

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES**  
**INGENIERÍA EN METALURGIA**



**Proyecto de Protección Anticorrosiva  
de Superficie Flotante Ubicada  
en el Embalse Arenal.**

**Proyecto de graduación sometido a consideración de la  
Escuela de Ingeniería en Ciencia de los Materiales, como requisito final  
Para optar por el grado de Bachiller en Ingeniería en Metalurgia.**

**GIANCARLO FERRANDINO DÍJERES**

**CARTAGO  
JUNIO, 2001**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES**  
**INGENIERÍA EN METALURGIA**



**Proyecto de Protección Anticorrosiva  
de Superficie Flotante Ubicada  
en el Embalse Arenal**

**Proyecto de graduación sometido a consideración de la  
Escuela de Ingeniería en Ciencia de los Materiales, como requisito final  
para optar por el grado de Bachiller en Ingeniería en Metalurgia.**

**REALIZADO POR**  
**GIANCARLO FERRANDINO DÍJERES**  
**PROFESOR ASESOR**  
**DR. JUAN FERNANDO ÁLVAREZ**  
**COORDINADOR DE PRACTICA EN EMPRESA**  
**ING. MARIO VEGA LEÓN**

**CARTAGO**

**JUNIO 2001**

Proyecto de graduación sometido a la consideración de la  
Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales  
como requisito para optar por el grado de  
Bachiller en Ingeniería en Metalurgia.

**Tribunal Examinador:**



---

**Dr. Juan Fernando Álvarez**  
Profesor asociado  
Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales



---

**Dr. Bruno Chiné**  
Profesor asociado  
Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales



---

**Ing. Jorge Muñoz**  
Profesor asociado  
Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales.

Campus, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 25 de junio del 2001.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, doy acción de gracias al Supremo Hacedor por permitirme llegar hasta este momento de mi vida.

Gracias a todo el personal del Centro de Investigación en Corrosión por permitirme el desarrollar esta práctica. Gracias Guadalupe, por su apoyo y confianza; gracias Erica, por ser esa persona tan especial y servicial; gracias Carlos, por ese espíritu de ayuda, por sus consejos sabios; gracias Mario, por las lecciones aprendidas y por todos momentos que dedico a este proyecto; gracias Randall, porque sin su ayuda no lo hubiera logrado, por su gran amistad.

Gracias al personal del Laboratorio de Circuitos Impresos, a Catalina, Marvin e Iván.

A los profesores de la Carrera de Metalurgia, por todas las enseñanzas recibidas.

Gracias al personal del Centro de Generación ARCOSA por brindarme todo el apoyo para la consecución de este trabajo; a José Miguel, William, Oscar, y todas aquellas personas que de una u otra manera pusieron su grano de arena.

A todos los compañeros de Metalurgia que me han apoyado en este proceso; a Yanner, Marvin, Yessenia, Erick, Adrián, Alejandro, Mauricio, Vernon, José Luis, Marcela, Marco. Gracias a ustedes y a todos los no están ya.

Gracias a mis amigos Daniel, Orlando, Sara, Marlon, por estar ahí cuando los necesité.

A mis padres, a mis hermanos Marco y Ramsés.

Gracias a mi novia, Silvia Gabriela, por tu paciencia, por ser la persona más especial que he conocido nunca jamás.

## **RESUMEN**

Con base en diversos estudios realizados (ref. 4), se estima que en un país como Costa Rica, las pérdidas causadas por la corrosión representan entre el 1.25% y el 3.25% del PIB. Implementando sistemas adecuados para la prevención de la corrosión, éstas pueden reducirse hasta un 40%.

El Centro de Investigación en Corrosión (CICorr), perteneciente al Instituto Costarricense de Electricidad, provee soluciones prácticas al respecto. Como parte de estas acciones el CICorr efectuó un estudio en una plataforma flotante ubicada en el embalse Arenal, la cual está encargada de las funciones de dragado del mismo. La plataforma presenta estado de corrosión avanzado en sus partes constitutivas.

Se caracterizó el grado de corrosión existente en la plataforma, lo cual sirvió de fundamento para el desarrollo de sistemas de pinturas a aplicar sobre el sustrato metálico. Se estableció un plan de mantenimiento preventivo y protección anticorrosiva, diseñado para servir como guía de los requerimientos específicos en la inspección, preparación de la superficie y aplicación de pinturas, durante una construcción nueva o rutina de mantenimiento.

# **OBJETIVOS**

## **Objetivo General**

Realizar un estudio del efecto de la corrosión y establecer un plan de protección anticorrosiva para una superficie flotante ubicada en el Embalse Arenal.

## **Objetivos Específicos**

Realizar una búsqueda de información histórica referente a la superficie flotante.

Caracterizar y cuantificar el grado de corrosión actual del material de la superficie flotante.

Valorar el resultado de diferentes sistemas de pintura para la superficie flotante

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para la superficie flotante.

# TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	v
OBJETIVOS .....	vi
Objetivo General.....	vi
Objetivos Específicos .....	vi
TABLA DE CONTENIDOS.....	vii
TABLA DE FIGURAS.....	x
CAPÍTULO 1. Marco Teórico.....	1
1.1    DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA .....	2
a. Creación del Instituto Costarricense de Electricidad:.....	2
b. Centro de Investigación en Corrosión (CICorr) .....	3
c. Planta Hidroeléctrica Arenal .....	3
d. Justificación del proyecto .....	5
1.2    NATURALEZA DE LA CORROSIÓN METÁLICA.....	6
1.3    IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN.....	7
1.4    CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN.....	7
a. Mecanismos de corrosión.....	7
b. Formas de corrosión.....	10
1.5    CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.....	17
a. Corrosión atmosférica de materiales metálicos .....	17
b. Influencia del espesor de la capa de humedad.....	18
c. Formación de películas de humedad.....	19
d. Papel de la herrumbre.....	20
e. Contaminación atmosférica.....	20
1.6    CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL ÁREA DEL EMBALSE ARENAL.....	22
a. Determinación del área de influencia del fenómeno de lluvia ácida como producto de la actividad del volcán Arenal.....	22

b.	Determinación de la velocidad de corrosión en diversos materiales .....	23
1.7	MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN.....	24
a.	Remoción de los elementos corrosivos.....	24
b.	Mejores materiales de construcción.....	25
c.	Protección catódica. ....	25
d.	Sobredimensionamiento.....	25
e.	Colocar una barrera entre el metal y el ambiente.....	26
1.8	SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS.....	26
a.	Conceptos.....	26
b.	Clasificación de recubrimientos.....	26
i.	Recubrimiento metálico.....	27
c.	Preparación de la superficie. ....	30
1.9	MÉTODO DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA.....	35
a.	Definición y propósito de la prueba.....	35
b.	Principio del método.....	35
c.	Descripción de las partes del equipo.....	36
d.	Principales aplicaciones de la inspección ultrasónica.....	36
1.10	MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS DE ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ..	38
a.	Método de las pendientes de Tafel .....	40
b.	Método de resistencia de polarización lineal .....	40
CAPÍTULO 2. Metodologías.....		42
2.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA SUPERFICIE	
	FLOTANTE .....	43
a.	Recopilación de información .....	43
b.	Definir estructura metalográfica de la superficie flotante .....	44
c.	Análisis de velocidad de corrosión.....	45
d.	Medición de dureza.....	47
2.2	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS ANTICORROSIVOS	47
a.	Diseño de sistemas de pintura.....	47
b.	Preparación de los sistemas de pintura .....	48

c. Pruebas realizadas a sistemas de pintura.....	49
CAPÍTULO 3. Caracterización de la estructura de la superficie flotante .....	52
3.1 Resultados.....	53
3.2 Análisis de resultados .....	55
CAPÍTULO 4. Evaluación del desempeño de sistemas de pintura .....	65
4.1 Resultados.....	66
4.2 Análisis de resultados .....	67
CAPÍTULO 5. Conclusiones .....	72
CAPÍTULO 6. Recomendaciones.....	75
BIBLIOGRAFÍA .....	78
APÉNDICES .....	80
APÉNDICE A. Datos experimentales .....	81
APÉNDICE B. Resultados intermedios.....	83
APÉNDICE C. Datos teóricos .....	109
APÉNDICE D. Especificaciones técnicas de las pinturas .....	112
APÉNDICE E. Plan de mantenimiento preventivo y correctivo .....	121
APÉNDICE F. Nomenclatura.....	124
APÉNDICE G. Imágenes obtenidas en campo de la superficie flotante .....	126

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 .....	5
Figura 1.2 .....	9
Figura 1.3 .....	10
Figura 1.4 .....	11
Figura 1.5 .....	12
Figura 1.6 .....	12
Figura 1.7 .....	14
Figura 1.8 .....	15
Figura 1.9 .....	16
Figura 1.10 .....	16
Figura 1.11 .....	19
Figura 1.12 .....	32
Figura 1.13 .....	33
Figura 1.14 .....	37
Figura 3.1 .....	53
Figura 3.2 .....	53
Figura B1 .....	87
Figura B2 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figuras B3-B6.....	100
Figuras B7-B10.....	101
Figuras B11-B14.....	102
Figura C1 .....	111
Figuras D1-D6 .....	112
Figuras G1-G14 .....	126

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 .....	28
Tabla 3.2 .....	54
Tabla 3.1 .....	54
Tabla A1 .....	82
Tabla B1.....	84
Tabla B2.....	84
Tabla B3.....	85
Tabla B4.....	85
Tabla B5.....	86
Tabla B6.....	89
Tabla B7.....	90
Tabla B8.....	90
Tabla B9.....	91
Tabla B10.....	92
Tabla B11.....	92
Tabla B12.....	93
Tabla B13.....	93
Tabla B15.....	93
Tabla B14.....	95
Tabla B16.....	96
Tabla B17.....	97
Tabla B18.....	97
Tabla B19.....	97
Tabla B20.....	97
Tabla B21.....	97
Tabla B22.....	98
Tabla B23.....	98

Tabla B24.....	99
Tabla B25.....	99
Tabla B26.....	99
Tabla C1.....	110
Tabla C2.....	110

## **CAPÍTULO 1. Marco Teórico**

## 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

### **a. Creación del Instituto Costarricense de Electricidad:**

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) fue creado el 8 de abril de 1949, por Decreto de Ley N° 449, con el objetivo de buscar solución a la crisis eléctrica. Se creó como Institución Autónoma y su programa básico de trabajo consistió en la construcción y puesta en servicio de nuevas plantas generadoras y sus correspondientes redes de distribución, líneas de transmisión y subestaciones.

Tiene como fin primordial el desarrollar racionalmente las fuentes productoras de energía propias de Costa Rica, especialmente los amplios recursos hidráulicos y estimular el uso de la electricidad para el desarrollo industrial y mejora de la calidad de vida de los habitantes. También, al promulgarse la Ley N° 3226 del 28 de octubre de 1963, al ICE se le encomendó el establecimiento, mejoramiento, funcionamiento y ampliación de los servicios de comunicaciones y telegráficas tanto nacionales como internacionales.

Por imperativo de su Ley Orgánica, los objetivos del ICE son mantener en funcionamiento correcto los servicios eléctricos de las redes propias y de telecomunicaciones de todo el país. Por lo tanto, debe de planificar, diseñar, construir, poner en servicio, ampliar y dar mantenimiento a las plantas generadoras, subestaciones, líneas de transmisión y redes de distribución del sector eléctrico, lo mismo que las centrales, planta externa y demás elementos del sistema de telecomunicaciones.

### **b. Centro de Investigación en Corrosión (CICorr)**

Con base en diversos estudios realizados (ref. 4), se estima que en un país como el nuestro las pérdidas causadas por la corrosión son en promedio entre un 1.25% y un 3.5% del Producto Nacional Bruto. Mediante la implementación de sistemas adecuados para la prevención de la corrosión, estas pérdidas pueden reducirse hasta un 40%.

Una solución del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) a este problema fue constituir el Centro de Investigación en Corrosión (CICorr), único en el país que cuenta con el equipo para la investigación de todas las áreas en el campo de la corrosión y, lo que es más importante, con la capacidad de brindar servicios integrales.

Esta dependencia del Centro de Servicio, Investigación y Desarrollo en Energía, de la Unidad Estratégica de Negocios, Proyectos y Servicios Asociados (UEN-PYSA) abrió sus puertas en agosto de 1996. La inversión en equipo, cercana a los 50 millones de colones, permite actualmente ofrecer diversos servicios, desde sus instalaciones ubicadas en el plantel de Colima de Tibás, San José. Entre otras, el Centro de Investigación puede proveer soluciones prácticas contra la corrosión, así como ofrecer servicios de análisis y medición a distintas dependencias del ICE u otras entidades externas.

### **c. Planta Hidroeléctrica Arenal**

La Planta Hidroeléctrica de Arenal ubicada en la provincia de Guanacaste tiene como objetivo funcional directo generar energía eléctrica en consonancia con los principios fundamentales de aprovechamiento integral y de mantenimiento del balance ecológico de la cuenca.

Un objetivo de esta magnitud involucra un mejoramiento constante en todos los procesos, ya sean administrativos, constructivos, etc, que redunden en una mayor eficiencia y eficacia del desempeño del mismo.

Una de las instancias encargadas de cumplir este punto es el Centro de Generación Arenal-Corobicí-Sandillal (ARCOSA). El Centro de Generación ARCOSA además de brindar soporte a las plantas hidroeléctricas de Corobicí y Sandillal, es el responsable de brindar mantenimiento al Embalse Arenal, que a su vez provee el caudal de agua a la Planta Hidroeléctrica de Arenal. Para tal fin cuenta con un sistema flotante, denominado pontón, con el que se realizan las labores de limpieza y dragado del Lago Arenal, especialmente en zonas críticas para el funcionamiento de la Planta Hidroeléctrica, como lo es la Toma de Agua.

Como parte de las acciones de mantenimiento que realiza la superficie flotante se encuentra la eliminación de materia orgánica, la cual se acumula en forma de islotes. Dicha materia orgánica se conoce como gamalote. La utilización de la superficie flotante o pontón, facilita en gran manera la recolección de todos estos residuos, convirtiéndola en un elemento imprescindible en las labores de limpieza de dicho embalse.

Otra de las funciones del Centro de Generación ARCOSA es la inspección periódica de las estructuras enterradas o sumergidas de la Planta Hidroeléctrica en el Embalse Arenal. Para realizar esta labor se utiliza la superficie flotante como plataforma de buceo. La superficie flotante cuenta con todos los dispositivos necesarios para realizar esta función, entre ellos, enfriadores de tanques de oxígeno, tanque de descompresión, etc.

#### **d. Justificación del proyecto**

El Centro de Generación ARCOSA solicitó al Centro de Investigación en Corrosión realizar un estudio que evalúe el efecto de la corrosión y establezca un plan de protección anticorrosiva para una superficie flotante o pontón, la cual se puede observar en la figura 1.1. Dicho estudio debe valorar su estado y contemplar diferentes posibilidades de reparación para incrementar su vida útil.

La superficie flotante presenta un estado de corrosión avanzado en sus partes constitutivas, con ataque de corrosión interno y externo (electroquímico), de forma generalizada.



PhotoEditor

**Figura 1.1** Vista panorámica de la superficie flotante en el Embalse Arenal, provincia de Guanacaste.

Esta superficie es la que se encarga de las labores de dragado del embalse Arenal, Guanacaste, por lo cual reparación debe de efectuarse prontamente, ya que se requiere que esté en óptimas condiciones, debido a que su presencia es de suma importancia para eventuales emergencias.

Fue fabricada por Servicios Técnicos, Planta Hidroeléctrica Ventanas-Garita, el 27 de enero de 1985; su masa es de 102000 kilogramos y su capacidad máxima es de 150000 kilogramos. Sus dimensiones máximas son 23.0 metros de largo, 13.3 metros de ancho y 1.7 metros de alto. Esta superficie flotante posee en su parte interior un sistema de celdas, 8 en total. Las celdas del extremo tienen como función el servir como contrapeso a una grúa que se coloca al frente de la estructura, para la cual, tienen que ser llenadas con agua.

## **1.2 NATURALEZA DE LA CORROSIÓN METÁLICA.**

La corrosión, en el más general de los sentidos, es un fenómeno natural, por el cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable. La corrosión tiene varias definiciones:

- Deterioro o destrucción de un material a causa de su reacción con el medio ambiente;

- Destrucción de los materiales por medios cualesquiera , excepto mecánicos;

- Proceso inverso de la metalurgia extractiva, o antimetalurgia, en virtud del cual los materiales metálicos tienden a volver al estado combinado, en el que se encuentran en la naturaleza.

La definición más apropiada depende del énfasis que se le quiera atribuir; las primeras dos se refieren a todo material, metálico o no, la última sólo es aplicable a metales o aleaciones, que es el caso de corrosión más difundido.

### **1.3 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN.**

Se han realizado diversos estudios por grupos de expertos en la corrosión y protección de materiales, en los cuales se fijan las pérdidas anuales causadas por la corrosión en los países industrializados y en vías de desarrollo, cercanas al 3.5 por 100 del producto interno bruto (ref. 7).

Otros datos hablan que las pérdidas directas por corrosión se aproximan al 10 por 100, considerando dicha producción en 650 millones de toneladas(ref. 6). Se debe considerar que estas estimaciones corresponden sólo a las pérdidas que son directas, sin incluir las pérdidas de carácter indirecto, que son difíciles de evaluar y de cuantificar, por ejemplo: mantenimiento y sustitución de partes corroídas, pérdidas de producción, coeficientes de seguridad en el diseño, entre otras.

Por un lado, la importancia de la corrosión desde los puntos de vista técnico y económico es enorme y, por otro lado, es un fenómeno inevitable, en cierto sentido, al ser la respuesta de los materiales metálicos a una ley natural, a una imposición termodinámica, características ambas que parecen conducir a un callejón sin salida. Sin dejar de ser cierto lo anterior, también lo es el hecho de que las pérdidas por corrosión pueden reducirse y, a veces, evitarse incluso, por métodos de protección sancionados por la práctica y rentables económicamente.

### **1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN.**

#### **a. Mecanismos de corrosión**

Los fenómenos de corrosión pueden clasificarse de acuerdo con muy variados criterios. Por el medio agresivo, morfología del ataque, etc. Pero es muy común clasificar a la corrosión de acuerdo al mecanismo de reacción de la corrosión. Por lo tanto, interesa referirse a dos mecanismos fundamentalmente distintos, tanto en su modo

de actuar como a las condiciones experimentales en que, por lo general, cada uno de ellos se desarrolla. A saber:

- Corrosión química.
- Corrosión electroquímica.

### **i. Corrosión química**

En la corrosión química el metal se combina con el medio por reacción directa; los átomos metálicos reaccionan químicamente con la sustancia agresiva, interesando el proceso a toda la superficie metálica y de manera similar.

### **ii. Corrosión electroquímica**

En presencia de un medio acuoso, la corrosión es de naturaleza electroquímica. Tal corrosión es un proceso espontáneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, siendo imprescindible la presencia de estos tres elementos para que este tipo de corrosión pueda existir. Se requiere asimismo de contacto eléctrico entre la zona anódica y catódica.

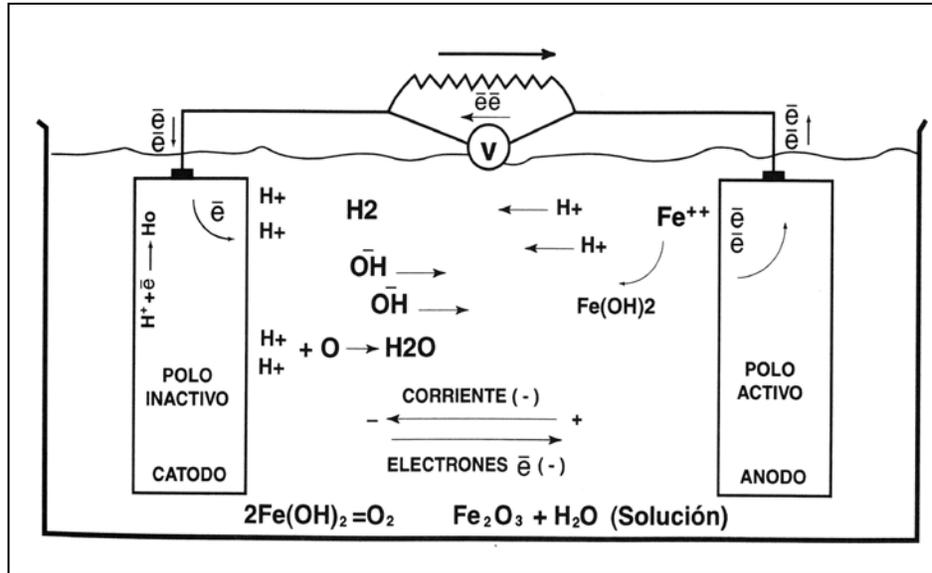
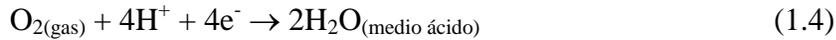
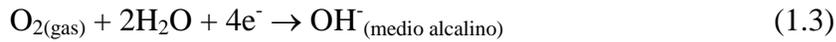
El término ánodo se usa para describir aquella porción de una superficie metálica en la que tiene lugar la corrosión (disolución) y en la cual se liberan electrones como consecuencia del paso del metal, en forma de iones, al electrolito. La reacción que sucede en el ánodo, por ejemplo, para el caso del hierro, es:



o sea, una reacción de oxidación.

Como los electrones en un compuesto metálico, se mueven en sentido opuesto al metal para entrar a la solución. El término cátodo se aplica a la porción de una superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito.

Las reacciones catódicas, o sea, reacciones de reducción, más comunes en presencia de agua son:



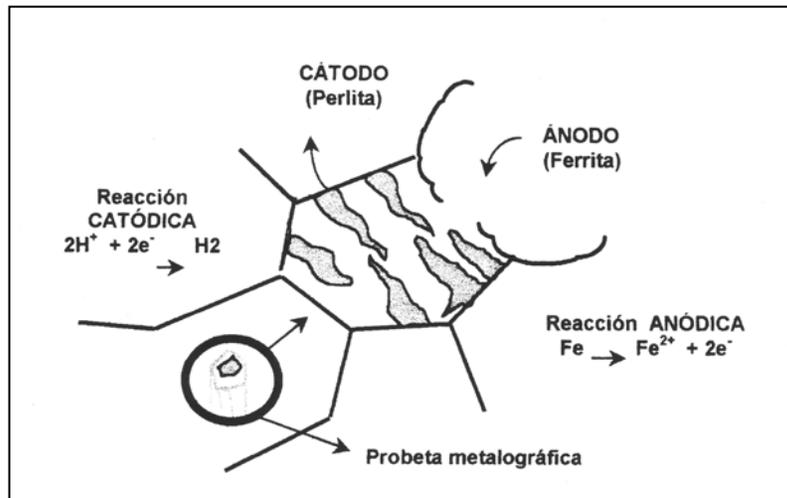
PhotoEditor

**Figura 1.2** Esquema de una celda electroquímica. (tomado de ref. 6)

En el cátodo la corriente eléctrica sale del electrolito para entrar al metal (figura 1.2), cerrándose el circuito eléctrico por medio de un conductor externo.

Este mecanismo de corrosión resulta, primordialmente, de la formación de multitud de zonas anódicas y catódicas sobre la superficie metálica, a causa de las diferentes fases existentes en la superficie; el electrolito, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, es el agua de condensación de la atmósfera que baña al metal, para lo cual se necesita que la humedad relativa del aire sea del orden del 70 por 100 o superior.

