instalación entre el terminal de desembarco y la estación de almacenamiento. Las tuberías están colocadas sobre soportes de hormigón, a una altura de 0,20 m del suelo. Son afectadas por las lluvias, el sol y la brisa salina del Estero Salado. Figs. 2.1 y 2.2.

2.1.2 Tuberías enterradas

Estos tramos están afectados por la clase natural del suelo y el material pétreo utilizado como relleno.

Como consecuencia, la capa inferior es húmeda y está sujeta a la influencia de las mareas y los de aguajes del estero cercano

FIGURA 2.1. Vista de tramo aéreo de tuberías ϕ14" y 8" del Salitral hacia Tres Bocas

FIGURA 2.2. Vista de tramos aéreos de muelle de descarga hacia estación de bombeo

FIGURA 2.3. Tubería recubierta con pintura afectada por diferentes capas de terreno.

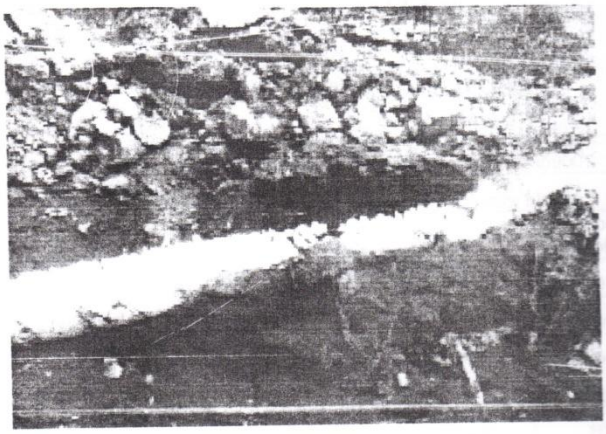


FIGURA 2.4. Tubería recubierta con cinta adhesivas afectada por diferentes capas de terreno.

Esta condición de humedad permanente, sumada a la composición química de los suelos, con alto porcentaje de cloruros y sulfatos reductores, entre otros, crea un medio altamente corrosivo para los metales que entren en contacto con él. Fig. N° 2.3 y 2.4.

2.2 Aplicación de recubrimientos

En los cuadros de la página siguiente se describen en forma resumida los procesos de recubrimiento a los que fueron sometidas las tuberías, tanto en los tramos aéreos como en los enterrados (ver cuadros de las Tablas 10 y 11.

TABLA 10

TRAMOS AÉREOS

PREPARACION DE SUPERFICIE	Código sueco SIS-055900	
	Grado Sa-2.5 casi blanco	
CAPA PRIMARIA	TIPO	Epóxica con poliamida
	ESPESOR	50 micras
	APLICACION	Airlass spray
	COLOR	amarillo
CAPA FINAL	TIPO	Epóxica
	ESPESOR	100 micras
	APLICACION	a mano
	COLOR	Blanco

TABLA 11

TRAMOS ENTERRADOS

PREPARACION DE SUPERFICIE	Código sueco SIS-055900	
	Grado Sa-2.5 casi blanco	
PINTURA		
CAPA PRIMARIA	TIPO	Epóxica con poliamida
	ESPESOR	50 micras
	APLICACION	Airlass spray
	COLOR	amarillo
CINTAS		
CAPA PRIMARIA	TIPO	Polietileno
	ESPESOR	20 ml/pulg
	TRASLAPE	50%
	PRIMER	----------
	COLOR	negro
CAPA FINAL	TIPO	Polietileno
	ESPESOR	100 micras
	TRASLAPE	50%
	APLICACION	a mano
	COLOR	blanco

2.3 Mediciones preliminares y requerimientos de corriente

2.3.1 Potencial natural y tramos a proteger

La inspección de los lugares correspondientes a los tramos enterrados y la medición del potencial natural, dio como resultado valores entre 300 y 350 milivoltios.

Los tramos a proteger y su ubicación se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 12

UBICACIÓN Y LONGITUD DE TRAMOS A PROTEGER

TRAMO N°	ABSISA (km)	LONGITUD (m)	AREA (m2)
1	4 + 380 a 4 + 440	60	38,30
2	0 + 440 a 0 + 600	160	102,14
3	0 + 000 a 0 + 070	70	44,69
4	4 + 160 a 4 + 190	30	33,51
5	4 + 000 a 4 + 100	100	111,72
6	0 + 440 a 0 + 600	160	178,74
7	0 + 000 a 0 + 060	60	67,03
8		20	12,77

2.3.2 Resistividad del suelo

La densidad de corriente que se usará en la protección es un factor importante, dadas las condiciones que existen en el medio. De allí que se ha calculado en primer lugar la resistividad eléctrica del suelo en contacto con la tubería que, por consistir principalmente de material pétreo compactado, tiene una resistividad bastante variada, debido a las capas subyacentes constituidas por pantanos, las que ejercen influencia en los resultados.

Las mediciones de resistividad realizadas en el suelo, a profundidades de enterramiento de tubería sobre y bajo de ella, permite establecer una resistividad eléctrica promedio de 4.000 ohm-cm.

2.4 Corriente necesaria para la protección catódica

Para realizar la protección catódica de estructuras enterradas, se requiere de un valor de corriente que depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Área a proteger y condiciones del recubrimiento.
- Resistividad eléctrica del suelo.
- Polarización geométrica de la estructura.

La corriente para la protección de una determinada estructura, independientemente del tipo de sistema que se vaya a utilizar para su protección, puede ser calculada en función de la siguiente información:

- Área de la estructura (A); obtenida a partir de la forma geométrica de la estructura, considerándose solamente el área que estará en contacto con el electrolito.
- Densidad de corriente (D_C); obtenida en función de la resistividad eléctrica del electrolito, con referencia a la estructura sin revestimiento. Se la obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$D_C = 13{,}35 * (\text{Log}_{10} \text{ Exp } 5{,}52/P)$$

También puede ser determinada a partir del grafico N° 1. *Ver apéndice.*

- Eficiencia del recubrimiento E; obtenida a partir de la tabla 13. Una estructura recubierta necesitará menor protección que otra que no lo tiene.
- Factor de velocidad de corrosión F; coeficiente adoptado cuando existe movimiento relativo entre estructura y electrolito.
- Resistividad (4.000 ohm.cm.)

TABLA 13

EFICIENCIA DE RECUBRIMIENTO APLICADO EN ESTRUCTURAS

ESTRUCTURA	CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO	EFICIENCIA	
		Inicial (%)	Final (%)
OLEODUCTOS	Excelente	95	90
	Bueno	90	80
	Regular	80	50
	Malo	50	--
FONDO DE TANQUES (EXTERIOR)	Bueno	80	60
	Regular	60	40
	Malo	40	--
FONDO DE TANQUES (INT)	Excelente	95	90
EMBARCACIONES	Excelente	95	90
	Bueno	90	80
	Regular	80	50
	Malo	50	--

La corriente total necesaria para realizar la protección está dada por la siguiente fórmula:

$$I = A*Dc*(1-E) * F$$

Para este trabajo, los valores considerados fueron los siguientes:

$D_C = 25\ mA/m^2$

$E = 0.5$

para los tramos 2 y 6 en la zona de la Vía Perimetral, debido al proceso de compactación que sufre el área, lo que genera altos esfuerzos de compresión que inciden sobre la tubería y que pueden deteriorar el recubrimiento.

$$E = 0.7$$

para los demás tramos y

$$F = 1$$

por no existir movimiento relativo entre la tubería y el electrolito.

La Tabla 14, a continuación, muestra los valores obtenidos.

TABLA 14

RESULTADO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE

TRAMO	AREA m^2	INTENSIDAD DE CORRIENTE mAmp
1	38,30	287
2	102,14	1,276
3	44,69	335
4	33,51	251
5	111,72	837
6	178,74	2,234
7	67,03	503
8	12,77	96

2.5 Selección del ánodo y método de ubicación

Las características del ánodo seleccionado son:

Tipo	:	"Galvomag D3"
Peso	:	17 libras
Dimensiones	:	6,5 por 29 pulgadas
Eficiencia	:	55%
Resistividad del relleno	:	250ohm-cm

La ubicación de los ánodos, en los diversos tramos, está supeditada a la condición de que prácticamente solo se puede instalar al borde de la carretera existente, ya que, con el fin de lograr una apropiada distribución de corriente, su distancia al eje de la tubería no debería ser menor de 3 metros.

Así mismo, en la zona de la Vía Perimetral, las condiciones creadas por el cruce de la carretera que soporta la tubería con esta vía, que tiene un ancho mayor a los 160 metros, afectan la disposición, así como la efectividad y eficiencia de los lechos de ánodos, cuya ubicación está limitada a los dos extremos del cruce.

Los ánodos, en general, serán instalados en forma horizontal, a una profundidad igual o mayor a la que están instaladas las tuberías, se debe tener cuidado para que el recubrimiento (backfill) rodee completamente el ánodo y no queden espacios vacíos.

La razón de escoger la forma horizontal en lugar de la vertical es que, al ser instalados verticalmente, los ánodos estarían participando de dos capas diferentes de subsuelo.

2.6 Cálculos

2.6.1 Cálculo de la masa anódica

Para calcular la masa anódica se usa la siguiente fórmula:

$$M = 8.760 * T * I/0,85C$$

donde:

M	=	masa total de ánodos, en kg
T	=	tiempo de vida del sistema, en años
I	=	corriente necesaria para la protección, en amperios
C	=	capacidad de corriente del ánodo, en Amp-hr/kg
0,85	=	factor de utilización del ánodo (constante)
8.760	=	número de horas al año (constante)

2.6.2 Cálculo del número de ánodos

El número de ánodos viene dado por la fórmula:

$$N = M/m$$

donde:

n = número de ánodos

M = masa total de ánodos, en kg

m = masa del ánodo, en kg

La tabla 15 contiene los datos acerca de M y n, calculados en base a las fórmulas y los parámetros utilizados.

TABLA 15

RESULTADO DEL CÁLCULO DE MASA TOTAL Y NÚMERO DE ÁNODOS

TRAMO	I amp	T a	C amp-hr/kg	constante	m kg	M kg	n	horas
1	0,287	10	1100	0,85	7,72	26,90	4	8760
2	1.277	10	1100	0,85	7,72	119,62	16	8760
3	0,335	10	1100	0,85	7,72	31,40	5	8760
4	0,251	10	1100	0,85	7,72	23,55	4	8760
5	0,834	10	1100	0,85	7,72	78,50	11	8760
6	2.234	10	1100	0,85	7,72	209,33	28	8760
7	0,503	10	1100	0,85	7,72	47,10	7	8760
8	0,096	10	1100	0,85	7,72	8,97	2	8760

2.6.3 Cálculo de resistencias para ánodos

La fórmula a utilizar es de H.B. Dulight

$$Rh = \frac{0.0052\ P}{L}\left[2{,}303 \log_{10} \frac{4L}{d} + 2.303 \log_{10} \frac{L}{h} + \frac{2h}{L} - 2\right]$$

donde:

L = longitud del ánodo

h = profundidad de la tubería al ánodo.

d = diámetro del ánodo

P = resistividad del suelo

La resistencia total para la cama o lecho de ánodos viene dada por:

$$Rth = Rh * f$$

siendo: $Rh = Rh_1 + Rh_2 - Rh_3$

donde:

Rh_1 = resistencia suelo-ánodo con dimensiones de zanja.

