

T
671.73
HUA



Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción



**“Evaluación de Recubrimientos a Base
de Zinc en la Atmósfera Industrial de
la Refinería Estatal Esmeraldas”
(PROYECTO PATINA)**

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Manuel Teófilo Huamán Marcillo



Guayaquil - Ecuador

Año - 2001



CIB

D-26878

AGRADECIMIENTO

A mi familia que me ayudó a la culminación exitosa de mi carrera y al Ing. Julián Peña Director de Tesis.

DEDICATORIA

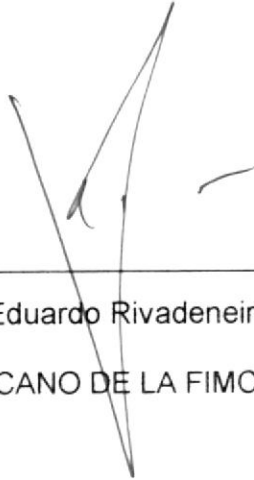
A DIOS

A MIS PADRES

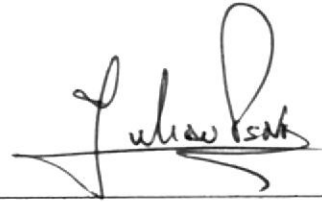
A MIS HERMANOS

A MIS TIOS MATERNOS

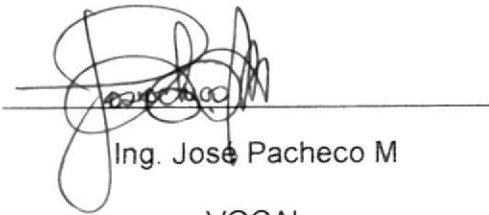
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Eduardo Rivadeneira P
DECANO DE LA FIMCP



Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. José Pacheco M
VOCAL



Ing. Omar Serrano V
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la “ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Manuel Teófilo Huamán Marcillo', written over a horizontal line.

Manuel Teófilo Huamán Marcillo

RESUMEN

Se describe en este trabajo el procedimiento, los resultados obtenidos y de acuerdo con esto, la evaluación de los diversos recubrimientos, formando parte esta investigación de la RED TEMÁTICA XV.D "PATINA" (PROTECCIÓN DE METALES EN LA ATMOSFERA) en la cual participan instituciones de 15 países de Iberoamérica.

El Proyecto Internacional Mapa iberoamericano de Corrosión atmosférica (MICAT), permitió conocer la agresividad de diferentes atmósferas a lo largo de la región Iberoamericana, lo cual sirvió de orientación respecto a las medidas protectoras a adoptar para la conservación de las estructuras metálicas, y de esta forma poder tener en cuenta la planificación de una obra, especificar el metal o aleación a utilizar, tipo y característica del recubrimiento protector, así hacer un estimado en cuanto a la frecuencia de mantenimiento.

Como una continuación de los trabajos realizados por los 14 países que participaron en la ejecución de MICAT, se plantea un nuevo proyecto denominado PATINA (Protección Anticorrosiva de Metales en la Atmósfera), en el cual se pretende elaborar una metodología del ámbito Iberoamericano para el conocimiento y evaluación del comportamiento de diferentes tipos de

recubrimientos en función de la agresividad atmosférica como una fase de continuación al proyecto MICAT

El objetivo de este trabajo es de mostrar los resultados del proyecto PATINA referente al recubrimiento base zinc el cual se encuentran sometido a una atmósfera catalogada como de alta agresividad, como lo es la Refinería Estatal de Esmeraldas.

En la primera fase de este trabajo, se describe La Red Temática, la descripción de los recubrimientos evaluados en base de zinc, el diseño experimental a seguir en el proyecto en el cual se detalla la instalación, la preparación de materiales, cronograma de exposición y el procedimiento de evaluación de resultados.

La segunda fase, es la aplicación de la metodología anteriormente expuesta, es el procesamiento de los resultados de acuerdo a las actividades realizadas, es importante destacar que las evaluaciones se realizan empleando las normas internacionales como son la ISO 4542, ISO 8407 ISO 9226, ISO 2178, ISO 1463

La tercera parte, trata sobre el análisis de diferentes tipos de recubrimientos evaluados, en el cual se incluyen estudios de la presentación y deterioro de las probetas expuestas, metalografías y análisis de la velocidad de corrosión.

Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones en el cual se incluye también un análisis cronológico de cada recubrimiento y su comportamiento en la atmósfera de la Refinería Estatal de Esmeraldas.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	III
SIMBOLOGIA.....	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
I. PROTECCION ANTICORROSIVA DE LOS METALES EN LA ATMOSFERA.- PROYECTO PATINA.....	4
1.1. La Red Temática CYTED en Iberoamérica.....	4
1.2. Recubrimiento Metálicos a Base de Zinc a Evaluar.....	9
1.3. Diseño Experimental del Proyecto PATINA.....	10
1.3.1. Ubicación del Panel de Exposición en la Atmósfera de la Refinería Estatal Esmeraldas.....	10
1.3.2. Preparación de Materiales.....	11
1.3.3. Identificación de Probetas.....	14
1.3.4. Cronograma de Exposición y Retirada de Probetas.....	17
1.3.5. Procedimientos de Evaluación de Resultados.....	20

II. RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE 42 MESES DE EXPOSICIÓN SOBRE LOS RECUBRIMIENTOS METALICOS.....	31
2.1. Actividades Realizas Durante la Retirada de Probetas.....	31
2.2. Galvanizado.....	31
2.2.1 Planillas de Resultados.....	33
2.2.2 Pérdida de peso.....	41
2.3. Metalizado.....	42
2.3.1 Planillas de Resultados.....	43
2.3.2 Medición de espesor.....	51
2.4. Electrozincado.....	52
2.4.1 Planillas de Resultados.....	53
2.4.2 Perdida de peso.....	57
2.5. Senzimir.....	58
2.5.1 Planillas de Resultados.....	59
2.5.2 Perdida de peso.....	67
2.6. Galfán.....	68
2.6.1 Planillas de Resultados.....	69
2.6.2 Perdida de peso.....	77
III. ANALISIS DE RESULTADOS.....	78
3.1. Análisis Visual.....	78
3.2. Análisis Metalográfico.....	84

3.3.Análisis de Pérdida de la Velocidad de Corrosión.....	89
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
APENDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

SIMBOLOGIA

SO ₂	Dióxido de Azufre
NO _x	Nitratos
H ₂ S	Sulfuro de Hidrógeno
RH	Humedad relativa
cm	Centímetros
mm	Milímetros
m	Metros
m ²	Metros Cuadrados
cm ²	Centímetros Cuadrados
° ' "	Grados-Minutos-Segundos
μ m	Micras
ΔW	Variación de peso
W _o	Peso inicial
W _F	Peso final
V _{corr}	Velocidad de corrosión
W	Peso
t	Tiempo
A	Area
g	Gramos
ml	Mililitros
°C	Grado centígrado

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1	Identificación de Probetas..... 16
Figura 1.2	Ruta Critica. Probetas por Perdida de Peso..... 21
Figura 1.3	Ruta Critica. Probetas de Metalizado sin Incisión..... 22
Figura 1.4	Ruta Critica. Probetas con Incisión Galvanizadas y Metalizadas..... 23
Figura 1.5	Esquema Patrón de los valores de CP..... 28
Figura 1.6	Sección Transversal de Probeta Para Metalografía..... 30
Figura 1.7	Zona Transversal de incisión Para Metalografía..... 30
Figura 2.1	Probeta Testigo Galvanizado..... 32
Figura 2.2	Probeta Galvanizado 1EX1, 12 Meses..... 34
Figura 2.3	Probeta Galvanizado 1EX2, 24 Meses..... 36
Figura 2.4	Probeta Galvanizado 1EX3, 36 Meses..... 38
Figura 2.5	Probeta Galvanizado 1ES31, 42 Meses..... 40
Figura 2.6	Probeta Testigo Metalizado..... 42
Figura 2.7	Probeta Metalizado 2EX1, 12 Meses..... 44
Figura 2.8	Probeta Metalizado 2EX2, 24 Meses..... 46
Figura 2.9	Probeta Metalizado 2EX3, 36 Meses..... 48
Figura 2.10	Probeta Metalizado 2ES3, 42 Meses..... 50
Figura 2.11	Probeta Testigo Electrozincado..... 52
Figura 2.12	Probeta Electrozincado 3EX1, 12 Meses..... 54
Figura 2.13	Probeta Electrozincado 3EX2, 24 Meses..... 56
Figura 2.14	Probeta Testigo Senzimir..... 58
Figura 2.15	Probeta Senzimir 4EX1, 12 Meses..... 60
Figura 2.16	Probeta Senzimir 4EX2, 24 Meses..... 62
Figura 2.17	Probeta Senzimir 4EX3, 36 Meses..... 64
Figura 2.18	Probeta Senzimir 4ES31, 42 Meses..... 66
Figura 2.19	Probeta Testigo Galfan..... 68
Figura 2.20	Probeta Galfán 5EX1, 12 Meses..... 70
Figura 2.21	Probeta Galfán 5EX2, 24 Meses..... 72
Figura 2.22	Probeta Galfán 5EX3, 36 Meses..... 74
Figura 2.23	Probeta Galfán 5ES33, 42 Meses..... 76

Figura 3.1	Metalografía en Incisión 1EX1, 12 Meses.....	84
Figura 3.2	Metalografía en Incisión 1EX2, 24 Meses.....	84
Figura 3.3	Metalografía en Incisión 2EX1, 12 Meses.....	85
Figura 3.4	Metalografía en Incisión 2EX2, 24 Meses.....	85
Figura 3.5	Metalografía en Incisión 3EX1, 12 Meses.....	86
Figura 3.6	Metalografía en Incisión 3EX2, 24 Meses.....	86
Figura 3.7	Metalografía en Incisión 4EX1, 12 Meses.....	87
Figura 3.8	Metalografía en Incisión 4EX2, 24 Meses.....	87
Figura 3.9	Metalografía en Incisión 5EX1, 12 Meses.....	88
Figura 3.10	Metalografía en Incisión 5EX2, 24 Meses.....	88
Figura 3.11	Curva de Velocidad de corrosión del Galvanizado.....	91
Figura 3.12	Curva de Velocidad de corrosión del Electrozincado.....	92
Figura 3.13	Curva de Velocidad de corrosión del Senzimir.....	93
Figura 3.14	Curva de Velocidad de corrosión del Galfan.....	94

INDICE DE TABLAS

		Pag.
Tabla I	Número de Probetas a Evaluar.....	16
Tabla II	Planilla de Resultados de Galvanizado, 12 Meses.....	33
Tabla III	Planilla de Resultados de Galvanizado, 24 Meses.....	35
Tabla IV	Planilla de Resultados de Galvanizado, 36 Meses.....	37
Tabla V	Planilla de Resultados de Galvanizado, 42 Meses.....	39
Tabla VI	Pesos Probetas Galvanizado.....	41
Tabla VII	Planilla de Resultados de Metalizado, 12 Meses.....	43
Tabla VIII	Planilla de Resultados de Metalizado, 24 Meses.....	45
Tabla IX	Planilla de Resultados de Metalizado, 36 Meses.....	47
Tabla X	Planilla de Evaluación de Metalizado, 42 Meses.....	49
Tabla XI	Espesores Metalizado.....	51
Tabla XII	Planilla de Resultados de Electrozincado, 12 Meses.....	53
Tabla XIII	Planilla de Resultados de Electrozincado, 24 Meses.....	55
Tabla XIV	Pesos Probetas Electrozincado.....	57
Tabla XV	Planilla de Resultados de Senzimir, 12 Meses.....	59
Tabla XVI	Planilla de Resultados de Senzimir, 24 Meses.....	61
Tabla XVII	Planilla de Resultados de Senzimir, 36 Meses.....	63
Tabla XVIII	Planilla de Resultados de Senzimir, 42 Meses.....	65
Tabla XIX	Pesos Probetas Senzimir.....	67
Tabla XX	Planilla de Resultados de Galfan, 12 Meses.....	69
Tabla XXI	Planilla de Resultados de Galfan, 24 Meses.....	71
Tabla XXII	Planilla de Resultados de Galfan, 36 Meses.....	73
Tabla XXIII	Planilla de Resultados de Galfan, 42 Meses.....	75
Tabla XXIV	Pesos Probetas Galfan.....	77
Tabla XXV	Velocidad de Corrosión Galvanizado.....	91
Tabla XXVI	Velocidad de Corrosión Electrozincado.....	92
Tabla XXXVII	Velocidad de Corrosión Senzimir.....	93
Tabla XXXVIII	Velocidad de Corrosión Galfan.....	94

INTRODUCCION

La corrosión es un campo multidisciplinario de la ciencia y de la ingeniería. El conocimiento de la química del ambiente, la micro estructura del sólido y la distribución de tensiones continúan siendo los problemas esenciales para los especialistas de la corrosión.

Una medida de la importancia del costo de la corrosión a la economía. Se llevo acabo por el Buró Nacional de standards de Estados Unidos y la firma Batelle a solicitud del congreso de ese país en 1985 determinó que las pérdidas provocadas por la corrosión de los metales era aproximadamente el 4,2% del PNB. Aproximadamente (2/3 de los gastos de defensa). Se estima que del 15 al 25 % o más de estas pérdidas pudo evitarse si se hubiera aplicado las medidas ya establecidas de protección.

Se han realizado análisis económicos rigurosos en diversos países como Estados Unidos, Reino Unido. En que se manifiesta los enormes costos que se supone la corrosión para un país, es entre el 20 y el 25% podrían ser evitados utilizando correctamente las distintas técnicas de prevención de la corrosión actualmente existentes.

Un componente metálico podrá alcanzar una prolongada vida en servicio bajo condiciones de exposición en la atmósfera únicamente si resiste la acción de

este medio. Por lo tanto un requisito esencial para un sin numero de aplicaciones practicas es la utilización de materiales que resistan la acción corrosiva de la atmósfera o por lo menos que se hallen protegidos de ellas por recubrimientos.

La corrosión atmosférica de láminas de acero con los recubrimientos metálicos de zinc es un proceso electroquímico complejo que incluye numerosas reacciones. Los principales componentes atmosféricos que reaccionan con los componentes galvánicos a base de zinc son básicamente el SO_2 , NO_x y H_2S en medios industriales y cloruros en los ambientes marinos.

Para proteger una superficie de acero contra la corrosión atmosférica es suficiente una delgada capa de recubrimiento de zinc aun para largos periodos de tiempo. Durante la exposición se forma una delgada y compacta capa de sales de zinc que protege a este y retarda la corrosión del acero.

Además de proteger el acero de la corrosión mediante una barrera física, esto es separándolo del medio ambiente, los recubrimientos de zinc también protegen mediante un mecanismo galvánico o de sacrificio. De esta manera, el acero expuesto en defectos, poros, ralladuras u orillas de corte se polariza electroquímicamente a un potencial que se aproxima al del zinc, cuando esto

ocurre, el acero se comporta como cátodo del par zinc-acero y este último queda protegido durante la vida del recubrimiento.

El estudio del comportamiento frente a la corrosión atmosférica, de recubrimientos de zinc sobre acero al carbón bajo diferentes condiciones ambientales. Con este trabajo se pretende conocer y evaluar el comportamiento del acero con los siguientes grupos: galvanizado, metalizado, electrozincado, senzimir y galfan en la atmósfera de la Refinería Estatal de Esmeraldas.

CAPITULO 1

1. PROTECCION ANTICORROSIVA DE LOS METALES EN LA ATMOSFERA.- PROYECTO PATINA

1.1. La Red Temática CYTED en Iberoamérica.

Se describe en este trabajo el procedimiento, los resultados obtenidos y de acuerdo con esto, la evaluación de los diversos recubrimientos probados, formando parte esta investigación de una colaboración con la RED TEMÁTICA XV.D "PATINA" (PROTECCIÓN DE METALES EN LA ATMOSFERA) en la cual participan instituciones de 15 países de Iberoamérica.

En el proyecto XV.1 del CYTED "Mapa iberoamericano de Corrosión Atmosférica" (MICAT) se desarrollaron experimentos que permitieron conocer la agresividad atmosférica existente en la región iberoamericana, información que ha sido obtenida a lo largo de la vida de ese proyecto mediante la experimentación en una red de 72

estaciones de ensayos diseminadas a lo largo y ancho de 14 países participantes: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, España, México, Panamá, Perú, Portugal, Uruguay, y Venezuela. Las distintas atmósferas presentes en la región, pueden incluirse en alguno de los diversos grupos con los diferentes tipos de atmósferas:

- Rural -Prácticamente no contaminada
- Urbana -Moderada Contaminación
- Industrial -Contaminación Elevada
- Marina -Moderado Contenido Salino
- Costera -Muy Alto Contenido Salino
- Especial -Proximidad a Volcanes

Para definir el contenido temático que desarrollara la red, se realizó una encuesta entre los 14 países que participan en el proyecto XV.1 del CYTED. "Mapa Iberoamericano De Corrosividad Atmosférica" (MICAT), encuesta que fue debatida en las distintas reuniones anuales del proyecto. El consenso al que se llegó tratando de conjuntar los intereses (producción nacional, utilización actual, estrategias de consumo) de los diferentes países de la región se resuelve en llevar a

cabo experimentos para conocer el desempeño de los materiales que se presentan a continuación:

- Grupo 1: Acero al carbono y acero zinc con pintura convencional.
- Grupo 2: Acero al carbono y acero zinc con pintura de nueva tecnología.
- Grupo 3: Recubrimiento a base de zinc
- Grupo 4: Recubrimiento a base de aluminio
- Grupo 5: Recubrimiento sobre aluminio
- Grupo 6: Recubrimiento para banda continua

15 países de la región mostraron su interés en participar en el programa: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, España, México Panamá, Perú, Portugal, Uruguay y Venezuela.

En la última Reunión del proyecto. XV.1 (MICAT) realizada en Lisboa (Diciembre de 1994) se aprovechó para definir entre los 15 países participantes el contenido temático, estructura organizativa y otros detalles de este programa colaborativo.

Se adoptó en el ámbito interno una estructura de seis grupos de trabajo en función de los distintos esquemas protectores a ensayar. La coordinación de cada uno de los grupos correría a cargo de especialistas de reconocido prestigio dentro de la región. Estos seis expertos estructuraron de acuerdo con unas directrices el plan tentativo de actuación de cada uno de los grupos. Los planes tentativos de cada uno de los grupos fueron consensuados parcialmente en la reunión de Lisboa y se aprobaron definitivamente en la reunión del Cuzco (Diciembre 1995)

Obviamente, la experimentación en este caso no se piensa llevar a cabo en las 72 estaciones de ensayo que componían la red MICAT, Sino en una muestra representativa de ellas seleccionadas de acuerdo a los siguientes criterio:

- Cobertura de las diferentes atmósferas.
- Estaciones de ensayo mejor equipada y con capacidad durante el desarrollo del programa colaborativo.
- Su distribución entre los diferentes países participantes
- Su pertenencia a una red de ámbito internacional.

Así, se han seleccionado las siguientes estaciones de ensayo:

• San Pedro (Colombia)	Atmósfera Rural
• Cuernavaca (México)	Atmósfera Rural
• Cuzco (Perú)	Atmósfera Rural
• El Prado (España)	Atmósfera Rural
• Cerrillos (Chile)	Atmósfera Urbana
• Luminar (Portugal)	Atmósfera Urbana
• San Pablo (Brasil)	Atmósfera Urbana
• La Paz (Bolivia)	Atmósfera Urbana
• Lima (Perú)	Atmósfera Urbana
• Panamá (Panamá)	Atmósfera Urbana
• Cubatao (Brasil)	Atmósfera Industrial
• Esmeraldas (Ecuador)	Atmósfera Industrial
• Tablazo (Venezuela)	Atmósfera Marina
• I. Naval (Colombia)	Atmósfera Marina
• Colon (Panamá)	Atmósfera Marina
• Punta del Este (Uruguay)	Atmósfera Marina
• Sines (Portugal)	Atmósfera Costera
• Cojimar (Cuba)	Atmósfera Costera
• Viridiato (Cuba)	Atmósfera Costera
• Puerto Limón (Costa Rica)	Atmósfera Costera
• Artigas Uruguay (Antártica)	Atmósfera Especial

- S max. 0.04%

1.3. Diseño Experimental del Proyecto PATINA

1.3.1. Ubicación del Panel de Exposición en la Atmósfera Industrial de la Refinería Estatal de Esmeraldas.

Ecuador participa activamente en este proyecto con la estación ubicada al nor.-occidente del territorio ecuatoriano, sobre los $00^{\circ}58'45''$ de latitud norte y en los $79^{\circ}37'28''$ de longitud oeste, a 7 m de altura sobre el nivel del mar, con una humedad relativa (RH) de $RH \geq 80\%$. La misma que se la ha denominado estación Esmeraldas, nombre relacionado a la ciudad donde esta asentada la refinería más grande del Ecuador.

PETROECUADOR empresa estatal del gobierno Ecuatoriano a través de la Refinería Estatal Esmeraldas, aceptó con beneplácito nuestra gestión investigativa proveyendo la infraestructura física y logística necesaria para desarrollar nuestros estudios de corrosión atmosférica.

La Coordinación en el Ecuador a tenido singular éxito ya que las probetas recibidas fueron totalmente instaladas en la fecha

sugerida por el Director General del proyecto Dr. Manuel Morcillo Linares; esto es, el 11 de Abril de 1996.

1.3.2. Preparación de Materiales

Los recubrimientos considerados son: galvanizado en caliente, electrozincado, senzimir, galfan, y zinc metalizado. Las muestras de galvanizado en caliente y metalizado las proporcionó México y el resto España.

Las muestras de galfan en los Estados Unidos. La preparación de probetas y los espesores de los recubrimientos a considerar son de acuerdo con las normas ASTM.

Para acero galvanizado en caliente (discontinuo) un espesor de 60 μm (360g/m²) de acuerdo a la norma ASTM A123-89a.

Para la chapa galvanizado en caliente (continuo o senzimir y galfan) un espesor nominal de 66 μm (450 g/m²), y 22 μm mínimo por lado de acuerdo a las normas ASTM A525, A526, A875.

Para chapa con recubrimiento electrolítico (zincada en Frío) una masa de recubrimiento de 90 g/m^2 .

Para el acero metalizado con zinc la aplicación se hace con la norma ASTM B833.

Una vez preparadas las probetas, las mismas fueron matriculadas con un número por estampación metálica. Se desengrasaron con acetona y se limpiaron con agua destilada e inmediatamente secadas con pistola de aire. Se empaquetaron y se guardaron en cajas de madera cerradas y con sílice gel para la absorción de humedad. El manejo de las muestras se hará con guantes quirúrgicos. Se evaluaron posteriormente los recubrimientos para la observación al microscopio. Se encapsularon y se observó que:

El galvanizado presentó un espesor aproximado de $350 \mu\text{m}$. Esto se realizó en diferentes áreas de la probeta. Se pudo observar variaciones en el espesor. Y se obtuvo un espesor total en ambas caras de $289 \mu\text{m}$. El espesor del acero es de $380 \mu\text{m}$.

El recubrimiento metalizado. Presentó un espesor incluyendo el sellador de poros es de 160 μm . El recubrimiento es mucho más uniforme y se puede observar el sellador sobre este. El espesor del metalizado es de aproximadamente de 60 μm . Por pérdida de peso el espesor total promedio de ambas caras fue de 167 μm . El acero tiene un espesor de 310 μm .

El electrozincado, que casi no se observa en la muestra ya que al prepararla se desprendió. Sin embargo se pudo medir su espesor en el microscopio en una probeta sin preparación metalográfica dando un espesor de 40 μm . Por inmersión dio un espesor total en ambas caras de 80 μm . El acero tiene un espesor de 320 μm .

El senzimir que presenta un recubrimiento uniforme de aproximadamente 40 μm . Por pérdida de peso un espesor total en ambas caras de 72 μm . El acero tiene un espesor de 120 μm .

El galfan presenta un espesor de recubrimiento de 30 μm . Por pérdida de peso tiene un espesor total promedio ambas caras de 50 μm . El acero tiene un espesor de 100 μm .

1.3.3. Identificación de las probetas

Las muestras están identificadas por impresión de golpe de martillo. Además llevan una identificación con plumón permanente (no lavable) en un extremo con un código de la siguiente manera, así como se muestra en la figura 1.1:

a) un numero indicativa del material.

1 Galvanizado

2 Metalizado

3 Electrozincado

4 Senzimir

5 Galfan

b) Una letra indicativa de la estación de ensayo

Atmósfera rural: Cuernavaca (A), Cuzco (B) y Pardo(L)

Atmósfera urbana: Sao Paulo (C) y La Paz (D).

Atmósfera Industrial: Esmeraldas (E)

Atmósfera Marina: Isla Naval (F) Colón (G).

Atmósfera Costera: Cojimar (H), Limón (K).

Atmósfera Especial: La Voz (Y) y Arenal (J).

C) Letra indicativa de la probeta: Con incisión (X) y sin incisión (S).

D) Un número indicativo del cuerpo de prueba y serie relacionada con el retiro de la probeta, por ejemplo.

Serie a retirarse el primer año (1), el segundo año (2) y el tercer año (3). Para las pérdidas de peso (exceptuando metalizado) llevarán un número extra indicativo del cuerpo de prueba (del 1 al 3)

Ejemplo:

1ES23

1 Galvanizado

E Esmeraldas

S Sin incisión

23 Retirada al segundo año, tercera muestra.

Las muestras se colocarán con la impresión hacia arriba (Vista al cielo) y la de plumón con vista al suelo.

En la tabla I consta el tipo de revestimiento y numero de probetas con y sin incisión a ser evaluadas en el proyecto.

TABLA I
NUMERO DE PROBETAS A EVALUAR

REVESTIMIENTOS	CON INCISIÓN	SIN INCISIÓN
Galvanizado	3	9
Metalizado	3	3
Electrozincado	3	9
Senzimir	3	9
Galfan	3	9
SUB-TOTAL	15	39
TOTAL	54	



FIGURA 1.1 IDENTIFICACION DE PROBETAS

1.3.4. Cronograma de Exposición y Retiradas de Probetas.

Las estaciones de ensayo en donde se llevarán a cabo los estudios, serán los siguientes: Cuernavaca, Pardo, El Cuzco Sao Paulo, La Paz, Esmeraldas, Isla Naval, Colon, Cojimar, Limón, La Voz, Arenal.

Los ensayos se llevarán acabo de acuerdo a las normas pre establecidas y se requiere fotografiar antes de exponer las probetas además se recuerda que se dispondrá para todos los países participantes de probetas testigos para comprobación de estado inicial y final del proyecto.