La corrosión se produce a nivel de microceldas, millones de ellas distribuidas en la superficie del metal, como se muestra en la figura 1.3.



PhotoEditor

**Figura 1.3** Corrosión producida por la formación de microceldas en su superficie. (Tomado de ref. 8)

### b. Formas de corrosión

También se puede clasificar la corrosión de acuerdo a la forma en que se presenta el deterioro del material metálico, así se tiene:

-Corrosión uniforme.

Este tipo de corrosión se produce de manera constante y regular, sin acelerarse o acentuarse, en determinadas zonas de la superficie. La llamada corrosión atmosférica se presenta generalmente en una primera etapa de tipo uniforme. Un ejemplo de corrosión uniforme se puede apreciar en la figura 1.4.

-Corrosión localizada.

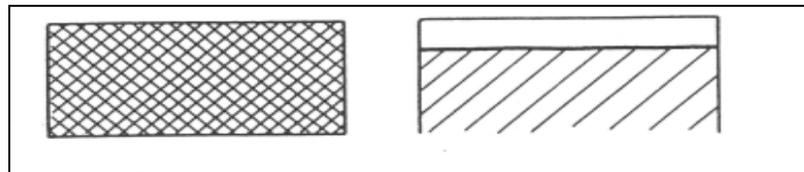
Este tipo de corrosión actúa exclusivamente sobre determinadas áreas de la superficie como consecuencia de un ataque electroquímico localizado, y puede conducir al fallo prematuro de una pieza o estructura sin afectar al resto (parte mayor) de la superficie metálica; este ataque puede ser en extremo peligroso.

Como corrosión localizada se presentan en general la mayoría de los procesos de corrosión, como por ejemplo: corrosión galvánica, corrosión por intersticios, etc.

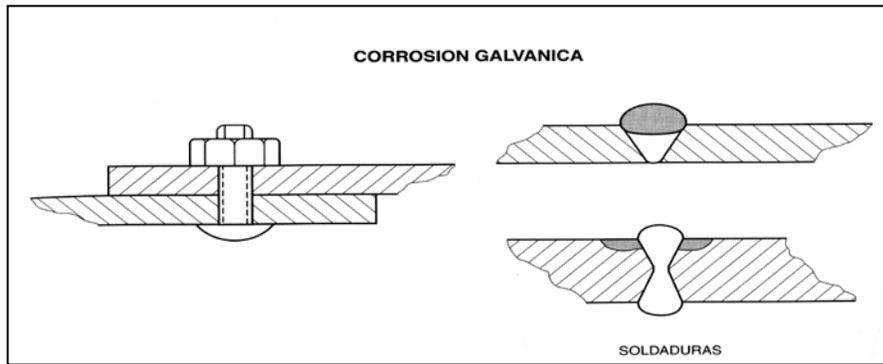
-Corrosión galvánica.

También conocida como corrosión bimetalica. Aparece cuando dos metales distintos se exponen a soluciones corrosivas o atmósferas húmedas. Uno de los dos, el más activo, se corroe con mayor rapidez que si se encontrara aislado (sin formar el par), mientras que la corrosión del metal más noble disminuye. Este es el mismo principio que utiliza el proceso de protección anticorrosiva conocido como protección catódica.

La figura 1.5 muestra diversas formas en que puede darse la corrosión galvánica.



**Figura 1.4** Esquema que representa la corrosión generalizada en una pieza metálica. Corte frontal y vista superior. (tomado de ref. 3)

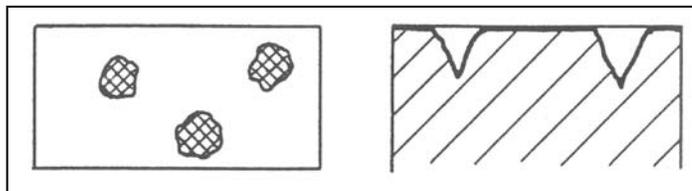


PhotoEditor

**Figura 1.5** Esquema representativo de la corrosión bimetálica o galvánica. (Tomado de ref. 6)

-Corrosión por picaduras.

Esta es una forma de corrosión muy activa que se genera a partir de la formación de pilas locales en la superficie metálica. Consiste en agujeros dispersados irregularmente en la superficie. Los principales factores asociados a este tipo de corrosión son entre otros: tipo de medio corrosivo, capa protectora o productos de corrosión que cubren parcialmente la superficie, imposibilidad de lograr la pasivación de la superficie. La figura 1.6 muestra la morfología del ataque de la corrosión por picaduras.



PhotoEditor

**Figura 1.6** Esquema representativo de la corrosión por picaduras. Se presenta corte frontal y la vista superior. (Tomado de ref. 3)

Este tipo de corrosión es muy peligroso, ya que requiere muy poca superficie para obtener una alta penetración o perforación del metal. En lugares en los que hayan

esfuerzos elevados, las picaduras pueden dar lugar a grietas o cortes, lo que puede llegar a ser muy peligroso.

-Corrosión intergranular.

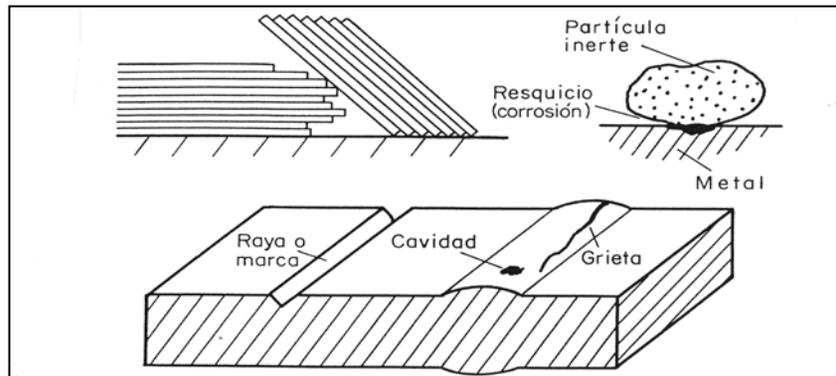
Es otro tipo de corrosión localizada, que sigue los bordes de grano sin apenas afectar al propio grano o cristal metálico, y que, está motivado, generalmente, por el funcionamiento de micropilas galvánicas entre el material del mismo borde y el del interior del grano.

La cantidad de metal corroído suele ser extremadamente pequeña. En cambio, la pérdida de resistencia mecánica es considerable a consecuencia de las múltiples grietas que dañan el metal. La susceptibilidad al ataque intergranular depende mucho de las aleaciones y del tratamiento térmico a que han estado sometidas, siendo de temer en aleaciones en donde se produce una precipitación de segundas fases en los bordes de granos. Este ataque se presenta con piezas que han sido soldadas a calentadas durante la fabricación y del cual no se sospecha, a menudo, hasta que aparece el fallo. Otras veces se presenta agrietamiento como consecuencia de una combinación de acciones electroquímicas y mecánicas. Tal sucede con la corrosión bajo tensión y la fatiga por corrosión.

-Corrosión por intersticios.

Es un tipo de corrosión muy activa que se caracteriza por ser autocatalítica y creciente. Se produce siempre que exista la posibilidad de la entrada de un líquido o solución en intersticios de unión de dos elementos metálicos o de un metal con un no metal. La figura 1.7 muestra algunas de las causas más frecuentes que ocasionan corrosión en intersticios. En este tipo de corrosión, la geometría de la cavidad es, en la mayoría de las ocasiones, el factor que domina la resistencia a este tipo de corrosión, siendo la regla general que, a menor abertura del resquicio o intersticio, mayor aceleración del ataque.

En metales expuestos a la atmósfera, las rendijas retienen a menudo agua con distintos contaminantes, mientras que las superficies más externas se lavan y se secan relativamente tras un período de humedad. Como consecuencia de ello, las superficies internas de la rendija quedan expuestas a un medio agresivo durante más tiempo y sufren un grado de ataque mayor que las zonas externas.

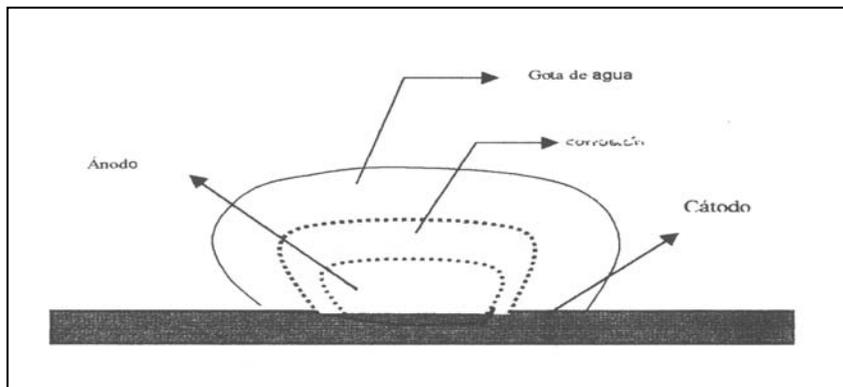


PhotoEditor

**Figura 1.7** Esquema explicativo de las causas comunes de corrosión por resquicios. (Tomado de ref. 6)

-Corrosión por aireación diferencial.

Es un tipo de corrosión que causa el ataque en las zonas menos expuestas al oxígeno proveniente de la atmósfera. Cualquier factor que motive una disminución en la concentración de oxígeno con respecto a la concentración de este elemento en otras partes de la superficie metálica da pie al funcionamiento de pilas de aireación diferencial. La reacción catódica se produce en las áreas más asequibles al oxígeno y la reacción anódica de disolución del metal en las áreas más pobres en oxígeno, como se observa en la figura 1.8.

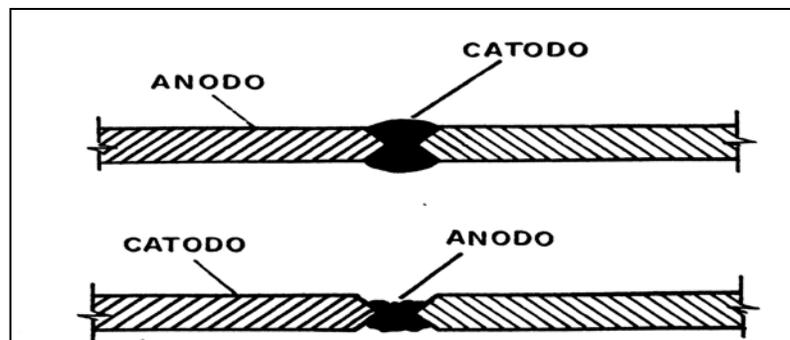


PhotoEditor

**Figura 1.8** Esquema de la corrosión que ocurre en una gota de agua por el fenómeno de aireación diferencial. (Tomado de ref. 8)

### Corrosión en soldaduras.

La causa principal de corrosión en las soldaduras tiene su arraigo en la corrosión galvánica o corrosión bimetálica. La soldadura presentará problemas importantes de corrosión bimetálica si se escoge un material de aporte de composición química diferente a la del material base. Puede manifestarse un ataque de corrosión a causa de la diferencia de potencial electroquímico resultante.



PhotoEditor

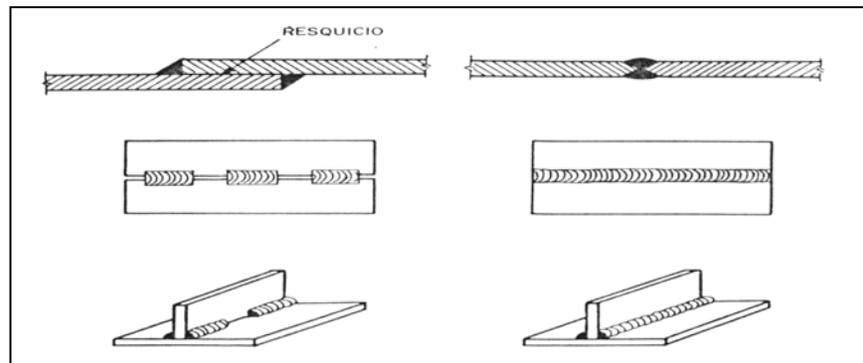
**Figura 1.9** Esquema representativo de la corrosión que ocurre en una junta soldada por pares galvánicos. (Tomado de ref. 8)

En las soldaduras en las que la diferencia de potencial electroquímico entre el material base y el de aporte son considerables, se procura escoger un material de aporte que sea más noble (catódico) que el metal base. De la misma manera, una relación elevada de áreas catódica/anódica motivará un fuerte ataque de la soldadura, capaz de producir un fallo de la estructura. La figura 1.9 esquematiza lo anteriormente expuesto.

También se pueden dar pilas de concentración en la solución electrolítica en contacto con la superficie metálica, causando el funcionamiento de pilas de concentración, o de aireación diferencial si la sustancia disuelta es el oxígeno del aire.

Aunque no se encuentra ligado estrictamente a la soldadura en sí, un diseño mal efectuado puede traer un sinnúmero de problemas de corrosión por aireación diferencial.

El diseño debe evitar resquicios y cualquier sitio en el cual el oxígeno llegue con dificultad. Es esencial un buen drenaje y ventilación de la zona unida que asegure la ausencia de electrolito. La figura 1.10 muestra algunos diseños incorrectos que son causa de corrosión.



PhotoEditor

**Figura 1.10** Esquema representativo de posibles puntos de corrosión por diseños defectuosos. (Tomado de ref. 3)

## 1.5 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

### a. Corrosión atmosférica de materiales metálicos

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de destrucción de metales y aleaciones. La gran mayoría de construcciones y piezas metálicas están bajo la acción de este medio, habiéndose calculado en más del 80 por 100 del metal producido(ref. 5). Es posible que la acción de la atmósfera sea responsable, por si sola, de más del 50 por 100 de las pérdidas totales atribuibles a la corrosión metálica (ref. 5).

A temperatura ambiente y a una atmósfera perfectamente seca, la corrosión puede ser ignorada a efectos prácticos. La corrosión es posible únicamente cuando las superficies metálicas están humedecidas. El mecanismo de corrosión es electroquímico. El electrolito es una capa de humedad, que en veces es extremadamente delgada e invisible, y otras moja perceptiblemente al metal. La corrosión depende del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica; realmente está fijada por una serie de factores: humedad, lluvia, temperatura, condiciones de exposición, contaminación atmosférica, composición del metal, propiedades del óxido formado, etc

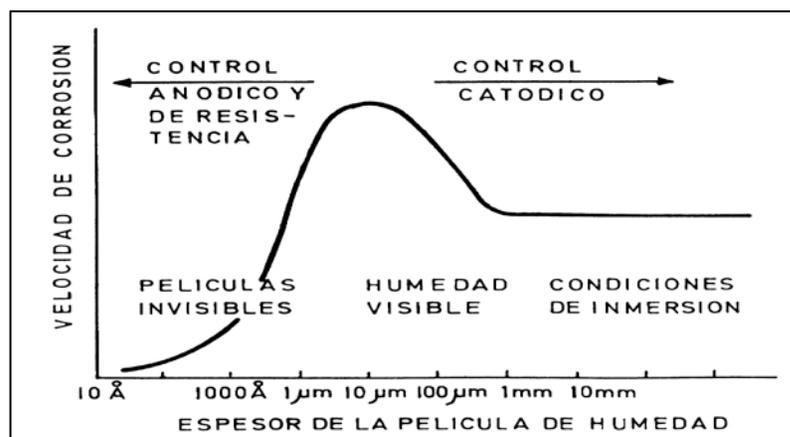
Ya que el mecanismo es electroquímico, la velocidad de corrosión atmosférica guarda relación con el proceso anódico, catódico y la resistencia óhmica del electrolito. El proceso anódico consiste en la disolución del metal dentro de una delgada capa de electrolito, en la que la concentración de cationes se eleva muy pronto hasta la precipitación de algún compuesto poco soluble, casi siempre, de pobre poder protector, probablemente un hidróxido poroso. En el proceso catódico, bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno. No existe apenas impedimento para el transporte de oxígeno a la

superficie metálica, siendo dicho impedimento menor cuanto menor sea la película de agua. El adelgazamiento de la capa de electrolito va acompañado por un aumento de resistencia óhmica entre las zonas anódicas y catódicas de las minúsculas pilas locales de corrosión que, en gran número, se distribuyen sobre el metal.

### b. Influencia del espesor de la capa de humedad

Se ha encontrado que el espesor de las capas formadas por la condensación de la humedad sobre las superficies verticales oscila entre unos 10 a 50  $\mu\text{m}$  y, en casos excepcionales, de más de 200  $\mu\text{m}$  (ref. 8).

La figura 1.11 muestra la dependencia entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa de electrolito sobre la superficie metálica. En ella se aprecia que hasta 100  $\text{Å}$  la corrosión es prácticamente inexistente, debido a la alta resistencia óhmica del electrolito, lo que dificulta la disolución metálica. A espesores crecientes, la velocidad de corrosión aumenta por disminuir la resistencia óhmica. Completadas unas pocas unidades o decenas de micra la velocidad de corrosión pasa por un máximo disminuyendo después con los ulteriores aumentos de la capa de humedad, para



PhotoEditor

**Figura 1.11** Esquema representativo de la influencia del espesor de película de humedad en la velocidad de la corrosión. (Tomado de ref. 9)

estacionarse prácticamente a partir de los 0.4-0.7 mm.

Cuando el espesor de las capas supera el máximo de la curva, la reacción catódica se convierte en determinante del proceso de corrosión. El papel del factor óhmico pierde importancia, lo mismo que la polarización anódica, pues la difusión de oxígeno a la superficie metálica es el proceso más lento.

Es importante comentar que las mayores corrosiones no corresponden al metal en inmersión total dentro del electrolito, ya que, de ser así, y bajo condiciones de convección natural, el espesor de la capa de difusión es de unos 400-700  $\mu\text{m}$ . En cambio, el espesor efectivo de la capa de difusión en las películas de humedad o acuosas sobre las superficies metálicas en la atmósfera es mucho menor, talvés de unos 30-150  $\mu\text{m}$  (ref. 11).

El hecho de que la velocidad media de corrosión en la atmósfera sea, frecuentemente, inferior a la obtenida bajo condiciones de inmersión se puede explicar por el período más corto en el cual el electrolito permanece en contacto con el metal en la atmósfera.

La experiencia confirma el hecho de que los secados rápidos acompañados de repetidas humidificaciones producen los peores efectos corrosivos (ref. 5), por ejemplo, en las zonas de humectación periódica de los barcos, en donde la corrosión llega a ser considerablemente mayor que bajo inmersión.

### **c. Formación de películas de humedad.**

Un factor responsable del depósito de agua sobre la superficie metálica es la condensación de humedad, con formación de innumerables gotas, que tiene lugar cuando

la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100 por 100, o sea, cuando la temperatura del metal desciende sobre el punto de rocío.

#### **d. Papel de la herrumbre.**

Cuando los procesos de corrosión se prolongan, se forman hidróxidos, óxidos y películas variadas sobre la superficie de los metales, las que, actuando de barrera, a menudo, disminuyen la velocidad de corrosión. En otras palabras, la magnitud del fenómeno depende de los productos de corrosión.

El óxido férrico hidratado que se forma durante la corrosión del acero contiene moléculas de agua en exceso. Alrededor del 12 por 100 de la herrumbre está constituida por agua, de la que la mitad es humedad libre disponible para el proceso corrosivo. Con el tiempo la herrumbre se deshidrata y cambia algo de volumen, lo que origina quebraduras y desconchaduras en la capa de óxido. Si desde el principio la velocidad de corrosión es muy alta, se produce una acción de cuña en la intercara metal/óxido, que repercute desfavorablemente en la continuidad de la capa de herrumbre. Por ello, la velocidad de corrosión suele disminuir con el tiempo, tanto más lentamente cuanto mayor es la corrosividad de la atmósfera.

#### **e. Contaminación atmosférica.**

Aunque el contenido de humedad de la herrumbre es un factor perjudicial por sí solo, sus efectos crecen al hallarse presente sales solubles.

Los factores de contaminación (contaminantes gaseosos y sólidos) junto con los factores meteorológicos (humedad, lluvia, niebla y rocío) determinan la intensidad y naturaleza del proceso corrosivo.

Está demostrado que el NaCl y el SO<sub>2</sub> son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La sal llega a la atmósfera desde el mar. El anhídrido

sulfuroso se encuentra en el aire que ha sido impurificado por humos industriales, combustibles sólidos y líquidos al quemarse, por la emanación de azufre desde los volcanes, etc.

Durante la formación de la herrumbre en una atmósfera contaminada por SO<sub>2</sub> se produce ácido sulfúrico.

La reacción siguiente representa la corrosión del metal en una atmósfera no contaminada



mientras que en el caso de estar presente el SO<sub>2</sub> debe formularse



Aún cuando el ácido sulfúrico reaccione con el hierro para dar sulfato de hierro, se regenera por hidrólisis de esta sal en presencia de más humedad. El ácido sulfúrico es un electrolito fuerte que eleva considerablemente la conductividad de la película acuosa sobre la superficie.

Para valorar debidamente el papel del SO<sub>2</sub> conviene tener presente que su solubilidad es unas 1300 veces mayor que la del oxígeno (ref. 9). Por ello, aún cuando sea baja la concentración de ese gas en el aire, en la delgada capa del electrolito puede elevarse considerablemente.

## **1.6 CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL ÁREA DEL EMBALSE ARENAL.**

### **a. Determinación del área de influencia del fenómeno de lluvia ácida como producto de la actividad del volcán Arenal.**

De acuerdo con estudios realizados en el área del Embalse Arenal durante un período de cuatro años, el cual cualifica y cuantifica la influencia del fenómeno de lluvia ácida como producto de la actividad eruptiva del volcán Arenal (ref. 4), se llegó a la conclusión de que la lluvia ácida representa una poderosa fuerza corrosiva en dicha zona, aparte de otras manifestaciones, como son: efectos en los suelos, en la salud de la población, en la vegetación, en el ganado, y otros efectos no cuantificados hasta el momento.

Dicho estudio estima que la mayor concentración de gases, producto de la actividad eruptiva del volcán, es dirigida por las corrientes de vientos predominantes durante todo el año hacia el sector suroeste del volcán (figura C1). Esta área comprende el embalse Arenal y parte considerable de los bosques de las cuencas de los ríos Arenal, Aguas Gatas, Caño Negro, Río Chiquito y otros; algunos centros de población, como: El Castillo, El Silencio, Viejo Arenal, Tronadora. En estos lugares es evidente la acción de los materiales eruptivos (presencia de ceniza en las hojas de las plantas, etc).

Estos estudios confirmaron que la acidificación atmosférica durante cuatro semestres consecutivos fue permanente. A pesar de ser Tronadora el punto más lejano al volcán Arenal en el grupo (aproximadamente 20 kilómetros en línea recta), no muestra diferencias importantes con los datos del poblado El Castillo, que se ubica a sólo 6 kilómetros del volcán.

### **b. Determinación de la velocidad de corrosión en diversos materiales**

Cualquier material que el hombre utilice para la construcción, está sujeto a los factores ambientales tales como temperatura, viento, humedad, lluvia, radiación solar, entre otros. Estos factores naturales junto con las alteraciones producidas por la actividad del hombre contribuyen a la degradación de los materiales (ref. 4).

En Costa Rica, se ha encontrado que cuando las precipitaciones húmedas o secas presentan un pH de 4.5 o menor, el recubrimiento de los materiales se disuelve más rápidamente, lo que da origen a una mayor corrosión (ref. 4).