Rh_2 = resistencia suelo-ánodo con dimensiones del Backfill.

Rh_3 = resistencia Backfil-ánodo con dimensiones del ánodo.

f = factor de ajuste.

La tabla 16, que se presenta a continuación, contiene los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de las resistencias.

TABLA 16

VALORES PARA EL CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS

P ohm-cm	L cm	S cm	d cm
4.000	1,39	0,50	0,61
4.000	0,73	0,165	0,61
250	0,64	0,063	0,61

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla XVII a continuación.

TABLA 17

RESULTADO DEL CÁLCULO DE RESISTENCIA

TRAMO	n	f	Rh1	Rh2 /cm	Rh3 /cm	Rth ohm
1	4	0.385	1.19	29.60	3.00	27.79
2	16	0.144	0.40	11.00	0.80	10.6
3	5	0.333	1.00	25.60	2.00	24
4	4	0.520	1.6	39.9	4.16	37.34
5	11	0.192	0.59	14.70	1.10	14.19
6	28	0.094	0.29	0.20	0.01	0.48
7	7	0.265	0.82	0.60	0.04	1.38
8	2	0.576	1.70	1.30	0.10	2.9

Para comprobar que el sistema opera en condiciones normales, se debe cumplir con la siguiente relación:

$$R' \leq R$$

siendo:

R = resistencia teórica

R' = resistencia del circuito.

La resistencia teórica R viene dada por la fórmula:

$$R = (E_o - E_{e-s})/It$$

donde:

E_o = potencial del ánodo en circuito, en voltios.

E_{e-s} = potencial estructura-suelo, en voltios.

I_t = corriente teórica de protección, en amperios.

La resistencia del circuito (R'), se la obtiene a partir de:

$$R' = Rh_1 + Rh_2 + Rh_3$$

CAPÍTULO 3

3. INSTALACION DEL SISTEMA

3.1 Materiales y elementos complementarios

3.1.1 Conductores eléctricos

Los cables o conductores eléctricos deben poseer una resistencia eléctrica pequeña, debido a las tensiones bajas de los sistemas galvánicos. El revestimiento de los cables debe ser de buena calidad por las condiciones de trabajo a que estarán expuestos, ya que al sufrir deterioro se produce absorción de humedad, lo que causa oxidación y aumenta la resistencia del circuito.

En la tabla 18 se presentan los tres tipos de cables empleados en el trabajo.

TABLA 18

TIPOS DE CABLES

TIPO AWG	Tmax A	R ohm-cm	COLOR
12	20	5,34	ROJO
8	45	2,10	BLANCO
6	65	1,34	AZUL

El cable tipo AWG-12 se lo empleó en la conexión de la tubería con un terminal de los postes de prueba.

El tipo AWG-6 sirvió como puente entre la tubería y el terminal del poste de prueba. Figs. N° 3.1 y 3.2.

3.1.2 Conexiones eléctricas

Es importante mantener una perfecta continuidad del circuito. Para ello, las uniones o conexiones de los conductores entre sí y con la tubería deben ser muy firmes y seguras. Para ello se emplea soldadura y conectores a presión, sean éstos manguitos metálicos o pernos hendidos.

Para la unión entre cable y tubería se empleó soldadura de aluminio térmica, del tipo Cadweld, y se utilizaron pernos hendidos entre los cables. Luego de ello se realizó el respectivo aislamiento empleando cinta auto-vulcanizada y masilla epóxica.

La Fig. N° 3.3 muestra la conexión entre cable y tubería.

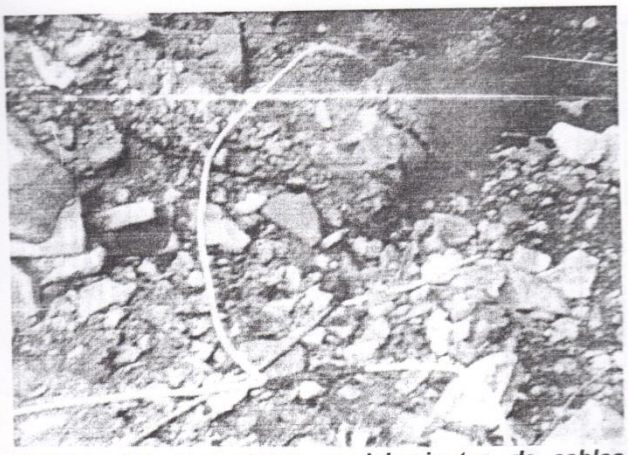
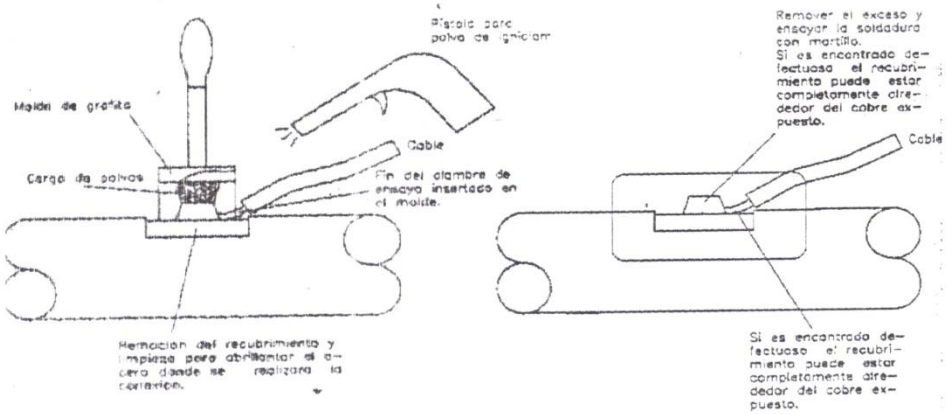


FIGURA 3.1. Conexiones y aislamientos de cables antes de ser cubiertos con material pétreo.

FIGURA 3.2. Disposición de los cables en un poste de prueba



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P. REQUENA	24/10/94		
REVISO	Ing. Martínez			ESCALA
COMPROBO	Ing. Martínez			MATERIAL
			CONEXIÓN DE CABLES A LA TUBERÍA UTILIZANDO EL MÉTODO AUTO VULCANIZADO	Fig. 3.3

3.1.3 Juntas aislantes

Son dispositivos usados para aislar eléctricamente cortos tramos de las tuberías, que están formados por bridas, cartuchos para pernos y arandelas. Este conjunto se lo monta entre las bridas metálicas.

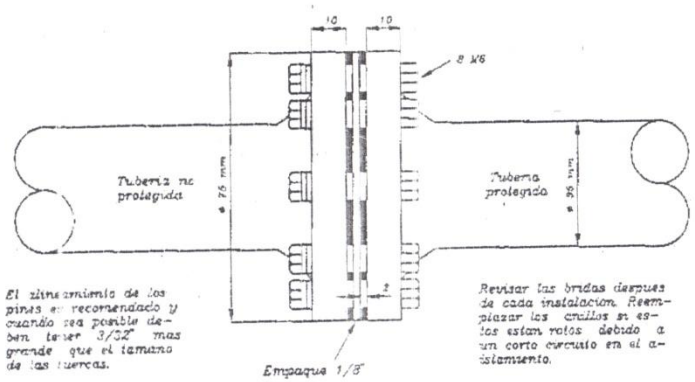
Se consiguen resultados como los siguientes:

- Aislamiento eléctrico de la tubería que se encuentra protegida galvánicamente, de otra que no tiene.
- Evita que la corriente atraviese los tramos aislados y, con ello, se puede tratar cada tramo en forma independiente de otro.

La Fig. 3.4. muestra estos dispositivos y su colocación entre bridas.

3.1.4 Postes de pruebas

Los postes de prueba están construidos con tubos de PVC rígido o de hierro galvanizado, con una placa aislante en su superficie, donde van ubicados los bornes de conexión de los cables y de los instrumentos de medición.



El alineamiento de los pines es recomendado y cuando sea posible deben tener 3/32" mas grande que el tamaño de las tuercas.

Revisar las bridas despues de cada instalacion. Reemplazar los anillos si estos estan rotos debido a un corto circuito en el aislamiento.

	NOMBRE	FECHA
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94
REVISO	Ing.Martinez	
COMPROBO	Ing.Martinez	

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPOL

ESCALA

MATERIAL

AISLAMIENTO DE BRIDAS Y PERNOS

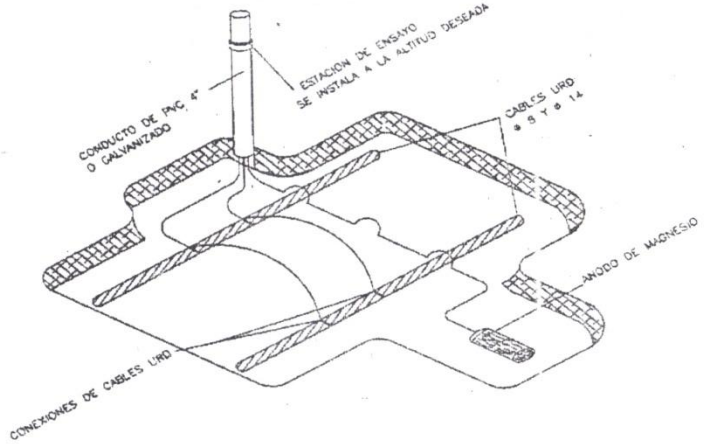
Fig. 3.4

Se los utiliza en las instalaciones de tuberías enterradas con protección galvánica, para realizar y facilitar operaciones tales como:

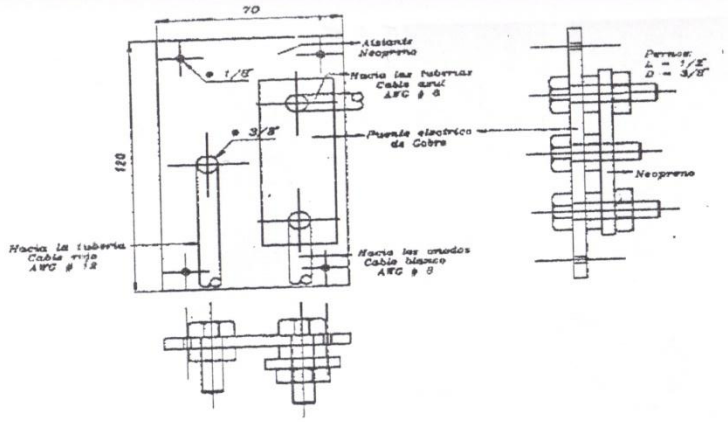
- Interligar dos tuberías que están siendo protegidas, así como también desconectar una de ellas.
- Medir la corriente drenada por camas de ánodos.
- Introducir una resistencia en el circuito para reducir la corriente producida en el lecho.
- Además, por medio de estas conexiones se puede incrementar el potencial de los ánodos, instalando baterías en serie con la cama de ánodos.

