



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE LA ALEACIÓN  
DE Zn-21wt%Al-2wt%Cu EXPUESTA A LA  
ATMÓSFERA Y A CONDICIONES  
SEVERAS DE SALINIDAD

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

MECÁNICA – METALMECANICA

P R E S E N T A :

ING. HERIBERTO VEGA SÁMANO

TUTOR:

DRA. FRIDA MARÍA LEÓN RODRÍGUEZ



2006

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. TCHIJOV VLADIMIR  
Secretario: Dra. CRUZ LEÓN GLORIA  
Vocal: Dra. LEÓN RODRÍGUEZ FRIDA MARÍA  
1<sup>er</sup>. Suplente: M. en I. CONTRERAS ESPINOSA JOSÉ JUÁN  
2<sup>do</sup>. Suplente: M. en I HERNÁNDEZ GÓMEZ VICTOR HUGO

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUATITLAN

**TUTOR DE TESIS:**  
DRA. FRIDA MARÍA LEÓN RODRÍGUEZ

---

**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad que brinda a todos los estudiantes para llegar a ser cada día mejores a través del apoyo y guía de sus profesores.

Se agradece en especial el apoyo recibido del proyecto PAPIIT IN100405 de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Dr. Rafael Moreno Esparza de la Facultad de Química por el apoyo en los estudios de Difracción de Rayos X.

Al Ing. Ubaldo Eduardo Márquez Amador de la Facultad de Ingeniería por el apoyo en los estudios de Dureza y Líquidos Penetrantes.

Al Dr. Armando Aguilar Márquez, por su gran apoyo y valiosas aportaciones a este trabajo.

En especial a la Dra. Frida María León Rodríguez, que con su guía y paciencia que dieron forma al presente trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), por el apoyo recibido para la conclusión de la presente tesis de Maestría.

# DEDICATORIAS

Dedico este humilde trabajo con un profundo agradecimiento y cariño a mis padres:

Rafael Vega Torres y Matilde Sámano Salazar.

Que siempre me han brindado su guía, apoyo y confianza durante mi formación académica.

A mi tía Eloisa Vega Torres por brindarme siempre su apoyo y buenos consejos.

A mis hermanos:

Rafael Vega Sámano.

Edgar Vega Sámano.

Ha sido una gran experiencia crecer con ustedes.

Agradezco en especial a mis compañeros y amigos, con los cuales compartí momentos especiales de trabajo y amistad.

Juan Carlos Axotla García.

Gilberto Arroyo Páramo.

## ÍNDICE.

<b>I RESUMEN.....</b>	<b>XVI</b>
-----------------------	------------

<b>II OBJETIVOS.....</b>	<b>XVIII</b>
--------------------------	--------------

### **CAPÍTULO 1. CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS.... 1**

1 Clasificación de la corrosión.....	1
2 Corrosión húmeda.....	1
3 Corrosión seca o corrosión por gases.....	2
4 Tipos de corrosión.....	2
5 Tipos de corrosión de acuerdo a las celdas que se presentan.....	2
6 Clasificación de acuerdo a los efectos básicos que dan lugar a la corrosión.....	3
7 Clasificación de la corrosión por los medios corrosivos.....	3
8 Clasificación de acuerdo a las características de la industria.....	4
9 Corrosión húmeda y seca.....	5
10 Naturaleza electroquímica del proceso de la corrosión en un medio acuoso.....	5
10.1 Componentes y funcionamiento de una celda galvánica.....	5
10.2 Celdas de corrosión.....	7
10.3 Proceso de corrosión por celdas galvánicas.....	8
10.4 Análisis del comportamiento de las celdas de corrosión.....	10
10.5 El potencial de la celda o fuerza electro-motriz (F. e. m.).....	11
10.6 Energía libre de o energía de Gibbs.....	11
10.7 Modificación del potencial de la celda por la concentración de reactivos y productos.....	12
10.8 Diagramas de potencial-pH (diagramas de Pourbaix).....	13
10.9 La pasivación.....	15
10.10 La repasivación.....	18

### **CAPÍTULO 2. CONTAMINACIÓN Y CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.....21**

1 La atmósfera.....	21
---------------------	----

1.1 Capas de la atmósfera.....	21
1.1.1 La troposfera y la tropopausa.....	22
1.1.2 La estratosfera y la estratopausa.....	23
1.1.3 La mesosfera y la mesopausa.....	23
1.1.4 La termosfera.....	24
2 Composición química del aire atmosférico.....	24
2.1 Los principales contaminantes de la atmósfera dentro de los componentes naturales del aire.....	25
2.1.1 El ozono.....	26
2.1.2 El dióxido de carbono.....	26
3 Contaminantes atmosféricos.....	27
3.1 Definición de contaminante.....	27
3.2 Contaminantes primarios gaseosos.....	27
3.2.1 Producción natural y artificial de gases.....	28
4 El fenómeno de la inversión térmica.....	29
5 Mecanismos de dispersión y eliminación de los contaminantes.....	30
5.1 Transporte.....	31
5.2 Reacciones químicas.....	31
5.3 Deposición.....	31
5.4 Decaimiento.....	32
6 Origen y efectos de los principales contaminantes.....	32
6.1 Monóxido de carbono.....	32
6.1.1 Fuentes de emisoras de CO.....	32
6.1.1.1 Fuentes naturales de CO.....	33
6.1.1.2 Fuentes antropogénicas de CO.....	34
6.1.2 Formación del CO.....	36
6.1.2.1 La combustión incompleta de carbón o de compuestos de carbono.....	36
6.1.2.2 La reacción a altas temperaturas entre el CO <sub>2</sub> y materiales que contienen carbono.....	36
6.1.2.3 Disociación del CO <sub>2</sub> en altas temperaturas en CO y O <sub>2</sub> .....	37
6.1.3 Procesos naturales de eliminación del CO.....	37
6.1.3.1 Reacciones atmosféricas.....	37

6.1.3.2 Eliminación del CO por el suelo.....	38
6.1.4 Concentración de CO en zonas urbanas.....	38
6.1.5 Efectos del CO en la atmósfera.....	39
6.2 Óxidos de Nitrógeno y sus características.....	39
6.2.1 Origen de las emisiones de óxidos de nitrógeno.....	40
6.2.1.1 Fuentes naturales de NO <sub>x</sub> .....	40
6.2.1.2 Fuentes antropogénicas de NO <sub>x</sub> .....	41
6.2.2 Formación de los óxidos de nitrógeno.....	41
6.2.3 Distribución de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera.....	43
6.2.3.1 Los óxidos de nitrógeno en la troposfera.....	43
6.3 Contaminación en la zona urbana.....	44
6.3.1 Smog fotoquímico.....	44
6.3.1.1 Formación del smog fotoquímico.....	46
6.3.1.2 Reacciones de iniciación.....	46
6.3.1.3 Reacciones de ramificación.....	46
6.3.1.4 Reacciones de propagación.....	46
6.3.1.5 Reacciones de terminación.....	46
6.4 Compuestos de azufre.....	46
6.4.1 Fuentes naturales de compuestos de azufre.....	47
6.4.2 Fuentes antropogénicas de compuestos de azufre.....	47
6.4.2.1 Fuentes de sulfuro de hidrogeno (H <sub>2</sub> S).....	47
6.4.2.2 Fuentes de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	48
6.4.3 Reacciones del dióxido de azufre en la atmósfera.....	49
6.4.3.1 Reacción con vapor de agua.....	49
6.4.3.2 Oxidación directa.....	49
6.4.3.3 Oxidación catalítica.....	49
6.4.3.4 Oxidación fotoquímica.....	50
6.5 Precipitación Ácida.....	50
6.6 Hidrocarburos y compuestos orgánicos.....	51
7 Corrosión atmosférica.....	53
7.1 Corrosión atmosférica seca.....	53
7.2 Corrosión atmosférica bajo condiciones de humedad moderada.....	53
7.3 Corrosión atmosférica bajo condiciones de humedad apreciable.....	53

8 Fenómenos dentro de la corrosión atmosférica.....	54
8.1 Campos que involucran la corrosión atmosférica.....	54
8.1.1 Química atmosférica.....	54
8.1.2 Transporte de masa y ciencia de las interfaces.....	54
8.1.3 Química de las soluciones acuosas.....	54
8.1.4 Química de los depósitos y de los sólidos.....	55
9 Etapas de la corrosión atmosférica.....	55
9.1 Etapas iniciales de la corrosión atmosférica.....	55
9.2 Etapas intermedias durante la corrosión atmosférica.....	57
9.3 Etapas finales de la corrosión atmosférica.....	62

