

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**VICERRECTORÍA DE DOCENCIA**  
**ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS**  
**MATERIALES**



**INFORME DE**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**

Planeamiento y montaje de un sistema para la evaluación de las velocidades de corrosión en láminas y tubos de acero galvanizado, colocadas en distintas zonas del país.

**Erick José Fernández Paniagua**

**CARTAGO**

**2007**

## CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

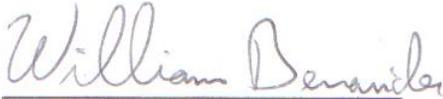
El presente Proyecto Final de Graduación titulado "Planeamiento y montaje de un sistema para la evaluación de la corrosión en láminas y tubos de acero galvanizados, colocados en distintas zonas del país" y realizado en la empresa "GALVATICA. SA", durante el II Semestre de 2006, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Ing. William Benavides R. e Ing. Oscar Chaverri; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La orientación y supervisión del proyecto desarrollado por el estudiante, estuvo a cargo del profesor(a) asesor (a) Ing. Juan Álvarez Castro, Dr.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

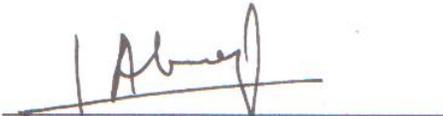
Confidenciales



Ing. William Benavides R.  
Profesor Evaluador



Ing. Oscar Chaverri Q.  
Profesor Evaluador



Ing. Juan Fdo. Álvarez C.  
Profesor Guía



Sr. Erick José Fernández Paniagua  
Estudiante

Cartago, 18 de diciembre de 2007

## **DEDICATORIA**

Mi trabajo, así como todos mis logros los dedico a mi familia, quienes me han dado la oportunidad de llegar hasta donde estoy y me han enseñado a ser una persona de bien, y aprovechar mis talentos y virtudes para lograr mis objetivos y sobre todo a no sucumbir ante los obstáculos que encontramos a lo largo del camino de la vida.

Especialmente a mis padres José Fernández Gatjens y Elga Paniagua Zúñiga quienes son mi motivo e inspiración para seguir adelante, y a mis hermanas Alexa, Yendry y María Nelly quienes siempre me han dado toda su confianza y cariño.

## **AGRADECIMIENTO**

Primero que a todos, estoy agradecido con Dios ya que gracias a su disposición, es que este proyecto se a podido realizar satisfactoriamente.

De forma muy especial al personal docente y administrativo de la escuela de ciencia e ingeniería de los materiales, por la formación personal y académica que me han dado.

Muy sinceramente agradezco a todas las personas que directa o indirectamente han estado a mi lado, contribuyendo con el desarrollo de este proyecto.

## INDICE DE TEMAS

Introducción	9
Presentación del tema	11
Resumen del tema	12
Objetivos	13
Objetivos generales	13
Objetivos específicos	13
Marco de referencia	15
Antecedentes y causas	15
Importancia y aplicabilidad del Proyecto	16
Capítulo I	17
Marco teórico	17
Clima de Costa Rica	17
Regiones climáticas	19
Mecanismo de corrosión atmosférica	29
Influencia de las condiciones meteorológicas en los procesos de corrosión	29
Corrosión atmosférica de acero al carbono	34
Contaminación atmosférica	35
Ciclo atmosférico del azufre	36
Influencia del SO <sub>2</sub> sobre el metal	36
Efecto de la lluvia ácida	38
Influencia de los cloruros (CL <sup>-</sup> )	38
Acción de los Principales Factores Atmosféricos	40
Confección de mapas de corrosión atmosférica	41
Categorización de la agresividad de la atmósfera	45
Galvanizado	49
Corrosión por Aireación diferencial	50
Medición de la coloración por método de Munsell	51
Medición del brillo	54
Capítulo II	55
Especificaciones y Procedimientos	55

Programación del ensayo de corrosión atmosférica	55
Geometría de las probetas de ensayo	58
Exposición de las probetas	62
Recolección de las probetas	64
Sitios de ubicación de las estaciones	65
Limpieza de las probetas	65
Calculo de la corrosividad	69
Codificación de las probetas	70
Especificaciones de los tubos	73
Procedimiento de Montaje de las probetas	75
Procedimiento de recolección de probetas	75
Capítulo II	76
Resultados de ensayo de corrosión en paquetes de tubos	76
Primera recolección	76
Segunda Recolección	82
Tercera Recolección	86
Resultados de ensayo de corrosión atmosférica	95
Análisis de resultados de ensayo de corrosión en paquetes de tubos	106
Análisis de resultados de ensayo de corrosión atmosférica	114
Capítulo IV	117
Conclusiones de ensayos	118
Recomendaciones de ensayo de corrosión en paquetes de tubos	120
Recomendaciones de ensayo de corrosión atmosférica	121
Bibliografía	122
Apéndice A	123
Apéndice B	129
Apéndice C	131
Apéndice D	136
Apéndice E	138

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa político de C.R	17
Figura 1.2 Mapa climático de C.R	19
Figura 1.3 Influencia de la película de humedad en la corrosión	30
Figura 1.4 factores atmosféricos involucrados	31
Figura 1.5 Diagrama potencial	34
Figura 1.6 Representación de un nido de sulfato	37
Figura 1.7 Representación de un aglomerado de cloruro	39
Figura 1.8 Micrografía de recubrimiento galvánico	49
Figura 1.9 Resquicios más comunes	51
Figura 1.10 Sistema 3D para la representación de los colores	53
Figura 1.11 Representación de la carta de colores	53
Figura 2.1 Probeta de lamina tipo teja	58
Figura 2.2 Probeta de lamina ondulada	58
Figura 2.3 Probeta de tubo de lamina galvanizada	59
Figura 2.4 Probeta de tubo galvanizado por inmersión	59
Figura 2.5 Geometría de las probetas de lamina de acero y zinc	60
Figura 2.6 Gráfica de peso perdido por las probetas	66
Figura 3.1 Corrosión presentada en los bordes de corte de los tubos	76
Figura 3.2 Corrosión en los sectores expuestos del paquete de tubos	77
Figura 3.3 Formación de corrosión en las caras internas del paquete de tubos	78
Figura 3.4 Formación de corrosión en las caras internas del paquete de tubos	78
Figura 3.5 Formación de corrosión en las caras de los tubos	79
Figura 3.6 Formación de corrosión en las caras de los tubos	79
Figura 3.7 Formación acelerada de corrosión en las caras de los tubos	80
Figura 3.8 Formación de corrosión en las caras internas del paquete de tubos	81
Figura 3.9 Corrosión en los bordes de corte de los tubos	82
Figura 3.10 Formación de oxidación blanca	83
Figura 3.11 Formación de oxidación blanca y herrumbre	84
Figura 3.12 Formación de óxidos de Hierro	85

Figura 3.13 Formación de óxidos en los bordes de corte	86
Figura 3.14 Formación de corrosión blanca en sectores externos	87
Figura 3.15 Formación de corrosión blanca en sectores internos	88
Figura 3.16 Formación de óxidos por fallo de recubrimiento de zinc	89
Figura 3.17 Paquete de tubos almacenado en optimas condiciones	90
Figura 3.18 Caras internas del paquete de tubos	91
Figura 3.19 Inspección de las caras internas del paquete de tubos	92
Figura 3.20 Bordes de corte de los tubos	93
Figura 3.21-3.22 Panel de Exposición, Estación caldera	98
Figura 3.23 Estación Orotina	99
Figura 3.24 Estación Tibás	99
Figura 3.25 Estación Pérez Zeledón	100
Figura 3.26 Solución para decapado de probetas de acero	101
Figura 3.27 Decapado de las probetas de acero	102
Figura 3.28 Limpieza de las probetas	103
Figura 3.29 Solución para decapado de probetas de Zinc	104
Figura Probeta decapada y limpia	104

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Categorías de las Atmósferas en función del tiempo de humectación, SO <sub>2</sub> y Cl-	46
Tabla 1.2 Categorías de la corrosividad de la atmósfera.	47
Tabla 1.3 Categorías de la corrosión de una atmósfera para Metales.	48
Tabla 1.4 Estimación de la corrosividad	48
Tabla 2.1 Tabla para recolección de datos de corrosión	62
Tabla 2.2 Tabla para periodos de recolección de probetas tipo A,B,C y D	63
Tabla 2.3 Tabla para periodos de recolección de probetas tipo E y F	63
Tabla 2.4 Procedimiento para limpieza de probetas de acero	67
Tabla 2.5 Procedimiento para limpieza de probetas de zinc	68
Tabla 2.6 Codificación de probetas según ubicación	70
Tabla 2.7 Codificación de probetas según su tipo	70
Tabla 2.8 Codificación de probetas según su periodo de recolección	70
Tabla 2.9 Codificación de probetas según su posición en el panel	71
Tabla 2.10 Tabla de recolección de datos de factores atmosféricos	72
Tabla 2.11 Requerimientos del galvanizado según norma ASME A653	73
Tabla 2.12 Periodos de exposición de los paquetes de tubos	74
Tabla 2.13 Condiciones ambientales dentro del laboratorio de TUBOTICO.SA	74
Tabla 3.1 Espesores de galvanizado de los tubos expuestos	94
Tabla 3.2 composición del baño para galvanizado (GALVATICA)	95
Tabla 3.3 composición del baño para galvanizado (TUBOTICO)	95
Tabla 3.4 Características climatográficas de las zonas de ubicación de las estaciones	96
Tabla 3.5 Cantidad y tipos de probetas por estación	97
Tabla 3.6 Resultados de los análisis de PH a las aguas de lluvia en estación Orotina	101
Tabla 3.7 Resultados de la medición de la corrosión en la estación Orotina	105
Tabla 3.8 Resultados de la medición de la corrosión en la estación Caldera	105

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se realizó para las empresas GALVATICA SA. y TUBOTICO SA. las cuales pertenecen al grupo Pujol Martí y forman parte del complejo industrial José Pujol Martí el cual esta ubicado en la Ceiba de Orotina.

GALVATICA SA. Esta empresa se dedica a la elaboración de lámina lisa galvanizada, la cual ha su vez es vendida en rollos, cintas o es formada para obtener productos como laminas corrugadas, onduladas y tipo teja, entre muchos otros usos.

Por otra parte la empresa TUBOTICO SA. se dedica a la elaboración de tuberías y perfiles, tanto en acero galvanizado proveniente de GALVATICA como de acero estructural, proveniente de proveedores externos.

Al estar estas dos compañías entre las principales proveedoras de estos productos al mercado nacional, abasteciendo también varios mercados internacionales, se a creado una gran responsabilidad para con los clientes y debido a esto es que han surgido nuevas necesidades de conocimiento, entre ellas la de conocer las velocidades de corrosión de los productos que se ofrecen al mercado, al ser sometidos a diferentes condiciones ambientales.

Es así como un estudio para conocer la corrosividad de algunos productos en diferentes regiones, tomando en cuenta consideraciones demográficas y climatográficas, se vuelve un elemento importante para respaldar de forma concreta la influencia de los elementos ambientales específicos del lugar en cada uno de los productos de mayor utilización a nivel industrial, lo cual generará información valiosa, con la cual se optimizará la vida útil de estos materiales.

Este estudio se diseñó para un plazo de diez años, en los cuales se verá el impacto temprano y a largo plazo de la corrosividad en puntos localizados en la zona de caldera, Orotina, colima de Tibás y Pérez Zeledón, además del monitoreo previo de agentes atmosféricos y contaminantes, así se contara con variables para poder compararlas y con esto lograr conclusiones justificadas.

Paralelo a este proyecto, también se realizarán investigaciones de oxidación en paquetes de tubos, almacenados durante periodos programados y en condiciones inapropiadas de almacenamiento, como lo son las exposiciones a las lluvias y a las altas humedades relativas, tal y como se profundizará más adelante con el desarrollo del proyecto.

## PRESENTACIÓN DEL TEMA

### **Planeamiento y montaje de un sistema para la evaluación de las velocidades de corrosión en láminas y tubos de acero galvanizado, colocadas en distintas zonas de Costa Rica.**

El efecto que causa la corrosión sobre los materiales metálicos es un tema de interés desde cualquier punto de vista pero especialmente desde el económico, ciertamente debido a que afecta puentes, líneas de transmisión eléctrica, estructuras de edificios, techos, equipos e instrumentos, mecánicos, eléctricos y electrónicos, lo cual representa pérdidas económicas directas cercanas a un 5% del producto interno bruto nacional de (PIB).

Una buena escogencia y caracterización de los sitios donde se instalaron las estaciones de monitoreo y control de corrosión, es parte fundamental puesto que cada lugar posee un microclima específico, y por lo tanto se espera que las variaciones de sus condiciones, evidencien diferencias entre sus velocidades de corrosión, así como la forma de presentarse la misma.

La metodología utilizada para el planeamiento del proyecto fue la consulta de diferentes normas, bibliografía y recopilación de proyectos realizados anteriormente.

La determinación de la corrosividad y velocidades de corrosión se hará mediante el método de pérdida de masa, establecido por la Norma *ASTM G 92 - 86 Characterization of Atmospheric Test Sites-*

Además se contará con un registro fotográfico para cada una de las recolecciones planeadas.

El resultado de este trabajo permitirá obtener información valiosa acerca del grado de deterioro que sufren las laminas galvanizadas, pintadas y las tuberías galvanizadas a corto y largo plazo, además de los principales factores ambientales y contaminantes atmosféricos que la afectan en cada uno de los lugares de ensayo.

Este proyecto depende del seguimiento y monitoreo que disponga la empresa a cada una de las estaciones.

## RESUMEN DEL TEMA

Para el estudio de la corrosión atmosférica en diferentes zonas de nuestro país nos debemos basar en la recopilación e interpretación de normas acerca de corrosividad y en pruebas similares realizadas anteriormente, y así poder establecer una serie de procedimientos para la realización del mismo, los cuales mencionaremos seguidamente:

Para la caracterización de las variables meteorológicas de estudio que podrían influir en la corrosividad de los materiales, las cuales son: precipitación, pH, humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad del viento, se obtendrán por medición directa y en cuanto a la concentración de contaminantes como  $H_2S$ ,  $SO_2$  y  $NaCl$  se obtendrán por contratación privada del servicio de análisis.

La caracterización demográfica también es un factor de gran importancia, ya que los sitios de ensayo deben ser lugares donde la información generada sirva para dar un mejor asesoramiento a potenciales clientes de la zona

Los sitios donde se colocaron las estaciones corresponden algunas a propiedades del Grupo Pujol, con el fin de establecer un procedimiento de comparación entre las zonas donde están ubicados.

Según los datos meteorológicos investigados este país por encontrarse cercano al ecuador, y al tener influencia de dos mares presenta condiciones muy favorables para la corrosión, entre las cuales se puede citar que la humedad relativa promedio anual en todo el territorio nacional es mayor a un 75%.

Como último paso se dejaron todos los procedimientos y formatos de recopilación de datos en hojas de cálculo, usando Microsoft EXCEL, tanto para la anotación de cada reporte de laboratorio, así como para dar una la categorización a los diferentes valores obtenidos.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVOS GENERALES:**

- Diseño del procedimiento para el desarrollo, análisis de información y construcción de las estaciones donde se ubicarán las muestras para el monitoreo de la corrosión atmosférica.
- Estudio e investigación de los fenómenos de corrosión que se presentan en paquetes de tubos estructurales en condiciones de mal almacenamiento.

### **Objetivos Específicos:**

- Diseño de una guía para el montaje y recolección de las muestras acorde a las necesidades de estudio de la empresa, de la corrosión atmosférica,
- Estudio y selección de las zonas de ubicación de las estaciones.
- Diseño de la estructura física de las estaciones, de los sujetadores de las muestras, y la selección de materiales para las mismas.
- Construcción de las estaciones y montaje de las muestras en ellas.
- Evaluar los efectos de la corrosión atmosférica sobre la capa de zinc (galvanizado) depositada sobre los tubos en paquetes expuestos al ambiente.
- Evaluar la influencia que tiene la exposición de los tubos estructurales al ambiente en su forma de empaque (paquete de tubo).
- Comparar las formas de corrosión presentes en las superficies del paquete expuestas al ambiente como también las localizadas entre tubo y tubo.
- Relacionar los datos obtenidos con las formas de corrosión presentes en casos de reclamos donde se sospecha un mal manejo y almacenamiento de los mismos.

- comparar la velocidad de corrosión entre los paquetes de tubos expuestos a las condiciones de un indebido almacenamiento, otro en condiciones óptimas de almacenamiento (almacenado en el laboratorio).

## MARCO DE REFERENCIA

### **Antecedentes y causas**

Anteriormente esta empresa no había realizado ningún proyecto de instigación en corrosión, si embargo ya había dado sus primeros pasos en este campo, con la instalación desde hace unos pocos años atrás de algunos estantes con muestras al ambiente, para dar un control visual de la degradación de las mismas, pero para lo cual no se seguía de forma estricta un estándar o normas, además se contaba con un procedimiento para la recolección de información de estas, elaborado de una forma empírica.

El creciente aumento en los estándares de calidad y en la competencia por el dominio de los mercados, tanto nacionales como extranjeros obliga a las industrias del acero a tener un mayor conocimiento sobre la resistencia de sus productos al ser sometidos a diferentes ambientes, que les permita brindar recomendaciones técnicas a sus clientes y así optimizar el aprovechamiento de los mismos.

A raíz de estos antecedentes surge la necesidad de realizar un estudio de la corrosividad tomando en cuenta las variables atmosféricas con el fin de contar con información precisa acerca de las causas tanto meteorológicas como las provenientes de los contaminantes ambientales.

## **IMPORTANCIA Y APLICABILIDAD DEL PROYECTO**

Toda la información que pueda ser obtenida gracias a la investigación de la corrosión atmosférica en distintas zonas climáticas y con diversos materiales, es parte del desarrollo de nuevas técnicas de protección y de mejoramiento en el uso de los materiales.

Un detallado análisis de estos resultados permite estimar las ventajas y limitaciones del material ensayado según las condiciones atmosféricas que prevalezcan en cada zona de interés, prever posibles formas de corrosión y establecer medidas a tomar para evitarlas.

La clasificación de las zonas atmosféricas según su agresividad es útil para pronosticar el comportamiento de los materiales y así optimizar su rendimiento para cada sitio de interés.

La investigación de la influencia de los factores meteorológicos y de contaminantes ambientales sobre el proceso de corrosión facilita la dilucidación de los procedimientos de protección más convenientes teniendo en cuenta el lugar donde se realizará el proyecto.

## CAPITULO I

### MARCO TEÓRICO

#### CLIMA DE COSTA RICA

Cuando se hace referencia al clima de un país, se trata de describir el comportamiento promedio de las principales variables meteorológicas de la manera más sencilla posible.

Al conocer la temperatura, la humedad, la cantidad de precipitación y otras variables, se da una idea de cuál es la mejor época del año para visitar esta región y dependiendo de nuestras necesidades, asumimos cómo debemos vestir y hasta qué tan recomendable es para nuestra salud, de una manera similar nos debemos regir a la hora de realizar alguna construcción, pues se debe de seleccionar los materiales más adecuados según las condiciones atmosféricas que prevalezcan en la zona.

Costa Rica se encuentra ubicada en la parte sur de América Central, al norte del Ecuador, en la región conocida como neotrópica. Tiene una extensión de 51100 kilómetros cuadrados (de los cuales un 24% son áreas de protección



silvestre), limita al noroeste con Nicaragua, al sureste con Panamá, al este con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico. Su localización esta entre la latitud  $08^{\circ}00'$  y  $11^{\circ}15'$  Norte y las longitudes  $82^{\circ}30'$  y  $86^{\circ}00'$  Oeste. La latitud media se estima en los  $10^{\circ}$  Norte y la longitud media en  $84^{\circ}15'$  Oeste. Está dividida en

Figura 1.1 mapa político de Costa Rica.

siete provincias: San José (la capital) (4 959 km<sup>2</sup>), Alajuela (9 752km<sup>2</sup>), Heredia (2656 km<sup>2</sup>), Cartago (3 124 km<sup>2</sup>), Puntarenas (11 276km<sup>2</sup>), Limón (9 188 km<sup>2</sup>), Guanacaste (10140 km<sup>2</sup>) y la Isla del Coco, bajo soberanía nacional en el Océano Pacífico, en la posición: latitud 5°30'Norte y longitud de 87°06'Oeste.

El último cálculo de población realizado en el año 2 000, da como resultado una población de 3 824 593 habitantes y el 50 % de estos viven en la gran área metropolitana, que comprende la parte central del país y a una altitud promedio de 1 000 metros sobre el nivel del mar.

Costa Rica por su posición en una zona tropical del planeta, se caracteriza por las altas temperaturas y lluvias durante gran parte del año.

La influencia del mar Caribe, del océano Pacífico y el área continental pequeña, hacen que la mayoría de los elementos meteorológicos del clima no presenten grandes oscilaciones anuales como las que se observan sobre las grandes masas continentales.

La variación anual más importante que se presenta es en el viento y se debe fundamentalmente a la interacción que presenta los diferentes sistemas de viento que afectan al país y la topografía, la cual cuenta con cadena montañosa (compuesta por sierras y cordilleras) que atraviesa el país de noroeste a sureste con elevaciones de hasta 3 820 metros sobre el nivel medio del mar (Cerro Chirripó). Esta variación se ve reflejada en la distribución de la precipitación

## REGIONES CLIMÁTICAS

Tomando como referencia las características en la distribución de la precipitación es que se han designado seis regiones climáticas, indicadas a continuación

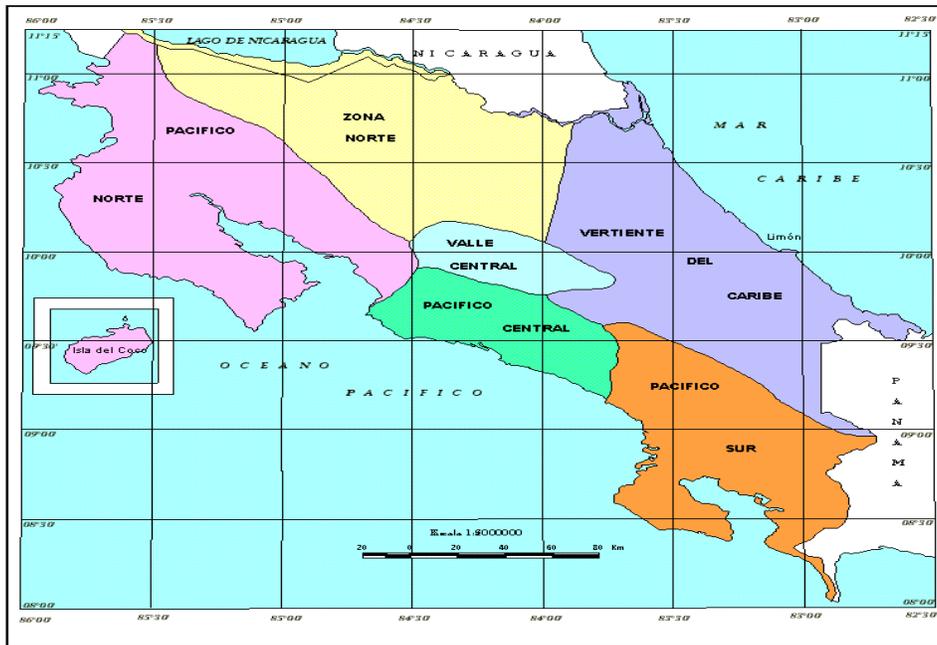


Figura 1.2 mapa climatográfico de Costa Rica, Según el instituto meteorológico nacional

### VALLE CENTRAL

La región del Valle Central comprende parte de las provincias de San José, Alajuela, Heredia, y Cartago. Para representar esta región se analiza las estaciones meteorológicas de Pavas en el centro del Valle y Fraijanes para el sector montañoso.

### LA LLUVIA

La cantidad de lluvia registrada varía de acuerdo con la zona, por ejemplo en el sector central (Pavas) 997m de altitud, se acumula durante el año una cantidad promedio de 1967 mm (1mm es equivalente a 1litro por metro

cuadrado). Mientras en el sector montañoso (Laguna de Fraijanes) a 1 850m de altitud, el registro anual es de 3230.8 mm, Cabe indicar que el sector montañoso tanto a inicio como a finales de año, la cantidad de lluvia es mayor que la registrada sobre el Valle.

## TEMPERATURA

En Pavas la temperatura promedio se mantiene entre los 22 y 24 grados Célsius(°C) y no tiene grandes cambios a través del año, mientras que la máxima promedio no exceden los 29°C y los promedios de la temperatura mínima oscilan alrededor de los 18°C. Mientras en Laguna de Fraijanes, sector montañoso del Valle, la temperatura máxima apenas alcanza los 23 grados en los meses de marzo y abril y durante enero y febrero fácilmente baja en algunas ocasiones hasta 7°C.

## HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa promedio anual en la estación de Pavas en San José es de 75%, con valores de 69% en la época seca y una oscilación de 10%, a lo largo de cada año. En las partes montañosas (1850m altitud, Fraijanes) el promedio es de 87% y pocas veces se registran humedades por debajo de 80%.

## VIENTO

La época seca está marcada por la persistencia del viento Alisio (dirección NE), con velocidades altas de 30 kilómetros por hora (km/h) entre enero, febrero y marzo. En la época lluviosa, el viento Alisio disminuye la intensidad en horas de la mañana, aproximadamente a las 10:00 a.m. (16:00 Tiempo Coordinado Universal (TCU), con lo cual la brisa del Pacífico con dirección Oeste, Suroeste, se adentra hasta el Valle Central y forman un "frente de brisa ", favoreciendo la formación de nubes de tipo cúmulos con suficiente desarrollo vertical como para provocar tormentas eléctricas y lluvias.

## PACIFICO NORTE

Esta región comprende la provincia de Guanacaste, los cantones de Orotina y San Mateo de la provincia de Alajuela y la parte norte de Puntarenas hasta la desembocadura del río Grande de Tárcoles. Para representar esta región se analiza las estaciones meteorológicas de Liberia a 85 m de altitud, una zona intermedia y Tilarán a 562 m de altitud para el sector montañoso.

### LA LLUVIA

La distribución de las lluvias en las llanuras y en la costa de esta región es de tipo Pacífico, es decir con una época lluviosa bien definida desde mayo a octubre, presentando los máximos de precipitación en los meses de junio, septiembre y octubre. Hay que tomar en cuenta que en julio se registra una disminución en la lluvia producto del "veranillo" que se presenta casi en general en este mes.

La época seca comprende los meses de diciembre a marzo, abril y noviembre se podrían considerar meses de transición en que las lluvias están presentes pero con menor regularidad.