Se prepararán 9 muestras de cada recubrimiento para exponerse y se retiraran por triplicado durante 3 años y serán utilizados para ensayos de pérdida de peso. Se prepararán otras tres muestras que llevarán una incisión longitudinal para estudio de efecto galvánico y productos de corrosión y que se retiraran, una cada año. Las orillas de estas ultimas deberán ser recubiertas con pintura Epoxídica- Poliámida aplicada por inmersión con un ancho de recubrimiento de 2 mm, Para prevenir exfoliación, corrosión ínter granular y efectos

galvánicos. Las probetas deberán ser marcadas, pesadas para posteriormente hacer la incisión y la protección de los bordes.

Para el caso de las probetas de zinc metalizado, se prepararon 6 muestras y se retirarán dos por años. De estas 6, tres llevarán incisión y tres no. La incisión es de forma longitudinal en la parte inferior de las probetas con una separación de 2 mm. Respecto a la orilla de las mismas. Se harán inspecciones visuales y ensayos metalográficos.

Las probetas serán colocadas viendo hacia el sur en el hemisferio norte y al norte en el hemisferio sur excepto las de atmósferas costeras que miran directamente a la costa.

Las probetas galvanizadas serán retiradas 3 anuales, para ensayo de pérdida de peso. Además de una con incisión para su evaluación de efectos galvánicos y estudios especiales. Las metalizadas serán retiradas una con incisión y otra sin incisión. Las probetas testigos llegarán oportunamente a cada coordinador para que sean fotografiadas y posteriormente su aplicación en las comparaciones visuales.

Antes de la Exposición:

- Limpiar con solvente (excepto las metalizadas) y lavar con agua destilada todas las probetas.
- Inspecciones visuales en las superficies de las probetas.
- Documentación fotográfica de las probetas con y sin incisión.
- Medición de espesores de las probetas (Ya se hizo con micrómetro, siendo conveniente hacerlo con medidores de espesores metálicos si se tiene)

Después de Retirar las probetas:

- Inspección visual de las probetas.
- Documentación fotográfica de las probetas con y sin incisión antes y después de la limpieza.
- Medición de pérdida de peso de tres probetas.
- Evaluación de la corrosión en una probeta con incisión.
- Identificación de productos de corrosión
- Morfología de los productos de corrosión.
- Ensayos electroquímicos (por definir)

1.3.5. Procedimientos de Evaluación de Resultados.

En las figuras 1.2, 1.3, 1.4 se detallan las rutas críticas a seguir, el procedimiento de análisis de las muestras. Al instalar las probetas se fotografiará el estado inicial de las probetas, cada doce meses se observarán y se reportarán si aparecen productos de corrosión del acero en las incisiones y el estado de las superficies de las galvanizadas (productos de corrosión de zinc y del acero)

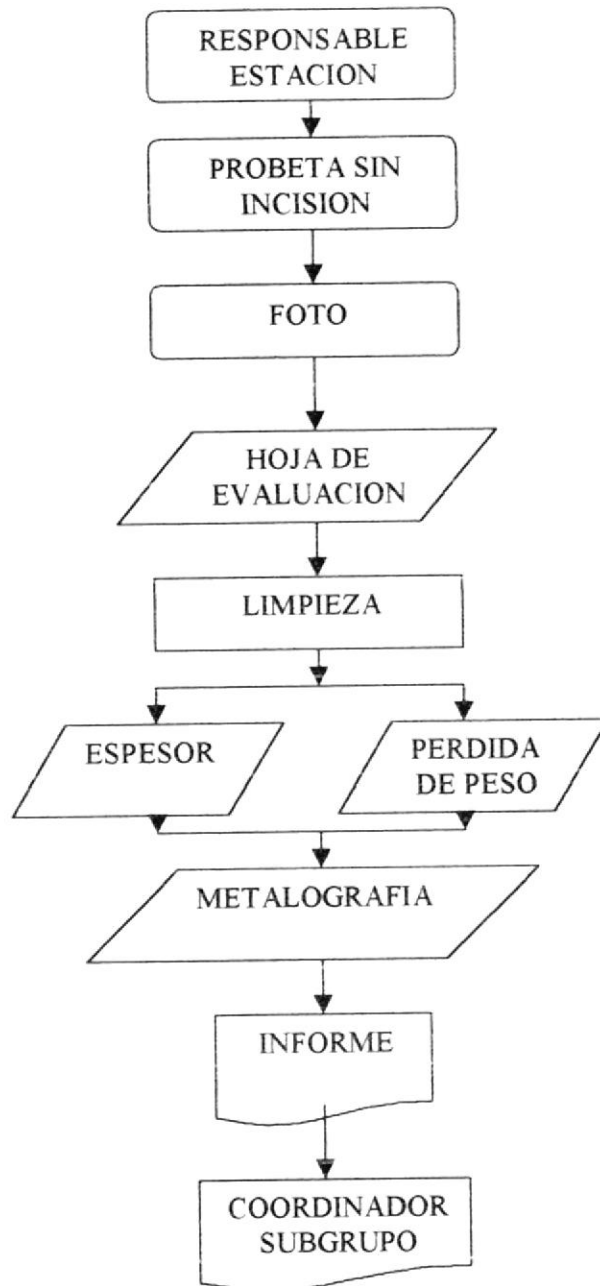


FIGURA 1.2. RUTA CRITICA- PROBETAS POR PERDIDA DE PESO



FIGURA 1.3. RUTA CRITICA- PROBETAS DE METALIZADO SIN INCISION

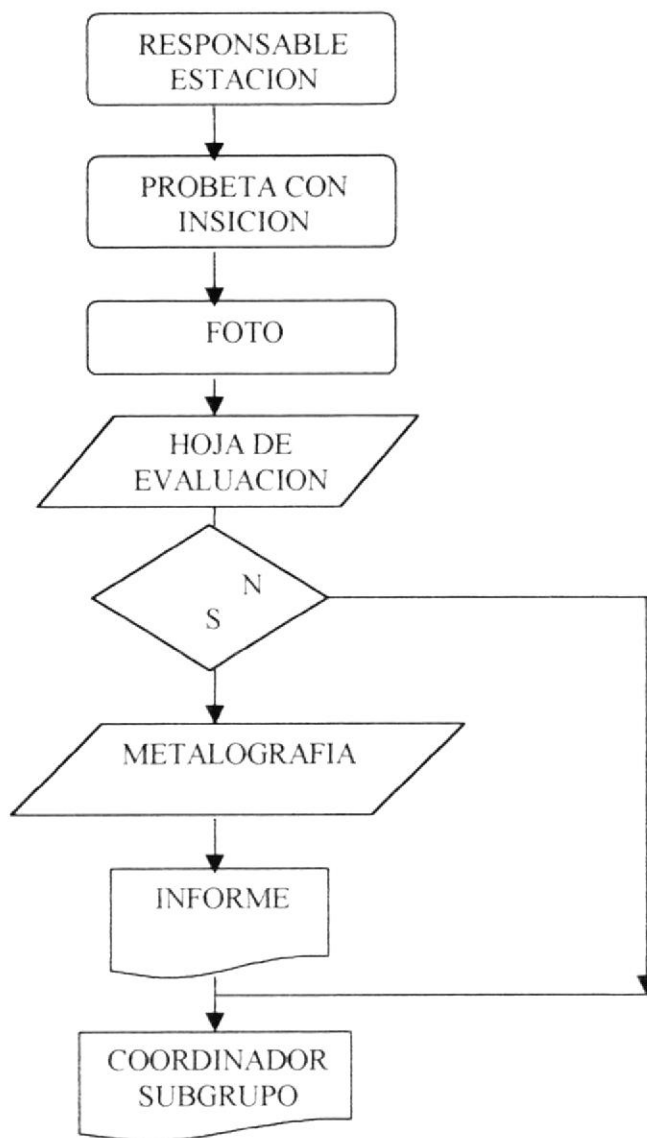


FIGURA 1.4. RUTA CRITICA-PROBETAS CON INSICION GALVANIZADAS Y METALIZADAS

Se requiere que se fotografien las probetas antes y después de la exposición especialmente las que tienen incisión para propósitos comparativos.

Después de la exposición en los paneles de diferentes medios ambientales: rural, urbana, marina, costera y especiales, los especímenes se retiran, se fotografían y se enjuagan con agua destilada se secan y se pesan. Se limpian en una solución de 200 g de trióxido de cromo disuelta en 1000 ml de agua destilada por un minuto a 80 °C, se enjuagan con agua destilada y se pesan, se continúa con la limpieza hasta que ya no registre pérdida de peso (ISO 9223, 9224, 9225 y 9226).

Después de retiradas y fotografiadas las probetas, se llena la hoja de evaluación y se envía al coordinador. Se realiza la limpieza para posteriormente medir espesores y pérdidas de pesos, se hace una metalografía para observar el comportamiento del metal base.

En el caso de las probetas de metalizado sin incisión se considera la medición de espesores, la metalografía y la

elaboración de informe para enviar al coordinador, incluyendo datos medios ambientales.

Para el caso de las probetas con incisión se utilizara esta también para los estudios especiales además de la evaluación de la incisión. Al retirar se tomara fotografías de los productos de corrosión y de la incisión. Se llenará la hoja de evaluación y ya sea que se envíe al coordinador o bien se prosigue con la evaluación. Esta incluye metalografías en la incisión, morfología y análisis de productos de corrosión. Elabora el informe que será enviado al coordinador. Para las metalizadas se reportará el estado de sellador de poros (Cambio de Color, Brillo, Etc)

En caso de no poder hacer todo o parte de las evaluaciones, entonces se remitirá las probetas al coordinador. Los resultados de las observaciones se anotaran en las planillas de evaluación y se entregara a los coordinadores del sub.-grupo.

Se recomienda que las probetas que no presenten recubrimiento en los bordes se inspeccionan con lupa para observar la existencia de ataque localizado.

Ensayos Especiales

Resulta interesante considerar pruebas aceleradas en cámara de niebla salina, cíclica de mojado y secado u otra: así como estudios por métodos electroquímicos en campo o laboratorio para determinar mecanismos de corrosión ya sea en las probetas previamente expuestas o bien en probetas sin exponer (pero esto se decidirá más adelante)

Se requiere evaluar los productos de corrosión mediante microscopio electrónico de barrido, y microscopio electrónico analítico. Se pueden considerar algunos estudios especiales en laboratorio para países que deseen participar como son pruebas aceleradas en cámara de niebla, estudios electroquímicos, análisis de productos de corrosión y otros. Esto tiene que discutirse para determinar el interés y las facilidades de laboratorio con que cuentan los participantes. Se puede realizar un estudio comparativo de niebla salina o cámara cíclica de humedad y secado entre los diferentes recubrimientos y su comportamiento en medio ambiente natural registrando el estado superficial. Para estudios electroquímicos se requiere estudiar el mecanismo de corrosión mediante curvas de polarización e impedancia faradaica en laboratorio.

Inspección Visual.

En la inspección visual se tomará en cuenta el recubrimiento, los bordes, la incisión y llevarán una hoja de evaluación.

Se limpiarán con agua destilada para posteriormente ser fotografiadas y acompañarán a las planillas que corresponde cada observación.

Medición de espesores.

La medición de espesores se realizará utilizando la norma ISO 2178, en la figura 1.5 se muestran los puntos en las probetas que serán evaluados.

La medición de espesores se realizará a las probetas sin incisión de metalizado.

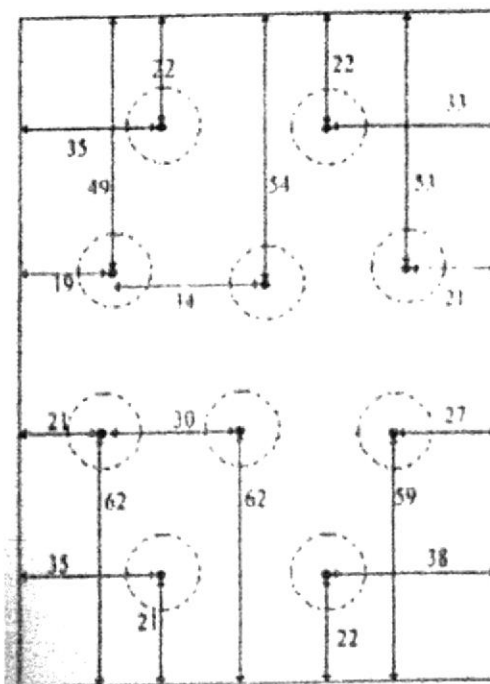


FIGURA 1.5. ESQUEMA PATRON DE LOS VALORES DE CP

Velocidad de corrosión.

Las probetas analizadas serán las de galvanizado, electrozincado, senzimir y galfan, la velocidad de corrosión se calcula con la pérdida de peso con la ecuación 1, se presenta un media con los valores de los pesos y posteriormente con la

con la ecuación 2 se procede a presentar los datos de la velocidad de corrosión.

$$\Delta_w = w_i - w_f \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$V_{\text{corr}} = W / (t \times A) \quad \text{Ecuación (2)}$$

También se presenta en tablas las masas iniciales y finales de las probetas

Ensayos Metalograficos.

Las pruebas de las metalografías se harán a las probetas con incisión, siguiendo la norma ISO 1463, que recomienda hacer en la zona de incisión, una sección transversal de acuerdo a las figuras 1.6 y 1.7 Vale recalcar que las metalografías están a 100 aumentos

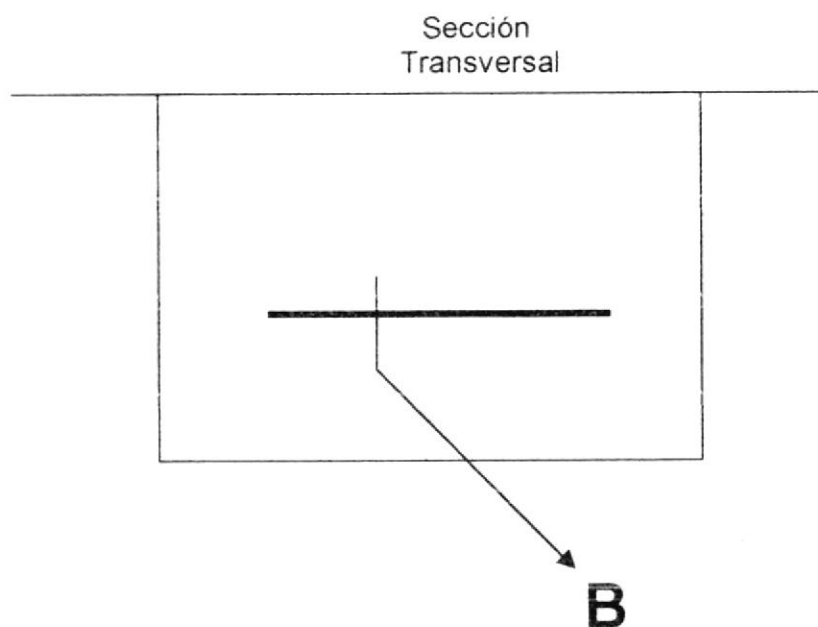


FIGURA 1.6. SECCIÓN TRANSVERSAL DE PROBETA PARA METALOGRAFÍA

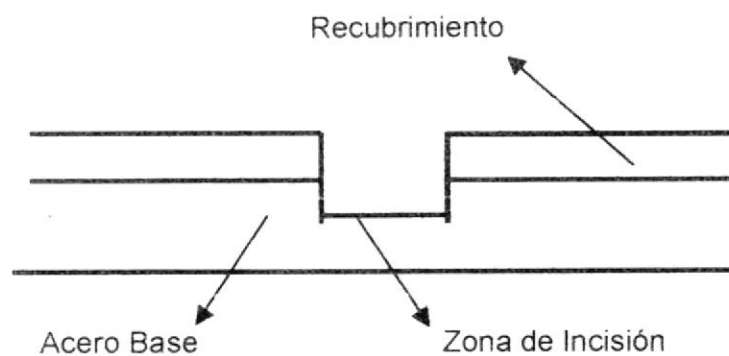


FIGURA 1.7. ZONA TRANSVERSAL DE INCISIÓN PARA METALOGRAFÍA

CAPITULO 2

2. RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE 42 MESES DE EXPOSICION SOBRE LOS RECUBRIMIENTOS METALICOS.

2.1. Actividades Realizadas durante la Retirada de Probetas

Se ha procedido con la retirada de probetas, y se ha seguido las rutas criticas ya establecidas como lo es la inspección visual, fotografías, medición de espesor, pérdida de peso y las metalografías.

2.2. Galvanizado

En las tablas II, III, IV, V, se muestran las planillas de evaluación de resultados, el estado de las probetas se documenta con las figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y los valores de pérdida de peso en la tabla VI.

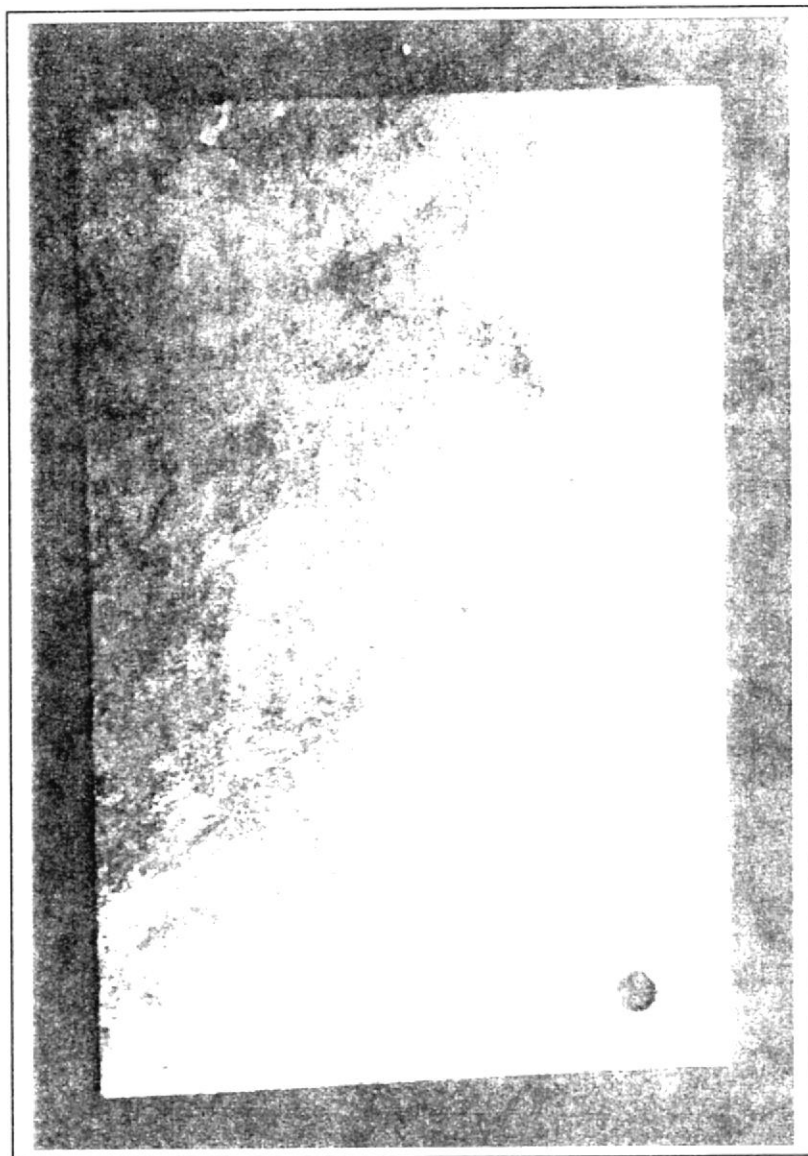


FIGURA 2.1 PROBETA TESTIGO GALVANIZADO

2.2.1. PLANILLA DE RESULTADOS

TABLA II

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALVANIZADO, 12 MESES

Identificación: 1EX1-1ES12

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 12 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.11.1997

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Se presenta corrosión en forma de puntos que pertenecen al revestimiento

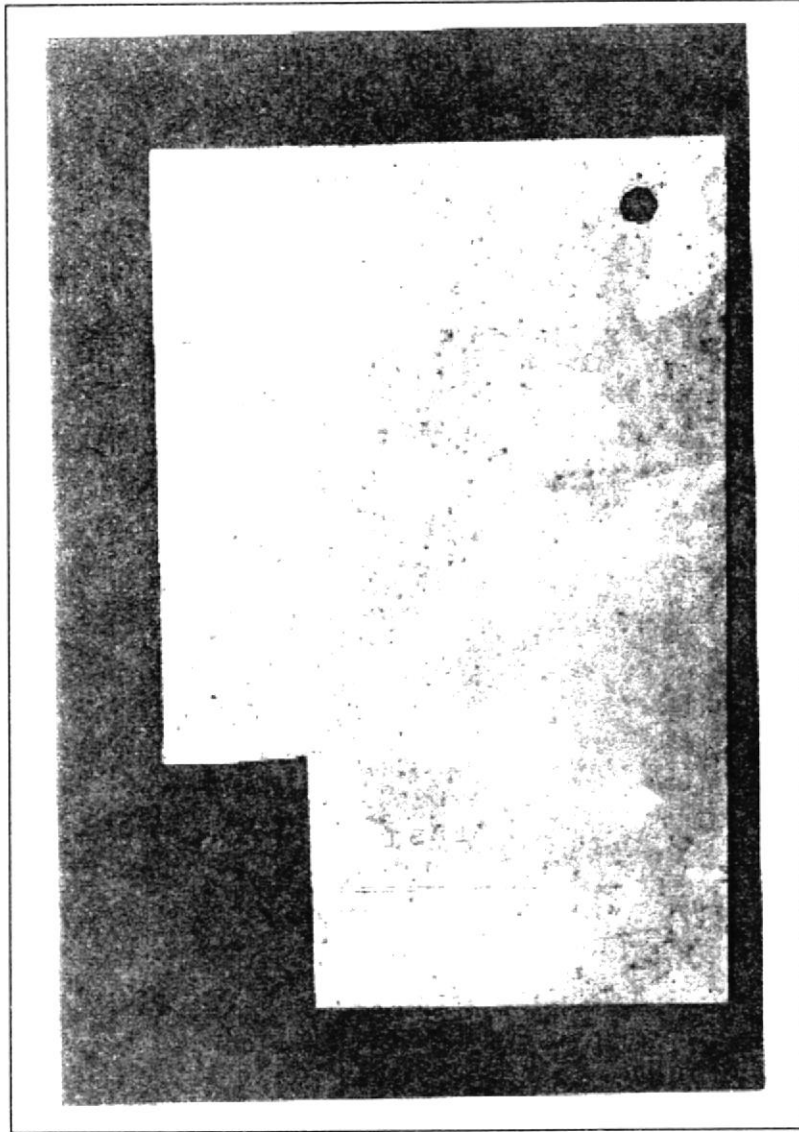


FIGURA 2.2 PROBETA GALVANIZADO 1EX1, 12 MESES

TABLA III

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALVANIZADO, 24 MESES

Identificación: 1EX2-1ES22

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 24 meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.16.1998

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Se presenta corrosión en forma de puntos que pertenecen al revestimiento



FIGURA 2.3 PROBETA GALVANIZADO 1EX2, 24 MESES

TABLA IV

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALVANIZADO, 36 MESES

Identificación: 1EX3-1ES32

EVALUADOR: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

EXPOSICION: 36 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de Evaluación: Abr.8.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4). CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Respecto a la zona con incisión, se aprecia una leve formación de focos de corrosión del metal base; lo cual ha sido impedido por la buena protección catódica que le ha conferido el revestimiento de galvanizado.



FIGURA 2.4 PROBETA GALVANIZADO 1EX3, 36 MESES

TABLA V

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALVANIZADO, 42 MESES

Identificación: 1EX3-1ES31

Evaluador: Manuel Huamán.

Estación: Esmeraldas

Exposición: 42 meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de Evaluación: Oct.14.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE
SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4). CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- La corrosión es evidente, se aprecia coloración marrón y puntos negros claro que en toda la superficie expuesta. Respecto a la zona con incisión, se aprecia formación de focos de corrosión del metal base.

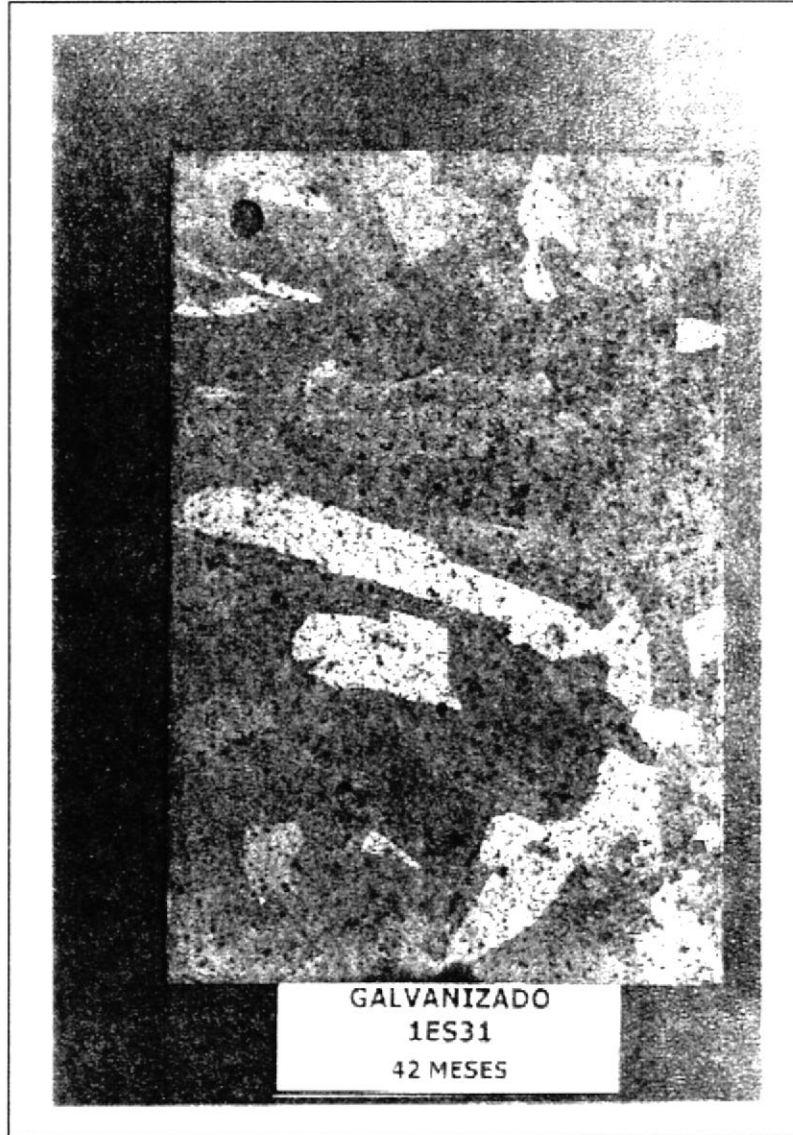


FIGURA 2.5 PROBETA GALVANIZADO 1ES31, 42 MESES

2.2.2. Pérdida de Peso.

El resultado de la pérdida de peso de las probetas de galvanizado se presenta en la tabla VI.