### **CAPÍTULO 3. ESTUDIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ALEACIONES**

<b>Zn- Al- Cu.....</b>	<b>65</b>
1 Estudios sobre aleaciones zinc-aluminio.....	65
2 Estudios sobre aleaciones zinc-aluminio-cobre (Zinalco).....	66
3 Resistencia a la corrosión de las aleaciones zinc-aluminio-cobre (Zinalco).....	68
4 Procesos de transformación del zinalco.....	71
4.1 Fundición.....	71
4.2 Inyección.....	72
4.3 Extrusión.....	72
4.4 Forjado.....	72
4.5 Laminación.....	72
4.6 Trefilado.....	73
4.7 Termoformado.....	73
5 Maquinado.....	74
6 Acabados.....	74
6.1 Limpieza.....	74
6.2 Pulido.....	74
6.3 Recubrimientos.....	75
6.3.1 Pintura.....	75
6.3.2 Pavonado.....	75
7 Características del las aleaciones zinc-aluminio-cobre.....	75



<b>CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>77</b>
1 Exposición atmosférica.....	77
1.1 Construcción de los bastidores para exposición.....	77
1.1.1 Características de la base.....	77
1.1.2 Construcción de sujetadores o porta muestras para las probetas.....	78
1.2 Características de los sitios de prueba seleccionados.....	80
1.2.1 Centro de monitoreo merced.....	81
1.2.2 Centro de monitoreo Xalostoc.....	82
1.2.3 Centro de monitoreo Villa de las flores.....	83
1.3 Colocación y orientación de los bastidores.....	85
1.4 Fabricación de los especímenes de prueba.....	85
1.5 Preparación de las probetas para la exposición ambiental.....	86
1.5.1 Identificación de las probetas.....	86
1.5.2 Limpieza de probetas.....	86
1.5.3 Registro de pesos y medidas.....	87
1.5.4 Registro fotográfico de las probetas antes de exposición.....	87
1.6 Colocación de las probetas en los sitios de exposición.....	87
1.7 Recolección de datos de probetas durante la exposición.....	88
1.8 Levantamiento de las probetas.....	89
1.9 Registro el peso de las probetas después de exposición.....	89
1.10 Limpieza después de exposición atmosférica.....	89
1.10.1 Ejemplo del procedimiento de limpieza de los productos de corrosión.....	90
1.11 Establecer el grado de corrosión.....	92
1.12 Estudios no destructivos.....	92
1.12.1 Difracción de rayos X.....	92
1.12.2 Microscopia de barrido electrónico.....	93
1.12.3 Pruebas de dureza.....	93
1.12.4 Evaluación de las probetas para detección de picaduras por corrosión atmosférica.....	94
1.12.5 Examinación e identificación de las picaduras.....	94

1.12.5.1 Inspección visual.....	94
1.12.5.2 Procedimiento para identificación de picaduras por medio de líquidos penetrantes.....	95
1.12.5.2.1 Procedimiento de aplicación de los líquidos penetrantes.....	97
2 Exposición a condiciones severas de salinidad.....	97
2.1 Procedimiento para la preparación y limpieza de las probetas que se colocaran en la cámara salina.....	98
2.2 Limpieza previa de probetas.....	98
2.3 Registro de pesos y medidas.....	99
2.4 Registro fotográfico de las probetas antes de exposición.....	99
2.5 Colocación de las Probetas en la Cámara salina.....	99
2.6 Características de la cámara de niebla salina.....	101
2.7 Características de la solución salina empleada.....	101
2.8 Preparación de la solución salina.....	101
2.9 Inicio de la prueba en cámara de niebla salina.....	102
2.10 Limpieza de las probetas después de la exposición en la cámara de niebla salina.....	104
2.11 Análisis y Evaluación de la Corrosión en Cámara de niebla Salina.....	104
2.11.1 Registro el peso de las probetas después de exposición.....	104
2.11.2 Limpieza después de exposición en la cámara de niebla salina.....	104
2.11.3 Perdida de y ganancia de peso.....	105
2.11.4 Conteo de área afectada por la corrosión.....	105
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
1 Resultados de exposición de la aleación Zn -21%wtAl -2%wtCu a la atmósfera.....	106
1.1 Limpieza inicial, registro de peso, dimensiones fotográfico y de las probetas antes de exposición.....	106
1.2 Recolección de datos visuales durante la prueba.....	107
1.3 Levantamiento de probetas.....	109
1.4 Limpieza de los productos de corrosión y registro de peso de las probetas....	109

1.5 Diferencias peso para análisis estadístico.....	110
1.6 Análisis estadístico de los porcentajes de pérdida de peso.....	111
1.7 Difracción de rayos X.....	113
1.8 Microscopia de barrido electrónico.....	116
1.9 Pruebas de dureza.....	128
1.10 Porcentaje de área afectada por la corrosión por picaduras.....	132
1.10.1 Prueba con líquidos penetrantes.....	133
2 Resultados de exposición de la aleación Zn-21%wtAl -2%wtCu a condiciones severas de salinidad.....	138
2.1 Fabricación e identificación de especímenes de prueba.....	138
2.2 Limpieza inicial, registro de peso dimensiones y fotográfico de las probetas antes de exposición.....	138
2.3 Recolección de datos visuales durante la prueba.....	139
2.4 Levantamiento de probetas.....	140
2.5 Limpieza de productos de corrosión y registro de peso de las probetas.....	140
2.6 Diferencias peso para análisis estadístico.....	144
2.7 Porcentaje de área afectada por la corrosión por picaduras.....	147
<b>CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>148</b>
1 Exposición de la aleación Zn-21%wtAl -2%wtCu a tres ambientes atmosféricos diferentes.....	148
1.1 Perdida de peso por exposición atmosférica.....	148
1.2 Prueba de Difracción de Rayos X.....	148
1.3 Microscopia de Barrido Electrónico.....	149
1.4 Dureza.....	151
1.5 El Porcentaje de Área Afectada por Picaduras.....	152
1.5.1 Prueba con Líquidos Penetrantes.....	152
2 Exposición en Cámara de Niebla Salina.....	153
<b>ANEXO A.</b>	
<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....</b>	<b>155</b>

<b>ANEXO B.</b>	
<b>PLANOS DEL BASTIDOR DE EXPOSICIÓN Y PORTA PROBETA.....</b>	<b>168</b>

<b>ANEXO C.</b>	
<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CÁMARA SALINA Y PARÁMETROS DE LA CÁMARA SALINA.....</b>	<b>173</b>

<b>ANEXO D.</b>	
<b>COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ZINALCO COMERCIAL CON OTROS MATERIALES.....</b>	<b>176</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>180</b>
--------------------------	------------

## **ÍNDICE CUADROS.**

Cuadro 1 Gases que componen el aire atmosférico.....	25
Cuadro 2 Producción natural y artificial de gases.....	29
Cuadro 3 Fuentes antropogénicas del CO.....	35
Cuadro 4 Tiempos de oxidación del NO de acuerdo a su concentración.....	43
Cuadro 5 Fuentes principales de compuestos de azufre en la atmósfera.....	48
Cuadro 6 Clasificación de ácidos y bases de Lewis.....	60
Cuadro 7 Propiedades del zinalco comercial.....	76
Cuadro 8 Piezas utilizadas en la base del bastidor.....	77
Cuadro 9 Piezas utilizadas en el marco del bastidor y aisladores.....	78
Cuadro 10 Piezas utilizadas en los porta muestra.....	80
Cuadro 11 Características de los tornillos usados por cada porta muestra.....	80
Cuadro 12 Ubicación de los puntos de exposición.....	81
Cuadro 13 Sustancias utilizadas en la limpieza química según norma ASTM G-1.....	90
Cuadro 14 Probetas utilizadas en la aplicación de líquidos penetrantes.....	96
Cuadro 15 Colocación de las probetas en soportes dentro de la cámara salina.....	100
Cuadro 16 Características y capacidades de la cámara salina utilizada.....	101