Casi siempre, se realizan investigaciones que tienden a determinar la susceptibilidad de los materiales de construcción a la contaminación del aire, pero, generalmente, no se pone atención a un elemento contaminante en particular. Sin embargo, estudios llevados a cabo en el área del Embalse Arenal durante cuatro semestres, consideraron el efecto de la precipitación ácida sobre la infraestructura del lugar (ref. 4). Se pretendió comparar los niveles de corrosión del acero en ambientes acidificados como producto de la actividad del Volcán Arenal. Se comparó las velocidades de corrosión del acero en cuatro sitios diferentes: dos de ellos con lluvia ácida (Sangregado y Tronadora) y los otros dos sin lluvia ácida (Cañas y Santa Clara).

Dicho estudio demostró que las zonas de mayor velocidad de corrosión eran aquellas que tenían mayor incidencia de acidez. Esto indica que a mayor acidez (menor pH), la velocidad de corrosión es mayor. El análisis muestra una velocidad de corrosión mayor del acero en los primeros seis meses de exposición que en los restantes 18 meses, siendo prácticamente la velocidad de corrosión 1.8 veces mayor en el primer semestre que en el segundo, y luego se observa una tendencia hacia un valor estable. Este dato es importante porque resalta el efecto protector que realiza la capa de óxido.

La velocidad de corrosión es mayor según crezca el nivel de acidificación promedio de la precipitación pluvial en cada una de las estaciones. Por esta razón se obtuvieron mayores valores para las velocidades de corrosión en la estación de Sangregado (pH promedio = 4.57), seguidos por Tronadora (pH promedio = 4.98).

Otro dato importante que dio a luz este estudio fue el hecho de que el recubrimiento de óxido sobre el acero provoca una disminución de la velocidad de corrosión conforme aumenta el tiempo de exposición.

## **1.7 MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN.**

Todos los materiales metálicos tienen una tendencia natural a deteriorarse o corroerse la cual es irreversible, sin embargo, se han desarrollado muchos métodos para disminuir este problema al máximo. Entre los principales métodos para controlar la corrosión se encuentran:

### **a. Remoción de los elementos corrosivos.**

Este método de control de la corrosión involucra una alteración del ambiente. Por lo general, el método consiste en agregar elementos inhibidores de la corrosión a líquidos dentro de circuitos cerrados, por ejemplo, calderas. Este método es sólo por inmersión, por lo cual su uso es limitado.

### **b. Mejores materiales de construcción.**

En la mayoría de las ocasiones, al escoger un material para construcción, sólo se tiene en cuenta sus propiedades físicas y su resistencia mecánica, sin tomar en cuenta su resistencia a la corrosión. Estos materiales se ha popularizado últimamente, sin embargo, esto no es lo más recomendable. Por ejemplo, el uso del hierro y el acero; son materiales que se corroen muy fácilmente.

En muchos casos se consigue disminuir inicialmente los costos, pero ello se traduce luego en un incremento de los gastos de mantenimiento durante la vida de la estructura.

### **c. Protección catódica.**

Este método es muy usado en materiales que son propensos a la corrosión en condiciones sumergidas o enterradas. Se basa en el hecho de la corrosión bimetalica. Se une a la estructura a proteger un metal que es más activo, el cual hará el papel de ánodo. Por ello, si se requiere proteger una estructura metálica, lo que se debe hacer es elegir un metal más activo, que se encuentre más arriba en la serie galvánica. Por ejemplo, en el caso del acero, se puede elegir como ánodo al zinc o al magnesio. Cuando estos metales, el acero y el zinc, están conectados, se produce una pila de corrosión, en la cual el zinc, debido a su actividad mayor, constituirá el ánodo y el acero el cátodo. De esta manera, el acero permanecerá intacto hasta que el ánodo de zinc se haya corroído.

### **d. Sobredimensionamiento.**

Consiste en anticiparse a las pérdidas de material metálico que van a ocurrir por causa del proceso de corrosión. Este método tiene muchas desventajas, entre las que resalta el hecho de que los costos por sobredimensionamiento suelen ser muy altos, además, el hecho de que, no se puede predecir con exactitud cual va a ser la velocidad de

corrosión para un material determinado, ya que muchas veces varía, de acuerdo a las condiciones ambientales existentes.

**e. Colocar una barrera entre el metal y el ambiente.**

Radica en aislar la superficie a proteger mediante una barrera impermeable, que no permita que penetren los agentes corrosivos. Este método de protección anticorrosiva es el más popular de todos los métodos. Consiste en términos generales en aislar la superficie metálica del ambiente y de todos los agentes corrosivos mediante una barrera impermeable. Específicamente significa revestirla con una pintura o recubrimiento. Al elegir la barrera apropiada para una determinada situación, es vital efectuar una adecuada preparación de la superficie a proteger y la técnica de aplicación.

## **1.8 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS.**

**a. Conceptos**

Es importante diferenciar los conceptos de pintura, recubrimiento y revestimiento. Se conoce por pinturas a aquellas películas que poseen un espesor menor a 50  $\mu\text{m}$ , las películas que se hayan entre los 50 y 1000  $\mu\text{m}$  se les llama recubrimientos y a las que son mayores a los 1000  $\mu\text{m}$  se les denomina revestimientos (ref. 9).

**b. Clasificación de recubrimientos**

Una de las clasificaciones principales de los recubrimientos es de acuerdo a su naturaleza: Recubrimientos metálicos, recubrimientos cerámicos, recubrimientos sintéticos y pinturas o recubrimientos no metálicos.

#### **i. Recubrimiento metálico.**

Consiste en recubrir el metal base con un metal de aporte que sea resistente. Tiene un doble propósito: el ornamental y el protector. Puede lograrse mediante electrodeposición química de metales como el zinc, cobre, cadmio, estaño, cromo, etc. Inmersión en metales fundidos, tal como el proceso de galvanizado por inmersión en caliente (GIC), aluminizado, etc. Proyección del metal fundido mediante pistola atomizadora y, por último, reducción química (sin paso de corriente); se pueden lograr depósitos de níquel, cobre, paladio, entre otros.

#### **ii. Recubrimiento cerámico.**

Se utiliza con un efecto puramente protector. Entre los recubrimientos principales se encuentran: recubrimientos sobre hormigón, recubrimiento sobre metales, entre otros.

#### **iii. Recubrimiento sintético.**

Puede ser para efecto reforzante o protector. Entre los principales están: forros de PVC (cloruro de polivinilo), poliéster, polietileno, teflón siliconas, neopreno, entre otros.

#### **iv. Recubrimiento no metálico.**

La aplicación de recubrimiento no metálico es el método de protección anticorrosiva en los metales más ampliamente difundido. Se calcula que por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie metálica expuesta a la corrosión, unos 85-90 m<sup>2</sup> de superficie están protegidos por revestimientos no metálicos (ref. 9).

Dentro de su complejidad, los recubrimientos no metálicos o pinturas son una mezcla líquida que al ser aplicada sobre una superficie tiene la propiedad de formar una capa continua y de transformarse en película sólida. Los componentes básicos de una pintura pueden apreciarse en la tabla 1.1.

Todas las pinturas tienen un punto en común, que es el formador de película, resina o aglutinante. Esta resina debe poseer una excelente adherencia al sustrato, debe estar en estado líquido al aplicar el revestimiento, ello se logra al añadirle el solvente.

**Tabla 1.1** Componentes básicos de una de pintura

<b>Pintura</b>		
<b>Vehículo</b>	<b>Pigmentos</b>	<b>Aditivos</b>
No volátil	Colorantes	Plastificantes
Volátil	Reforzantes	Secantes
	Químicos	humectantes
		Dispersantes
		Tixotroizantes
		Etc

Excel

La resina y el solvente juntos forman lo que se conoce como vehículo. Entonces se tiene, vehículo no volátil o resina, y vehículo volátil o solvente.

Los pigmentos son productos químicos naturales o sintéticos que tienen como función principal el darle el color a la pintura. También sirven como refuerzo de la capa de pintura.

Los aditivos son productos químicos que modifican las propiedades de la pintura. Se agregan en pequeñas cantidades.

El proceso de curado o formación de la película sólida puede obedecer a varios mecanismos. Entre los principales se tiene:

- Evaporación del solvente.
- Oxidación.
- Reacción química.

Por lo general en la protección de recubrimientos no se emplea sólo una pintura sino una serie de ellas, cada una con un fin distinto, que en conjunto llegan a formar lo que se conoce como sistema de pinturas. Este lo componen un máximo de cuatro diferentes pinturas, aunque con frecuencia sólo llegan a formar dos o tres.

Un esquema completo de un sistema de pinturas lo componen :

- Pre-primario
- Primario
- Intermedio
- Acabado

Cada componente del sistema tiene su función particular en el sistema, y si alguno de ellos falta, el sistema será menos efectivo.

El componente pre-primario se utiliza sólo en casos en que la superficie este muy atacada por óxidos y productos de corrosión, siendo imposible la aplicación de una limpieza de superficie de manera adecuada. Este componente tiene una extraordinaria adherencia al sustrato y una gran retardancia de la corrosión.

El componente primario se destaca de todos los demás por su excepcional importancia. Sobre este componente descansan dos grandes responsabilidades : el control de la corrosión y la adherencia. Este componente representa la unión entre el sustrato y la capa intermedia o el acabado, según sea el caso. Este componente debe

poseer una excelente adherencia al sustrato y proporcionar un fuerte anclaje al componente que lo recubrirá.

El componente intermedio, el cual no siempre es necesario, posee altas relaciones pigmento/vehículo. Su función principal es proporcionar de espesor al sistema y suministrar una buena superficie para su unión con la pintura de acabado.

El componente de acabado tiene como requisito principal el poseer una excelente resistencia al ambiente en contacto con ella. También debe poseer una excelente adherencia, propiedades de retención del color y brillo, resistencia a la abrasión, entre otros requisitos.

### **c. Preparación de la superficie.**

Constituye la etapa más importante para garantizar la buena adherencia de la capa primaria al sustrato metálico.

#### **i. Preparación y tratamiento de superficies para pintar**

Se entiende por preparación de la superficie a la limpieza que se realiza para eliminar del sustrato metálico, óxidos, grasas, aceites, partículas de polvo, etc., por métodos tanto físicos como químicos, dejándola en condiciones óptimas para recibir la primera capa de pintura o recubrimiento. Además, se busca dar rugosidad al metal e incrementar la superficie sobre la que se va a depositar la pintura, con lo que tendrá mayor resistencia mecánica.

La preparación de la superficie constituye la etapa más importante para obtener un óptimo resultado con un revestimiento protector, por lo cual, la adhesión de la pintura a la superficie depende de la correcta elección y aplicación del método de preparación de superficies.

Se han establecido normas aceptadas a nivel mundial con las cuales se pueden clasificar los estados superficiales de corrosión del acero sin pintura que se encuentran de manera normal. Se conocen internacionalmente tres tipos principales de sistemas ; la Norma SSPC (Steel Structures Painting Council), la Norma Sueca y la Norma NACE (National Association of Corrosion Engineers). La Norma Sueca es la más ampliamente difundida y abarca cuatro tipos de superficies iniciales, con y sin pintura, y siete tipos de limpieza del metal.

Las Normas Suecas SIS (ref. 12), clasifican las superficies corroídas del acero sin pintar en cuatro grados o estados, desde el grado A, el cual considera una superficie metálica con la chapa de laminación intacta y sin corrosión, hasta el grado D, el cual corresponde a una superficie de acero con corrosión generalizada, ya sin chapa de laminación y llena de cavidades.

También existe la clasificación del estado superficial del acero pintado previamente, la cual va del grado E, que es aquel en el cual la pintura está intacta sobre la superficie metálica, los puntos de corrosión no sobrepasan el 10 por 100, hasta el grado H, en el cual grandes áreas de la superficie se hallan cubiertas con productos de corrosión y la pintura no tiene adherencia. Estas normas pueden ser consultadas con detalle en la referencia 12.

La selección del método adecuado de preparación de superficie depende de diversos factores relacionados con el tipo de impurezas presentes en la superficie, diseño de la estructura o pieza, espacio existente para realizar el trabajo, toxicidad de los productos químicos utilizados, etc.

La Norma Sueca define dos tipos principales de limpieza del metal, denominados St y Sa. Para cada uno de estos dos tipos existen cuatro diferentes grados de limpieza para St y cinco grados para Sa.

Cada uno de estos métodos de preparación de la superficie puede ser consultado con detalle en la ref. 12.

## **ii. Relación de costos en un sistema de pintado**

Levinson y Spindel (ref. 3) determinaron la incidencia que tienen los distintos factores sobre el costo total de una operación de pintado. Estos autores determinaron que el costo de la preparación de la superficie es aproximadamente el 40 por 100 del costo total del sistema de pintado, sin contar el costo del revestimiento y el de aplicación de la pintura.

## **iii. Principales contaminantes del acero**

### **iii a. Óxidos de laminación en el acero.**

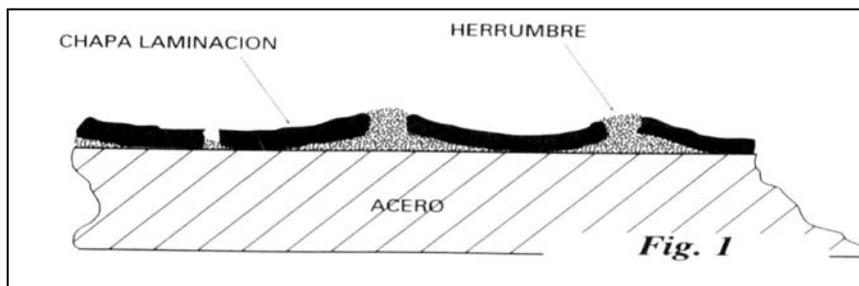
La escoria u óxido de laminación en el acero está formada por varios grados de óxido de hierro que se producen en la laminación en caliente. Entre sus principales componentes se tienen al  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y el  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita), los cuales se producen a elevada temperatura. Esta laminilla es muy dura, sin embargo es frágil y quebradiza, posee alto coeficiente de dilatación térmico y, lo más importante es que es catódica con respecto al acero, por ser más estable.

Todo esto conlleva al hecho de que cualquier grieta o abertura en la capa del óxido de laminación provocará una corrosión galvánica que irá produciendo el desprendimiento de la capa de laminación al oxidarse la base, como se aprecia en la figura 1.12. Este óxido de laminación, principalmente en exteriores, es muchas veces la

causa de una corrosión galvánica, por lo cual es necesario removerlo antes de aplicar un revestimiento.

### iii b. Efectos de las sales.

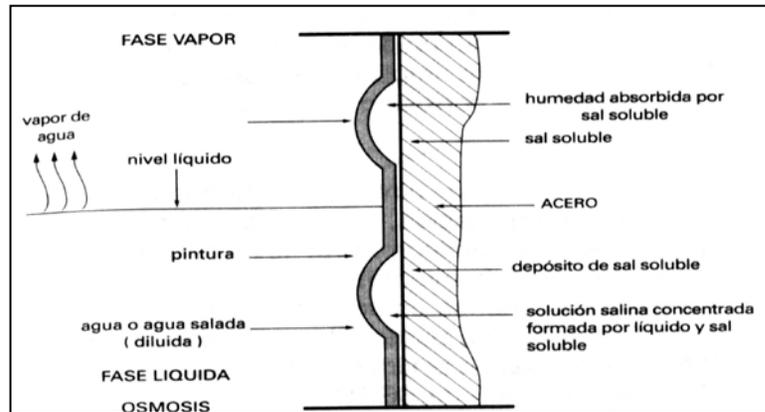
Cuando las sales son solubles, si se aplica una pintura sobre una superficie con productos de corrosión (figura 1.13), éstos quedan atrapados entre la superficie y la capa de pintura. Como la mayoría de estos productos son solubles, entrarán en actividad al pasar el agua la membrana de revestimiento. O sea, la humedad exterior penetrará a través de la película y disolverá las sales formando una solución concentrada de ella en forma de ampollas. Esto dará lugar a la formación de corrosión localizada en el sitio donde se encuentre la ampolla. Además, algunas pinturas no son tan resistentes para mantener el ampollamiento por lo que producen roturas en dicho sitio.



PhotoEditor

**Figura 1.12** Esquema del óxido de laminación que cubre al sustrato metálico. (Tomado de ref. 6)

Si la calamina u óxido de laminación fue eliminada en la acería por tratamiento ácido o decapado, las condiciones en que se encuentre el acero dependerán de la aplicación de un revestimiento graso de protección temporaria



PrhotoEditor

**Figura 1.13.** Esquema explicativo del efecto de sales entre el substrato metálico y la capa de recubrimiento. (Tomado de ref. 6)

### iii c. Productos de corrosión.

Corresponden a una gran gama de compuestos de hierro de un volumen alto, porosos, con elementos solubles y con humedad.

## 1.9 MÉTODO DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA.

### a. Definición y propósito de la prueba

El ultrasonido es una vibración mecánica con un ámbito de frecuencia mayor al audible por el hombre. Dicha onda se transmite a través de la materia o medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con la ayuda de un aparato creado para ese fin.

La inspección por ultrasonido se puede definir como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo mecánico, diseñado para detectar discontinuidades y variaciones en la estructura interna de un material.

Lo anterior se comprende mejor si se tiene claro el concepto de onda de sonido. Una onda de sonido tiene tres regiones o zonas bien definidas: la infrasónica, la sónica y la ultrasónica.

Para materiales metálicos se utilizan frecuencias que van de los 200 KHz a los 25 MHz.

### b. Principio del método

El principio de funcionamiento del ultrasonido es la impedancia acústica ( $Z$ ), que es la resistencia de un material a las vibraciones de las ondas ultrasónicas. La impedancia es el producto de la velocidad máxima de vibración de un material por la densidad del mismo.

$$Z = \rho * V_m \quad (1.7)$$

La impedancia es mayor en los cuerpos sólidos que en los líquidos y, por lo tanto, mayor en los líquidos que en los gases. En la tabla C3 se muestran valores de impedancias acústicas para varios materiales de empleo común.

### **c. Descripción de las partes del equipo**

La figura 1.14 representa un diagrama general de un sistema de ultrasonido, describiendo cuales son sus partes más importantes.

El equipo electrónico de ultrasonido genera pulsos eléctricos muy breves, del orden de microsegundos, con una diferencia de potencial entre los 100 y los 1000 volts y con una frecuencia de repetición entre los 125 y los 1500 pulsos por segundo. Los pulsos eléctricos que genera el equipo son conducidos por el cable coaxial hasta el transductor, el cual mediante un material electrocerámico que tiene propiedades piezoeléctricas los transforma en vibraciones mecánicas con frecuencias entre los 200 KHz y los 25 MHz.

Estas vibraciones son transmitidas al material que se quiere examinar, donde se propagan y reflejan en la superficie opuesta, o bien, pueden ser reflejadas, atenuadas o dispersadas por una discontinuidad. Los pulsos reflejados son captados por el transductor, el cual los transforma en impulsos eléctricos que son analizados y representados en un digitalizador de imágenes.

Se utiliza un medio acústicamente conductor entre el palpador y la superficie a analizar, para desplazar la fina película de aire entre ambos; dicho medio acoplante es necesario, dado que el aire atenúa fuertemente el sonido.

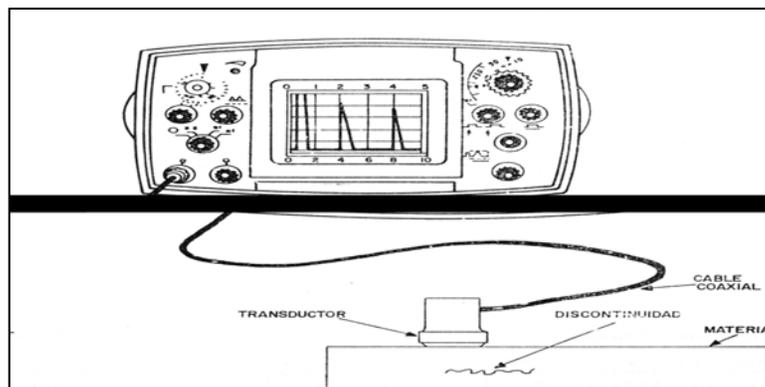
### **d. Principales aplicaciones de la inspección ultrasónica**

Dos de las aplicaciones más importantes de la inspección ultrasónica son la detección de discontinuidades y la medición de espesores.

### **i. Detección de discontinuidades**

Una discontinuidad es una falta de homogeneidad en la estructura física normal de un material. Cuando la onda ultrasónica pasa a través de un material que contiene una discontinuidad, producirá un sonido reflejado; la reflexión dependerá de la magnitud de la discontinuidad.

En el caso de detección de discontinuidades, es necesario definir el tipo de material que se inspeccionará, ya sea productos laminados, cilíndricos, piezas fundidas, soldadas, etc., para así poder llevar a cabo una inspección correcta.



PhotoEditor

**Figura 1.14** Representación de las partes principales de un equipo de inspección ultrasónica. (Tomado de ref. 9)

### **ii. Medición de espesores**

En el caso de medición de espesores, se lleva a cabo mediante equipos de pulso-eco. La inspección tiene como finalidad detectar las reducciones de espesor en superficies, que son producidas por corrosión o deterioro, debido a la acción de agentes ambientales.

## 1.10 MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS DE ESTUDIO DE LA CORROSIÓN

Los métodos para el estudio de la corrosión se pueden dividir en dos grandes grupos: los no electroquímicos y los electroquímicos.

En el primer grupo se encuentran los gravimétricos, que se basan en la medida de la pérdida de masa; los analíticos, en los cuales se determina la concentración de los compuestos presentes y los volumétricos, en los que se determina el volumen de hidrógeno desprendido o de oxígeno consumido en los procesos catódico. Como ventaja de estos métodos se encuentra su alta exactitud a la vez que proporcionan una medida directa de la velocidad de corrosión. Su desventaja principal consiste en lo elevado del tiempo que requiere de exposición, con resistencia a la corrosión alta y que sólo se determinan valores puntuales sin indicación del mecanismo de corrosión.

En cuanto a los electroquímicos están: el método de intersección (Tafel), el método de resistencia a la polarización lineal (LPR), las técnicas de impedancia, método de impulsos, ruido electroquímico y métodos potenciodinámicos. Las ventajas principales de estos métodos son: alta sensibilidad en las medidas de los potenciales y densidades de corriente, rápidos, brindan información diferencial sobre la velocidad instantánea de corrosión, se pueden utilizar para obtener la evolución del fenómeno con el tiempo y obtener información integral correspondiente. Su desventaja estriba en el hecho de que las medidas que se obtienen son indirectas.

La corrosión existe gracias a la formación y movimiento de partículas con carga eléctrica. Esto permite que sea posible calcular la velocidad de la corrosión midiendo magnitudes eléctricas, ya que la transferencia de cargas eléctricas y la densidad de corriente están relacionadas por la Ley de Faraday:

$1F = 1 \text{ mol de electrones} = 9.648 \times 10^4 \text{ C} = 1 \text{ A/s}$   
 donde F es el Faraday, C son Culombios y A amperios.

Las sustancias sufren corrosión a su potencial libre de corrosión,  $E_{\text{corr}}$ , presentándose una equivalencia entre las corrientes de los procesos anódico y catódico parciales, y se puede representar como:

$$I_t = I_a + I_c = 0 \quad (1.8)$$

Donde  $I_t$  es la corriente total,  $I_a$  es la intensidad de la corriente anódica e  $I_c$  es la corriente de la reacción catódica.