TABLA VI
PESOS PROBETAS GALVANIZADO

GALVANIZADO				
MESES	IDENTIFICACIÓN	W _o (g)	W _F (g)	ΔW (g)
12	1ES11	157,07	156,64	0,13
	1ES12	152,97	152,86	0,11
	1ES13	154,68	154,57	0,11
24	1ES21	151,71	151,27	0,44
	1ES22	153,25	152,59	0,66
	1ES23	154,28	153,75	0,53
42	1ES31	151,83	150,86	0,97
	1ES32	154,56	153,57	0,99
	1ES33	151,71	150,66	1,05
AREA DE LA MUESTRA: 300 cm ²				

2.3. Metalizado

El comportamiento de las probetas se documenta con las figuras 2.6 hasta 2.10 durante la exposición, empezando con la probeta testigo.

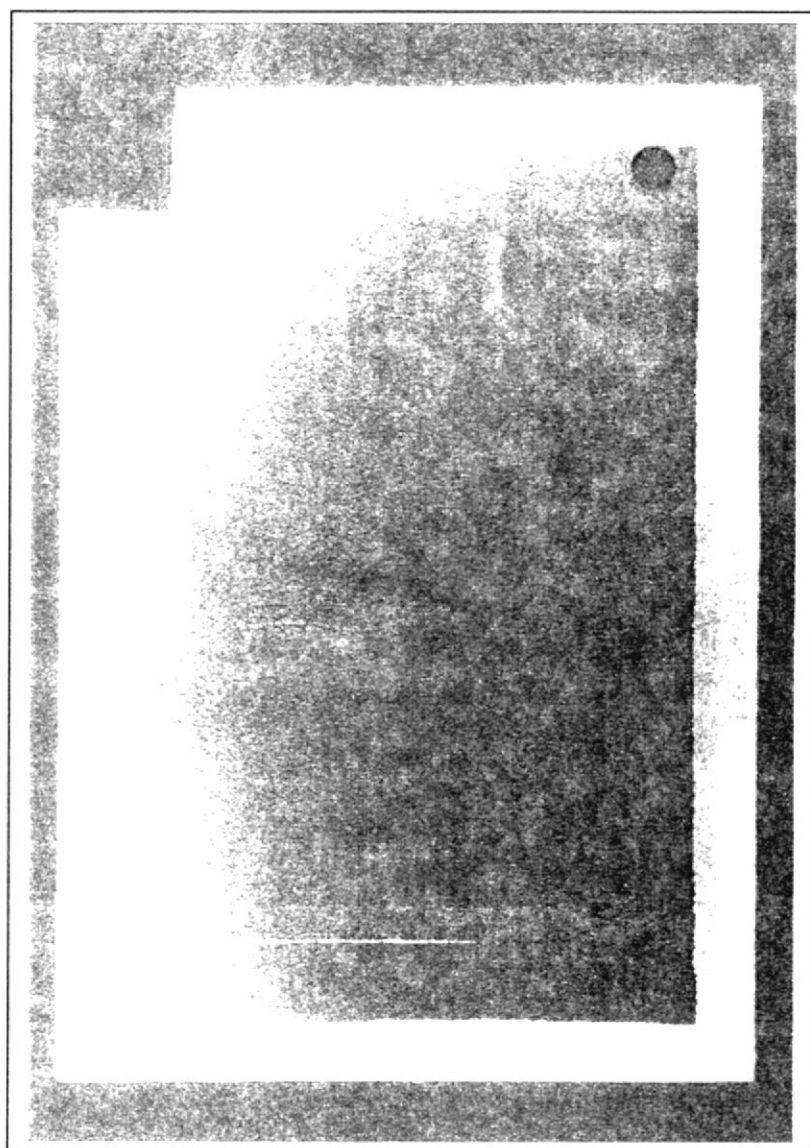


FIGURA 2.6 PROBETA TESTIGO METALIZADO

2.3.1. PLANILLA DE RESULTADOS

Los resultados visuales de acuerdo al formato son expuestos en las tablas VII, VIII, IX, X durante los meses de exposición.

TABLA VII

PLANILLA DE RESULTADOS DE METALIZADO, 12 MESES

Identificación: 2EX1-2ES1

Estación: Esmeraldas

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Evaluador: Manuel Huamán

Exposición: 12 Meses

Fecha de evaluación: Abr.11.1997

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

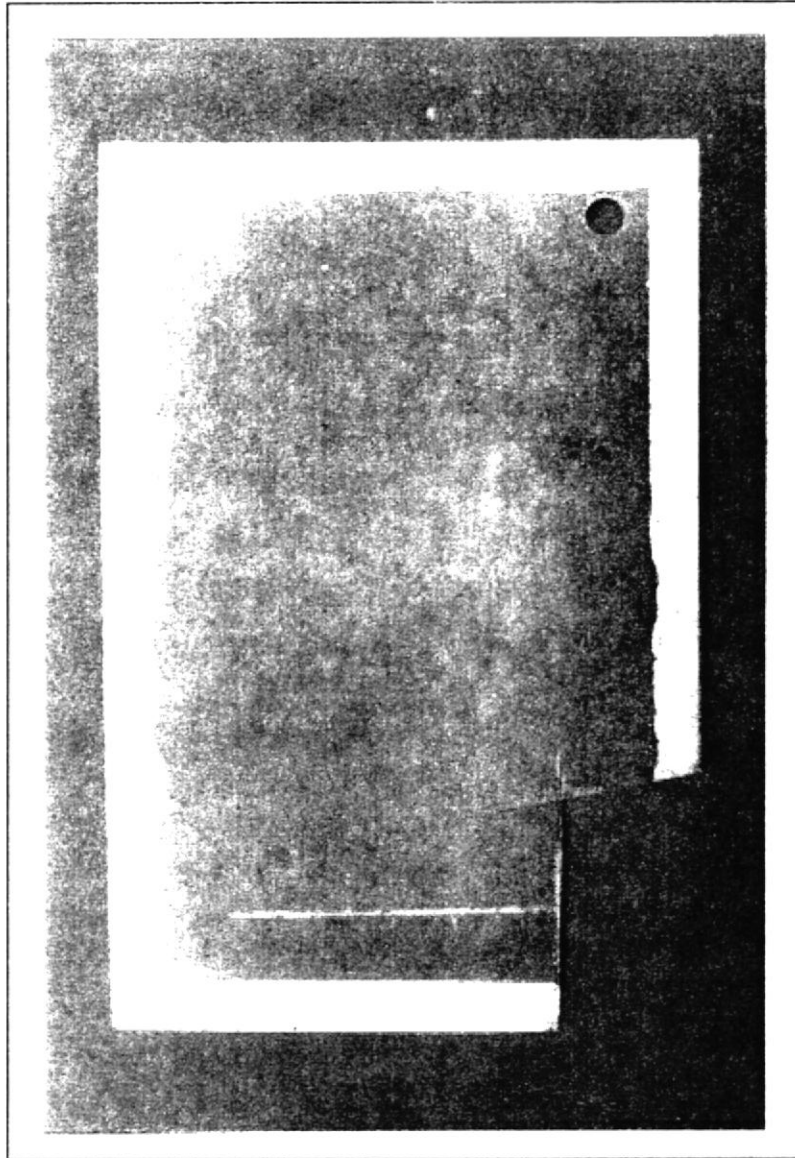


FIGURA 2.7 PROBETA METALIZADO 2EX1, 12 MESES

TABLA VIII

PLANILLA DE RESULTADOS DE METALIZADO, 24 MESES

Identificación: 2EX2-2ES2

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 24 Meses

Fecha de exposición: Abr. 11. 1996

Fecha de evaluación: Abr. 16. 1998

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Presenta corrosión en un 35% y no se presenta avance de formación de productos de corrosión partir de la incisión.

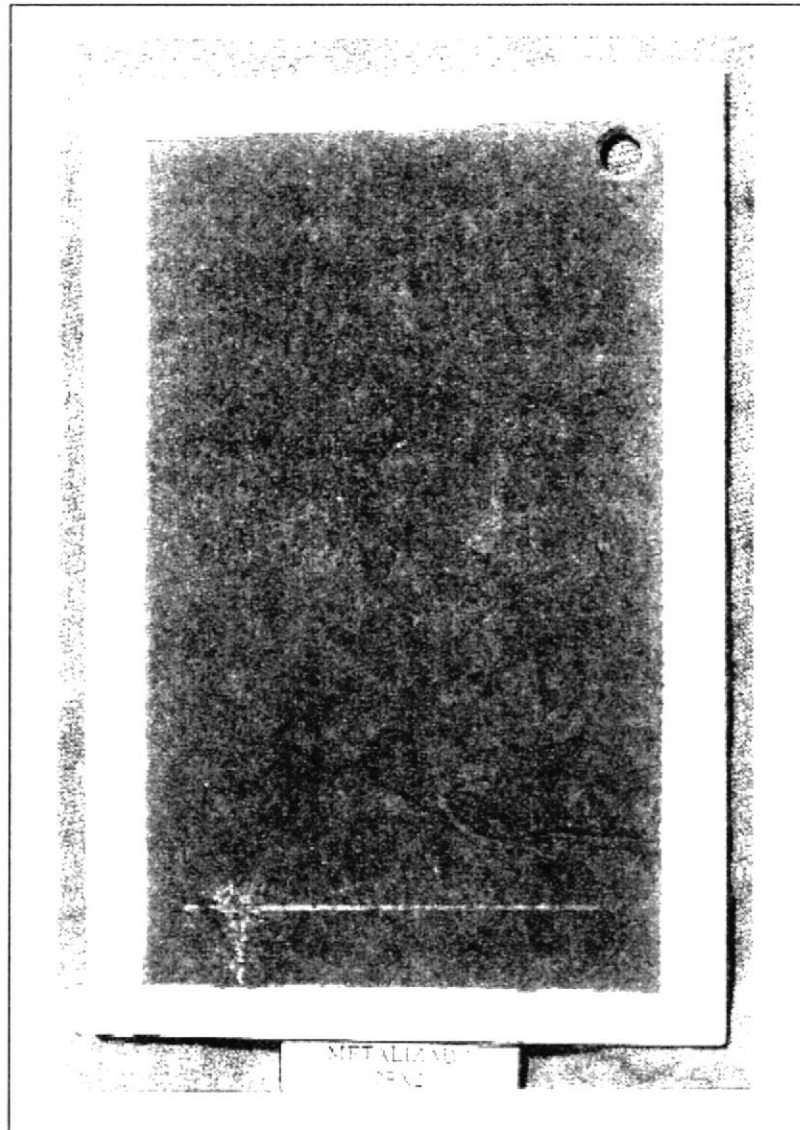


FIGURA 2.8 PROBETA METALIZADO 2EX2, 24 MESES

TABLA IX

PLANILLA DE RESULTADOS DE METALIZADO, 36 MESES

Identificación: 2EX3-2ES3

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 36 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.8.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- El revestimiento presenta decoloración, tornándose opaco.
- La corrosión del sustrato se ha presentado en formas de manchas oscuras en forma uniforme en toda la superficie.
- Respecto a la zona de incisión, no se manifiesta formaciones de focos de corrosión; lo que hace pensar que ha existido buen comportamiento de la protección catódica.

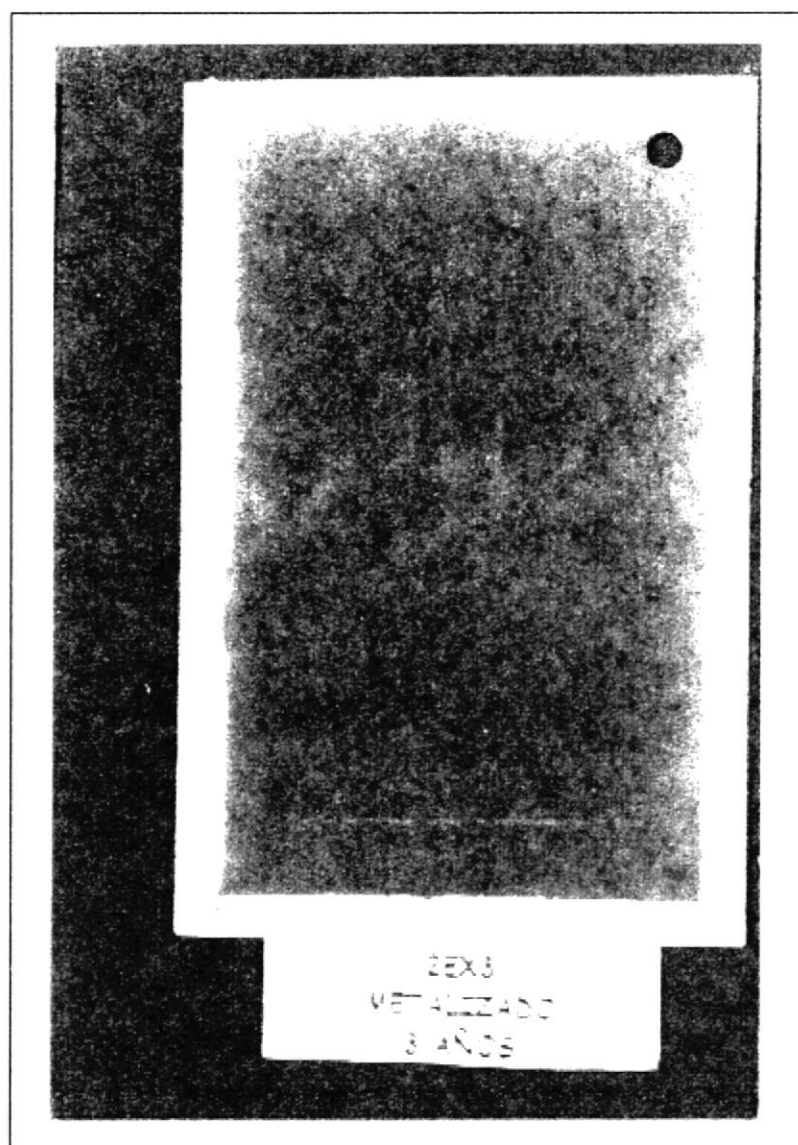


FIGURA 2.9 PROBETA METALIZADO 2EX3, 36 MESES

TABLA X

PLANILLA DE RESULTADOS DE METALIZADO, 42 MESES

Identificación: 2EX3-2ES3

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 42 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Oct.14.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE
SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4). CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- El revestimiento presenta decoloración, tornándose opaco y manchas de color marrón. La corrosión del sustrato se ha presentado en formas de manchas oscuras en forma uniforme en toda la superficie.
- En la zona de incisión, no existen focos de corrosión. La decoloración es evidente y se ha tornado mucho mas claro que la testigo.

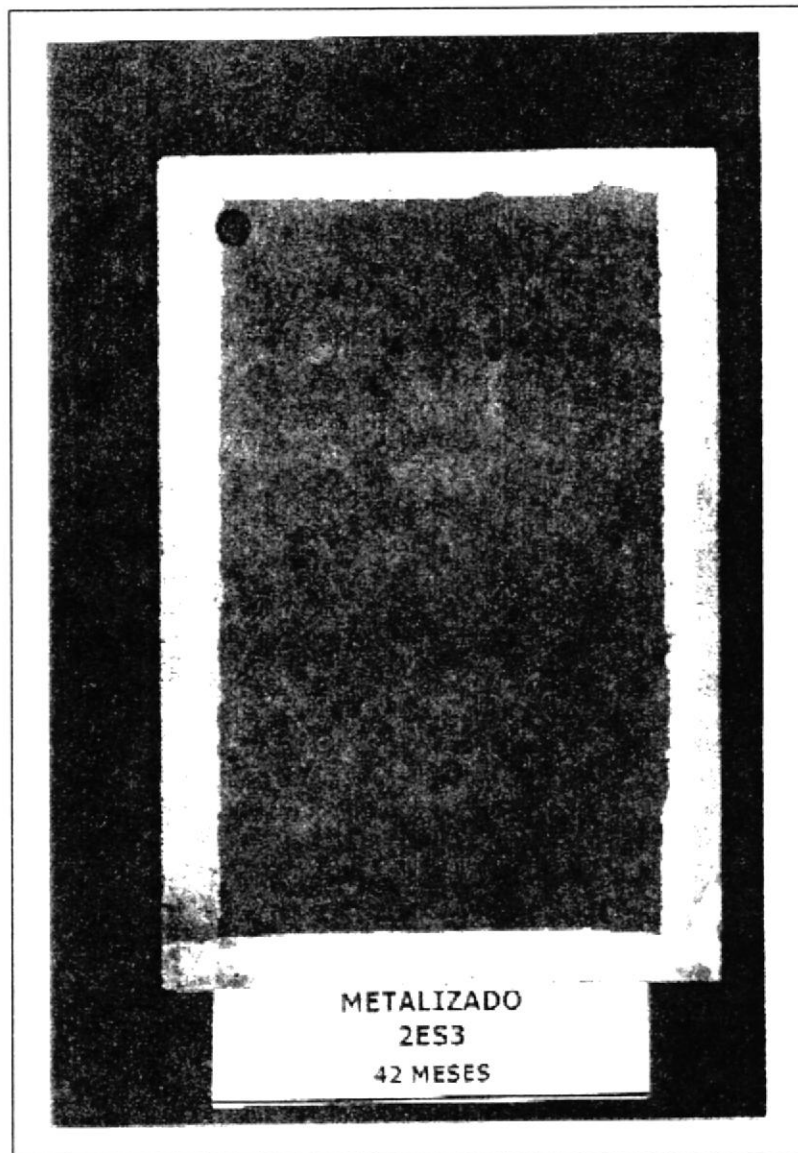


FIGURA 2.10 PROBETA METALIZADO 2ES3, 42 MESES

2.3.2. Medición de Espesor

Los resultados de los espesores de las probetas de metalizado se presentan en la tabla XI, en la que se aprecian un decrecimiento del espesor durante los 42 meses evaluados.

TABLA XI
ESPEORES METALIZADO

METALIZADO											
MESES	VALORES DE ESPEORES (um)										PROMEDIO
12	5,5	5,9	5,6	5,4	6,7	4,8	4,9	4,9	5,4	5,5	5,46
24	5,2	5,4	5,3	5,2	5,0	5,3	5,7	5,8	5,2	5,2	5,33
42	5,1	5,1	5,6	5,1	5,3	5,0	5,5	5,4	5,1	5,2	5,24

2.4. Electrozincado

Se presentan las fotografías durante los 42 meses de exposición respectivamente en las figuras 2.11, 2.12, 2.13.

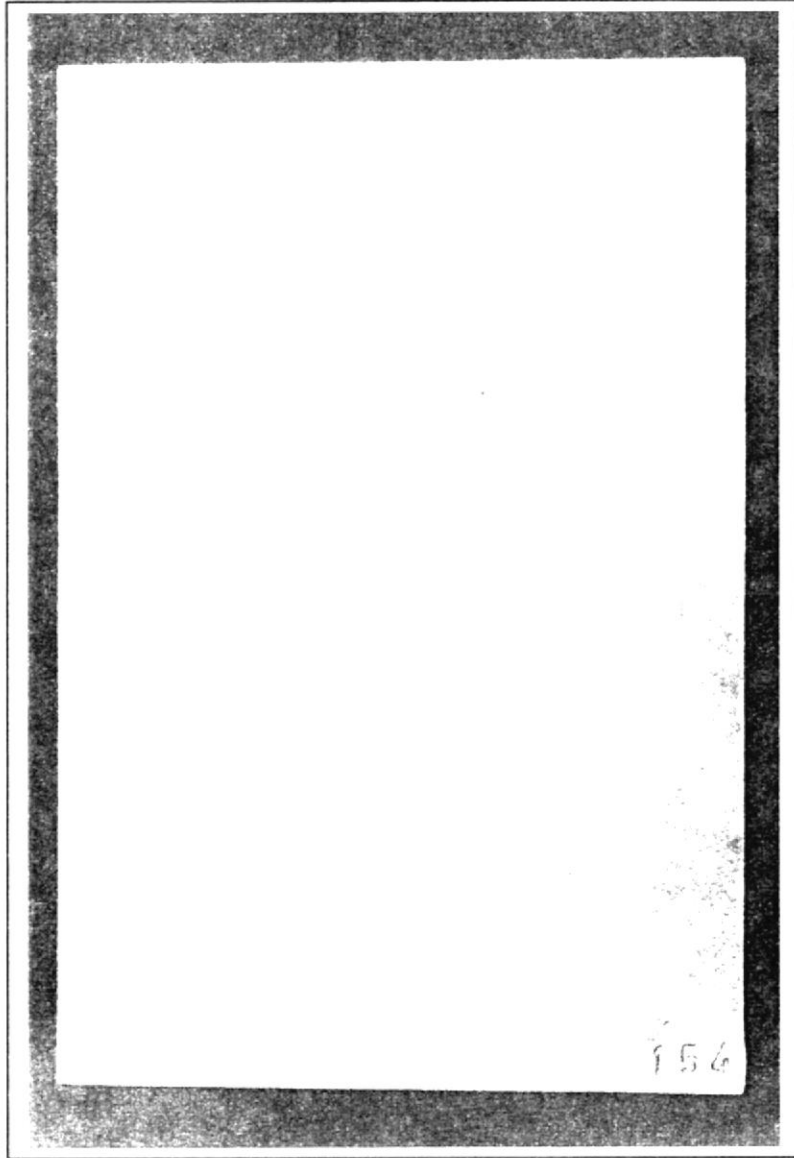


FIGURA 2.11 PROBETA TESTIGO ELECTROZINCADO

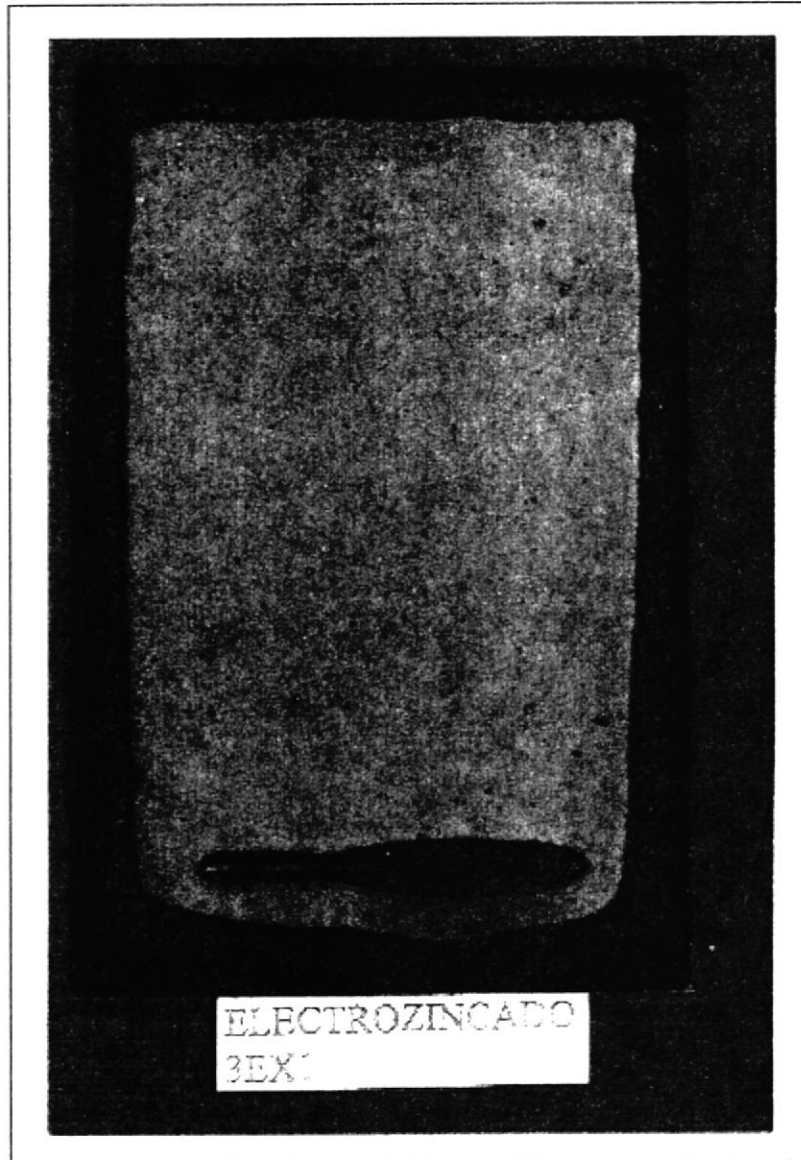


FIGURA 2.12 PROBETA ELECTROZINCADO 3EX1, 12 MESES

TABLA XIII

PLANILLA DE RESULTADOS DE ELECTROZINCADO, 24 MESES

Identificación: 3EX2-3ES23

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 24 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.16.1998

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Se ha presentado corrosión en un 100%, producto del sustrato es decir la incisión ha desaparecido.

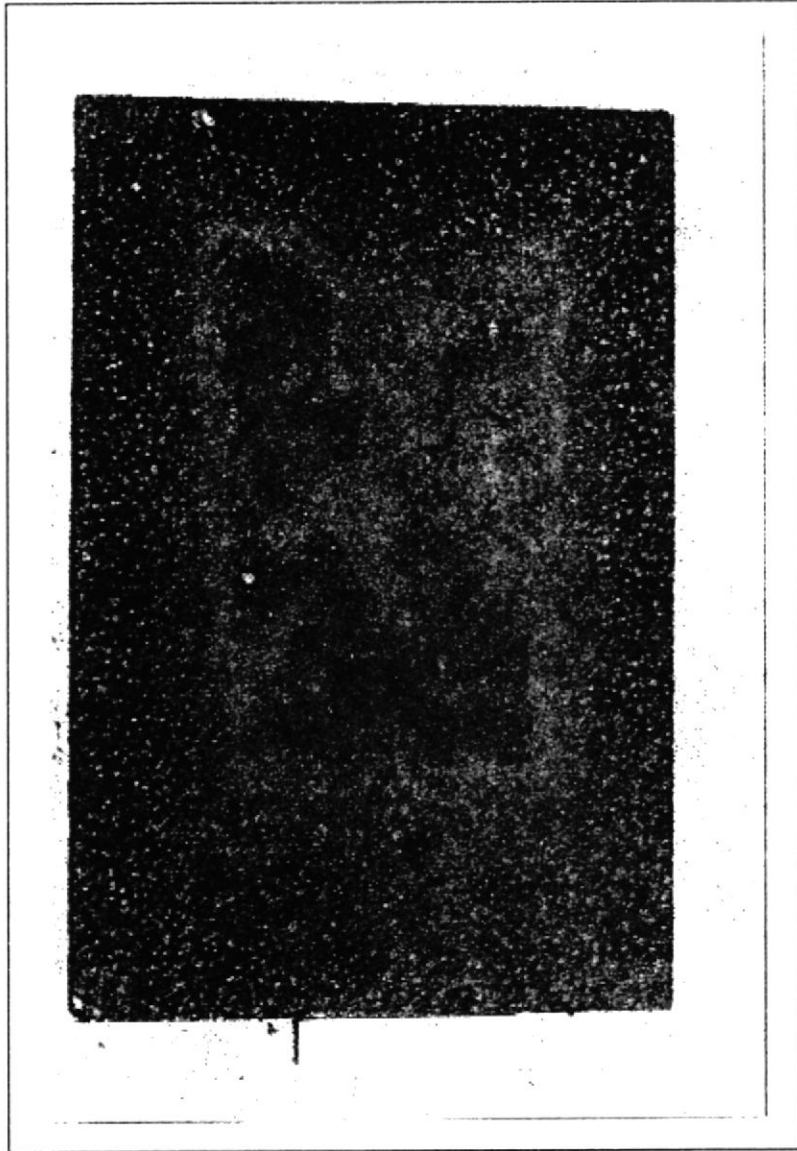


FIGURA 2.13 PROBETA ELECTROZINCADO 3EX2, 24 MESES

2.4.2. Pérdida de Peso.

En la tabla XIV se presentan los resultados de pérdida de peso durante 12, 24 meses de exposición.