La zona montañosa de esta región (Tilarán a 562m de altitud) también tiene un comportamiento similar (tipo Pacífico) con un promedio de 1963.1 mm anuales. Cabe indicar que durante el fin y principio de año las lluvias son más abundantes (*por la acción de los vientos alisios que acarrear humedad del Caribe*) en comparación a las partes bajas. En general, se presenta un promedio de alrededor de 1 400mm en las llanuras.

### TEMPERATURA

En la estación meteorológica de Liberia, ubicada en el aeropuerto internacional Daniel Oduber Quirós de Llano Grande, la temperatura promedio ronda los 28° C, los máximos se presentan durante el mes de abril, alcanzando en algunos casos valores próximos a los 38° C. Mientras que las temperaturas

mínimas son más probables en los meses que van desde noviembre a marzo debido a las incursiones de masas de aire con componente Norte y Noreste, se sitúan cerca de los 20° C. Conforme ascendemos a las cordilleras de Tilarán y Guanacaste las temperaturas van en descenso y en las faldas oscilan entre los 23 °C y 17 °C.

## HUMEDAD RELATIVA

Tomando como referencia siempre la estación ubicada en el aeropuerto Daniel Oduber de Liberia, la humedad relativa oscila entre 60 y 65% en la época seca y en la lluviosa entre 80 y 85%, junio, setiembre y octubre -*que son los más lluviosos*- presentan los máximos valores, mientras que los mínimos se presentan en el mes de marzo, las zonas más altas de esta región presentan humedades relativas altas la mayor parte del año debido a que durante diciembre, enero y febrero tienen predominio de viento alisio y el consecuente arrastre de humedad en forma de nubosidad y lloviznas desde la región del Caribe y Zona Norte.

## VIENTO

Durante la época seca y durante el veranillo (*julio y agosto*) los vientos alisios predominan con direcciones de Este y Noreste, en mayo y junio la dirección del viento es de Oeste-Noroeste, los meses de setiembre y octubre también hay componente Sur . Usualmente, en la noche durante la época lluviosa prevalece el viento calmo.

La velocidad promedio anual del viento en la región es de 12 km/h siendo los meses más ventosos diciembre, enero, febrero y marzo mientras que en abril el promedio apenas alcanza los 5 km/h.

## **PACIFICO CENTRAL**

Comprende parte de la provincia de Puntarenas y San José, extendiéndose desde el río Grande de Tárcoles hasta la desembocadura de río Barú. Se destaca en esta región una zona costera e inmediatamente de esta comienza otra montañosa.

### **LLUVIA**

La distribución de las lluvias, tanto en la zona costera Damas, Quepos a 6 metros sobre el nivel medio del mar, como la montañosa, (Naranjillo 780 metros de altitud), es de tipo Pacífico. La cantidad de precipitación promedio varía entre los 3 624.4 milímetros anuales en la costa, pero al ascender a alturas medias en la estación de Naranjillo a 780 m de altitud, la precipitación aumenta registrándose 6 664.9 mm de promedio anual. Luego al continuar subiendo la cordillera, la lluvia vuelve a disminuir, hasta obtener promedios anuales de 2 112.9 mm en la estación de Copey de Dota a 1 880 metros de altitud.

La época seca en la zona costera (Damas), se extiende desde enero hasta marzo, mientras que la lluviosa desde abril a diciembre. Aquí no se presenta una disminución de las lluvias entre julio y agosto típica del fenómeno conocido como “Veranillo” como sí se manifiesta en otras regiones. El mes más seco es febrero y el más lluvioso es octubre.

### **TEMPERATURA**

La temperatura promedio anual varía desde los 27 °C en las costas, como en el caso de Damas, Quepos hasta 17 °C en las cumbres de las montañas, (Naranjillo 1880 msnmm) los meses más cálidos se pueden situar entre marzo y mayo. Las temperaturas mínimas en las partes bajas no descienden de los 22 °C (Damas, Quepos), mientras que a 1880 msnmm en los meses de enero a marzo las mínimas se sitúan entre los 9 y 10°C.

## HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa es bastante constante durante todo el año, los valores más bajos se presentan durante febrero y marzo en que mantienen entre 75 y 80% y durante junio, septiembre y noviembre sobre pasan el 90%. El promedio anual de 85 %.

## EL VIENTO

En esta región el viento predominante durante la mayor parte del día es con componente del Sur. Mientras durante la noche es generalmente calmo o del Este con velocidades débiles.

## **PACIFICO SUR**

Esta Región comprende la parte sur de la provincia de Puntarenas y el Valle del General que es parte del cantón de Pérez Zeledón, que se ubica al oeste de la capital, San José.

## LLUVIA

La topografía de la región influye bastante en la precipitación promedio anual haciéndola muy variada. En las partes bajas el promedio supera los 4 000 milímetros. En el Valle del General a 1 100 de altitud (Los Angeles de Pérez Zeledón) los promedios apenas alcanzan los 3 000 mm anuales. Mientras en la Península de Osa se registra máximos con más de 5 000 mm anuales.

La zona costera no presenta una disminución de la cantidad de lluvia durante julio y agosto (veranillo), mientras que sobre la Península de Osa y el Valle del General es perceptible una disminución durante julio.

En la región del Pacífico Sur hay dos estaciones bastante definidas, siendo la estación seca un poco más corta que la observada en el Pacífico Norte, ésta se inicia a finales de diciembre y termina alrededor de abril, en las estaciones

meteorológicas de Coto 47 y Los Ángeles de Pérez Zeledón. El mes más lluvioso suele ser octubre y el más seco, febrero, aunque aquí no es del todo seco como en el Pacífico Norte

### LA TEMPERATURA

Las temperaturas medias anuales fluctúan alrededor del los 26° C en los lugares próximos a la costa, mientras que en las partes más elevadas de la Cordillera de Talamanca se registran valores de hasta 10° C.

### EL VIENTO

En esta región del Pacífico el viento durante el día, entre las 10: Hora Local (HL) y las 18: HL, registra vientos ecuatoriales y brisas de mar con componentes Oeste. En las horas que va de las 18:00 HL a las 10:00 HL el viento suele ser calmo. Por las noches se presentan en el Valle del General brisas de montañas, originadas en la Cordillera de Talamanca, con direcciones Noreste y Norte. Durante la época seca, las brisas de mar y tierra son las que predominan.

### HUMEDAD RELATIVA:

En cuanto a la humedad relativa de esta región la oscilación es muy pequeña, durante el mes más seco (marzo), se mantiene como promedio 75% en julio, octubre y diciembre encontramos promedios cercanos al 90%.

### **VERTIENTE DEL CARIBE**

A través del año esta región es considerablemente lluviosa, debido a la constante entrada de humedad transportada por el viento Alisio desde el Mar Caribe, por esto no se puede hablar de una estación seca bien definida.

## LA LLUVIA

En la provincia de Limón a 5 m de altitud se registran cantidades desde los 3525 milímetros de lluvia (como promedio), en las regiones costeras y de 3 620 mm en el sector montañoso (Guayabo, Turrialba 1 003 m altitud).

En la zona costera se puede definir dos periodos relativamente secos, uno que va desde febrero hasta marzo y otro, los meses de setiembre y octubre que son los más secos, las partes mas altas se nota una disminución importante solo en febrero y marzo. Los meses más lluviosos tanto en la región costera como montañosa son: julio y diciembre.

## TEMPERATURA

La Temperatura promedio de esta región, varía a lo largo del año entre los 25° C y 27° C en toda la costa, las temperaturas mínimas se producen durante los meses de diciembre a febrero con valores próximos a los 20° C, mientras los termómetros de máximas alcanzan hasta 31°C en los meses de mayo, junio y octubre que son los más cálidos, en la región montañosa (Turrialba) las mínimas alcanzan fácilmente los 16° C y como promedio las máximas apenas rozan lo 28° C.

## HUMEDAD RELATIVA

Toda la región caribeña es la más húmeda de nuestro país, debido a la constante entrada de humedad transportada por el viento aliso desde el mar Caribe. Al igual que el resto del país la humedad relativa presenta poca variación anual En la estación de Limón durante febrero, abril y marzo los promedios alcanzan valores alrededor de 84%, el resto del año se mantiene entre 87% y 90%.

En Turrialba (Zona Montañoso), el descenso de la humedad durante febrero hasta marzo también es perceptible llegando alcanzar como promedio

valores de 85%, y los meses más húmedos son julio y noviembre, alcanzado valores próximos al 90%.

#### EL VIENTO:

Durante todo el año, en la estación de Limón (5 m), el comportamiento del Viento diario está caracterizado por dos sistemas, durante la noche, brisa de tierra a mar con direcciones Sur-Oeste y Oeste. Mientras en el día se asocia la brisa de mar con el Alisio dando como resultado componente Norte, Noreste y Este con velocidades promedio próximas a los 12 km/h.

En las partes altas de esta Vertiente, Turrialba por ejemplo a más de 600 m, los vientos están regidos en su mayoría por el movimiento de los sistemas de mayor escala que contribuyen a la circulación atmosférica esto hace que prevalezca el viento con dirección Este y Noreste en la mayor parte del año.

#### **ZONA NORTE**

##### LA LLUVIA:

En la Zona Norte los mínimos de precipitación se dan desde enero hasta abril, en la estación de San Jorge en Los Chiles ubicada a 55 m de altitud y datos de lluvia de S. Vicente ubicada en Ciudad Quesada a 1 450 m de altitud se observa que mientras el promedio en las llanuras (San Jorge) es de 2 612 mm, en los lugares montañosos (S. Vicente), este valor es mayor 3 992 mm, en ambas estaciones se da una disminución de las lluvias entre febrero y marzo, pero fácilmente se observa que la disminución es mas acentuada en las llanuras de la Zona Norte (San Jorge, Los Chiles).

## TEMPERATURA:

El comportamiento de la temperatura en la Zona Norte de nuestro país, depende de muchos factores y uno de ellos es la altitud, a 1 450 m en el área de montaña (San Vicente de Ciudad Quesada) los promedios de temperatura (17° C) son claramente más bajos que los de Santa Clara de San Carlos a 170 m donde los valores medios de temperatura rondan los 25.4° C. Estos valores son bastante alejados unos de otros a lo largo del año.

Coinciden los meses de abril y mayo como los más cálidos, mientras que los primeros meses del año son los más fríos con mínimas que fácilmente alcanzan menos de 13° C en las partes altas de la región.

## HUMEDAD RELATIVA:

La Humedad Relativa de Santa Clara a 650 m de altitud. En esta puede observar que la mayor parte del año los valores se mantienen en rangos próximos al 80%, hay un descenso del porcentaje de Humedad Relativa durante los primeros meses del año, lo mismo sucede en Coopelesca (la estación meteorológica ubicada a 650 m de altitud).

Cabe destacar que esta merma en la Humedad Relativa coincide con los meses de menos precipitación en la zona Norte de nuestro país

## EL VIENTO:

La estación de Santa Clara de San Carlos a 170 m de altitud reporta predominio de componente sur a lo largo del año con velocidades promedio de 5.5 km/h, pero hay que recordar que en algunas ocasiones la componente Norte o noreste es la principal herramienta para provocar ascenso mecánico de las masa de aire para la generación de lluvias en estas regiones

## **MECANISMO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.**

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente del deterioro de los metales y aleaciones de estos, pues la acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos. También es importante mencionar otros factores como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que combinados entre sí, influyen en los procesos de corrosión.

### **Influencia de las condiciones meteorológicas en los procesos de corrosión**

La característica atmosférica más importante que se relaciona directamente con el proceso de corrosión es la humedad, que es el origen del electrolito necesario en el proceso electroquímico.

La figura 1.1 muestra la relación que existe entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Se observa que en espesores pequeños la corrosión no existe, pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y la disolución del metal es difícil.

Al aumentar el espesor disminuyen la resistencia de la capa del electrolito y la polarización catódica, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que alcanza un nivel máximo, que disminuye después con el aumento del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión, el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno en la superficie metálica es muy lenta y por tanto determinante del proceso global.

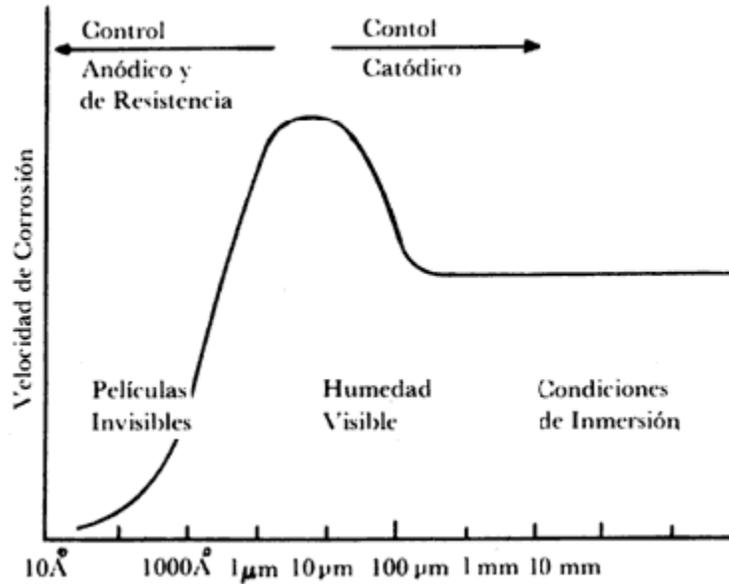


Figura 1.3 Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión.

Esto nos permite comprobar la importancia del conocimiento de las causas y los factores que influyen en la formación de películas de humedad sobre la superficie metálica. La causa más importante es la precipitación atmosférica (en forma de lluvia o niebla espesa).

Existe también la condensación de humedad, que se origina cuando la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100%. Es importante mencionar también la condensación por absorción, la condensación capilar y la condensación química.

Otras influencias son principalmente el oxígeno, y los contaminantes atmosféricos ( $\text{SO}_2$ , NaCl, etc), además de la degradación por la radiación global del sol. Todos estos factores constituyen lo que se denomina macroclima de una zona determinada. El microclima en cambio es el clima específico que se forma alrededor del objeto, de importancia fundamental a la hora de entender los mecanismos de degradación atmosférica de los materiales.

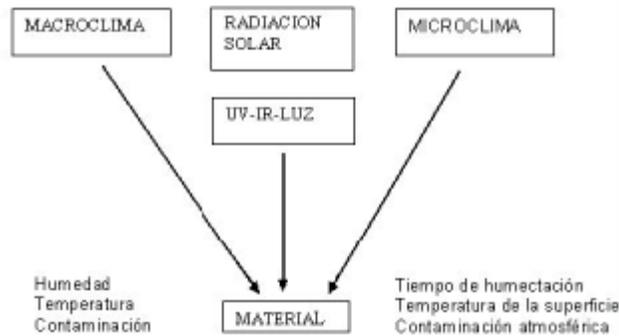


Figura 1.4 Factores atmosféricos con influencia en la durabilidad de los materiales

El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica. El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles) hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica.

Como el mecanismo de corrosión es electroquímico, su característica principal es la presencia de un proceso anódico y otro catódico, con un electrolito de resistencia óhmica determinada.

En el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble.

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.

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

a) Corrosión seca. Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa.

b) Corrosión húmeda. Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.

c) Corrosión por mojado. Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

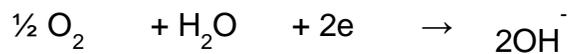
La velocidad de las reacciones aumenta con la concentración de sustancias capaces de ionizarse en la película de humedad. Bajo esta película el metal se corroe por medio del proceso catódico de reducción del oxígeno procedente del aire.

El proceso anódico de corrosión del metal (Me) y el catódico pueden expresarse de modo simplificado en las siguientes reacciones:

Proceso anódico:



Proceso catódico:



Proceso catódico por productos ácidos:



### Corrosión atmosférica del acero al carbono

Es importante conocer las posibilidades termodinámicas de corrosión de un metal por su exposición al medio atmosférico.

La termodinámica nos indica, por ejemplo, que un metal se disuelve por formaciones de iones metálicos a un potencial dado, según la ecuación de Nernst:



$$E^0 = \frac{-RT}{nF} \cdot \ln [\text{Me}^{++}]$$

También nos indica que no hay disolución a un potencial inferior y que por encima de él la forma que se establece es la iónica, disolviéndose el metal según la anterior reacción e independientemente del pH del medio, puesto que no intervienen en ella los iones  $\text{H}^+$  u  $\text{OH}^-$ .

Sin embargo, de alguna manera los iones  $H^+$  y  $OH^-$ , no sólo el potencial, condicionan las reacciones de corrosión, pues los iones  $Me^{++}$  producidos en ellas dan lugar a óxidos e hidróxidos, compuestos que influyen sobre la velocidad de corrosión, a través de sus características más o menos protectoras. Además, por encima de cierto umbral de potencial, distinto para cada metal, los metales se disuelven y los óxidos e hidróxidos previamente precipitados también, para dar aniones o iones complejos.

Todo esto es importante en el estudio de la corrosión, pues, en las condiciones en que se forman productos solubles, es de esperar corrosión, mientras que la formación de productos insolubles puede entorpecerla, llegando incluso a proteger el metal por pasivación. Esta valiosísima información puede resumirse en forma gráfica en diagramas potencial - pH, conocidos por diagramas de Pourbaix, que pueden construirse a partir de cálculos basados en la ecuación de Nernst y los productos de solubilidad de diversos compuestos metálicos.

Diagrama de Pourbaix (Figura 1.3) del sistema Fe-H<sub>2</sub>O muestra las regiones de estabilidad de soluciones acuosas para el hierro, iones ferrosos y férricos, oxihidróxidos (FeOOH) y magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). La región de estabilidad del agua incluye el Fe<sup>2+</sup> y FeOOH principalmente.

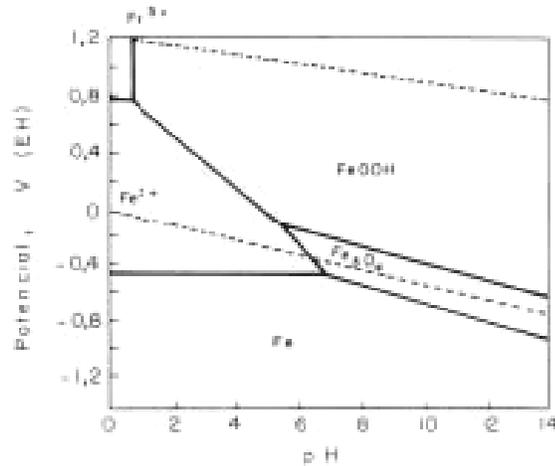
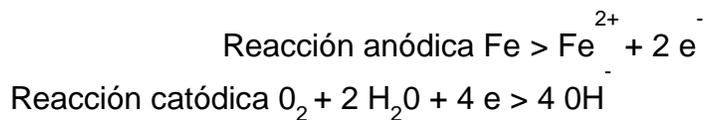


Figura 1.5 Diagrama de potencial. pH del sistema Fe-H<sub>2</sub>O; 25°C, 10<sup>-1</sup> M Fe.

Entre los productos de la corrosión atmosférica del hierro generalmente encontrados están los oxihidróxidos ( $\alpha$ -FeOOH, goethita;  $\gamma$ -FeOOH, lepidocrocita y  $\beta$ -FeOOH, akaganeita), el óxido ferroso-férrico (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, magnetita) y el hidróxido ferroso (Fe(OH)<sub>2</sub>). Así pues, la composición de los productos de corrosión atmosférica del acero al carbono está en concordancia con aquellas regiones de estabilidad mostradas en la figura 1.3.

Las reacciones químicas desempeñan un importante papel, se piensa que las reacciones anódicas y catódicas primarias en los primeros estados de la corrosión son las siguientes:



## **Contaminación atmosférica**

Se puede definir la contaminación atmosférica como "la presencia en el aire de sustancias extrañas, sean éstas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del paisaje".

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre y dependiendo del tipo de atmósfera cloruros.

El NaCl y el SO<sub>2</sub> son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La correlación entre los niveles de concentración de SO<sub>2</sub> o NaCl y la velocidad de corrosión es alta. También es importante mencionar al sulfuro de hidrógeno, que es el responsable del deslustre de cobre y plata, los compuestos nitrogenados que en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales, las partículas inertes (silicio) y las partículas absorbentes (carbón de leña).

Entre todos estos contaminantes, el SO<sub>2</sub> tiene una importancia especial en los procesos de corrosión atmosférica, a causa de su incidencia directa en la velocidad de corrosión de los metales expuestos a la atmósfera.

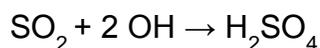
Los metales no ferrosos consumen SO<sub>2</sub> en las reacciones de corrosión, y sus productos principales son los sulfatos metálicos, mientras que en la oxidación del hierro y del acero los sulfatos ferrosos son hidrolizados formando óxidos y generando ácido sulfúrico.

Una característica importante del SO<sub>2</sub> es que es más soluble que el oxígeno, lo cual origina que cuando se producen concentraciones muy bajas en la atmósfera pueden obtenerse películas de humedad sobre la superficie metálica con altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, lo cual ocasiona el deterioro de la misma.

## Ciclo atmosférico del azufre

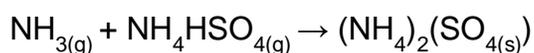
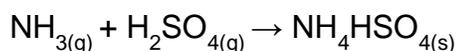
La oxidación puede ser iniciada por la reacción en fase gaseosa del dióxido de azufre con el radical hidroxilo, por las reacciones en fase líquida en las gotas de niebla, que incluyen el dióxido de azufre disuelto y agentes oxidantes tales como peróxido de hidrógeno o el ozono, o por reacciones en las superficies sólidas de los aerosoles. La separación de los aerosoles y gotas de niebla que contienen  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en forma de precipitaciones devuelven el azufre a la superficie de la Tierra y cierra el ciclo del azufre atmosférico

La reacción más importante de oxidación en fase gaseosa del  $\text{SO}_2$  atmosférico es la de este producto con radicales libres como el hidroxilo, el hidroperoxilo y el metilperoxilo. Parece ser que, entre todos estos radicales, el hidroxilo es el principal responsable de esta oxidación:



El ácido formado tiene una presión de vapor baja y se condensa fácilmente en presencia de  $\text{H}_2\text{O}$ .

De la misma manera que el ácido nítrico, también el ácido sulfúrico puede dar lugar a un proceso de transformación de gas a partículas sólidas por reacción, principalmente, con el amoníaco presente en la atmósfera:



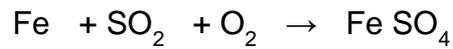
La composición química del aerosol se caracteriza por las fracciones molares de los componentes  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , que se pueden calcular si se conocen las concentraciones iniciales en fase gaseosa de los compuestos  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

## Influencia del $\text{SO}_2$ sobre el metal

El depósito de  $\text{SO}_2$  y de partículas salinas sobre las superficies metálicas acelera la corrosión al dar lugar a productos de corrosión solubles en vez de los escasamente insolubles que se forman en agua pura. Según Schikorr, la capa de herrumbre del acero absorbe el  $\text{SO}_2$  tan rápido como si fuese un papel

absorbente y este proceso continúa casi independiente de la humedad relativa o la temperatura. Sin embargo solo cuando la HR es suficientemente alta (70 - 80%), el SO<sub>2</sub> absorbido acelera el proceso de corrosión.

Como primer paso el SO<sub>2</sub> forma sulfato ferroso



Que posteriormente da lugar a mayor formación de FeOOH con liberación de ácido sulfúrico.



Este ácido sulfúrico reacciona con el hierro para una nueva formación de sulfato de hierro.



Por lo tanto, el agente corrosivo almacenado actúa a través de un proceso cíclico, que tiende a perpetuar su efecto. Se opone a este efecto el lavado de los contaminantes lavados por lluvia, el desprendimiento de partículas contaminadas de herrumbre y la conversión del sulfato en sales básicas insolubles.

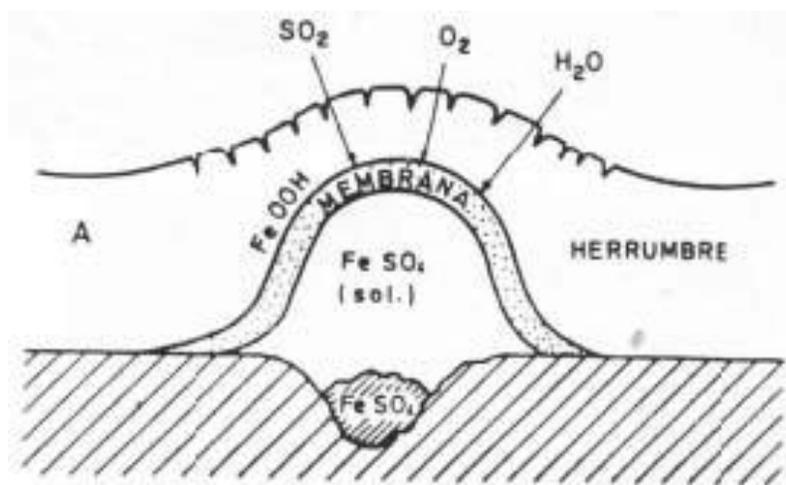


Figura 1.6. Representación esquemática de un nido de sulfato. Tomado de, Corrosión y Control de la Corrosión, H. UHLIG

## **Efecto de la lluvia ácida**

El retorno a la superficie de la tierra de los contaminantes atmosféricos se realiza de dos formas distintas: por depósito seco y por depósito húmedo.

La oxidación del dióxido de azufre y la incorporación de ácido sulfúrico en las gotas de niebla pueden aumentar la acidez de las precipitaciones de la misma forma en que lo hacen la oxidación y la separación de los óxidos de nitrógeno, de manera que las regiones con altos niveles de óxidos de azufre y de nitrógeno tienen con cierta frecuencia lluvias ácidas.

La lluvia normal, no contaminada, tiene un pH de aproximadamente 5.6, acidez debida a la presencia de ácido carbónico, formado en la atmósfera por combinación del bióxido de carbono y el agua.

La lluvia ácida se caracteriza por un pH inferior a 5.6 y contiene pequeñas pero significativas cantidades de ácido sulfúrico y ácido nítrico. Sus efectos sobre el ecosistema terrestre son muy importantes, y uno de los más agresivos es el de la corrosión de los metales.

## **Influencia de los Cloruros (Cl<sup>-</sup>)**

El origen de los cloruros atmosféricos corresponde al agua de mar, que puede arrastrar el ión cloruro disuelto o como sal sódica, tras la evaporación. Ambas formas alcanzan en la atmósfera concentraciones comprendidas entre 0,5 y 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Otra fuente natural de emisión de cloruros a la atmósfera son los gases procedentes de volcanes en erupción. Asimismo, las actividades de naturaleza antropogénica son responsables de la emisión a la atmósfera de cantidades importantes de estos compuestos.