La transferencia de cargas debe de vencer al campo eléctrico, por lo que la densidad de corriente de las semirreacciones se expresa como:

$$I_a = I_{\text{corr}}(\exp((\alpha n F/RT)\eta)) \quad (1.9)$$

$$I_c = -I_{\text{corr}}(\exp((-\beta n F/RT)\eta)) \quad (1.10)$$

Donde  $I_{\text{corr}}$  es la densidad de corriente buscada,  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes relacionados con la caída del potencial a través de la doble capa que rodea al electrodo,  $n$  es el número de oxidación en la reacción redox,  $F$  la carga eléctrica,  $\eta$  es la polarización aplicada,  $T$  es la temperatura absoluta y  $R$  es la constante de los gases ideales.

Cuando se rompe el equilibrio, por una polarización, o sea, cuando se desplazala reacción del  $E_{\text{corr}}$ , se aprecia una corriente externa, resultante de la suma de los procesos parciales

$$I_t = I_a + I_c = I_{\text{corr}}(\exp((\alpha n F/RT)\eta)) + (-I_{\text{corr}}(\exp((-\beta n F/RT)\eta))) \quad (1.11)$$

A partir de esta ecuación se puede estimar  $I_{\text{corr}}$ , es decir, la velocidad de corrosión, por medio de las pendientes de Tafel o de la resistencia de polarización lineal.

### a. Método de las pendientes de Tafel

Para polarizaciones suficientemente grandes se tiene que:

$$\eta \gg RT/\alpha nF \quad \text{o bien} \quad -\eta \gg RT/\beta nF \quad (1.12)$$

por lo que la ecuación xx se reduce a las reacciones x y xx de las reacciones catódica y anódica, que corresponden con la recta de Tafel respectiva, con pendientes:

$$b_a = 2.3 RT/\alpha nF \quad \text{y} \quad (1.13)$$

$$b_c = -2.3 RT/\beta nF \quad (1.14)$$

Al aplicar logaritmo a la ecuación se obtiene:

$$\log I_a = \log I_{\text{corr}} + (\alpha nF/2.3 RT) \eta \quad (1.15)$$

Debido a que  $I_{\text{corr}}$  tiene valores determinados para un sistema específico, los valores constantes pueden agruparse para obtener las relaciones:

$$\eta = a + b_a \log I_a \quad (1.16)$$

$$\eta = c + b_c \log I_c \quad (1.17)$$

En las proximidades de  $E_{\text{corr}}$ , para polarizaciones pequeñas, los procesos de reducción y oxidación se influyen y las curvas de polarización se alejan de lo previsto por la ecuación xx. Sin embargo, para  $\eta = 0$  ( $E_{\text{corr}}$ ) resulta que:

$$I_a = | I_c | = I_{\text{corr}} \quad (1.18)$$

por lo que con sólo extrapolar las rectas de Tafel, obtenidas a polarizaciones grandes hasta la línea  $E = E_{\text{corr}}$ , se alcanza la  $I_{\text{corr}}$  correspondiente con la pérdida del material y la velocidad de corrosión por la ley de Faraday.

### b. Método de resistencia de polarización lineal

Para este método se utiliza la corriente alterna, como medio para estudiar la interfase metal–electrolito. Este procedimiento tiene su fundamento en que las curvas

de polarización son casi rectas y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión.

Para un sistema específico, las pendientes de Tafel se pueden considerar constantes y la fórmula adopta su fórmula más simple:

$$I_{\text{corr}} = B \Delta I / \Delta E = B / R_p \quad (1.19)$$

En la práctica se aplica una pequeña polarización de  $\pm 10$  mV casi siempre, y se mide el  $\Delta I$  correspondiente, dando así nombre al método, ya que según la ley de Ohm, el cociente  $\Delta E / \Delta I$  es la resistencia.

## **CAPÍTULO 2. Metodologías**

## **2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA SUPERFICIE FLOTANTE**

### **a. Recopilación de información**

#### **i. Búsqueda de datos referentes al diseño y proceso de fabricación de la superficie flotante**

Se recopiló información referente a la estructura flotante, tomando en consideración toda la información archivada existente así como también entrevistas con personas que participaron del diseño y del proceso de fabricación.

Se indagó acerca de las reparaciones de mantenimiento y cambios que se le hubieran realizado en algún momento de su utilidad a la estructura. Esta recopilación de información tuvo como fin principal tener un criterio de los requerimientos de ingeniería en corrosión que primaron al momento de su diseño y desarrollo, como son: planeamiento e ingeniería preliminar, ingeniería detallada, adquisiciones, fabricación y construcción, usando como base criterios de calidad desarrollados por ASTM y NACE.

#### **ii. Visitas de inspección al sitio de interés**

Se realizaron visitas periódicas de inspección al sitio de interés en las cuales se evaluó el estado de la superficie flotante.

Se inspeccionó el estado de las barandas de seguridad, la plataforma y las paredes laterales de la superficie flotante. Se hizo imposible inspeccionar el estado de la superficie inferior del piso, ya que, se encontraba enterrada o encallada en la orilla del Embalse Arenal.

Dichas inspecciones incluyeron evaluación de la soldadura del barco y el efecto de la corrosión en las zonas afectadas térmicamente. Además, se investigó los tipos de

electrodo usados en el proceso de fabricación del barco con el fin de evaluar su compatibilidad electroquímica con el material laminado y perfilado del barco.

Se evaluó la posibilidad de corrosión bajo tensión y corrosión por esfuerzos de fatiga en los sitios inferiores de la superficie flotante sujetos a esfuerzo mecánico severo en condiciones de servicio.

Se inspeccionó el estado del laminado de la superficie flotante, tanto en su interior como en su exterior, buscando sitios críticos de avance de corrosión. Se investigó cual es el mecanismo de avance de la misma.

### **iii. Caracterización de la zona geográfica**

Se realizó una recopilación de información bibliográfica referente a las condiciones climáticas de la zona y su influencia en la corrosión de los materiales metálicos. Se evaluó la influencia que tiene la lluvia ácida, como producto de la actividad eruptiva del Volcán Arenal, en los materiales metálicos.

### **iv. Preparación de dibujo técnico de superficie flotante**

Se preparó un dibujo de la superficie flotante, siguiendo las dimensiones originales de la estructura. El dibujo se realizó usando el programa de computo llamado AutoCad. El dibujo se observa en la figura C1.

## **b. Definir estructura metalográfica de la superficie flotante**

### **i. Preparación de plan de toma de muestras**

Se definió un método de preparación de muestras metalográficas de la superficie flotante según la Norma ASTM E 3 (ref. 1).

## **ii. Preparación de toma de muestras**

Al momento de preparar las muestras para su posterior análisis metalográfico, se utilizaron para este ensayo destructivo la máquina cortadora metalográfica marca Buehler, modelo Abrasimet 2, serie 468-MS-184S; la lijadora manual marca Buehler, modelo Handimet 2, serie 499-HRG-951; la prensa hidráulica marca Buehler, modelo Simplimet 3, serie 499-N3S-00981 y la máquina pulidora rotacional marca Buehler, modelo Metaserv 2000, serie 499-MGTV-252.

## **iii. Análisis metalográfico de las muestras**

Después de preparar las muestras se procedió a analizarlas metalográficamente. Se procedió a revelar su estructura siguiendo el método estándar para pruebas de microataque en metales, según la Norma ASTM E 407 (ref. 1), atacante 74.

Se analizaron las muestras metálicas en un microscopio metalográfico marca Olympus, modelo PME 3, serie 504002. Se comparó con los patrones que se encuentran en el libro ASM Handbook (ref. 2) y se identificó la estructura metalográfica.

Luego de observar las muestras en el microscopio metalográfico y de identificarlas plenamente, se fotografiaron utilizando una cámara fotográfica marca Olympus, modelo PM -C35B, serie 5E-06314. Para tomar las fotomicrografías metalográficas, se siguió la Norma ASTM E 883 (ref.1).

## **c. Análisis de velocidad de corrosión**

### **i. Método de medición de espesores**

Se determinó la velocidad de ataque de la corrosión en el material metálico, midiendo la penetración que tiene la corrosión a través del tiempo, en unidades de milímetros por año.

Para determinar la penetración de la corrosión en el material, se midió el espesor de lámina en la superficie flotante por medio de la técnica de ultrasonido, método de eco-pulsos, y se comparó con el espesor original de lámina, según los requerimientos generales para acero estructural laminado, mostrados en la Norma ASTM A 6 (ref. 1).

Se utilizó un equipo de ultrasonido marca Technology Corporation, modelo AD-3251F Ultrasonic Thickness Gage, serie 3600227.

La examinación ultrasónica se hizo siguiendo la Norma ASTM 114 (ref. 1).

Los valores experimentales obtenidos de velocidad de corrosión se pueden observar en la tabla 3.2.

## **ii. Método electroquímico**

La segunda manera en que se determinó la velocidad de la corrosión en el material metálico fue por medio de un ensayo electroquímico de medición del polarización de resistencia.

Se determinó la penetración que tiene la corrosión en el substrato metálico en unidades de milímetros por año (mm/año). Las normas ASTM G59 (ref. 1) y D 2776 (ref.1) describen el procedimiento estándar seguido para obtener las mediciones de velocidad de corrosión por el método de polarización lineal de resistencia (LPR).

Para realizar este ensayo se requirió montar una muestra metálica de la

superficie flotante en resina plástica. El área del electrodo de trabajo fue de 0.36 cm<sup>2</sup>. Además, se necesitó del electrolito del sitio de interés, esto es, del embalse Arenal. Como electrodo de referencia se usó el electrodo de plata/cloruro de plata (0.1 N) y como electrodo auxiliar se usó una lámina de platino. El potenciómetro usado fue de marca ACM instruments, modelo Gill8V2, serie 265. Los resultados de este ensayo se pueden observar en la tabla 3.2.

#### **d. Medición de dureza**

Se midió la dureza de las muestras tomadas utilizando un durómetro marca Proceq, modelo Equo Tip, serie 6368. Los valores de dureza obtenidos se muestran en la tabla 3.1.

## **2.2 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS ANTICORROSIVOS**

Se prepararon tres sistemas de recubrimiento anticorrosivo para ser evaluados en diversas pruebas estándar, sobre la superficie metálica identificada en el análisis metalográfico. Todos los sistemas que se aplicaron, llevaron una mano de pintura en cada componente.

#### **a. Diseño de sistemas de pintura**

Los sistemas anticorrosivos ensayados fueron los siguientes:

Sistema 1

- Pre-primario epóxico
- Primario resinas de poliuretano
- Intermedio resinas de poliuretano
- Acabado resinas de poliuretano

### Sistema 2

- Primario resinas de poliuretano
- Intermedio resinas de poliuretano
- Acabado resinas de poliuretano

### Sistema 3

- Primario de resinas alquídicas
- Acabado de resinas de poliuretano

#### **b. Preparación de los sistemas de pintura**

El sistema 1 fue un sistema con cuatro componentes. Se diseñó para una superficie que tuviera un Grado de Corrosión H de 4 a 6 según Norma SSPC-Vis 2 (ref. 13), y en la que, la morfología de la estructura dificultara preparar de la superficie de manera adecuada. Se efectuó una preparación de la superficie siguiendo la Norma SSPC-SP2 ref. 13), a las cuatro muestras que se prepararon. Se siguió la especificación estándar para aplicación de pintura, según la Norma SSPC-PA1 (ref.13). La aplicación se realizó usando una pistola de aire comprimido marca Camaria, tamaño de boquilla intermedio.

El sistema 2 fue sistema con tres componentes. Se diseñó para una superficie que tuviera un Grado de Corrosión H de 4 a 6 según Norma SSPC-Vis 2 ref. 13), y en la que, la morfología de la estructura permitiera preparar la superficie de manera adecuada. Se efectuó una preparación de la superficie siguiendo la Norma SSPC-SP10 (ref. 13) a las cuatro muestras que se prepararon. Se siguió la especificación estándar para aplicación de pintura, según la Norma SSPC-PA1. La aplicación se realizó usando una pistola de aire comprimido marca Camaria, tamaño de boquilla intermedio.

El sistema 3 fue sistema con dos componentes. Se diseñó para una superficie que tuviera un Grado de Corrosión F de 6 a 8 según Norma SSPC-Vis 2 (ref. 13), y en la que, la morfología de la estructura dificultara preparar la superficie de manera adecuada. Se efectuó una preparación de la superficie siguiendo la Norma SSPC-SP2 (ref. 13) a las cuatro muestras que se prepararon. Se siguió la especificación estándar para aplicación de pintura, según la Norma SSPC-PA1 (ref. 13). La aplicación se realizó usando una brocha plana, de una pulgada de ancho.

-Calibración de equipo

El equipo que se usó fue el siguiente: Medidor de espesores no metálicos, medidor de pruebas atmosféricas. Todo este equipo se debió calibrar antes de empezar las pruebas.

-Preparación de la superficie y aplicación de las pinturas

Se verificó, como medida de seguridad, que la temperatura de la superficie a trabajar estuviera por lo menos 3 grados Celsius por encima de la temperatura del punto de rocío; esto para evitar condensación de la humedad sobre la superficie.

-Medición de espesor de las capas de pintura.

Los resultados de las mediciones de espesores de película para los sistemas de pinturas experimentados se pueden observar en las tablas B12 a la B17.

**c. Pruebas realizadas a sistemas de pintura**

Los sistemas de recubrimiento anticorrosivo fueron evaluados en las siguientes pruebas paramétricas:

- Espesor de capa
- Adherencia
- Resistencia a niebla salina

- Ampollamiento
- Ampollamiento en corte
- Sangrado

### **i. Espesor de capa**

Se midió el espesor de cada capa aplicada de recubrimiento anticorrosivo utilizando un medidor de espesores de recubrimientos no metálicos marca Positector, modelo 6000-NF2, serie 42345. El valor reportado en la lectura es el promedio de cinco mediciones tomadas en diferentes partes de la probeta. Se midió el espesor de capa seca (en  $\mu\text{m}$ ). Los resultados obtenidos se encuentran en las tablas B12 a la B17.

Esta prueba fue realizada por cuadruplicado para disminuir el porcentaje de error experimental. Se siguió el procedimiento indicado en la Norma ASTM D 1005 (ref. 1).

### **ii. Adherencia**

La adherencia de un recubrimiento o pintura al substrato tiene una importancia extraordinaria al momento de evaluar la calidad de dicho recubrimiento.

El grado de adherencia del recubrimiento al substrato metálico se midió para cada sistema, usando el método estándar de la Norma ASTM D 3359, Método B (ref. 1). Se utilizó el equipo de medición de adherencia al substrato marca S. G. Pinney & Associates, serie 1800 955 1574. Los resultados de las pruebas de adherencia se observan en las tablas B21 a la B26.

Esta prueba fue realizada por cuadruplicado para reducir el porcentaje de error experimental.

### **iii. Resistencia a niebla salina**

Se sometieron los tres sistemas de pinturas a una prueba estándar de resistencia a la niebla salina, según la Norma ASTM B 117 (ref. 15). Se usó una máquina de niebla marca The Q Panel Company, modelo Q-Fog Cyclic Corrosion Tester, serie 95-1294-21-CCT1100. La prueba se programó para durar 600 horas de exposición.

La prueba se realizó por cuadruplicado para disminuir el porcentaje de error experimental. Se realizaron inspecciones periódicas para llevar un registro del avance de la corrosión en las muestras (tablas B18 a B20).

Para realizar esta prueba fue necesario utilizar el siguiente equipo: balanza electrónica marca A&D Company, modelo FX-6000, serie 50031, medidor del pH de la solución y medidor de temperatura de la solución marca Corning Incorporated, modelo Check Mate 90, serie 170280, termómetro de superficie dual magnético marca PTC Instruments, modelo 312-C, serie 2172-1, medidor de espesor de superficie marca Positector, modelo 6000-FN2, serie 42345, plantilla marca Corning Incorporated, modelo PC-420, serie 06-068448, compresor marca Campbell Hausfeld, modelo SKC48PR10006W, serie 0 20994L-58 9117, pistola de pintar marca Camaria, destilador marca Barnstead Thermolyne, modelo A1011-A, serie 011950689313, medidor de humedad relativa y temperatura ambiente marca Barnet, modelo Tri Sense Kit, serie 83061.

Las muestras fueron marcadas con la Cruz de Evans antes de ser introducidas a la cámara de niebla. Esta marca en cruz, de 2 cm de largo cada brazo, permite observar el sangrado y el ampollamiento bajo condiciones de desgarre del sistema de pintura hasta el sustrato. Para este efecto se siguió las indicaciones de las normas ASTM D 1654 (ref. 1) y ASTM D 714 (ref. 1).

## **CAPÍTULO 3. Caracterización de la estructura de la superficie flotante**

### 3.1 Resultados

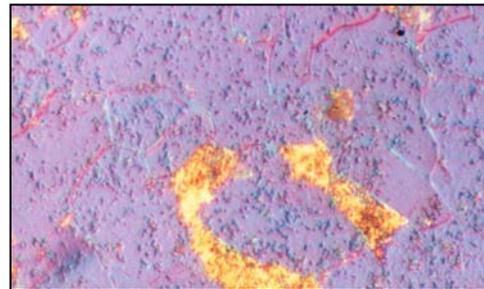
Al realizar la caracterización de la superficie flotante se obtuvo que el acero usado en su elaboración fue el ASTM A 36 (ref. 1). Este acero posee características que lo hacen una buena elección. Se corroboraron sus propiedades mecánicas y electroquímicas mediante varias pruebas descritas en la metodología.

Se puede apreciar en la figura 3.1 las líneas del laminado que atraviesan el material. Se aprecia la perlita de color oscuro mientras que la ferrita de aprecia de color blanco.



PhotoEditor

**Figura 3.1** Estructura metalográfica de una muestra del acero de la superficie flotante. 200X



PhotoEditor

**Figura 3.2** Estructura metalográfica vista transversal de muestra del acero de la superficie flotante. 500X, polarizado. Nital 5%.

Se realizaron varias pruebas destructivas y no destructivas al material con el fin de determinar sus propiedades, tanto mecánicas como electroquímicas.

Se comprobó que la dureza del material muestra no es muy alta, tanto longitudinal como transversalmente, por lo cual, muchas partes de la superficie metálicas presentan muestras de impactos, como se observa en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Determinación de durezas en la escala de Brinell para muestras de acero de superficie flotante.

	<b>Muestra longitudinal</b>	<b>Muestra transversal</b>
1	143	118
2	149	122
3	139	131
4	144	125
5	150	119
<b>Promedio</b>	145	123

Excel

La tabla 3.2 muestra los valores obtenidos de velocidad de corrosión por métodos electroquímicos y no electroquímicos; muestra como la curva de velocidad de corrosión se estabiliza aproximadamente a un valor de 0.2 mm/año.

**Tabla 3.2** Determinación de la velocidad de corrosión por métodos no electroquímicos y electroquímicos.

	<b>mm/año</b>
Prueba LPR	0.200
Medición de espesores	0.214

Excel

La prueba de polarización de resistencia mostró el mismo resultado que la otra prueba de medición de velocidad de corrosión conocida como medición de espesores.

### **3.2 Análisis de resultados**

Al empezar la investigación se realizó un estudio detallado del proceso de adquisición y fabricación de la misma. Este estudio sacó a la luz datos de suma importancia, los cuales ayudaron a entender mejor muchas de las causas del deterioro de la estructura.

Es importante señalar que la superficie fue construida a raíz de una situación de fuerza mayor que ocurrió en el embalse Arenal en el año de 1985, en el transcurso de tan solo 20 días, lo que es muy poco tiempo, si se consideran los muchos detalles que conlleva una construcción de esta magnitud.

Como consecuencia de haber construido la obra en un tiempo muy corto, muchos requerimientos de ingeniería fueron obviados, en detrimento de la operación y seguridad de la misma. Debido a la ausencia de todo tipo de información referente su composición química, fue necesario identificar los materiales utilizados para construirla.

Para identificar dichos materiales, se tomaron muestras metálicas de diversas partes de la estructura: de la pared de seguridad, de la superficie superior y de la superficie interna, siguiendo la norma ASTM E 3 (ref. 1). El análisis de todas las muestras tomadas mostró como resultado una estructura metalográfica similar a la del acero A 36 laminado, calidad estructural, clasificado según ASTM (ref. 1).

La figura 3.1 pone de manifiesto lo expuesto anteriormente, ya que, al compararla con la estructura micrográfica de un acero estándar A 36 (ref. 2), en un corte longitudinal, se obtuvo una misma estructura metalográfica. Una vista transversal de la estructura micrográfica se puede apreciar en la figura 3.2.

Se corroboró la dureza del material de muestra (tabla 3.1), según la escala de Brinell, tanto de manera transversal como longitudinal, con respecto a la dirección del laminado, la cual mostró resultados muy similares a los especificados para el acero A 36 laminado, según la norma ASTM A 6 (ref. 1). Este resultado de dureza, pone de manifiesto que este acero se puede catalogar como suave, por lo cual, si se somete a esfuerzos de impacto, puede llegar a presentar una penetración de importancia.

Al observar las características mecánicas y de composición química este acero, según la norma ASTM A 6 (ref. 1), se puede concluir que tiene una gama de ventajas que lo hacen una buena elección para la superficie flotante: buena apariencia, compatible con otros materiales y pinturas, buena soldabilidad; además de su facilidad de adquisición y bajo costo.

Como desventaja se puede citar el hecho de que es un acero que ofrece poca resistencia a la corrosión, por lo cual, al estar en servicio siempre bajo condiciones de inmersión, alta humedad, ambiente corrosivo y cambios de clima constantes, debe tener un buen sistema de protección anticorrosivo, ya sea protección catódica o sistema barrera, o ambos.

Los resultados obtenidos al inspeccionar la superficie flotante, mostraron un gran deterioro en la mayoría de sus partes constitutivas. Este deterioro se analizó desde varios puntos de vista, debido a la variada posibilidad de causas de la corrosión en dicha estructura.

El acero A 36 (ref. 1) por lo general, no presenta grandes problemas corrosivos si se encuentra recubierto por un sistema de pinturas aplicado correctamente, sin embargo, cuando dicho sistema se empieza a deteriorar, el substrato metálico comienza a manifestar focos de corrosión localizada, la cual se va acrecentando hasta llegar al punto en que la superficie entera se haya atacada.

Esta situación fue la que sirvió de base para empezar a analizar qué fue lo que ocurrió en la superficie flotante. El hecho de haber seleccionado un material como el acero A 36 (ref. 1) para la construcción de la superficie, no significa que se haya fallado en el proceso de selección de materiales y de requerimientos del material. Lo que sucedió fue que no se le dio el mantenimiento preventivo y correctivo necesario a la superficie de manera constante y programada.

Durante los primeros años de funcionamiento de la superficie flotante, se efectuaron operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo regulares, sin embargo, las mismas fueron menguando hasta el punto en que no se volvieron a realizar. Como consecuencia de ello, problemas incipientes de corrosión, que eran fáciles de solucionar, crecieron hasta llegar a ser corrosión generalizada irregular en toda la superficie.

La estructura fue fabricada con perfiles estructurales y aceros laminados estructurales, como se muestra en la figura B2. Esta selección de materiales fue correcta, ya que presentan buenas cualidades mecánicas y de adherencia a los sistemas de pintado (designación A 6), lo cual es más que suficiente para los requerimientos físicos y mecánicos para los que fue diseñada.

A la estructura en condiciones de servicio, adicional a su masa de 102 Toneladas, se debe añadir la masa de una grúa, que se ubica en su parte delantera (figura G1). Esta grúa se utiliza para efectuar las labores de dragado del embalse, especialmente en las cercanías de la toma de agua, que es el punto más crítico, el cual debe permanecer libre de materia orgánica a fin de evitar una obstrucción que podría llegar a tener consecuencias fatales.