Para este caso se prefabricó el poste con una tubería de 4" de diámetro. En su parte inferior se colocó una base de hormigón y, en la superior, la placa aislante con los bornes para las pruebas y mediciones, protegida por un gorro metálico.

La Fig. N° 3.5 y 3.6 muestra la forma de instalación y conexión. La Fig. N°. 3.7. muestra la disposición de un potenciómetro – electrodo de referencias conectado a terminales del poste de prueba. La Fig. 3.8. muestra la comprobación del potencial en un poste de prueba.



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94		
REVISO	Ing.Martinez			ESCALA
COMPROBÓ	Ing.Martinez		REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA CONEXIÓN ELÉCTRICA	MATERIAL
				Fig. 3.5



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94		
REVISO	Ing.Martínez			ESCALA
COMPROBÓ	Ing.Martínez			MATERIAL
			DETALLE INTERIOR DEL POSTE POTENCIOMÉTRICO	Fig. 3.6

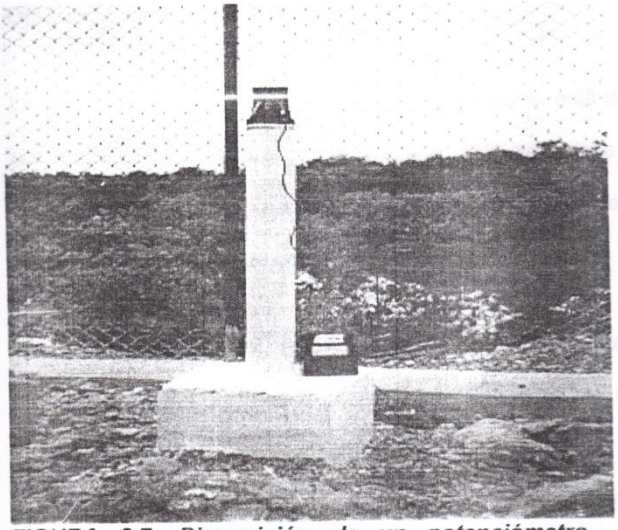


FIGURA 3.7. Disposición de un potenciómetro – electrodo de referencia conectado a terminales del poste de prueba (potencial del ánodo abierto)

FIGURA 3.8. Comprobación de potencial en un poste de prueba.

3.2 Detalles prácticos de la instalación

La ubicación de los ánodos, en los diversos tramos, está determinada por la condición de que, en la práctica, sólo se puede realizar la instalación al borde de la carretera existente, con el fin de lograr una apropiada distribución de corriente.

Los ánodos, en general, están instalados en forma horizontal, a una profundidad igual o mayor a la que están instaladas las tuberías. La razón para escoger la forma horizontal en lugar de la vertical, es porque los ánodos estarían participando de dos capas diferentes del subsuelo: la que está rellena con material pétreo y la que corresponde al pantano, lo que daría lugar a un desgaste no uniforme del ánodo, debido a la entrega de cantidades diferentes de corriente provenientes de las dos secciones del ánodo.

Mediante una retroexcavadora se abrieron zanjas en los sitios señalados y se colocó una capa de arena de río para proteger los paquetes de ánodos en su parte inferior. De igual manera se realizaron las conexiones de cables, de acuerdo al método descrito anteriormente. Terminado esto, y dejando puntas de cables de longitud apropiada, se colocó otra capa de arena alrededor de los ánodos y luego se cubrieron las zanjas con material pétreo.

Los postes de prueba se colocaron después, con las respectivas conexiones eléctricas.

3.3 Instalación de camas o lechos

A continuación y con ayuda de figuras y planos se describe la ubicación de los ánodos y los tramos protegidos con el sistema galvánico, con breves detalles que se tomaron en cuenta.

Tramo 1

Para el primer tramo, la Fig. N° 3.9 y plano 1 corresponde a la tubería de 8 pulgadas de diámetro. Para esta tubería se abrió una zanja común para la colocación de los ánodos, a una profundidad de 1,5 metros, en forma paralela a la tubería, a 3 metros de distancia. El poste de prueba está a 7,7 metros del enterramiento.

Tramos 2 y 6

El segundo tramo se representa en las Fig. N° 3.10 y 3.11 y el plano 2. Aquí están ubicadas las camas para las tuberías de 8 y 14 pulgadas, en el cruce de la Vía Perimetral. Como se observa, la posición de las camas es paralela de la vía, a 3 metros de distancia, pero no a la tubería, que está con una inclinación de 22 grados respecto a ella.

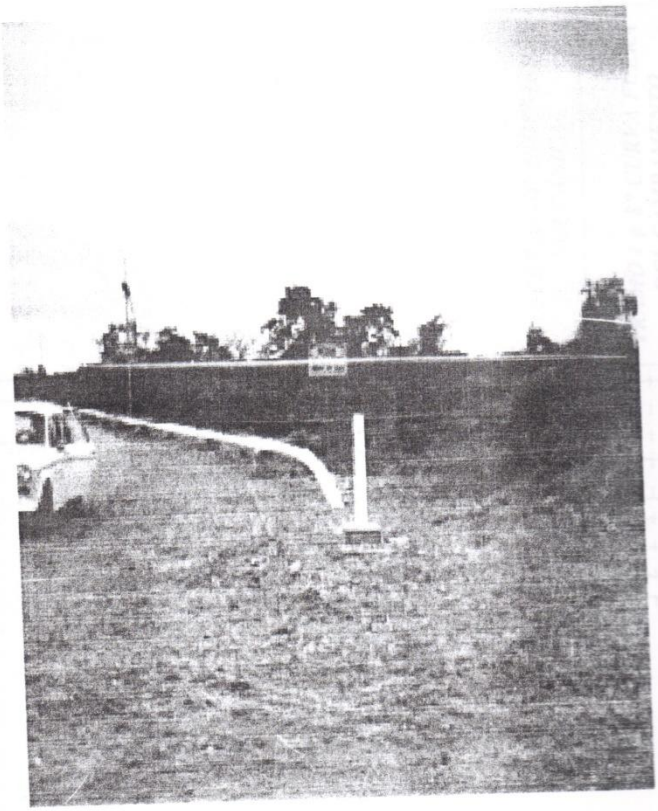
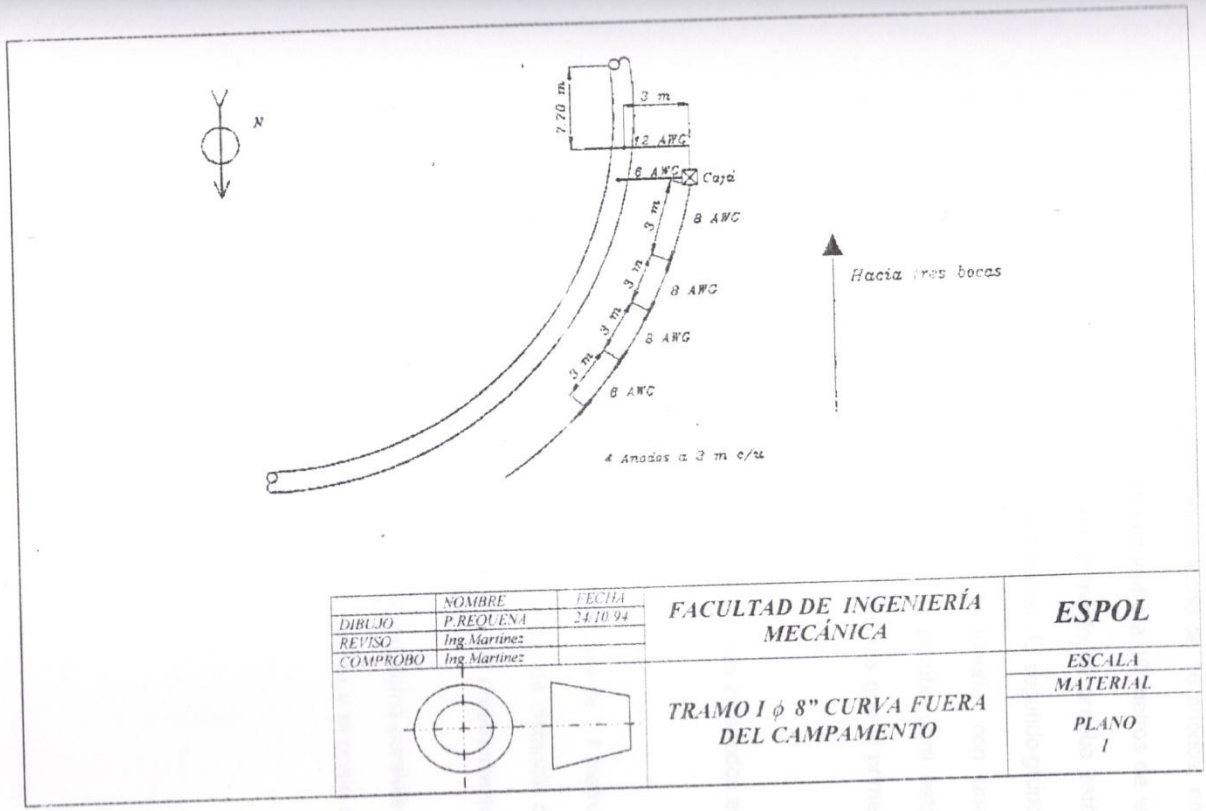


FIGURA 3.9. Enterramiento y poste de prueba de tubería de 8" de diámetro hacia estación de L.P.G. Salitral.



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94		
REVISO	Ing.Martinez			ESCALA
COMPROBO	Ing.Martinez			MATERIAL
			TRAMO I ϕ 8" CURVA FUERA DEL CAMPAMENTO	PLANO 1

La tubería para LPG está protegida con un lecho de 16 ánodos, en posición horizontal. El primer ánodo se encuentra a 10 metros de la tubería, y los otros a 4 metros cada uno. El poste de prueba está colocado a 25,5 metros del inicio del enterramiento. El segundo grupo está ubicado a 3 metros de distancia de la tubería, con una separación de 3 metros entre sí. El poste de prueba para esta posición esta a 3.5 metros del enterramiento, mientras que el primer ánodo está a 3 metros de la tubería.