El depósito de partículas salinas sobre la superficie metálica acelera su corrosión, sobre todo si, como en el caso de los cloruros, pueden dar lugar a productos de corrosión solubles en lugar de los escasamente insolubles que se

forman en agua pura. Por otro lado, los cloruros disueltos en la capa de humedad, elevan considerablemente la conductividad de la película del electrolito sobre el metal y tienden a destruir eventuales películas pasivantes.

Está perfectamente establecido el importante efecto de este contaminante en la corrosión metálica, sin embargo la información cuantitativa en el caso de los cloruros es menos abundante que en el caso del  $\text{SO}_2$ .

Para que el ión cloruro acelere la corrosión es necesario que la superficie metálica esté humedecida. El valor de la HR a partir de la cual la sal comienza a absorber agua de la atmósfera (higroscopicidad) parece ser crítico desde el punto de vista de la corrosión. Ambler y Bain comprobaron que la humedad del 78%, que es la de equilibrio con la solución saturada de NaCl, coincidía con la fuerte aceleración de la corrosión del acero al carbono.

Entre las variables con influencia en la salinidad atmosférica destacan: régimen de vientos dominantes (dirección y velocidad), distancia a la costa, topografía de la zona, altitud, etc.

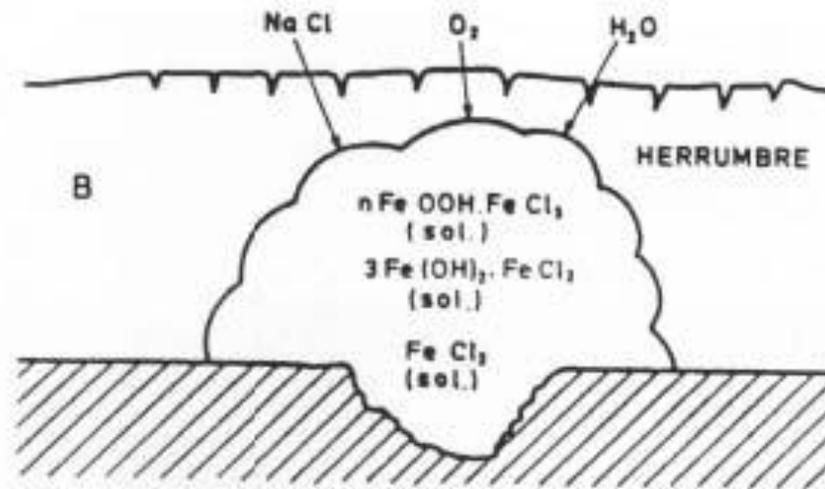


Figura 1.7. Representación esquemática de un aglomerado de cloruro.

## **Acción de los principales factores atmosféricos**

### Humedad relativa del aire

La expresión "humedad relativa del aire" se refiere al contenido de vapor de agua del aire.

La humedad relativa es una medida del contenido de humedad del aire y, en esta forma, es útil como indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvia convectiva. No obstante, los valores de humedad relativa tienen la desventaja de que dependen fuertemente de la temperatura del momento. En las zonas tropicales continentales, en donde las variaciones de la temperatura durante el día son generalmente grandes, la humedad relativa cambia considerablemente en el curso del día. Para comparar diferentes estaciones, los datos de humedad relativa pueden emplearse únicamente si han sido observados a la misma hora y las temperaturas no son muy diferentes.

Como se ha indicado, por debajo de un nivel determinado de humedad relativa (HR) no es probable la corrosión, puesto que no existe película apreciable de electrolito sobre el metal. Aún cuando la HR exceda ese valor para que la velocidad de corrosión sea apreciable la atmósfera debe estar además contaminada.

### Tiempo de humectación

Es el periodo durante el cual una superficie metálica está cubierta por una película de electrolito (incluso adsorbida) que estimula significativamente la corrosión atmosférica. El tiempo de humectación depende, como se ha visto, de la zona macro climática y del tipo de localización.

A continuación se definen los siguientes términos:

Tiempo de humectación calculado. Tiempo de humectación estimado a partir de relaciones temperatura-humedad relativa.

Tiempo de humectación experimental. Tiempo de humectación determinado directamente por diferentes sistemas de medida.

## **Mapas de la corrosividad.**

Las predicciones de corrosión o agresividad de las atmósferas pueden servir como orientación respecto a las medidas protectoras que deben adoptarse para la conservación de una estructura metálica, y se tendrán en cuenta en la planificación de una obra, para especificar el metal o aleación que hay que utilizar, el tipo de recubrimiento protector y sus características y la frecuencia del mantenimiento. Así, la importancia de estos factores nos muestra el interés que tienen los mapas de corrosividad de países y áreas geográficas, que informen directamente acerca de los riesgos de corrosión.

## **Confección de mapas de corrosión atmosférica**

La elaboración de mapas de corrosión atmosférica no es una tarea fácil, el fenómeno de la corrosión atmosférica depende, entre otros, de un gran número de factores climáticos, entendiendo el término clima en su más amplia acepción, meteorología y contaminación. El elevado número de factores a considerar, su variación en el tiempo, la existencia de interrelaciones entre ellos y el desconocimiento que frecuentemente se tiene de su variación geográfica hacen muy complejo el proceso de confección del mapa. Además, los mapas, para constituir una herramienta útil, deben ser de fácil interpretación, lo que puede complicar aún más su elaboración.

En la práctica, se han empleado distintos enfoques para construir estos mapas:

Medida directa de la corrosividad de la atmósfera a través de su efecto sobre ciertos materiales metálicos típicos (acero al carbono, cinc, cobre, aluminio, etc.), que se exponen en múltiples lugares representativos de una región geográfica.

Estimación de la corrosión atmosférica en una determinada región geográfica a partir de datos ambientales disponibles y de su efecto en los materiales mediante experimentación a nivel de laboratorio.

A partir del conocimiento de las funciones reales dosis / respuesta existentes en una determinada región geográfica entre corrosión atmosférica y parámetros ambientales. Estas funciones pueden desempeñar un papel importante en la predicción de la vida de servicio de los materiales en la atmósfera y pueden ser usadas también como herramienta para la confección de mapas de corrosividad atmosférica a diferentes niveles (micro, meso y macro).

Para la aplicación del método a se necesita disponer de una vasta red de estaciones de corrosión, que cubra lo mejor posible el área en estudio. Si esta área es grande, aun así, puede resultar arriesgado generalizar algunas conclusiones. El método b ha sido seguido por Rychtca para la elaboración de atlas tecnoclimáticos de diferentes continentes.

Para la aplicación del método c, hay que disponer primeramente de las funciones dosis / respuesta, y ello presenta grandes dificultades. En primer lugar, las debidas a la propia complejidad del proceso de corrosión de los metales en la atmósfera. Hasta ahora, la mayoría de las funciones dosis / respuesta existentes son funciones lineales en las que intervienen sólo unas pocas variables ambientales ( $C = f(HR, TDH, SO_2, CL)$ ). Los análisis estadísticos, a partir de los cuales se han obtenido ecuaciones de regresión lineal múltiple entre corrosión y parámetros ambientales para un área geográfica determinada, han ayudado notablemente a simplificar el número de combinaciones posibles entre los distintos factores, permitiendo hacer generalizaciones de un modo objetivo. Por ejemplo, gracias a este tratamiento se ha elaborado la norma ISO 922318 sobre clasificación de la corrosividad de las atmósferas.

Otra dificultad añadida es la falta de disponibilidad de datos de aquellos parámetros más significativos a lo largo y ancho de un territorio. Afortunadamente, conforme pasa el tiempo, las redes de toma de datos se van ampliando y los datos presentan cada vez una mayor calidad.

En ocasiones, la carencia de datos se ha podido solventar acudiendo a técnicas estadísticas de interpolación basadas en la covarianza espacial existente entre los diversos factores.

Debido a aquellas dificultades, la elaboración de mapas se ha podido abordar realizando una serie de simplificaciones. Una de ellas consiste en admitir que la corrosividad de la atmósfera está gobernada, únicamente, por el tiempo durante el cual la superficie del metal se halla humedecida, y por los niveles de  $\text{SO}_2$  y cloruros en la atmósfera.

En atmósferas puras (prácticamente sin contaminación), el mapa de corrosión será función exclusiva de los parámetros meteorológicos, en especial de los que determinan el tiempo de humectación (TDH) de la superficie metálica. No es corriente que se produzcan cambios importantes en los valores medios anuales de estos parámetros para un determinado lugar. Más difícil es atribuir niveles típicos de contaminación a los puntos que configuran el mapa de una región, por la mayor variabilidad de la contaminación, debido a la naturaleza cambiante de las fuentes de contaminación (creación de nuevas industrias, desmantelamiento de otras, adopción de medidas anticontaminantes, etc.).

Con este enfoque, se han elaborado mapas de corrosión en función exclusiva del TDH asignando una equivalencia entre este tiempo y la corrosión anual. El mapa de corrosión así obtenido se refiere al supuesto que la atmósfera esté libre de cualquier contaminante.

El efecto de la contaminación se introduce posteriormente por medio de coeficientes correctores de las cifras de corrosión leídas en el mapa. Por tanto, en el caso de una atmósfera contaminada, el dato de corrosión, leído en el mapa para contaminación cero, deberá multiplicarse por el pertinente coeficiente de corrección que tome en consideración las condiciones de contaminación del lugar.

Otra alternativa es partir de las mencionadas ecuaciones de regresión entre corrosión y parámetros ambientales para un área geográfica determinada. Estas ecuaciones incluyen, como variables independientes, los parámetros meteorológicos estadísticamente significativos y los niveles de contaminación por  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}$ . Si se anulan los términos correspondientes al efecto de los

contaminantes, la ecuación de regresión de información sobre la corrosión en atmósferas puras en función de las variables meteorológicas.

Con estos mapas pueden hacerse previsiones sobre el comportamiento en atmósferas rurales prácticamente exentas de contaminación, que comprenden, por lo normal, la mayor parte del territorio de un país.

Para las atmósferas contaminadas podrán elaborarse, asimismo, mapas de corrosión en función de unos hipotéticos niveles de contaminación por  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$ , que se introducen en la ecuación de regresión. En este caso, el mapa se refiere a unas condiciones que afectarán a porcentajes mucho más pequeños del territorio de un lugar.

Finalmente, es interesante comentar, con relación a los criterios para la elaboración de estos mapas:

Por muy amplia que haya sido la red de toma de datos es prácticamente imposible reflejar en los mapas la totalidad de las condiciones atmosféricas presentes en una determinada región geográfica. Siempre existirán zonas de microclimas y situaciones criotoclimáticas que no se hayan tenido en cuenta a la hora de confeccionar la red,

La información contenida en los mapas debe ser fácilmente comprensible por los técnicos que vayan a hacer uso de esa información; mapas de gran complejidad y difícil interpretación son de escasa utilidad para fines prácticos,

Teniendo en cuenta la complejidad del proceso de degradación de los materiales en la atmósfera, puede ser aconsejable, a la hora de realizar mapas de una región determinada, considerar cada factor ambiental por separado. Estos mapas suministrarán los datos para los distintos términos de las ecuaciones de regresión.

## **CATEGORIZACIÓN DE LA AGRESIVIDAD DE LA ATMÓSFERA**

Para poder determinar la corrosividad de una atmósfera es necesario relacionar entre sí todos los factores que la afectan, y muy especialmente aquellos que han demostrado tener una especial influencia en el proceso de corrosión: tiempo de humectación de la superficie metálica y cantidad de contaminantes —causantes de corrosión— que pueden depositarse en la superficie metálica.

Es de gran utilidad para la interpretación de los datos establecer la siguiente terminología:

**Agresividad de la atmósfera:** Es el potencial de la atmósfera para provocar corrosión en metales o aleaciones, se puede medir con base en los siguientes parámetros ambientales: humedad, temperatura y contaminación.

**Corrosividad de la atmósfera:** Habilidad de la atmósfera para provocar corrosión en un sistema dado.

**Tiempo de humectación:** Periodo durante el cual una superficie metálica está cubierta por una película de electrolito (incluso adsorbida) que estimula significativamente la corrosión atmosférica. Se considera en el presente proyecto las horas en las cuales se tiene una humedad relativa mayor o igual a 80% y una temperatura superior a 0°C.

**Tipo de localización:** Condiciones de exposición típicas definidas convencionalmente a partir de un componente o estructura: espacio cerrado, bajo techo, aire libre, etc.

**Caracterización de la atmósfera en relación con su agresividad.** Para propósitos prácticos, se consideran como factores clave de la corrosión producida por la atmósfera los siguientes: tiempo de humectación, niveles de SO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>. Sin embargo, existe otro tipo de contaminantes que pueden ejercer un efecto agresivo: NO<sub>2</sub>, humos en zonas industriales, CaCl<sub>2</sub> y MgCl<sub>2</sub> en las regiones marítimas, y hay que tomar también en cuenta la presencia de contaminantes

específicos de un determinado microclima como es el caso de otros compuestos de azufre en zonas volcánicas. Estos tipos de contaminación no se toman en cuenta como criterio de clasificación.

Clasificación del tiempo de humectación. El tiempo de humectación depende, como se ha visto, de la zona macro climática y del tipo de localización. En la tabla 1.1, se muestra la clasificación de la corrosividad según el tiempo de humectación<sup>1</sup>.

Clasificación de las categorías de contaminación. Las categorías que se proponen se emplean para medir la contaminación de la atmósfera por SO<sub>2</sub> y por cloruros. Estos dos tipos de contaminantes son representativos de atmósferas como la rural, la urbana, la industrial y la marina. Los otros tipos de contaminantes se consideran añadidos (por ejemplo, NO<sub>2</sub> en atmósferas urbanas e industriales). La clasificación de la contaminación debida al SO<sub>2</sub> y cloruros para atmósferas exteriores estándar también se presenta en la tabla 1.1.

Categoría	Tiempos de humectación (TDH), horas/año	Contenido en SO <sub>2</sub> , mgSO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .día	Contenido en cloruros, mgCl/m <sup>2</sup> .día
1	< 10	≤ 10	≤ 3
2	10-250	10-35	3-60
3	250-2500	35-80	60-300
4	2500-5500	80-200	300-1500
5	> 5500		

Tabla 1.1 Categorías de las atmósferas en función del tiempo de humectación (TDH), y contaminación SO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>. (ISO 9223:1992).

La probabilidad de corrosión es mayor en superficies donde puede depositarse suciedad.

Categorías de la corrosividad de la atmósfera. Para efectos prácticos, la corrosividad de la atmósfera se divide en cinco categorías, que se presentan en la tabla 1.2.

Categoría de Corrosividad	Agresividad
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy alta

TABLA 1.2: Categorías de la corrosividad de la atmósfera. (ISO 9223:1992).

Determinación de las categorías de corrosividad para las mediciones de velocidad de corrosión en probetas metálicas. En la tabla 1.3 se presentan los valores numéricos correspondientes a la velocidad de corrosión del primer año de exposición para cada una de las categorías propuestas para el acero, zinc, cobre y aluminio.

Categoría de corrosividad	Unidades	Acero	Zinc	Cobre	Aluminio
C1	g/m <sup>2</sup> /año	≤ 10	≤ 0,7	≤ 0,9	desp.
	µm/año	≤ 1,3	≤ 0,1	≤ 0,1	-
C2	g/m <sup>2</sup> /año	10-200	0,7-5	0,9-5	≤ 0,6
	µm/año	1,3-25	0,1-0,7	0,1-0,6	-
C3	g/m <sup>2</sup> /año	200-400	5-15	5-12	0,6-2
	µm/año	25-50	0,7-2,1	0,6-1,3	-
C4	g/m <sup>2</sup> /año	400-650	15-30	12-25	2-5
	µm/año	50-80	2,1-4,2	1,3-2,8	-
C5	g/m <sup>2</sup> /año	650-1500	30-60	25-50	5-10
	µm/año	80-200	4,2-8,4	2,8-5,6	-

TABLA 1.3: Categoría de corrosividad de una atmósfera para materiales metálicos en el primer año de exposición (ISO 9223:1992).

Determinación de la categoría de corrosividad de una atmósfera a partir de datos del medio ambiente. Las diferentes categorías de corrosividad se establecen de acuerdo con los efectos progresivos de la contaminación y el tiempo de humectación. A medida que aumenta la agresividad de la atmósfera, aumenta, por lo general, la velocidad de corrosión de los metales. En la tabla 1.4 se presenta dicha clasificación.

	TDH, <10h/año mg Cl/m <sup>2</sup> .d			TDH, 10-250h/año mg Cl/m <sup>2</sup> .d			TDH,250-2500h/año mg Cl/m <sup>2</sup> .d			TDH, 2500-5500h/año mg Cl/m <sup>2</sup> .d			TDH,>5500h/año mg Cl/m <sup>2</sup> .d		
	<60	60-300	300-1500	<60	60-300	300-1500	<60	60-300	300-1500	<60	60-300	300-1500	<60	60-300	300-1500
<b>Acero al carbono</b>															
<35 mgSO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .d.	C1	C1	C1-C2	C1	C2	C3-C4	C2-C3	C3-C4	C4	C3	C4	C5	C4	C5	C5
35-80 "	C1	C1	C1-C2	C1-C2	C3-C4	C3-C4	C3-C4	C3-C4	C4-C5	C4	C4	C5	C5	C5	C5
80-200 "	C1-C2	C1-C2	C2	C2	C3	C4	C4	C4-C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5
<b>Zinc y cobre</b>															
<35 mgSO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .d.	C1	C1	C1	C1	C1-C2	C3	C3	C3	C3-C4	C3	C4	C5	C4	C5	C5
35-80 "	C1	C1	C1-C2	C1-C2	C2	C3	C3	C3-C4	C4	C3-C4	C4	C5	C5	C5	C5
80-200 "	C1	C1-C2	C2	C2	C3	C3-C4	C3	C3-C4	C4	C4-C5	C5	C5	C5	C5	C5
<b>Aluminio</b>															
<35 mgSO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .d.	C1	C2	C2	C1	C2-C3	C4	C3	C3-C4	C4	C3	C3-C4	C5	C4-C5	C5	C5
35-80 "	C1	C2	C2-C3	C1-C2	C3-C4	C4	C3	C4	C4-C5	C3-C4	C4	C5	C4-C5	C5	C5
80-200 "	C1	C2-C3	C3	C2-C4	C4	C4	C3-C4	C4-C5	C5	C4-C5	C5	C5	C5	C5	C5

TABLA 1.4: Estimación de la corrosividad de la atmósfera por categorías a partir de sus datos ambientales ISO 9223: 1992

## Galvanizado

Se estima que aproximadamente un 40% de la producción mundial de zinc se consume en el proceso de galvanizado en caliente.

A la temperatura normal del baño de zinc fundido la cual se encuentra en el rango de 440°C -470 °C se produce una reacción química entre el hierro y el zinc que da lugar a la formación de aleaciones Hierro-zinc sobre la superficie del acero.

El recubrimiento que se forma esta compuesto principalmente por tres capas que se diferencian por su contenido de hierro. La capa mas interna, fase gamma ( $\gamma$ ) contiene entre un 21% -28 % de hierro, la capa intermedia, fase delta ( $\delta$ ), contiene de 7%-12% de hierro, y aun más externa capa zeta ( $\zeta$ ), que contiene aproximadamente un 6% de hierro.

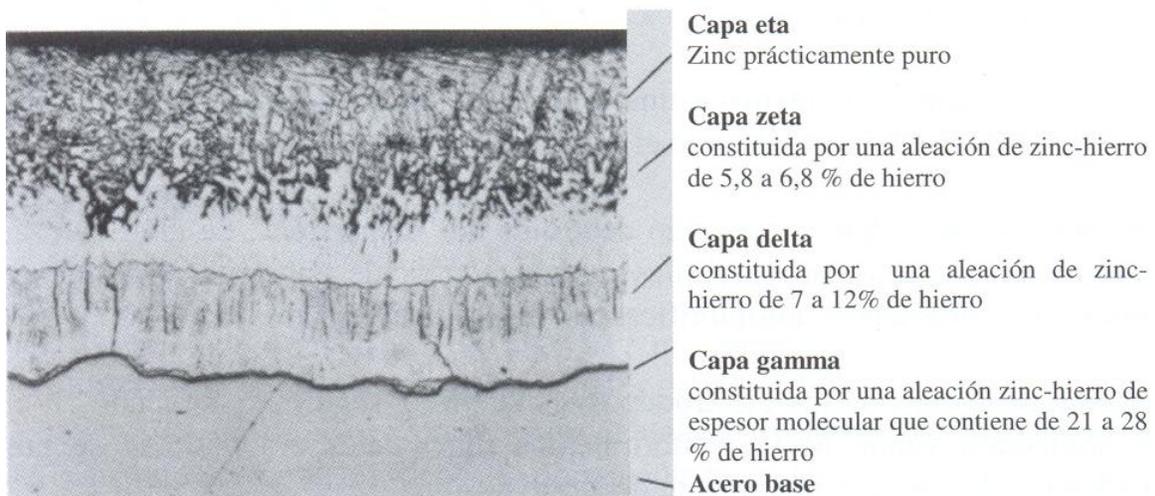


Figura 1.8: Fotomicrografía de una sección de un recubrimiento galvanizado típico en la que se puede observar las diferentes capas que lo componen. Fuente: Programa Cyted 2002

Al extraer el material del baño queda adherida a la superficie aleada una película de zinc fundido que, al solidificar constituye una nueva capa de zinc metálico que se conoce como fase eta ( $\eta$ ) del recubrimiento.

### **Proceso de corrosión por aireación diferencial:**

En los sistemas metal/electrolito o metal/sólido inerte/electrolito es posible que la sustancia responsable de la reacción catódica (moléculas de oxígeno normalmente) alcance con dificultad determinadas zonas de la superficie metálica, en tanto llega fácilmente al resto de ella. Esta circunstancia se da cuando existen resquicios en las piezas o estructuras metálicas, por ejemplo, uniones solapadas, ranuras, grietas, zonas de contacto con otros cuerpos metálicos o no metálicos.

Un caso típico del fenómeno comentado lo constituye la ya mencionada aireación diferencial, que causa el ataque del metal en las zonas menos expuestas al oxígeno proveniente de la atmósfera. Cualquier factor que motive una disminución local en la concentración de oxígeno respecto a la concentración de este elemento en otras partes de la superficie metálica da pie al funcionamiento de las pilas de aireación diferencial.

La reacción catódica de reducción tiende a producirse siempre en las áreas más asequibles al oxígeno, y la reacción anódica de disolución del metal en las áreas más pobres en oxígeno.

De esta manera, la exclusión del aire de solamente una parte de una superficie metálica bañada por un electrolito predispone su ataque preferente.

Son numerosos los ejemplos prácticos de corrosión localizada debida a fenómenos de aireación diferencial. Cualquier objeto reposando sobre una superficie metálica o aplicando contra ella: partícula sólida, recubrimiento protector parcialmente desprendido, o incrustación de organismo marino, puede dar origen a resquicios, algunos ejemplos de estos se muestran en la siguiente figura.

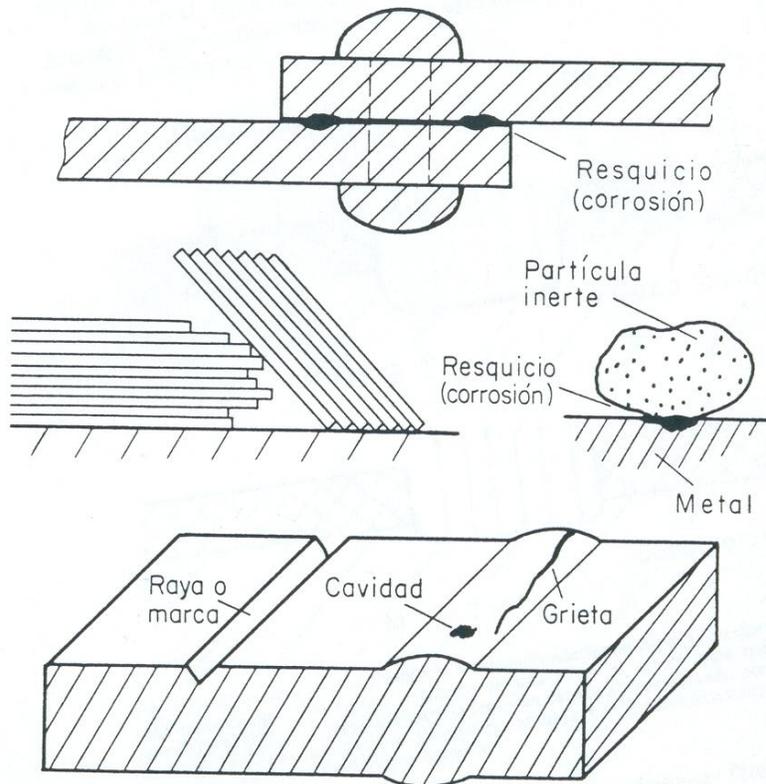


Figura 1.9: ejemplos de los resquicios más comunes.

### Medición de La coloración usando el método Munsell

Los colores de Munsell son identificados asignando diferentes letras y números a los distintos pasos en la carta de colores tridimensional, Desarrollada originalmente A. H Munsell, la fórmula que proporciona se puede dividir en tres partes: H V/S, donde cada parámetro significa.

H: Tono Munsell legible por aproximación por una de colores.

V: Claridad

S: Croma Munsell

A partir de estos datos es factible conseguir las coordenadas lab Siguiendo los siguientes formulas.

$$L = 10.V$$

$$a = c \cdot \cos\alpha$$

$$b = c \cdot \sin\alpha$$

Donde:

C se define como el cromatismo.

$\alpha$  es el ángulo comprendido entre el radio formado y el eje de las abscisas

L (Claridad) Este se refiere a la cantidad de luz considerada en la referencia del color en porcentaje.

$a^*$  Si este valor es positivo incrementa proporcional al incremento en la tonalidad del color rojo, si este valor es negativo incrementa negativamente proporcional al incremento en la intensidad del color verde.

$b^*$  Si este valor es positivo incrementa proporcional al aumento en la tonalidad del color amarillo y si al contrario es negativo aumenta proporcional al aumento del color azul en la muestra de la medición.

$C^*$  cromaticidad, este hace referencia al plano transversal donde se ubican los demás colores (Rojo, Verde, Amarillo y Azul)

A continuación se muestra una representación gráfica de la distribución de los valores  $L^*a^*b^*$  en el sistema tridimensional en cual se pueden encontrar todas las mezclas posibles de colores.