Durante el proceso del dragado, una superficie flotante adicional, de menor tamaño, la cual carga una vagoneta en su plataforma, se coloca a la par de la superficie

flotante, con el fin de que se deposite el gamalote o materia orgánica dragada. En esta acción los costados de la superficie sufren severos impactos (figura G13), a raíz del roce de las estructuras provocado por el movimiento de las olas, máxime si se toma en cuenta que el material laminar utilizado en la pared no es de alta resistencia al impacto y es de una dureza relativamente baja. Se aprecia el enorme daño que tiene la estructura lateral, la cual ha tenido que ser rellenada en varias ocasiones con soldadura, debido a las penetraciones a las cuales a sido objeto.

Otra causa de daño en las paredes laterales es el hecho que la superficie no cuenta con motor para su traslado, por lo cual muchas veces tiene que ser empujada por un bote remolcador, el cual es el encargado de trasladarla de un punto a otro. En ese intervalo, las paredes de la estructura sufren acciones de impacto por choque con el remolcador.

En el transcurso de la vida útil de la superficie se le instaló un perfil en C (designación A 6) en los costados (figura G15), el cual tiene como función servir como amortiguador de los golpes que recibe. También se colocaron alrededor de las paredes llantas gruesas colgando de cadenas unidas a la cubierta por juntas con el mismo fin. Sin embargo, como se aprecia en la figura G13, el perfil presenta signos de impacto, junto con las paredes. El análisis de esta situación lleva a la conclusión de que el efecto protector barrera para lo cual fueron instalados estos dispositivos es insuficiente, comparado con el alto poder de impacto a que están sometidas las paredes.

Se determinó que el sistema de pinturas usado inicialmente para recubrir la superficie flotante fue un sistema multicapa compuesto por una mano de primario Oxiprimer y otra mano de acabado Coal Tar. La pintura primaria es del tipo de resinas epóxicas mientras que la pintura de acabado posee resinas epóxicas bituminosas.

La inspección de la plataforma o cubierta de la estructura arrojó varios resultados. Se diferenciaron dos zonas: la zona descubierta y la zona cubierta.

La zona descubierta presentó el desprendimiento de la pintura aplicada anteriormente, tanto por envejecimiento y acción erosiva atmosférica, como por acción mecánica de rozamiento, principalmente en la zona correspondiente a la ubicación de la grúa. Se pueden apreciar zonas hundidas en el laminado debido al peso de la grúa, las cuales son de alto riesgo, porque en cualquier momento pueden fallar, provocando el colapso de la grúa (figura G5).

Esta zona presentó corrosión de tipo generalizada irregular en casi toda su extensión (figura G11) causada por un mecanismo electroquímico. Al estar casi siempre esta zona bajo una capa de humedad, el acero se corroe por reducción del oxígeno. El metal se disuelve dentro de la delgada capa de electrolito, en la que la concentración de los cationes se eleva hasta que ocurre la precipitación de un compuesto poco soluble de poder protector pobre.

Mediciones realizadas (ref. 8) han demostrado que la capa de humedad de una superficie horizontal en una zona de condensación, oscila entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ , como promedio. Si se analiza este estudio tomando en cuenta la alta precipitación anual de la zona y humedad relativa (ref. 4), se deduce que la velocidad de corrosión de la plataforma en su parte descubierta es máxima.

En la parte descubierta de la superficie superior exterior se localizan gran cantidad de juntas metálicas soldadas a la superficie laminar (figura G10). Esas juntas presentan ataque de corrosión en la zona soldada y en la zona alterada térmicamente, tanto del lado de la junta como del lado de la lámina.

Este mismo ataque se aprecia en la mayoría de zonas soldadas, tanto en la plataforma, las paredes, las celdas internas como en el piso interno (figura G3).

Lo que ha sucedido en las juntas soldadas se conoce como corrosión por formación de pares galvánicos. El sistema de soldadura usado, compuesto por los electrodos de arco revestido 6010 y 7018 (tabla C1), formó una pila galvánica tanto con las juntas como con la estructura laminar en presencia del ataque de la humedad atmosférica. La inspección visual muestra que la corrosión mayor se encuentra alrededor del cordón de la soldadura, mientras que el cordón no presenta tanta corrosión. Esto es positivo, desde el punto de vista de seguridad de la estructura, ya que si hubiera sucedido lo contrario, o sea, que la soldadura hubiera sido anódica, esta se habría corroído muy rápidamente, dada la diferencia de masas que tiene con respecto al material metálico de la estructura, el cual haría la función de cátodo. Esto habría provocado el colapso casi inmediato de la obra.

Otro factor que propició la corrosión en la zona soldada fue el deterioro del recubrimiento protector en esa zona crítica se deterioró, dejándola a merced de la atmósfera agresiva.

La zona cubierta de la plataforma superior presentó dos sitios muy diferentes. El primero fue el cuarto de entrada, en el cual el piso se encontró muy bien protegido por un sistema de pinturas. Este recubrimiento se encontró en buen estado, debido a un mantenimiento correcto. Esta zona, en la cual se ubica la cámara de descompresión para buzos, se halla en su mayoría libre de corrosión, a excepción de algunos cordones de soldadura que si manifiestan corrosión galvánica. Dicha corrosión galvánica se produjo debido a los constantes salpiques a los cuales está sometido el piso, como producto de la actividad de los buzos en ella.

La otra parte de la zona cubierta de la plataforma, el cuarto de máquinas, presentó un ataque severo de corrosión en toda su estructura laminar (figura G2). Este cuarto, a pesar de que permanece la mayor parte del tiempo seco, fue uno de los que mayores productos de corrosión presentó. Al analizar el mecanismo de avance de los mismos, se llegó a la conclusión de que la aireación diferencial tiene un papel preponderante en dicho avance. Se encontró que el laminado estaba siendo carcomido o corroído de manera interna, principalmente, debido a la diferencia de concentración de oxígeno existente entre la parte sublaminar y la parte más exterior de la cascarilla de corrosión.

Al revisar las paredes exteriores de la estructura flotante, se apreció que fueron sometidas recientemente a un mantenimiento correctivo que consistió en la eliminación de productos de corrosión de su área y la aplicación de un sistema de pinturas, compuesto por un primario Corroless alquídico y un acabado a esmalte (Apéndice D). Lo anterior se puede observar mejor en las figuras G12 y G14.

Este sistema de pinturas fue ensayado, para determinar su resistencia ante las condiciones de servicio a las cuales estará sometido. Los resultados de este análisis se pueden observar en el punto 4.2 del Capítulo 4 de este informe.

Se analizó un sector de la superficie lateral que aún no había sido preparado para recibir la capa primaria de pintura, pudiéndose constatar que los productos de corrosión formaron una capa insoluble, muy fuertemente adherida al substrato metálico.

Para discutir estos resultados es importante indicar que el agua del embalse Arenal no es una sustancia pura, sino que presenta numerosos elementos disueltos y compuestos. Por ejemplo: calcio, magnesio sulfuro, cloruro, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, entre otros (ref 4).

Por la cercanía con el volcán Arenal, el embalse presenta una concentración de azufre reportado como sulfuros y sulfatos, por encima de lo normal (tabla A1). Este azufre no sólo se encuentra en el agua sino en el aire. Para valorar debidamente la influencia que tiene el azufre reportado como sulfato, se debe decir que presenta una solubilidad 1300 veces mayor que la del oxígeno. Por ello, este elemento al estar presente en la capa de humedad que cubre a la superficie, puede elevar considerablemente la conductividad del electrolito, acelerando el proceso corrosivo.

Este hecho tuvo influencia en la corrosión de las paredes, ya que el factor controlante de la corrosión del metal cuando se encuentra sumergido es la facilidad de llevarse a cabo las reacciones catódica y anódica, y de la resistencia óhmica de la pila de corrosión. Al estar las paredes metálicas, sumergidas en el nivel de difusión del oxígeno, la reacción catódica de reducción del oxígeno no tuvo inconvenientes en llevarse a cabo. Sin embargo, al irse formando productos de corrosión de baja solubilidad sobre el substrato metálico, se produjo una barrera a la reacción catódica de reducción del oxígeno. Este es el mecanismo que imperó tanto en la parte sumergida de las paredes como en el fondo de la estructura metálica

La inspección de la parte interna de la plataforma mostró como ella se encuentra atacada por corrosión laminar en muchos sectores. Se notó que la pintura se ha caído en muchas zonas a causa del ataque de la corrosión (figura G8).

La corrosión presente en esta zona tiene su origen en un fenómeno electroquímico. A pesar de que 5 de las 8 celdas de la superficie no se hayan en condiciones de inmersión, la humedad es casi homogénea en todas las celdas (figura G9), por el hecho de que ellas se intercomunican por un espacio abierto en la parte superior de las paredes de separación de las celdas. Esta humedad es la que provocó la corrosión de la estructura interna.

También se observó corrosión en la zona cercana al cordón de soldadura. Este daño es del mismo tipo que el que se explicó anteriormente para las juntas ubicadas en la plataforma.

Mediante mediciones de espesores en la superficie de la estructura metálica, se determinó la penetración promedio de la corrosión en el sustrato metálico (figura G6), en el transcurso de sus 16 años de servicio, como se observa en la Tabla B3. Dicha medida de la penetración se obtuvo a partir de la diferencia de espesores de la lámina en estado nuevo y en estado de corrosión.

El espesor inicial de lámina que se usó en la construcción de la superficie flotante fue de 9.53 mm en las paredes y plataforma, y de 15.88 mm en el piso interno.

Se obtuvo la velocidad de corrosión del acero A 36 (ref. 1) a partir de las mediciones de espesores del laminado (tabla 3.2). Esta velocidad de 0.214 mm/año de penetración de la corrosión, se puede considerar como muy aceptable, primeramente por el hecho de que las mediciones fueron realizadas siguiendo un procedimiento normalizado estricto; segundo, porque este valor de 0.214 mm/año de penetración, es un valor que se haya dentro de valores muy similares a los obtenidos en otros estudios de medición de corrosión en medios afines al experimentado (ref. 14).

Al analizar los resultados de la prueba de polarización lineal de resistencia, se obtuvo una medida de la velocidad de la corrosión de 0.200 mm/año (tabla 3.2). Este resultado de 0.200 mm/año de penetración de la corrosión, como se observa en la figura C1, concuerda con el resultado obtenido en la prueba de penetración de la corrosión por medición de espesores.

La similitud de estos dos resultados aporta una mayor credibilidad a los resultados obtenidos experimentalmente, por el hecho de que se trata de dos métodos de

medición muy diferentes. Esta correlación de resultados corroboró la veracidad de los mismos.

También, estudios realizados en ambientes y superficies similares a las de estos ensayos (ref. 14), dan cifras muy similares en el orden de magnitud de la penetración de la corrosión al sustrato.

## **CAPÍTULO 4. Evaluación del desempeño de sistemas de pintura**

## **4.1 Resultados**

Los sistemas de pinturas 1 y 2 fueron los que presentaron el mejor desempeño para ser aplicados en la estructura metálica de la superficie flotante.

Una de los requerimientos de las pinturas más importante es su espesor. El espesor está directamente relacionado con la vida útil de la pintura, por lo cual, este factor debe ser muy bien controlado. Los sistemas de pinturas 1 y 2 fueron los que presentaron el espesor de película mayor.

Al ser expuestos los sistemas de pinturas a 600 horas de envejecimiento, se apreció que los sistemas de curado por la humedad son los mejor se desempeñaron. Estos sistemas, el 1 y 2, mostraron un comportamiento excelente ante dicha prueba.

## 4.2 Análisis de resultados

Al evaluar el desempeño de los 3 sistemas de pinturas empleados, se obtuvo que el primero y el segundo mostraron las mejores propiedades protectoras, mientras que el más deficiente fue el restante.

Al analizar las hojas técnicas de los sistemas de pintura (Apéndice D), se observa que cada uno corresponde a una situación en particular, con propiedades específicas, por lo tanto no es correcto el hablar de que existe la mejor pintura o algo parecido, sino que cada una posee muchas ventajas o muchas desventajas, de acuerdo a las exigencias que se presenten para cada situación en particular.

El sistema 1 se diseñó para funcionar en las partes de la superficie flotante que presentan un grado de corrosión avanzado, con gran cantidad de productos de corrosión y pintura sin adherencia, en la cual se haga muy difícil efectuar una limpieza por chorro abrasivo u otro método de eliminación de capa de óxido fuertemente adherida.

El elemento clave de este sistema es la capa preprimaria. Esta pintura de un espesor de capa seca promedio de 38  $\mu\text{m}$  (Apéndice D), que se puede considerar como delgado, posee muy altas propiedades de adherencia, lo que la hace idónea para ser aplicada sobre superficies oxidadas, a la vez que proporciona un excelente anclaje a la capa siguiente primaria. La baja viscosidad de esta pintura hace que pueda penetrar a sitios que son de difícil acceso. Presenta un porcentaje de sólidos de casi el 100%. Esta formulación a base de sólidos metálicos produce una protección catódica que impide la corrosión de la superficie. En este caso el cátodo será el substrato metálico y el ánodo serán los sólidos presentes en la pintura, casi siempre de zinc.

La capa siguiente, la primaria, posee cualidades protectoras muy altas también. Es un recubrimiento rico en zinc, el cual confiere al sustrato un efecto de protección catódica. Una propiedad de este recubrimiento es que seca por humedad. Esta característica particular permite que pueda ser aplicado en lugares con humedad relativa cercana al 98% inclusive, sin ningún efecto contrario.

Como se sabe, para aplicar una pintura es necesario que la temperatura del sustrato este por lo menos 3 grados Celsius por encima de la temperatura del punto de rocío, para evitar que el agua condense sobre el sustrato. Esto es imposible lograrlo con humedades relativas altas.

La capa siguiente intermedia, también cura en la humedad. Esta capa tiene como fin primordial aportar grosor al sistema de pinturas y proporcionar un adecuado perfil de anclaje a la capa de acabado

La última capa de pintura que se aplicó fue un esmalte de curado por humedad, de altas características de resistencia a los agentes externos, como lluvia, inmersión, viento, lluvia ácida, etc, ya que estará expuesta a ellos.

Tuvo dos fines muy importantes: el primero fue proporcionar un excelente efecto barrera que impidiera la acción corrosiva de los elementos atmosféricos; el otro fue un efecto decorativo al ser esta capa la que quedará a la vista.

El sistema 2 es exactamente igual al sistema de pinturas 1, con la excepción de que no presenta la capa preprimaria. La razón por la cual no se aplicó la capa de pintura preprimaria, fue el hecho de que se quería ensayar el sistema de pinturas sobre un sustrato con una preparación de la superficie más exhaustiva, que estuviera limpia de materias contaminantes y que poseyera una rugosidad que favoreciera el anclaje de la pintura primaria.

El sistema 3 fue diseñado para ser aplicado en una superficie que se aprecie levemente envejecida, en la cual los productos de la corrosión y la pintura caída no sean de gran proporción.

La propiedad fundamental del primario aplicado en este sistema fue su capacidad para estabilizar el óxido presente en el sustrato. Éste contiene pigmentos activos, que transforman la herrumbre (óxidos e hidróxidos de hierro inestables) en un compuesto más estable termodinámicamente, la magnetita, adheriéndola fuertemente al sustrato, formando una capa protectora.

Este sistema, al igual que el sistema 1, requiere una mínima preparación de la superficie, lo que se traduce en ahorro de dinero y de tiempo.

El acabado que se aplicó fue un esmalte de poliuretano, el cual proporciona buen acabado, gran resistencia a la abrasión y excelente brillo.

Una de los factores que más influye en la vida de una pintura es su espesor. Existe una relación directa entre la vida útil de la pintura y su espesor, por lo cual es de vital importancia el vigilar que se cumpla este parámetro. Se midió el espesor de las pinturas que se aplicaron para cada sistema (tabla B12 a B17), corroborando en las hojas técnicas (Apéndice D) que dicho espesor estuviera dentro del rango indicado.

Al evaluar los sistemas de pinturas mediante una prueba de adherencia, se observó que el mejor fue el sistema 3 (tablas B20 a B23). Esta prueba se realizó sin haber sometido a las muestras a envejecimiento.

Se observa (figuras B15 a B22) que las muestras correspondientes a los sistemas 1 y 2 no presentaron buena adherencia entre la capa intermedia y la de acabado, mientras

que la adherencia del sistema 3 fue muy buena en todas sus capas (figuras B23 a B26). Este hecho se explica porque en los sistemas 1 y 2 las resinas curan por humedad. Al estar expuestas las muestras a un proceso de curado por humedad, la adherencia de sus capas se vio disminuida notablemente. El sistema 3, al formarse la película de resina sin necesidad de humedad, no presentó problemas en su curado.

Los tres sistemas se sometieron a una prueba de envejecimiento acelerado, en una atmósfera de niebla salina, para determinar cual era el que mejor desempeño presentaba, bajo condiciones de desgarro de la pintura hasta el substrato metálico. Esta prueba de envejecimiento acelerado no tuvo una duración programada, sino que se dejó transcurrir hasta que se apreciaran diferencias claras entre un sistema y otro, que permitieran emitir un criterio de calidad. Los parámetros evaluados en esta prueba fueron el sangrado y el ampollado de la pintura.

Los sistemas que más resistieron a la atmósfera de niebla salina fueron el 1 y el 2, mientras que el sistema 3 tuvo un desempeño inferior.

El sistema 1 (tabla B18) al cabo de las 600 h de prueba, no presentó ampollamiento en su superficie, sino, únicamente un leve ampollamiento en la zona de desgarro de la pintura. El sangrado en esta zona fue muy bajo. Todo esto se puede observar claramente en las figuras B3 a B6.

El sistema 2 (tabla B19) tuvo un comportamiento prácticamente idéntico al sistema 1, como se puede observar en las figuras B7 a B10.

El sistema 3 (tabla B20) fue el que tuvo el desempeño más deficiente, ya que el sangrado se empezó a dar mucho antes de que sangraran los otros sistemas (figuras B11 a B14), además de ser más abundante.

Lo que se concluye de este ensayo es hecho de que tanto el sistema 1 como el 2 tuvieron el mismo desempeño cuando fueron sometidos al envejecimiento. Además, demostraron mayor resistencia al envejecimiento que el sistema 3.

La adherencia de los sistemas de pintura se midió también después de haber sido sometidos al envejecimiento (tablas B27 a B38), obteniéndose unos resultados totalmente diferentes a los obtenidos en la prueba de adherencia antes del envejecimiento (tabla B15 a B26).

En la prueba primera de adherencia, el sistema que había mostrado mejor adhesión había sido el sistema 3. En la prueba post envejecimiento, los sistemas 1 y 2 mostraron la mejor adherencia al substrato metálico (figuras B27 a B34).

La calidad de la adherencia que presentaron los sistemas 1 y 2 fue prácticamente perfecta, a pesar de haber sido sometidos a un envejecimiento acelerado por espacio de 600 h. Esto se explica por el hecho de que las resinas poliuretánicas de los sistemas 1 y 2 se curan por medio de la humedad, a la cual estuvieron sometidas por 600 h. Entonces, su exposición al envejecimiento lo que hizo fue mejorar sustancialmente la calidad del sistema de pinturas. Mientras, el sistema 3 (tabla B20) presentó una pésima adherencia al substrato metálico. Como se observa en las figuras B35 a B38, la adherencia del sistema de pinturas al substrato es prácticamente nula. Este resultado es muy diferente al que mostró la prueba de adherencia sin envejecimiento, en la cual el sistema 3 obtuvo el mejor desempeño.

Lo que se puede deducir de estos datos es que el sistema 3 disminuye su adherencia en gran manera cuando se somete a humedades altas constantes.

## **CAPÍTULO 5. Conclusiones**

El objetivo general de esta investigación fue cumplido, ya que se logró realizar un estudio del efecto que tuvo la corrosión en la estructura flotante, además del diseño de un sistema de protección anticorrosiva para la misma.

Por medio de este trabajo de investigación se logró llegar a las conclusiones que se exponen seguidamente:

1. Se determinó que la estructura metalográfica de los materiales usados en la construcción de la superficie correspondió a la del acero ASTM A 36, calidad estructural.
2. El acero ASTM A 36, calidad estructural, cumplió con los requerimientos necesarios para ser utilizado como material de construcción para la estructura metálica.
3. El deterioro de la estructura metálica se ha acelerado con el transcurso de los años como consecuencia de no recibir mantenimiento preventivo y correctivo oportuno.
4. El área metálica de la estructura flotante se encuentra constantemente cubierta por humedad, lo que provoca que el proceso electroquímico de corrosión sea continuo.
5. Los resultados obtenidos en las pruebas estándar de velocidad de corrosión de la estructura metálica fueron muy similares, lo que confiere validez a los mismos.
6. Los sistemas de pinturas 1 y 2 fueron los que presentaron el mejor desempeño ante la prueba de envejecimiento por exposición a niebla salina, esto debido a que el mecanismo que forma la película de pintura en ellos es la humedad.

7. El sistema de pintura 3 presenta buena adherencia al substrato en condiciones sin envejecimiento, pero después del envejecimiento su adherencia se vuelve muy pobre.

## **CAPÍTULO 6. Recomendaciones**

Entre las recomendaciones más importantes que se pueden proporcionar están las siguientes:

1. Las láminas metálicas de la plataforma ubicadas en el área de trabajo de la grúa se deben reemplazar, ya que, presentan un deterioro mecánico avanzado, además del deterioro causado por la corrosión, lo que puede provocar su fallo repentino.
2. Mejorar el sistema protector de las paredes laterales de la estructura, ya que se ha demostrado que la barrera que ofrecen al impacto es muy poca, en comparación con la que se necesita. Se recomienda instalar una línea más de perfiles en las paredes laterales, además de aumentar el número de llantas que amortigüen los impactos recibidos.
3. Corregir el diseño del sistema de soldadura empleado en algunas zonas de la estructura flotante en las cuales el cordón de soldado presenta saltos o discontinuidades. Esta situación origina resquicios que propician la aparición de corrosión localizada. Además, permite que el agua penetre dentro de la estructura metálica y se quede acumulada por mucho tiempo, ocasionando daños internos. Se recomienda completar el cordón de soldadura faltante.
4. Seguir el procedimiento indicado en el Plan de Mantenimiento Preventivo y Correctivo para la Superficie Flotante, indicado en el apéndice x, al momento de preparar la superficie y aplicar la pintura, ya sea en una nueva construcción o mantenimiento rutinario.
5. Se recomienda el uso del sistema de pinturas 1 para ser usado como recubrimiento anticorrosivo en la estructura metálica, debido a que fue diseñado para

una superficie con características similares a las que presenta la superficie flotante, además que presentó un desempeño excelente ante la humedad, lo que lo hace ideal para la zona. Se recomienda una preparación de la superficie grado SSPC SP2.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testings and Materials. Annual Book of ASTM standards. Race Street, Philadelphia, USA: 1993.
2. ASM HandBook. Metallography and Microstuctures. 6 ed. USA: ASM International, 1995.
3. Capriati, J. Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión. España: CENIM, 1984.
4. Chávez, Adolfo. Evaluación de algunos efectos del fenómeno de lluvia ácida como producto de la actividad eruptiva del volcán Arenal. Sede Regional, San Carlos: ITCR, 1996.
5. Feliú Mata, Sebastián. Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión. España: CENIM, 1984.
6. García Abarca, Juan. Manual para el Mantenimiento Industrial. 3 ed. Sn José, Costa Rica: Editorama, 1999.
7. Hour, T.P. Reporte del Comité en Corrosión y Protección. Londres: Departamento de Comercio e Industria, 1971.
8. Knotkova D. IV Congreso Internacional de Corrosión Metálica. Holanda, Ámsterdam: 1969.
9. Morcillo, M. Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión. España: CENIM, 1984.