Cuadro 17	Parámetros de funcionamiento de la cámara salina.....	103
Cuadro 18	Pesos y medidas de las probetas para exposición ambiental.....	107
Cuadro 19	Pesos de las probetas del tercer levantamiento después de exposición y limpieza.....	111
Cuadro 20	Media y desviación estándar de el porcentaje de pérdida de peso.....	111
Cuadro 21	Pruebas de dureza de las probetas con 240 días de exposición.....	128
Cuadro 22	Dureza promedio y desviación estándar de las probetas expuestas a condiciones atmosféricas.....	128
Cuadro 23	Porcentaje de área afectada por picaduras observables a simple vista en probetas con 204 días de exposición.....	132
Cuadro 24	Porcentaje de área afectada por picaduras observables con líquidos penetrantes en probetas con 204 días de exposición.....	137
Cuadro 25	Pesos y medidas de las probetas para exposición en cámara de neblina salina.....	139
Cuadro 26	Pesos de las probetas después de limpieza de productos de corrosión con los líquidos recomendados en ASTM G-1.....	144
Cuadro 27	Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.....	144
Cuadro 28	Pérdida de peso promedio y desviación estándar de las probetas expuestas y testigos.....	145
Cuadro 29	Porcentaje de área afectada por picaduras observables a simple vista en probetas con 1000 hrs. de exposición.....	147
Cuadro 30	Análisis normal de varianza aleatoria.....	156
Cuadro 31	Comparación de los intervalos de confianza.....	156
Cuadro 32	Niveles de significancia entre los intervalos.....	156
Cuadro 33	Comparaciones Tukey.....	157
Cuadro 34	Comparación Fisher.....	157
Cuadro 35	Análisis normal de varianza aleatoria.....	159
Cuadro 36	Comparación de los intervalos de confianza.....	159
Cuadro 37	Niveles de significancia entre los intervalos.....	159
Cuadro 38	Comparaciones Tukey.....	160
Cuadro 39	Comparaciones Fisher.....	160
Cuadro 40	Análisis de varianza aleatoria para dureza.....	162

Cuadro 41 Comparación de los intervalos de confianza de las 4 variables.....	162
Cuadro 42 Comparaciones entre los intervalos.....	162
Cuadro 43 Comparaciones Tukey.....	163
Cuadro 44 Comparaciones Fisher.....	163
Cuadro 45 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.....	165
Cuadro 46 Análisis normal de varianza aleatoria.....	165
Cuadro 47 Comparación de los intervalos de confianza.....	166
Cuadro 48 Comparaciones entre intervalos.....	166
Cuadro 49 Comparación Tukey.....	166
Cuadro 50 Comparación Fisher.....	166
Cuadro 51 Medidas del bastidor según norma ASTM G-50.....	168
Cuadro 52 Piezas utilizadas en los porta muestra.....	171
Cuadro 53 Características de los tornillos usados por cada porta muestra.....	171
Cuadro 54 Condiciones de la solución salina empleada en la exposición.....	173
Cuadro 55 Condiciones de trabajo de la cámara de niebla salina.....	174
Cuadro 56 Condiciones de trabajo de la cámara de niebla salina continuación.....	175
Cuadro 57 Comparación de las propiedades del zinalco con las de aluminio y latón.....	176
Cuadro 58 Comparación de las propiedades del zinalco con las de bronce, hierro, acero y acero inoxidable.....	177
Cuadro 59 Comparación de las propiedades del zinalco con las del Zamak.....	178
Cuadro 60 Comparación de las propiedades del zinalco con las de aleaciones Zn-Al.....	179

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 1 Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión.....	6
Fig. 2 Formación de zonas anódicas y catódicas en la superficie del acero en exposición atmosférica.....	9
Fig. 3 Diagrama de Pourbaix para el aluminio.....	15
Fig. 4 Curva de polarización anódica para el Fe.....	17

Fig. 5 Curva de velocidad de pasivación y repasivación.....	20
Fig. 6 Capas de la atmósfera de acuerdo a la temperatura.....	22
Fig. 7 Ciclo natural del CO.....	34
Fig. 8 Ciclo de los óxidos de nitrógeno.....	45
Fig. 9 Bastidor para exposición atmosférica vista superior.....	168
Fig. 10 Desglose de piezas del bastidor de exposición.....	169
Fig. 11 Dimensiones del bastidor armado.....	170

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.

Fotografía 1 Probetas en diferentes tiempos de la exposición atmosférica.....	108
Fotografía 2 Probeta 9, 2 kX Aumentos.....	116
Fotografía 3 Probeta 9, 2 kX Aumentos.....	117
Fotografía 4 Probeta 9, 100 X Aumentos.....	117
Fotografía 5 Probeta 9, 1 kX Aumentos.....	118
Fotografía 6 Probeta 9, 1.5 kX Aumentos.....	118
Fotografía 7 Probeta 3, 1.5 kX Aumentos.....	119
Fotografía 8 Probeta 3, 4.5 kX Aumentos.....	119
Fotografía 9 Probeta 3, 2.5 kX Aumentos.....	120
Fotografía 10 Probeta 3, 4.5 kX Aumentos.....	120
Fotografía 11 Probeta 10, 4.5 kX Aumentos.....	122
Fotografía 12 Probeta 10, 4.5 kX Aumentos.....	122
Fotografía 13 Probeta 10, 7 kX Aumentos.....	123
Fotografía 14 Probeta 10, 4.5 kX Aumentos.....	123
Fotografía 15 Probeta 16, 300 X Aumentos.....	124
Fotografía 16 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.....	124
Fotografía 17 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.....	125
Fotografía 18 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.....	126
Fotografía 19 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.....	126
Fotografía 20 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.....	127
Fotografía 21 Probeta con el líquido limpiador.....	134
Fotografía 22 Probeta con líquido penetrante.....	134
Fotografía 23 Probeta con líquido penetrante seco.....	134

Fotografía 24 Probeta con líquido revelador.....	134
Fotografía 25 Probeta después de aplicar revelador, dejar secar y vista con luz ultravioleta.....	135
Fotografía 26 Probeta después de aplicar revelador limpiando exceso y dejando secar, vista con luz ultravioleta.....	135
Fotografía 27 Probeta después de aplicar revelador limpiando exceso, dejando secar, aplicando revelador y limpiando excesos, vista con luz ultravioleta.....	135
Fotografía 28 Probeta 3 Merced.....	136
Fotografía 29 Probeta 10 Xalostoc.....	136
Fotografía 30 Probeta 16 Villa.....	136
Fotografía 31 Probeta 9 Testigo.....	136
Fotografía 32 Probeta después de 3, 5, 12 y 14 días de exposición.....	139
Fotografía 33 Probeta 4 antes de exposición en cámara salina parte anterior.....	142
Fotografía 34 Probeta 4 antes de la exposición en cámara salina parte posterior.....	142
Fotografía 35 Probeta 4 después de exposición en cámara salina.....	142
Fotografía 36 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.1.....	142
Fotografía 37 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.2.....	143
Fotografía 38 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.3.....	143
Fotografía 39 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.5.....	143
Fotografía 40 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.6.....	143
Fotografía 41 Porta muestra terminado.....	172

## ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 1 Porcentaje de los contaminantes primarios en la atmósfera.....	28
Gráfica 2.Porcentajes de emisores de CO a la atmósfera.....	33
Gráfica 3 Origen de las emisiones de óxidos de nitrógeno.....	40
Gráfica 4.Gráfica de puntos para las zonas de exposición.....	112
Gráfica 5 Gráfica de caja para las zonas de exposición por pérdida de peso por las zonas de exposición.....	112



Gráfica 6 Calibración del equipo con la probeta testigo.....	113
Gráfica 7 Identificación de los componentes de la aleación por medio de difracción de rayos X.....	114
Gráfica 8 Comparación de las graficas que muestran los componentes de la aleación por medio de difracción de rayos X.....	114
Gráfica 9 Sobre posición de las graficas de las probetas 3 merced y 9 testigo mostrando la completa similitud de ambas.....	115
Gráfica 10 Gráfica puntos para las zonas de exposición por dureza.....	129
Gráfica 11 Gráfica de caja para las zonas de exposición por dureza.....	130
Gráfica 12 Gráfica puntos para las zonas de exposición y testigo por dureza.....	130
Gráfica 13 Gráfica de caja para las zonas de exposición y testigo por dureza.....	131
Gráfica 14 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.....	145
Gráfica 15 Gráfica de puntos para probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.....	146
Gráfica 16 Gráfica de cajas para probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.....	146
Gráfica 17 Gráfica de puntos para el % de peso para las 3 zonas de exposición atmosférica.....	158
Gráfica 18 Diagrama de caja para la pérdida de peso en las 3 zonas de exposición.....	158
Gráfica 19 Gráfica de puntos para la dureza en las 3 zonas de exposición.....	161
Gráfica 20 Gráfica de caja para la dureza en las 3 zonas de exposición.....	161
Gráfica 21 Gráfica puntos para la dureza por zona de exposición y testigo.....	164
Gráfica 22 Gráfica de caja para las durezas de las 3 zonas de exposición y testigo.....	164
Gráfica 23 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.....	165
Gráfica 24 Gráfica de puntos para la pérdida de peso de las probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.....	167
Gráfica 25 Gráfica de cajas para probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.....	167

## SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.

ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
CE	Conductancia específica.
DH	Deposito húmedo.
DS	Deposito sólido.
DT	Deposito total.
DV	Dirección del viento.
$E^0$	Potencial estándar de electrodo.
$E^0_{\text{celda}}$ , E	Potencial estándar de celda.
$E^0_{\text{red.}}$	Potencial estándar de reducción.
F	Constante de Faraday.
$\Delta G$	Energía libre de Gibbs.
$\Delta G^0$	Energía libre de Gibbs en condiciones estándar.
HR	Humedad relativa.
ln	Logaritmo natural.
log	Logaritmo base 10.
n	Numero de moles de electrones que se transfieren en la reacción.
pH	Acidez.
PM10	Partículas menores a 10 micrómetros
PM2.5	Partículas menores a 2.5 micrómetros.
PST	Partículas totales suspendidas.
Q	Expresión de la constante de equilibrio.
R	Constante universal de los gases.
T	Temperatura.
TMP	Temperatura ambiental.
UVA	Radiación ultravioleta tipo A.
UVB	Radiación ultravioleta tipo B.
VV	Velocidad del viento.
wt %	Porcentaje en peso.
(HCHO)	Formaldehído.

(HC)	Hidrocarburos.
(PHA)	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.
(PAN)	Nitratos de peroxiacilo.
(SO <sub>x</sub> )	Óxidos de azufre.
(NO <sub>x</sub> )	Óxidos de nitrógeno.

## **I RESUMEN.**

En el presente estudio se evaluó el comportamiento de la aleación Zn-21%wtAl - 2%wtCu en tres diferentes ambientes atmosféricos, de tal manera que la exposición atmosférica se asemejará lo más posible a un ambiente de trabajo real del material al ser expuesto, estableciendo si el ambiente afecta en la degradación del material, además de observar el comportamiento del mismo material en condiciones severas de salinidad al aplicar una prueba en cámara de neblina salina con una duración de 1000 horas.

Para la primera parte del estudio se decidió exponer el material con una capa pasiva que desarrolla el material después de un periodo mayor a un año de almacenaje en condiciones normales en las que esto ocurre y evaluar el comportamiento del material en estas condiciones.

El método de limpieza para la primer parte del experimento se escogió de tal manera que no afectara en demasía la superficie del material, conservando la capa de oxido inicial, aunque esta no fuera perceptible a simple vista, como se vio en la probeta testigo durante la inspección con microscopia de barrido electrónico, además se estableció la diferencia de pesos de las probetas debidas al proceso de limpieza de productos de corrosión realizando un análisis estadístico.

Se realizaron estudios de difracción de rayos X en probetas expuestas en las tres zonas seleccionadas y la probeta testigo para lograr la identificación de los productos de corrosión formados durante la exposición.

Se realizaron pruebas de dureza en el material, tanto en la probeta testigo como en una probeta de cada zona de exposición para determinar si cambiaban las propiedades mecánicas de material en estudio por influencia de la zona de exposición.

Para la evaluación de la superficie del metal se siguió la metodología establecida en la norma ASTM G 46 para el examen y evaluación de picaduras que pudieran existir en la superficie del metal.

En la segunda parte del experimento el material fue nuevamente preparado para la exposición en condiciones severas de salinidad, para evaluar la pérdida de peso después de la exposición.

En esta ocasión el material fue sometido a un proceso de limpieza profunda para observar el efecto de un ambiente salino con una humedad relativa alta sobre la superficie libre la capa pasiva del material.

Nuevamente se hizo uso de la norma ASTM G 46 para el examen y evaluación de picaduras que pudieran existir en la superficie del metal.

Ambos estudios se siguieron por medio del registro fotográfico y de datos de las pruebas durante el desarrollo de estas, así como con observaciones durante las pruebas.

Concluyendo que el material no se vio afectado significativamente en el tiempo de exposición por los ambientes a los que fueron expuestos evaluando esto por el método de pérdida de peso, y en la segunda parte de la investigación se estableció que este material se ve altamente afectado en ambientes salinos con alto grado de humedad como sucedió en la prueba con un periodo de 1000 hrs. en cámara de niebla salina.

## II OBJETIVOS.

- Definir el efecto de la corrosión atmosférica de tres zonas de monitoreo dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en la corrosión de la aleación Zn-21wt%Al-2wt%Cu.
- Valorar la corrosión de la aleación Zn-21wt%Al-2wt%Cu después de la exposición atmosférica mediante el método de pérdida de peso.
- Identificar los productos de corrosión resultantes de la exposición atmosférica mediante un estudio de difracción de Rayos X.
- Establecer el comportamiento de la capa pasiva que forma el material por la exposición en las tres zonas de monitoreo, mediante un reconocimiento de la superficie por Microscopia de Barrido Electrónico.
- Valorar el efecto de la corrosión atmosférica en las propiedades mecánicas a través de un análisis estadístico de las pruebas de dureza realizadas al material.
- Establecer el grado de corrosión por picaduras resultante de la exposición atmosférica mediante la utilización de las normas ASTM G-46 “Guía estándar para la examinar y evaluar la corrosión por picaduras”.
- Definir el efecto de la corrosión por exposición a condiciones severas de salinidad de la aleación Zn-21wt%Al-2wt%Cu.
- Valorar la corrosión de la aleación Zn-21wt%Al-2wt%Cu después de la exposición a condiciones severas de salinidad mediante el método de pérdida de peso.
- Establecer el grado de corrosión por picaduras resultante de la exposición a condiciones severas de salinidad mediante la utilización de las normas ASTM G-46 “Guía estándar para la examinar y evaluar la corrosión por picaduras”.

# **CAPÍTULO 1.**

## **CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS.**

La corrosión es un problema al que la humanidad ha estado combatiendo desde el inicio de la metalurgia, grandes esfuerzos han sido aplicados para combatir el deterioro de los materiales metálicos sometidos a ambientes corrosivos; por medio de nuevas aleaciones resistentes a medios de corrosión, recubrimientos químicos y metálicos para los materiales existentes, así como materiales de sacrificio que tienen el propósito de proteger a un material base del ambiente corrosivo por medio de la destrucción de estos materiales.

### 1 Clasificación de la corrosión.

La corrosión representa el deterioro o destrucción de los materiales en contacto con su medio ambiente, proceso que se da por medio de reacciones de oxidación y de reducción. Las características de estas reacciones varían en función del ambiente donde se desarrolle la corrosión, por lo que es posible definir dos tipos generales de ambientes donde se presenta la corrosión.

### 2 Corrosión húmeda.

En este caso el material esta en contacto con medios acuosos que actúan como electrolitos, bajo estas condiciones estos fenómenos se presentan en:

- Exposición de materiales en medios acuosos.
  
- Exposición de materiales a la atmósfera, este tipo de exposición se subdivide de acuerdo a los contaminantes presentes en la atmósfera en rurales, urbanas, industriales y marinas.
  
- Exposición a medios líquidos (sin contenido de agua).

### 3 Corrosión seca, también conocida como corrosión por gases.

- En general se presenta sin que exista un medio líquido (electrolito) en contacto con la superficie del material. Este tipo de problemática existe cuando hay contacto con gases calientes, sin presencia de condensados, este caso es de particular importancia en turbinas de gas, sistemas de escape, etc.

### 4 Tipos de corrosión.

Existen otras formas de clasificar la corrosión, donde el aspecto de esta y /o alguna característica específica de su crecimiento, es lo que puede nombrar el tipo de corrosión, dentro de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Corrosión uniforme.
- Corrosión galvánica.
- Corrosión en grietas.
- Corrosión por picaduras.
- Corrosión intergranular.
- Disolución selectiva.
- Corrosión erosión.
- Corrosión bajo esfuerzos.