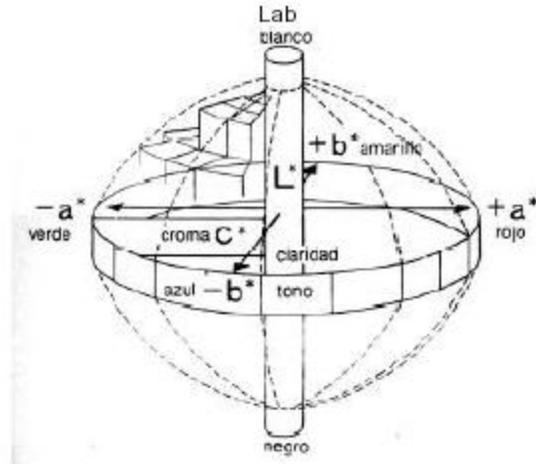


Figura:1.10 Sistema 3D para la representación de colores

Seguidamente se muestra una vista transversal donde se puede apreciar la distribución de las diferentes mezclas en la carta de colores, en la cual se pueden notar claramente la distribución según la estructuración en el los ejes  $a^*$  y  $b^*$  anteriormente descrita.

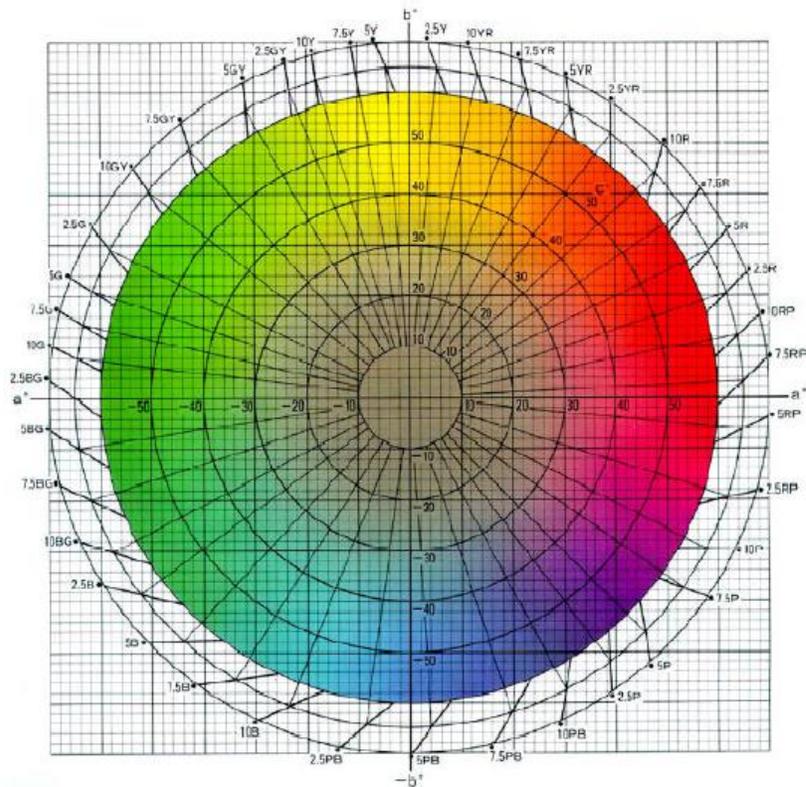


Figura: 1.11 Distribución de la carta de colores

## Medición del brillo.

La medición del brillo, es un método que permite determinar la altura de la intensidad de la luz reflectante de la superficie del objeto que se está analizando. Los valores adquiridos bajo un ángulo de incidencia predeterminado suministran valores comparativos que están en relación con el brillo de la superficie. El cabezal de medición ajustado para el ángulo de incidencia ( $20^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $85^\circ$ ) se sitúa sobre la superficie del material y se lee el valor de brillo en la escala de los medidores de brillo. Son indispensables la calibración del cabezal de medición y la determinación de la cantidad de datos estadísticos a obtener. El ángulo de medición es predefinido por el brillo del objeto a medir.

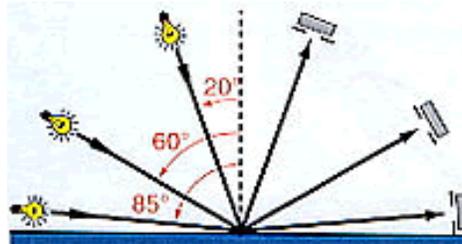


Figura: 1.12 Método de medición del brillo

## **CAPITULO II**

### **ESPECIFICACIONES Y PROCEDIMIENTOS**

#### **PROGRAMACIÓN DEL ENSAYO DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA**

Según la Norma **ASTM G 92 – 86** (Reapproved 2003) *Standard Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites* , están establecidos dos métodos para la caracterización de los ambientes en los sitios de ensayo, los cuales son denominados el Método A y el Método B.

Es recomendable utilizar ambos métodos, además de una técnica ideal de recolección de datos que ayuden a identificar los factores influyentes en la corrosión de una forma más completa.

El método A, se clasifica de acuerdo a la tasa de corrosión del acero estructural al carbono y especifica la configuración y los materiales de la exposición.

El método B es específico cuando son monitoreados sobre una base continua los factores atmosféricos y contaminantes ambientales.

#### **Resumen de los métodos**

El método A es usado cuando los datos de corrosión de la atmósfera ya han sido obtenidos.

Las medidas del ensayo de corrosión y del sitio de ensayo siguen el procedimiento y recomendaciones de ASTM G-50 (Ensayos de corrosión atmosférica de metales). En este procedimiento se adiciona información relacionada al tipo de material para la caracterización del ensayo como tiempo de exposición, posición de la probeta, práctica de limpieza y reporte de los datos.

El método B, es utilizado cuando los factores climáticos y contaminantes ambientales influyen en la corrosión como por ejemplo: temperatura, humedad relativa, precipitación, tiempo de humectación y partículas atmosféricas conocidas.

## **Descripción de probetas para monitoreo de la corrosión ambiental.**

Las probetas a utilizar en los ensayos a exposición ambiental, se describen a continuación:

### 1. Probetas tipo A:

Estas probetas son hechas a partir de lamina formada tipo teja, con el fin de evaluar la degradación en su recubrimiento de pintura, mediante la evaluación visual periódica con pruebas de coloración y de brillo a 60°

### 2. Probetas tipo B:

Estas son hechas a partir de lámina formada tipo ondulada para techo, a estas probetas se le realizaran mediciones de espesor de capa de galvanizado con el fin de verificar que estas cumplen con los requerimientos que establece la norma ASTM A653 para un galvanizado grado G-60, sin embargo las evaluaciones de la degradación de las mismas se harán mediante la inspección visual.

### 3. Probetas tipo C:

Las probetas tipo C, fueron obtenidas a partir de tubo estructural electrosoldado, con soldadura metalizada formado a partir de lámina galvanizada. a estas probetas se le realizaran mediciones de espesor de capa de galvanizado con el fin de verificar que estas cumplen con los requerimientos que establece la norma ASTM A653 para un galvanizado grado G-60, sin embargo las evaluaciones de la degradación de las mismas se harán mediante la inspección visual.

### Probetas tipo D:

Las probetas denominadas tipo D, fueron confeccionadas a partir de tubo tipo cañería, el cual fue manufacturado a partir de lámina de acero, y posteriormente a su formado es inmerso en un baño de zinc, para darle su recubrimiento protector. Al igual que en caso anterior las inspecciones que se realizaran a estas muestras serán del tipo visual, y las mediciones

de la capa galvanizada serán con el fin de conocer esa característica específica para cada probeta.

4. Probetas tipo E:

Las probetas tipo E, son probetas de lamina lisa de acero las cuales serán pesadas en una balanza analítica, expuestas al ambiente, decaadas químicamente y nuevamente pesadas para la valoración de la degradación de las mismas en un periodo determinado de tiempo, siguiendo el procedimiento descrito por la norma **ASTM G 92 – 86**.

5. Probetas tipo F:

Las probetas tipo F, son probetas de lamina lisa de acero galvanizado las cuales serán pesadas en una balanza analítica, expuestas al ambiente, decaadas químicamente y nuevamente pesadas para la valoración de la degradación del zinc en un periodo determinado de tiempo, siguiendo el procedimiento descrito por la norma **ASTM G 92 – 86**.

## Geometría de probetas de ensayo

Probeta tipo A: probeta de lámina pintada tipo teja para techo

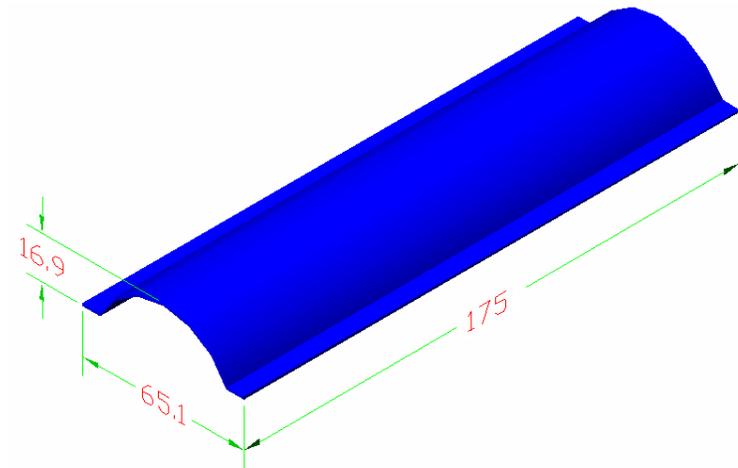


Fig. 2.1 Probeta de lámina pintada tipo teja  
Medidas en mm

Probeta tipo B: Probeta de Lámina ondula para techo.

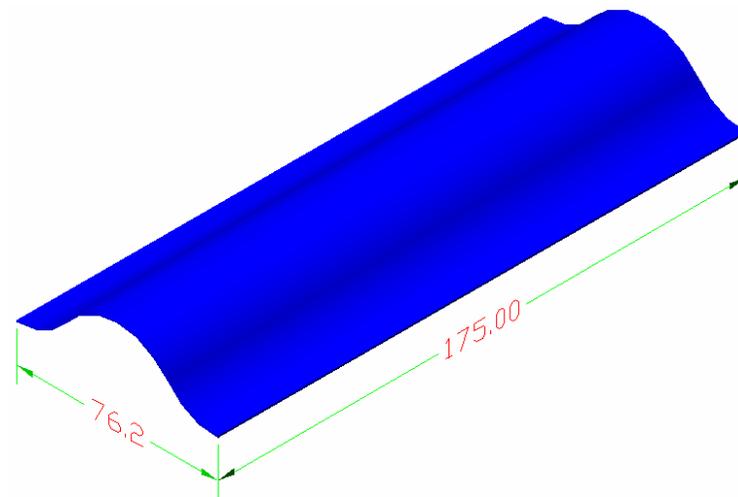


Fig. 2.2 Probeta de Lámina ondula  
Medidas en mm

Probeta tipo C: Probeta de Tubo de lámina galvanizada y con soldadura galvanizada por aspersion (metalizada) de 1" de diámetro

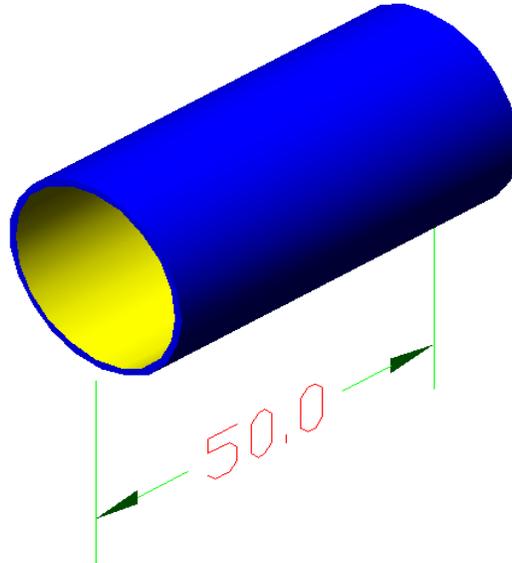


Fig. 2.3 Probeta de Tubo a partir de lámina galvanizada  
Medidas en mm

Probeta tipo D: Probeta de Tubo de cañería galvanizado por inmersión del tubo en el pote, de 1" de diámetro.

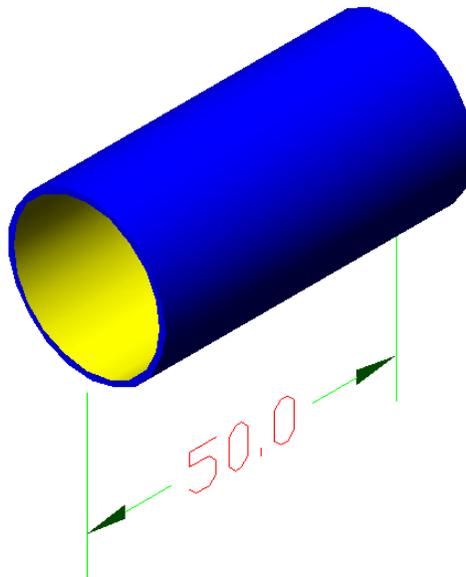


Fig. 2.4 Probeta de Tubo galvanizado por inmersión.  
Medidas en mm

Probeta tipo E y F: Ambos tipos de probeta poseen la misma geometría.

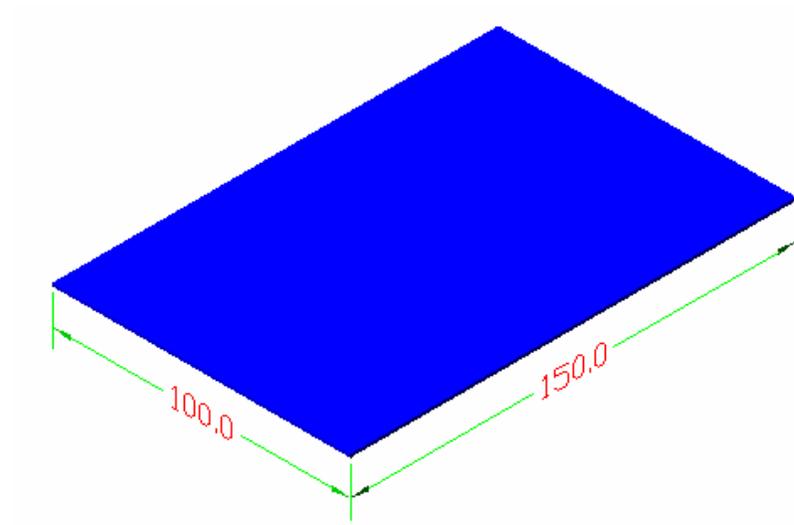


Figura 2.5: Geometría de las Probetas de lámina de acero descubierto y lámina de zinc. Medidas en mm.

## **Material para la confección de las probetas de ensayo**

El material base de las probetas de ensayo, es el acero estructural de bajo carbono, las cuales posteriormente han sido galvanizadas por diferentes procesos, e incluso pintadas como en el caso de la lamina tipo teja la cual es recubierta con una pintura a base de poliéster.

En el apéndice A se muestran la información técnica del premier y las diferentes pinturas utilizadas en el proceso del pintado de las láminas para techo tipo teja.

Se deben preparar suficientes probetas como para poder caracterizar el lugar del ensayo.

## **Preparación del material**

- Las probetas de ensayo deben poseer una medida estándar, las cuales se muestran en la sección de geometría de las probetas de ensayo.
- Se debe asignar un código de identificación y una localización permanente durante la exposición en el panel.
- Preasignar un código para definir los periodos de recolección e identificar las probetas.
- Todas las probetas deben ser limpiadas con el mismo procedimiento con el fin de asegurar la comparación en cuanto a la superficie. La práctica recomendada para la limpieza antes del ensayo es la siguiente:
- Desengrasar y remojar si es necesario para remover las costras y otras impurezas.
- Restregar con espuma de brillo y jabón hasta que el agua esté clara.
- Secar con toallas.
- Limpiar con un desengrasante como acetona o alcohol.
- Colocar en un desecador antes de pesar.

- Las probetas deben ser pesadas con  $\pm 1.0\text{mg}$  y la masa original guardada en una tabla de datos.
- En el caso de las probetas de lámina pintada, se aplicará una limpieza con espuma o tela, con el cuidado de no dañar el recubrimiento.

A continuación se muestra la forma de la tabla de datos según ASTM, en que se debe almacenar la información de las probetas a ensayar, en este caso solos las probetas tipo E y F seguirán este procedimiento.

Tabla 2.1. Formato para la recolección de datos de las probetas de ensayo de corrosión atmosférica

Sitio de Ensayo:		Latitud		Masa perdida (mg/m <sup>2</sup> )	Corrosión (mm/año)
Tiempo de exposición		Longitud			
Código	Periodo de exposición (días)	Masa (g)		Masa perdida (mg/m <sup>2</sup> )	Corrosión (mm/año)
		Original	Final		

Las probetas deben ser guardadas en bolsas plásticas con desecador o selladas herméticamente hasta el tiempo de exposición.

### **Exposición de las probetas.**

La frecuencia con la cual las probetas se recolectarán depende de las necesidades de obtener los datos de corrosividad.

Cada probeta debe estar por triplicado como mínimo para cada periodo de exposición, con el fin de obtener un dato promedio más valedero (para probetas tipo E y F).

Un periodo de un año es sugerido como mínimo de exposición, sin embargo periodos considerables de 3, 6, 9,12 meses, son de gran importancia para nuestro caso específico, pues se pretende investigar y documentar el proceso de degradación del recubrimiento desde su inicio.

Periodos de o 1, 2 , 4 o más años nos ayudan a conocer el comportamiento del avance de la corrosión a través del recubrimiento y del material base.

Acortar los periodos de ensayos cuando la corrosión es severa o alargarlos cuando no lo es.

Para este proyecto los periodos de recolección para las probetas tipo A, B, C, y D se muestran en la siguiente tabla

Primera recolección de probetas	1 mes
Segunda recolección de probetas	3 meses
Tercera recolección de probetas	6 meses
Cuarta recolección de probetas	9 meses
Quinta recolección de probetas	1 año
Sexta recolección de probetas	2 años
Séptima recolección de probetas	3 años
Octava recolección de probetas	5 años
Novena recolección de probetas	10 años

Tabla.2.2: periodos de recolección de probetas A, B, C y D de las estaciones

Los periodos de recolección para las probetas tipo E y F se muestran en la siguiente tabla.

Primera recolección de probetas	1 mes
Segunda recolección de probetas	3 meses
Tercera recolección de probetas	6 meses
Cuarta recolección de probetas	9 meses
Quinta recolección de probetas	1 año

Tabla 2.3: periodos de recolección de probetas E y F de las estaciones

## **Recolección de las probetas**

Para probetas tipo E y F

Después de cumplidos los periodos de exposición de las probetas, estas deben removerse y ser puestas en bolsas previamente etiquetadas. En caso de que no se distinga el código se debe guiar con un mapa de ubicación de la probeta dentro del panel. Si la probeta se encuentra húmeda tiene que secarse cuidadosamente si es almacenada extensamente (24 horas) antes de limpiarla. Debe de tomarse fotografías y realizarse observaciones de la apariencia de la probeta.

La probeta antes de ser removida debe ser identificada en el lugar de la exposición, masa original, composición química y área de exposición y la información documentada como muestra la tabla 2.1

Una vez identificada y removida la probeta esta debe ser limpiada de acuerdo a la ASTM G1 (Preparación, limpieza y evaluación de las probetas de ensayo de corrosión). Antes de la pesada final debe secarse por completamente.

Para probetas tipo A: Al igual que en el procedimiento anterior las probetas deben seguir el proceso de identificación establecido para evitar confundirlas entre ellas, sin embargo a estas las pruebas que se les realizaran son las de coloración y brillo a 60°

Para probetas tipo B, C, y D: igual que en el procedimiento anterior las probetas deben seguir el proceso de identificación establecido para evitar confusiones, a estas probetas no se planea realizar ninguna prueba, sin embargo si se analizaran inspeccionándolas visualmente y se incluirán en el registro fotográfico al igual que todas los demás tipos de probetas.

### **Sitios de ubicación de las estaciones.**

Las estaciones de control y monitoreo de la corrosión se colocaran en diferentes zonas, con fin de encontrar en ellas diferentes condiciones climatológicas.

1. Complejo industrial en la Ceiba de Orotina.
2. Pt. Caldera
3. Laminadora en Colima de Tibás
4. Perez Zeledón

### **Limpieza de las probetas después del ensayo**

Solo para probetas tipo E y F

La remoción de los productos de corrosión pueden ser clasificada en tres categorías: mecánica, química y electrolítica.

Un procedimiento ideal conforme a la norma ASTM G1-Preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens- removerá solo productos de corrosión y no-metal base. Para determinar la masa perdida del metal cuando se remueven los productos de corrosión las réplicas se deben limpiar con el mismo método.

Se debe pesar cada probeta antes y después de la limpieza, la diferencia de peso es la masa perdida por corrosión.

La limpieza de la probeta puede repetirse todas las veces necesarias. Cada vez que se limpie la probeta se debe determinar la masa que va perdiendo a cada espécimen.

La masa perdida se graficada como función del número de limpiezas hechas. De esta gráfica se obtendrán dos líneas AB y BC y la masa perdida por corrosión corresponderá al punto B.

Para minimizar la incertidumbre asociada al método de limpieza de la corrosión. El método a escoger debe procurar la mínima inclinación (cerca de la horizontal) de BC.

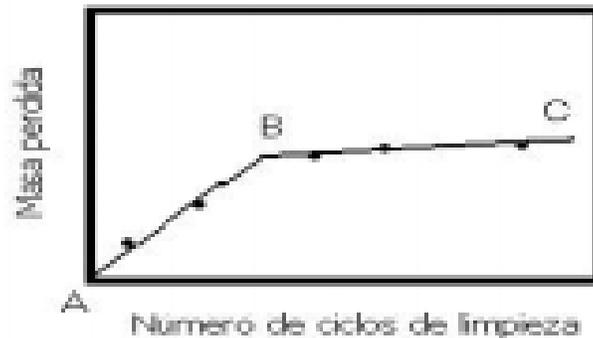


Figura 2.6. Grafica de peso perdido al lavar las probetas.

Es conveniente repetir el tratamiento para garantizar completamente la remoción de los productos de corrosión. Para confirmar la limpieza total la probeta puede examinarse con un microscopio de bajo poder (por ejemplo 7x a 30x).

Al finalizar el tratamiento la probeta deberá ser enjuagada y secada completamente de forma inmediata.

Todas las soluciones de limpieza se deben prepara con agua y reactivos de grado químico.

A continuación se dan algunos procedimientos y sus disoluciones recomendadas por ASTM G1 (Preparación, limpieza y evaluación de las probetas de ensayo de corrosión), para limpiar los productos de corrosión después del ensayo.

Para aceros y sus aleaciones

Designación	Solución	Tiempo	Temperatura	Observaciones
C.3.1	1000 mL ácido clorhídrico (HCl, sp gr 1.19) 20 g trióxido de antimonio (Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 50 g Cloruro de estaño (SnCl <sub>2</sub> )	1 a 25 min	20 a 25 °C	La solución debe ser bien agitada o la probeta cepillada. Algunas veces puede requerir de largo tiempo.
C.3.2	50 g Hidróxido de sodio (NaOH) 200 g de zinc granulado pedacitos de zinc. Agua destilada hasta llenar 1000mL	30 a 40 min	80 a 90°C	Tome las precauciones adecuadas si utiliza polvo de zinc.
C.3.3	200 g Hidróxido de sodio (NaOH) 20 g de zinc granulado pedacitos de zinc. Agua destilada hasta llenar 1000mL	30 a 40 min	80 a 90°C	Tome las precauciones adecuadas si utiliza polvo de zinc.
C.3.4	200 g de citrato de diamonio ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> ) Agua destilada hasta llenar 1000mL	20 min	75 a 90°C	Dependiendo de la composición de los productos de corrosión, puede ocurrir ataque del metal base.
C.3.5	500 mL ácido clorhídrico (HCl, sp gr 1.19) 3.5 g tetramino hexametileno Agua destilada hasta llenar 1000mL	10 min	20 a 25 °C	Puede requerir de tiempos mas largos
C.3.6	Soda cáustica derretida (NaOH) con 1.5 . 2.0 % hidruro de sodio (NaH)	1 a 20 min	370°C	

Tabla 2.4 procedimiento de limpieza para probetas de acero.

La limpieza química es casi siempre precedida por un cepillado (cerdas no metálicas) o ultrasonido para remover la masa perdida.

Para zinc y aleaciones de zinc

Designación	Solución	Tiempo	Temperatura	Observaciones
C.9.1	150ml de hidroxido de amonio (NH <sub>4</sub> OH, sp gr 0.90) Llene hasta llegar a 1000ml de seguido por 50 g de trióxido de cromo(CrO <sub>3</sub> ), 10 g de nitrato de plata (AgNO <sub>3</sub> ) Llenado con agua destilada hasta los 1000ml	1 a 25 min  15 a 20 s	20 a 25 °C  Ebullición	El nitrato de plata se debe disolver en agua y agregar al ácido crómico que hierve a prevenir la cristalización excesiva del cromato de plata. El ácido crómico debe ser sulfato libremente para evitar el ataque del metal bajo del cinc.
C.9.2	100 g de cloruro de amonio (NH <sub>4</sub> Cl) Llenar con agua destilada hasta 1000ml	2 a 5 min	70°C	-----
C.9.3	200 g de trióxido de cromo(CrO <sub>3</sub> ), Llenar con agua hasta los 1000 ml	1 min	80°C	La contaminación del cloruro del ácido crómico de los productos de la corrosión formados en ambientes de la sal se debe evitar para prevenir el ataque del metal bajo del cinc.
C.9.5	100 g de persulfato de amonio ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ) Llenar con agua destilada hasta los 1000 ml	5 min	20 a 25 °C	Recomendado particularmente para el acero galvanizado
C.9.6	100g de acetato de amonio (CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> ) Llenar con agua destilada hasta los 1000 ml	2 a 5 min	70 °C	.....

Tabla 2.5 Procedimiento de limpieza para probetas zinc.