TABLA XIV
PESOS PROBETAS ELECTROZINCADO

ELECTROZINCADO				
MESES	IDENTIFICACIÓN	W _o (g)	W _F (g)	ΔW (g)
12	3ES11	139,8362	137,9620	1,8742
	3ES12	139,0674	137,2019	1,8655
	3ES13	139,5747	137,3491	2,2256
24	3ES21	140,0380	134,0050	6,0330
	3ES22	137,9464	131,0735	6,8729
	3ES23	140,2697	132,7271	7,5426
AREA DE EXPOSICION: 300 cm ²				

2.5. Senzimir

Las figuras 2.14 hasta 2.18 corresponden a las inspecciones visuales del grupo Senzimir durante el tiempo de exposición.

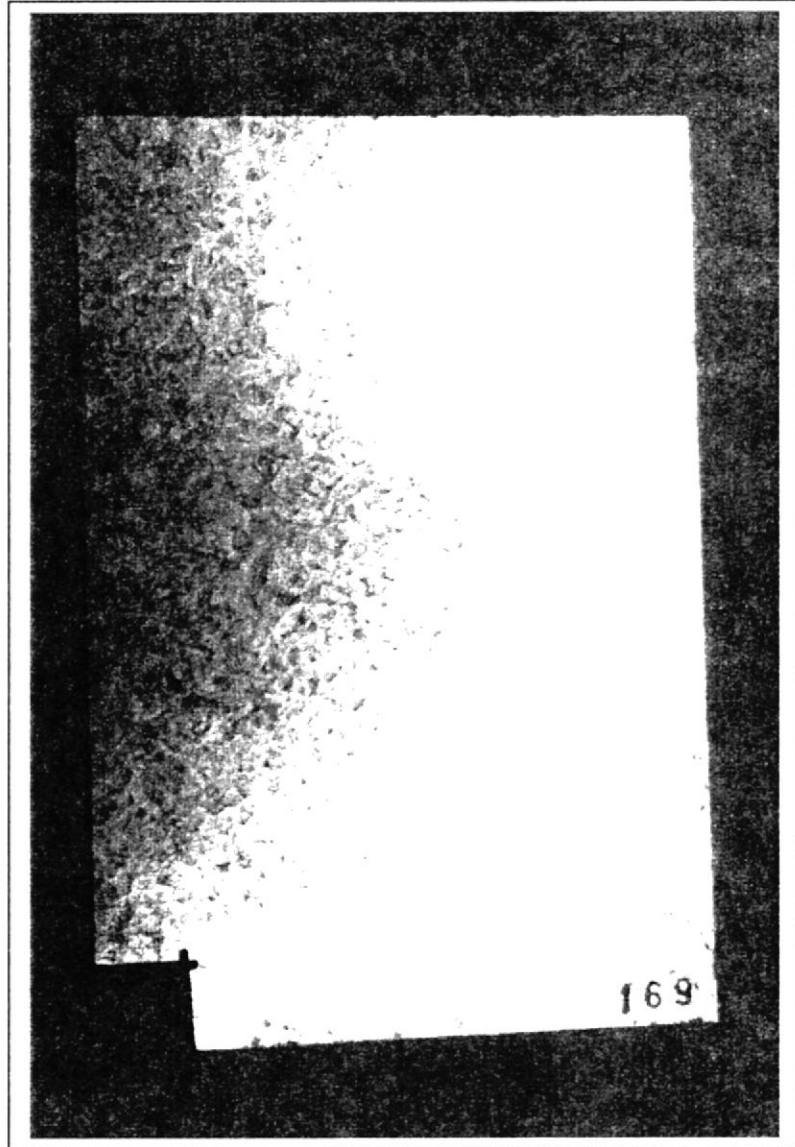


FIGURA 2.14 PROBETA TESTIGO SENZIMIR

2.5.1. PLANILLA DE RESULTADOS

Las tablas XV, XVI, XVII, XVIII presentan las planillas de resultados de las probetas de Senzimir.

TABLA XV

PLANILLA DE RESULTADOS DE SENZIMIR, 12 MESES

Identificación: 4EX1-4ES11

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 12 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.11.1997

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Presenta corrosión en el revestimiento, pero no herrumbre.

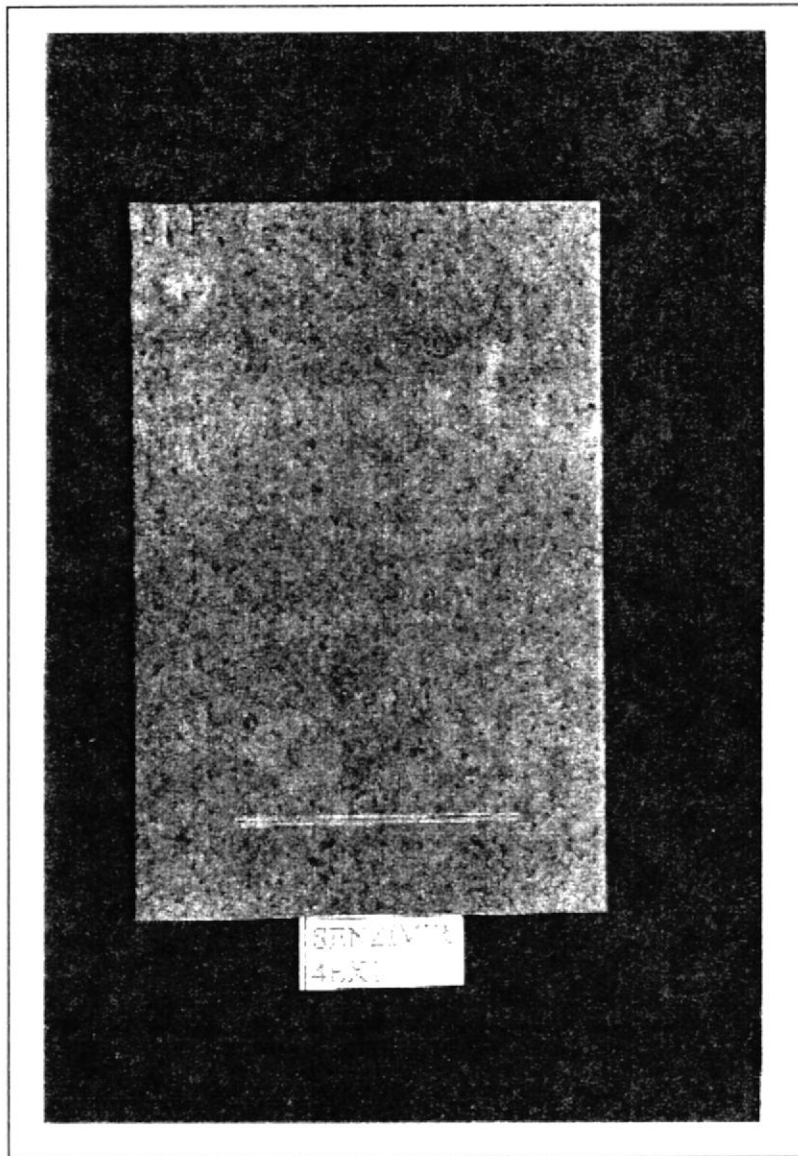


FIGURA 2.15 PROBETA SENZIMIR 4EX1, 12 MESES

TABLA XVI

PLANILLA DE RESULTADOS DE SENZIMIR, 24 MESES

Identificación: 4EX2-4ES22

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 24 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.16.1998

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Presenta corrosión un 45% proveniente del revestimiento, pero no herrumbre.

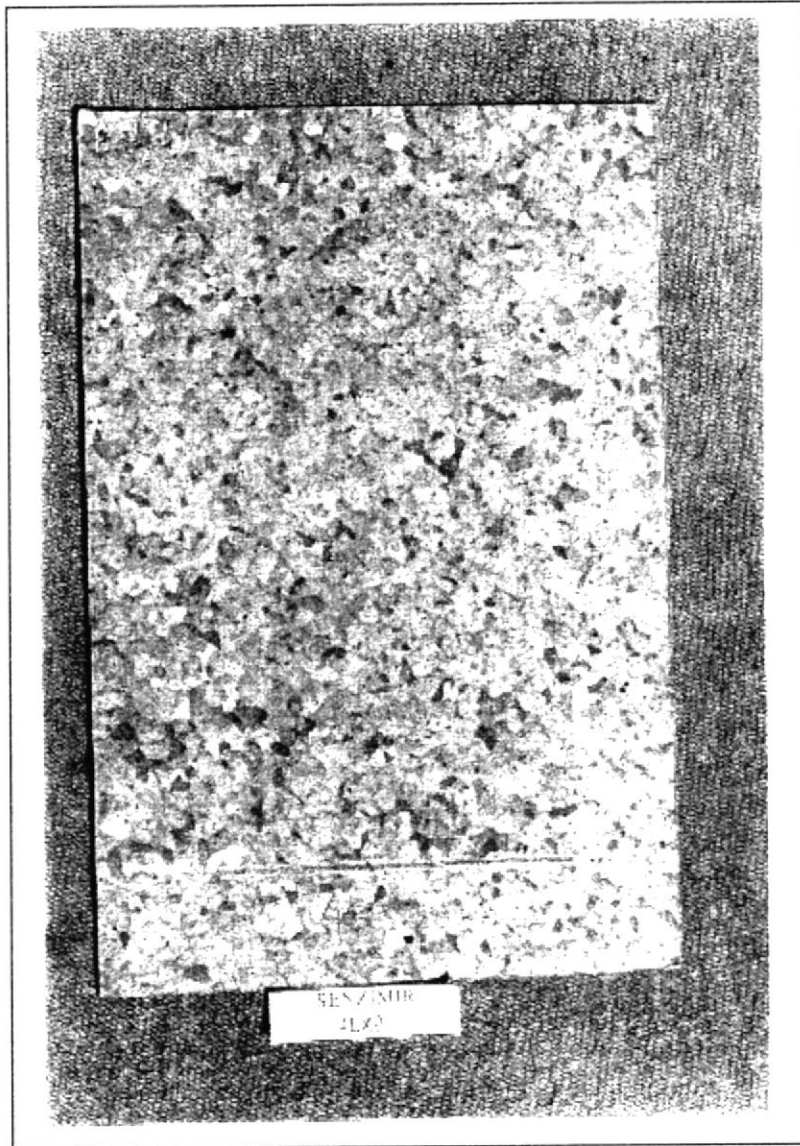


FIGURA 2.16 PROBETA SENZIMIR 4EX2, 24 MESES

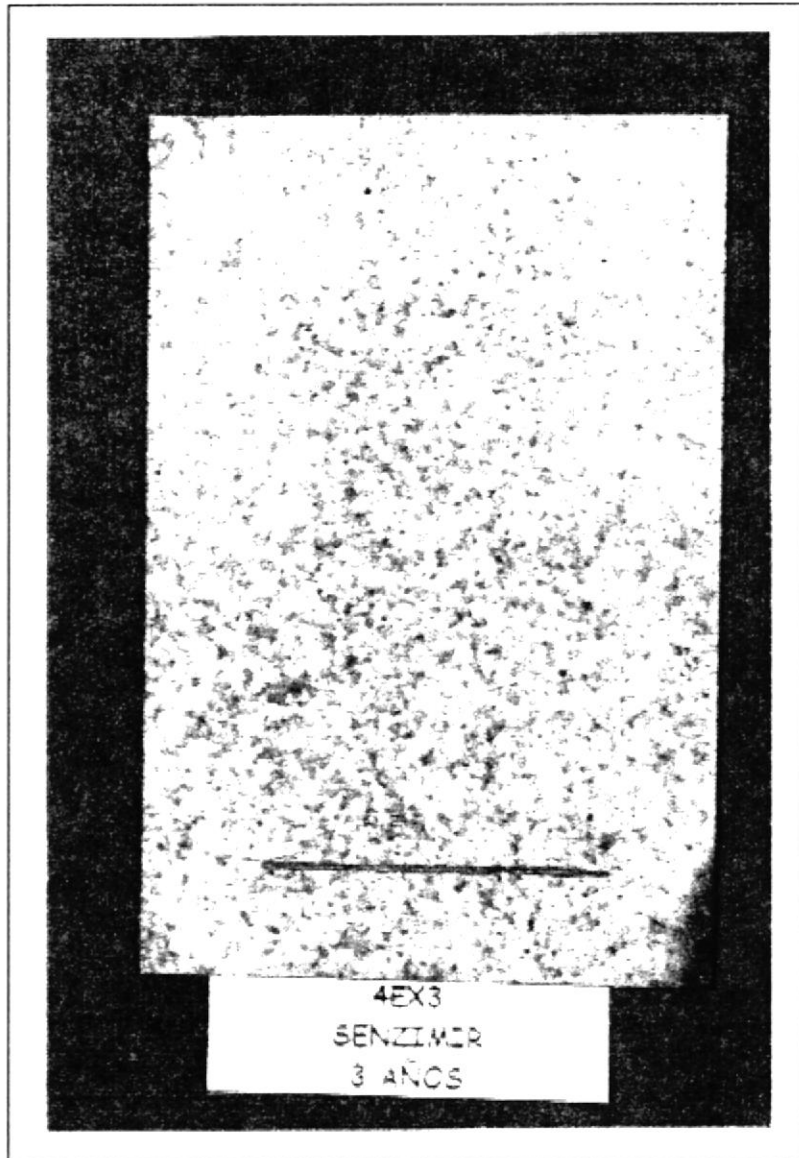


FIGURA 2.17 PROBETA SENZIMIR 4EX3, 36 MESES

TABLA XVIII

PLANILLA DE RESULTADOS DE SENZIMIR, 42 MESES

Identificación: 4EX3-4ES31

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 42 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Oct.14.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE
SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4). CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- La corrosión encontrada en el sustrato se ha incrementado notablemente a partir de los 24 meses.
- No se evidencian daños del sustrato en la zona de incisión.

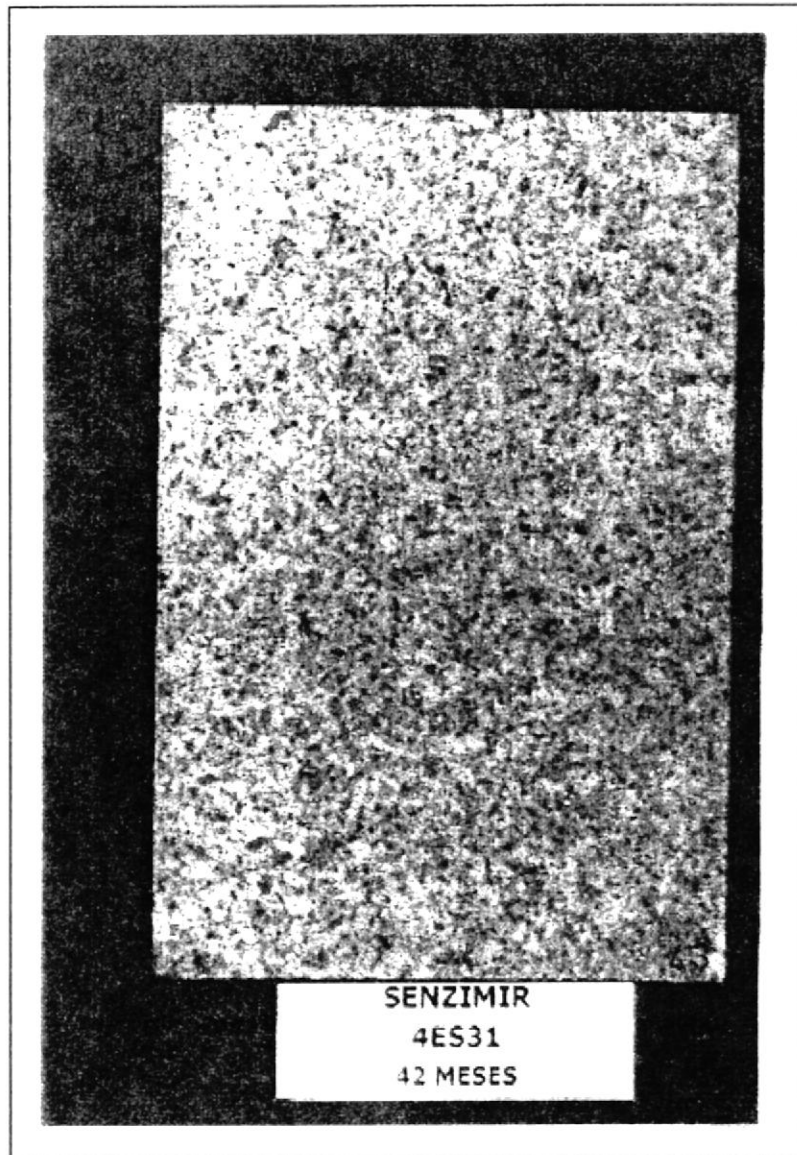


FIGURA 2.18 PROBETA SENZIMIR 4ES31, 42 MESES

2.5.2. Pérdida de Peso.

En la tabla XIX constan los valores de pérdida de peso para el senzimir durante la duración del proyecto.

TABLA XIX
PESOS PROBETAS SENZIMIR

SENZIMIR				
MESES	IDENTIFICACIÓN	W _o (g)	W _F (g)	ΔW (g)
12	4ES11	70,2738	70,1160	0,1578
	4ES12	70,2310	70,0681	0,1629
	4ES13	70,2643	70,1006	0,1637
24	4ES21	70,1667	69,7595	0,4072
	4ES22	70,2806	69,8721	0,4085
	4ES23	69,8860	69,4766	0,4094
42	4ES31	69,9721	69,1907	0,7814
	4ES32	69,8278	69,0716	0,7562
	4ES33	69,8779	69,0747	0,8032
AREA DE EXPOSICION: 300 cm ²				

2.6. Galfan

Las figuras 2.19 hasta 2.23 representan las fotografías de las probetas de Galfan, durante el proyecto, incluyendo la testigo.

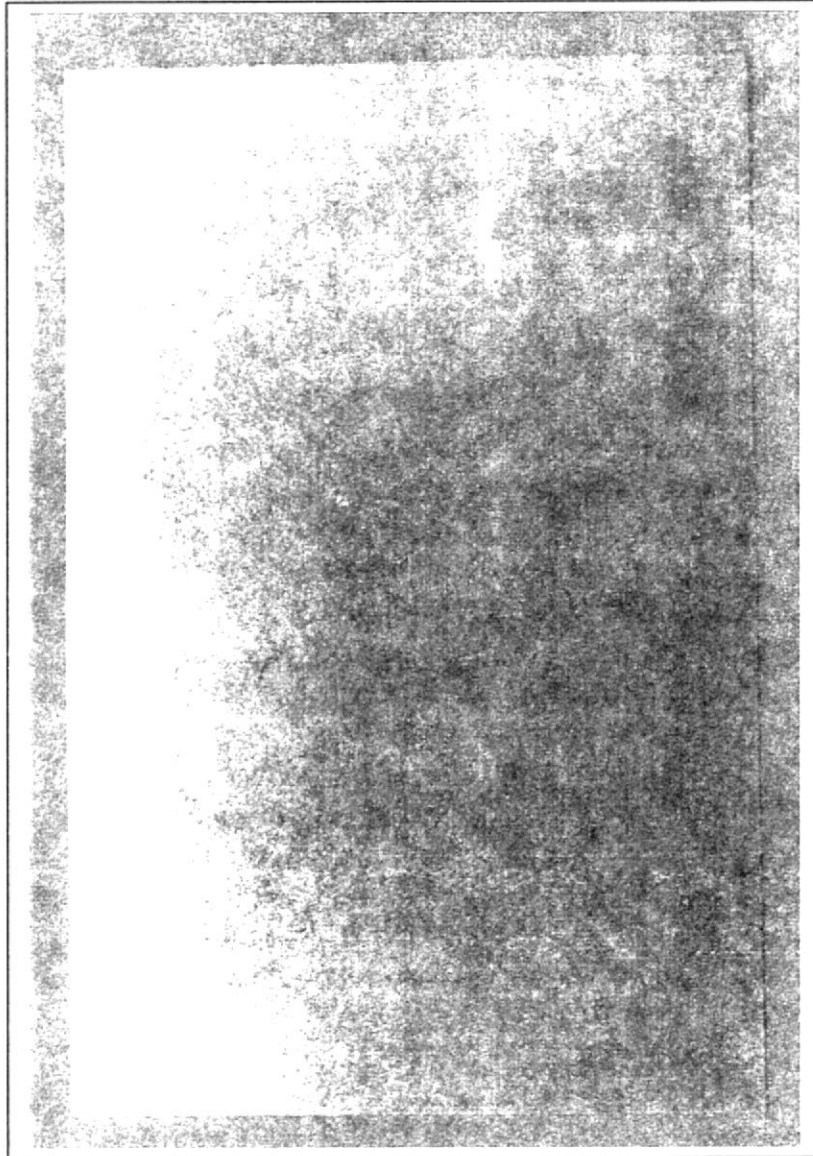


FIGURA 2.19 PROBETA TESTIGO GALFAN

2.6.1. Planillas de Resultados.

Las tablas XX hasta XXIII presentan las planillas de resultado para las probetas de Galfan, durante la duración del proyecto.

TABLA XX

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALFAN, 12 MESES

Identificación: 5EX1-5ES11

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 12 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.11.1997

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI NO

4) CORROSION EN LOS BORDES

SI NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- Se presentan puntos de color blanco pertenecientes al revestimiento.

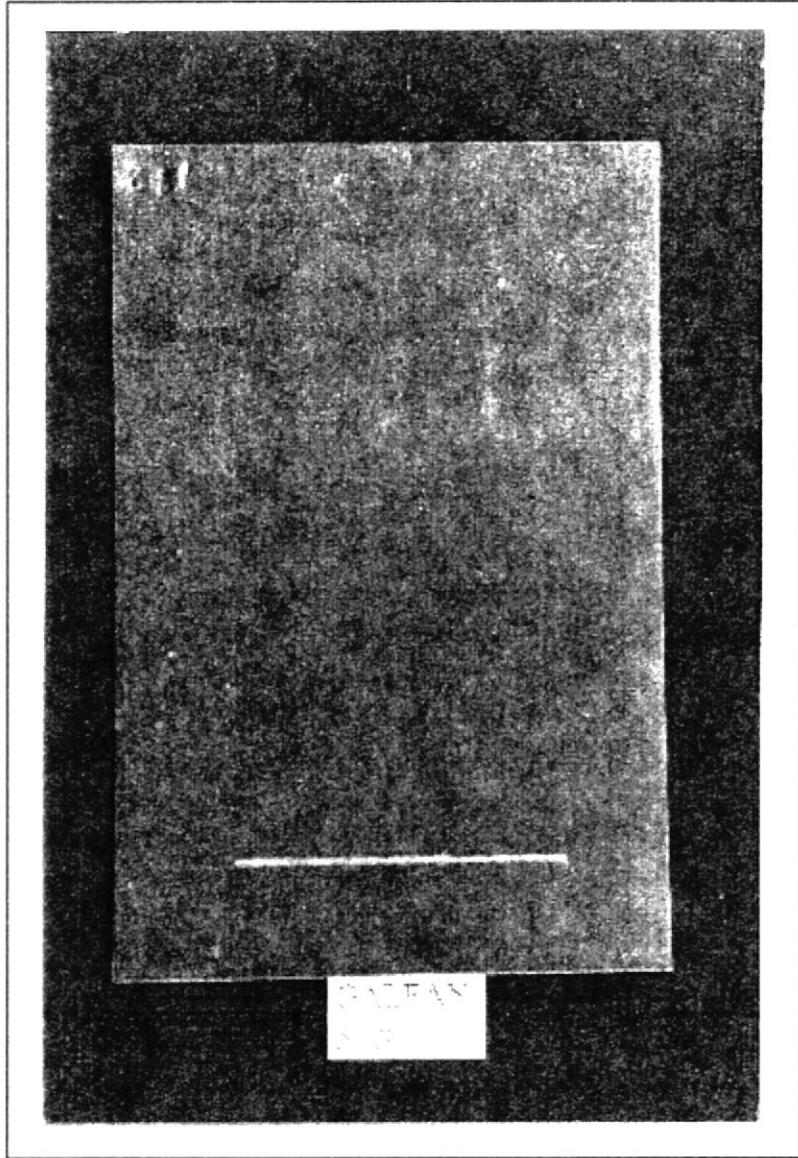


FIGURA 2.20 PROBETA GALFÁN 5EX1, 12 MESES

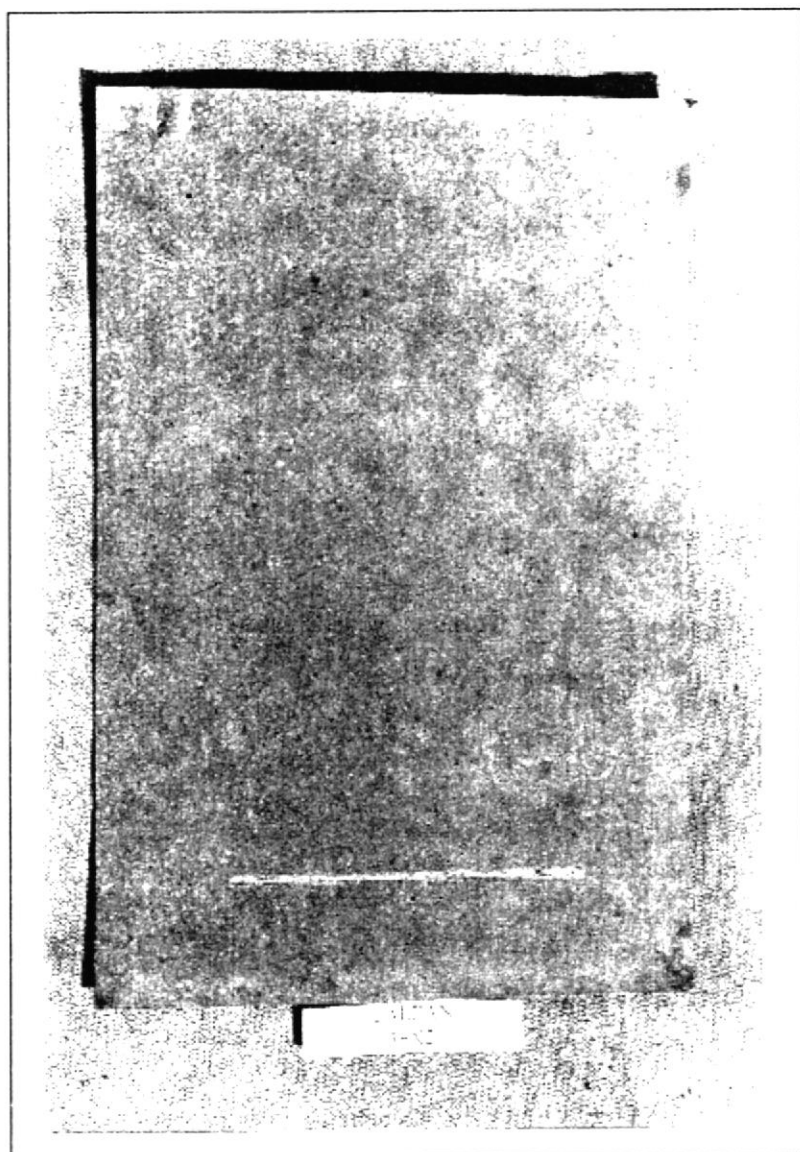


FIGURA 2.21 PROBETA GALFÁN 5EX2, 24 MESES

TABLA XXII

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALFAN, 36 MESES

Identificación: 5EX3-5ES31

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 36 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Abr.8.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4). CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- La corrosión encontrada en el sustrato se ha incrementado notablemente a partir de los 24 meses.
- No se evidencian daños del sustrato en la zona de incisión.