### 5 Tipos de corrosión de acuerdo a las celdas que se presentan.

Otra forma de agrupar los diferentes tipos de corrosión que se puede presentar es de acuerdo a las celdas que se pueden presentar esto es:

- Celdas galvánicas: la corrosión se genera al estar en contacto dos metales diferentes en un electrolito creando una celda galvánica.



- Celdas por deformación: son aquellas que se producen entre dos regiones del un mismo material y se diferencian por la cantidad de trabajo en frío a que se han visto sometidas.
- Celdas de concentración: en este caso la diferencia de potencial tiene su origen en la aireación diferencial a la que están sometidas las diferentes secciones del material.

## 6 Clasificación de acuerdo a los efectos básicos que dan lugar a la corrosión.

Otra clasificación más es de acuerdo a los efectos básicos que dan lugar al fenómeno de la corrosión, y es posible estructurarla de acuerdo a los preceptos anteriores.

- Corrosión galvánica generada por el contacto de metales y/o aleaciones de composición diferente.
- Corrosión por celdas de concentración.
- Corrosión por microceldas galvánicas, disolución selectiva, corrosión intergranular.
- Deterioro por efecto combinado de desgaste y corrosión ó corrosión y desgaste.
- Corrosión por presencia de celdas de deformación diferencial.
- Deterioro por efecto combinado de esfuerzos (aplicados o remanentes) y el medio ambiente (corrosión bajo esfuerzos).

Cada sistema presentara tendencias al deterioro por efecto de algún mecanismo en particular y este se vera afectado por la composición del material o materiales, manufactura y ambiente de trabajo.

## 7 Clasificación de la corrosión por los medios corrosivos.

La definición de la corrosión por los medios corrosivos en la que esta tiene lugar es muy compleja y depende en esencia, del punto de vista del autor, en general se puede definir en:

- Corrosión en soluciones acuosas.
- Corrosión atmosférica.
- Corrosión en suelos.
- Corrosión en concreto reforzado.
- Corrosión biológica.
- Corrosión en implantes.
- Corrosión por metales fundidos y sales fundidas.

8 Clasificación de acuerdo a las características de la industria.

Una clasificación más, es de acuerdo a las características de cada industria (materiales, condiciones de exposición, restricciones en cuanto al deterioro) es factible definir la problemática de la corrosión de acuerdo a:

- Industria petrolera.
- Industria aeroespacial.
- Industria alimenticia.
- Industria química.
- Industria electrónica.
- Industria nuclear.
- Plantas termoeléctricas.
- Industria automotriz, etc.

Una vez mencionado lo más representativo de los diversos tipos de clasificación de la corrosión nos abocaremos a la corrosión atmosférica los diversos casos de corrosión que se pudiera dar en este tipo.

## 9 Corrosión húmeda y seca.

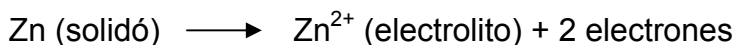
La corrosión se clasifica en dos grandes grupos, corrosión húmeda y corrosión seca, nos abocaremos al primero debido a que la corrosión seca solo tiene lugar a altas temperaturas, en medios gaseosos y sin contenido de agua.

## 10 Naturaleza electroquímica del proceso de la corrosión en un medio acuoso.

El proceso de la corrosión en presencia de un medio acuoso, tiene un comportamiento de naturaleza electroquímica, es decir, se crean innumerables pilas galvánicas en la superficie del metal, esta corrosión es un proceso espontáneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, siendo imprescindible la presencia de los tres para que este tipo de corrosión pueda existir (se requiere así mismo, el contacto eléctrico entre la zona anódica y catódica) habiendo una transferencia de carga (electrones e iones) entre el medio acuoso y los electrodos.

### 10.1 Componentes y funcionamiento de una celda galvánica.

El termino ánodo se emplea para describir aquella porción de una superficie metálica en la que tiene lugar la corrosión (disolución del metal) y en la cual se liberan electrones. (Los átomos metálicos aumentan su valencia al ceder electrones, convirtiéndose entonces en iones positivos, los cuales pasan al electrolito) como consecuencia del paso del metal en forma de iones, al electrolito, la reacción que sucede en el ánodo es por ejemplo para el caso del zinc:



O sea, una reacción de oxidación.

Como los electrones en un conductor metálico, se mueven en sentido opuesto al convencional, en el ánodo la corriente eléctrica sale del metal para entrar a la solución como se muestra en la figura 1.

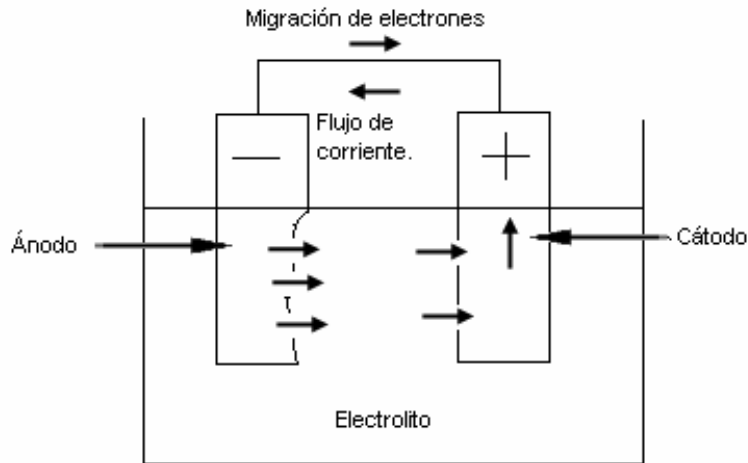


Fig. 1 Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión (Ávila J. 2003-1).

El termino cátodo se aplica a la porción de una superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito reduciendo estos a una forma mas estable (Representa una reducción de la valencia de la especie oxidante).

Las reacciones catódicas más comunes en presencia de agua son:



O sea, reacciones de reducción.

En el cátodo, la corriente eléctrica sale del electrolito para entrar al metal figura 1, cerrándose el circuito eléctrico a través de un conductor eléctrico metálico externo.

Este arreglo también toma el nombre de celda galvánica o pila galvánica.

Los componentes esenciales de esta se presentan en la figura 1. Las flechas representan la corriente eléctrica (no electrones) fluyendo a la solución desde el ánodo (-) al cátodo (+) y regresando desde el cátodo al ánodo a través de un conductor metálico externo (cobre por ejemplo).

## 10.2 Celdas de corrosión.

Algunas celdas galvánicas pueden recibir nombre como celda de corrosión, esta es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión. Una celda de corrosión de dimensiones muy pequeñas (por ejemplo ( $< 0.1$  mm)) se conoce como celda de acción localizada o microcelda galvánica. Las celdas locales o micropilas se dan, por ejemplo, en aleaciones multifásicas o en metales con recubrimientos que presentan buena conductividad eléctrica o en inclusiones de óxidos, sulfuros, carbón, etc. también llamadas impurazas del metal. La acción de estas celdas a menudo conduce a un ataque localizado, tal como picaduras o corrosión bajo tensión.

El fenómeno de corrosión más frecuente es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación de numerosas zonas anódicas y catódicas sobre la superficie metálica como se plantea anteriormente, siendo el electrolito en caso de que el metal no estuviese sumergido o enterrado, el agua de condensación de la atmósfera, para lo cual se requiere que la humedad relativa del aire no sea menor del 70% (Ávila 2003).

El proceso de disolución del metal en un ácido (por ejemplo el zinc en ácido clorhídrico) es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica corresponden a la formación de hidrógeno,  $H_2$ , gaseoso, poniendo de manifiesto la presencia de zonas catódicas, mientras en las zonas anódicas se va disolviendo el metal.

Al cambiar continuamente la posición de estas zonas catódicas y anódicas, llega el momento en que el metal se disuelve continuamente. Este tipo de corrosión se caracteriza porque casi siempre es más pronunciada en unas zonas que en otras, y su forma de manifestarse más característica es la aparición de picaduras.

### 10.3 Proceso de corrosión por celdas galvánicas.

Como ejemplo de la corrosión por celdas galvánicas se mostrara a continuación el mecanismo de la formación de pequeñas zonas anódicas y catódicas en la superficie de hierro en la atmósfera.