De los procedimientos anteriores fueron usados para la limpieza de las probetas estándar de acero el procedimiento C.3.3 de la tabla 2.6

Para las probetas estándar de Zinc se utilizó el procedimiento C.9.2 de la tabla 2.7

### **Cálculo de la corrosividad**

Solo para probetas Tipo E Y F

Determinación de la corrosividad por masa perdida

Calcular la masa perdida, la masa perdida por unidad de área ( $\text{mg} / \text{m}^2$ ) y la proporción de la corrosión ( $\text{mm/año}$ ), utilizando las siguientes ecuaciones de acuerdo a ASTM G 92 (Characterization of Test Sites):

$$M_a = \frac{M}{A} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$M_a$  = masa perdida por unidad de área, miligramos por metro cuadrado

$M$  = Masa perdida mg

$A$  = área expuesta, metros cuadrados

$$C = \frac{(8.76 \times 10^4) M_1}{a \times t \times d} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$C$  = promedio de corrosión en milímetros por año

$M_1$  = perdida de masa, en gramos

$a$  = área en centímetros cuadrados

$t$  = tiempo en horas

$d$  = densidad en gramos por centímetro cúbico

## Codificación de las muestras o probetas.

Para la elaboración de un código, con el cual se pueda identificar cada una de las probetas, tomando en cuenta cuatro factores determinantes para la identificación de las mismas, los cuales son: la ubicación de la estación de monitoreo, el tipo de muestra, el periodo para el cual se planea su recolección, y el numero de muestra ya que de cada uno de los tipos hay una cantidad definida de muestras por recolección, con el fin de obtener un resultado promedio. A continuación se muestra la descripción detallada de cómo se obtuvo esta codificación.

### Por Ubicación

Complejo industrial en la Ceiba de Orotina.	O.XX.X
Pt. Caldera	C.XX.X
Laminadora en Colima de Tibás	T.XX.X
Perez Zeledón	L.XX.X

Tabla 2.6 codificación de las probetas según su ubicación

### Por tipo de muestra.

Lámina pintada tipo teja	X.AX.X
Lámina ondula para techo	X.BX.X
Tubo de lámina galvanizada	X.CX.X
Tubo galvanizado por inmersión	X.DX.X
Lamina de acero desnudo	X.EX.X
Lamina de zinc. (Acero revestido)	X.FX.X

Tabla 2.7 codificación de las probetas según el tipo de muestra

### Por periodo de recolección de la muestra

1 mes	X.X1.X
3 meses	X.X2.X
6 meses	X.X3.X
9 meses	X.X4.X
1 año	X.X5.X
2 años	X.X6.X
3 años	X.X7.X
5 años	X.X8.X
10 años	X.X9.X

Tabla 2.8 codificación de las probetas según su periodo de recolección

Por cantidad de muestras de un mismo tipo y para un mismo periodo de recolección

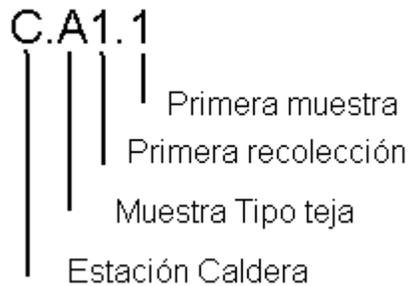
Para probetas tipo E y F

Primera muestra	X.XX.1
Segunda muestra	X.XX.2
Tercera muestra	X.XX.3

Tabla 2.9 codificación de las probetas según su posición.

En el caso de las probetas A, B, C, y D únicamente se colocaran dos (2) muestras por periodo de recolección, a continuación se muestra un claro ejemplo del funcionamiento del sistema de codificación establecido.

EJEMPLO:



En la sección de apéndices, específicamente en el apéndice **B** se muestra detalladamente las tablas con la codificación de las probetas de cada una de las estaciones, de una forma ordenada para que eventualmente funcionen como un mapa de ubicación de las probetas.

## Método B

Algunos factores atmosféricos han sido identificados por tener una influencia sobre la corrosión en los metales. Algunos de estos factores son tabulados en la siguiente tabla:

Fecha	Temperatura °C			Humedad Relativa (%)			Precipitación (mm)	Tiempo Humectación (h/d)
	Alta	baja	Promedio	alta	baja	promedio		

Tabla 2.10 tabla de recolección de datos de factores atmosféricos

El monitoreo de los factores atmosféricos depende de la frecuencia con la cual los instrumentos o sistemas de medición sean atendidos.

El dióxido de azufre es un contaminante el cual puede ser monitoreado mensualmente de acuerdo a la Norma Cubana (Sistema de Normas para la Protección Contra la Corrosión, NC 12-01-08, determinación del contenido de dióxido de azufre en la atmósfera, Método de análisis químico)

La concentración del ión cloruro es otro contaminante que es monitoreado generalmente con el método de la candela húmeda, el cual requiere de una atención semanal para reemplazar el agua que se evapora y un análisis químico mensual para obtener la cantidad de cloruros en el ambiente. El método de la candela húmeda se realiza de acuerdo a la Norma ISO 9225.

Además de otros contaminantes mencionados como H<sub>2</sub>S, o bien factores climáticos como la velocidad y dirección del viento.

## Especificaciones de los tubos expuestos

Geométricas:

- Lado: 72 x 72 mm
- Largo del tubo: 60 cm
- Espesor: 1.50 mm

De recubrimiento:

- Grado de galvanizado: G-60

Grado	Mínimo para ambas caras				Mínimo para una cara			
	oz/ft <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	Promedio mils/cara	Promedio μm/cara	oz/ft <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	mils	μm
G115	1.15	351	0.98	25	0.40	124	0.69	17
G90	0.90	275	0.77	19	0.32	97	0.54	14
G60	0.60	183	0.51	13	0.20	65	0.36	9.2
G40	0.40	122	0.34	8.6	0.12	43	0.24	6.1

Tabla 2.11. Requerimientos mínimos para galvanizados según norma ASTM A653

Numéricas

- Cantidad de paquetes: 4 paquetes
- Tubos por paquete: 12 tubos

Exposición:

Fecha de puesta a exposición de los 4 paquetes: 03 de Julio del 2006

Periodos de exposición de los paquetes.

Número de paquete	Periodo de exposición (meses)
Paquete #2	2.5
Paquete #3	4
Paquete #4	5
Paquete #1	5

Tabla 2.12: Periodos de exposición de los tubos en paquete.

### **Condiciones de exposición de los paquetes al ambiente.**

La estación de experimentación donde se encuentran colocados los paquetes de tubos estructurales galvanizados #2, #3, #4, está ubicada al costado oeste de la planta de producción de TUBOTICO SA, en este sitio específico prevalecen condiciones muy húmedas, puesto que se encuentra aislada a un lado por la infraestructura de la planta de producción de tubotico, y al otro por una pared de piedra y la planta de producción de GALVATICA. Lo cual protege la estación de la acción desecadora de los vientos y a la vez reduce grandemente la cantidad de horas de influencia directa del sol, convirtiendo el sitio de ensayo en un lugar dentro de la categoría de los húmedos.

Por otro lado el paquete #1 se encuentra almacenado en el laboratorio de TUBOTICO, en condiciones controladas de temperatura y humedad con el fin de simular condiciones idóneas de almacenamiento.

### **Condiciones ambientales controladas en el laboratorio.**

Temperatura	22 °C
Humedad relativa (HR)	63 %

Tabla 2.13: Condiciones ambientales dentro del laboratorio de TUBOTICO.

**Procedimiento de exposición:**

- Preparar los paquetes de tubos (#1, #2, #3, #4) que se desean analizar atándolos con cinta metálica galvanizada, de igual manera que los paquetes de tubos para la venta al cliente.
- Los paquetes de tubos poseen longitudes de 60 cm aproximadamente, ya que no se consideró necesario que estos tuvieran longitudes mayores.
- Realizar mediciones aleatorias del espesor de galvanizado en diferentes tubos, con el fin de obtener un valor promedio, y comprobar que se encuentran dentro de la especificación ISO mostrada en la tabla 1.
- Rotular debidamente cada uno de los paquetes, siguiendo una codificación preestablecida.
- Elaborar un calendario con los periodos de exposición deseados para cada uno de los paquetes.
- Colocar los paquetes de tubos sobre una tarima o perfiles, de tal manera que estos queden separados levemente del suelo (con el fin de simular condiciones de mal almacenamiento)

**Procedimiento de recolección:**

- Las recolecciones se deben realizar según el calendario de recolección de cada uno de los paquetes y siguiendo un procedimiento de recolección de información ya preestablecido.
- Las evaluaciones que se realizarán sobre la corrosión serán únicamente por el método de inspección visual.
- Se deberá establecer un registro fotográfico de cada uno de los paquetes que se han puesto a exposición.
- En el registro fotográfico, se debe incluir fotografías de los sectores de los tubos que estaban a la intemperie (caras de los paquetes), como los sectores entre tubos (zonas internas del paquete), y hasta donde sea posible de sectores internos de los tubos.

### CAPITULO III

## RESULTADOS DE ENSAYO DE CONTROL DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN PAQUETES DE TUBO ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DE UN ADECUADO HE INADECUADO ALMACENAMIENTO

### Primera recolección de datos.

Registro fotográfico, recolección paquete # 2

Tiempo de exposición al ambiente de 2.5 meses

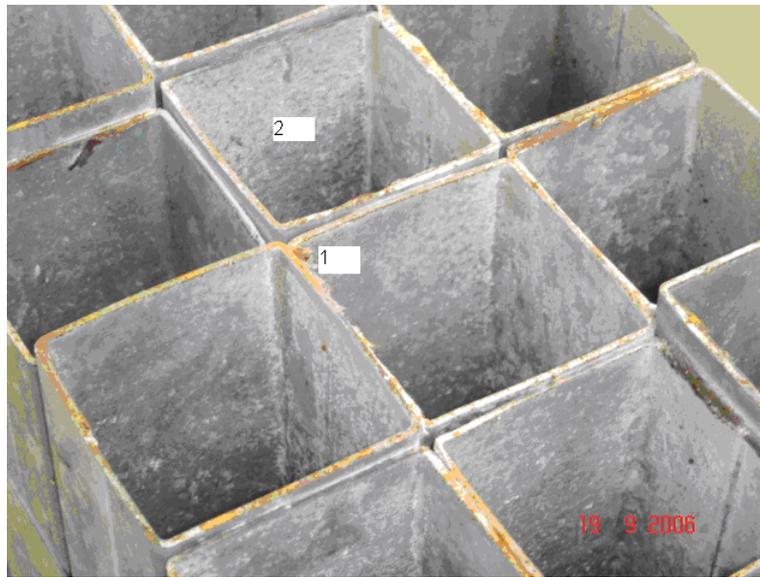


Figura 3.1: corrosión presentada en los bordes de corte de los tubos

### Observaciones de figura 3.1.

- En los bordes de corte de los tubos se detectaron múltiples formaciones de óxidos de hierro y adherencias de óxidos de zinc de forma sectorizada (ver punto 1).
- Formaciones capas superficiales de óxido de zinc en las paredes internas del tubo, la cual aumenta en los sectores más cercanos a los bordes de corte (ver punto 2).
- No se presentaron formaciones de óxidos de hierro en los sectores internos de los tubos analizados.



Figura 3.2: corrosión en los sectores expuestos del paquete de tubos

Observaciones en figura 3.2.

- Degradación prácticamente total de pasivador, solo en pequeños sectores los tubos conservan el brillo del galvanizado inicial.
- Formaciones de óxidos de zinc de poco espesor en forma casi generalizada en la superficie del paquete de tubos, tanto en las zonas laterales y la inferior del mismo.
- No se detectó presencia de óxidos de hierro en estas superficies.
- En todos los tubos analizados se presentan líneas longitudinales, provocadas por los rodillos de doblado del tubo, los cuales provocan daños superficiales en el recubrimiento, estas líneas las podemos ver claramente en la parte superior e inferior del punto denominado como 1, en la figura anterior



Figura 3.3 y 3.4: Formación de corrosión en las caras de los tubos en sectores Internos del paquete.

#### Observaciones en figura 3.3 y 3.4

- En ambas figuras se evidencia la presencia de óxidos de zinc de forma generalizada pero con variable intensidad de corrosión.
- En ambas figuras se evidencia presencia de variaciones en la intensidad de la corrosión del zinc, dando así la apariencia de estar manchado.
- En la figura 3.3 (izquierda) se evidencia la presencia de óxidos de hierro de tipo picadura.



Figura 3.5 y 3.6: Formación de corrosión en las caras Internas del rollo de tubos

#### Observaciones en figuras 3.5 y 3.6

- Las caras de los tubos nombradas como uno (1) y dos (2) en ambas figuras, estuvieron en contacto directo durante todo el periodo de corrosión.
- Se evidencia una alta tendencia a la corrosión de los vértices del tubo.
- Ambas caras son prácticamente una imagen espejo una de la otra.
- El cordón de soldadura se nota menos afectado que las superficies a su alrededor

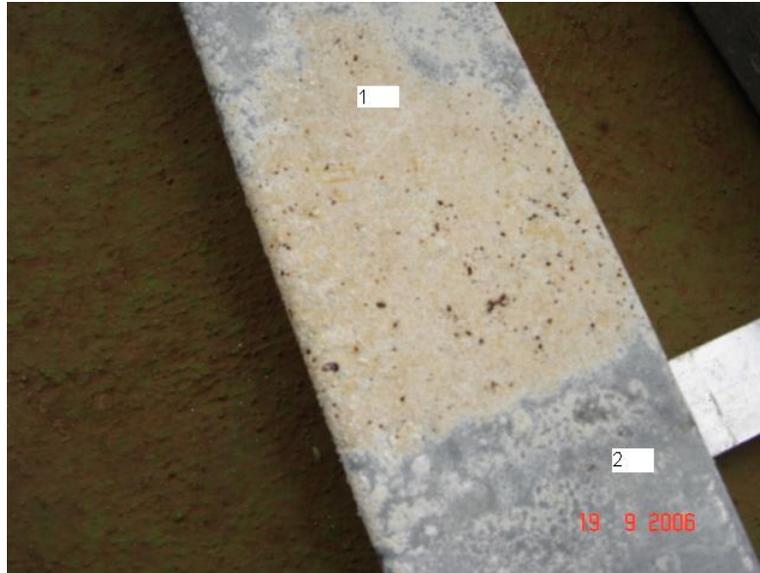


Figura 3.7: Formación acelerada de corrosión en las caras de los tubos en sectores Internos del rollo.

Observaciones en figura 3.7.

- Se evidencia una mancha de corrosión con una coloración amarillenta formada principalmente por óxidos de zinc, y pequeñas formaciones de herrumbre en forma de picaduras. (ver punto 1)
- La mancha de corrosión amarillenta se encuentra sectorizada en la parte semicentral de la longitud del tubo.
- El tubo también presenta formaciones prácticamente generalizadas de corrosión en la capa de zinc de las zonas no cubiertas por la mancha de corrosión amarillenta (ver punto 2).

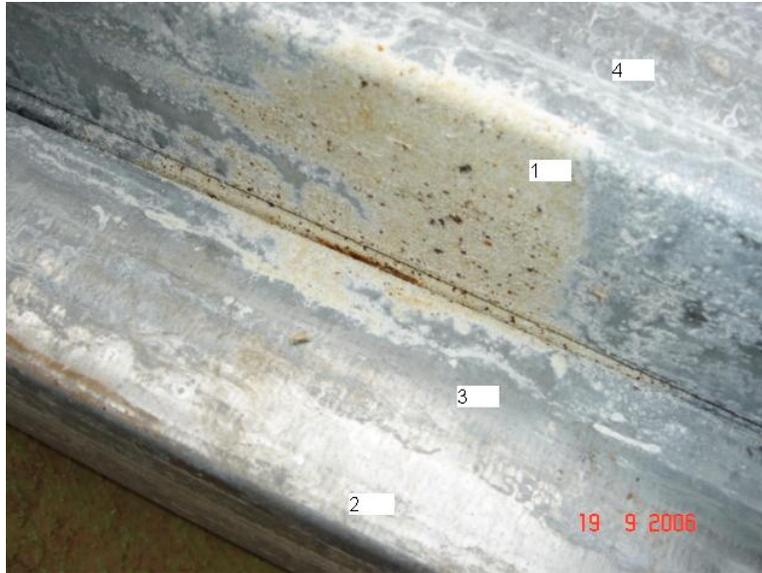


Figura 3.8: formación de corrosión en las caras de los tubos en sectores Internos del rollo

#### Observaciones de figura 3.8

- En el sector denominado en la figura anterior como punto 1 podemos ver la formación de una mancha de corrosión amarillenta formada principalmente por óxidos de zinc y múltiples puntos de corrosión de hierro del tipo picadura.
- En los puntos 3 y 4 se denota una formación de corrosión leve en la capa del recubrimiento.
- en la zona de ubicación del punto 2 se puede observar que los efectos de la corrosión son muy leves, ya que se puede notar que el tubo aún conserva el brillo del galvanizado.

## Segunda recolección de datos.

Registro fotográfico, recolección paquete # 3

Tiempo de exposición al ambiente de 4 meses



Figura 3.9: formación corrosión (herrumbre) en los bordes de corte de los tubos

### Observaciones de figura 3.9

- En los bordes de corte del tubo se detectaron formaciones de óxidos de hierro y adherencias de óxido de zinc arrastrados por las aguas de las lluvias, de forma sectorizada (ver punto 1).
- Formaciones de notorias capas de óxido de zinc en las paredes internas del tubo, la cual aumenta en los sectores más cercanos a los bordes de corte.

No se presentaron formaciones de óxidos de hierro en los sectores internos de los tubos analizados



Figura 3.10: formación de oxidación blanca en las caras expuestas y no expuestas de los tubos.

#### Observaciones en figura 3.10

- Degradación total de pasivador a base de ácido crómico y formación de corrosión generalizada de baja intensidad, en las caras externas de los tubos. (ver punto 2).
- Se detectó presencia de óxidos de hierro en forma de picaduras en las superficies de las caras de los tubos de los sectores internos del paquete. (ver punto 1)



Figura 3.11: Formación de oxidación blanca y herrumbre en las caras de los sectores internos del paquete de tubos.

Observaciones en figura 3.11:

- En esta figura se evidencia presencia de variaciones en el espesor de la capa corrosión del zinc, dando así la apariencia de estar manchado.
- En el sector inferior del punto 1 se evidencia la presencia de óxidos de hierro en forma de picadura.



Figura 3.12: formaciones de óxidos de hierro en las caras de los tubos.

Observaciones en figura 3.12:

- Formaciones de corrosión blanca de forma generalizada y de variable intensidad y herrumbre en forma de picaduras (ver punto 1).
- Se denotan acumulaciones de óxidos blancos sobre la línea del cordón de soldadura.

### Tercera recolección de datos.

Registro fotográfico, recolección paquete # 4

Tiempo de exposición al ambiente de 5 meses.

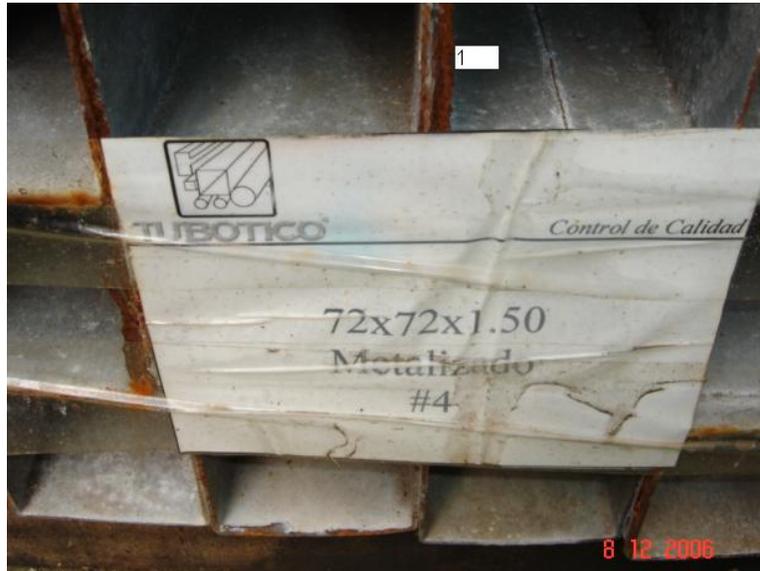


Figura 3.13: formación de corrosión en los bordes de corte de los tubos

Observaciones de figura 3.13:

- Se detectaron formaciones de óxidos de hierro y adherencias de óxido de zinc arrastrados por las aguas de las lluvias, de forma sectorizada (ver punto 1).
- Formaciones de notorias capas de óxido de zinc en las paredes internas del tubo, la cual aumenta en los sectores más cercanos a los bordes de corte.
- No se presentaron formaciones de óxidos de hierro en los sectores internos de los tubos analizados, con la excepción de pequeñas formaciones a lo largo de la superficie del cordón de soldadura la cara interna del tubo.



Figura 3.14: formación de corrosión blanca en los sectores externos del paquete de tubos.

Observaciones en figura 3.14:

- Degradación total de pasivador.
- Formaciones de óxidos de zinc de poco espesor en forma generalizada en la superficie del paquete de tubos, tanto en las zonas laterales y la inferior del mismo.
- No se detectó presencia de óxidos de hierro en estas superficies externas del paquete.



Figura 3.15: formaciones de corrosión en los sectores internos del paquete de tubos.

Observaciones en figura 3.15:

- En esta figura se evidencia presencia de variaciones en el espesor de la capa de óxido zinc, creando relieves superficiales que dan la apariencia de estar manchado.
- En el sector inferior del punto 1 se evidencia la presencia de óxidos de hierro en forma sectorizada.



Figura 3.16: Formaciones de óxidos de hierro por fallo del recubrimiento de zinc.

Observaciones en figura 3.16:

- Se evidencia la formación de manchas de corrosión con una coloración amarillenta formada principalmente por óxidos de zinc, y formaciones de herrumbre en forma de picaduras.
- El tubo también presenta formaciones generalizadas de corrosión en la capa de zinc de las zonas no cubiertas por la mancha de corrosión amarillenta.

Registro fotográfico, recolección paquete # 1

Tiempo de exposición al ambiente de 5 meses

Paquete en condiciones idóneas de almacenamiento.



Figura 3.17: Aspecto externo del paquete en optimas condiciones de almacenamiento

Observaciones en figura 3.17:

- Las caras externas de los tubos que conforman el paquete no contaban con formaciones de corrosión perceptibles a simple vista.
- Se denota la conservación del brillo superficial del galvanizado antes de ser atacado por la oxidación.



Figura 3.18: condiciones de las caras internas de los tubos en el paquete

Observaciones en figura 3.18:

- Las caras internas de los tubos que conforman el paquete, tampoco presentaban formaciones perceptibles de óxidos blancos ni de hierro.
- La superficie interna y externa del cordón de soldadura tampoco presentaban formaciones de corrosión blanca ni de óxidos de hierro.



Figura 3.19: condiciones de las caras internas del paquete de tubos almacenado en óptimas condiciones.

Observaciones en figura 3.19:

- En la figura anterior se muestran todos los tubos que conforman el paquete de tubos #1
- En las caras de tubos anteriores no se encontraron formaciones de óxidos de hierro ni de óxidos de zinc.



Figura 3.20: bordes de corte de los tubos

Observaciones en figura 3.20.

- Se observan acumulaciones de residuos polvosos provenientes del disco de corte, usado en de cada uno de estos tubos.
- En la figura anterior se muestran los bordes de corte de los tubos que conforman el paquete de tubos #1
- En los bordes de corte de tubos anteriores no se encontraron formaciones de óxidos de hierro ni de óxidos de zinc.

Mediciones aleatorias del espesor de galvanizado realizadas a los tubos cortados para la fabricación de los paquetes.

espesores ( $\mu\text{m}$ )	promedio ( $\mu\text{m}$ )
13.6	14.225
15.5	
14.3	
13.5	

Tabla 3.1: Espesores de galvanizado de los tubos Expuestos.

Cada una de las medidas que se exponen en la columna denominada como espesores, ya es un promedio de diez mediciones realizadas y promediadas por el instrumento elcometer (medidor de la capa de galvanizado) y la columna denominada como promedio es el promedio general de las mismas.

## RESULTADOS DE ENSAYO DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

### Análisis de composición química

Como parte fundamental del estudio de los efectos de la corrosión en los recubrimientos galvánicos se realizó el análisis de composición de la aleación de zinc usada para este recubrimiento, mediante el uso del espectrómetro de emisión óptica del laboratorio de análisis de Galvatica SA.

A continuación se muestra una tabla que muestra los resultados de los análisis de composición química, realizados a partir de una muestra del horno para galvanizado por inmersión de la línea de galvanizado de lámina de GALVATICA SA.

#### COMPOSICION QUIMICA (%)

Pb	Al	Cu	Cd	Sn	Mg
0.05991	0.2266	0.00055	0.0003	0.00361	0.00034
Fe	Ni6	Cr4	In1	Si3	Zn
0.05365	0.00102	0.00064	0.03205	0.00222	99.6191

Tabla 3.2 composición química del zinc para el galvanizado en GALVATICA. SA

Seguidamente se muestra una tabla que muestra los resultados de un análisis de composición química realizado, a partir de una muestra del pote (horno para galvanizado por inmersión) de la línea de galvanizado de tubo formado en TUBOTICO. SA

#### COMPOSICION QUIMICA (%)

Pb	Al	Cu	Cd	Sn	Mg
0.21666	0.00256	0.00044	0.00067	0.00112	0.00007
Fe	Ni6	Cr4	In1	Si3	Zn
0.03748	0.0018	0.00007	0.00034	0.003	99.7461

Tabla 3.3 composición química del zinc para el galvanizado en TUBOTICO.

## Estaciones Instaladas

Para la realización de las pruebas de corrosión atmosférica se montaron 4 estaciones de corrosión, las cuales están ubicadas en las cercanías de puerto caldera, en la Ceiba de Orotina, en la zona de Tibás, y en la zona de Pérez Zeledón, respectivamente.

Los resultados obtenidos hasta el momento los podemos observar en el apéndice C, el cual contiene las tablas con los registros de las pruebas de color y brillo realizados a las probetas tipo A, y las pruebas de espesor de capa de galvanizado realizadas a las probetas tipo B, C, y D. además en el apéndice C se encuentran tabulados los registros las masas de las probetas tipo E y F

### **Características climatológicas de estaciones de monitoreo y control instaladas.**

Tal y como se encuentra expresado en la sección de procedimientos de este informe, el proyecto de montaje de estaciones de corrosión cuenta con cuatro sitios donde fueron instalados cada uno de estos, estos sitios de prueba y las características climatográficas de estos se encuentran listados de forma resumida en la siguiente tabla.

Estación	Ubicación Climatográfica	Lluvia (mm/año)	Temperatura promedio (°C)	Humedad relativa Promedio	
				Invierno	Verano
Estación Orotina	Pacífico Norte	1400	28	80-85	60-65
Estación Caldera	Pacífico Norte	1400	28	80-85	60-65
Estación Tibás	Valle Central	1967	24	~75	~69
Estación Pérez Zeledón	Pacífico Sur	3000	26	~90	~75

Fuente: Instituto meteorológico nacional.