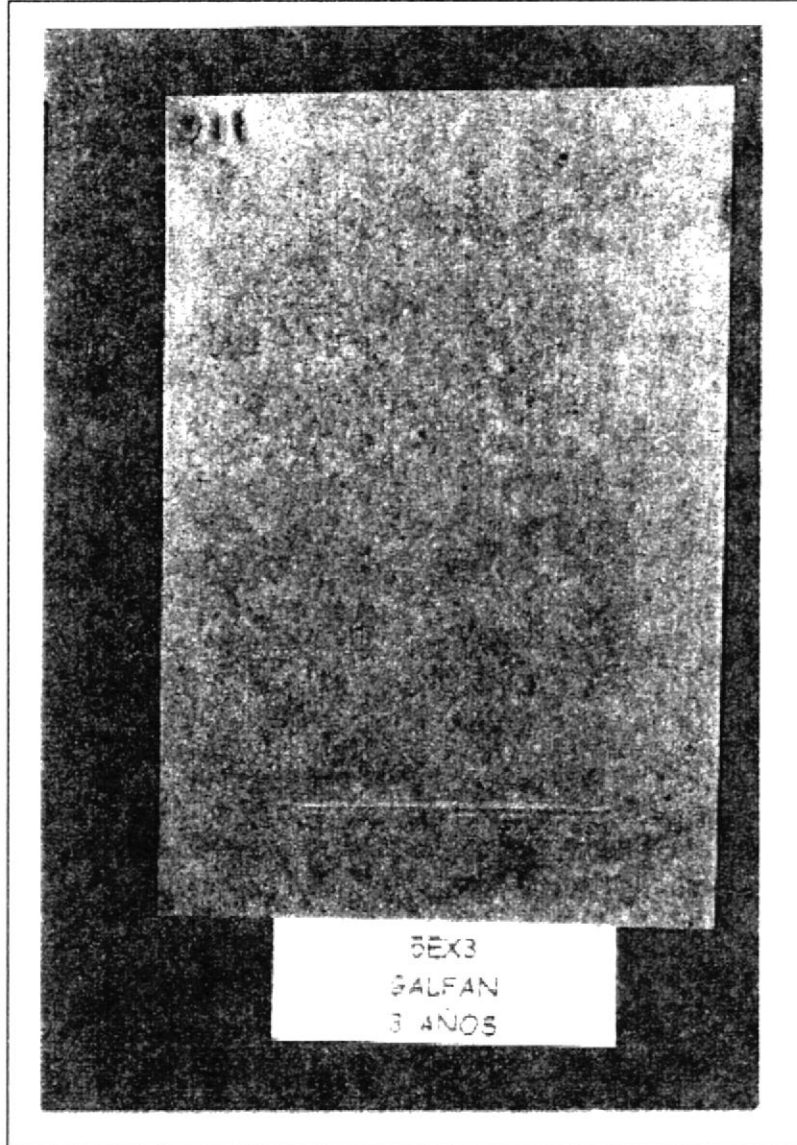


FIGURA 2.22 PROBETA GALFAN 5EX3, 36 MESES

TABLA XXIII

PLANILLA DE RESULTADOS DE GALFAN, 42 MESES

Identificación: 5EX3-5ES33

Evaluador: Manuel Huamán

Estación: Esmeraldas

Exposición: 42 Meses

Fecha de exposición: Abr.11.1996

Fecha de evaluación: Oct.14.1999

1) FORMACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

2) FORMACION DE PRODUCTOS DE CORROSION DEL ACERO DE
SUSTRATO

SI

NO

3) DESCASCARAMIENTO DEL REVESTIMIENTO

SI

NO

4). CORROSION EN LOS BORDES

SI

NO

5) EN CASO DE INCISIÓN: CORROSION A PARTIR DE INCISIÓN

SI

NO

6) OTRAS OBSERVACIONES

- La corrosión encontrada en el sustrato se ha incrementado notablemente y presenta zonas de color marrón más acentuadas que las demás. No se observa corrosión en la zona de incisión.
- Se nota que ha perdido el brillo y se ha tornado oscura.

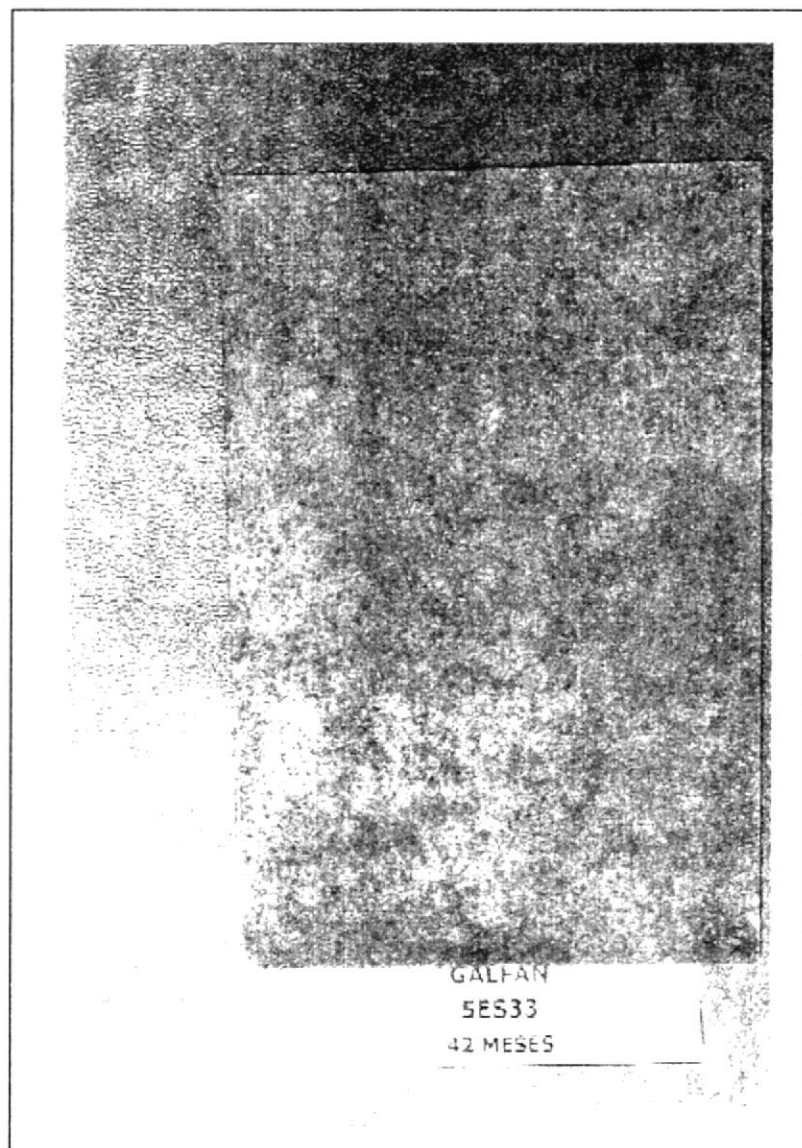


FIGURA 2.23 PROBETA GALFAN 5ES33, 42 MESES

2.6.2. Pérdida de Peso

En la tabla XXIV, se presentan los resultados de los ensayos de pérdida de peso durante los 42 meses de observación.

TABLA XXIV
PERDIDA DE PESO DEL GALFAN

GALFAN				
MESES	IDENTIFICACIÓN	W _o (g)	W _F (g)	ΔW (g)
12	5ES11	45,5545	45,4433	0,1112
	5ES12	44,8892	44,7824	0,1068
	5ES13	44,2407	44,1344	0,1063
24	5ES21	44,7618	44,5526	0,2092
	5ES22	43,8595	43,6393	0,2202
	5ES23	44,9201	44,7106	0,2095
42	5ES31	44,6787	44,2288	0,4499
	5ES32	43,6715	43,2947	0,3768
	5ES33	45,4016	44,9772	0,4244
Area de Exposición: 300 cm ²				

CAPITULO 3

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis Visual

Un análisis visual del comportamiento de los recubrimientos en la atmósfera durante los 42 meses de exposición.

Galvanizado.

6 meses: Se observa la aparición de diminutos puntos de corrosión muy dispersos pero no evidentes, tampoco presenta decoloración.

12 Meses: No presenta gran cambio con la observación anterior, la aparición de puntos marrones es evidente pero no de manera relevante.

18 Meses: Con respecto a la observación anterior los cambios no son tan representativos.

24 Meses: Los puntos marrones son más evidentes, presenta en esta observación cambio en su color tornándose gris.

36 Meses: Se ha acentuado los puntos marrones y es evidente en toda la probeta, la decoloración no representa gran cambio en comparación a la probeta testigo.

42 Meses: Los puntos de color marrón se han presentado de manera más evidente en la superficie expuesta no presenta una decoloración marcada con respecto a la observación anterior.

Metalizado.

6 Meses: La aparición de puntos marrones, y un cambio de color oscura.

12 Meses: Se nota un cambio de tonalidad tornándose un verde oscuro evidente con la observación anterior.

18 Meses: Se nota puntos negros y marrones, sigue el cambio en, la tonalidad tornándose más oscura.

24 Meses: Se puede apreciar que los puntos de corrosión de color marrón y negros han tornado la totalidad de la probeta y el verde oscura de la placa es más evidente.

36 Meses: Se puede decir que los puntos se han generalizado en toda la placa es un verde muy oscuro.

42 Meses: Se nota la aparición de más puntos grises y marrones, la decoloración no es muy evidente con respecto a la evaluación anterior.

Electrozincado.

6 Meses: Se puede apreciar la aparición de corrosión del sustrato alrededor de la probeta con una medida desde el borde aproximadamente de 7 mm.

12 Meses: La corrosión en los bordes ha aumentado considerablemente y en la parte con incisión se puede apreciar corrosión del sustrato alrededor de la misma, además se puede observar la aparición de puntos marrones en el centro de la placa.

18 Meses: La corrosión de los bordes es evidente y se nota que la corrosión avanza hacia el centro de la probeta, cabe resaltar que el descascamiento del revestimiento es evidente.

24 Meses: El revestimiento a desaparecido totalmente es decir la corrosión del sustrato a cubierto toda la probeta, Cabe recalcar que en la convención de Junio de 1998 la probeta quedó fuera de exposición.

Senzimir.

6 Meses: La probeta presenta la aparición de puntos marrones en general pero no en gran concentración presentando un poco de decoloración.

12 Meses: Los puntos marrones siguen apareciendo pero no en gran cantidad es decir de manera dispersa, la decoloración es poco evidente.

18 Meses: Los puntos marrones se han acentuado pero se puede apreciar que no han aumentado, la decoloración no es evidente.

24 Meses: Se nota la aparición también dispersa de puntos marrones, ha tomado una coloración de color de la herrumbre pero no han

aumentado en cantidad, la decoloración no es evidente con relación a la observación anterior.

36 Meses: Los puntos marrones han hecho que se presente alrededor de ellos manchas de herrumbre la tonalidad no presenta un cambio tan drástico con la testigo pero es obvio un oscurecimiento.

42 Meses: Se observa muchos puntos marrones, más que los grises, en toda la parte expuesta.

Galfan.

6 Meses: La probeta presenta buenas características salvo la aparición de puntos aislados muy dispersos de formación de herrumbre presenta una decoloración en tono plomo claro en comparación al color brillo metálico de la probeta testigo.

12 Meses: Los puntos de corrosión han aumentado un poco en dimensión, pero la coloración es más oscura con relación a la observación anterior.

18 Meses: Los puntos han aumentado de igual manera en forma dispersa pero no de forma concentrada la coloración esta en un color

plomo oscuro.

24 Meses: Los puntos se pueden notar que han aumentado y se nota la aparición de puntos negros, la decoloración es evidente y se ha tornado de color plomo oscuro.

36 Meses: Se aprecia que los puntos se han generalizado en toda la probeta y que el color se ha tornado a plomo oscuro, ha perdido el brillo metálico totalmente.

42 Meses: Los puntos marrones se han presentado en forma de manchas, presenta de otra manera también los puntos de color gris oscuro.

3.2. Análisis Metalográfico

Galvanizado.

El galvanizado se ha comportado manera protectora hacia el sustrato de acero, dejando ver diminutos puntos de corrosión a partir de los 24 meses, tal como se observa en las figuras 3.1 y 3.2 que pertenecen a 12 y 24 meses de exposición.

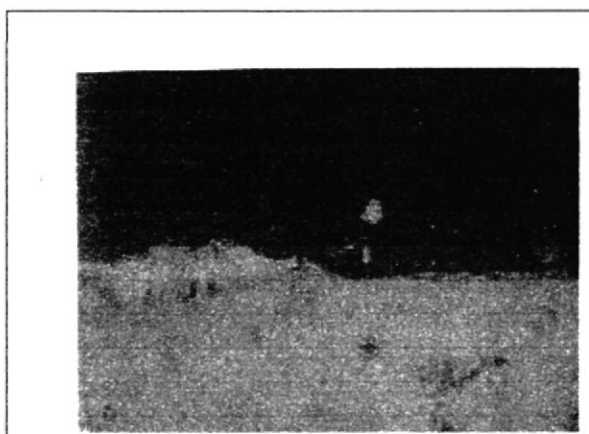


FIGURA 3.1 METALOGRAFIA EN INCISION 1EX1, 12 MESES

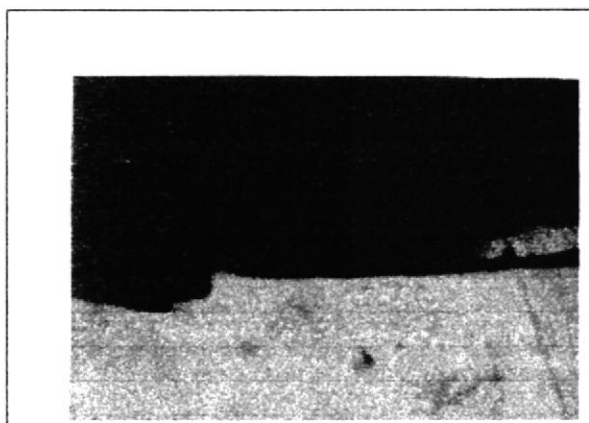


FIGURA 3.2 METALOGRAFIA EN INCISION 1EX2, 24 MESES

Metalizado.

Se aprecia a los 12 meses un buen comportamiento de la base de acero, como se muestra en la figura 3.3, pero a los 24 meses ya se aprecia pequeñas imperfecciones a lo largo de la superficie como se puede apreciar en la figura 3.4

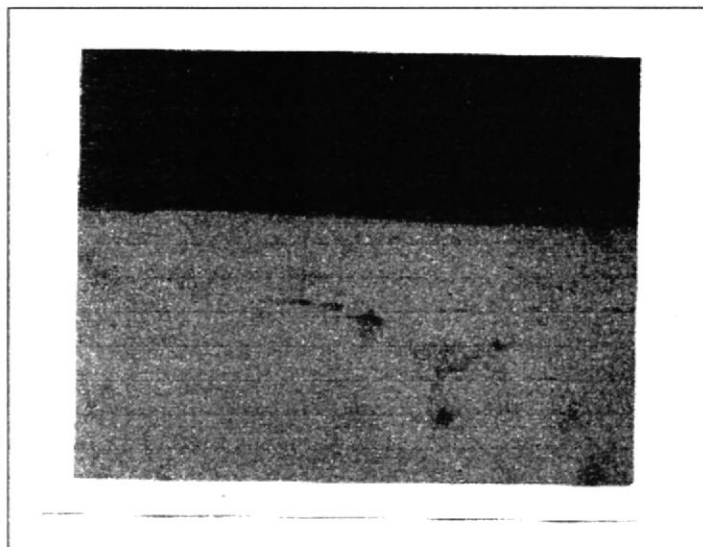


FIGURA 3.3 METALOGRAFIA EN INCISION 2EX1, 12 MESES

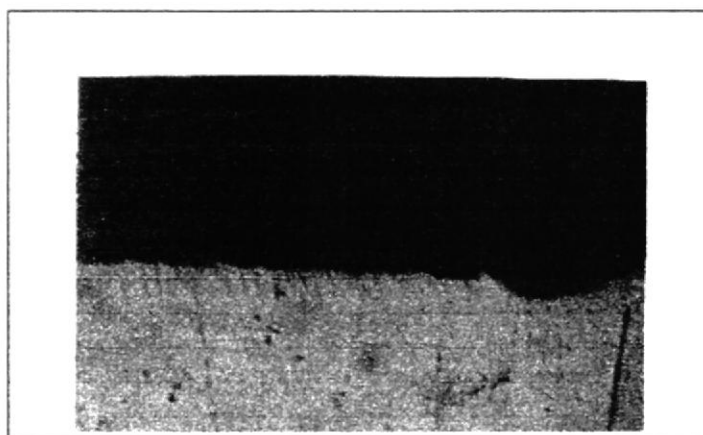


FIGURA 3.4 METALOGRAFIA EN INCISION 2EX2, 24 MESES

Electrozincado.

El recubrimiento a desaparecido totalmente y como se aprecia en la figura 3.6 ya existe deterioro a los 12 meses, pero a los 24 meses el deterioro es total como se evidencia en la figura 3.7

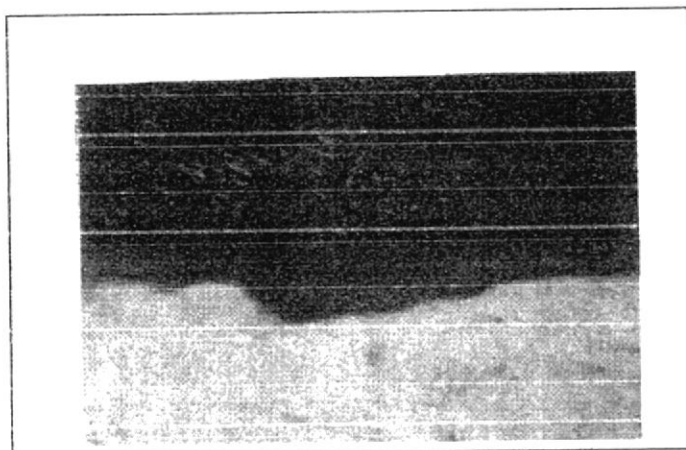


FIGURA 3.5 METALOGRAFIA EN INCISION 3EX1, 12 MESES

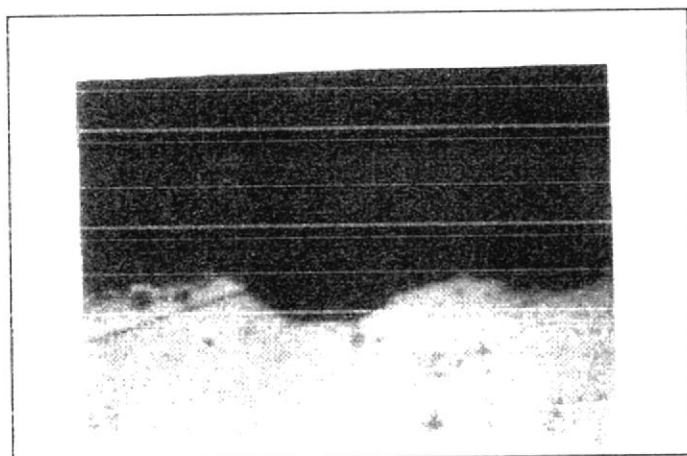


FIGURA 3.6 METALOGRAFIA EN INCISION 3EX2, 24 MESES

Senzimir.

El comportamiento de este revestimiento se lo califica como aceptable a la resistencia al medio, las superficies se aprecia sin picaduras en las figuras 3.7 y 3.8 respectivamente a los 12 y 24 meses.

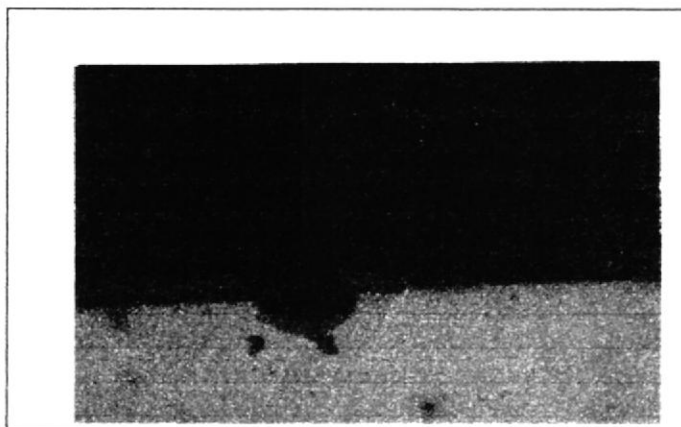


FIGURA 3.7 METALOGRAFIA EN INCISION 4EX1, 12 MESES

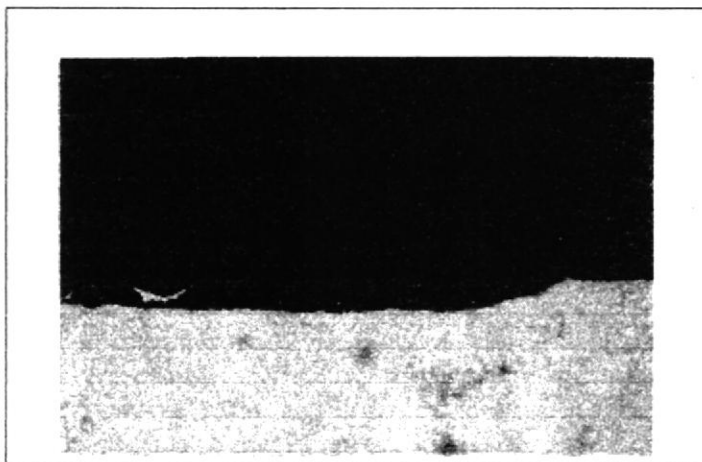


FIGURA 3.8 METALOGRAFIA EN INCISION 4EX2, 24 MESES

Galfan.

El galfan presenta superficies de comportamiento similares en las figuras 3.9 y 3.10. Se afirma que este recubrimiento se a comportado adecuadamente para este tipo de ambiente.

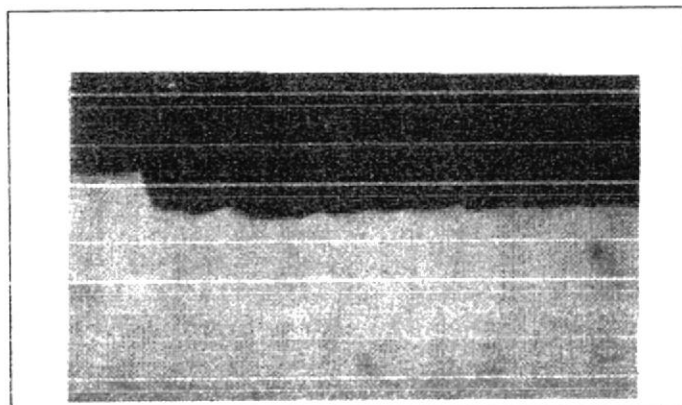


FIGURA 3.9 METALOGRAFIA EN INCISION 5EX1, 12 MESES

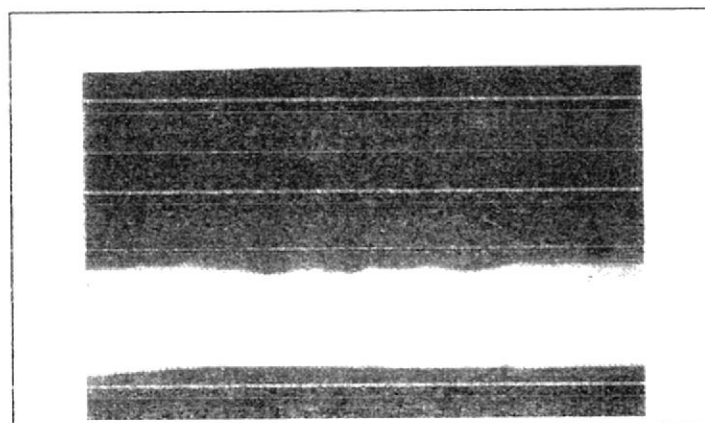


FIGURA 3.10 METALOGRAFIA EN INCISION 5EX2, 24 MESES

3.3. Análisis de Pérdida De La Velocidad de Corrosión

A los 12 meses.

Al primer año se puede apreciar en las tablas XXVI y XXIX que los recubrimientos de galvanizado y galfan respectivamente, tuvieron una tasa menor de corrosión respecto a los otros recubrimientos, siguiendo en secuencia de este comportamiento el Senzimir tal como se observa en la tabla XXVIII y figura 3.13.

El electrozincado tuvo una mayor tasa de corrosión en el primer año que los otros recubrimientos según datos de la tabla XXVII y figura 3.12.

A los 24 Meses.

El galvanizado presenta una tasa de corrosión doble en comparación a los 12 meses de exposición de acuerdo a la tabla XXVI.

Se aprecia en la tabla XXVII un repunte alto de la corrosión del Electrozincado, a tal punto que por el alto deterioro ha quedado fuera de exposición.

El senzimir en la tabla XXVIII y el galfan en la tabla XXIX han presentado un repunte de la velocidad de corrosión en comparación a

los 12 meses de exposición.