En primer lugar, tendremos que decir que el acero es una aleación de hierro y carbono (contenido máximo de 2% en peso de carbono) que presenta diferentes fases, a nivel microscópico, una sección de la pieza de acero puede presentar la microestructura típica que se representa esquemáticamente en la figura 2. Se observan principalmente dos fases. Una fase rica en hierro (ferrita) y otra fase conteniendo carburos de hierro en una matriz de ferrita (perlita). Puesto que son dos fases diferentes y ambas son conductoras, es fácil establecer un par galvánico con la presencia de un electrolito.

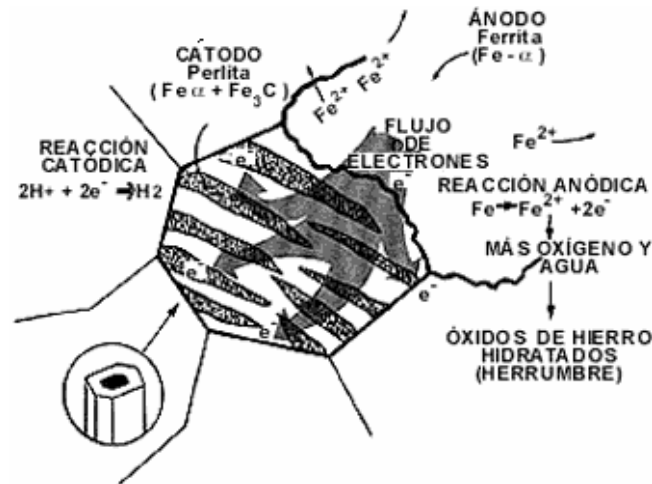


Fig. 2 Formación de zonas anódicas y catódicas en la superficie del acero en exposición atmosférica (Ávila 2003-1).

El electrolito lo constituirá la humedad existente en la atmósfera, la cual forma películas muy finas y casi imperceptibles sobre la superficie metálica (inclusive capa de unas cuantas moléculas de agua es suficiente para actuar de electrolito). Esta película de agua, modificada con los contaminantes presentes en la atmósfera (bióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cloruros, etc.), crea una solución aún más conductora y agresiva.

La conexión eléctrica entre ánodo y cátodo lo hará la misma pieza metálica y como el electrolito formado por el agua y los contaminantes mezclados, está sobre la estructura y baña a ambas fases la pila esta completa, dándose así el fenómeno de la corrosión del metal.

En este caso en la celda galvánica la ferrita es más anódica (activa) que la fase perlítica (noble). La corrosión se produce a nivel de microceldas; millones de ellas están distribuidas a lo largo y ancho de la pieza de acero. El mecanismo heterogéneo de la corrosión tiende a fijar las reacciones anódicas y catódicas en sitios definidos de la superficie metálica, basta la presencia de heterogeneidades, aún dentro de una sola fase metálica, para que la corrosión se presente, existiendo, la presencia de un electrolito. Estas heterogeneidades pueden ser de un tipo o de otro, por ejemplo, diferentes fases metalúrgicas de una aleación, tales

como la perlita y la ferrita, la presencia de impurezas en el material, una distribución no uniforme de esfuerzos en el metal debido a deformaciones, calentamientos y/o maquinado, arreglos diferentes en la red cristalina, diferencias de aireación en el material e inclusive partículas de materiales metálicos que se depositaron en la superficie.

Se piensa que el mecanismo de corrosión inicial de la aleación en estudio es similar, debido a que la aleación consta de dos fases principales, la fase alfa que rica en aluminio y la fase beta rica en zinc, ambas están en contacto, estos elementos predominantes en cada fase tienen un potencial de media celda diferente creando así una diferencia de potencial en la celda ( $E^0_{\text{celda}}$ ) que propicia la corrosión; se establece que es un mecanismo inicial debido a que estos potenciales son medidos experimentalmente sobre metal libre de productos de corrosión y en condiciones estándar, por lo que con el tiempo y las condiciones atmosféricas variando (temperatura, pH del electrolito) al igual que las condiciones del material (reactivos y productos) las condiciones de la celda que se forma varían continuamente, pero con el tiempo ambas fases crean una capa pasiva protectora creando una resistencia al flujo de electrones.

#### 10.4 Análisis del comportamiento de las celdas de corrosión.

Para el análisis del comportamiento de las celdas de corrosión o galvánicas nos valemos de la descomposición de las reacciones químicas que tienen lugar en el proceso de corrosión en reacciones de media celda, que se presentan en la reacción de oxidación-reducción o redox, por medio de estas establecemos cual es el ánodo, el cátodo y las cantidades de reactivos y productos que se obtienen de la reacción. Para establecer que tan posible es que se de la reacción se emplea el concepto de potencial de celda, estableciendo la diferencias de potencial en la celda, este es la fuerza con que se impulsan los electrones del ánodo al que cátodo, y dependiendo de esta fuerza se sabrá si la reacción es espontánea.



## 10.5 El potencial de la celda o fuerza electro-motriz (F.e.m.).

El potencial de la celda lo establecemos por medio la diferencia de los potenciales de electrodo estándar de los elementos involucrados ( $E^0$ ), siendo esta diferencia de potencial la fuerza con que se impulsa a los electrones del ánodo al cátodo a través del circuito exterior (esto en una pila galvánica), obteniendo estos potenciales de electricidad estándar de tablas de potenciales de reducción, los cuales nos indican el potencial de reducción de los metales con respecto a un electrodo estándar de hidrógeno ( $H^0 = 0 \text{ V}$ ), observando el signo de la diferencia de potenciales veremos que tan espontánea es (o en que dirección ocurre) la reacción en las condiciones de trabajo de la celda (para que sea espontánea la reacción el  $E^0_{\text{red.}}(\text{cátodo})$  deberá tener un valor más positivo que la reacción del ánodo), ya que estas se ven afectadas por diversas variables (reacciones que se lleven a cabo en el ánodo y en el cátodo, la temperatura, la concentración de reactivos y productos).

$$E^0_{\text{celda}} = E^0_{\text{red.}}(\text{cátodo}) - E^0_{\text{red.}}(\text{ánodo}) \dots \dots (1)$$

Otra forma de establecer la espontaneidad de una reacción a presión y temperatura constante es por medio de la energía libre de Gibbs.

## 10.6 Energía libre de o energía de Gibbs.

El cambio de energía libre de Gibbs,  $\Delta G$ , es una medida de espontaneidad de un proceso que se lleva a cabo a temperatura y presión constantes, la relación entre la energía libre de Gibbs y el potencial de celda esta dada por la ecuación.

$$\Delta G = -nFE \dots \dots (2)$$

Donde:

n = es el numero de moles de electrones que se transfieren en la reacción.

F = es la constante de Faraday.

E = potencial de celda.

Y para cuando los reactivos como los productos están en condiciones estándar la ecuación (2) queda:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \dots\dots(3)$$

Como n y F son positivas un valor positivo de la E dará como resultado un valor negativo de  $\Delta G$  indicando una reacción espontánea.

#### 10.7 Modificación del potencial de la celda por la concentración de reactivos y productos.

Como se dijo anteriormente el potencial de la celda varia con la concentración de los reactivos y productos de la reacción redox, cuando los reactivos aumentan también lo hace la f.e.m. pero cuando la concentración de los productos aumenta la f.e.m. disminuye.

La f.e.m. que se produce en condiciones no estándar se puede calcular usando la ecuación de Nerst. La cual nos indica que la dependencia de la f.e.m. de la celda respecto a la concentración, se puede obtener de la dependencia del cambio de energía libre respecto a la concentración de acuerdo con:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln (Q) \dots\dots(4)$$

Donde:

Q expresa la constante de equilibrio, excepto que las concentraciones son las que existen en la mezcla en un momento dado.

Sustituyendo (3) en (4) obtenemos:

$$-nFE = -nFE^0 + RT \ln (Q) \dots\dots(5)$$

Despejando E obtenemos la ecuación de Nerst.

$$E = E^0 + [RT/nF] [\ln (Q)] \dots\dots(6)$$

Pero se acostumbra expresar esta ecuación en términos de logaritmos comunes (base 10).

$$E = E^0 + [2.3RT/nF] [\log (Q)] \dots\dots(7)$$

Para simplificar más la ecuación se toma la temperatura normal de 298° K quedando la ecuación como sigue:

$$E = E^0 + [0.592 \text{ V/n}] [\log (Q)] \dots\dots(8)$$

Con esta ecuación es posible encontrar el potencial de una celda en condiciones no estándar o cuando deseamos encontrar la concentración de un reactivo o producto midiendo la f.e.m. de la celda.