Tabla 3.4: Características climatológicas específicas en la zona de cada una de las estaciones

### **Estación Caldera:**

Esta estación se encuentra ubicada en la zona verde de la empresa Transitaria, la cual es una compañía naviera perteneciente al grupo Pujol, y se encuentra ubicada a unos 75 m. sobre el nivel del mar y a unos 300 m. lineales de la playa, esta estación hay sido colocada estratégicamente, con la finalidad de medir el efecto corrosivo de la condiciones costeras en las probetas a ensayar, Esta estación al igual que las demás estaciones instaladas cuenta con la siguientes probetas.

<b>Cantidad</b>	<b>Tipo de Probeta</b>
18	Probeta Tipo A
18	Probeta Tipo B
18	Probeta Tipo C
18	Probeta Tipo D
15	Probetas Tipo E
15	Probetas Tipo E

Tabla 3.5: Cantidad y tipo de probetas por Estación Montada

Estas probetas cuentan con un programa de recolección, el cual se muestra de forma clara en el apéndice D y en la sección de procedimientos de este documento.

A continuación se muestran imágenes de la estación caldera, estas son parte del registro fotográfico de la misma, en el montaje de esta estación se realizó una variación con respecto a las demás estaciones montadas, ya que esta fue montada con su parte frontal hacia el noroeste, ya que se busca que esta quede de frente a la costa para que la brisa marina impacte directamente sobre la parte frontal de estación y por ende directamente a las probetas, cabe mencionar que las demás estaciones de control de corrosión se encuentran ubicadas con su parte frontal hacia el sur, esto con el fin de maximizar el periodo de exposición a la luz solar.



Figura 3.21: Panel de exposición ubicado en zona verde de oficinas de la empresa TRANSITARIA, en Pto. Caldera



Figura 3.22: Panel de exposición ubicado en zona verde de oficinas de la empresa TRANSITARIA, en Pto. Caldera

### **Estación la Ceiba de Orotina:**

Esta estación se encuentra ubicada en la Ceiba de Orotina, específicamente en el complejo Industrial José Pujol Martí, lugar desde el cual se coordinó el desarrollo del proyecto, y se realizaron las pruebas a las probetas expuestas.



Figura 3.23: Estación Orotina.

### **Estación Tibás:**

Esta estación se encuentra ubicada en colima de Tibás, específicamente en las bodegas de almacenamiento de materiales de ABONOS AGRO SA. Empresa también perteneciente al Grupo Pujol.



Figura 3.24: Estación Tibás

## Estación Pérez Zeledón

La estación de control de corrosión Pérez Zeledón, se encuentra ubicada en las instalaciones de Abonos Agro, ubicadas en el centro del cantón, esta estación está ubicada con su parte frontal hacia el sur, al igual que las demás estaciones y posee la misma cantidad y tipo de probetas.



Figura 3.25: Fotografía de panel de exposición ubicado en zona verde de Planta de Abonos Agro en Pérez Zeledón.

## Resultados del análisis de PH de las aguas de lluvias en la estación la Ceiba de Orotina.

Durante los meses de octubre y noviembre del 2006, se procedió con el muestreo periódico de las aguas de las lluvias, para lo cual se realizaron distintas mediciones, las cuales son mostradas a continuación.

Fecha de recolección de la muestra	PH de la muestra	Conductividad ( $\mu$ s)
3/10/2006	5.30	9
6/10/2006	6.2	6
9/10/2006	5.7	8
17/10/2006	5.8	11
23/10/2006	5.9	10
01/11/2006	6.5	9
12/11/2006	6.1	7
<b>PROMEDIO</b>	<b>5.9</b>	<b>8.57</b>

Tabla 3.6: Resultados de análisis de PH de aguas de lluvia, en estación Orotina.

## Resultados de la recolección de las probetas de ensayo

### Probetas de Acero (Tipo E):

Para el decapado químico de las probetas de acero se aplicó el procedimiento C.3.3 que se encuentra en la tabla 2.6 de este documento, tal y como se muestra en dicho procedimiento, la preparación de la solución para este decapado consiste en la mezcla de 200g hidróxido de sodio, Zinc en cantidad necesaria para cubrir las caras de la probeta y agua destilada hasta completar los 1000 ml, para posteriormente llevar esta solución hasta una temperatura que se debe mantener entre los 80°C y los 90°C por 40 min.

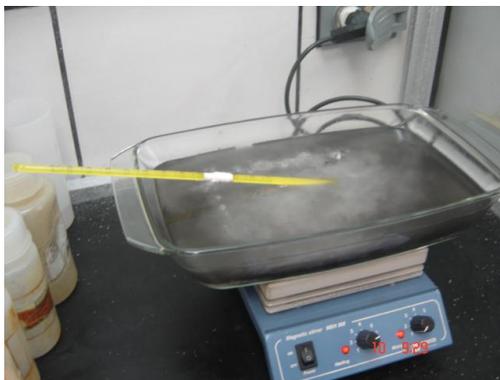


Figura 3.26. Fotografía de solución para decapado de probetas.

Una vez finalizado el paso anterior, se procedió a la evacuación de los residuos y a la extracción de las probetas, cabe recalcar que los residuos de este proceso poseen un alto poder corrosivo, por lo cual este procedimiento se realizó colocando los equipos dentro de la cámara o capilla de gases.

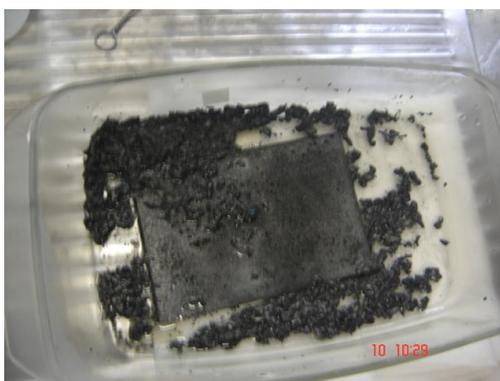


Figura 3.27: Fotografía de bandeja con Probeta decapada, antes de ser limpiada.

El siguiente procedimiento fue el lavado de las probetas, para la cual se usó agua, jabón y un cepillo de cerdas duras para restregar las mismas, hasta lograr extraer el óxido por completo, de las probetas ya corroídas.

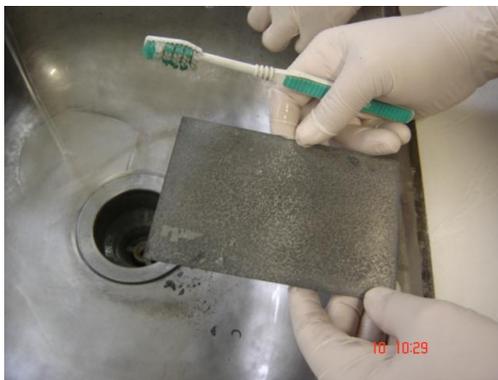


Figura 3.28: Proceso de limpieza de probetas.

En la siguiente imagen se puede observar el acabado superficial de las probetas, de acero, posterior al proceso de limpieza por decapado y secado de la misma.

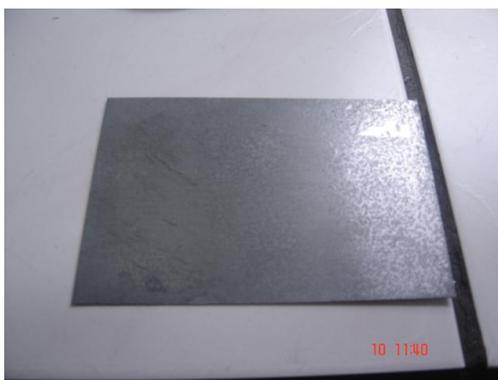


Figura 3.29: Fotografía de probeta decapada

### Probetas de Zinc (Tipo F):

Para el decapado químico de las probetas de zinc (recubierto con zinc) se aplicó el procedimiento C.9.2 que se encuentra en la tabla 2.7 de este documento, tal y como se muestra en dicho procedimiento, la preparación de la solución para este decapado consiste en la mezcla de 100 g cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y agua destilada hasta completar los 1000 ml, para posteriormente llevar esta solución hasta una temperatura que se debe mantener cercana a los  $70^\circ\text{C}$  por 5 min, tal y como se indica en dicho procedimiento.

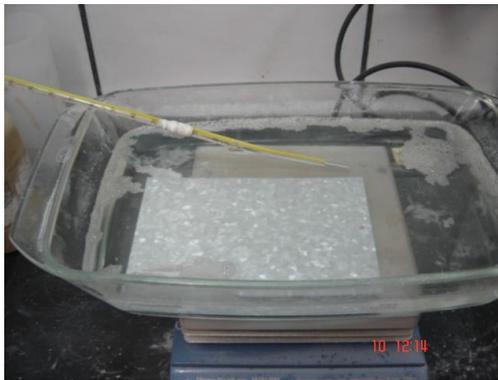


Figura 3.30: Probeta de zinc en solución para decapado

A continuación se puede observar el acabado superficial que presentaron las probetas, de zinc, posterior al proceso de limpieza por decapado y secado de la misma.



Figura 3.31: Fotografía de probeta decapada

## Resultados del análisis de pérdida de masa por oxidación en las probetas tipo E y F de las estaciones de Orotina y Caldera.

A continuación se muestran tabulados los resultados de la medición de la corrosión a partir de la aplicación del procedimiento para la determinación de la corrosión por pérdida de masa, a continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de los análisis de las estaciones de Orotina Y Caldera respectivamente.

### Resultados de estación Orotina

Estación	Código	Exposición (semanas)	Masa (g)			Masa perdida (g/m <sup>2</sup> )	Corrosión (mm/año)
			Original	Final	Perdida		
Orotina							
	O.E1.1	4	45,845	45,076	0,769	25,633	0,0198
	O.E1.2	4	47,950	47,174	0,776	25,867	0,0200
	O.E1.3	4	47,047	46,296	0,751	25,033	0,0194
<b>Promedio</b>	<b>O.E1</b>	<b>4</b>	<b>46,947</b>	<b>46,182</b>	<b>0,765</b>	<b>25,511</b>	<b>0,0197</b>
	O.F1.1	4	41,956	41,775	0,181	9,378	0,0051
	O.F1.2	4	40,970	40,792	0,178	7,911	0,0051
	O.F1.3	4	41,321	41,145	0,176	7,822	0,0050
<b>Promedio</b>	<b>O.F1</b>	<b>4</b>	<b>41,416</b>	<b>41,237</b>	<b>0,178</b>	<b>8,370</b>	<b>0,0051</b>

Tabla: 3.7: Resultados de medición de la corrosión, en estación de Orotina.

### Resultados de estación Caldera

Estación	Código	Exposición (semanas)	Masa (g)			Masa perdida (g/m <sup>2</sup> )	Corrosión (mm/año)
			Original	Final	Perdida		
Caldera							
	C.E1.1	4	47,191	46,402	0,789	26,300	0,0204
	C.E1.2	4	48,278	47,453	0,825	27,500	0,0213
	C.E1.3	4	47,764	46,967	0,797	26,567	0,0206
<b>Promedio</b>	<b>C.E1</b>	<b>4</b>	<b>47,744</b>	<b>46,941</b>	<b>0,804</b>	<b>26,789</b>	<b>0,0207</b>
	C.F1.1	4	41,537	41,316	0,221	7,367	0,0063
	C.F1.2	4	41,633	41,422	0,211	7,033	0,0060
	C.F1.3	4	41,540	41,318	0,222	7,400	0,0063
<b>Promedio</b>	<b>C.F1</b>	<b>4</b>	<b>41,570</b>	<b>41,352</b>	<b>0,218</b>	<b>7,267</b>	<b>0,0062</b>

Tabla:3.8: Resultados de medición de la corrosión, en estación de Caldera

Los resultados obtenidos para las probetas tipo A, B, C y D se pueden observar en el apéndice E.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### **ANÁLISIS DE ENSAYO DE EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN PAQUETES DE TUBO ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DE UN ADECUADO HE INADECUADO ALMACENAMIENTO**

Las formaciones de óxidos de hierro de forma sectorizada en los bordes de corte de los tubos (ver figura 3.1, punto 1) es una clara evidencia de que durante el periodo de exposición se contó con condiciones ambientales que aceleraron la oxidación de los mismos, a dichas condiciones hay que sumar que debido al proceso de corte transversal de los tubos, estos bordes no cuentan con ningún recubrimiento protector, por lo cual se podrían catalogar como normal la cantidad de corrosión encontrada en estos bordes de tubo tomando en cuenta las condiciones ambientales favorables para la corrosión que prevalecen en dicho medio.

En los bordes de corte también se encontraron acumulaciones de óxido blanco (óxido de zinc) esto se produce debido al esparcimiento dado por las aguas de fluviales que caen sobre el paquete y que posteriormente depositan el óxido de zinc desde las zonas cercanas a los bordes de corte. Las formaciones de corrosión blanca además se hicieron visibles en las caras internas del tubo intensificándose en los sectores más cercanos a los bordes de corte (ver figura 3.1, punto 2), la intensificación de la corrosión blanca en los sectores cercanos a estos bordes se debe a la mayor influencia de los factores climáticos, como la lluvia y incidencia del sol, he inclusive la depositación de sólidos en suspensión, como polvo y principalmente los residuos del disco de corte dejados después de la ejecución de dicho corte.

En el análisis realizado a las caras de los tubos que conformaban los sectores externos del paquete o de una forma más explícita, los que quedaban a la intemperie (ver figura 3.2), se encontró que la capa del pasivador a base de ácido crómico usada como pasivador del galvanizado ya se encontraba degradada, con algunas pequeñas excepciones en donde se podía observar una buena conservación del recubrimiento, esto lo podemos notar debido a la

perdida del brillo del galvanizado en los sectores afectados, y a las múltiples formaciones de capas de óxido blanco de poco espesor en la superficie de las caras del paquete de tubos.

La función de la capa del pasivador es la de crear una barrera que aisle el recubrimiento galvánico de las condiciones ambientales que favorecen su corrosión, esta capa es un tipo de barniz que no aporta ninguna coloración específica a la lamina, pero si provoca cierta opacidad en la misma.

Las líneas longitudinales presentes en los tubos (ver figura 3.2, punto 1), producto del efecto de fricción ejercido por los rodillos formadores del mismo son un posible punto de formación prematura de corrosión debido al daño que sufre la capa del revestimiento, sin embargo en los tubos analizados no se presentó ningún indicio de que la corrosión afectara aceleradamente o en demasía a los sectores con estas marcas restantes del proceso de formado.

En las figuras 3.3 y 3.4 se puede observar la formación de óxidos de zinc en la capa del galvanizado en forma de manchas, dicha formación evidencia que en esos sectores hubo un estancamiento de electrolito, que en este caso es el agua de origen fluvial y que cada mancha de corrosión que podemos observar corresponde al sitio donde se estableció un pequeño charco de electrolito, lo cual favoreció el rápido ataque corrosivo sobre el material por medio del mecanismo de corrosión por aireación diferencial, (mecanismo de corrosión que se explica claramente en la sección de marco teórico) la variación en el espesor de capa de óxido (corrosión irregular) que da formada a cada una de estas manchas, se debe principalmente a la depositación y estancamiento de las mismas por parte de las aguas fluviales caen sobre el paquete de tubos, y arrastran todos los óxidos desprendidos de la superficie.

Tal influencia queda demostrada en las figuras 3.3 y 3.4, en las que se puede notar que en los bordes de las denominadas manchas de corrosión el espesor de capa aumenta, esto debido a que durante el arrastre de los óxidos producido por las aguas fluviales. En la figura 3.3 (izquierda) se puede notar

formaciones de herrumbre en forma de picaduras debido a la perforación de la capa de galvanizado.

Las caras de los tubos nombradas como uno (1) y dos (2) (ver figuras 3.5 y 3.6) estuvieron en contacto directo durante todo el periodo de exposición, lo cual produjo formaciones de corrosión muy similares, de tal manera que al colocarlas juntas son una imagen casi a espejo una de la otra. Sin embargo no se puede asegurar que siempre que hayan caras de tubos en contacto como en este caso o láminas, las formaciones de corrosión serán tan similares como en este caso pues eso depende de varios factores como los son: la velocidad de corrosión de cada una de las caras, la separación entre ellas, y su posición ya sea vertical o horizontal.

La velocidad de corrosión entre las caras podría variar, ya sea por diferencia de materiales entre las caras en contacto, o porque alguna o ambas presentan discontinuidades o defectos en su recubrimiento, lo cual produciría que una se corroiera a una mayor velocidad, por otro lado la separación entre las caras debe ser la adecuada, ni tan cerca como para que el electrolito no pueda entrar ni tan distante como para que el electrolito no haga contacto de igual forma en ambas superficies.

La posición de las caras en contacto también es un factor a tomar en consideración puesto que la posibilidad de estancamiento del electrolito entre estas varía según si se encuentran de forma vertical o horizontal.

Un aspecto de gran importancia y que es posible notar en las figuras 3.4 y 3.5 es que la superficie de los cordones de soldadura metalizados, no presentan formaciones aceleradas de corrosión, y al contrario en la mayoría de los casos parece tener una mejor apariencia que el resto de la superficie de la cara del tubo, lo cual nos indica que el metalizado realizado a la soldadura posee las cualidades requeridas para resistir a estas condiciones de corrosividad.

En los casos que se produce un fuerte deterioro de la capa de galvanizado se generan formaciones de capas gruesas de corrosión blanca, tal y como se muestra en la figura 3.7 (punto 1). Las formaciones de óxidos pueden ser altamente higroscópicas, o sea que absorben la humedad del aire, y debido

a su porosidad permiten la penetración del oxígeno y el electrolito dentro de sus capas, produciendo una corrosión acelerada del metal, aunque ya no este presente el charco de electrolito el cual daba paso a la corrosión por aireación diferencial, solo algunas excepciones de óxidos como el del aluminio no presentan estas características.

La transformación en la coloración del cúmulo de óxidos de zinc de blanco a amarillenta, tal y como se muestra en la figura 3.7 (punto 1), es debido a las múltiples formaciones de herrumbre en forma de picadura que estas presentan, ya que los óxidos de hierro provenientes de estas picaduras se disuelven en el agua (electrolito) y se esparcen por toda la formación de corrosión blanca, dejando una tonalidad amarillenta tal y como se aprecia en dicha figura.

En los sectores periféricos al cúmulo amarillento de corrosión mencionado anteriormente, se puede observar una formación de óxidos blancos caracterizado anteriormente como del tipo manchado (ver figura 3.7, punto 2) los cuales ya fueron descritos anteriormente en esta sección.

En la figura 3.8 se puede observar, un combinado de efectos de la corrosión en el rollo de tubos, ya que en el sector denominado como punto 1 podemos ver la formación de un cúmulo de corrosión amarillento formada principalmente por óxidos de zinc y múltiples puntos de corrosión de hierro del tipo picadura, en los puntos 3 y 4 se denota una formación de corrosión leve en la capa del recubrimiento, y formaciones de corrosión del tipo manchado.

Sin embargo en la zona de la figura denominada como punto 2, podemos observar que la capa de galvanizado se encuentra en muy buenas condiciones, esto debido a que el electrolito no logró estancarse en esta zona seguramente debido a la falta de espacio libre entre las caras y a la falta de capilaridad del electrolito en este caso el agua de las lluvias o por algún gradiente en el nivel de esa superficie.

En el análisis de oxidación realizado al paquete # 3 (segundo paquete en analizar, perteneciente al segundo periodo de recolección) los resultados fueron muy similares a los obtenidos en el primer periodo de recolección de información, ya que la corrosión formada es causada por las mismas condiciones que en las anteriores, y tomando en cuenta que las primeras capas de óxidos funcionan como películas pasivadoras, es de esperar que el aumento en la corrosión formada no sea muy significativo, tal y como se puede observar en el registro fotográfico del segundo periodo de recolección de datos.

Siguiendo con el análisis de los resultados obtenidos en la segunda recolección, podemos notar en la figura 3.9, la presencia de óxidos de hierro en los bordes de corte junto con formaciones generalizadas de óxidos de zinc en las zonas internas de los tubos cercanas a los bordes de corte (ver punto 1), al igual que en lo encontrado en el paquete # 2 (paquete abierto en el primer periodo de recolección).

En la imagen número # 3.10 es posible percibir claramente que el pasivador a fallado totalmente y que las formaciones de óxidos de zinc se encuentran de forma generalizada (ver punto 2), además se pueden notar una tendencia al aumento de la corrosión en los vértices internos de los tubos (ver punto 1), tal y como se manifestó en los tubos del paquete abierto en el primer periodo de recolección, al igual en la figura 3.11 y 3.12 podemos ver formaciones generalizadas de corrosión y denotar en ambos casos focos de concentraciones de picaduras de la capa galvanizada y a consecuencia brotes de picaduras de herrumbre (ver punto 1, ambas figuras)

En el análisis de oxidación realizado al paquete # 4 (tercer paquete en analizar, perteneciente al tercer periodo de recolección) se presentaron formaciones de corrosión un tanto más pronunciadas, esto debido a que este paquete tuvo un periodo de exposición de cinco meses, al observar la figura 3.13 es notable que los bordes de corte se encuentran totalmente oxidados (ver punto 1), que hay presencia de corrosión blanca en las zonas internas del tubo cercanas a los bordes de corte y hasta donde es apreciable visualmente dentro del tubo, sumado a esto se puede notar que la superficie interna del cordón de soldadura en el tubo también se encuentra afectada por la corrosión, lo cual no había ocurrido en los tubos de los paquetes abiertos anteriormente.

En la figura 3.14 (ver punto 1) se puede observar la degradación total del pasivador y a su efecto la formación generalizada de óxidos de zinc sobre las caras del paquete de tubos, seguidamente en la figura 3.15 (ver punto 1) al igual que en las caras externas de los tubos de los sectores internos de los paquetes anteriores, podemos encontrar fuertes muestras de degradación de la capa galvanizada, lo cual al igual que en los casos anteriores a ocurrido principalmente por estancamiento de un electrolito, dando paso así a la oxidación por aireación diferencial, la cual posee una alta velocidad de degradación de los metales, dejando como muestra las ya antes denominadas machas de corrosión blanca y algunos sectores con picaduras de oxidación de hierro, de igual forma en la figura 3.16 se muestran dos caras de tubos que han sido afectadas fuertemente por la corrosión por aireación diferencial, tanto así que ya se notan múltiples picaduras en la capa galvanizada que dan paso a los óxidos de hierro, y estos a su vez se disuelven en los electrolitos (agua) dando así una coloración amarillenta-naranja a la capa de óxidos de zinc que se encuentre cercana a estas picaduras.

En el análisis de oxidación realizado al paquete # 1 (cuarto paquete en analizar, perteneciente al tercer periodo de recolección) el cual tuvo un tiempo de exposición de 5 meses, en condiciones consideradas apropiadas de almacenamiento, las cuales se mencionan en la sección de: condiciones de almacenamiento de los paquetes.

Las condiciones externas en que se encuentra el paquete #1 después de cinco meses de almacenamiento se pueden observar en la figura 3.17, en la que al contrario de los paquetes anteriores este no presenta ningún tipo de corrosión perceptible a simple vista, sino al contrario las caras de los tubos aun mantienen el brillo de galvanizado, lo cual nos indica que el recubrimiento pasivador a protegido de manera efectiva a la capa galvanizada, y que las condiciones de humedad relativa y temperatura (siendo la RH la mas importante de ellas) se encuentran en rango de apropiadas para el almacenamiento de aceros galvanizados.

Con las figuras 3.18 y 3.19 se puede terminar de comprobar que los efectos de la corrosión no se han hecho presentes aún en este paquete de tubos, ya que al igual que en la figura anterior se puede apreciar claramente que el galvanizado se encuentra intacto en todas las caras de todos los tubos, seguidamente en la figura 3.20 se puede observar que los bordes de corte se encuentran libres de corrosión alguna, a pesar de que como se puede observar se encuentran rodeados de polvos producto de la degradación del disco de corte y del material mismo, durante la ejecución de dicho proceso de corte.

En forma general se puede denotar según lo explicado en a sección de marco teórico, que las formas de corrosión encontradas son corrosión húmeda, corrosión por mojado y por aireación diferencial, debido a la clara evidencia del estancamiento del electrolito y tomando en consideración las condiciones ambientales de exposición.

En la tabla 3.1 se encuentran registrados los valores promedios medidos y un valor promedio final del espesor de la capa de galvanizado en los tubos para el ensayo, dicho valor promedio final es de 14.22  $\mu\text{m}$  el cual es mayor al valor mínimo requerido, el cual se muestra en la tabla 1. *Requerimientos mínimos para galvanizados según norma ASTM A653*. Con base a estos podemos concluir que los daños por corrosión encontrados en los tubos de los paquetes #2, #3 y #4 No han sido ocasionados por deficiencias en la capa galvánica, sino por las condiciones ambientales y demás factores externos no aptos para el almacenamiento de paquetes de tubos galvanizados ni ningún otro material que pueda oxidarse.

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS DE RESULTADOS DE ESTACIONES DE MONITOREO Y CONTROL DE LA CORROSIÓN.**

En el análisis de la composición química de la aleación en base zinc, utilizada para el recubrimiento metálico de las láminas y tuberías, se determinó que ambas composiciones se encuentran dentro de los parámetros, tanto es así para la aleación utilizada por la empresa TUBOTICO. SA para el recubrimiento galvanizado por inmersión de tubería, como para la aleación utilizada por la empresa GALVATICA en su sistema en línea de galvanizado de lámina, ya que ambos casos la aleación debe tener una composición química, con la presencia de 99.7 % de zinc, cabe recalcar que la principal variación en las composiciones de estas dos aleaciones está en su contenido de Aluminio y plomo, ya que la aleación utilizada para el recubierto de la tuberías requiere un nivel levemente superior de plomo y a su vez un contenido levemente inferior de Aluminio con el fin de mejorar la adherencia de la capa galvanizada a la superficie metálica, en el caso contrario la aleación utilizada para el recubierto de lámina en línea, por su moderno diseño y eficiente sistema de limpieza y preparación de la lámina para la el recubrimiento requiere un menor contenido de plomo en su composición y a su vez una mayor cantidad de Aluminio, los datos de estos análisis de composición química se encuentran detallados en las tablas 3.2 y 3.3 de la sección de resultados obtenidos.