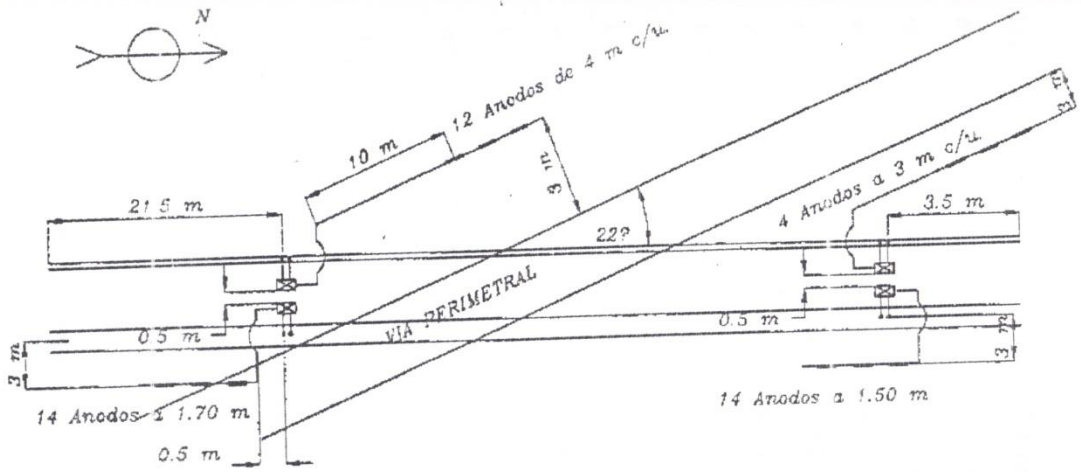
Para la tubería de 14 pulgadas de diámetro se utilizaron 28 ánodos en dos grupos.

El primero, de 14 ánodos, esta colocado con distancias de 1.7 metros entre sí, en forma paralela a la tubería y a 3 metros de distancia de ella. El poste de prueba se encuentra a 21.5 metros del enterramiento.

El segundo grupo está a 3 metros de la tubería, en forma paralela a ella. La separación entre los ánodos es de 1.5 metros y el poste de prueba está a 3.5 metros de enterramiento.

FIGURA 3.10.Entrada de tubería enterrados en el cruce de la vía Perimetral desde el Salitral.

FIGURA 3.11. Salida de enterramiento de tuberías en el cruce de vía perimetral hacia estación de bombeo Tres Bocas.



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94		
REVISO	Ing.Martínez			ESCALA
COMPROBÓ	Ing.Martínez			MATERIAL
			TRAMO II y VI ϕ 8" y ϕ 14" CRUCE PERIMETRAL	PLANO 2

Tramos 3 y 7

Las Fig. N° 3.12 y 3.13 y el plano 3 presenta la ubicación de los ánodos para las tuberías de 8 y 14 pulgadas, en el cruce con el carretero hacia la estación de bombeo. Para la tubería de 8 pulgadas, se colocaron 5 ánodos. Tres de ellos en zanja común, paralelos a ella y a 3 metros de distancia, separados entre sí cada 3 metros. Los otros 2 se ubicaron en zanjas independientes, a 3 metros de distancia y en forma horizontal.

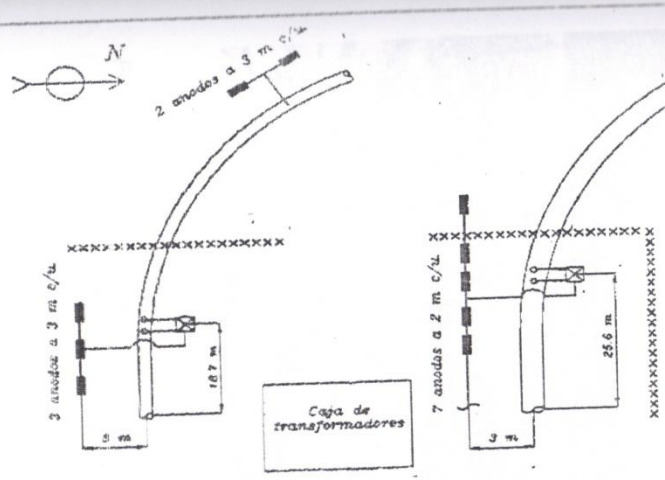
La tubería de 14 pulgadas está protegida por 7 ánodos, 5 de ellos en zanja común, con 2 metros de separación entre ellos, y los otros 2 en forma independiente, por la dificultad del terreno y el cerramiento del área del campamento.

Tramo 4

Este tramo, localizado dentro del campamento, se presenta en la Fig. N° 3.14 y el plano 4, en la que está localizada solamente la tubería de 14 pulgadas de diámetro. La protección tiene tres ánodos, con 2 metros de separación entre sí, dos de ellos en una sola cama y el otro en forma independiente, perpendicular a la dirección de la curvatura de la tubería.

FIGURA 3.12. Enterramiento de tubería de 14" en el área de la Estación de Bombeo Tres Bocas

FIGURA 3.13. Enterramiento de tubería de 8" en área de la Estación de Bombeo Tres Bocas.



	NOMBRE	FECHA
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94
REVISO	Ing.Martinez	
COMPROBO	Ing.Martinez	

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPOL

ESCALA

MATERIAL

TRAMO III y VII ϕ 8" y ϕ 14"
TRES BOCAS

PLANO 3

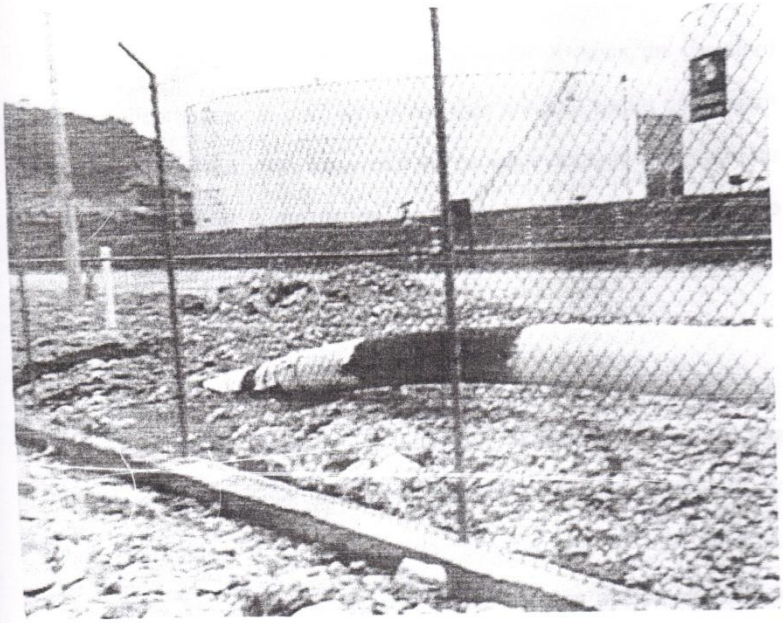


FIGURA 3.14. Enterramiento de tubería de 14" dentro del área del Salitral hacia los tanques de almacenamiento

Tramo 5

La Fig. N° 3.15, 3.16 y plano 5 corresponde al cruce del carretero hacia el campamento y allí se utilizan seis ánodos, cuatro de ellos en una zanja común y los otros dos en zanjas independientes, uno de ellos separado a 9 metros de los otros. La posición del poste de prueba está a 15,8 metros del enterramiento.

Tramo 8

Comprende la bifurcación de la tubería aérea de 14 pulgadas con una de 8 pulgadas, enterrada, que atraviesa el camino carretero en dirección hacia los tanques de almacenamiento de INECEL. Asimismo, se utilizaron dos ánodos, ubicados en ambos lados de la tubería y en dirección paralela a ella. Plano 6.

3.4 Ficha técnica de inspección

Se realizaron las mediciones en el campo, en los terminales de los postes de prueba y se obtuvieron los siguientes resultados.

TABLA 19

MEDICIONES DE LECTURAS DEL POTENCIAL DE PROTECCIÓN

TRAMO	DIAMETRO pulgadas	POTENCIAL mV	GRAFICO N°	UBICACION
1	8	590	1	Intersección hacia lado norte
2	8	730	2	Vía perimetral lado norte
2	14	711	2	Vía Perimentral, lado norte
3	8	682	3	Campamento Tres Bocas
4	14	630	4	El Salitral (interior del campamento)
5	14	658	5	El Salitral (entrada al campamento)
6	8	744	2	Vía Perimentral , lado sur
6	14	735	2	Vía Perimetral lado sur
7	14	699	3	Campamento Tres Bocas
8	8	677	6	Cruce a Inecel

Producto: LPG Fuel-Oil

Diámetro: 8" 14"

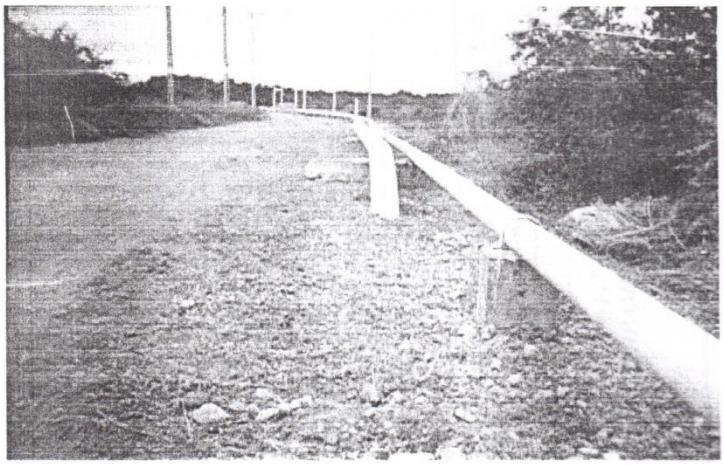


FIGURA 3.15. Entrada de enterramiento de tubería de 14 hacia el campamento del Salitral – Cruce de vía.