### 10.8 Diagramas de potencial-pH (diagramas de Pourbaix).

El diagrama de Pourbaix es una presentación rápida de las condiciones del poder oxidante de la solución, así como de la acidez ó alcalinidad para diversas fases termodinámicamente estables en un sistema electroquímico acuoso. En este

diagrama las líneas de frontera delimitan áreas de estabilidad para diferentes fases, las cuales se definen por medio de la ecuación de Nerst.

Los diagramas de Pourbaix muestran las reacciones y productos de reacción que se presentan en un sistema electroquímico cuando este alcanza el equilibrio. Dichos diagramas han sido desarrollados para una gran cantidad de reacciones químicas en soluciones acuosas.

De especial importancia es la determinación de las condiciones bajo las cuales la corrosión es imposible desde el punto de vista termodinámico. Esto permite ajustar las condiciones del pH para evitar así la presencia de fenómenos corrosivos.

Los diagramas de Pourbaix permiten definir la factibilidad de fenómeno corrosivo, pero no dan información sobre la velocidad del proceso ya que el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio termodinámico es afectado por la temperatura.

Estos diagramas tienen gran aplicación en celdas de combustible, procesos de electro recubrimiento, metalurgia extractiva y por supuesto problemas de corrosión acuosa.

En cualquier diagrama de Pourbaix se definen tres tipos de condiciones: inmunidad, pasivación y corrosión. La región de corrosión se define como aquella en que los iones metálicos (aniones o cationes) solubles ( $Me^{n+}$ ,  $(Me_xO_y)^{m-}$ ) son estables termodinámicamente. Se define el estado de pasivación cuando los óxidos son estables y el de inmunidad cuando el estado de menor energía es el metálico.

Un ejemplo del diagrama de Pourbaix por su sencillez es el del aluminio que a continuación se presenta en la figura 3.

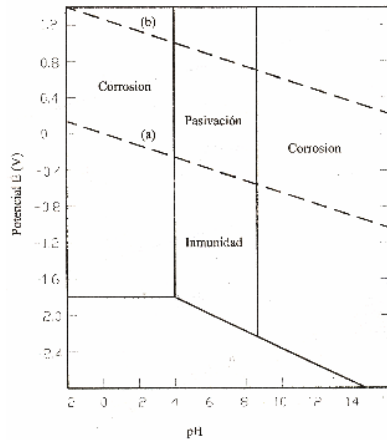


Fig. 3 Diagrama de Pourbaix para el aluminio (Cerrud 2003).

### 10.9 La pasivación.

Una característica que poseen algunos materiales es la pasivación, esta es la propiedad de permanecer inertes en determinadas condiciones, en las cuales termodinámicamente se esperarían reacciones espontáneas muy rápidas, esto es que debieran comportarse como metales activos y así disolverse a altas velocidades por medio de reacciones electroquímicas.

Un metal o aleación se considera que puede adquirir un estado pasivo, si al incrementar el potencial de corrosión hacia condiciones más oxidantes, la velocidad de disolución en un medio agresivo es menor que la registrada a potenciales inferiores. También se considera que adquiere un estado pasivable cuando al aumentar la concentración de un agente oxidante, la velocidad de corrosión es inferior a la registrada a concentraciones más bajas del mismo oxidante.

Un caso típico es el del hierro que se disuelve fácilmente en soluciones diluidas de ácido nítrico, mientras que en soluciones concentradas deja de disolverse, cuando se esperaría una velocidad de corrosión más alta.

Esto se debe a que la acción del ácido concentrado forma rápidamente una capa de óxido en la superficie y esta actúa como una capa protectora dejando al material prácticamente inerte, esto es, consigue la pasivación del mismo.

El fenómeno de pasivación es debido a la formación de una película de productos de oxidación compacta, de poco espesor, de baja porosidad y bien adherida que forma una barrera protectora, aislando a el metal del medio corrosivo, o bien se puede deber a la presencia de capas monoatómicas, por lo general de oxígeno, que se forman sobre la superficie del metal.

Para que una película pueda formarse se requieren que las condiciones de pH y potencial sean adecuadas, una vez formada la capa inicial, si esta no fuera conductora, el crecimiento de la misma se debe a fenómenos de migración iónica provocados por el fuerte campo eléctrico generado en sus extremos, proceso que se conoce como anodizado.

El espesor de la película se mide por métodos elipsométricos, que relacionan el espesor con el grado de alteración que sufre un haz de luz polarizada al reflejarse en la superficie o por medios eléctricos como la coulombimetría, que relaciona el espesor con el número de coulombios necesarios para reducir electrolíticamente la película pasiva.

Experimentalmente la pasividad se determina mediante la curva de polarización.

Para obtener esta gráfica el metal se expone en el medio corrosivo y mediante un potencioestato, un electrodo de referencia, y un electrodo inerte, se regula el potencial del metal. Cambiando el potencial se mide la corriente eléctrica que circula entre el metal y el electrodo inerte.

Mediante las leyes de Faraday se calcula la cantidad de metal que se pierde por unidad de tiempo y de superficie.

Así podemos calcular la velocidad de corrosión del metal en un determinado medio a un potencial dado.

En la figura 4, se muestra una la curva de polarización anódica del hierro en una solución diluida y ácida de fosfatos.

En el eje de las abscisas, se representa el potencial medido en voltios, en la escala del electrodo normal de hidrógeno  $V_{(ENH)}$ .

La variable dependiente es la densidad de corriente en  $A/cm^2$ .

El potencial del hierro en la solución, cuando no está circulando corriente es alrededor de  $-0.5 V_{(ENH)}$ . A este potencial se le conoce como potencial de corrosión.

Cuando el potencial del hierro esta por arriba del potencial de corrosión, se polariza anodinamente, en este momento comienza a circular una corriente anódica que va creciendo en cuanto mayor es la polarización aplicada.

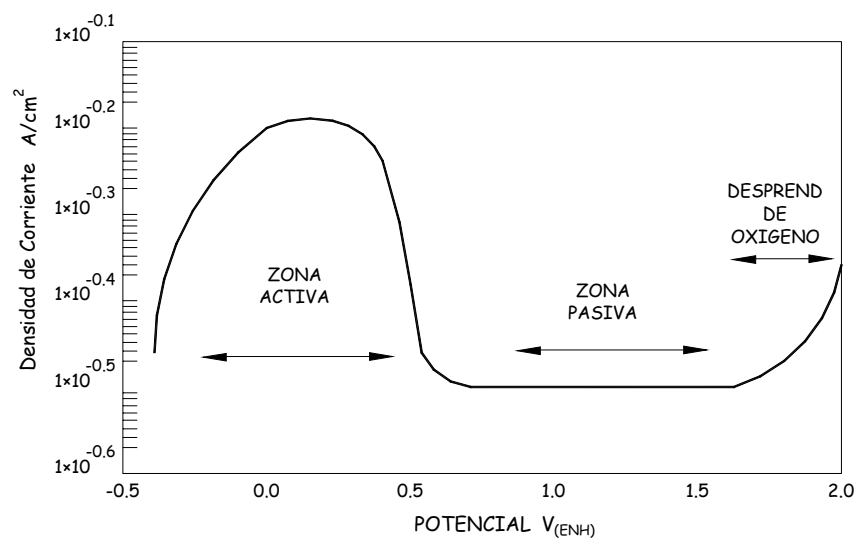


Fig. 4 Curva de polarización anódica para el Fe (Raman 1987).

Según la figura 4, en un potencial cerca de  $0.3 V_{(ENH)}$ , la corriente anódica alcanza su valor máximo.

En la zona de que va desde  $-0.5$  hasta aproximadamente  $0.6$ , el metal se corroerá más rápidamente y recibe el nombre de zona activa.

Podemos observar que al aumentar el potencial, la corriente en lugar de aumentar, disminuye hasta alcanzar densidades de corriente de  $1 \times 10^{-5} A/cm^2$ . Al alcanzar dicha densidad de corriente, comienza lo que es la zona pasiva.

La pasividad se consigue mediante la formación de una película delgada de óxido sobre la superficie del metal. En el caso del hierro la película formada conduce electrones. Al incrementar el potencial, el agua se descompone y se observa un aumento de corriente debido al desprendimiento de oxígeno.