10. NACE Standards. National Association of Corrosion Engineers. Texas, USA: 1995.
11. Rosenfeld. I. I Congreso Internacional de Corrosión Metálica. Londres:1961.
12. Swedish Standard Institute SIS 055900. Normas de Preparación Superficial, 1990.
13. Steel Structures Painting Council. Normas para Preparación de Superficies. USA, 1986.
14. Schweitzer, Philip. Corrosion Resistance Tables. New York: Marcel Dereck Inc.,1990.

## **APÉNDICES**

## **APENDICE A. Datos experimentales**

**Tabla A1.** Azufre reportado como sulfatos en productos de corrosión externos e internos en la superficie flotante.

<b>Muestra</b>	<b>% (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) en HCl</b>	<b>% (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) en agua regia</b>
Parte interna	2.26	2.92
Parte externa	1.20	1.10

Excel

## **APÉNDICE B. Resultados intermedios**

**Tabla B1.** Mediciones promedio del espesor de lámina de la plataforma de la superficie flotante.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
1	6.720	6.860	6.720	6.630	6.630
2	6.530	6.620	6.790	7.130	6.740
3	6.620	6.620	6.680	6.850	7.100
4	6.740	6.400	6.420	6.640	6.580
5	6.630	6.530	6.780	6.730	6.570
<b>Promedio</b>	<b>6.648</b>	<b>6.606</b>	<b>6.678</b>	<b>6.796</b>	<b>6.724</b>

Excel

**Tabla B2.** Mediciones promedio del espesor de lámina de todos los sectores de la superficie flotante.

	<b>Piso inferior</b>	<b>Pared izquierda</b>	<b>Pared derecha</b>	<b>Pared frontal</b>	<b>Pared posterior</b>
	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
1	12.050	6.730	6.510	6.410	6.560
2	12.020	6.470	6.190	6.390	6.460
3	11.910	6.370	5.600	6.370	6.540
4	11.990	6.520	6.400	6.440	6.440
5	12.050	6.510	5.800	6.410	6.480
<b>Promedio</b>	<b>12.004</b>	<b>6.520</b>	<b>6.100</b>	<b>6.404</b>	<b>6.496</b>

Excel

**Tabla B3.** Mediciones promedio del espesor de lámina de todos los sectores de la superficie flotante.

	<b>Medición Promedio</b>	<b>Medida Estándar</b>	<b>Diferencia</b>
	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
Piso superior	6.689	9.525	2.836
Piso inferior	12.001	15.875	3.874
Pared lateral derecha	6.100	9.525	3.425
Pared lateral izquierda	6.519	9.525	3.006
Pared frontal	6.400	9.525	3.125
Pared posterior	6.500	9.525	3.025
<b>Promedio</b>			<b>3.215</b>

Excel

**Tabla B4.** Condiciones utilizadas para realizar la prueba de medición de la velocidad de corrosión por medio de la polarización de resistencia.

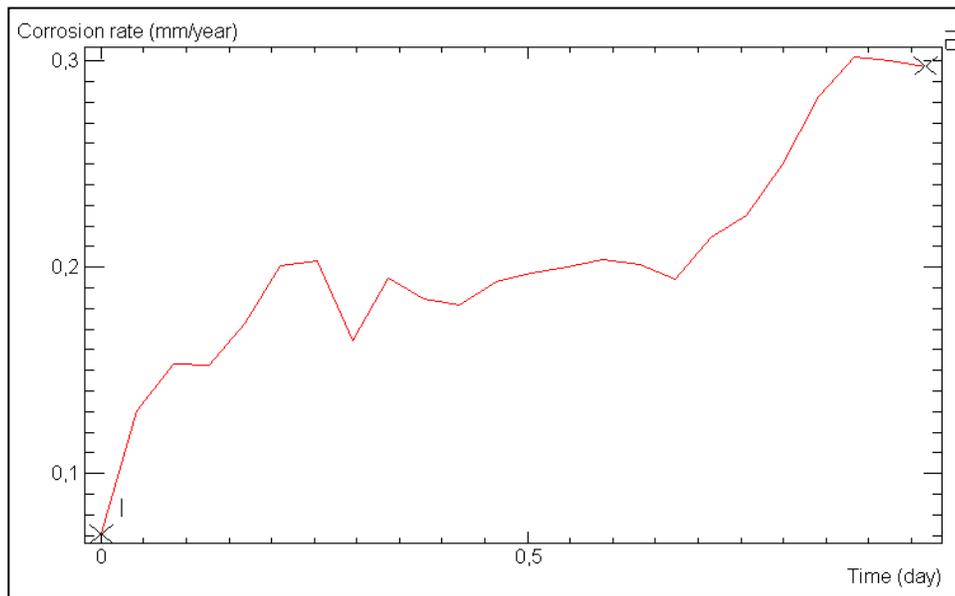
<b>Parámetro</b>	<b>Designación</b>
Fecha	31/05/01
Archivo	lprdata/pontón/01
Ámbito	de -10 a 10 mv
Velocidad	80 mv/min
Área	0.36 cm <sup>2</sup>
Número de lecturas	24
Pausa entre lecturas	60 min
Electrodo auxiliar	platino
Electrodo de referencia	Ag/AgCl
Electrolito	Agua del Embalse Arenal
Condiciones	Temperatura y presión normal
Hora de inicio	0.645833333

Excel

**Tabla B5.** Valores experimentales obtenidos en prueba electroquímica de medición de velocidad de corrosión, por el método LPR.

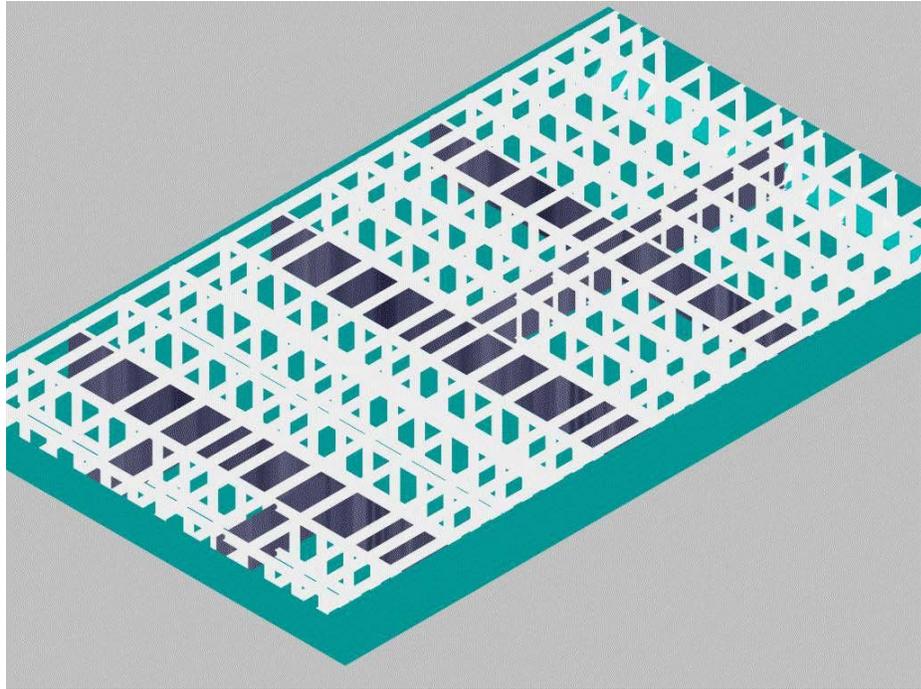
<b>Punto</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>
	<b>(días)</b>	<b>de corrosion</b>
		<b>(mm/año)</b>
1	0.00	70683.76
2	42013.89	.1305402
3	.0840162	.153041
4	.1260069	.1521851
5	.1680093	.1725425
6	.21	.2003109
7	.2520023	.2030153
8	.2939931	.1638878
9	.3359838	.1942678
10	.3779745	.1845718
11	.4199653	.1816587
12	.461956	.1927536
13	.5039583	.1966217
14	.5459607	.199931
15	.587963	.2037342
16	.6299653	.2012904
17	.671956	.1940185
18	.7139468	.214266
19	.7559375	.2250034
20	.7979861	.2493002
21	.8399768	.2823839
22	.8819907	.3018152
23	.9239699	.2997863
24	.9659722	.2971623

Excel



Excel

**Figura B1.** Representación gráfica de la velocidad de corrosión obtenida por el método electroquímico de LPR.



AutoCad

**Figura B2.** Esquema demostrativo de la estructura interna de la superficie flotante.

**Tabla B6.** Determinación de parámetros atmosféricos para sistema de pinturas 1 sobre acero ASTM A 36.

<b>Muestra</b>	<b>H. Relat.</b>	<b>T. Sup.</b>	<b>P. Roc.</b>	<b>T. Amb.</b>	<b>Componente</b>
12111	57.7	26	20.5	29	Pre-primario
22111	57.7	26	20.5	29	
32111	57.7	26	20.5	29	
42111	57.7	26	20.5	29	
12111	59.0	28.0	21.4	30.1	Primario
22111	59.0	28.0	21.4	30.1	
32111	59.0	28.0	21.4	30.1	
42111	59.0	28.0	21.4	30.1	
12111	62.0	24.0	18.6	27.0	Intermedio
22111	62.0	24.0	18.6	27.0	
32111	62.0	24.0	18.6	27.0	
42111	62.0	24.0	18.6	27.0	
12111	55.0	24.0	18.1	28.0	Acabado
22111	55.0	24.0	18.1	28.0	
32111	55.0	24.0	18.1	28.0	
42111	55.0	24.0	18.1	28.0	

Excel

**Tabla B7.** Determinación de parámetros atmosféricos para sistema de pinturas 2 sobre acero ASTM A 36.

<b>Muestra</b>	<b>H. Relat.</b>	<b>T. Sup.</b>	<b>P. Roc.</b>	<b>T. Amb.</b>	<b>Componente</b>
11111	59.0	28.0	21.4	30.1	Primario
21111	59.0	28.0	21.4	30.1	
31111	59.0	28.0	21.4	30.1	
41111	59.0	28.0	21.4	30.1	
11111	62.0	24.0	18.6	27.0	Intermedio
21111	62.0	24.0	18.6	27.0	
31111	62.0	24.0	18.6	27.0	
41111	62.0	24.0	18.6	27.0	
11111	55.0	24.0	18.1	28.0	Acabado
21111	55.0	24.0	18.1	28.0	
31111	55.0	24.0	18.1	28.0	
41111	55.0	24.0	18.1	28.0	

Excel

**Tabla B8.** Determinación de parámetros atmosféricos para sistema de pinturas 3 sobre acero ASTM A 36.

<b>Muestra</b>	<b>H. Relat.</b>	<b>T. Sup.</b>	<b>P. Roc.</b>	<b>T. Amb.</b>	<b>Componente</b>
13222	59.0	28.0	21.4	30.1	Primario
23222	59.0	28.0	21.4	30.1	
33222	59.0	28.0	21.4	30.1	
43222	59.0	28.0	21.4	30.1	
13222	59.0	28.0	21.4	30.1	Acabado
23222	59.0	28.0	21.4	30.1	
33222	59.0	28.0	21.4	30.1	
43222	59.0	28.0	21.4	30.1	

Excel

**Tabla B9.** Determinación de parámetros atmosféricos para sistema de pinturas 1 sobre acero ASTM A 36.

<b>Muestra</b>	<b>H. Relat.</b>	<b>T. Sup.</b>	<b>P. Roc.</b>	<b>T. Amb.</b>	<b>Componente</b>
52111	66.2	28.0	22.0	29.2	Pre-primario
62111	66.2	28.0	22.0	29.2	
72111	66.2	28.0	22.0	29.2	
82111	66.2	28.0	22.0	29.2	
52111	68.1	23.0	18.8	25.7	Primario
62111	68.1	23.0	18.8	25.7	
72111	68.1	23.0	18.8	25.7	
82111	68.1	23.0	18.8	25.7	
52111	64.1	25.5	19.8	27.5	Intermedio
62111	64.1	25.5	19.8	27.5	
72111	64.1	25.5	19.8	27.5	
82111	64.1	25.5	19.8	27.5	
52111	66.0	24.5	20.1	26.0	Acabado
62111	66.0	24.5	20.1	26.0	
72111	66.0	24.5	20.1	26.0	
82111	66.0	24.5	20.1	26.0	

Excel

**Tabla B10.** Determinación de parámetros atmosféricos para sistema de pinturas 2 sobre acero ASTM A 36.

<b>Muestra</b>	<b>H. Relat.</b>	<b>T. Sup.</b>	<b>P. Roc.</b>	<b>T. Amb.</b>	<b>Componente</b>
51111	68.1	23.0	18.8	25.7	Primario
61111	68.1	23.0	18.8	25.7	
71111	68.1	23.0	18.8	25.7	
81111	68.1	23.0	18.8	25.7	
51111	64.1	25.5	19.8	27.5	Intermedio
61111	64.1	25.5	19.8	27.5	
71111	64.1	25.5	19.8	27.5	
81111	64.1	25.5	19.8	27.5	
51111	66.0	24.5	20.1	26.0	Acabado
61111	66.0	24.5	20.1	26.0	
71111	66.0	24.5	20.1	26.0	
81111	66.0	24.5	20.1	26.0	

Excel

**Tabla B11.** Determinación de parámetros atmosféricos para sistema de pinturas 3 sobre acero ASTM A 36.

<b>Muestra</b>	<b>H. Relat.</b>	<b>T. Sup.</b>	<b>P. Roc.</b>	<b>T. Amb.</b>	<b>Componente</b>
53222	66.2	28.0	22.0	29.2	Primario
63222	66.2	28.0	22.0	29.2	
73222	66.2	28.0	22.0	29.2	
83222	66.2	28.0	22.0	29.2	
53222	66.0	24.5	20.1	26.0	Acabado
63222	66.0	24.5	20.1	26.0	
73222	66.0	24.5	20.1	26.0	
83222	66.0	24.5	20.1	26.0	

Excel

.....

.....

**Tabla B12** Determinación de espesores para sistemas de pinturas 1 aplicado en superficie de acero ASTM A 36.

	<b>12111</b>	<b>22111</b>	<b>32111</b>	<b>42111</b>	
Pre-primario	38.0	35.2	66.3	45.2	Espesor
Primario	68.0	59.8	164.4	104.4	Promedio
Intermedio	107.2	138.8	118.0	104.4	(micrómetros)
Acabado	140.0	173.6	186.4	145.2	
Pre-primario	7.4	6.8	8.9	4.3	Desviación
Primario	10.3	15.2	24.6	3.29	Estándar
Intermedio	4.6	5.1	8.3	4.8	(%)
Acabado	2.4	4.5	1.67	1.79	
Pre-primario	45.0	44.0	75.0	52.0	Espesor
Primario	80.0	84.0	200.0	108.0	Máximo
Intermedio	114.0	146.0	132.0	110.0	(micrómetros)
Acabado	144.0	180.0	188.0	148.0	
Pre-primario	31.0	29.0	50.0	38.0	Espesor
Primario	52.0	46.0	140.0	100.0	Mínimo
Intermedio	104.0	166.0	184.0	144.0	(micrómetros)
Acabado	138.0	166.0	184.0	144.0	

Excel

**Tabla B13** Determinación de espesores para sistemas de pinturas 2 aplicado en superficie de acero ASTM A 36.

	<b>1111</b>	<b>2111</b>	<b>3111</b>	<b>4111</b>	
Primario	73.6	80.0	64.4	56.4	Espesor
Intermedio	95.2	95.2	95.6	102.4	Promedio
Acabado	152.0	140.2	143.6	141.2	(micrómetros)
Primario	0.9	0.5	1.6	4.3	Desviación
Intermedio	4.9	2.7	2.6	1.7	Estándar
Acabado	3.5	3.9	1.7	1.1	(%)
Primario	74.0	80.0	66.0	62.0	Espesor
Intermedio	104.0	100.0	100.0	104.0	Máximo
Acabado	158.0	146.0	146.0	142.0	(micrómetros)
Primario	72.0	80.0	62.0	50.0	Espesor
Intermedio	90.0	94.0	94.0	100.0	Mínimo
Acabado	150.0	136.0	142.0	140.0	(micrómetros)

Excel

**Tabla B14** Determinación de espesores para sistemas de pinturas 3 aplicado en superficie de acero ASTM A 36.

	<b>13222</b>	<b>23222</b>	<b>33222</b>	<b>43222</b>	
Primario	58.2	47.8	71.0	81.3	Espesor Promedio
Acabado	113.2	102.8	126	182.4	(micrómetros)
Primario	8.1	7.6	4.5	6.2	Desviación
Acabado	5.9	9.2	19.9	9.6	Estándar (%)
Primario	64.0	55.0	67.0	91.0	Espesor Máximo
Acabado	120.0	116.0	146.0	196.0	(micrómetros)
Primario	51.0	44.0	74.0	69.0	Espesor Mínimo
Acabado	104.0	94.0	102.0	172.0	(micrómetros)

Excel

**Tabla B15** Determinación de espesores para sistemas de pinturas 1 aplicado en superficie de acero ASTM A 36.

	<b>52111</b>	<b>62111</b>	<b>72111</b>	<b>82111</b>	
Pre-primario	41.2	46.6	39.4	38.6	Espesor
Primario	74.4	71.6	79.2	81.2	Promedio
Intermedio	141.2	134.4	147.2	135.2	(micrómetros)
Acabado	183.6	174.4	208.8	164.4	
Pre-primario	6.1	11.7	8.2	6.8	Desviación
Primario	8.7	7.1	8.8	9.0	Estándar
Intermedio	5.9	17.6	17.4	17.0	(%)
Acabado	13.0	23.0	14.6	5.1	
Pre-primario	49.0	58.0	52.0	46.0	Espesor
Primario	84.0	84.0	102.0	88.0	Máximo
Intermedio	148.0	152.0	174.0	160.0	(micrómetros)
Acabado	204.0	206.0	222.0	170.0	
Pre-primario	34.0	30.0	30.0	30.0	Espesor
Primario	60.0	64.0	70.0	66.0	Mínimo
Intermedio	134.0	108.0	134.0	116.0	(micrómetros)
Acabado	168.0	152.0	188.0	124.0	

Excel

**Tabla B16.** Determinación de espesores para sistemas de pinturas 2 aplicado en superficie de acero ASTM A 36.

	<b>51111</b>	<b>61111</b>	<b>71111</b>	<b>81111</b>	
Primario	58.0	48.8	49.8	44.6	Espesor
Intermedio	126.8	132.0	106.8	112.4	Promedio
Acabado	168.4	165.6	147.2	163.0	(micrómetros)
Primario	9.8	6.9	5.7	3.7	Desviación
Intermedio	8.0	9.2	5.4	13.2	Estándar
Acabado	18.8	9.4	6.6	19.4	(%)
Primario	70.0	60.0	58.0	50.0	Espesor
Intermedio	142.0	142.0	114.0	132.0	Máximo
Acabado	186.0	174.0	156.0	196.0	(micrómetros)
Primario	44.0	33.0	44.0	40.0	Espesor
Intermedio	118.0	124.0	100.0	98.0	Mínimo
Acabado	148.0	150.0	138.0	146.0	(micrómetros)

Excel

**Tabla B17.** Determinación de espesores para sistemas de pinturas 3 aplicado en superficie de acero ASTM A 36.

	<b>53222</b>	<b>63222</b>	<b>73222</b>	<b>83222</b>	
Primario	46.8	38.2	45.2	47.2	Espesor Promedio
Acabado	126.0	118.8	111.2	112.0	(micrómetros)
Primario	6.8	5.8	5.2	7.5	Desviación
Acabado	10.7	12.2	12.1	12.4	Estándar (%)
Primario	58.0	45.0	50.0	58.0	Espesor Máximo
Acabado	142.0	156.0	124.0	134.0	(micrómetros)
Primario	40.0	32.0	37.0	41.0	Espesor Mínimo
Acabado	114.0	88.0	92.0	100.0	(micrómetros)

Excel

.....  
 .....  
**Tabla B18** Resultados de someter sistema 1 de pinturas a envejecimiento por niebla salina según método estándar ASTM B 117.

	Tiempo de exposición (horas)						
	96	168	264	336	432	504	600
ampollamiento	10	10	10	10	10	10	10
ampollamiento en corte	10	10	8F	6F	4F	4F	4F
sangrado en corte	N	N	MP	MP	MP	MP	MP

Excel

**Tabla B19** Resultados de someter sistema 3 de pinturas a envejecimiento por niebla salina según método estándar ASTM B 117.

	Tiempo de exposición (horas)						
	96	168	264	336	432	504	600
ampollamiento	10	10	10	4F	4F	4F	4F
ampollamiento en corte	10	10	6F	4F	4F	4F	2F
sangrado en corte	MP	MP	P	R	M	M	M

Excel

.....  
 .....  
**Tabla B20** Resultados de someter sistema 2 de pinturas a envejecimiento por niebla salina según método estándar ASTM B 117.

	Tiempo de exposición (horas)						
	96	168	264	336	432	504	600
ampollamiento	10	10	10	10	10	10	10
ampollamiento en corte	10	10	10	8F	8F	8F	6F
sangrado en corte	N	N	N	MP	MP	MP	MP

Excel

**Tabla B21** Resultados de someter el sistema 1 de pinturas a la prueba de adherencia ASTM D 3359 por el método A sin haber envejecido la superficie.

<b>Muestra</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
52111	2A	1A	2A
62111	2A	1A	2A
72111	2A	3A	3A
82111	2A	2A	1A

Excel

**Tabla B22** Resultados de someter el sistema 2 de pinturas a la prueba de adherencia ASTM D 3359 por el método A sin haber envejecido la superficie.

<b>Muestra</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
51111	3A	2A	3A
61111	3A	2A	1A
71111	3A	3A	3A
81111	2A	3A	3A

Excel

**Tabla B23** Resultados de someter el sistema 3 de pinturas a la prueba de adherencia ASTM D 3359 por el método B2 sin haber envejecido la superficie.

<b>Muestra</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
53222	4B	3B	3B
63222	4B	3B	3B
73222	4B	4B	3B
83222	4B	4B	4B

Excel

**Tabla B24** Resultados de someter el sistema 1 de pinturas a la prueba de adherencia ASTM D 3359 por el método A habiendo envejecido la superficie.

<b>Muestra</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
12111	5A	5A	5A
22111	5A	5A	5A
32111	5A	5A	5A
42111	5A	5A	5A

Excel

**Tabla B25** Resultados de someter el sistema 2 de pinturas a la prueba de adherencia ASTM D 3359 por el método A habiendo envejecido la superficie.

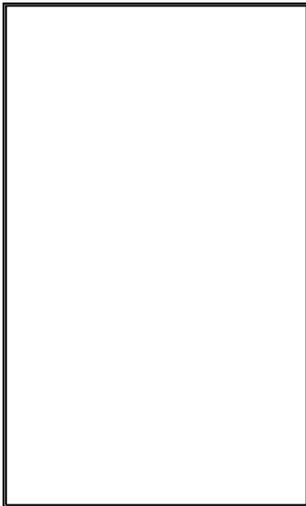
<b>Muestra</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
11111	5A	5A	5A
21111	5A	5A	5A
31111	5A	5A	5A
41111	5A	5A	5A

Excel

**Tabla B26** Resultados de someter el sistema 3 de pinturas a la prueba de adherencia ASTM D 3359 por el método B2 habiendo envejecido la superficie.