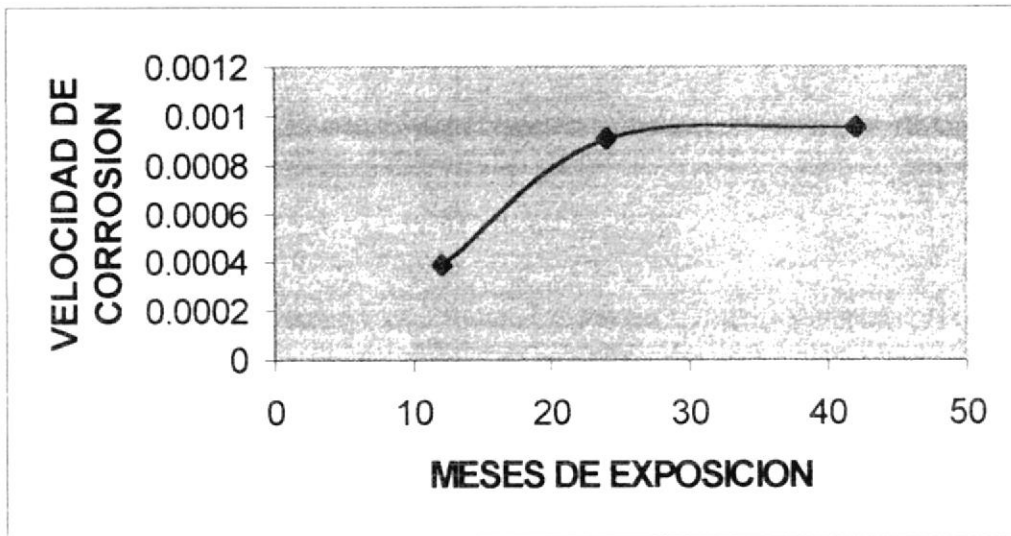
A los 42 Meses.

En los 42 meses de exposición se aprecia que en la figura 3.11 que el galvanizado presenta un aumento en la velocidad de corrosión de acuerdo con los resultados de los 24 meses, se puede recalcar que a los 42 meses presenta una estabilización.

De acuerdo con los resultados 12 y 24 meses se puede notar que el senzimir en la figura 3.13 y galfan en la figura 3.14 han presentado una velocidad de corrosión estable, durante todos los 42 meses de exposición.

TABLA XXV
VELOCIDAD DE CORROSION GALVANIZADO

GALVANIZADO		
12 MESES (g/Año.cm ²)	24 MESES (g/Año.cm ²)	42 MESES (g/Año.cm ²)
0.000388	0.000905	0.000955



**FIGURA 3.11 CURVA DE VELOCIDAD DE CORROSION DEL
GALVANIZADO**

TABLA XXVI
VELOCIDAD DE CORROSION ELECTROZINCADO

ELECTROZINCADO	
12 MESES (g/Año.cm ²)	24 MESES (g/Año.cm ²)
0.006627	0.011360

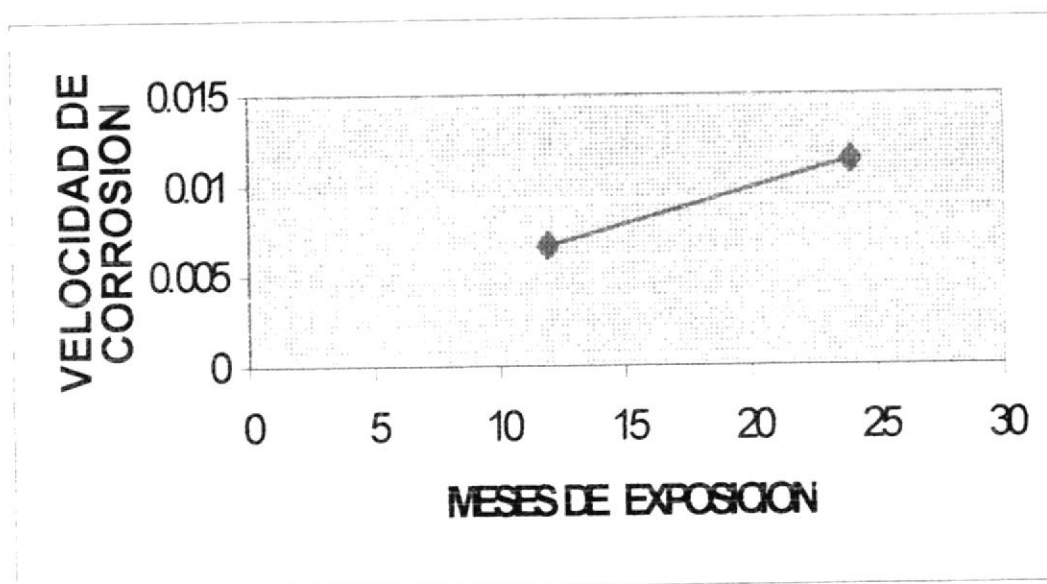


FIGURA 3.12 CURVA DE VELOCIDAD DE CORROSION DEL
ELECTROZINCADO

TABLA XXVII
VELOCIDAD DE CORROSION SENZIMIR

SENZIMIR		
12 MESES (g/Año.cm ²)	24 MESES (g/Año.cm ²)	42 MESES (g/Año.cm ²)
0.000538	0.000680	0.000742

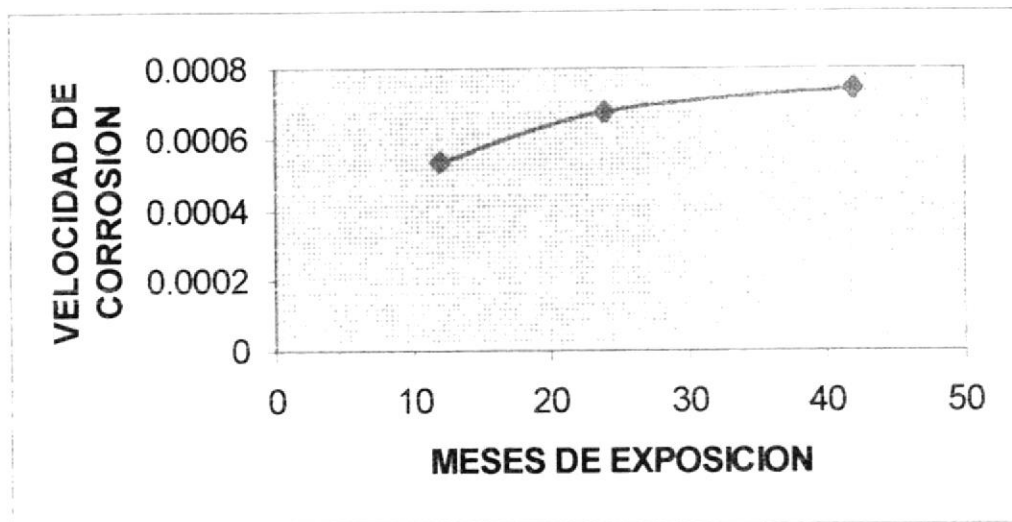


FIGURA 3.13 CURVA DE VELOCIDAD DE CORROSION DEL SENZIMIR

TABLA XXVIII
VELOCIDAD DE CORROSION GALFÁN

GALFAN		
12 MESES (g/Año.cm ²)	24 MESES (g/Año.cm ²)	42 MESES (g/Año.cm ²)
0.000360	0.000354	0.000396

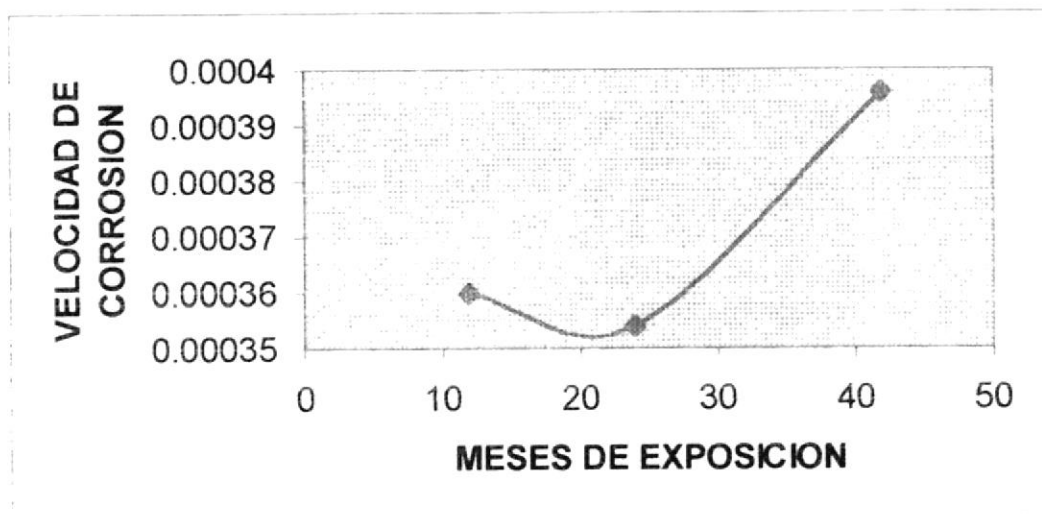


FIGURA 3.14 CURVA DE VELOCIDAD DE CORROSION DEL GALFAN

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

1. A los 42 meses de exposición queda evidenciado que la Refinería Estatal de Esmeraldas, es una atmósfera de tipo agresiva debido a su entorno geográfico y su carácter industrial.
2. El electrozincado resultó ser el recubrimiento a base de zinc más vulnerable con respecto a los otros de este grupo.
3. Los recubrimientos de Metalizado y Galfan presentan decoloración a partir de los 24 meses de exposición.
4. Los recubrimientos que presentan mejor apariencia son el Galvanizado y el Senzimir, los mismos que no presentan cambios en su coloración, hasta los 42 meses de exposición.

5. De acuerdo con los resultados de pérdida de peso y velocidad de corrosión, muestran un buen comportamiento el galfan y senzimir en su orden, no así el galvanizado que presentan tasas de corrosión elevadas respecto a los anteriores.
6. Las probetas con incisión se comportaron de la misma manera que las probetas sin incisión (galvanizado, metalizado, senzimir, galfan), es decir tuvo un buen comportamiento de protección catódica del zinc hacia el acero.
7. El galvanizado tiene un buena apariencia, pero en el análisis de resultados tiene una tasa de corrosión alta en comparación a los anteriores recubrimientos.

Se recomienda lo siguiente:

1. El electrozincado es el más vulnerable en estos medios agresivos y no se recomienda para una vida útil de 12 meses.
2. En vista que el galfan y el senzimir fueron los recubrimientos que mejor se comportaron durante todo el período de exposición en este medio tan agresivo, se recomienda su utilización como recubrimientos tipo

protector en esta atmósfera industrial.

3. El metalizado presenta un buen comportamiento en la atmósfera de la Refinería Estatal de Esmeraldas, ya que conserva características similares a la probeta testigo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASM INTERNATIONAL, Metal Handbook, Volumen 5, Surface Cleaning, Finishing and Coating, Ninth Edition.
2. ASM INTERNATIONAL, Metal Handbook, Volumen 13, Corrosion, Ninth Edition.
3. AVALLONE EUGENE/BAUMEISTER III THEODORE, Manual del Ingeniero Mecánico, Novena Edición, Tomo I, Editorial Mc Graw Hill.
4. DOCUMENTO PATINA G3-1, CYTED, España, 1996.
5. DOCUMENTO PATINA G3, CYTED, España, 1997.
6. DOCUMENTO PATINA G3, CYTED, España, 1998.
7. JONES DENNY A., Principles and Prevention of Corrosion.

APENDICES

APENDICE A

ENSAIOS DE CORROSÃO ATMOSFÉRICA COM AÇO REVESTIDO COM ALUMÍNIO, ZINCO E SUAS LIGAS POR PROCESSO CONTÍNUO

Zehbour Panossian

(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Brasil, Av. prof. Almeida Prado, 535. CEP 05508-901, Cidade Universitária, São Paulo – Brasil. FAX: 55 11 3767 4036.

Fone: 55 11 3767 4044. e-mail: zep@ipt.br)

Manuel Morcillo Linares (Centro Nacional de Investigaciones Metalurgicas – Espanha); Liboria Mariaca Rodriguez¹ (Instituto de Investigaciones Electricas – México), Santiago Flores Merino (Pontificia Universidad Catolica del Perú – Peru); Jaime A. Rocha Valenzuela (Instituto de Investigaciones en Metalurgica y Materiales – Bolívia); Jorge Julian Peña (Escuela Superior Politécnica del Litoral – Equador), Francisco Herrera (Faculdade de Engenharia – Colômbia); Francisco E. Corvo Pérez (Centro Nacional de Investigaciones Científicas – Cuba), Mariela Sanches de Villalaz (Universidad Tecnológica de Panamá – Panamá), Oladis T. Rincon (Facultad de Ingeniería – Venezuela), Galina Pridybailo (Instituto Tecnológico de Costa Rica – Costa Rica), Joaquim Simancas (Centro Nacional de Investigaciones Metalurgicas – Espanha)

RESUMO

Este trabalho, desenvolvido dentro do projeto PATINA “Proteção Anticorrosiva de Metais na Atmosfera”, teve como objetivo a condução de ensaios de corrosão atmosférica de diferentes revestimentos metálicos de alumínio, zinco e suas ligas. Participaram deste trabalho 11 países, a saber: Brasil, Bolívia, Colômbia, Costa Rica, Cuba, Equador, Espanha, México, Panamá, Peru e Venezuela. Os revestimentos ensaiados foram: alumínio/silício, *Galvalume*®, zinco (Sendzimir) e *Galfan*® aplicados por imersão a quente contínuo; zinco aplicado por imersão a quente não-contínuo; alumínio e zinco/alumínio aplicados por aspersão térmica e zinco obtido por eletrodeposição por processo contínuo. A avaliação consistiu essencialmente de exame visual, exame metalográfico e exame com o auxílio de microscópio eletrônico de varredura. No presente trabalho, são descritos os resultados de 3,5 anos de exposição dos revestimentos aplicados por imersão a quente contínuo.

Palavras chaves: revestimento; zinco; alumínio; corrosão atmosférica; liga zinco/alumínio; Sendzimir; *Galvalume*®; *Galfan*®

ABSTRACT

Atmospheric corrosion tests on aluminum, zinc and their alloys coatings have been conducted as part of PATINA project “Anticorrosive protection of metals in atmosphere”. Eleven countries took part in this work: Brazil, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Spain, Mexico, Panama.

¹ *In memoriam*

Peru and Venezuela. The tested coatings were: steel sheet aluminum/silicon, *Galvalume*®, *Galfan*® and zinc (Sendzimir) coated by hot-dip process, thermally sprayed aluminum and sprayed zinc/aluminum and electrolytic zinc coated. All coatings were exposed at different aggressive atmospheres. All coatings were characterized before their exposures. The evaluations were essentially annual visual inspection, metalografic examination and electronic microscope analysis.

Key words: coating; zinc; aluminum; atmospheric corrosion; metallic coating, zinc/aluminum alloy; Sendzimir; *Galvalume*®; *Galfan*®

1. INTRODUÇÃO

Dentro do Programa Ibero-americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento (CYTED), desenvolve-se um projeto denominado PATINA no qual catorze países fazem parte. O tema deste projeto é a proteção anticorrosiva de metais expostos à atmosfera. Dentro do projeto PATINA, há seis subgrupos de trabalho divididos de acordo com os diferentes tipos de materiais estudados. Os subgrupos três e quatro tem por objetivo a verificação do desempenho de revestimentos de alumínio, de zinco e de suas ligas. Participam deste subgrupo onze países que possuem estações atmosféricas de ensaio em diferentes ambientes, a saber:

Cuzco – Peru	atmosfera rural
Cuernavaca – México	atmosfera rural
El Pardo – Espanha	atmosfera rural
São Paulo – Brasil	atmosfera urbana
La Paz – Bolívia	atmosfera urbana
Bahia Solano – Colômbia	atmosfera marinha
Cojimar – Cuba	atmosfera marinha
Limon - Costa Rica	atmosfera marinha
Esmeraldas – Equador	atmosfera marinha-industrial
Colón – Panamá	atmosfera urbana-industrial
La Voz – Venezuela	atmosfera especial (deserta, marinha com alta salinidade e muitos ventos)
Arenal - Costa Rica	atmosfera especial (zona vulcânica)

Os revestimentos metálicos ensaiados foram os seguintes:

- alumínio-silício aplicado por imersão a quente, contínuo;
- *Galvalume*® aplicado por imersão a quente, contínuo;
- zinco aplicado por processo Sendzimir, contínuo;
- *Galfan*® aplicado por imersão a quente, contínuo;
- alumínio e zinco/alumínio aplicados por aspensão térmica;
- zinco aplicado por imersão a quente, não-contínuo;
- zinco aplicado por eletrodeposição, contínuo.

No presente trabalho, são apresentados os resultados da avaliação dos revestimentos aplicados pelo processo de imersão a quente, contínuo, após aproximadamente 3.5 anos de exposição nas diferentes atmosferas.

2. METODOLOGIA

Os ensaios de exposição foram conduzidos com corpos-de-prova no formato de chapas com

dimensões 15 cm x 10 cm, fixados em painéis de ensaio. A instalação dos painéis foi feita de modo que a superfície dos corpos-de-prova ficasse voltada para o norte geográfico e inclinada de 30° com relação ao plano horizontal. A fixação dos corpos-de-prova aos painéis foi feita por meio de material não-metálico.

Antes da colocação dos corpos-de-prova nos painéis de ensaio, estes foram submetidos à limpeza prévia para remoção de camadas de óleos e graxas e caracterizados quanto à:

- espessura da camada;
- microestrutura;
- composição do revestimento como um todo e das fases microestruturais (análises realizadas por dispersão de energia com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura - MEV).

3. CARACTERÍSTICAS DOS REVESTIMENTOS

As características principais dos revestimentos ensaiados estão apresentados nos itens 3.1 a 3.4.

3.1 Alumínio/silício aplicado por imersão a quente, contínuo

Bordas: não-protegidas.

Espessura: ~ 40 µm.

Tratamento superficial: cromatização.

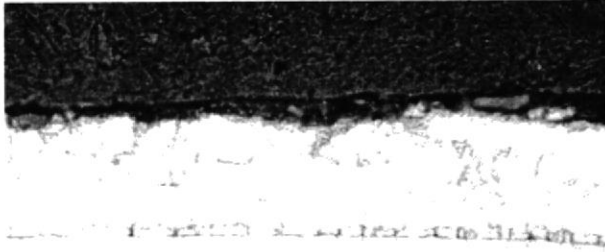
Composição: os resultados das análises² feitas no revestimento estão apresentados a seguir:

Elemento	Porcentagem em massa
Alumínio	84,35%
Silício	13,10%
Ferro	2,05%

Natureza do revestimento: liga de alumínio com cerca de 13% de silício, constituída por uma matriz de fase α com plaquetas de silício (Micrografia nº 1).

Características no que se refere à proteção contra corrosão: oferece proteção catódica ao substrato de aço somente em atmosferas altamente contaminadas com cloreto, portanto apresenta corrosão vermelha no substrato exposto na maioria das atmosferas. Pode ser utilizado em altas temperaturas.

² As análises foram realizadas por dispersão de energia com o auxílio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Assim sendo, os valores apresentados devem ser utilizados com cautela, pois o erro do método é elevado. Estes resultados devem ser utilizados para se ter uma idéia da porcentagem relativa dos metais constituintes do revestimento.



Micrografia n° 1: aspecto da seção transversal do revestimento de liga de alumínio/silício: matriz fase α com plaquetas de silício. Ataque: Kel x400

3.2 Galvalume® aplicado por imersão a quente, contínuo

Bordas: não-protegidas.

Espessura: ~ 20 μm .

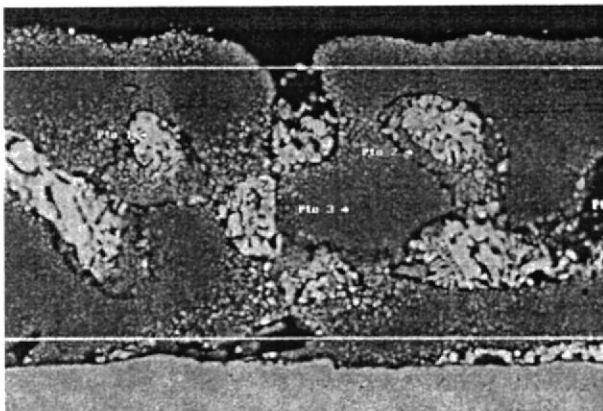
Tratamento superficial: fosfato crômico.

Composição: os resultados das análises feitas no revestimento estão apresentados a seguir:

Elemento	Porcentagem em massa
Alumínio	55,45%
Silício	0,81%
Ferro	1,37%
Zinco	42,37%

Natureza do revestimento: liga de alumínio/zinco com cerca de 55% de alumínio contendo silício, possui duas camadas: uma externa, mais espessa, constituída por uma fase dendrítica rica em alumínio e outra fase interdendrítica rica em zinco contendo ainda partículas esparsas de silício. A outra camada, a interna, é mais fina e é constituída por dois compostos intermetálicos: um próximo ao substrato de composto quaternário de Al-Fe-Si-Zn sendo seguido por um composto ternário de Al-Si-Fe (Micrografia n° 2).

Características no que se refere à proteção contra corrosão: apresenta resistência à corrosão intrínseca superior ao zinco, porém só oferece proteção catódica ao substrato de aço em atmosferas altamente contaminadas com cloreto. Não oferece proteção catódica em ambientes pouco agressivos portanto apresenta corrosão vermelha nas regiões de corte.



Micrografia n° 2: aspecto da seção transversal do revestimento de Galvalume®, evidenciando a camada mais espessa, constituída por uma fase dendrítica rica em alumínio e outra fase interdendrítica rica em zinco. Sem ataque. x2000

3.3 Zinco aplicado por imersão a quente pelo processo Sendzimir. contínuo

Bordas: não-protegidas.

Espessura: ~ 20 μm .

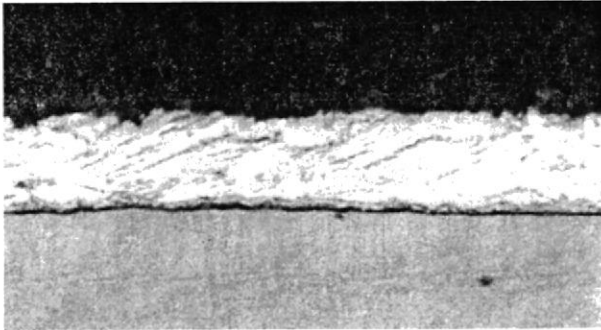
Tratamento superficial: cromatização.

Composição: os resultados das análises feitas no revestimento estão apresentados a seguir:

Elemento	Porcentagem em massa
Zinco	96,50%
Alumínio	0,66%
Ferro	0,84%
Oxigênio	2,01%

Natureza do revestimento: zinco praticamente puro (Micrografia nº 3).

Características no que se refere à proteção contra corrosão: oferece proteção catódica ao substrato de aço na maioria das atmosferas naturais. O tempo de proteção é função da espessura do revestimento e da agressividade do meio.



Micrografia nº 3: aspecto da seção transversal do revestimento de zinco Sendzimir. Ataque: Nital. x400.

3.4 *Galfan*® aplicado por imersão a quente, contínuo

Bordas: não-protegidas.

Espessura: ~ 25 µm.

Tratamento superficial: fosfatizado.

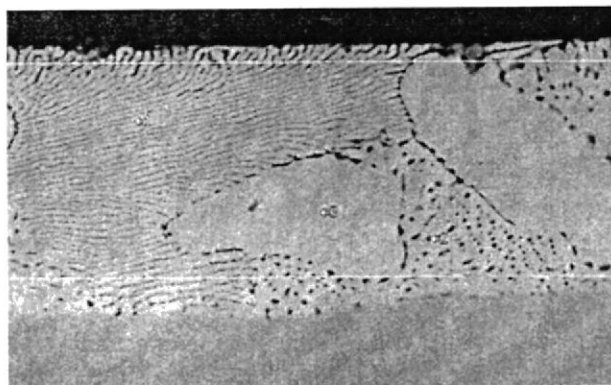
Composição: os resultados das análises feitas no revestimento estão apresentados a seguir:

Elemento	Porcentagem em massa
Zinco	93,07%
Alumínio	3,56%
Ferro	1,08%
Oxigênio	2,29%

Natureza do revestimento: zinco contendo ~5% de alumínio, constituída por (Micrografia nº 4):

- dendritas de fase rica em zinco (solução sólida de alumínio em zinco);
- eutético binário Zn-Al com 6% de Al, constituído de duas fases ricas em zinco com diferentes teores de alumínio: uma com 17% de alumínio (fase escura do eutético) e outra com 1% de alumínio (fase clara do eutético). A diferença de morfologia é decorrente do plano de corte metalográfico.

Características no que se refere à proteção contra corrosão: compete com o zinco e oferece proteção catódica ao substrato de aço. Em atmosferas marinhas severas seu desempenho é superior ao do zinco. Em atmosferas marinhas moderadas e em atmosferas rurais e industriais, o desempenho do *Galfan*® é comparável ao do zinco.



Micrografia n° 4: aspecto da seção transversal do revestimento de *Galfan*®. Dendritas de fase rica em zinco. Eutético binário constituído de duas fases ricas em zinco com diferentes teores de alumínio: uma com 17% de alumínio (fase escura do eutético) e outra com 1% de alumínio (fase clara do eutético). A diferença de morfologia é decorrente do plano de corte metalográfico. Sem ataque. x2000.

4. CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES

As estações atmosféricas foram classificadas segundo a norma ISO 9223 (1992) usando taxas de corrosão do zinco e do alumínio, conforme mostra a Tabela I. Além da classificação em “Categorias de corrosividade” foi feita uma classificação baseada somente na taxa de deposição de cloretos (S_i) e na taxa de sulfatação (P_i) com indicação da classificação segundo ISO (Tabela II). Analisando estes dados, verifica-se que:

- das três atmosferas rurais somente a estação de Cuzco (Perú) pode ser classificada como S_0P_0 . A Estação de Cuernavaca (México) é classificada como S_0P_2 devido à contaminação com compostos de enxofre ($40,4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) e a Estação de El Pardo (Espanha) é classificada como S_1P_0 devido à contaminação com cloreto ($3,9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$);
- as atmosferas urbanas são classificadas como:
 - * São Paulo (Brasil): S_0P_2
 - * La Paz (Bolívia): S_1P_0
 Pode-se verificar que, em termos de contaminantes, as duas atmosferas são diferentes;
- a atmosfera urbana-industrial de Colón (Panamá) é classificada como S_1P_2 , sendo a única com esta classificação. A classificação ISO, neste caso, está bem de acordo com a denominação urbana-industrial;
- a atmosfera marinha-industrial de Esmeraldas (Equador) é classificada como S_1P_0 . Isto indica que a contaminação com compostos de enxofre é muito baixa e portanto os poluentes emanados das indústrias não devem estar influenciando de maneira significativa na agressividade desta estação;
- as atmosferas marinhas estão assim classificadas:
 - * Bahia Solano (Colômbia): **sem classificação**
 - * Cojimar (Cuba): S_2P_1
 - * Limon (Costa Rica): S_2P_0
 Pode-se verificar que a atmosfera de Cojimar está mais contaminada com compostos de enxofre do que a atmosfera de Limon;
- a atmosfera especial de La Voz (Venezuela) é classificada como S_3P_0 e a de Arenal (Costa Rica) como S_1P_0

Pelo exposto, pode-se concluir que o agrupamento em termos de S_iP_i é mais adequado do que a classificação como rural, urbana, industrial, etc. Assim sendo, os resultados dos ensaios de exposição serão apresentados e discutidos agrupando as atmosferas conforme a Tabela II.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DAS INSPEÇÕES VISUAIS

TABELA I - Caracterização e classificação das atmosferas de ensaio segundo ISO 9223 (1992)

Estação		Metal de referência	Taxa de corrosão	Classificação		Cl/SO ₂
Rural	A - Cuzco (Peru)	Zinco	0,16 µm/ano	C2	S ₀ P ₀	Cl ⁻ = desprezível
		Alumínio	0,04 g/(m ² .a)	C1		SO ₂ = desprezível
	J - Cuernavaca (México)	Zinco	1,16 µm/ano	C3	S ₀ P ₂	Cl ⁻ = desprezível
		Alumínio	0,14 g/(m ² .a)	C2		SO ₂ = 40,4 mg/(m ² .d)
	L - El Pardo (Espanha)	Zinco	0,27 µm/ano	C2	S ₁ P ₀	Cl ⁻ = 3,9 mg/(m ² .d)
		Alumínio	0,16 g/(m ² .a)	C2		SO ₂ = 6,4 mg/(m ² .d)
Urbana	B - São Paulo (Brasil)	Zinco	1,19 µm/ano	C3	S ₀ P ₂	Cl ⁻ = desprezível
		Alumínio	0,68 g/(m ² .a)	C3		SO ₂ = 57,78 mg/(m ² .d)
	C - La Paz (Bolívia)	Zinco	0,181 µm/ano	C2	S ₁ P ₀	Cl ⁻ = 6,6 mg/(m ² .d)
		Alumínio	0,13 g/(m ² .a)	C2		SO ₂ = 2,32 mg/(m ² .d)
Urbana-industrial	G - Colon (Panamá)	Zinco	3,71 µm/ano	C4	S ₁ P ₂	Cl ⁻ = 16,76 mg/(m ² .d)
		Alumínio	2,21 g/(m ² .a)	C3		SO ₂ = 47,4 mg/(m ² .d)
Marinha-industrial	D - Esmeraldas (Equador)	Zinco	1,31 µm/ano	C3	S ₁ P ₀	Cl ⁻ = 16,47 mg/(m ² .d)
		Alumínio	1,34 g/(m ² .a)	C3		SO ₂ = 2,09 mg/(m ² .d)
Marinha	E - Bahia Solano (Colômbia)	Zinco	Não fornecido			
		Alumínio	Não fornecido			
	F - Cojimar (Cuba)	Zinco	6,71 µm/ano	C5	S ₂ P ₁	Cl ⁻ = 104 mg/(m ² .d)
		Alumínio	2,07 g/(m ² .a)	C4		SO ₂ = 22,5 mg/(m ² .d)
	K - Limon (Costa Rica)	Zinco	2,66 µm/ano	C4	S ₂ P ₀	Cl ⁻ = 54,5 mg/(m ² .d)
		Alumínio	0,86 g/(m ² .a)	C3		SO ₂ = 7,8 mg/(m ² .d)
Especial ⁽¹⁾	H - La Voz (Venezuela)	Zinco	26,53 µm/ano	>C5	S ₃ P ₀	Cl ⁻ = 567,7 mg/(m ² .d)
		Alumínio	8,24 g/(m ² .a)	C4		SO ₂ = 9,5 mg/(m ² .d)
Especial ⁽²⁾	I - Arenal (Costa Rica)	Zinco	1,58 µm/ano	C3	S ₁ P ₀	Cl ⁻ = 20,9 mg/(m ² .d)
		Alumínio	0,17 g/(m ² .a)	C2		SO ₂ = 8,25 mg/(m ² .d)

(1) Deserto, marinho com alta salinidade e muitos ventos.

(2) Zona vulcânica

TABELA II - Agrupamento das estações atmosféricas do presente estudo segundo classificação S_iP_i

Classificação segundo ISO 9223	Estação atmosférica	Taxa de deposição de cloretos ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	Taxa de sulfatação ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)
S_0P_0	Cuzco (Peru) – Rural	$S \leq 3$	$P \leq 10$
S_0P_2	Cuernevaca (México) – Rural	$S \leq 3$	$35 < P \leq 80$
	São Paulo (Brasil) – Urbana		
S_1P_0	El Pardo (Espanha) – Rural	$3 < S \leq 60$	$P \leq 10$
	La Paz (Bolívia) – Urbana		
	Esmeraldas (Equador) – Marinha-industrial		
	Arenal (Costa Rica) – Especial (zona vulcânica)		
S_1P_2	Colón (Panamá) – Urbana-industrial	$3 < S \leq 60$	$35 < P \leq 80$
S_2P_0	Limon (Costa Rica) – Marinha	$60 < S \leq 300$	$P \leq 10$
S_2P_1	Cojimar (Cuba) – Marinha	$60 < S \leq 300$	$10 < P \leq 35$
S_3P_0	La Voz (Venezuela) – Especial (deserta, marinha, salina e muitos ventos)	$300 < S \leq 1500$	$P \leq 10$
Sem classificação	Bahia Solano (Colômbia)	-	-

5.1 Alumínio-silício aplicado por imersão a quente, contínuo

Na atmosfera com a classificação S_0P_0 , este revestimento não apresentou corrosão perceptível e não ofereceu proteção catódica ao substrato de aço.

Nas atmosferas com a classificação S_0P_2 , S_1P_0 , S_1P_2 e **sem-classificação (Bahia Solano)**, este revestimento não oferece proteção catódica ao substrato e sofre corrosão localizada que avança pela periferia das plaquetas de silício (exemplo típico apresentado na Micrografia nº 5). A intensidade desta corrosão aumenta com:

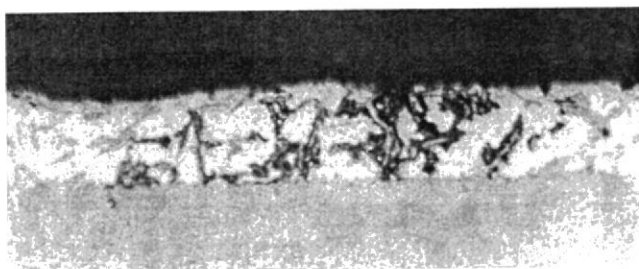
- **a taxa de sulfatação:** em atmosferas não-contaminadas com cloreto e com baixa taxa de sulfatação, o tempo para a percepção visual da corrosão do substrato é longo (3 anos na Estação São Paulo - Brasil). Quanto maior a taxa de sulfatação, mais perceptível torna-se a corrosão localizada do revestimento. Isto pôde ser verificado comparando-se o comportamento do revestimento exposto em Cuernevaca ($40,4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) de SO_2 com o de São Paulo ($57,78 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) de SO_2 . O revestimento exposto em São Paulo apresentou corrosão na superfície longe da incisão enquanto o de Cuernevaca só apresentou perto da incisão;
- **a taxa de deposição de cloretos:** o efeito da presença de cloretos é muito mais significativa do que o dos compostos de enxofre: quanto maior a taxa de deposição de cloretos mais intensa é a corrosão do

revestimento. Isto pode ser verificado comparando as estações de São Paulo (sem cloretos e com 57,78 mg/(m².d) de SO₂) com Arenal (20,9 mg/(m².d) de cloretos e 8,25 mg/(m².d) de SO₂). Apesar da taxa de sulfatação de São Paulo ser maior do que a de Arenal, a corrosão do revestimento foi muito mais intensa em Arenal;

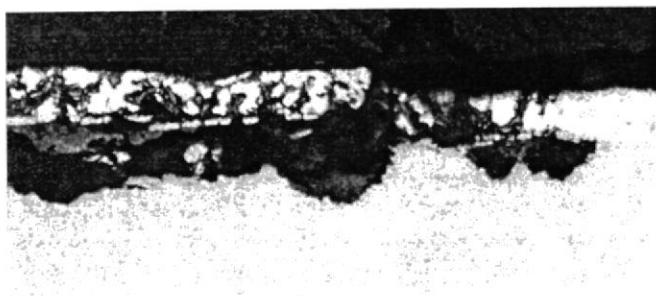
- **contaminação da superfície do revestimento com íons férricos proveniente da corrosão do substrato de aço:** em todas as estações foi observada intensificação da corrosão do revestimento nas vizinhanças da incisão levando a concluir que a contaminação com íons férricos provenientes da corrosão do substrato de aço determina aceleração do processo corrosivo (exemplo típico é apresentado na Micrografia n^o 6).

Nas atmosferas com a classificação **S₂P₀** e **S₂P₁**, este revestimento sofre corrosão localizada que avança pelas periferias das plaquetas de silício. A intensidade desta corrosão aumenta com a contaminação da superfície do revestimento com íons férricos proveniente da corrosão do substrato de aço. O revestimento não oferece proteção catódica no início da exposição. Porém, após a corrosão inicial do substrato, passa a oferecer proteção catódica. O tempo de proteção é curto.

Na atmosfera especial classificada como **S₃P₀**, este revestimento sofre corrosão acentuada pela periferia das plaquetas de silício. Esta corrosão é tão acentuada que determina o desprendimento de grãos da matriz de alumínio. A presença de ventos acelera ainda mais a corrosão do revestimento. Muito provavelmente os grãos soltos da matriz de alumínio são facilmente arrancados pelo vento. Nesta estação, o revestimento oferece proteção catódica desde o início de exposição, porém como o revestimento é fino (~40 µm) e o ambiente é muito agressivo o tempo de proteção é curto. Mesmo assim, de todos os revestimento aplicados por imersão a quente contínuo estudados neste projeto, o alumínio/silício apresentou o melhor desempenho nesta estação.



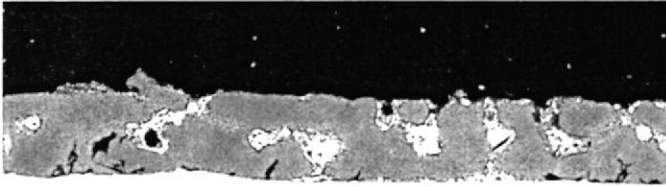
Micrografia n^o 5: exemplo típico do revestimento de alumínio/silício apresentando corrosão severa através das periferias das plaquetas de silício. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Colón (Panamá). Sem ataque. x424



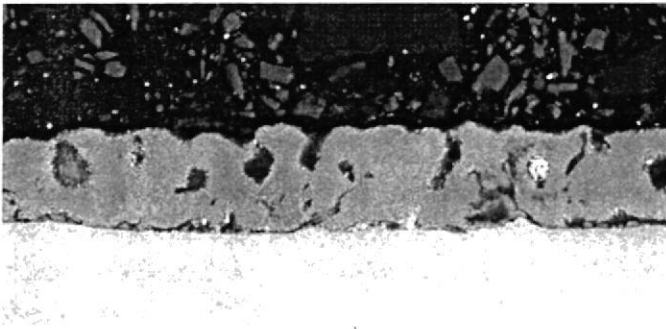
Micrografia n^o 6: exemplo típico do revestimento de alumínio/silício apresentando corrosão severa junto à incisão e não oferecendo proteção catódica. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Arenal (Costa Rica). Sem ataque. x424

4.2 Galvalume® aplicado por imersão a quente, contínuo

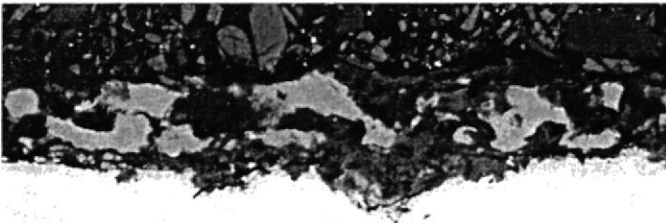
Em todas as estações atmosféricas, o Galvalume® sofreu corrosão localizada através da fase rica em zinco (exemplo típico apresentado na Micrografia nº 7). Em muitas estações, esta corrosão chegou a atingir o substrato (exemplo típico apresentado na Micrografia nº 8). Em todas as estações verificou-se que a corrosão da fase rica em zinco era muito mais intensa nas proximidades da incisão e/ou das bordas (Micrografia nº 9), o que leva a concluir que a contaminação com íons férricos provenientes da corrosão do aço determina a aceleração desta corrosão.



Micrografia nº 7: exemplo típico do revestimento de Galvalume® apresentando corrosão da fase rica em zinco. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Cuernavaca (México). Sem ataque. x750.



Micrografia nº 8: exemplo típico do revestimento de Galvalume® apresentando corrosão da fase rica em zinco. Praticamente toda a fase rica em zinco foi corroída. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Esmeraldas (Equador). Sem ataque. x750.



Micrografia nº 9: exemplo típico do revestimento de Galvalume® numa região junto à incisão, onde a corrosão é acelerada. Verifica-se corrosão do substrato, o que mostra a não-ocorrência de proteção catódica. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Esmeraldas (Equador). Sem ataque. x750.

Na atmosfera com a classificação S_0P_0 , este revestimento sofre corrosão localizada, o que determina perda de brilho do revestimento e aparecimento de riscos pretos escuros por toda a superfície. A corrosão é mais intensa junto à incisão. É capaz de oferecer proteção catódica após a corrosão inicial do substrato de aço.

Nas atmosferas com a classificação S_0P_2 , S_1P_0 , S_1P_2 e sem-classificação (Bahia Solano), este revestimento não oferece proteção catódica ao substrato de aço e sofre corrosão localizada. A intensidade desta corrosão aumenta com:

- a taxa de sulfatação: quanto maior a taxa de sulfatação mais rápida é a penetração da corrosão através da fase rica em zinco. Isto pôde ser verificado comparando-se o comportamento do revestimento exposto em Cuernevaca (40,4 mg/(m².d) de SO₂) com o de São Paulo (57,78 mg/(m².d) de SO₂). O de São Paulo apresentou corrosão mais acentuada;
- a taxa de deposição de cloretos: para uma mesma taxa de sulfatação (La Paz com 2,32 mg/(m².d) e Esmeraldas com 2,09 mg/(m².d)), quanto maior a taxa de deposição de cloretos (La Paz com 6,6 mg/(m².d) e Esmeraldas com 16,47 mg/(m².d)), mais rápido é o avanço da corrosão pela fase rica em zinco: a corrosão no Equador foi muito mais intensa do que a de La Paz;
- presença concomitante de cloretos e sulfatos: em atmosferas em que há contaminação concomitante com cloretos com taxas de deposição moderadas (Esmeraldas e Colón), a penetração da corrosão é tão intensa que rapidamente o substrato é exposto. Uma vez exposto o substrato passa a corroer. Isto determina o aparecimento de pontos vermelhos pela superfície do revestimento. Já quando a taxa de deposição de cloretos é mais elevada (Arenal), a penetração da corrosão não é tão pronunciada e não ocorre a rápida exposição e corrosão do substrato;

Nas atmosferas com a classificação S₂P₀ e S₂P₁, este revestimento sofre corrosão localizada que avança pela fase rica em zinco. A intensidade desta corrosão é moderada, no entanto nas proximidades de locais de exposição do substrato de aço, a corrosão é bastante acelerada. O revestimento oferece proteção catódica desde o início da exposição, porém o tempo de proteção é curto.

Na atmosfera especial classificada como S₃P₀, este revestimento sofre severa corrosão através da fase rica em zinco. Na proximidades de locais de exposição do substrato de aço, esta corrosão é tão intensa que determina o desprendimento de partículas de dendritas ricas em alumínio (Micrografia n^o10). A presença de ventos acelera de maneira significativa a deterioração do revestimento. Muito provavelmente as dendritas soltas são facilmente arrancadas pelo vento. Nesta estação, o revestimento oferece proteção catódica desde o início de exposição, porém como o revestimento é fino (~40 μm) e o ambiente é muito agressivo, o tempo de proteção é muito curto. De todos os revestimento aplicados por imersão a quente contínuo estudados neste projeto, o *Galvalume*[®] apresentou o pior desempenho nesta estação.



Micrografia n^o 10: corpo-de-prova revestido com *Galvalume*[®] exposto durante 42 meses em La Voz (Venezuela). Pode-se verificar intensa corrosão do revestimento determinando desprendimento de dendritas ricas em alumínio. Notar que o substrato ainda não apresentou corrosão severa: nesta estação ocorre proteção catódica devido à alta salinidade. Sem ataque. x750.

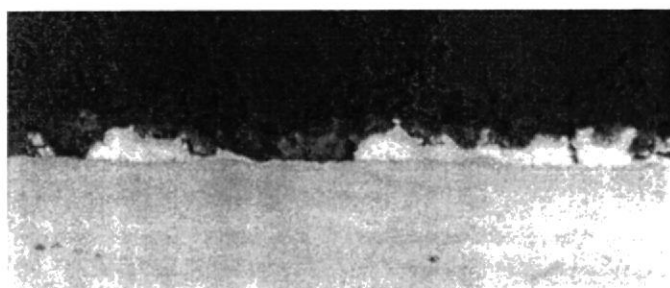
4.3 Sendzimír aplicado por imersão a quente

Nas atmosferas com a classificação S₀P₀, este revestimento apresenta um bom desempenho e ainda oferece proteção catódica, após a corrosão inicial do aço.

Nas atmosferas com a classificação S₀P₂, S₁P₀, S₁P₂ e sem-classificação (Bahia Solano), este

revestimento sofre corrosão generalizada e oferece proteção catódica ao substrato (Micrografia nº 11). A intensidade desta corrosão aumenta com:

- a taxa de sulfatação: quanto maior a taxa de sulfatação mais pronunciada é a corrosão. Isto pode ser verificado comparando-se o comportamento do revestimento exposto em Cuernavaca (40,4 mg/(m².d) de SO₂) com o de São Paulo (57,78 mg/(m².d) de SO₂). O de São Paulo apresentou corrosão mais acentuada;
- a taxa de deposição de cloretos: para uma mesma taxa de sulfatação quanto maior a taxa de deposição de cloretos mais intensa é a corrosão do revestimento. Isto pode ser verificado comparando as estações de São Paulo (sem cloretos e com 57,78 mg/(m².d) de SO₂) com Arenal (20,9 mg/(m².d) de cloretos e 8,25 mg/(m².d) de SO₂). Apesar da taxa de sulfatação de São Paulo ser maior do que a de Arenal, a corrosão do revestimento foi muito mais intensa em Arenal;
- presença concomitante de cloretos e compostos de enxofre: em atmosferas em que há contaminação concomitante com cloretos, com taxas de deposição moderadas, e com compostos de enxofre como a de Esmeraldas (16,47 mg/(m².d) de cloretos e 2,09 mg/(m².d) de SO₂) e de Colón (47,4 mg/(m².d) de cloretos e 16,76 mg/(m².d) de SO₂), o comportamento do revestimento é diferente: há rápida corrosão do revestimento com exposição do substrato que passa a corroer, porém sem avanço. Quando a taxa de deposição de cloretos é mais elevada, como a de Arenal (20,9 mg/(m².d) de cloretos e 8,25 mg/(m².d) o comportamento volta a ser o típico de revestimentos de zinco: o revestimento corrói, mas mesmo que regiões do substrato sejam expostas, o substrato não corrói (ou seja há efetiva proteção catódica do substrato).



Micrografia nº 11: exemplo típico da efetiva proteção catódica oferecida pelo revestimento Sendzimir: nota-se corrosão do revestimento, com exposição do substrato sem corrosão. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Arenal (Costa Rica). Sem ataque. x424.

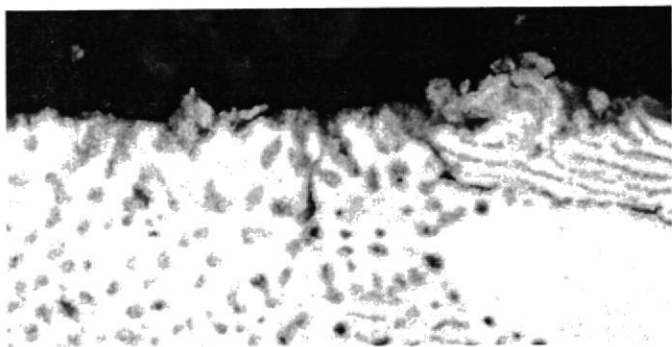
Nas atmosferas com a classificação S₂P₀ e S₂P₁, este revestimento sofre corrosão generalizada e oferece proteção catódica efetiva ao substrato de aço. O tempo de proteção é muito curto, de modo que ocorre rápido avanço da corrosão (tanto do revestimento como do substrato) nos locais de exposição do substrato.

Na atmosfera especial classificada como S₃P₀, este revestimento sofre corrosão acentuada. A presença de ventos acelera a corrosão do revestimento porém de maneira não tão acentuada como a observada para os revestimentos de Al/Si e de *Galvalume*®. Muito provavelmente, este fato está relacionado com o tipo de corrosão: neste caso não há corrosão preferencial de fases que determinem desprendimento de partículas, os ventos só arancam os produtos de corrosão e não grãos soltos. Nesta estação, o revestimento oferece proteção catódica desde o início de exposição, porém como o revestimento é fino (~20 µm) e o ambiente é muito agressivo o tempo de proteção é muito curto.

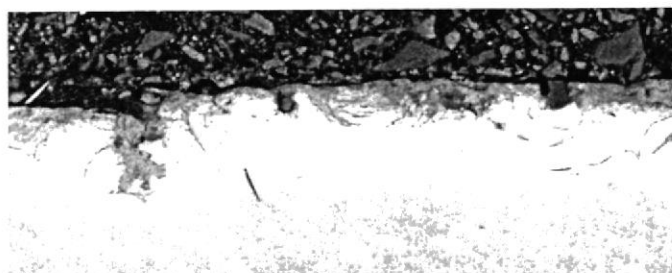
4.4 *Galfan*® aplicado por imersão a quente, contínuo

Em todas as estações atmosféricas, este revestimento sofre corrosão localizada, da seguinte maneira (exemplo típico apresentado nas Micrografias nº 12 e nº 13):

- nas regiões de exposição da fase eutética, a corrosão ocorre pela interface rica em alumínio. O avanço desta corrosão é muito lenta devido ao fato dos produtos de corrosão ficarem retidos na fina estrutura da fase eutética;
- nas regiões de exposição das dendritas, a corrosão é mais profunda. Em ambientes muito agressivos, o avanço desta corrosão é rápida e atinge o substrato.



Micrografia n° 12: exemplo típico do revestimento de *Galfan*® apresentando corrosão da fase eutética: os produtos de corrosão ficam retidos na fina estrutura desta fase, o que retarda o avanço da corrosão. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em El Pardo (Espanha). Sem ataque. x5000.



Micrografia n° 13: exemplo típico do revestimento de *Galfan*® apresentando corrosão mais acentuada da dendrítica: esta fase quando exposta corrói de maneira muito mais acentuada do que a fase eutética. Corpo-de-prova exposto durante 42 meses em Esmeraldas (Equador). Sem ataque. x750.

Na atmosfera com a classificação S_0P_0 , este revestimento apresenta corrosão incipiente e oferece proteção catódica ao substrato de aço, porém não evita a corrosão incipiente do aço no início da exposição.

Nas atmosferas com a classificação S_0P_2 , S_1P_0 , S_1P_2 e sem-classificação (Bahia Solano), este revestimento oferece proteção catódica e sofre corrosão, cuja intensidade aumenta com:

- a taxa de sulfatação: quanto maior a taxa de sulfatação mais pronunciada é a corrosão. Isto pode ser verificado comparando-se o comportamento do revestimento exposto em Cuernevaca ($40,4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2) com o de São Paulo ($57,78 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2). O de São Paulo apresentou corrosão mais acentuada (evidenciada pelo escurecimento mais acentuado);
- a taxa de deposição de cloretos: para uma mesma taxa de sulfatação, quanto maior a taxa de deposição de cloretos mais intensa é a corrosão do revestimento. Isto pode ser verificado comparando as estações de São Paulo (sem cloretos e com $57,78 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2) com Arenal ($20,9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de cloretos e $8,25 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2). Apesar da taxa de sulfatação de São Paulo ser maior do que a de Arenal, a corrosão do revestimento foi muito mais intensa em Arenal;
- presença concomitante de cloretos e compostos de enxofre: em atmosferas em que há contaminação concomitante com cloretos, com taxas de deposição moderadas, e com compostos de enxofre como a de Esmeraldas ($16,47 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de cloretos e $2,09 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2) e de Colón ($47,4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de cloretos e $16,76 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2), o comportamento do revestimento é diferente: há rápida corrosão através das dendritas ricas em zinco do revestimento com exposição do substrato que passa a corroer, porém sem avanço. Quando a taxa de deposição de cloretos é mais elevada, como a de Arenal ($20,9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de cloretos e $8,25 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de SO_2), o avanço da corrosão é menos pronunciado e o substrato exposto (em pequenas áreas) não corrói, o que indica efetiva

proteção catódica.

Nas atmosferas com a classificação S_2P_0 e S_2P_1 , este revestimento sofre corrosão cuja intensidade aumenta com a taxa de deposição de cloretos, visto que em Cojimar ($104 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de cloretos) a corrosão do revestimento foi muito mais intensa do que em Limon ($54,5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ de cloretos). Além disso, oferece proteção catódica efetiva ao substrato de aço porém o tempo de proteção diminui com o aumento da agressividade da atmosfera: em Cojimar o tempo de proteção foi muito menor do que em Limon.

Na atmosfera especial classificada como S_3P_0 , este revestimento sofre corrosão acentuada. A presença de ventos acelera a corrosão do revestimento porém de maneira não tão acentuada como a observada para os revestimentos de Al/Si e de *Galvalume*[®]. Nesta estação, o revestimento oferece proteção catódica desde o início de exposição, porém como o revestimento é fino ($\sim 25 \mu\text{m}$) e o ambiente é muito agressivo, o tempo de proteção é muito curto.