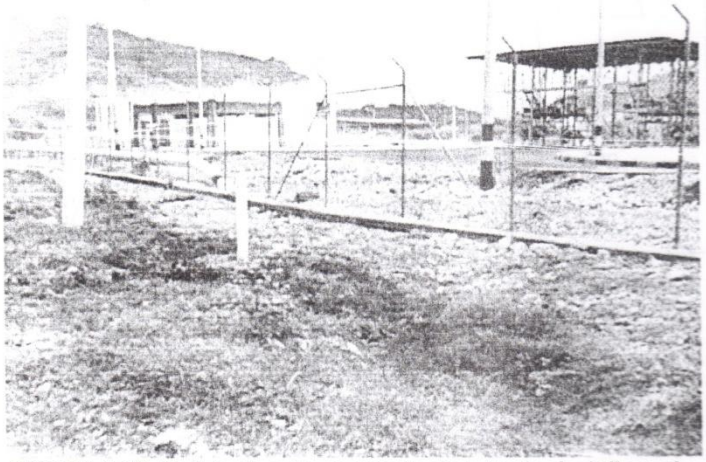
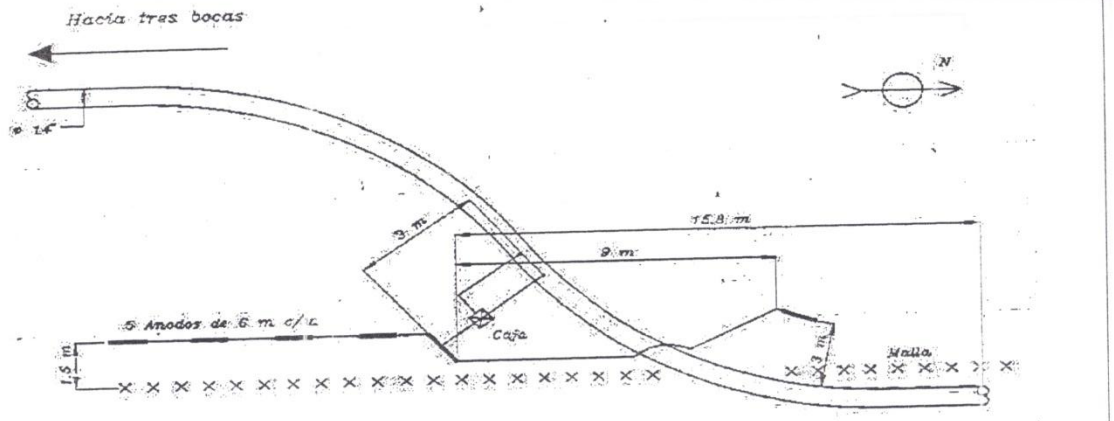
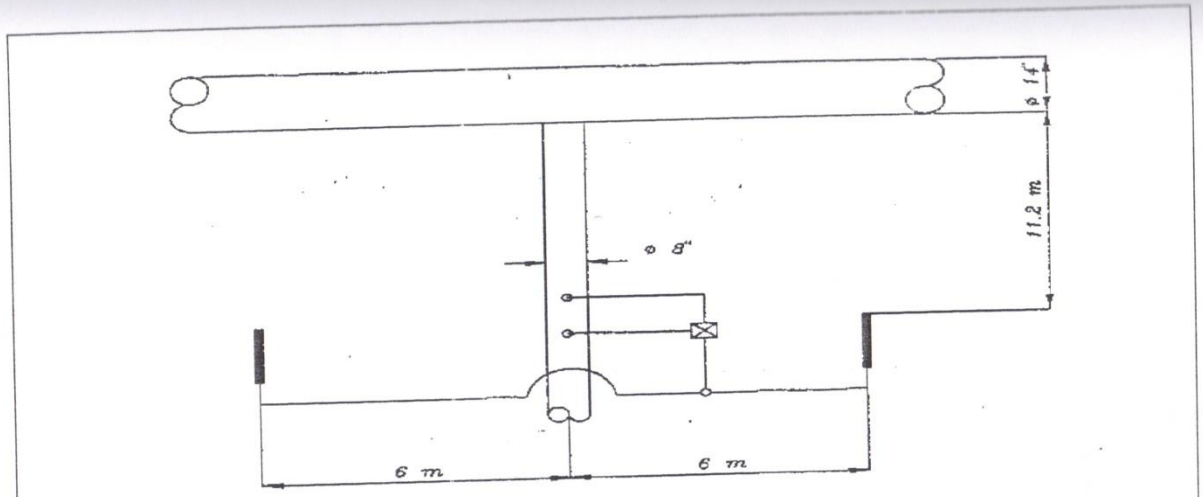


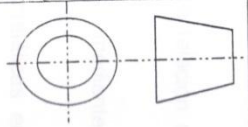
FIGURA 3.16. Salida de enterramiento de tubería de 14" en el campo del Salitral.



	NOMBRE	FECHA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94		
REVISO	Ing.Martinez			ESCALA
COMPROBO	Ing.Martinez			MATERIAL
			TRAMO V ϕ 14" MALLA - CAMPAMENTO	PLANO 5



	NOMBRE	FECHA
DIBUJO	P.REQUENA	24/10/94
REVISO	Ing.Martinez	
COMPROBÓ	Ing.Martinez	



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRAMO VIII ϕ 8"
CRUCE INECEL

ESPOL

ESCALA

MATERIAL

HOJA
021

3.5 Proceso de mantenimiento

Se debe establecer un programa de mantenimiento para hacer posibles los ajustes necesarios y conservar el sistema de protección durante su vida útil. Una interrupción del sistema no provoca perjuicios violentos a corto plazo, como el "lucro cesante", por ejemplo, lo cual ocurrirá si las interrupciones fueran constantes a medio y largo plazo.

Dentro del programa de mantenimiento se establecen los siguientes puntos, que deben ser atendidos con prioridad:

- Lecturas del potencial estructura-suelo, con relación a la media celda de $Cu/CuS0_4$.
- Verificación del aislamiento entre bridas, mediante la eficiencia de las juntas aislantes.
- Verificación del potencial de estructuras metálicas enterradas, que no son parte del sistema de tuberías protegidas.
- Verificación de los drenajes de corriente y la resistencia de cada ánodo o grupo de ánodos instalados.
- Limpieza y cambio de los terminales eléctricos de los postes de prueba, cuando estén sulfatados.
- Limpieza y lubricación de los gorros metálicos de los postes de prueba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La corrosión definida como el deterioro de un material metálico por acción química, electroquímica o un medio ambiente con esfuerzos metálicos puede ser anulada, bloqueada o controlada con recubrimientos a base de pinturas, cintas adhesivas y procesos galvánicos.

En este proyecto se han utilizado las tres formas, para los tramos aéreos en general y tanques de almacenamiento se emplea el recubrimiento a base de pintura, utilizando colores de acuerdo a las normas de la seguridad industrial con el fin de identificar el producto que transportan las líneas y las válvulas.

Para tramos de tuberías secundarias y que no sufren mayor asentamiento por el paso vehicular se emplea además de la pintura cintas adhesivas y para los tramos principales protección galvánica.

El trabajo de protección catódica que refuerza el control contra el ataque electroquímico que ocasiona la corrosión de las tuberías enterradas, se realizó de acuerdo a las normas y recomendaciones dadas por la National Association of Corrosion Engineers (NACE).

Tal como se describió en el Capítulo 2, los tramos fueron recubiertos por una capa de pintura anticorrosiva aún cuando, en general, las pinturas no son muy útiles para proteger estructuras enterradas. Esto ocurre, principalmente,

porque es difícil evitar el daño mecánico que sufren los recubrimientos delgados por el contacto con el suelo, por lo cual se período de vida es relativamente corto.

La mayor parte de las pinturas se comportan mejor para proteger contra la corrosión por agentes atmosféricos y esta es su función principal.

Se consideró que el recubrimiento a base de cintas de polietileno no era suficiente para la protección contra la corrosión, porque los tramos atraviesan caminos cuyos suelos sufren asentamientos provocados por el paso de vehículos pesados, que ocasionan daños en las capas.

Se decidió utilizar el método de los ánodos galvánicos atendiendo a las siguientes razones: la influencia de las mareas del Estero Salado, la corta longitud de los tramos y el menor riesgo de interferencia con las estructuras y tuberías enterradas de productos blancos, que van casi paralelos con la tubería que se iba a proteger, el bajo costo de la instalación y la vida útil de la estructura a preservar.

Los valores que se espera alcanzar deben estar dentro del rango de protección (de –1.200 a –850 mV). Un valor mayor provocaría una sobreprotección y el correspondiente ampollamiento de la capa de pintura debido al escape del hidrógeno. Esto se puede corroborar en el Diagrama de Pourbaix, para el sistema entre hierro y agua.

Es importante indicar que la aplicación de recubrimientos, reduce la cantidad de corriente requerida para obtener protección, se dice que de dicha reducción puede varias entre 99.8% para recubrimientos sumamente buenos hasta un 50% recubrimiento muy pobre, dañado o viejo.

Los costos de las instalaciones, las normas y leyes de conservación del medio ambiente determinan la utilización de medios de protección contra la corrosión.

Existe información bibliográfica, en texto, catálogos y documentación editada por fabricantes de productos y accesorios vinculados a combatir la corrosión; así como trabajos de tesis de grado que contribuyen a la solución de diferentes problemas.

En el país se han ejecutado proyectos que han requerido la instalación de control de la corrosión de diferentes estructuras sometidas a estos ataques, razón por la cual existen profesionales calificados y con experiencia para realizar estos trabajos.

Como recomendaciones es importante indicar que la limpieza de la superficie a tratar es de suma importancia, por ello se debe acatar y aplicar las normas establecidas con el fin de obtener buenos resultados.

Se debe cumplir con un programa de inspecciones y mantenimiento preventivo periódico trimestral que consiste en medir el potencial de ánodo abierto, corriente drenada por los lechos o camas, y el potencial de protección (estructura de suelo).

Cuando el valor del potencial sea menor al considerado como criterio, es necesario proceder a la revisión de los ánodos y al reemplazo de los que presentan desgastes.

La utilización de instrumentos de buena calidad y sensibilidad permitirá detectar valores de corriente continua y de voltaje pequeños, por esta razón el personal dedicado a estas funciones debe estar familiarizado con su manejo para evitar lecturas erróneas.

Otra forma para bajar costo es la construcción en nuestro medio de algunas partes y accesorios como los postes de prueba, cosquillas para pernos, empaques para brida, arandeles, etc., siempre y cuando estos elementos cumplan con las normas y propiedades requeridas.

APÉNDICE A

NORMAS PARA LA PREPARACION DE SUPERFICIES

Entre las varias normas oficiales y extraoficiales que existen para la preparación del acero antes del pintado, una de ellas ha ganado carta cae naturaleza internacional y se acostumbra a adoptar en todos los países. Se trata de:

SWEUISH STANDARDS INSTITUTION:

Surface Preparations Standard for Paintirig Steel Surfaces (SIS 055900)

que se conoce también con el nombre comun de **Norma Sueca.**

Esta Norma ha servido como modelo para otras normas similares y ha sido adoptada en muchos países. Sus grados de limpieza Sa 3, Sa 2 1/2, etc., que han sido universalmente reconocidos, son los que se emplean en el presente manual para las recomendaciones de grados de limpieza del acero.

La Norma Sueca fue !a primera en usar **patrones fotográficos** para describir los diferentes grados de preparación de superficies, mientras que otras normas muy conocidas, como por ejemplo:

---

* Marca registrada HEMPEL

STEEL STRUCTURES PAINTING COUNCIL,
USA: Surface Preparation Specificalions (SSPC-SP),
y BRITISH STANDARDS INSTITUTION:
Surface Finish of Blast-cleaned Slek.,1 for Painting (SS 4232)

son **descriptivas** y hacen referencia al equipo, materiales y procedimientos a emplear para conseguir los grados de limpieza especificados. Ambas remiten a la Norma Sueca como **patrón visual** para la interpretación del resultado final.

Una característica importante y única de la Norma Sueca, es que toma **en** consideración el **estado de la superficie de acero antes de la limpieza** y los grados de preparación que resultan, de acuerdo con el mencionado estado inicial.

Dichos estados iniciales del acero son los siguientes:

A: Superficie de acero completamente recubierta con cascarilla de laminación y con trazas de óxido. (El grado **A** es normalmente el que presenta el acero poco tiempo después de su laminación en caliente).

B: Superficie de acero que ha iniciado su corrosión y de la que ha empezado a desprenderse la cascarilla de laminación. (El grado B es normalmente el estado de una superficie después de haber permanecido expuesta a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva, durante 2 ó 3 meses).

*** Marca registrada HEMPEL**

C: Superficie de acero de la que la corrosión ha hecho saltar la totalidad de la cascarilla de laminación, pero que todavía no presenta picaduras detestables a simple vista. (El grado C es normalmente el estado de una superficie que ha sido expuesta a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva, durante 1 año, aproximadamente).