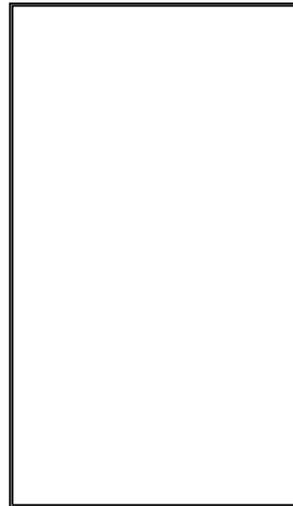
<b>Muestra</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
13222	0B	0B	0B
23222	0B	0B	0B
33222	1B	0B	0B
43222	0B	0B	0B

Excel



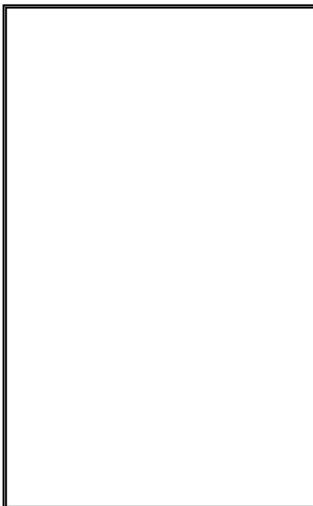
PhotoEditor

**Figura B3** Sangrado en muestra 12111



PhotoEditor

**Figura B4** Sangrado en muestra 22111



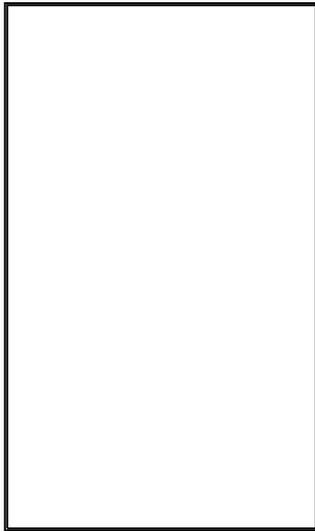
PhotoEditor

**Figura B5** Sangrado en muestra 32111



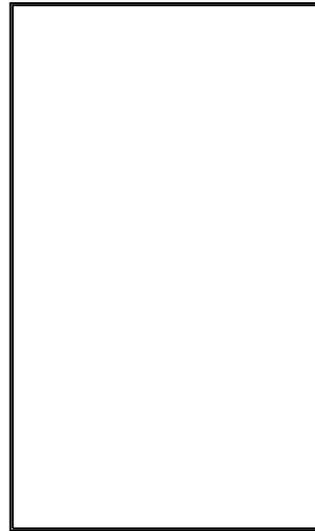
PhotoEditor

**Figura B6** Sangrado en muestra 42111



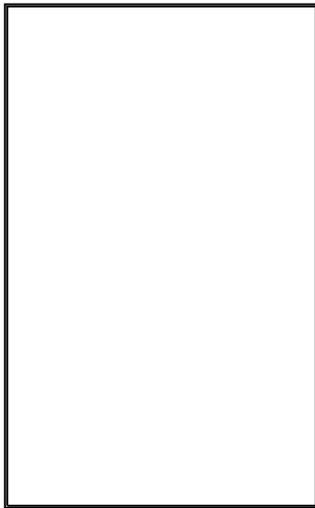
PhotoEditor

**Figura B7** Sangrado en muestra 11111



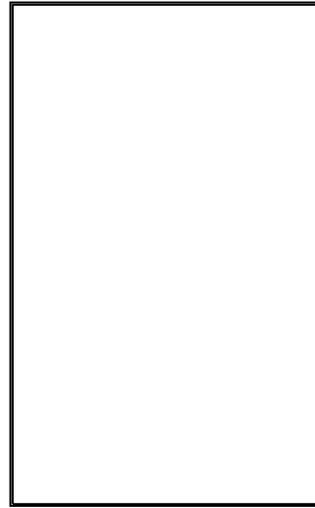
PhotoEditor

**Figura B8** Sangrado en muestra 21111



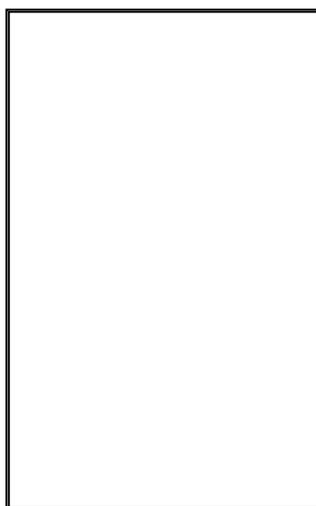
PhotoEditor

**Figura B9** Sangrado en muestra 31111.



PhotoEditor

**Figura B10** Sangrado en muestra 41111.



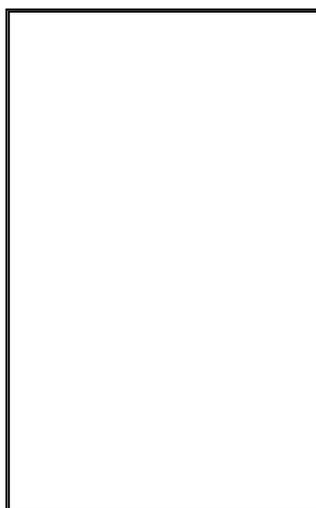
PhotoEditor

**Figura B11** Sangrado en muestra 13222.



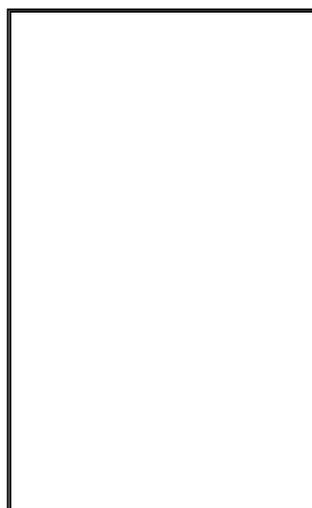
PhotoEditor

**Figura B12** Sangrado en muestra 23222.



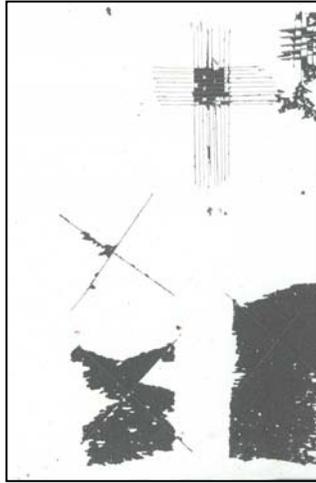
PhotoEditor

**Figura B13** Sangrado en muestra 33222.



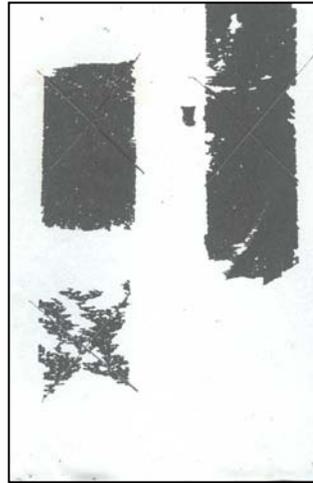
PhotoEditor

**Figura B14** Sangrado en muestra 43222.



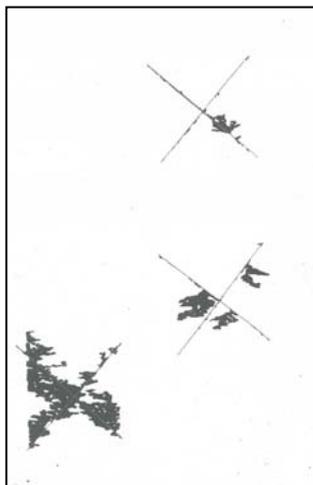
PhotoEdit

**Figura B15** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 52111.



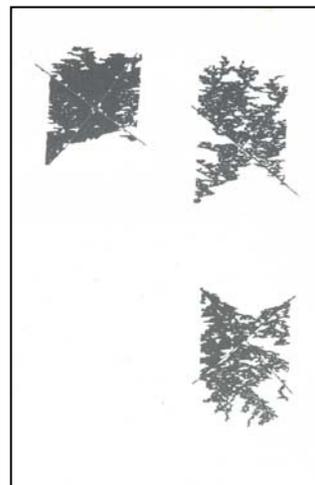
PhotoEdit

**Figura B16** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 62111.



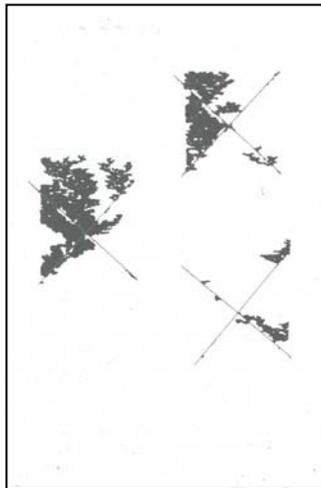
Photoeditor

**Figura B17** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 72111.



PhotoEditor

**Figura B18** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 82111.



Photoedit

**Figura B19** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 51111



PhotoEdito

**Figura B20** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 61111.



PhotoEdito

**Figura B21** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 71111.



PhotoEditor

**Figura B22** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 81111.



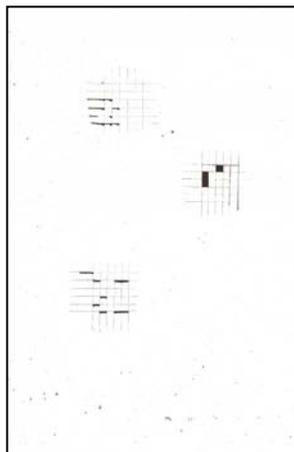
PhotoEditor

**Figura B23** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 53222.



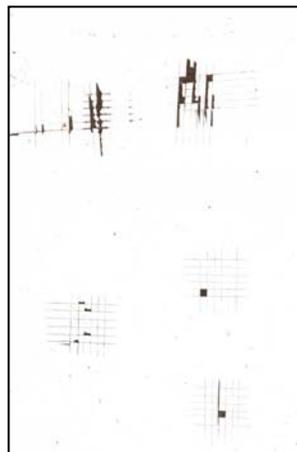
PhotoEdito

**Figura B24** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 63222.



PhotoEditor

**Figura B25** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 73222.



PhotoEdito

**Figura B26** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra



PhotoEdito

**Figura B27** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra



PhotoEdito

**Figura B28** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 22111.



PhotoEdito

**Figura B29** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 32111.



PhotoEdito

**Figura B30** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 42111.



PhotoEdito

**Figura B31** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra



PhotoEdito

**Figura B32** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 21111.



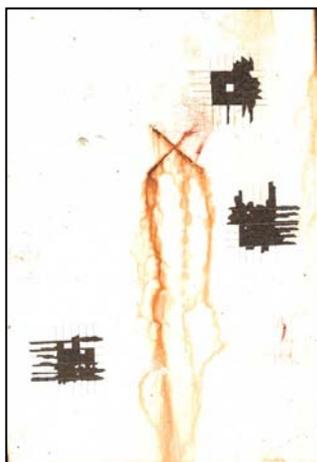
PhotoEdito

**Figura B33** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 31111.



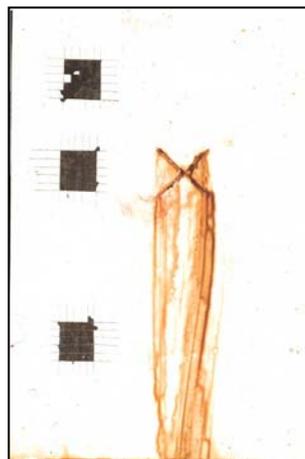
PhotoEditor

**Figura B34** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 41111.



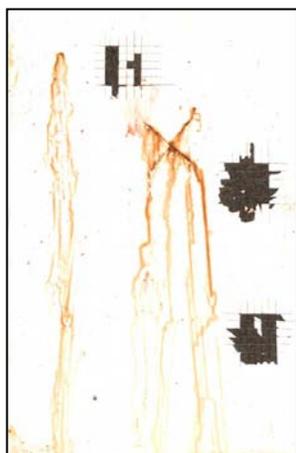
PhotoEditor

**Figura B35** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 13222.



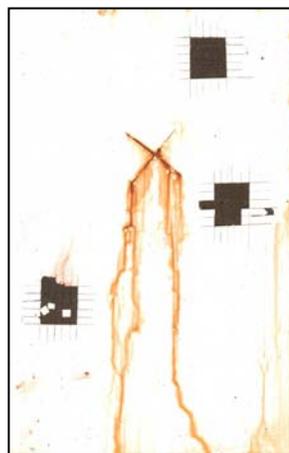
PhotoEdito

**Figura B36** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 23222.



PhotoEdito

**Figura B37** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 33222.



PhotoEdito

**Figura B38** Prueba de adherencia sin envejecimiento en muestra 43222.

## **APÉNDICE C. Datos teóricos**

**Tabla C1.** Datos técnicos correspondientes a los electrodos 6010 y 70 18, según AWS.

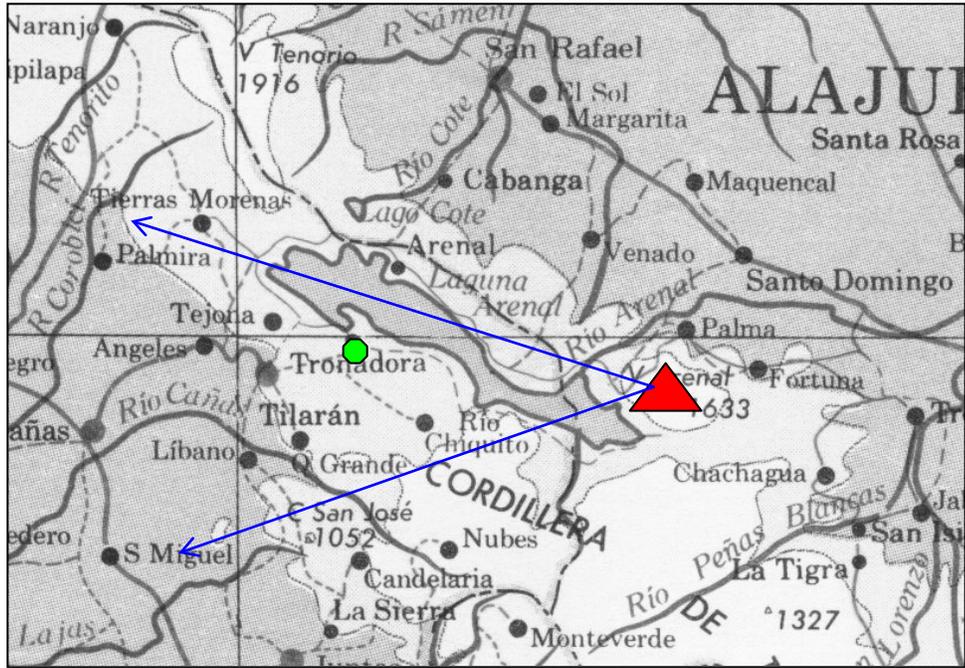
<b>Clase AWS</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Corriente (amp)</b>	<b>Propiedades mecánicas</b>	
E-6010	3.2x356	95-125	Resist. Tensión	60000 lb/pulg2
	3.9x356	120-160	Lím. Elast.	48000 lb/pulg2
			Elongación	22%
			Impacto Charpy	27 J
E-7018	2.3x356	70-100	Resist. Tensión	70000 lb/pulg2
	3.2x457	90-140	Lím. Elast.	58 lb/pulg2
	3.9x457	140-170	elongación	22%
	4.8x457	170-200	Impacto Charpy	27 J

Excel

**Tabla C2.** Datos promedio semestrales de pH para algunas poblaciones cercanas al embalse Arenal.

<b>Período</b>	<b>jul-dic 92</b>	<b>ene-jun 93</b>	<b>jul-dic 93</b>	<b>ene-jun 94</b>	<b>jul-dic 94</b>
<b>Puntos de muestreo</b>					
El Castillo	5.00	4.91	4.42	4.38	4.55
Viejo Arenal		4.48	5.75		
Tronadora		5.81	5.21	4.89	4.45

Excel



PhotoEditor

**Figura C1.** Mapa representativo de la región del embalse Arenal.

**APÉNDICE D. Especificaciones técnicas de las  
pinturas**



## INFORMACION TECNICA

### TRANSURETHANE ZINC/ MIO PRIMER 1.60

Primario de poliuretano curado por humedad  
513-80160-720

#### INFORMACION SOBRE EL PRODUCTO

DESCRIPCION DE PRODUCTO	USOS RECOMENDADOS
<p>Primario anticorrosivo rico en zinc, monocompone- nente, formulado a base de resinas de poliuretano que curan con la humedad ambiental y pigmentos de zinc e hierro micacio.</p> <p><b>Propiedades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Monocomponene</li> <li>•Resiste condiciones de inmersión constante</li> <li>•Se puede aplicar en superficies húmedas y a bajas temperaturas (-5°C )</li> <li>•Excelente adherencia</li> <li>•Excelente protección anticorrosiva</li> <li>•Rápido Secado</li> </ul>	<p>El Transurethane zinc / mio Primer está formula- do para ser usado como primario anticorrosivo en tanques, tuberías, estructuras marinas, puentes y maquinaria que se encuentre en un ambiente severo.</p> <p>Puede ser repintado con cualquier tipo de recubrimiento como epóxicos, vinílicos y poliuretánicos.</p>

#### CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO

<p><b>Color</b> Gris</p> <p><b>Acabado</b> Mate</p> <p><b>Sólidos por volumen</b> 72% ± 2</p> <p><b>Espesor seco recom.</b> 1.5 a 3 mils</p> <p><b>Rendimiento Teórico</b> 108 m<sup>2</sup> /gl (1 mils)</p> <p><b>Peso x galón (Kg)</b> 10.97</p> <p><b>Temp. máx. de desempeño</b> 100°C</p> <p><b>Vida útil en stock</b> 12 meses</p> <p><b>Visc. Stormer Krebs</b> 85 95</p> <p><b>Sólidos por Peso</b> 88% ± 2</p> <p><b>VOC (gramos / Litro)</b> 243</p> <p><b>Condiciones de almacenamiento</b> Entre 20°C y 30°C en un lugar seco y ventilado. El envase debe permanecer cerrado.</p>	<p><b>TIEMPO DE SECADO (20 °C)</b></p> <p><b>Tacto</b> 15 min</p> <p><b>Repintado Mínimo</b> 2.5 hrs</p> <p><b>Repintado Máximo</b> ilimitado</p> <p><b>Duro</b> 3 hrs</p> <p><b>Diluyente recomendado</b> Transocean Poliurethane Thinner 6.05 (513-80605-900)</p> <p><b>Proporción de dilución</b> 25 % max. en Vol</p> <p>Los tiempos de secado están basados en condiciones normales de aplicación, tempe- ratura, espesor de película y dilución. Cuando alguno de estos factores sufren algún cambio, se deben tomar medidas específicas. Cuando es necesario aplicar una segunda mano, o bien aplicar la capa siguiente del esquema de pintado, observar los tiempos de secado indicados.</p>
--	--

La información suministrada es una guía de referencia del producto evaluado a nuestro leal saber y entender. Es responsabilidad del cliente hacer sus pruebas para comprobar la idoneidad del producto en sus aplicaciones particulares. SUR QUIMICA, S.A. se reserva el derecho de modificar dicha información en el momento que considere pertinente.

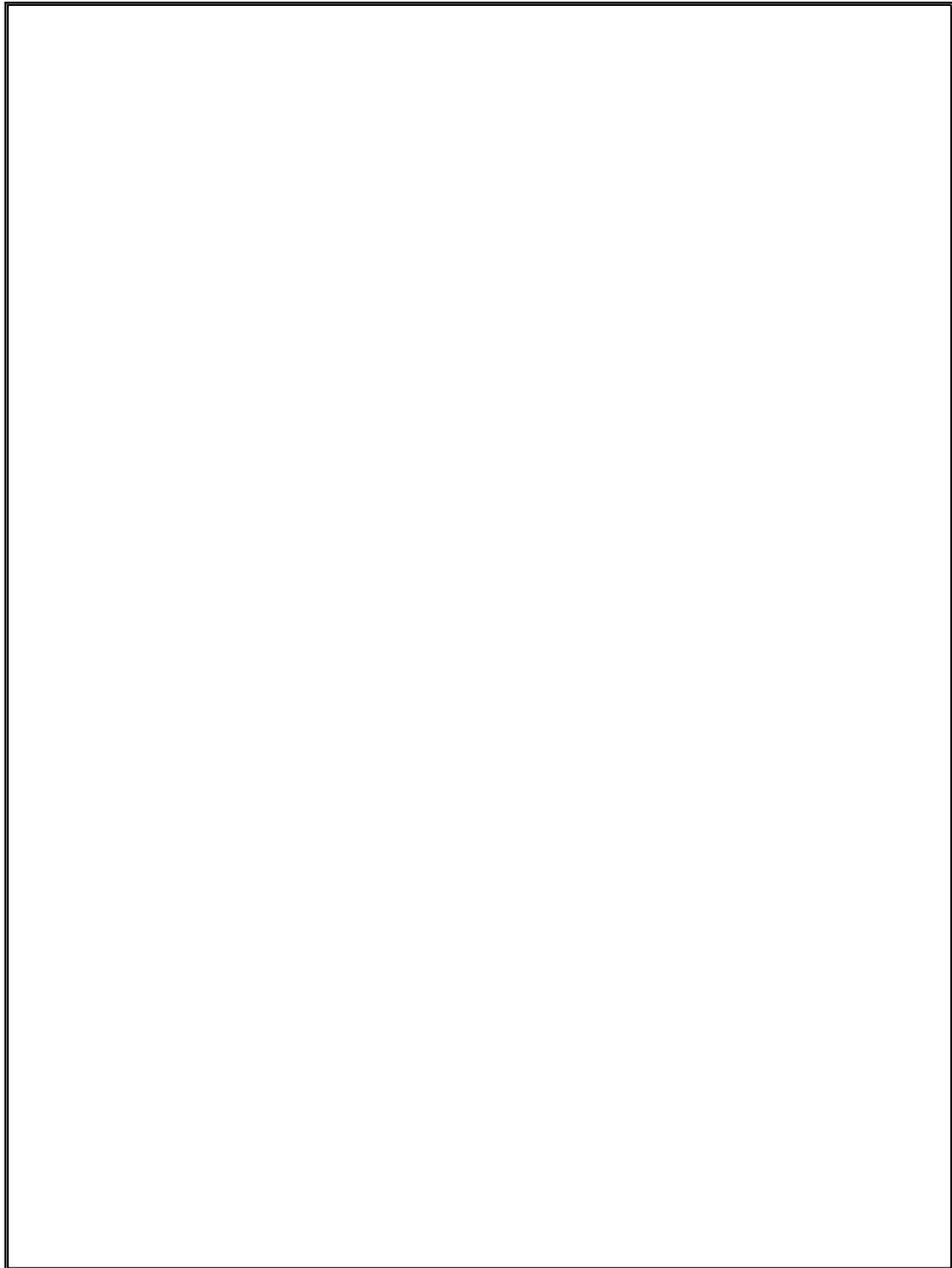


## INFORMACION TECNICA

**TRANSURETHANE ZINC/ MIO PRIMER 1.60**  
 Primario de poliuretano curado por humedad  
 513-80160-720

### INFORMACION SOBRE EL PRODUCTO

PREPARACION DE LA SUPERFICIE	CONDICIONES DE APLICACION										
<p>Las superficies a pintar deberán encontrarse libres de óxido, grasa, polvo, o cualquier otro contaminante. Sobre superficies de acero o hierro nuevas se recomienda limpiar previamente con Desoxidante-Desengrasante Sur # 305-900.</p> <p>•<b>Limpieza Mecánica</b>            Utilizando cepillo de acero, lijadoras rotativas, limpiar la superficie hasta un grado de limpieza SSPC-SP2 ó SP3 según indicación del Steel Structures Painting Council.</p> <p>•<b>Limpieza con Abrasivo</b>            Para condiciones de servicio severas, limpiar con chorro abrasivo hasta un grado de limpieza SSPC-SP5 ó SP10.</p>	<p><b>Temperatura ambiente</b>            Mínima: -5°C            Máxima: 40°C</p> <p><b>Humedad relativa ambiente</b>            Mínima: 10%            Máxima: 98%</p> <p><b>Temperatura de la superficie</b>            Mínima: -5°C            Máxima: 35 °C</p>										
EQUIPOS PARA LA APLICACION	INSTRUCCIONES PARA LA APLICACION										
<p>Puede ser aplicado con brocha, pistola convencional o equipo Airless.</p> <p><b>DATOS DE APLICACIÓN CON AIRLESS</b></p> <table border="0"> <tr> <td>Presión de Línea</td> <td>2400 PSI</td> </tr> <tr> <td>Tamaño de boquilla</td> <td>0.43 A 0.50 mm</td> </tr> <tr> <td>Angulo del Abanico</td> <td>60° 80°</td> </tr> <tr> <td>Espesor Seco x capa</td> <td>1.5 mils</td> </tr> <tr> <td>Espesor Húmedo x capa</td> <td>2.08 mils</td> </tr> </table> <p>Los datos indicados sirven como una guía. Puede ser necesario variar la presión de salida y la boquilla del equipo para mejorar las condiciones de aplicación del producto.</p>	Presión de Línea	2400 PSI	Tamaño de boquilla	0.43 A 0.50 mm	Angulo del Abanico	60° 80°	Espesor Seco x capa	1.5 mils	Espesor Húmedo x capa	2.08 mils	<p>Para un uso seguro de este producto solicite la hoja de seguridad del mismo ( M.S.D.S.).</p> <p>Agite el contenido del envase hasta que el producto esté completamente homogéneo. Luego agregue el diluyente recomendado sin exceder la cantidad indicada.</p> <p>Aplicar las capas siguientes del sistema de pintura previsto dentro de los tiempos de repinte recomendados.</p>
Presión de Línea	2400 PSI										
Tamaño de boquilla	0.43 A 0.50 mm										
Angulo del Abanico	60° 80°										
Espesor Seco x capa	1.5 mils										
Espesor Húmedo x capa	2.08 mils										