5. CONCLUSÕES

O alumínio/silício aplicado por imersão a quente, contínuo:

- mantém-se passivo, ou seja, não sofre corrosão apenas em atmosferas não-contaminadas com cloretos e com compostos de enxofre (S_0P_0);
- em atmosferas com pouca ou moderada contaminação de cloretos e/ou compostos de enxofre, sofre corrosão localizada através da periferia das plaquetas de silício. Esta corrosão é acelerada com:
 - * o aumento da taxa de sulfatação;
 - * o aumento da taxa de deposição de cloretos. Efeito mais pronunciado que o da taxa de sulfatação;
 - * contaminação da superfície com os produtos de corrosão do substrato de aço;
- não oferece proteção catódica ao substrato de aço em ambientes com baixa taxa de deposição de cloretos. Em ambientes com moderada taxa de deposição de cloretos, a proteção catódica manifesta-se após a corrosão inicial do substrato de aço. Em ambientes com alta taxa de deposição de cloretos a proteção catódica manifesta-se desde o início.

O *Galvalume*[®] aplicado por imersão a quente, contínuo:

- sofre corrosão através da fase rica em zinco em todas as estações de estudo deste projeto, incluindo a atmosfera de Cuzco (Peru) que é classificada como S_0P_0 . Esta corrosão é acelerada com:
 - * a taxa de sulfatação;
 - * a taxa de deposição de cloretos;
 - * contaminação da superfície com os produtos de corrosão do substrato de aço;
- não oferece proteção catódica ao substrato de aço em ambientes contaminados com compostos enxofre. Se houver a presença concomitante de compostos de enxofre e de cloretos, a proteção catódica não se manifestará com baixa taxa de deposição de cloretos, porém esta proteção será manifestada, desde o início da exposição em ambientes, com moderada e alta taxa de deposição de cloretos. O tempo de proteção é curto;
- sofre um severo processo de corrosão-erosão: provavelmente, as dendritas soltas (devido à corrosão severa da fase interdendrítica ricas em zinco) são facilmente arrancadas pelo vento.

Pelo exposto, pode-se verificar que o *Galvalume*[®] não apresentou um desempenho satisfatório. Este fato pode estar relacionado com a microestrutura da liga: é bem conhecido o fato de que a corrosão do *Galvalume*[®] se dá através da fase interdendrítica rica em zinco. Por esta razão, o desempenho deste revestimento é fortemente afetado pela microestrutura da liga: quanto mais estreitos e mais numerosos

forem os circuitos formados pela fase rica em zinco, melhor será o desempenho. Isto porque os produtos da corrosão da fase rica em zinco serão mais facilmente aprisionados dentro de circuitos estreitos. O aprisionamento destes produtos diminui o avanço da corrosão, tendo como consequência melhor desempenho. No presente estudo, os circuitos da fase rica em zinco, não sendo muito estreitos, não foram capazes de aprisionar os produtos de corrosão e por esta razão seu desempenho não foi muito bom.

O Sendzimir aplicado por imersão a quente, contínuo:

- sofre corrosão generalizada em todas as estações de estudo deste projeto, incluindo a atmosfera de Cuzco (Peru), que é classificada como S_0P_0 . Esta corrosão é acelerada com:
 - * a taxa de sulfatação;
 - * a taxa de deposição de cloretos;
- oferece proteção catódica ao substrato de aço em todas as estações de estudo deste projeto, incluindo a atmosfera de Cuzco (Peru), que é classificada como S_0P_0 . Em ambientes com alta taxa de deposição de cloretos, o tempo de proteção é curto.

O **Galfan®** aplicado por imersão a quente, contínuo, oferece proteção catódica efetiva e sofre corrosão da seguinte maneira:

- nas regiões de exposição da fase eutética, a corrosão ocorre pela interface rica em alumínio. O avanço desta corrosão é muito lenta devido ao fato dos produtos de corrosão ficarem retidos na fina estrutura da fase eutética;
- nas regiões de exposição das dendritas, a corrosão é mais profunda. Em ambientes muito agressivos, o avanço desta corrosão é rápida e atinge o substrato.

A intensidade desta corrosão é influenciada pela:

- taxa de sulfatação;
- taxa de deposição de cloretos;
- presença concomitante de cloretos e compostos de enxofre: em atmosferas em que há contaminação concomitante com cloretos, com taxas de deposição moderadas, e com compostos de enxofre, o comportamento do revestimento é diferente: há rápida corrosão através das dendritas ricas em zinco do revestimento com exposição do substrato que passa a corroer, porém sem avanço. Quando a taxa de deposição de cloretos é mais elevada, o avanço da corrosão é menos pronunciado e o substrato exposto (em pequenas áreas) não corrói, o que indica efetiva proteção catódica.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos Dárcio de Oliveira Souza e Luiz Antônio Braga de Almeida, pela execução dos ensaios e exames laboratoriais dos corpos-de-prova expostos durante 42 meses.

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERDA DE MASSA

Somente os revestimentos que continham zinco com teores elevados foram submetidos ao ensaio de determinação de perda de massa, quais sejam:

- zinco aplicado por imersão a quente, processo não-contínuo (Revestimento 1 - Grupo 3);
- zinco aplicado por eletrodeposição, contínuo (Revestimento 3 - Grupo 3);
- zinco aplicado por imersão a quente pelo processo de Sendzimir, contínuo (Revestimento 4 - Grupo 3);
- *Galfan*® aplicado por imersão a quente, contínuo (Revestimento 5 - Grupo 3);
- *Galvalume*® aplicado por imersão a quente, contínuo (Revestimento D - Grupo 4).

Os resultados das perdas de massa estão apresentados na Tabela 5.1. Os valores apresentados (exceção de Cuba) são os da perda de massa de um corpo-de-prova de área muito próxima a 300 cm². Cabe citar aqui que na maioria dos casos, foi observada corrosão do substrato logo no início da exposição. Assim sendo, era de se esperar que os valores de perda de massa obtidos estivessem sujeitos a erros devido à influência da corrosão do substrato. De fato, quando a corrosão do substrato era muito pronunciada, os valores de perda de massa aumentavam significativamente. Nestes casos, desprezavam-se os valores encontrados. No entanto, quando a corrosão do substrato era pouco intensa, não se conseguia verificar qual era a extensão do erro introduzido. Assim sendo, neste estudo não serão considerados os valores de perda de massa quantitativamente mas sim qualitativamente.

Para melhor visualização, os resultados de perda de massa foram locados num gráfico de perda de massa em função de tempo de exposição (Figura 5.1). Pode-se observar, pelo comportamento das curvas, que não há uma tendência bem definida de variação de perda de massa com o tempo de exposição: em alguns casos nota-se aumento gradativo, em outros observa-se aumento no primeiro ano e diminuição no segundo. Tem-se ainda valor praticamente constante com o tempo de exposição.

Para poder analisar o comportamento dos diferentes revestimentos em cada tipo de atmosfera, foi construída a Tabela 5.2. A apresentação está feita de maneira a dar uma visão geral qualitativa do desempenho relativo de cada revestimento por tipo de atmosfera e foi feita com base nos dados de perda de massa após 3,5 anos de exposição¹. O zinco aplicado por eletrodeposição

¹ Nos casos em que houve corrosão acentuada do substrato no terceiro ano, foram utilizados os valores correspondentes a 1 ano ou 2 anos de exposição.

TABELA 5.1– Resultados das perdas de massa

Estação	Tempo de exposição	Perda de massa por corpo-de-prova (g)						
		Galvalume®	Zn imersão não-contínuo	Zn eletrodeposição	Sendzimir	Galfan®		
S ₀ P ₀	Cuzco (Peru)	1 ano	Desprezível	0,1576	0,0414	0,0171	0,0136	
		2 anos	0,3869	0,2964	0,1072	Desprezível	0,083	
		3,5 anos	0,1346	0,1941	0,1286	0,0596	0,045	
S ₀ P ₂	Cuernavaca (México)	1 ano	Não fornecido	0,25	0,12	0,06	0,075	
		2 anos	Não fornecido	0,526	0,266	0,153	0,296	
		3,5 anos	Não fornecido	0,742	0,401	0,184	0,380	
	São Paulo (Brasil)	1 ano	0,1411	0,503	0,174	0,159	0,072	
		2 anos	0,2453	0,6746	0,2230	0,3058	0,2618	
		3,5 anos	0,3363	1,1224	Perda total	0,65	0,47	
S ₁ P ₀	El Pardo (Espanha)	1 ano	Não fornecido	(1)	(1)	(1)	(1)	
		2 anos	Não fornecido	0,2477	0,0706	0,0363	0,0333	
		3,5 anos	Não fornecido	0,1816	0,0672	0,0409	0,0345	
	La Paz (Bolívia)	1 ano	0,005	0,064	-0,049	-0,029	0,001	
		2 anos	0,136	0,074	0,013	0,025	0,032	
		3,5 anos	0,178	0,154	0,015	0,028	0,036	
	Esmeraldas (Equador)	1 ano	0,564	0,117	1,988	0,161	0,1080	
		2 anos	0,727	0,543	Perda total	0,4085	0,2130	
		3,5 anos	0,675	1,003	Perda total	0,780	0,417	
	Arenal (Costa Rica)	1 ano	Não fornecido	0,595	0,4277	0,3050	0,198	
		2 anos	0,5428	0,7122	Perda total	0,6017	0,3902	
		3,5 anos	0,5436	0,954	Perda total	0,796	0,557	
	S ₁ P ₂	Cólon (Panamá)	1 ano	0,4178	0,8424	Perda total	Extravio	0,3848
			2 anos	0,8994	1,487	Perda total	Extravio	0,7211
			3,5 anos	Perda total	Perda total	Perda total	Extravio	Perda total
S ₁ P ₀	Limon (Costa Rica)	1 ano	Não fornecido	0,6904	3,826	0,5473	0,2964	
		2 anos	0,5504	1,1676	Perda total	0,952	0,6411	
		3,5 anos	0,5575	1,5223	Perda total	1,0416	0,7342	
S ₂ P ₁	Cojimar (Cuba)	1 ano	16,1 g/m ²	74,7 g/m ²	Perda total	58,7 g/m ²	24,7 g/m ²	
		2 anos	0,74	4,1	Perda total	3,34	1,78	
		3,5 anos	Não fornecido	Não fornecido	Perda total	Perda total	Perda total	
S ₃ P ₀	La Voz (Venezuela)	1 ano	25,35	3,1	Perda total	4,20	3,80	
		2 anos	Não fornecido	Perda total	Perda total	Perda Total	Perda total	
		3,5 anos	Não fornecido	Perda total	Perda Total	Perda total	Perda total	
Bahia Solano (Colômbia)	1 ano	0,0069	0,074	0,2488	0,0611	0,0232		
	2 anos	0,0063	0,1858	Não fornecido	0,139	0,0444		
	3,5 anos	0,2938	1,1311	0,9310	Perda total	0,5369		

(1) Valor muito diferente dos demais valores. Foi desconsiderado

não foi incluído nesta Tabela pois este revestimento sofreu rápida corrosão em praticamente todas as estações, com consumo praticamente total do revestimento. Analisando esta Tabela as observações mais relevantes que se pode fazer são:

- as Estações La Paz e La Voz diferiram da tendência apresentada pelas outras estações. Por exemplo: em praticamente todas as atmosferas, o zinco aplicado por imersão a quente, processo não-contínuo, apresentou o pior desempenho. No caso de La Paz e de La Voz, o *Galvalume* apresentou o pior desempenho;
- em atmosferas não-contaminadas com cloreto (S_0P_0 ou S_0P_2) não foi possível estabelecer uma ordem de desempenho entre os revestimentos, visto que cada uma das estações apresentou uma ordem relativa de desempenho dos revestimentos diferente;
- com exceção de apenas uma atmosfera (La Paz), em atmosferas com pouca contaminação com cloreto e com pouca ou nenhuma contaminação com compostos de enxofre (S_1P_0 ou S_1P_1 ou S_1P_2), o *Galfan*[®] apresentou o melhor desempenho. O desempenho comparativo entre os revestimentos foi (desempenho melhor da esquerda para a direita):

Zn imersão ⇔ Sendzimir ⇔ *Galvalume*[®] ⇔ *Galfan*[®]

- em atmosferas altamente contaminadas com cloreto e com pouca ou moderada contaminação com compostos de enxofre (Limon, S_2P_0 ou Cojimar, S_2P_1 ou Bahia Solano - sem classificação) o *Galvalume*[®] apresentou o melhor desempenho. O desempenho comparativo entre os revestimentos foi (desempenho melhor da esquerda para a direita):

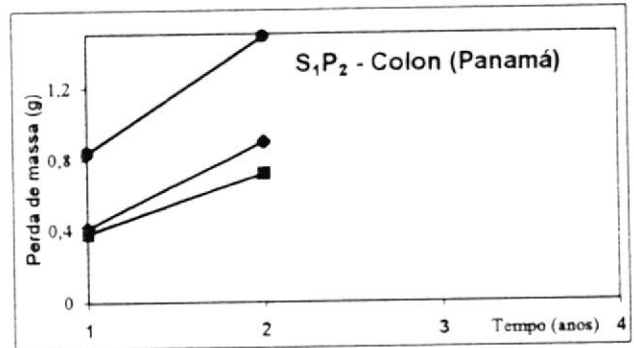
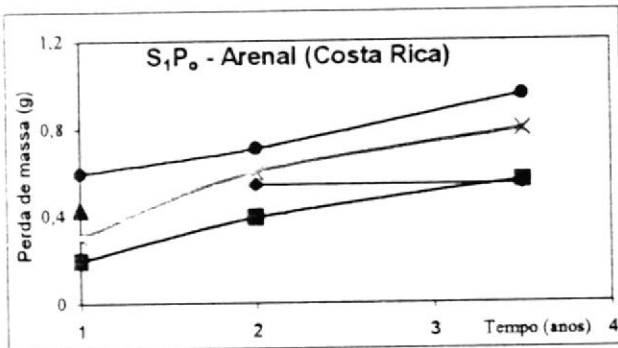
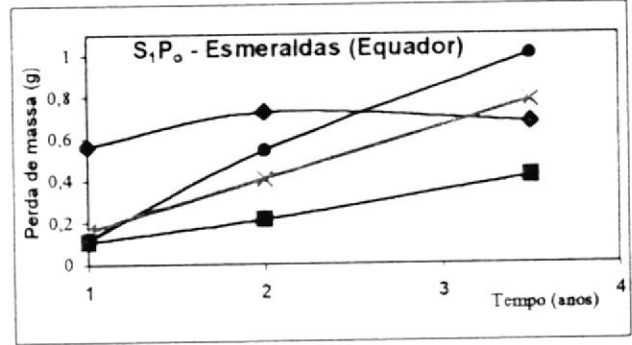
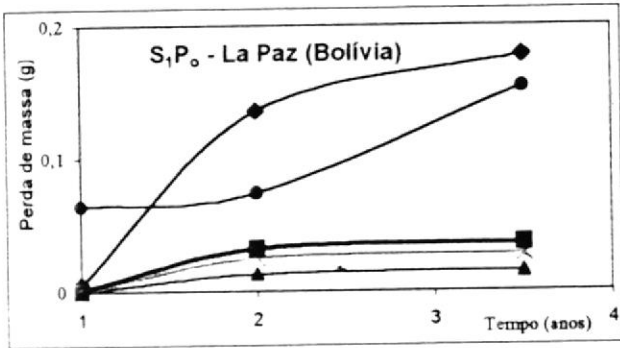
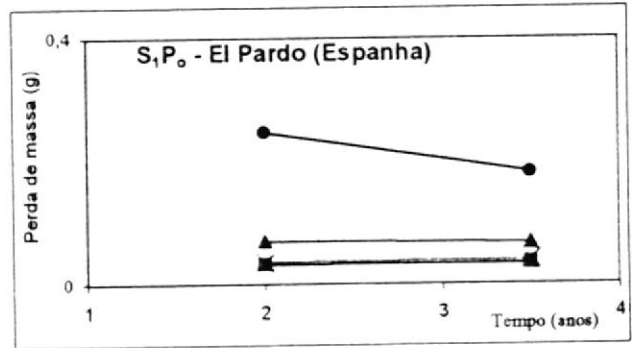
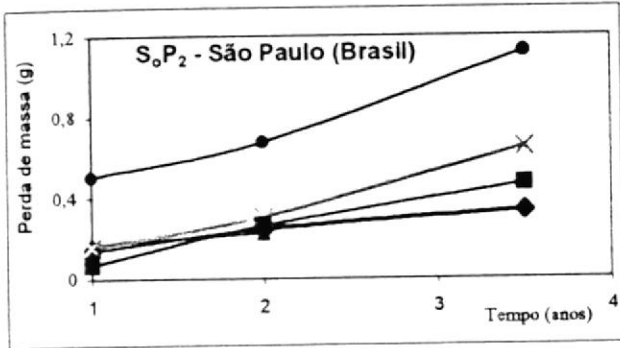
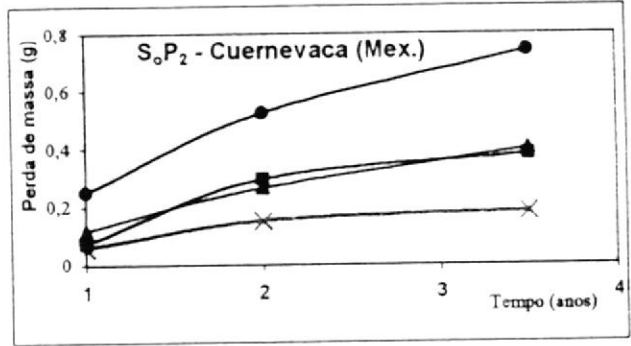
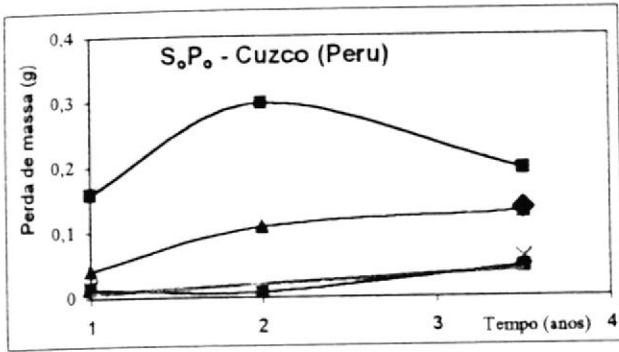
Zn imersão ⇔ Sendzimir ⇔ *Galfan*[®] ⇔ *Galvalume*[®]

- em atmosferas altamente contaminadas com cloreto e com alta incidência de ventos (La Voz, S_3P_0) surpreendentemente o *Galvalume*[®] passou a apresentar o pior desempenho. O desempenho comparativo entre os revestimentos nesta estação foi (desempenho melhor da esquerda para a direita):

Galvalume[®] ⇔ Sendzimir ⇔ *Galfan*[®] ⇔ *Zn imersão*

A Tabela 5.3 foi construída agrupando agora as estações de acordo com a ordem de desempenho dos revestimentos. Para se ter uma visão bastante ampla, nesta Tabela foram incluídos os valores de perda de massa, de taxa de deposição de cloretos e de taxa de sulfatação.

◆ Galvalume® • Zn imersão não-contínuo ▲ Zn eletrodeposição ✕ Sendzimir ■ Galfan®



continua ...

FIGURA 5.1 - Perda de massa em função do tempo de exposição

◆ Galvalume® • Zn imersão não-contínuo ▲ Zn eletrodeposição ◊ Sencizimar ■ Galfan®

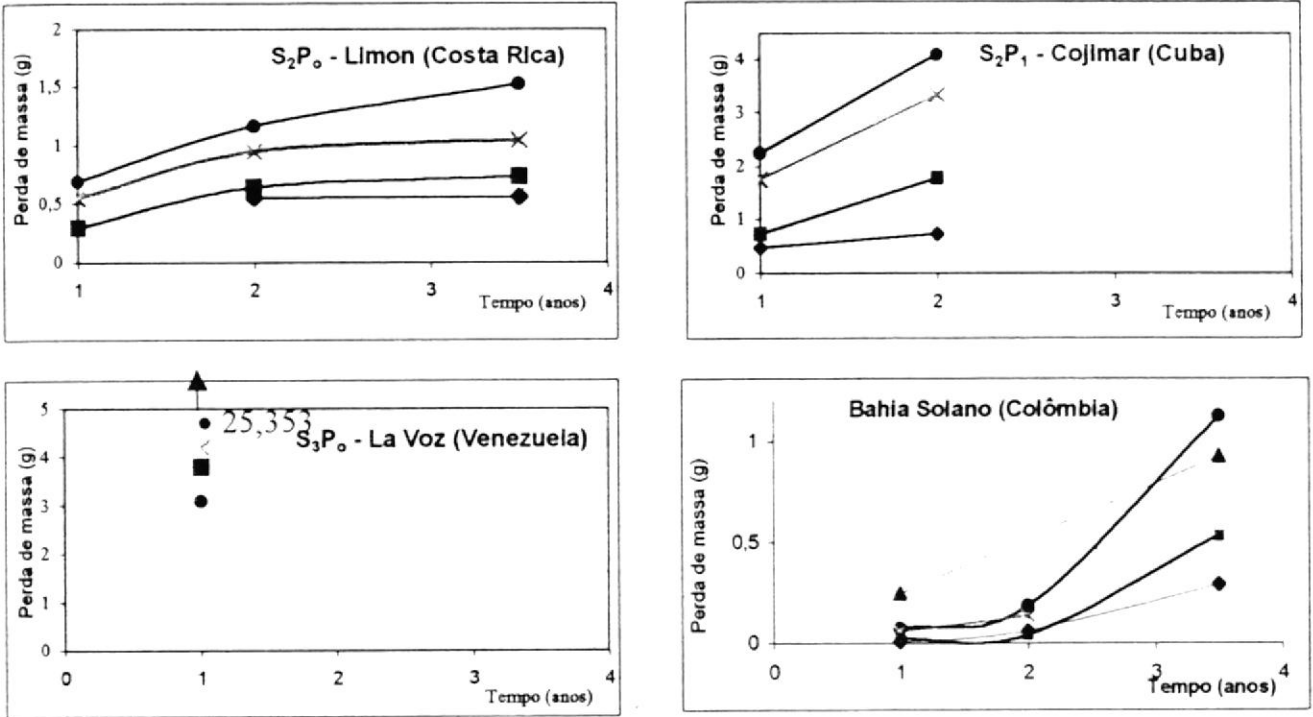


FIGURA 5.1 - Perda de massa em função do tempo de exposição (continuação)

TABELA 5.2 – Visão qualitativa do desempenho dos diferentes revestimentos por tipo de atmosfera

Estação		Pior $\xrightarrow{\hspace{10em}}$ Desempenho $\xrightarrow{\hspace{10em}}$ Melhor			
S_0P_0	Cuzco (Peru)	Zn imersão	\Leftrightarrow Galvalume®	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®
S_0P_2	Cuernevaca (México)	Zn imersão	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Sendzimir	
	São Paulo (Brasil)	Zn imersão	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Galvalume®
S_1P_0	El Pardo (Espanha)	Zn imersão	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®	
	La Paz (Bolívia)	Galvalume®	\Leftrightarrow Zn imersão	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Sendzimir
	Esmeralda (Equador)	Zn imersão	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galvalume®	\Leftrightarrow Galfan®
	Arenal (Costa Rica)	Zn imersão	Sendzimir	Galvalume®	Galfan®
S_1P_2	Colon (Panamá)	Zn imersão	\Leftrightarrow Galvalume®	\Leftrightarrow Galfan®	
S_2P_0	Limon (Costa Rica)	Zn imersão	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Galvalume®
S_2P_1	Cojimar (Cuba)	Zn imersão	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Galvalume®
S_3P_0	La Voz (Venezuela)	Galvalume®	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Zn imersão
-	Bahia Solano (Colômbia)	Zn imersão	\Leftrightarrow Sendzimir	\Leftrightarrow Galfan®	\Leftrightarrow Galvalume®

TABELA 5.3 – Agrupamento das estações de acordo com a ordem de desempenho dos revestimentos no que se refere à perda de massa

Estação	Cl SO ₂	Desempenho			
		Pior	→		Melhor
S ₀ P ₀	Cuzco (Peru) Desprezível Desprezível	Zn imersão (0,1941 g)	⇒ Galvalume® (0,1346 g)	⇒ Sendzimir (0,0500 g)	⇒ Galfan® (0,045 g)
S ₀ P ₂	Cuernevaca (México) Desprezível 40,4 mg/(m ² .d)		Zn imersão (0,742 g)	⇒ Galfan® (0,38 g)	⇒ Sendzimir (0,184 g)
S ₀ P ₂	São Paulo (Brasil) Desprezível 57,78 mg/(m ² .d)	Zn imersão (1,1224 g)	⇒ Sendzimir (0,35 g)	⇒ Galfan® (0,47 g)	⇒ Galvalume® (0,3363 g)
-	Bahia Solano (Colômbia) Sem classificação	Zn imersão (1,1311 g)		Galfan® (0,5369 g)	⇒ Galvalume® (0,2938 g)
S ₁ P ₀	Limon (Costa Rica) 54,5 mg/(m ² .d) 7,8 mg/(m ² .d)	Zn imersão (1,5223 g)	⇒ Sendzimir (0,410 g)	⇒ Galfan® (0,7342 g)	⇒ Galvalume® (0,5575 g)
S ₂ P ₁	Cojimar (Cuba) 104 mg/(m ² .d) 22,5 mg/(m ² .d)	Zn imersão (4,1 g)*	⇒ Sendzimir (0,734 g)*	⇒ Galfan® (1,78 g)*	⇒ Galvalume® (0,74 g)*
S ₁ P ₀	El Pardo (Espanha) 3,9 mg/(m ² .d) 6,4 mg/(m ² .d)	Zn imersão (0,1816 g)	⇒ Sendzimir (0,0400 g)		Galfan® (0,0345 g)
S ₁ P ₀	Esmeralda (Equador) 16,47mg/(m ² .d) 2,09 mg/(m ² .d)	Zn imersão (1,003 g)	⇒ Sendzimir (0,278 g)	⇒ Galvalume® (0,675 g)	⇒ Galfan® (0,417 g)
S ₁ P ₀	Arenal (Costa Rica) 20,9 mg/(m ² .d) 8,25 mg/(m ² .d)	Zn imersão (0,954 g)	⇒ Sendzimir (0,270 g)	⇒ Galvalume® (0,5436 g)	⇒ Galfan® (0,557 g)
S ₁ P ₂₁	Colon (Panamá) 16,76 mg/(m ² .d) 47,4 mg/(m ² .d)	Zn imersão (1,487 g)*		Galvalume® (0,8994 g)*	⇒ Galfan® (0,7211 g)*
S ₁ P ₀	La Paz (Bolivia) 6,6 mg/(m ² .d) 2,32 mg/(m ² .d)	Galvalume® (0,178 g)	⇒ Zn imersão (0,154 g)	⇒ Galfan® (0,036 g)	⇒ Sendzimir (0,028 g)
S ₃ P ₀	La Voz (Venezuela) 567,7 mg/(m ² .d) 9,5 mg/(m ² .d)	Galvalume® (25,35 g)**	⇒ Sendzimir (0,25 g)**	⇒ Galfan® (3,8 g)**	⇒ Zn imersão (3,1 g)**

* 2 anos

** 1 ano