D: Superficie de acero de la que se ha desprendido la totalidad de la cascarilla de laminación y en la que se observan picaduras a simple vista. El grado D corresponde al estado de la superficie después de su exposición a la intemperie, sin protección, en una atmósfera medianamente corrosiva, durante unos 3 años).

Sólo son válidos oficialmente los patrones fotográficos publicados por la Swedish Standard Institution.

Las Normas Americanas y Suecas contemplan ambas otros sistemas de limpieza distintos del chorreado, mientras que las British Standard sólo toman en consideración el chorreado abrasivo como preparación de superficie adecuada previa al pintado del acero.

En la tabla de la página siguiente se da una comparación entre las diferentes Normas.

*** Marca registrada HEMPEL**

Norma Sueca	Descripción	Equivalente a:	
SIS 055900 Sa3	Eliminar la totalidad del óxido visible, cascarilla de laminación, pintura vieja y cualquier materia extraña. Limpieza por chorreado hasta metal blanco. El chorro se pasa sobre la superficie durante todo el tiempo necesario para eliminar la totalidad de la cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas. Finalmente, la superficie se limpia con un aspirador, aire comprimido limpio y seco o un cepillo limpio, para eliminar los residuos de polvo de abrasivo. Debe entonces quedar con un color metálico uniforme.	PSC-SP-5 BS 4232:	"Metal blanco" Chorreado abrasivo. Primera calidad.
SIS 055900 Sa2 ½	Chorreado abrasivo hasta metal casi blanco, a fin de conseguir que por lo menos el 95 % de cada porción de la superficie total quede libre de cualquier residuo visible. Chorreado muy cuidadoso. El chorro se mantiene sobre la superficie el tiempo necesario para asegurar que la cascarilla de laminación herrumbre y materias extrañas son eliminados de tal forma que cualquier residuo aparezca sólo como ligeras sombras o manchas en la superficie. Finalmente, se elimina el polvo de abrasivo con un aspirador, con aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio	PSC-SP-10 BS 4232:	"Casi blanco" Chorreado Abrasivo. Segunda calidad
SIS 055900 Sa2	Chorreado hasta que al menos los 2/3 de cualquier porción de la superficie total estén libres de todo residuo visible. Chorreado cuidadoso. El chorro se pasa sobre la superficie durante el tiempo suficiente para eliminar la casi totalidad de cascarilla de laminación, herrumbre y materias extrañas. Finalmente, se elimina el polvo de abrasivo con un aspirador, con aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio. La superficie debe quedar de color grisáceo.	PSC-SP-6 BS 4232:	"Comercial" Chorreado Abrasivo. Tercera calidad
SIS 055900 St3	Rascado con rasquetas de metal duro y cepillado con cepillo de alambre, muy cuidadoso. El rascado debe realizarse en primer lugar en una dirección y después en sentido perpendicular. Una vez eliminado el polvo, la superficie debe mostrar un pronunciado aspecto metálico.	SSPC-SP-3 BS 4232:	Limpieza Mecánica. No tiene equivalente

*** Marca registrada HEMPEL**

ÁREA:
CONSORCIO CMI – SANTOS
EXTERIOR DE TANQUES
m^2 4.000 m^2

ESPECIFICACIÓN DE PINTURA

SISTEMA:
EPOXI/POLIAMIDA

PRETRATAMIENTO: **Limpieza abrasiva al grado Sa 2 ½, metal casi blanco según el estándar Sueco SIS – 055900.-**

INFORMACIÓN DEL SISTEMA	Color / Color Código No.	Espesor de Película micras Húm.	Espesor de Película micras Seco	Rendimiento m^2/lt. Teórico	Intervalo de repintado a 20°C/68° F y amplia ventilación Min.	Intervalo de repintado a 20°C/68° F y amplia ventilación Máx.	Método de Aplicación Brocha (B) Rodillo (R) Pistola (P) B	R	P	Recomendación Orificio Boquilla	Recomendación Presión Boquilla
1 X HEMPADUR PRIMER 15030	2178 amar.	100	50	9.6	6 hrs.	30 días			X	0.021"	2450 psi
1 HEMPADUR HI BUILD 4520	1000 blanco	200	100	5.5	16 hrs.	30 días			X	0.018"	3500 psi
1 X HEMPADUR ENAMEL 5534	1000 blanco	100	40	10.5	8 hrs,	1 semana			X	0.021"	2100 psi
	Total d.f.t.										

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO	Sól x Vol. %	Agente Curador	Prop. Mezcla Vol.	Vida de Mezc. Hrs.	Tiempo Secado a 20° C/68° F	Punto Infl. °C/°F	Thinner	Restricciones Min. Temp.°C/°F	Restricciones Max. R.H. %
1 X HEMPADUR PRIMER 15030	48	9504	4:1	8 hrs.	4 hrs.	26/79	0845	10/50	85
1 HEMPADUR HI BUILD 4520	55	9504	3:1	8 hrs.	10 hrs.	26/79	0845	10/50	85
1 X HEMPADUR ENAMEL 5534	42	9502	3:2	8 hrs.	4 hrs.	23/73	0845	10/50	85
								Temp. de superficie Debe estar sobre punto de rocío	

OBSERVACIONES: EL HEMPADUR PRIMER 15030 y el HHEMPADUR HI BUILD 4520 utilizan el mismo agente curador, pero en diferentes proporciones.-

Año:	1988
Mes:	Junio
Día:	17
Pág.	**De**

HEMPEL´S Industrial Coatings

ÁREA:
CONSORCIO CMI – SANTOS

INTERIOR DE TANQUES

m^2 6.000 m^2

ESPECIFICACIÓN DE PINTURA

SISTEMA:
EPOXI/POLIAMIDA

PRETRATAMIENTO: **Limpieza abrasiva al grado Sa 3, metal casi blanco según el estándar Sueco SIS – 055900.-**

INFORMACIÓN DEL SISTEMA	Color / Color Código No.	Espesor de Película micras Húm.	Seco	Rendimiento m^2/lt. Teórico	Intervalo de repintado a 20°C/68° F y amplia ventilación Min.	Máx.	Método de Aplicación Brocha (B) Rodillo (R) Pistola (P) B	R	P	Recomendación Orificio Boquilla	Presión Boquilla
1 X HEMPADUR 1540	5089 rojo	225	100	4.5	10 hrs.	3 días			X	0.021"	2800 psi
1 HEMPADUR 1540	1000 blanco	225	100	4.5	10 hrs,	3 días			X	0.021"	2800 psi
	Total d.f.t.										

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO	Sól x Vol. %	Agente Curador	Prop. Mezcla Vol.	Vida de Mezc. Hrs.	Tiempo Secado a 20° C/68° F	Punto infl. °C/°F	Thinner	Restricciones Min. Temp.°C/°F	Max. R.H. %
HEMPADUR PRIMER 1540	45	9510	4:1	2 hrs.	10 hrs.	26/79	0845	10/50	85
								Temp. de superficie Debe estar sobre punto de rocío	

OBSERVACIONES: Se puede alterar el orden de las capas dependiendo del color requerido para el acabado.-

Año: 1988
Mes: Junio
Día: 17

Pág. **De**

HEMPEL'S Industrial Coatings

ÁREA:

CONSORCIO CMI – SANTOS

EXTERIOR DE TUBERÍAS AÉREAS

m^2 13.000 m^2

ESPECIFICACIÓN DE PINTURA

SISTEMA: EPOXI/POLIAMIDA

PRETRATAMIENTO: **Limpieza abrasiva al grado Sa 2 ½, metal casi blanco según el estándar Sueco SIS – 055900.-**

INFORMACIÓN DEL SISTEMA		Color / Color Código No.	Espesor de Película micras Húm.	Seco	Rendimiento m^2/lt. Teórico	Intervalo de repintado a 20°C/68° F y amplia ventilación Mín.	Máx.	Método de Aplicación Brocha (B) Rodillo (R) Pistola (P) B	R	P	Recomendación Orificio Boquilla	Presión Boquilla
1 X HEMPADUR PRIMER	1530	2178 amar.	100	50	9.6	6 hrs.	30 días			X	0.021"	2450 psi
1 X HEMPADUR HI BUILD	4520	1000 blanco	200	100	5.5	16 hrs.	30 días	X		X	0.018"	3500 psi
1 X HEMPADUR ENAMEL	5534	1000 blanco	100	40	10.5	8 hrs.	1 semana	X		X	0.021"	2100 psi
		Total d.f.t.										

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO		Sól x Vol. %	Agente Curador	Prop. Mezcla Vol.	Vida de Mezc. Hrs.	Tiempo Secado a 20° C/68° F	Punto Infl. °C/°F	Thinner	Restricciones Min. Temp.°C/°F	Máx. R.H. %
HEMPADUR PRIMER	1530	48	9504	4:1	8 hrs	4 hrs.	26/79	0845	10/50	85
HEMPADUR HI BUILD	4520	55	9504	3:1	8 hrs.	10 hrs.	26/79	0845	10/50	85
HEMPADUR ENAMEL	5534	42	9502	3:2	8 hrs.	4 hrs.	23/73	0845	10/50	85

Temp. de superficie Debe estar sobre punto de rocío

OBSERVACIONES: EL HEMPADUR PRIMER 1530 y el HEMPADUR HI BUILD 4520 utilizan el mismo agente curador, pero en diferentes proporciones.-
En el EXTERIOR DE TUBERÍAS el color final se aplicará de acuerdo a las líneas de flujo, según carta de colores.

Año: 1988
Mes: Junio
Día: 17

Pág. **De**

HEMPEL´S Industrial Coatings

INSPECCIÓN Y PRUEBA

Se debe realizar inspecciones en el sitio de trabajo durante el proceso de limpieza, para comprobar si se esta aplicando la norma correcta y la especificación determinada.

Para la aplicación de pinturas normalmente se recorre a los catálogos de fabricantes de pinturas industriales y establecer los parámetros de control esto es entre otros:

a) Espesor de película húmeda.
b) Espesor de película seca.
c) Tipo de aplicación.

Existen varios métodos e instrumentos para realizar estos chequeos:

Tickness gage – para medir espesores en húmedos.

Mikrotest magnetic – para medir espesores en seco.

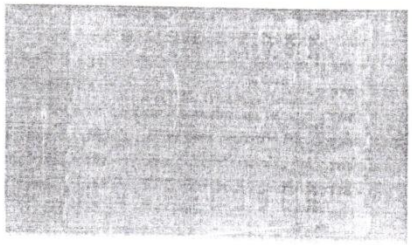


FIG. A-1 A notch type wet film thickness gage.

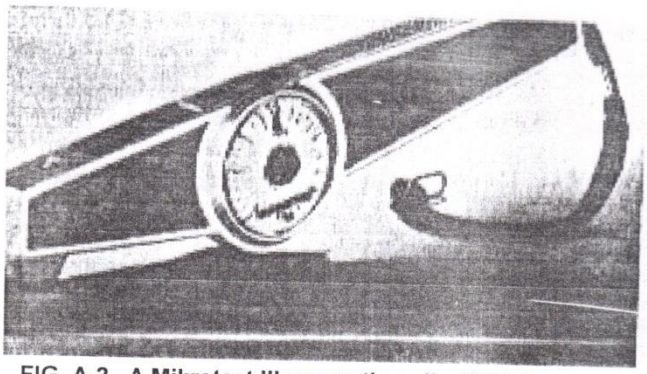


FIG. A-2. A Mikrotest III magnetic pull-off thickness gage.