## INFORMACION TECNICA

### TRANSURETHANE MIO COATING 4.01

Capa intermedia de poliuretano curado por humedad  
513-80401-721

#### INFORMACION SOBRE EL PRODUCTO

DESCRIPCION DE PRODUCTO	USOS RECOMENDADOS
<p>Producto monocomponente formulado a base de resinas de poliuretano que curan con la humedad ambiental.</p> <p><b>Propiedades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Monocomponente</li> <li>• Resiste condiciones de inmersión constante</li> <li>• Se puede aplicar en superficies húmedas y a bajas temperaturas (-5°C)</li> <li>• Excelente adherencia</li> <li>• Excelente protección por barrera</li> <li>• Rápido Secado</li> </ul>	<p>El Transurethane Mio Coating es formulado para ser usado como capa intermedia en tanques, tuberías, estructuras marinas, puentes y maquinaria.</p> <p>Se recomienda el uso previo de primarios adecuados.</p> <p>Puede ser repintado con cualquier tipo de recubrimiento como epóxicos, vinílicos y poliuretánicos.</p>

#### CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO

<p><b>Color</b> Gris</p> <p><b>Acabado</b> Mate</p> <p><b>Sólidos por volumen</b> 59% ± 2</p> <p><b>Espesor seco recom.</b> 1.5 a 3 mils</p> <p><b>Rendimiento Teórico</b> 88 m<sup>2</sup>/gl (1 mils)</p> <p><b>Peso x galón (Kg)</b> 5.79</p> <p><b>Temp. máx. de desempeño</b> 100°C</p> <p><b>Vida útil en stock</b> 12 meses</p> <p><b>Visc. Stormer Krebs</b> 85 95</p> <p><b>Sólidos por Peso</b> 74% ± 2</p> <p><b>VOC (gramos / Litro)</b> 388</p> <p><b>Condiciones de almacenamiento</b> Entre 20°C y 30°C en un lugar seco y ventilado. El envase debe permanecer cerrado.</p>	<p><b>TIEMPO DE SECADO (20 °C)</b></p> <p><b>Tacto</b> 30 min</p> <p><b>Repintado Mínimo</b> 6 hrs</p> <p><b>Repintado Máximo</b> ilimitado</p> <p><b>Duro</b> 18 hrs</p> <p><b>Diluyente recomendado</b> Transocean Poliurethane Thinner 6.05 (513-80605-900)</p> <p><b>Proporción de dilución</b> 25 % max. en Vol</p> <p>Los tiempos de secado están basados en condiciones normales de aplicación, temperatura, espesor de película y dilución. Cuando alguno de estos factores sufren algún cambio, se deben tomar medidas específicas. Cuando es necesario aplicar una segunda mano, o bien aplicar la capa siguiente del esquema de pintado, observar los tiempos de secado indicados.</p>
---	---

La información suministrada es una guía de referencia del producto evaluado a nuestro leal saber y entender. Es responsabilidad del cliente hacer sus pruebas para comprobar la idoneidad del producto en sus aplicaciones particulares. SUR QUIMICA, S.A. se reserva el derecho de modificar dicha información en el momento que considere pertinente.



## INFORMACION TECNICA

**TRANSURETHANE MIO COATING 4.01**  
 Capa intermedia de poliuretano curado por humedad  
 513-80401-721

INFORMACION SOBRE EL PRODUCTO											
PREPARACION DE LA SUPERFICIE	CONDICIONES DE APLICACION										
<p>Las superficies a pintar deberán encontrarse libres de óxido, grasa, polvo, o cualquier otro contaminante.            Asegurese de que el primario aplicado previamente se encuentre completamente seco.</p>	<p><b>Temperatura ambiente</b>            Mínima: -5°C            Máxima: 40°C</p> <p><b>Humedad relativa ambiente</b>            Mínima: 10%            Máxima: 98%</p> <p><b>Temperatura de la superficie</b>            Mínima: -5°C            Máxima: 35 °C</p>										
EQUIPOS PARA LA APLICACION	INSTRUCCIONES PARA LA APLICACION										
<p>Puede ser aplicado con brocha, pistola convencional o equipo Airless.</p> <p><b>DATOS DE APLICACIÓN CON AIRLESS</b></p> <table border="0"> <tr> <td>Presión de Línea</td> <td>2100 PSI</td> </tr> <tr> <td>Tamaño de boquilla</td> <td>0.43 A 0.50 mm</td> </tr> <tr> <td>Angulo del Abanico</td> <td>60° 80°</td> </tr> <tr> <td>Espesor Seco x capa</td> <td>1.5 mils</td> </tr> <tr> <td>Espesor Húmedo x capa</td> <td>2.54 mils</td> </tr> </table> <p>Los datos indicados sirven como una guía. Puede ser necesario variar la presión de salida y la boquilla del equipo para mejorar las condiciones de aplicación del producto.</p>	Presión de Línea	2100 PSI	Tamaño de boquilla	0.43 A 0.50 mm	Angulo del Abanico	60° 80°	Espesor Seco x capa	1.5 mils	Espesor Húmedo x capa	2.54 mils	<p>Para un uso seguro de este producto solicite la hoja de seguridad del mismo ( M.S.D.S.).</p> <p>Agite el contenido del envase hasta que el producto esté completamente homogéneo. Luego agregue el diluyente recomendado sin exceder la cantidad indicada.</p> <p>Aplicar las capas siguientes del sistema de pintura previsto dentro de los tiempos de repinte recomendados.</p>
Presión de Línea	2100 PSI										
Tamaño de boquilla	0.43 A 0.50 mm										
Angulo del Abanico	60° 80°										
Espesor Seco x capa	1.5 mils										
Espesor Húmedo x capa	2.54 mils										



## INFORMACION TECNICA

**TRANSURETHANE TOP COAT 8.02**  
Acabado de poliuretano curado por humedad  
513-80802-000

INFORMACION SOBRE EL PRODUCTO		
DESCRIPCION DE PRODUCTO		USOS RECOMENDADOS
<p>Esmalte brillante, monocomponente formulado a base de resinas de poliuretano que curan con la humedad ambiental.</p> <p><b>Propiedades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Monocomponente</li> <li>• Resiste condiciones de inmersión constante</li> <li>• Se puede aplicar en superficies húmedas y a bajas temperaturas (-5°C)</li> <li>• Excelente adherencia</li> <li>• Excelente protección por barrera</li> <li>• Rápido Secado</li> </ul>		<p>El Transurethane Top Coat está formulado para ser usado como capa de acabado en tanques, tuberías, estructuras marinas, puentes y maquinaria.</p> <p>Se recomienda el uso previo de primarios y capas intermedias adecuadas.</p>
CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO		
<p><b>Color</b> Consultar</p> <p><b>Acabado</b> Brillante</p> <p><b>Sólidos por volumen</b> 58% ± 2</p> <p><b>Espesor seco recom.</b> 1.5 a 3 mils</p> <p><b>Rendimiento Teórico</b> 87 m<sup>2</sup> /gl (1 mils)</p> <p><b>Peso x galón (Kg)</b> 4.77</p> <p><b>Temp. máx. de desempeño</b> 100°C</p> <p><b>Vida útil en stock</b> 12 meses</p> <p><b>Visc. Stormer Krebs</b> 85 95</p> <p><b>Sólidos por Peso</b> 71% ± 2</p> <p><b>VOC (gramos / Litro)</b> 368</p>	<p><b>TIEMPO DE SECADO (20 °C)</b></p> <p><b>Tacto</b> 30 min</p> <p><b>Repintado Mínimo</b> 6 hrs</p> <p><b>Repintado Máximo</b> ilimitado</p> <p><b>Duro</b> 18 hrs</p> <p><b>Diluyente recomendado</b> Transocean Poliurethane Thinner 6.05 (513-80605-900)</p> <p><b>Proporción de dilución</b> 25 % max. en Vol</p>	<p>Los tiempos de secado están basados en condiciones normales de aplicación, temperatura, espesor de película y dilución. Cuando alguno de estos factores sufren algún cambio, se deben tomar medidas específicas. Cuando es necesario aplicar una segunda mano, o bien aplicar la capa siguiente del esquema de pintado, observar los tiempos de secado indicados.</p>
<p><b>Condiciones de almacenamiento</b> Entre 20°C y 30°C en un lugar seco y ventilado. El envase debe permanecer cerrado.</p>		

La información suministrada es una guía de referencia del producto evaluado a nuestro leal saber y entender. Es responsabilidad del cliente hacer sus pruebas para comprobar la idoneidad del producto en sus aplicaciones particulares. SUR QUIMICA, S.A. se reserva el derecho de modificar dicha información en el momento que considere pertinente.



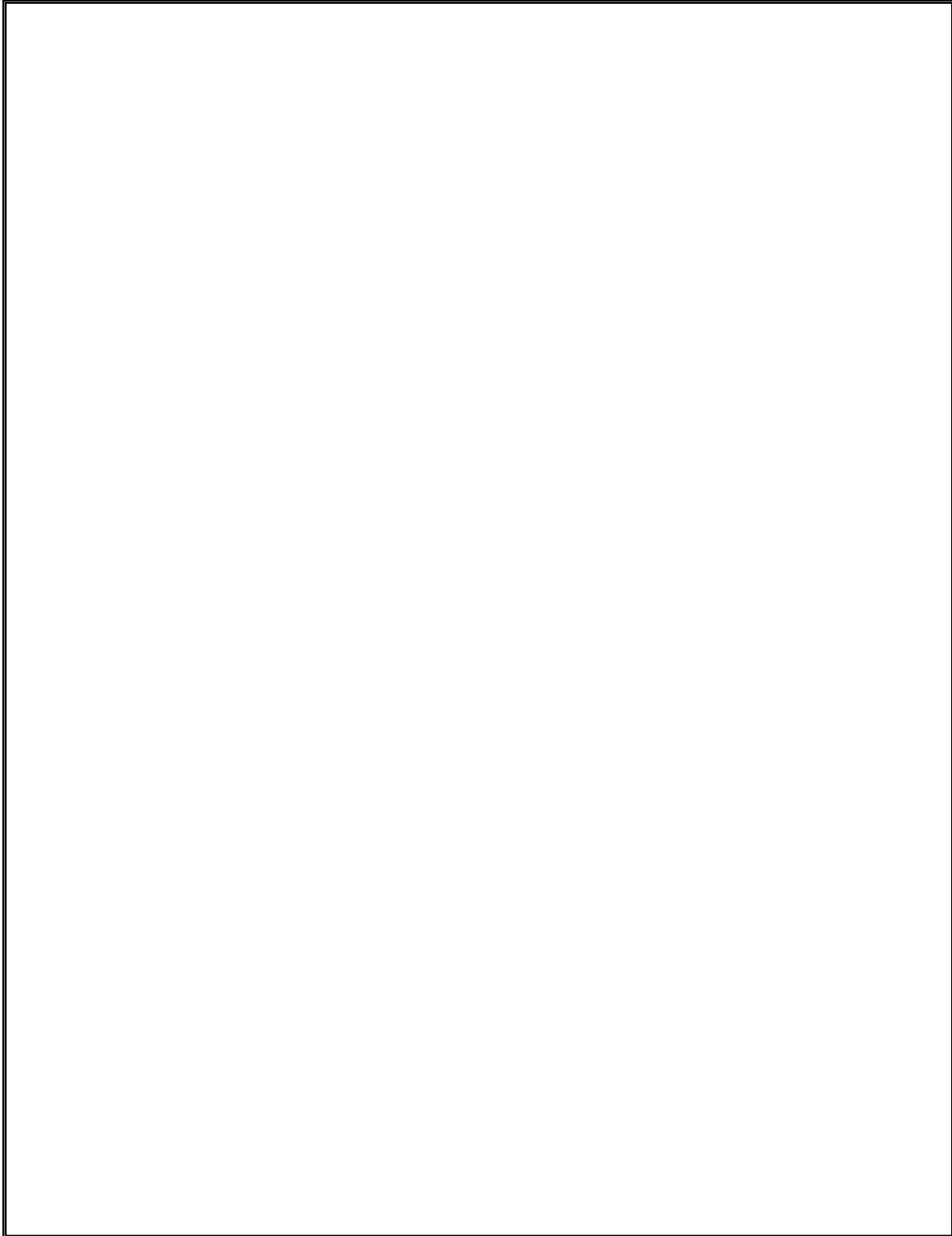
## INFORMACION TECNICA

### TRANSURETHANE TOP COAT 8.02

Acabado de poliuretano curado por humedad

513-80802-000

INFORMACION SOBRE EL PRODUCTO											
PREPARACION DE LA SUPERFICIE	CONDICIONES DE APLICACION										
<p>Las superficies a pintar deberán encontrarse libres de óxido, grasa, polvo, o cualquier otro contaminante. Asegurese de que el primario aplicado previamente se encuentre completamente seco.</p>	<p><b>Temperatura ambiente</b> Mínima: -5°C Máxima: 40°C</p> <p><b>Humedad relativa ambiente</b> Mínima: 10% Máxima: 98%</p> <p><b>Temperatura de la superficie</b> Mínima: -5°C Máxima: 35 °C</p>										
EQUIPOS PARA LA APLICACION	INSTRUCCIONES PARA LA APLICACION										
<p>Puede ser aplicado con brocha, pistola convencional o equipo Airless.</p> <p><b>DATOS DE APLICACIÓN CON AIRLESS</b></p> <table> <tr> <td>Presión de Línea</td> <td>1740 PSI</td> </tr> <tr> <td>Tamaño de boquilla</td> <td>0.30A 0.45 mm</td> </tr> <tr> <td>Angulo del Abanico</td> <td>60°</td> </tr> <tr> <td>Espesor Seco x capa</td> <td>1.5 mils</td> </tr> <tr> <td>Espesor Húmedo x capa</td> <td>2.54 mils</td> </tr> </table> <p>Los datos indicados sirven como una guía. Puede ser necesario variar la presión de salida y la boquilla del equipo para mejorar las condiciones de aplicación del producto.</p>	Presión de Línea	1740 PSI	Tamaño de boquilla	0.30A 0.45 mm	Angulo del Abanico	60°	Espesor Seco x capa	1.5 mils	Espesor Húmedo x capa	2.54 mils	<p>Para un uso seguro de este producto solicite la hoja de seguridad del mismo ( M.S.D.S.).</p> <p>Agite el contenido del envase hasta que el producto esté completamente homogéneo. Luego agregue el diluyente recomendado sin exceder la cantidad indicada.</p> <p>Aplicar las capas siguientes del sistema de pintura previsto dentro de los tiempos de repinte recomendados.</p>
Presión de Línea	1740 PSI										
Tamaño de boquilla	0.30A 0.45 mm										
Angulo del Abanico	60°										
Espesor Seco x capa	1.5 mils										
Espesor Húmedo x capa	2.54 mils										



**APÉNDICE E. Plan de mantenimiento preventivo y  
correctivo**

## DISEÑO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO PARA LA SUPERFICIE FLOTANTE.

Este plan está diseñado para servir como guía de los requerimientos específicos en la inspección, preparación de superficie y aplicación de pintura, durante una construcción nueva o rutina de mantenimiento en la superficie flotante.

Se debe entender que esta práctica debe ser utilizada para coordinar actividades entre el personal encargado de la embarcación, el personal constructor, personal de manufactura de las pinturas y personal de aplicación de las pinturas.

Para desarrollar este diseño se consultó el procedimiento indicado en la norma ASTM F 941 (ref. 1).

### Procedimiento

Al inicio de contrato, después de la selección de las pinturas, pero antes de comenzar la preparación de la superficie o aplicación de la pintura, una reunión debe ser realizada entre las partes mencionadas anteriormente.

En ella se debe de acordar cual va a ser la preparación de la superficie y la aplicación de la pintura para cada parte de la estructura flotante por separado. Se debe completar el informe que se halla en la designación ASTM F 941 Formulario Muestra para Determinación de la Preparación de la Superficie y Aplicación de la Pintura (ref 1). El mismo debe ser completado para cada área de la superficie flotante por separado, y cada punto debe ser discutido y analizado durante la reunión.

La designación estándar ASTM F 718 (ref. 1) muestra un procedimiento para la escogencia de las pinturas, de acuerdo con los requerimientos deseados.

Luego de haber completado la forma muestra F 941 (ref. 1) para cada parte de la superficie flotante, y de tener muestras de las hojas de requerimiento técnico para cada pintura a aplicar, se puede consultar la norma D 3276 Guía para inspectores de pinturas (ref. 1), como una fuente adicional de información.

Las normas F 1130 Inspección de los Sistemas de Pintura de la Plataforma y Superestructura de un Barco (ref. 1) y la F 1131 Inspección en el Sistema de Tanques y Celdas de un Barco (ref. 1) también pueden servir de consulta a este respecto.

## **APÉNDICE F. Nomenclatura**

## Notación de las pinturas

Primer dígito: Número de muestra

Segundo dígito: (1) Sand Blast; (2) Preprimario; (3) Ninguno

Tercer dígito: (1) Primario Transocean; (2) Primario Corroless

Cuarto dígito: (1) Intermedio transocean; (2) Ninguno

Quinto dígito: (1) Acabado transocean; (2) Acabado Poliuretek

T.Amb: Temperatura ambiente (°C)

T.Sup: Temperatura de la superficie metálica (°C)

H.Relat: Humedad relativa

Pto.Rocío: Temperatura del punto de rocío (°C)

mm/año: Milímetros entre año

$\eta$ : Polarización de resistencia

E: Potencial

$E_{\text{corr}}$ : Potencial de corrosión

$I_{\text{corr}}$ : Corriente de corrosión

## Notación de sangrado en corte

N: Nulo

MP: Muy poco

P: Poco

R: Regular

M: Mucho

**APÉNDICE G. Imágenes obtenidas en campo de la  
superficie flotante**



**Figura G1.** Fotografía de las grúas que se colocan sobre la plataforma de la superficie flotante.



**Figura G2.** Fotografía del piso de la zona cubierta. Se observa la corrosión irregular generalizada.



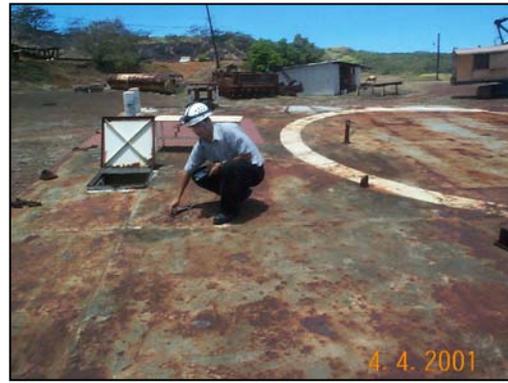
**Figura G3.** Fotografía de las paredes de seguridad exteriores. Se observa la corrosión en la zona del cordón de soldadura.



**Figura G4.** Fotografía del cuarto de buceo. Se aprecia que el piso se encuentra en buen estado debido a que su recubrimiento está bien mantenido.



**Figura G5.** Fotografía de la plataforma en la que se aprecia la gran corrosión que la cubre, también se pueden observar hundimientos en las láminas.



**Figura G6.** Fotografía de la plataforma en la que se están realizando mediciones de espesores por la técnica de ultrasonido industrial.



**Figura G7.** Fotografía de la plataforma en la que se observa como la corrosión ha desprendido el recubrimiento de pintura existente..



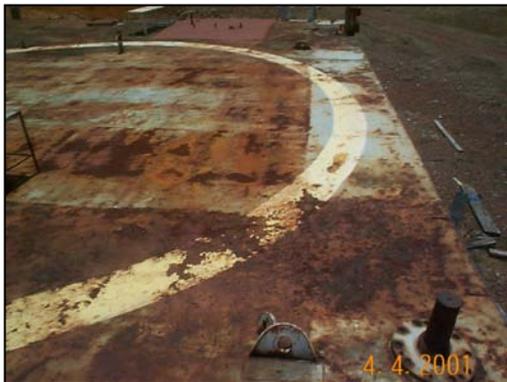
**Figura G8.** Fotografía de plataforma entre la superficie y el interior. Se aprecia cómo la corrosión ha deteriorado el laminado.



**Figura G9.** Fotografía del piso de una celda en la que se observa la corrosión.



**Figura G10.** Fotografía de la plataforma que muestra una junta al laminado. Se observa corrosión bimetalica.



**Figura G11.** Fotografía de la plataforma que muestra el deterioro existente en la zona de depósito de la grúa.



**Figura G12.** Fotografía panorámica de la superficie flotante, la cual está encallada en las orillas del embalse Arenal.



**Figura G13.** Fotografía mostrando los costados golpeados de la superficie flotante.



**Figura G14.** Fotografía que muestra la discontinuidad del cordón de soldadura en la pared exterior de la superficie.



**Figura G15.** Fotografía que muestra un agujero en la pared exterior de la superficie flotante.



**Figura G16.** Fotografía que muestra la parte posterior de la superficie flotante.