Para la selección de los puntos de ubicación de las estaciones de monitoreo de la corrosión es importante conocer las características climatológicas, a las que se desea someter las probetas, y más aún importante tener claro cuales son las condiciones climáticas que se desean evaluar, para que a partir del estudio de estas, se obtengan datos útiles para los diferentes interesados, en el caso de este proyecto, las estaciones fueron montadas en cuatro puntos estratégicos, la primera de ellas es la estación Orotina, la cual se ubica dentro de los terrenos del complejo industrial José Pujol Martí, el cual fue instalado en este lugar por encontrarse en el sitio de coordinación del proyecto, desde donde se podría dar una constante vigilancia al proceso de degradación

de las probetas, otro factor importante en la toma de decisión de la ubicación de esta estación, fue el interés de evaluar la corrosión en las condiciones ambientales del pacífico central, las cuales se denotan en la tabla 3.4 ubicada en la sección de resultados obtenidos, para el montaje de la estación cadera el principal factor a evaluar es la influencia de las brisas marinas, más que las condiciones climáticas de la región, ya que estas son las mismas que se presentan en la estación de orotina, los factores de evaluación de la estación de colima de Tibás, son los efectos de las condiciones climáticas propias del lugar y el efecto de la contaminación ambiental sobre la corrosión, ya que en el valle central se registran los mayores índices de contaminación, al igual que en el caso de la estación Orotina, con la estación Pérez Zeledón, se pretende analizar el efecto de las condiciones ambientales propias del lugar sobre la corrosión, es importante mencionar que todas las estaciones se encuentran dentro de propiedades del grupo Pujol Martí, lo cual es un factor importante para la toma de decisión sobre la ubicación de las mismas.

Durante los meses de octubre y noviembre, se procedió a la medición del grado de acidez o basicidad (PH), de las aguas de lluvia en la estación Orotina, de las cuales se obtuvo un dato promedio de 5.9 (Ver tabla 3.6), el cual es un dato que se encuentra ubicada dentro de los parámetros normales para este tipo de aguas, por otra parte el promedio de conductividad arrojó un dato de 8.7  $\mu\text{s}$ , lo cual es un valor un poco alto, esto refleja que el agua posee un moderadamente alto contenido de iones.

Con base en los análisis anteriores y en el análisis de resultados de las recolecciones de las probetas de las estaciones Orotina y Caldera (Ver tabla 3.7 y 3.8 en sección de resultados obtenidos) se puede confirmar con certeza que los valores obtenidos, poseen una baja variabilidad, lo cual refleja la constancia en las condiciones a las cuales han sido sometidas durante el periodo de exposición al ambiente, además de una buena práctica en el proceso de limpieza por decapado químico, del análisis de los valores promedio de las

muestras es importante denotar una leve tendencia a una mayor oxidación en las probetas de acero y zinc expuestas en la estación de Puerto Caldera, esto debido a que las condiciones marinas ocasionan una alta concentración de sales en el ambiente, las cuales se depositan sobre las probetas, las cuales al ser humedecidas por el rocío de la noche, lluvia o por simple efecto de la humedad relativa en el ambiente, se produce la disolución de estas sales, generando así una sustancia de una muy alta conductividad eléctrica y un alto poder de disolución de los metales, a partir de los datos obtenidos de la velocidad de corrosión en mm/año, se puede notar que esta ha sido muy acelerada, sin embargo hay que tomar en cuenta que las probetas, han sido colocadas sin ninguna protección y por ende estas tendrán una tendencia a una oxidación rápida, sin embargo la formación rápida de esta capa de óxido provoca un efecto inverso el cual aísla el metal del contacto con el ambiente, de esta forma colaborando con la pasivación del metal, y de esta forma produciendo que la velocidad de corrosión disminuya considerablemente.

Por medio de la comparación de las velocidades de corrosión de las probetas de acero y las de zinc, se comprobó la mucho mayor resistencia a la corrosión de las probetas de zinc, la cual según estos resultados promedio de cada grupo de probetas, es de casi cuatro veces mayor, lo cual nos indica que el beneficio de uso de este tipo de recubrimientos es realmente importante para la preservación de estas estructuras a través del tiempo.

Al realizar la categorización de las atmósferas respectivas a las zonas de ubicación de las zonas analizadas, las cuales fueron únicamente la estación Orotina y caldera, resultados que muestran en la tabla 3.7 y 3.8 de este documento, se determina por medio de la tabla 1.3 (Categorías de corrosividad de un ambiente) que tanto en la zona de caldera como en la zona de Orotina la categorización de la corrosividad del ambiente es muy similar, ya que en la estación Orotina el promedio de corrosividad obtenido para las probetas de acero es 0.0197 mm/año y de 0.0051 mm/año para las probetas de zinc, resultado muy similar al obtenido en la estación de Caderal, en la cual el promedio de corrosividad para las probetas de acero fue de 0.0207 mm/año y de

0.0062 mm/año, lo cual según la tabla 1.2 (Categorías de corrosividad de la atmósfera), la corrosividad en probetas de acero en ambos casos se encuentra en el rango de 1.3-25 micrómetros/año, lo cual caracteriza el ambiente en esta tabla como C2, lo cual corresponde según esta tabla a un ambiente de corrosividad baja, por otro parte el análisis y caracterización de las probetas de Zinc para ambas estaciones arrojan un promedio de corrosividad entre el rango de 4.2-8.4 micrómetros/año, lo cual lo caracteriza como un C5, lo cual a su vez lo caracteriza como un ambiente de muy alta corrosividad para este tipo de metal.

## **CAPITULO IV**

### **CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE CORROSIÓN**

- Diseño de las estructuras para la exposición de las probetas de ensayo está diseñada de acuerdo a la norma, ASTM G50.  
*Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals1*
- Las estaciones de monitoreo fueron instaladas siguiendo los intereses de investigación de la empresa, en las zonas de Caldera, Orotina, tibás y Pérez Zeledón.
- Se confeccionaron hojas de cálculo mediante el uso de la herramienta de Microsoft Excel para el cálculo de la corrosividad para todas las estaciones de ensayo, y cada uno de los periodos de recolección.
- El PH promedio de la lluvia en la zona de la Ceiba de Orotina es de 5.9 y promedio anual de precipitación anual en todas las estaciones sobrepasa los 1400 mm.
- La humedad relativa en las zonas de ubicación de las estaciones sobrepasa el 70% en época húmeda y el 60% en época seca, por lo cual se considera que todas las estaciones están localizadas en sitios donde se esperan velocidades de corrosión altas.
- El formato para la recolección de datos está establecido de acuerdo a los requerimientos de la norma ISO 9223 para realizar los reportes de los resultados de corrosividad.
- Se comprueba que el zinc posee una velocidad de corrosión mucho menor a la de acero.

- El Ambiente en la zona de caldera y Orotina se caracteriza como de muy alta corrosividad para el zinc.
- El Ambiente en la zona de caldera y Orotina se caracteriza como de baja corrosividad para el acero.
- El galvanizado que poseían los tubos analizados sobrepasan los requerimientos mínimos para galvanizados según norma ASTM A653, para un galvanizado grado G-60.
- Se corroboró que la formación de herrumbre en forma de picaduras en los aceros galvanizados son producidas por la perforación de la capa de galvanizado.
- Las formaciones de herrumbre en forma de picaduras se formaran en los puntos más débiles (menor espesor, o presencia de algún defecto) del galvanizado.
- Se comprobó que los óxidos del hierro y zinc que son arrastrados por los fluidos (en este caso la lluvia) y depositados en otras zonas, podrían provocar corrosión en el sitio de depositación.
- El mecanismo de corrosión por aireación diferencial es el causante de la fuerte corrosión encontrada entre las caras externas de los tubos dentro de los paquetes.

**RECOMENDACIONES A PARTIR LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN PAQUETES DE TUBO ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DE UN ADECUADO HE INADECUADO ALMACENAMIENTO:**

- Es recomendable almacenar los paquetes de tubos, perfiles, y demás productos de acero estructural o acero galvanizado, en lugares donde No se depositen sólidos higroscópicos como el polvo u óxidos metálicos sobre su superficie, que podrían generar un proceso de corrosión acelerada.
- Se recomienda almacenar los paquetes de tubos, perfiles, y demás productos de acero estructural o acero galvanizado, en lugares techados y en condiciones de humedad relativa menores a un 70 %
- Es recomendable en el caso de tener que almacenar varios paquetes, colocar espaciadores entre ellos con el fin de permitir la entrada de luz y el aire y así mantener equilibradas las condiciones dentro y fuera del cúmulo de paquetes de tubos u otros metales en almacenamiento.
- Se recomienda en caso de que un paquete de tubos sea expuesto a la lluvia (una exposición), que abra el paquete, seque cada una de las unidades, y sea almacenado en un lugar con las condiciones apropiadas de almacenamiento, lo antes posible.

## **RECOMENDACIONES A PARTIR LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA:**

- Las estructuras metálicas deben ser mayormente protegidas de la corrosión en las zonas costeras, debido al alto poder corrosivo de las brisas marinas.
- Las estructuras metálicas protegidas con recubrimientos de zinc son más resistentes a los efectos de la corrosión, que las estructuras de acero desnudo. con base en esto se recomienda el uso de este tipo de materiales principalmente en zonas costeras o zonas que poseen una alta humedad relativa.
- Para la identificación adecuada de las muestras en el panel de exposición se recomienda además de la identificación de la probeta, la identificación del sitio donde se debe ubicar.

## BIBLIOGRAFÍA

Blanca Rosales. Mapas de Corrosividad Atmosférica de Argentina. CITEFA. Argentina. 1995

H. Uhlig. Corrosión y Control de corrosión, Urmo, España, 1979

La expresión "humedad relativa del aire"  
[www.hidromet.com.pa/humedad\\_relativa.html](http://www.hidromet.com.pa/humedad_relativa.html)

M. Elisabete, M. Almeida e G. Ferreira. Corrosão Atmosférica. MAIA. Lisboa, Portugal. 1998.

M. Morcillo, E. Almeida. Corrosión y Protección de Metales en las  
Atmósferas de Iberoamerica. ISBN 1<sup>0</sup>. Madrid, España. 1999.

M. Morcillo y S. Feliu. Mapas de España de Corrosividad Atmosférica. Salve. Madrid España. 1993.

### **Normas Utilizadas**

ASTM A36- Standard Specification for Carbon Structural Steel-  
ASTM G1- Preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens-  
ASTM G 92- Characterization of Atmospheric Test Sites-  
ASTM G50- Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion  
Tests on Metals-

## APENDICE A:

Ficha técnica de pinturas utilizadas sobre las láminas galvanizadas, de uso en techos.

# BECKER INDUSTRIAL COATINGS, INC.

PRODUCT: **Commodity Primer**  
CODE: **495-978**

### 1.0 GENERAL

1.1 Description **Yellow Primer**  
1.2 Uses **Primer**  
1.3 Containers Drums: 50 U.S. Gallons

1.4 Shelf Life All properties of the wet paint are expected to remain within the specified ranges for a 6 month storage period.

### 2.0 TECHNICAL INFORMATION

#### 2.1 Physical Characteristics of the Wet Paint.

Weight per U.S. Gallon	10.1 ± 0.3 lbs
Weight per Imperial Gallon	12.1 ± 0.3 lbs
Non-volatile by Weight	58.9 ± 2%
by Volume	46.8 ± 2%
Shipping Viscosity	21 - 25 #4 Zahn @ 25 °C

#### 2.2 Application and Physical Characteristics of the Dry Film

Reduction	Use Solvesso 150.
Substrate	HDG
Application	Lab: # 12 DD Bar
Dry Film Thickness	0.2 - 0.3 mils
PMT Range (°F)	435 - 480
Gloss @ 60°	20-30
Pencil Hardness	H+
MEK Resistance	20+ Double Rubs
Notes	Meet Appropriate Top Coat Specifications

Rev. (11/2003)

# BECKER INDUSTRIAL COATINGS, INC.

PRODUCT: BRICK RED BACKER

CODE 495-938

## 1.0 GENERAL

### 1.1 Description

1.2 Uses BACK COATING

1.3 Containers Drums: 180 Liters (48 U.S. Gallons)

1.4 Shelf Life All properties of the wet paint are expected to remain within the specified ranges for a 6 month storage period.

## 2.0 TECHNICAL INFORMATION

### 2.1 Physical Characteristics of the Wet Paint.

Density	1.23 g/ml
Non-volatile by Weight	66.0 %
by Volume	54.5 %
Shipping Viscosity	22-28 sec. Zahn #4

### 2.2 Application and Physical Characteristics of the Dry Film

Application	Lab: # 12 DD Bar
Film Thickness	0.20-0.30
Cure Schedule	PMT 420°F
Primer	495-980
Substrate	HDG
Gloss @ 60°	10-30
Pencil Hardness	H+
MEK Resistance	50+ Double Rubs
T-Bend	3T no tape removal

July 12 2004



# BECKER INDUSTRIAL COATINGS, INC.

PRODUCT: DELTA WHITE

CODE 512-146

## 1.0 GENERAL

### 1.1 Description

1.2 Uses Exterior

1.3 Containers Drums: 180 Liters (48 U.S. Gallons)

1.4 Shelf Life All properties of the wet paint are expected to remain within the specified ranges for a 6 month storage period.

## 2.0 TECHNICAL INFORMATION

### 2.1 Physical Characteristics of the Wet Paint.

Density	1.36 g/ml
Non-volatile by Weight	67.8 %
by Volume	52.4 %
Shipping Viscosity	22-27 sec. Zahn #4

### 2.2 Application and Physical Characteristics of the Dry Film

<b>PRIMER:</b>	
CODE	495-980
Application	Lab: #10 DD Bar
Film Build	0.2 - 0.3 mil
Cure Schedule	435 - 490 PMT
<b>TOP COAT</b>	
Application	Lab: #25 DD Bar
Film Thickness	0.6 - 0.70 mil
Cure Schedule	PMT 440 - 465°F
Substrate	HDG
Gloss @ 60°	15-25
Pencil Hardness	H +
MEK Resistance	50+ Double Rubs
Reverse Impact	60" lbs No Tape Removal
T-Bend	2T No Tape Removal

# BECKER INDUSTRIAL COATINGS, INC.

PRODUCT: DELTA RED

CODE 512-091

## 1.0 GENERAL

### 1.1 Description

1.2 Uses Exterior

1.3 Containers Drums: 180 Liters (48 U.S. Gallons)

1.4 Shelf Life All properties of the wet paint are expected to remain within the specified ranges for a 6 month storage period.

## 2.0 TECHNICAL INFORMATION

### 2.1 Physical Characteristics of the Wet Paint.

Weight per U.S. Gallon	10.17 lbs/gal.
Weight per Imperial Gallon	12.21 lbs/gal.
Non-volatile by Weight	63.5 %
by Volume	52.5 %
Shipping Viscosity	22-28 sec. Zahn #4

### 2.2 Application and Physical Characteristics of the Dry Film

Application	Lab: # 25 DD Bar
Film Thickness	0.60-0.70
Cure Schedule	PMT 430°F
Primer	Customer
Substrate	HDG
Gloss @ 60°	15-25
Pencil Hardness	H-2H
MEK Resistance	50+ Double Rubs
T-Bend	2T no tape removal

## APÉNDICE B:

Ficha Técnica de Aceros, utilizados para la manufacturación de los tubos y láminas galvanizadas en Tubotico y Galvatica, respectivamente.

 <b>TUBOTICO</b> <i>Control de Calidad</i>	<b>Análisis químico externo de Materia Prima</b>	<b>Orient Saori 62</b>
--	--	----------------------------

Tipo de análisis:     Químico     Metalográfico      
otros \_\_\_\_\_

### Información de la muestra

*Código de la muestra: A*

*Materia Prima: Bobina de acero laminada en frío (EN 10111)*

*Numero de bobina de obtención de la muestra (materia prima): 24884*

*Norma de material: JIS G 3132 SPHT-2*

*Dimensiones: 1.50 mm \* 1145 mm*

*Geometría de la muestra: 10cm \* 20cm*

*Proveedor: STEEL – LINK B-V.*

*Molino: CORUS STAAL B.V.*

*País de Origen: HOLANDA*

*Buque: ORIENT SAORI*

*Fecha de arribo: 25 de octubre del 2006*

### Muestra A

*Material Recibido: 398 rollos – 3457 TM*

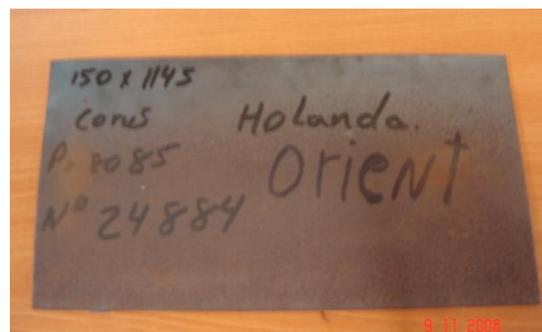
*Otras observaciones:*

*Las probetas fueron tomadas de una bobina escogida de forma aleatoria.*

RESPONSABLE

*Control de Calidad*

*GALVATICA – TUBOTICO*





**TUBOTICO**

*Control de Calidad*

**Análisis químico externo de  
Materia Prima**

**Centauros  
61**

Tipo de análisis:     Químico     Metalográfico      
otros \_\_\_\_\_

**Información de la muestra**

*Código de la muestra:* **B**

*Materia Prima:* Bobina de acero laminado en caliente

*Numero de bobina de obtención de la muestra (materia prima):* 23964

*Norma de material:* N/A (SAE 1008)

*Dimensiones:* 2.37mm \* 120cm.

*Geometría de la muestra:* 10cm \* 20cm

*Proveedor:* DUFERCO

*Molino:* MMK

*Despachador:* N/A

*País de Origen:* RUSIA

*Buque:* CENTAURUS

**Muestra B**

*Puerto de arribo:* Puerto Caldera

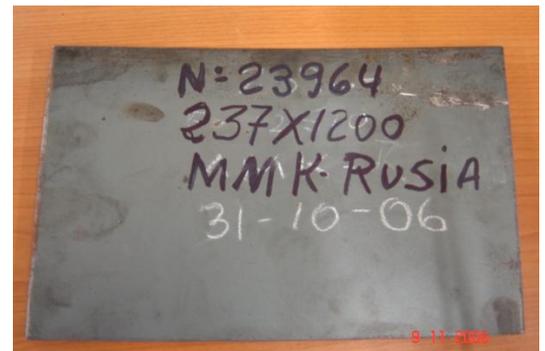
*Fecha de arribo:* 15 de octubre del 2006

*Material Recibido:* 436 Rollos 500TM

RESPONSABLE

*Control de Calidad*

GALVATICA – TUBOTICO





**TUBOTICO**

Control de Calidad

## Análisis químico externo de Materia Prima

**Yichangai  
57**

Tipo de análisis:  Químico  Metalográfico   
otros \_\_\_\_\_

### Información de la muestra

Código de la muestra: **C**

Materia Prima: Bobina de acero laminado en frío

Numero de bobina de obtención de la muestra (materia prima): 23230

Norma de material: JIS G 3141 SPCC-SD

Geometría de la lámina: 1.20mm \* 1.22m

Dimensiones: 10cm \* 20cm

Proveedor: HYSCO

Molino: HYUNDAI

Despachador: N/A

País de Origen: JAPON

Buque: YICHANGHAI

Puerto de arribo: Caldera

Fecha de arribo: 18 de septiembre

Material Recibido: 174 Rollos – 1366.8TM

Otras observaciones:

RESPONSABLE

Control de Calidad

GALVATICA – TUBOTICO

Muestra C



## APÉNDICE C.

Resultados de la mediciones iniciales a las de las probetas tipo E y F

<b>Tabla 1</b> Datos de la PRIMERA recolección de probetas de control de corrosión.							
<b>Estación</b>	<b>Código</b>	<b>Exposición (semanas)</b>	<b>Masa (g)</b>			<b>Masa perdida (mg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>corrosión (mm/año)</b>
			<b>Original</b>	<b>Final</b>	<b>Perdida</b>		
Caldera	C.E1.1	4	47,191	46,402	0,789	26,300	0,0204
	C.E1.2	4	48,278	47,453	0,825	27,500	0,0213
	C.E1.3	4	47,764	46,967	0,797	26,567	0,0206
	C.F1.1	4	41,537	41,316	0,221	7,367	0,0063
	C.F1.2	4	41,633	41,422	0,211	7,033	0,0060
	C.F1.3	4	41,540	41,318	0,222	7,400	0,0063
Fecha inicio	<u>22/12/2006</u>	Fecha recolección		<u>23/01/2007</u>			
Orotina	O.E1.1	4	45,845	45,076	0,769	25,633	0,0198
	O.E1.2	4	47,950	47,174	0,776	25,867	0,0200
	O.E1.3	4	47,047	46,296	0,751	25,033	0,0194
	O.F1.1	4	41,956	41,775	0,181	9,378	0,0051
	O.F1.2	4	40,970	40,792	0,178	7,911	0,0051
	O.F1.3	4	41,321	41,145	0,176	7,822	0,0050
Fecha inicio	<u>29/11/2006</u>	Fecha recolección		<u>27/01/2007</u>			
Tibás	T.E1.1	4	46.533				
	T.E1.2	4	47.325				
	T.E1.3	4	47.502				
	T.F1.1	4	41.471				
	T.F1.2	4	42.944				
	T.F1.3	4	41.932				
Fecha inicio	<u>20/12/2006</u>	Fecha recolección		_____			
Perez Zeledón	L.E1.1	4	46.410				
	L.E1.2	4	46.438				
	L.E1.3	4	46.969				
	L.F1.1	4	41.962				
	L.F1.2	4	41.378				
	L.F1.3	4	41.227				
Fecha inicio	<u>25/03/2007</u>	Fecha recolección		_____			

<b>Tabla 2</b> Datos de la SEGUNDA recolección de probetas de control de corrosión.							
<u>Estación</u>	<u>Código</u>	<u>Exposición</u> (semanas)	<u>Masa (g)</u>			<u>Masa perdida</u> (mg/m <sup>2</sup> )	<u>corrosión</u> (mm/año)
			<u>Original</u>	<u>Final</u>	<u>Perdida</u>		
Caldera	C.E2.1	12	46.211				
	C.E2.2	12	46.479				
	C.E2.3	12	47.909				
	C.F2.1	12	42.209				
	C.F2.2	12	41.793				
	C.F2.3	12	41.321				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Orotina	O.E2.1	12	46.910				
	O.E2.2	12	47.355				
	O.E2.3	12	48.735				
	O.F2.1	12	41.187				
	O.F2.2	12	41.238				
	O.F2.3	12	41.412				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Tibás	T.E2.1	12	47.788				
	T.E2.2	12	48.078				
	T.E2.3	12	47.026				
	T.F2.1	12	41.868				
	T.F2.2	12	41.308				
	T.F2.3	12	42.228				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Limón	L.E2.1	12	47.530				
	L.E2.2	12	47.876				
	L.E2.3	12	47.447				
	L.F2.1	12	42.918				
	L.F2.2	12	42.077				
	L.F2.3	12	41.750				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					

**Tabla 3** Datos de la TERCERA recolección de probetas de control de corrosión.

<u>Estación</u>	<u>Código</u>	<u>Exposición</u> <u>(semanas)</u>	<u>Masa (g)</u>			<u>Masa perdida</u> <u>(mg/m<sup>2</sup>)</u>	<u>corrosión</u> <u>(mm/año)</u>
			<u>Original</u>	<u>Final</u>	<u>Perdida</u>		
Caldera	C.E3.1	24	46.532				
	C.E3.2	24	48.175				
	C.E3.3	24	47.939				
	C.F3.1	24	41.917				
	C.F3.2	24	41.456				
	C.F3.3	24	40.118				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Orotina	O.E3.1	24	47.972				
	O.E3.2	24	45.336				
	O.E3.3	24	47.738				
	O.F3.1	24	41.310				
	O.F3.2	24	40.840				
	O.F3.3	24	41.020				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Tibás	T.E3.1	24	47.820				
	T.E3.2	24	45.100				
	T.E3.3	24	47.982				
	T.F3.1	24	42.264				
	T.F3.2	24	41.670				
	T.F3.3	24	39.943				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Limón	L.E3.1	24	46.017				
	L.E3.2	24	47.586				
	L.E3.3	24	46.299				
	L.F3.1	24	42.050				
	L.F3.2	24	42.848				
	L.F3.3	24	41.733				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					

<b>Tabla 4</b> Datos de la CUARTA recolección de probetas de control de corrosión.							
<u>Estación</u>	<u>Código</u>	<u>Exposición</u> <u>(semanas)</u>	<u>Masa (g)</u>			<u>Masa perdida</u> <u>(mg/m<sup>2</sup>)</u>	<u>corrosión</u> <u>(mm/año)</u>
			<u>Original</u>	<u>Final</u>	<u>Perdida</u>		
Caldera	C.E4.1	36	47.818				
	C.E4.2	36	46.047				
	C.E4.3	36	47.410				
	C.F4.1	36	41.911				
	C.F4.2	36	41.230				
	C.F4.3	36	40.658				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Orotina	O.E4.1	36	48.718				
	O.E4.2	36	48.791				
	O.E4.3	36	47.603				
	O.F4.1	36	41.854				
	O.F4.2	36	41.227				
	O.F4.3	36	41.226				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Tibás	T.E4.1	36	49.057				
	T.E4.2	36	47.581				
	T.E4.3	36	47.012				
	T.F4.1	36	40.098				
	T.F4.2	36	40.635				
	T.F4.3	36	40.845				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Limón	L.E4.1	36	46.818				
	L.E4.2	36	47.178				
	L.E4.3	36	47.267				
	L.F4.1	36	41.780				
	L.F4.2	36	42.774				
	L.F4.3	36	42.173				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					

**Tabla 5** Datos de la QUINTA recolección de probetas de control de corrosión.

<u>Estación</u>	<u>Código</u>	<u>Exposición</u> <u>(AÑOS)</u>	<u>Masa (g)</u>			<u>Masa perdida</u> <u>(mg/m<sup>2</sup>)</u>	<u>corrosión</u> <u>(mm/año)</u>
			<u>Original</u>	<u>Final</u>	<u>Perdida</u>		
Caldera	C.E5.1	1	48.138				
	C.E5.2	1	48.447				
	C.E5.3	1	48.035				
	C.F5.1	1	41.451				
	C.F5.2	1	40.837				
	C.F5.3	1	41.668				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Orotina	O.E5.1	1	48.138				
	O.E5.2	1	48.447				
	O.E5.3	1	48.035				
	O.F5.1	1	41.136				
	O.F5.2	1	41.224				
	O.F5.3	1	41.189				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Tibás	T.E5.1	1	48.865				
	T.E5.2	1	47.945				
	T.E5.3	1	46.427				
	T.F5.1	1	40.858				
	T.F5.2	1	40.959				
	T.F5.3	1	41.112				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					
Limón	L.E5.1	1	48.103				
	L.E5.2	1	47.526				
	L.E5.3	1	47.611				
	L.F5.1	1	42.218				
	L.F5.2	1	42.253				
	L.F5.3	1	41.636				
Fecha inicio _____		Fecha recolección _____					

## APÉNDICE D:

Mapas de recolección de Muestras de las diferentes estaciones

### ESTACIÓN UBICA EN COMPLEJO INDUSTRIAL EN LA CEIBA OROTINA

ETAPA DE RECOLECCIÓN	CÓDIGO DE LA MUESTRA							
	1	O.A1.1	O.A1.2	O.B1.1	O.B1.2	O.C1.1	O.C1.2	O.D1.1
2	O.A2.1	O.A2.2	O.B2.1	O.B2.2	O.C2.1	O.C2.2	O.D2.1	O.D2.2
3	O.A3.1	O.A3.2	O.B3.1	O.B3.2	O.C3.1	O.C3.2	O.D3.1	O.D3.2
4	O.A4.1	O.A4.2	O.B4.1	O.B4.2	O.C4.1	O.C4.2	O.D4.1	O.D4.2
5	O.A5.1	O.A5.2	O.B5.1	O.B5.2	O.C5.1	O.C5.2	O.D5.1	O.D5.2
6	O.A6.1	O.A6.2	O.B6.1	O.B6.2	O.C6.1	O.C6.2	O.D6.1	O.D6.2
7	O.A7.1	O.A7.2	O.B7.1	O.B7.2	O.C7.1	O.C7.2	O.D7.1	O.D7.2
8	O.A8.1	O.A8.2	O.B8.1	O.B8.2	O.C8.1	O.C8.2	O.D8.1	O.D8.2
9	O.A9.1	O.A9.2	O.B9.1	O.B9.2	O.C9.1	O.C9.2	O.D9.1	O.D9.2

Tabla 1: periodos de recolección para cada una de las probetas de la estación la Ceiba según su codificación.