CONVERSIÓN

Los espesores de películas o capa tienen como unidad de medida las micras o mils.

Para realizar las conversiones tenemos que:

De mils a micras multiplicamos x 25

Micras a mils multiplicamos x 0.04

CÁLCULO DE ESPESORES

Húmeda: $\frac{W.f.t \times SV\%}{100}$

Seca: $\frac{d.f.t \times 100}{SV\%}$

De donde:

W.f.t. = espesor de película húmeda.

d.f.t. = espesor de película seca.

SV% = porcentaje de sólidos por volumen.

CÁLCULO DE RENDIMIENTO

Rendimiento teórico: En^2/l = Húmeda: $\frac{SV\% \times 10}{d.f.t(micras)}$

CÁLCULO DE CONSUMO

Consumo en litios: $\frac{\text{Superficie } (m^2) \times \text{d.f.t. (micras)}}{SV\% \times 10}$

APÉNDICE B

BACKFILL

Es un relleno químico que consiste esencialmente en: porcentaje, yeso hidratado, arcilla Bentonita y sulfato de sodio.

Este relleno procura un medio envolvente uniforme y máxima eficiencia. Aisla el material del ánodo del contacto directo con la tierra, para prevenir la acción de los elementos químicos del suelo que pueden dar lugar a la formación de películas pasivas de alta resistencia, que se forman sobre la superficie del ánodo y evita la descarga de cantidades provechosas de corriente. Tiene una baja resistividad eléctrica que, cuando el suelo que lo rodea es de alta resistividad, permite una baja resistencia ánodo-tierra y mayor salida de corriente.

El efecto general del relleno químico es hacer que el rendimiento del ánodo sea más independiente de las variaciones erráticas de un punto a otro del suelo. Las ventajas derivadas de su uso son:

a. Es más alto y estable el potencial de trabajo del ánodo
b. Reduce la suceptibilidad a la polarización
c. La resistencia ánodo-tierra es más baja
d. Hay una mejor distribución del ataque de la corrosión en el ánodo.
e. No es necesario en electrolitos de alta conductividad como el agua de mar.

TABLA B-1

RECUBRIMIENTOS QUÍMICOS DE BACKFILL PARA ÁNODOS GALVÁNICOS

TIPO	HIDRATADO	MOLDURA DE YESO	BENTONITA CALCIO%	SODIO SULFATO %	RESISTENCIA APROXIMADA EN OHM-CM
A	25	-	75	-	250
B	50	-	50	-	250
C	-	50	50	-	250
D	75	-	20	5	50

MEZCLA DE BACKFILL

A. Útil en mezclas de suelos de baja resistividad colocadas en huecos para ánodos desnudos.

B. Comúnmente usado con ánodos de zing.

C. Útil con zing o magnesio en suelos muy secos

D. Con baja resistividad usada en suelos de alta resistividad

TABLA B-2

FACTOR DE AJUSTE

No. De ánodos en Paralelo	Ánodos espaciados en Pie (ff)				
	5	10	15	20	25
2	0.625	0.576	0.551	0.538	0.530
3	0.586	0.460	0.418	0.397	0.384
4	0.520	0.385	0.340	0.318	0.304
5	0.466	0.333	0.289	0.267	0.253
6	0.423	0.295	0.252	0.231	0.218
7	0.387	0.265	0.224	0.204	0.192
8	0.361	0.243	0.204	0.184	0.172
9	0.332	0.222	0.185	0.166	0.155
10	0.311	0.205	0.170	0.153	0.142
11	0.292	0.192	0.158	0.141	0.131
12	0.276	0.180	0.148	0.132	0.122
13	0.262	0.169	0.139	0.123	0.114
14	0.249	0.160	0.131	0.116	0.107
15	0.238	0.152	0.124	0.109	0.101
16	0.226	0.144	0.117	0.103	0.095
17	0.218	0.138	0.112	0.099	0.091
18	0.209	0.132	0.107	0.094	0.086
19	0.202	0.127	0.102	0.90	0.082
20	0.194	0.122	0.098	0.086	0.079
22	0.182	0.114	0.091	0.079	0.073
24	0.171	0.106	0.085	0.074	0.067
26	0.161	0.100	0.079	0.069	0.063
28	0.152	0.094	0.075	0.065	0.059
30	0.145	0.089	0.070	0.061	0.056

Para conversión:
1 pie = 0.305 m.

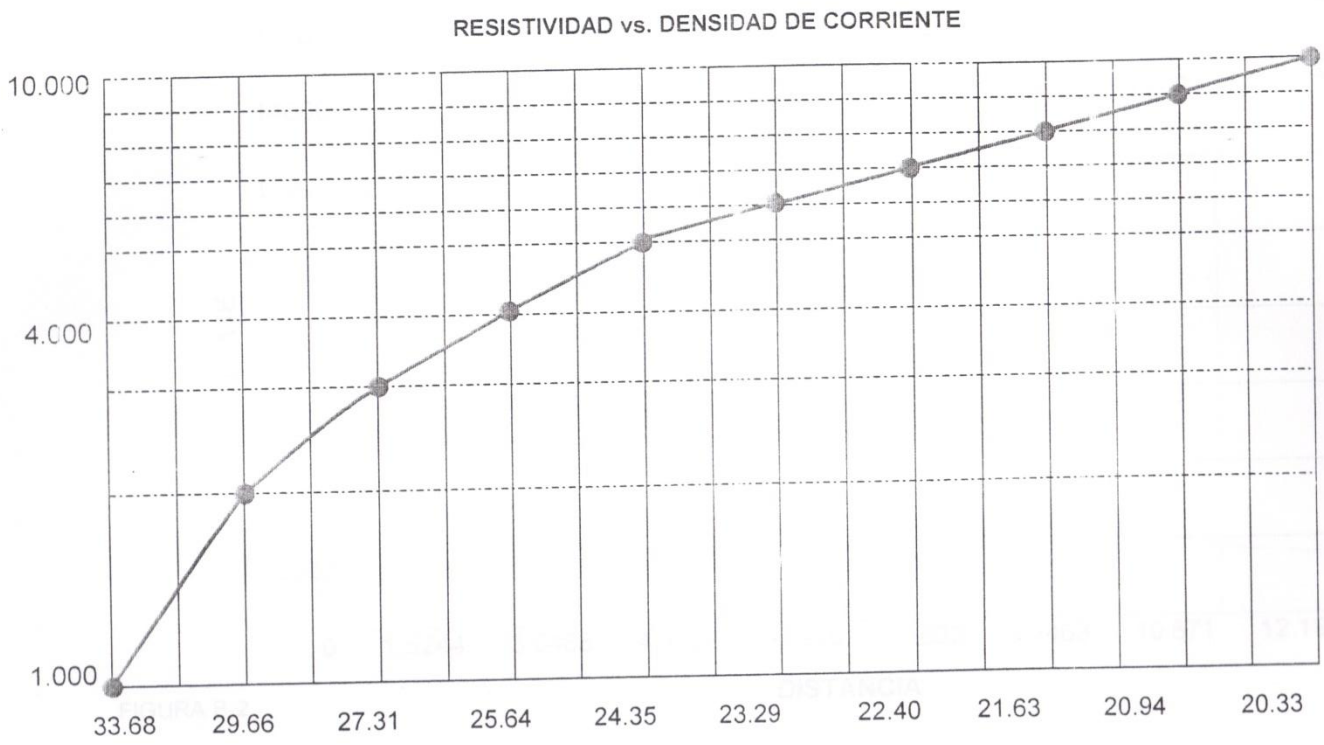

RESISTIVIDAD vs. DENSIDAD DE CORRIENTE
10.000
4.000
1.000
33.68
29.66
27.31
25.64
24.35
23.29
22.40
21.63
20.94
20.33

FIGURA B-1

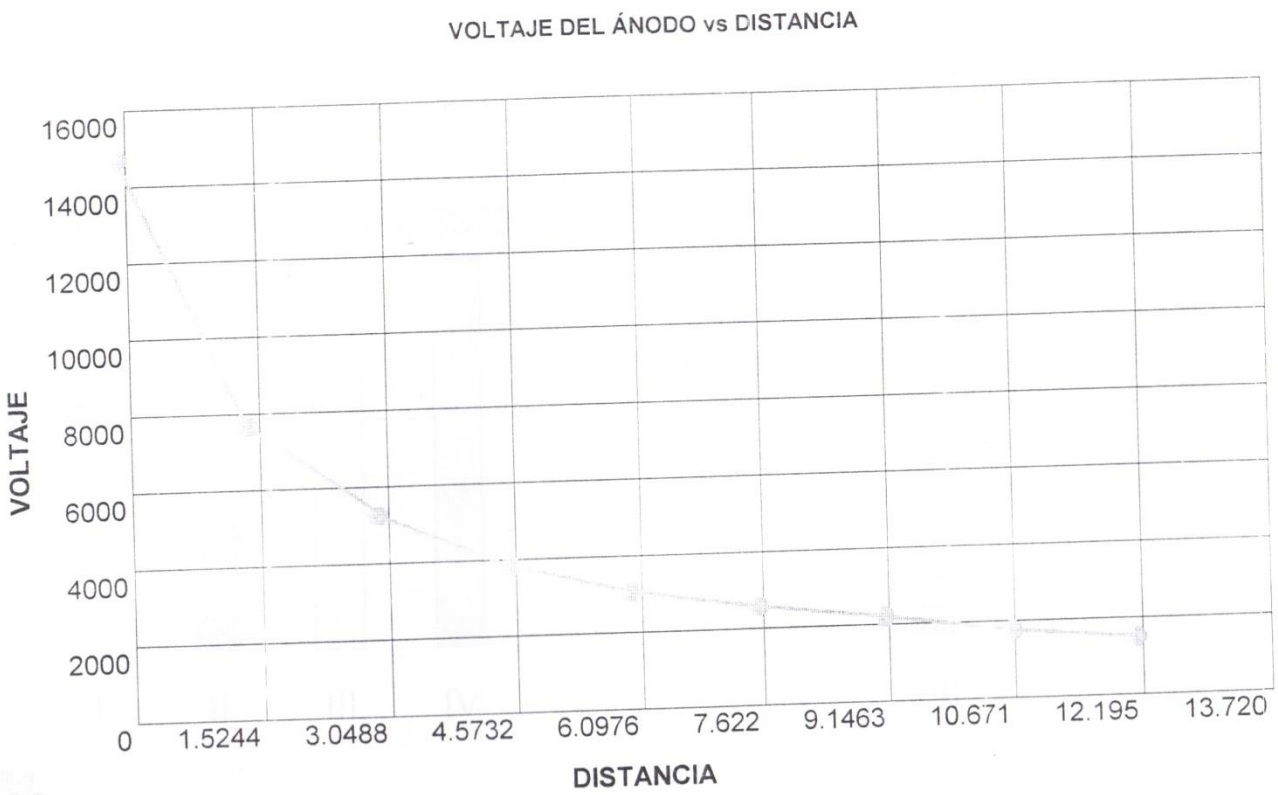

VOLTAJE DEL ÁNODO vs DISTANCIA
VOLTAJE
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
1.5244
3.0488
4.5732
6.0976
7.622
9.1463
10.671
12.195
13.720
DISTANCIA

FIGURA B-2

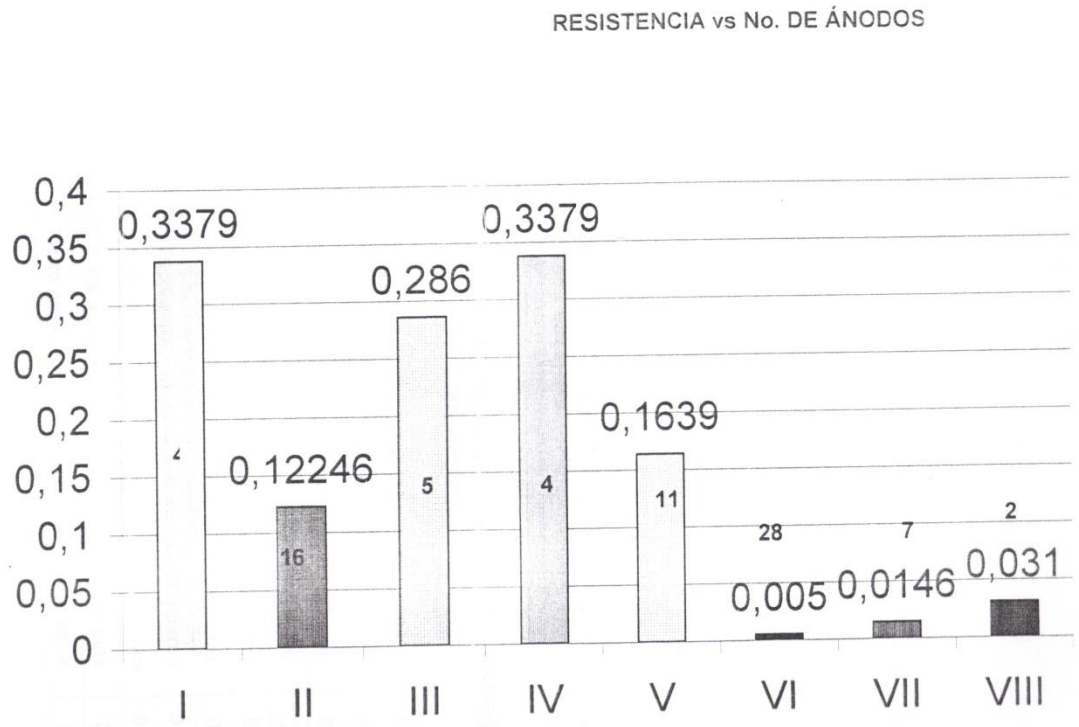

RESISTENCIA vs No. DE ÁNODOS
0,4
0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
0,3379
0,12246
0,286
0,3379
0,1639
0,005
0,0146
0,031
4
16
5
4
11
28
7
2
I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII

FIGURA B-3

APÉNDICE C

DESCRIPCIÓN DE LOS ÁNODOS DE MAGNESIO: AMC17G

A	M	C	17	G
1	2	3	4	5

1 Producto

2 Material

3 Tipo de ánodo

4 Peso del ánodo en Lb.

5 Tipo de aleación:
- G = Galvomag,
- H = Aleación grado 1;
- J = Aleación grado 2;
- K = Aleación grado 3; y,
- X = Otras aleaciones

TABLA C-1

PORCENTAJE EN PESO DE LOS ELEMENTOS ALEADOS CON MAGNESIO

ELEMENTO	GALVOMAG	GRADO I	GRADO II	GRADO III
Al.	0.010% max.	5.0 – 7.0%	5.3 – 6.7%	5.3 – 6.7%
Mn.	0.50 a 1.30%	0.15% min.	0.15% min.	0.10% min.
Zn.	0.05% max.	2.0 – 4.0%	2.5 – 3.5%	2.5 – 3.5%
Si.	0.05% max.	0.30 max.	0.30% max.	0.10% max.
Cu.	0.02% max.	0.01% max.	0.05% max.	0.02% max.
Ni	0.0001% max.	0.003% max.	0.003% max.	0.002% max.
Fe.	0.03% max.	0.03% max.	0.003% max.	0.003% max.
Otros	0.05-0.3% max.tot.	0.30% max.	0.30% max.	0.30% max.
Mg.	resto de %	resto del %	resto del %	resto del %

TABLA C-2

ÁNODOS DE MAGNESIO DIMENSIONES Y PESOS

PESO lbs.	DESCRIPCIÓN	DIMESIÓN NOMINAL – PULG.					PESO-BACKFIL Lbs.	PESO TOTAL Lbs.
		A	B	C	D	E		
1	H-1 aleación	3.2		2	6	6	2.5	3.5
3	Galvomag	3	3	4.5	6.5	6	6	9
3	H-1 aleación	3	3	4.5	6.5	6	6	9
5	Galvomag	3	3	7.5	9.5	6	9	14
5	H-1 aleación	3	3	7.5	9.5	6	9	14
9	Galvomag	3	3	13.5	15.5	6	15	23
9	H-1 aleación	3	3	13.5	15.5	6	15	23
17	Galvomag	3	3	25.5	28.0	6	25	42
17	H-1 aleación	4	4	17.0	19.0	6.5	25	42
17	Galvomag	4	4	25.5	29.0	6.5	28	45
20	H-1 aleación	2	2	60.0	60.0	5	50	68
32	Galvomag	5	5	21.0	23.0	8	38	70
32	H-1 aleación	5	5	21.0	23.0	8	38	70
48	Galvomag	5	5	31.0	34.0	8	48	96
50	H-1 aleación	18		15.0	18.0	10	46	96

Factor de Conversaciones:

1 lb. ..... 0.4545 Kg.

1 pulg. ..... 0.0254 m.

1 pie ..... 0.3048 m.

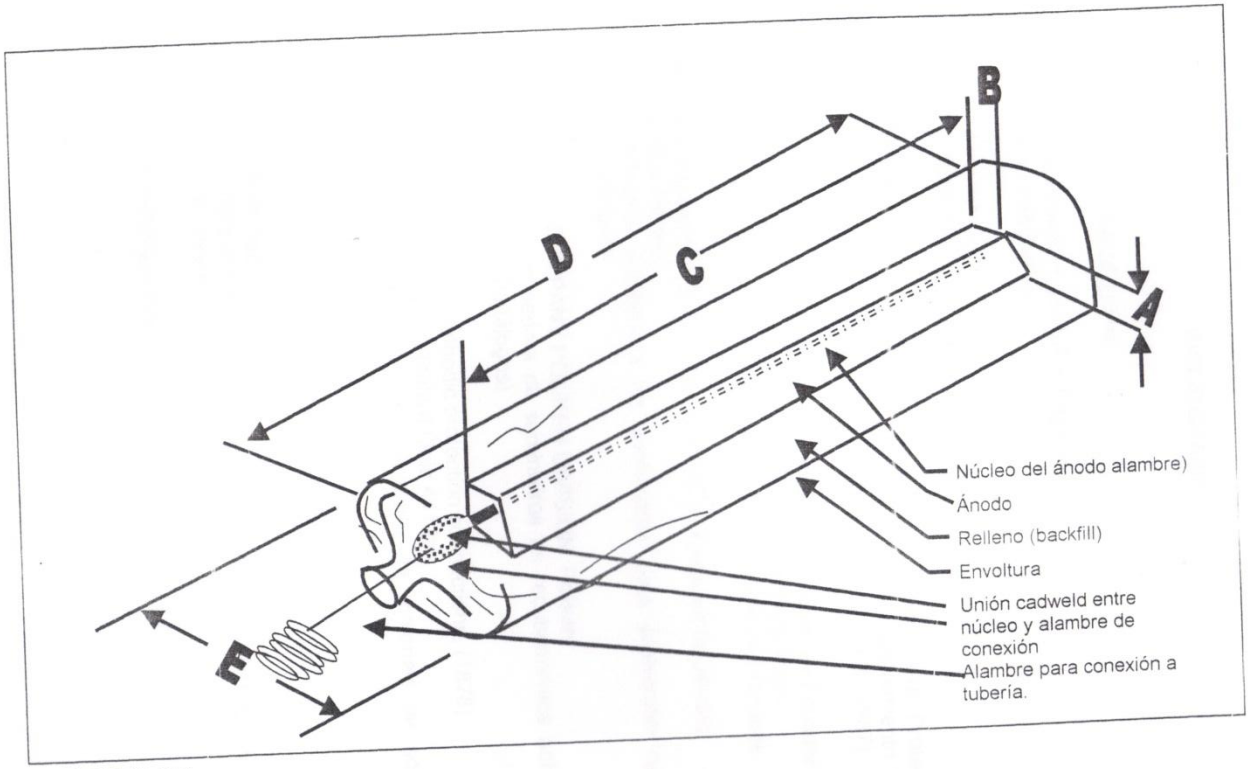

B
D
C
A
F
Núcleo del ánodo alambre)
Ánodo
Relleno (backfill)
Envoltura
Unión cadweld entre núcleo y alambre de conexión
Alambre para conexión a tubería.

FIGURA C-1

BIBLIOGRAFÍA

* A.W. Peabody – NACE (1968)

* National Association of Corrosion Engineers
  - Ground Bed Design 94-108
  - Cootings 9-18
  - Criteria for Cathodic Protection 33-38
  - The Basic Corrosion Mechanism 3-8

* Julian Peña Estrella: Evaluación y Modificación del Sistema de Protección Catódica de los Tanques de Almacenamiento de la Refinería Estatal de Esmeralda. ESPOL (1987).

* HEMPEL´S Industrial Cootings: Pinturas Marinas Hempel del Ecuador S.A.
  - Catálogo de Normas para la Preparación de superficies
  - Catálogo de especificación de pintura para tubería y tanques

* HARCO Corporation – Sistem Design (1812 Underwood Boulevard. Deiran, New Yersey)
  - Industria proveedora de suministros para protección catódica (catálogos)

* THE KENDALL COMPANY POLIKEN DIVISION: Poliken
  - Industria proveedora de suministros de recubrimientos adhesivos para tubería (catálogos)

* ERICO Productos, Inc. Cathodic protection connections. (1878) 34600 Salon Rd. Cleveland (salon) Ohio 4413a
  - Industria proveedora de suministro de materials de soldadura cadweld.

* L. JAMES MOORE- Galvanic cathodic protection.

* I E C – Instalacoes e Engenharia de Corrosao Ltda. Protecao catódica. Octubro de 1981 (2da. Edicao GRAPHOS) Río de Janeiro

* VICENTE GENTIL – Corrosao. Editora Guanabara Dois S.A. Río de Janeiro.