### ESTACIÓN UBICA EN CALDERA

ETAPA DE RECOLECCIÓN	CÓDIGO DE LA MUESTRA							
	1	C.A1.1	C.A1.2	C.B1.1	C.B1.2	C.C1.1	C.C1.2	C.D1.1
2	C.A2.1	C.A2.2	C.B2.1	C.B2.2	C.C2.1	C.C2.2	C.D2.1	C.D2.2
3	C.A3.1	C.A3.2	C.B3.1	C.B3.2	C.C3.1	C.C3.2	C.D3.1	C.D3.2
4	C.A4.1	C.A4.2	C.B4.1	C.B4.2	C.C4.1	C.C4.2	C.D4.1	C.D4.2
5	C.A5.1	C.A5.2	C.B5.1	C.B5.2	C.C5.1	O.C5.2	C.D5.1	C.D5.2
6	C.A6.1	C.A6.2	C.B6.1	C.B6.2	C.C6.1	C.C6.2	C.D6.1	C.D6.2
7	C.A7.1	C.A7.2	C.B7.1	C.B7.2	C.C7.1	C.C7.2	C.D7.1	C.D7.2
8	C.A8.1	C.A8.2	C.B8.1	C.B8.2	C.C8.1	C.C8.2	C.D8.1	C.D8.2
9	C.A9.1	C.A9.2	C.B9.1	C.B9.2	C.C9.1	C.C9.2	C.D9.1	C.D9.2

Tabla 2: periodos de recolección para cada una de las probetas de la estación Caldera según su codificación.

**ESTACIÓN UBICA EN TIBÁS**

ETAPA DE RECOLECCIÓN	CÓDIGO DE LA MUESTRA							
	T.A1.1	T.A1.2	T.B1.1	T.B1.2	T.C1.1	T.C1.2	T.D1.1	T.D1.2
1	T.A1.1	T.A1.2	T.B1.1	T.B1.2	T.C1.1	T.C1.2	T.D1.1	T.D1.2
2	T.A2.1	T.A2.2	T.B2.1	T.B2.2	T.C2.1	T.C2.2	T.D2.1	T.D2.2
3	T.A3.1	T.A3.2	T.B3.1	T.B3.2	T.C3.1	T.C3.2	T.D3.1	T.D3.2
4	T.A4.1	T.A4.2	T.B4.1	T.B4.2	T.C4.1	T.C4.2	T.D4.1	T.D4.2
5	T.A5.1	T.A5.2	T.B5.1	T.B5.2	T.C5.1	T.C5.2	T.D5.1	T.D5.2
6	T.A6.1	T.A6.2	T.B6.1	T.B6.2	T.C6.1	T.C6.2	T.D6.1	T.D6.2
7	T.A7.1	T.A7.2	T.B7.1	T.B7.2	T.C7.1	T.C7.2	T.D7.1	T.D7.2
8	T.A8.1	T.A8.2	T.B8.1	T.B8.2	T.C8.1	T.C8.2	T.D8.1	T.D8.2
9	T.A9.1	T.A9.2	T.B9.1	T.B9.2	T.C9.1	T.C9.2	T.D9.1	T.D9.2

Tabla 3: Periodos de recolección para cada una de las probetas de la estación Tibás según su codificación.

**ESTACIÓN UBICA EN LIMÓN**

ETAPA DE RECOLECCIÓN	CÓDIGO DE LA MUESTRA							
	L.A1.1	L.A1.2	L.B1.1	L.B1.2	L.C1.1	L.C1.2	L.D1.1	L.D1.2
1	L.A1.1	L.A1.2	L.B1.1	L.B1.2	L.C1.1	L.C1.2	L.D1.1	L.D1.2
2	L.A2.1	L.A2.2	L.B2.1	L.B2.2	L.C2.1	L.C2.2	L.D2.1	L.D2.2
3	L.A3.1	L.A3.2	L.B3.1	L.B3.2	L.C3.1	L.C3.2	L.D3.1	L.D3.2
4	L.A4.1	L.A4.2	L.B4.1	L.B4.2	L.C4.1	L.C4.2	L.D4.1	L.D4.2
5	L.A5.1	L.A5.2	L.B5.1	L.B5.2	L.C5.1	L.C5.2	L.D5.1	L.D5.2
6	L.A6.1	L.A6.2	L.B6.1	L.B6.2	L.C6.1	L.C6.2	L.D6.1	L.D6.2
7	L.A7.1	L.A7.2	L.B7.1	L.B7.2	L.C7.1	L.C7.2	L.D7.1	L.D7.2
8	L.A8.1	L.A8.2	L.B8.1	L.B8.2	L.C8.1	L.C8.2	L.D8.1	L.D8.2
9	L.A9.1	L.A9.2	L.B9.1	L.B9.2	L.C9.1	L.C9.2	L.D9.1	L.D9.2

Tabla 4: Periodos de recolección para cada una de las probetas de la estación Limón según su codificación.

## APÉNDICE E:

### RESULTADOS DE PRUEBAS INICIALES DE BRILLO, COLORACIÓN Y MEDICIÓN DE ESPESORES DE GALVANIZADO DE LAS PROBETAS.

ESTACIÓN OROTINA:

CÓDIGO	BRILLO A 60° (Original)	Exposición meses	BRILLO A 60° (Final)
O.A1.1	12	1	11.9
O.A1.2	13.1	1	13.0
O.A2.1	12	3	
O.A2.2	13.9	3	
O.A3.1	12.3	6	
O.A3.2	9.1	6	
O.A4.1	13.6	9	
O.A4.2	12.1	9	
O.A5.1	13.5	12	
O.A5.2	12.3	12	
O.A6.1	13.9	24	
O.A6.2	14.1	24	
O.A7.1	14.2	36	
O.A7.2	12.2	36	
O.A8.1	14.4	60	
O.A8.2	14	60	
O.A9.1	9.9	120	
O.A9.2	12.8	120	

Tabla1.1: Resultados de la prueba de brillo a 60° para Probetas tipo A

CÓDIGO	PARÁMETROS ORIGINALES				Exposición meses	PARÁMETROS FINALES			
	L*	a*	b*	c*		L*	a*	b*	c*
O.A1.1	36.62	32.64	24.92	41.068	1	36.22	31.15	23.56	38.059
O.A1.2	36.44	32.7	24.88	41.091	1	36.89	30.80	22.7	38.258
O.A2.1	36.45	32.6	25.02	40.655	3				
O.A2.2	36.46	32.4	24.55	41.541	3				
O.A3.1	36.39	32.48	24.92	41.309	6				
O.A3.2	36.18	32.83	25.45	41.456	6				
O.A4.1	36.33	32.66	25.3	40.814	9				
O.A4.2	36.32	32.9	25.23	41.337	9				
O.A5.1	36.53	32.52	24.66	41.21	12				
O.A5.2	36.41	32.78	25.18	41.343	12				
O.A6.1	36.24	32.61	25.2	41.071	24				
O.A6.2	36.34	32.89	25.02	40.927	24				
O.A7.1	36.38	32.56	25.06	41.117	36				
O.A7.2	36.37	32.54	24.82	41.052	36				
O.A8.1	36.35	32.61	25.05	40.803	60				
O.A8.2	36.29	32.69	24.83	41.632	60				
O.A9.1	36.55	32.54	24.62	41.596	120				
O.A9.2	36.07	32.96	25.44	40.943	120				

Tabla 1.2: Resultados de prueba de coloración para probetas tipo A

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (μm)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>O.B1.1</b>	28.7	1
<b>O.B1.2</b>	20.8	1
<b>O.B2.1</b>	25.8	3
<b>O.B2.2</b>	27.3	3
<b>O.B3.1</b>	28.3	6
<b>O.B3.2</b>	22.4	6
<b>O.B4.1</b>	27.1	9
<b>O.B4.2</b>	28.6	9
<b>O.B5.1</b>	24.6	12
<b>O.B5.2</b>	24.5	12
<b>O.B6.1</b>	26.5	24
<b>O.B6.2</b>	28.1	24
<b>O.B7.1</b>	27.4	36
<b>O.B7.2</b>	24.6	36
<b>O.B8.1</b>	23.7	60
<b>O.B8.2</b>	27.9	60
<b>O.B9.1</b>	28.3	120
<b>O.B9.2</b>	24.1	120

**Tabla 1.3:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo B.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>O.C1.1</b>	27.8	1
<b>O.C1.2</b>	27.6	1
<b>O.C2.1</b>	27.6	3
<b>O.C2.2</b>	29.5	3
<b>O.C3.1</b>	26.7	6
<b>O.C3.2</b>	27.3	6
<b>O.C4.1</b>	24.8	9
<b>O.C4.2</b>	26.7	9
<b>O.C5.1</b>	25.2	12
<b>O.C5.2</b>	25.8	12
<b>O.C6.1</b>	26.3	24
<b>O.C6.2</b>	22.2	24
<b>O.C7.1</b>	26.7	36
<b>O.C7.2</b>	30.2	36
<b>O.C8.1</b>	23.1	60
<b>O.C8.2</b>	31.4	60
<b>O.C9.1</b>	27.1	120
<b>O.C9.2</b>	27.5	120

**Tabla 1.4:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo C.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>O.D1.1</b>	60.2	1
<b>O.D1.2</b>	62.1	1
<b>O.D2.1</b>	62.4	3
<b>O.D2.2</b>	59.8	3
<b>O.D3.1</b>	64.2	6
<b>O.D3.2</b>	59.6	6
<b>O.D4.1</b>	58.7	9
<b>O.D4.2</b>	58.3	9
<b>O.D5.1</b>	63.7	12
<b>O.D5.2</b>	64.9	12
<b>O.D6.1</b>	62.6	24
<b>O.D6.2</b>	58.7	24
<b>O.D7.1</b>	62.2	36
<b>O.D7.2</b>	62.4	36
<b>O.D8.1</b>	62.7	60
<b>O.D8.2</b>	60.2	60
<b>O.D9.1</b>	63.4	120
<b>O.D9.2</b>	60.8	120

**Tabla 1.5:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado Para probetas tipo D.

**ESTACIÓN CALDERA:**

<b>CÓDIGO</b>	<b>BRILLO A 60° (Original)</b>	<b>Exposición meses</b>	<b>BRILLO A 60° (Final)</b>
<b>C.A1.1</b>	14.1	1	12.6
<b>C.A1.2</b>	14.3	1	12.2
<b>C.A2.1</b>	13.9	3	
<b>C.A2.2</b>	14.7	3	
<b>C.A3.1</b>	14.4	6	
<b>C.A3.2</b>	13.9	6	
<b>C.A4.1</b>	14.3	9	
<b>C.A4.2</b>	14.8	9	
<b>C.A5.1</b>	14.2	12	
<b>C.A5.2</b>	14.1	12	
<b>C.A6.1</b>	15.3	24	
<b>C.A6.2</b>	14.7	24	
<b>C.A7.1</b>	14.5	36	
<b>C.A7.2</b>	14.2	36	
<b>C.A8.1</b>	14.2	60	
<b>C.A8.2</b>	13.9	60	
<b>C.A9.1</b>	13.8	120	
<b>C.A9.2</b>	14.6	120	

**Tabla 2.1:** Resultados de la prueba de brillo a 60° para  
Probetas tipo A

CÓDIGO	PARÁMETROS ORIGINALES				Exposición meses	PARÁMETROS FINALES			
	L*	a*	b*	c*		L*	a*	b*	c*
<b>C.A1.1</b>	36.76	32.78	25.33	41.429	1	37.84	30.85	22.34	38.090
<b>C.A1.2</b>	36.75	32.92	25.13	41.414	1	37.28	31.20	22.97	38.680
<b>C.A2.1</b>	36.61	32.81	25.04	41.533	3				
<b>C.A2.2</b>	36.65	32.82	25.71	41.283	3				
<b>C.A3.1</b>	36.62	32.84	25.19	41.441	6				
<b>C.A3.2</b>	36.72	32.79	25.51	41.349	6				
<b>C.A4.1</b>	36.55	32.02	25.55	41.729	9				
<b>C.A4.2</b>	36.66	32.95	24.9	41.696	9				
<b>C.A5.1</b>	36.82	32.65	25.41	41.063	12				
<b>C.A5.2</b>	36.39	32.82	25.46	41.508	12				
<b>C.A6.1</b>	36.63	32.86	24.67	41.567	24				
<b>C.A6.2</b>	36.84	32.61	24.91	40.883	24				
<b>C.A7.1</b>	36.85	32.67	25.16	41.234	36				
<b>C.A7.2</b>	36.76	32.92	25.25	41.487	36				
<b>C.A8.1</b>	36.75	32.74	25.33	40.389	60				
<b>C.A8.2</b>	36.65	32.62	24.96	41.069	60				
<b>C.A9.1</b>	36.65	32.81	25.39	41.488	120				
<b>C.A9.2</b>	36.71	32.82	25.44	40.512	120				

**Tabla 2.2:** Resultados de prueba de coloración para probetas tipo A

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (µm)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>C.B1.1</b>	20.1	1
<b>C.B1.2</b>	20.2	1
<b>C.B2.1</b>	19.6	3
<b>C.B2.2</b>	26.6	3
<b>C.B3.1</b>	28.7	6
<b>C.B3.2</b>	20.9	6
<b>C.B4.1</b>	22.9	9
<b>C.B4.2</b>	23.8	9
<b>C.B5.1</b>	25.6	12
<b>C.B5.2</b>	26.4	12
<b>C.B6.1</b>	25.4	24
<b>C.B6.2</b>	24.2	24
<b>C.B7.1</b>	22.1	36
<b>C.B7.2</b>	28.1	36
<b>C.B8.1</b>	28.3	60
<b>C.B8.2</b>	27.9	60
<b>C.B9.1</b>	26.4	120
<b>C.B9.2</b>	24.2	120

**Tabla 2.3:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo B.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPEJOR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>C.C1.1</b>	27.7	1
<b>C.C1.2</b>	21.5	1
<b>C.C2.1</b>	22.4	3
<b>C.C2.2</b>	21.5	3
<b>C.C3.1</b>	22.7	6
<b>C.C3.2</b>	28.6	6
<b>C.C4.1</b>	22.9	9
<b>C.C4.2</b>	21.8	9
<b>C.C5.1</b>	22.5	12
<b>O.C5.2</b>	24.4	12
<b>C.C6.1</b>	25.1	24
<b>C.C6.2</b>	19.1	24
<b>C.C7.1</b>	20.9	36
<b>C.C7.2</b>	20.1	36
<b>C.C8.1</b>	26.3	60
<b>C.C8.2</b>	23.2	60
<b>C.C9.1</b>	22.7	120
<b>C.C9.2</b>	22.8	120

**Tabla 2.4:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo C

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPEJOR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>C.D1.1</b>	51.9	1
<b>C.D1.2</b>	55.3	1
<b>C.D2.1</b>	51.5	3
<b>C.D2.2</b>	57.1	3
<b>C.D3.1</b>	53.6	6
<b>C.D3.2</b>	53.2	6
<b>C.D4.1</b>	54.4	9
<b>C.D4.2</b>	60.1	9
<b>C.D5.1</b>	60.3	12
<b>C.D5.2</b>	54.3	12
<b>C.D6.1</b>	56.3	24
<b>C.D6.2</b>	52.8	24
<b>C.D7.1</b>	55.8	36
<b>C.D7.2</b>	60.1	36
<b>C.D8.1</b>	53.6	60
<b>C.D8.2</b>	54.8	60
<b>C.D9.1</b>	55.3	120
<b>C.D9.2</b>	54.9	120

**Tabla 2.5:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo D.

**ESTACIÓN TIBÁS:**

<b>CÓDIGO</b>	<b>BRILLO A 60° (Original)</b>	<b>Exposición meses</b>	<b>BRILLO A 60° (Final)</b>
T.A1.1	14.5	1	
T.A1.2	14.4	1	
T.A2.1	15.1	3	
T.A2.2	14.8	3	
T.A3.1	14.4	6	
T.A3.2	13.7	6	
T.A4.1	14.8	9	
T.A4.2	13.8	9	
T.A5.1	14.6	12	
T.A5.2	14.3	12	
T.A6.1	15.1	24	
T.A6.2	15.2	24	
T.A7.1	13.5	36	
T.A7.2	14.2	36	
T.A8.1	14.6	60	
T.A8.2	13.4	60	
T.A9.1	13.8	120	
T.A9.2	14.1	120	

**Tabla 3.1:** Resultados de la prueba de brillo a 60° para probetas tipo A

CÓDIGO	PARÁMETROS ORIGINALES				Exposición meses	PARÁMETROS FINALES			
	L*	a*	b*	c*		L*	a*	b*	c*
<b>T.A1.1</b>	36.66	32.82	25.35	41.468	1				
<b>T.A1.2</b>	36.71	32.95	25.19	41.489	1				
<b>T.A2.1</b>	36.38	32.86	25.13	41.719	3				
<b>T.A2.2</b>	36.96	32.89	25.54	41.325	3				
<b>T.A3.1</b>	36.87	32.85	25.21	41.589	6				
<b>T.A3.2</b>	36.78	32.75	25.55	41.456	6				
<b>T.A4.1</b>	36.67	32.17	25.59	41.848	9				
<b>T.A4.2</b>	36.69	32.89	24.92	41.726	9				
<b>T.A5.1</b>	36.85	32.75	25.46	41.235	12				
<b>T.A5.2</b>	36.44	32.82	25.48	41.501	12				
<b>T.A6.1</b>	36.69	32.88	24.72	41.789	24				
<b>T.A6.2</b>	36.92	32.65	24.91	40.925	24				
<b>T.A7.1</b>	36.96	32.77	25.16	41.269	36				
<b>T.A7.2</b>	36.86	32.95	25.5	41.056	36				
<b>T.A8.1</b>	36.79	32.86	25.36	40.783	60				
<b>T.A8.2</b>	36.75	32.75	24.86	41.465	60				
<b>T.A9.1</b>	36.65	32.89	25.39	41.351	120				
<b>T.A9.2</b>	36.78	32.79	25.45	40.511	120				

Tabla 3.2: Resultados de prueba de coloración para probetas tipo A

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (μm)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>T.B1.1</b>	23.1	1
<b>T.B1.2</b>	23.5	1
<b>T.B2.1</b>	21.1	3
<b>T.B2.2</b>	24.8	3
<b>T.B3.1</b>	25.8	6
<b>T.B3.2</b>	26.3	6
<b>T.B4.1</b>	18.7	9
<b>T.B4.2</b>	21.6	9
<b>T.B5.1</b>	17.1	12
<b>T.B5.2</b>	19.6	12
<b>T.B6.1</b>	21.2	24
<b>T.B6.2</b>	20.5	24
<b>T.B7.1</b>	24.9	36
<b>T.B7.2</b>	20.9	36
<b>T.B8.1</b>	18.9	60
<b>T.B8.2</b>	25.8	60
<b>T.B9.1</b>	22.2	120
<b>T.B9.2</b>	19.4	120

**Tabla 3.3:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo B.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Exposición meses</b>
T.C1.1	19.8	1
T.C1.2	20.3	1
T.C2.1	21.2	3
T.C2.2	25	3
T.C3.1	21.4	6
T.C3.2	20	6
T.C4.1	20.7	9
T.C4.2	22.2	9
T.C5.1	21.7	12
T.C5.2	23.7	12
T.C6.1	21.6	24
T.C6.2	20.9	24
T.C7.1	22.9	36
T.C7.2	20.9	36
T.C8.1	21.3	60
T.C8.2	21.5	60
T.C9.1	21	120
T.C9.2	23	120

**Tabla 3.4:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo C.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (µm)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>T.D1.1</b>	53.4	1
<b>T.D1.2</b>	55.6	1
<b>T.D2.1</b>	56.6	3
<b>T.D2.2</b>	57.1	3
<b>T.D3.1</b>	57.6	6
<b>T.D3.2</b>	54.3	6
<b>T.D4.1</b>	56.9	9
<b>T.D4.2</b>	53.1	9
<b>T.D5.1</b>	55.2	12
<b>T.D5.2</b>	56.9	12
<b>T.D6.1</b>	52.6	24
<b>T.D6.2</b>	61.2	24
<b>T.D7.1</b>	55.9	36
<b>T.D7.2</b>	54.7	36
<b>T.D8.1</b>	58.8	60
<b>T.D8.2</b>	52.1	60
<b>T.D9.1</b>	54.7	120
<b>T.D9.2</b>	57.8	120

**Tabla 3.5:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo D.

## ESTACIÓN PEREZ ZELEDÓN:

LÓDIGO	BRILLO A 60° (Original)	Exposición meses	BRILLO A 60° (Final)
L.A1.1	15.1	1	
L.A1.2	14.1	1	
L.A2.1	14.1	3	
L.A2.2	14.7	3	
L.A3.1	14.3	6	
L.A3.2	13.9	6	
L.A4.1	14.7	9	
L.A4.2	13.6	9	
L.A5.1	14.3	12	
L.A5.2	14.7	12	
L.A6.1	14.9	24	
L.A6.2	15.5	24	
L.A7.1	15.3	36	
L.A7.2	14.9	36	
L.A8.1	15.1	60	
L.A8.2	13.2	60	
L.A9.1	14.3	120	
L.A9.2	14.6	120	

Tabla 4.1: Resultados de la prueba de brillo a 60° para probetas tipo A

CÓDIGO	PARÁMETROS ORIGINALES				Exposición meses	PARÁMETROS FINALES			
	L*	a*	b*	c*		L*	a*	b*	c*
L.A1.1	36.88	32.83	25.65	41.789	1				
L.A1.2	36.76	32.78	25.23	41.439	1				
L.A2.1	36.21	32.46	25.19	41.728	3				
L.A2.2	36.89	32.48	25.45	41.385	3				
L.A3.1	36.78	32.88	25.56	41.525	6				
L.A3.2	36.76	32.73	25.51	41.489	6				
L.A4.1	36.65	32.19	25.32	41.879	9				
L.A4.2	36.75	32.76	24.65	41.759	9				
L.A5.1	36.85	32.69	25.72	41.286	12				
L.A5.2	36.88	32.65	25.16	41.506	12				
L.A6.1	36.66	32.95	24.86	41.755	24				
L.A6.2	36.86	32.63	24.56	40.936	24				
L.A7.1	36.92	32.63	25.74	41.221	36				
L.A7.2	36.91	32.25	25.63	41.051	36				
L.A8.1	36.56	32.48	25.36	40.593	60				
L.A8.2	36.99	32.58	24.89	41.479	60				
L.A9.1	36.75	32.83	25.42	41.356	120				
L.A9.2	36.89	32.71	25.46	40.564	120				

Tabla 4.2: Resultados de prueba de coloración para probetas tipo A

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (μm)</b>	<b>Exposición meses</b>
<b>L.B1.1</b>	24.2	1
<b>L.B1.2</b>	26.3	1
<b>L.B2.1</b>	20.1	3
<b>L.B2.2</b>	23.4	3
<b>L.B3.1</b>	24.8	6
<b>L.B3.2</b>	25.1	6
<b>L.B4.1</b>	23.7	9
<b>L.B4.2</b>	28.3	9
<b>L.B5.1</b>	19.1	12
<b>L.B5.2</b>	25.4	12
<b>L.B6.1</b>	21.2	24
<b>L.B6.2</b>	24.5	24
<b>L.B7.1</b>	25.6	36
<b>L.B7.2</b>	22.3	36
<b>L.B8.1</b>	19.8	60
<b>L.B8.2</b>	26.1	60
<b>L.B9.1</b>	22.6	120
<b>L.B9.2</b>	21.6	120

**Tabla 4.3:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo B.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPEJOR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Exposición meses</b>
L.C1.1	19.9	1
L.C1.2	20.6	1
L.C2.1	22.8	3
L.C2.2	20.2	3
L.C3.1	21.4	6
L.C3.2	22.3	6
L.C4.1	23.1	9
L.C4.2	22.2	9
L.C5.1	21.7	12
L.C5.2	23.9	12
L.C6.1	24.6	24
L.C6.2	21.6	24
L.C7.1	21.9	36
L.C7.2	21.3	36
L.C8.1	20.3	60
L.C8.2	20.6	60
L.C9.1	21.5	120
L.C9.2	20.6	120

**Tabla 4.4:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo C.

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESPESOR (μm)</b>	<b>Exposición meses</b>
L.D1.1	55.1	1
L.D1.2	57.2	1
L.D2.1	62.7	3
L.D2.2	57.9	3
L.D3.1	52.8	6
L.D3.2	54.8	6
L.D4.1	58.8	9
L.D4.2	50.8	9
L.D5.1	53.3	12
L.D5.2	55.2	12
L.D6.1	54.1	24
L.D6.2	56.7	24
L.D7.1	55.5	36
L.D7.2	55.9	36
L.D8.1	51.8	60
L.D8.2	52.2	60
L.D9.1	53.4	120
L.D9.2	54.6	120

**Tabla 4.5:** Resultados de pruebas de espesor de capa de galvanizado  
Para probetas tipo D.

---