En algunos casos al aumentar el potencial la película pasivante se oxida disolviéndose, pasando a la zona de transpasividad, donde el ataque es uniforme y en otros casos la película se rompe localmente y en estos sitios se llevará a cabo el ataque por picadura.

#### 10.10 La repasivación.

Un material pasivable que se encuentra operando a un potencial comprendido entre el potencial de pasivación y el de transpasivación mantendrá la capa pasiva estable sobre su superficie.

Si en estas condiciones, la película pasiva se daña mecánicamente, entonces el metal quedará expuesto al medio corrosivo. Cuando se destruye la película se registra una densidad de corriente que a partir de este momento crece hasta un máximo, en el cual empieza a disminuir a medida que se regenera la película (repasivación).



El fenómeno de repasivación se ajusta por lo general a un modelo hiperbólico del tipo:

$$i = A t^b$$

Siendo:

$i$ , la densidad de corriente en  $A/cm^2$ .

$t$  el tiempo en segundos.

$A$  y  $b$  constantes.

Es importante tener en cuenta este fenómeno ya que si la velocidad de repasivación es alta y la película se regenera en tiempos cortos, se reduce en gran forma el ataque localizado en la picadura creada.

Sin embargo si la velocidad es baja, los ataques locales en el punto dañado pueden ser progresivos y muy dañinos.

La constante  $b$  (velocidad de repasivación), se determina en escalas logarítmicas.

$$\log i = \log A + b \log t$$

En la figura 5, se representa el  $\log I$  frente a  $\log t$ , la pendiente de la recta representa un valor  $b$ , en la que se observan pendientes con valores  $b = -1$  (repasivación rápida), y  $b = -0.5$  (repasivación lenta).

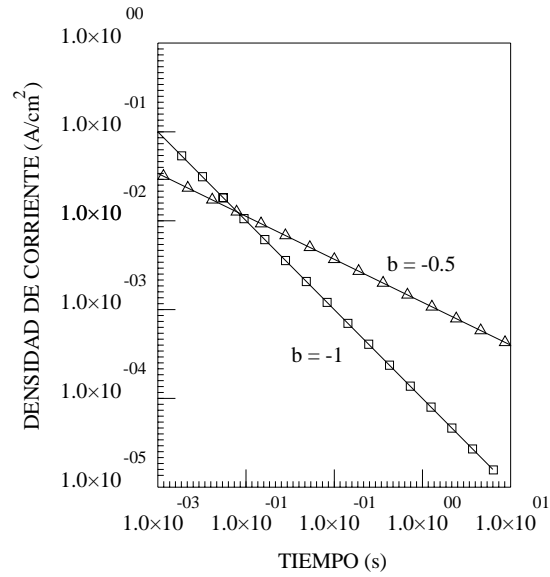


Fig. 5 Curva de velocidad de pasivación y repasivación (Raman 1987).

Es decir para que aparezcan picaduras se requiere valores aproximados de  $b$  de  $-0.5$  y para que se vean agrietamientos por corrosión bajo tensión, es necesario seguir trabajando con valores cercanos de  $b = -0.5$

## **CAPÍTULO 2.**

### **CONTAMINACIÓN Y CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.**

#### 1 La atmósfera.

La atmósfera terrestre es una mezcla de gases que envuelve a la tierra formando a su alrededor una capa para la que se ha estimado un espesor de 10 mil kilómetros. La fuerza gravitatoria mantiene unido al planeta este conjunto de gases y determina su densidad tomando su valor máximo al nivel del mar, y que disminuye rápidamente con la altura, pues se reduce a la mitad cada 6.5 Km. de aumento en la altitud, de modo que el 90% de su masa total esta incluida en los primeros 20 Km.

#### 1.1 Capas de la atmósfera.

Una clasificación de la atmósfera en sus diferentes capas no puede tener en cuenta todas las variables que inciden en ella, por lo que existen distintas clasificaciones que atienden a diferentes criterios; El más utilizado es el que se basa en la distribución vertical de las temperaturas, según el cual, de abajo hacia arriba tenemos la troposfera, la estratosfera, la mesosfera y la termosfera o ionosfera. Las superficies de separación de estas capas reciben los nombres de tropopausa, estratopausa y mesopausa como lo indica la figura 6.

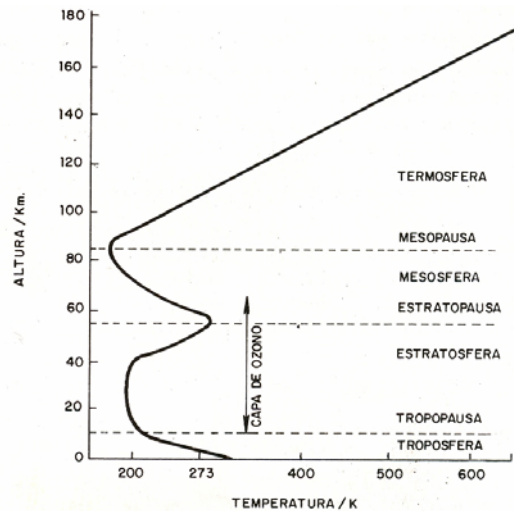


Fig. 6 Capas de la atmósfera de acuerdo a la temperatura (Spedding 1981).

### 1.1.1 La troposfera y la tropopausa.

La troposfera tiene unos 12 Km. de altura media. Se caracteriza por la disminución de la temperatura con la altura, por cada 100 m de ascenso supone una disminución de  $0.64^{\circ} \text{C}$ , valor que se le denomina gradiente vertical normal de temperatura. No obstante, pueden existir desviaciones de este gradiente que dependen de la situación geográfica, de la estación del año y de la humedad del aire.

La importancia de la troposfera para el hombre resulta evidente si tenemos en cuenta que es el medio en el que vive, y que la mayor parte de la masa atmosférica está incluida en ella y prácticamente todos los procesos meteorológicos tienen lugar en ella.

El espesor de la troposfera está limitado por la tropopausa, oscila en función de la latitud y época del año. En los polos es de unos 7 Km., mientras que en el ecuador alcanza los 17 Km. esta variación de la altitud de la tropopausa no es gradual debido a que en ambos hemisferios aparece un escalón a los  $35^{\circ}$  de latitud y en todos los puntos del planeta encontramos la tropopausa a mayor altitud en verano que en invierno e incluso varía varios kilómetros según el día y hasta la hora.

La temperatura a nivel de la tropopausa tampoco es uniforme resultando siempre inferior sobre el ecuador ( $-80^{\circ}$  C) que sobre los polos ( $-50^{\circ}$  C), lo que es consecuencia lógica de la mayor altitud de la tropopausa sobre el ecuador y la aplicación del gradiente de temperatura.

A través de la tropopausa se produce un lento intercambio de materia en ambas direcciones, la duración del cambio se cuenta por meses, lo que tiene su importancia para la velocidad de eliminación de los contaminantes que se introducen en la estratosfera tales como los gases de escape de las aeronaves.

### 1.1.2 La estratosfera y la estratopausa.

La estratosfera se extiende hasta los 50 Km. de altitud. La temperatura en la estratosfera inferior se mantiene prácticamente constante, pero en la estratosfera superior se observa un aumento gradual que alcanza los  $60^{\circ}$  C en su punto más alto, coincidiendo con la estratopausa.

Como la temperatura al principio no crece y a continuación incluso aumenta se supuso que los movimientos verticales debían ser muy débiles y que por tanto, la atmósfera en esta capa no podía ser homogénea, de manera que los gases que la componen deberían de estar estratificados por orden de densidades de ahí el nombre de estratosfera, debido a la existencia de fuertes corrientes horizontales de aire, así como una importante mezcla vertical.

### 1.1.3 La mesosfera y la mesopausa.

Por encima de la estratopausa se encuentra la mesosfera, en ella la temperatura vuelve de nuevo a descender, lo hace de forma continua hasta alcanzar un mínimo de  $-90^{\circ}$  C, que corresponde a una altitud de 80 Km. y al límite superior de la mesosfera, la mesopausa.

#### 1.1.4 La termosfera.

A mayor altura esta la termosfera con limite superior indefinido. En esa ultima capa la temperatura vuelve a ascender, llegando a alcanzar valores cercanos a los 1600° C, temperatura que carece de importancia dado que en esta zona la densidad es próxima al vacío.

#### 2 Composición química del aire atmosférico.

El aire de la atmósfera es una mezcla de gases muy estable sobre todo en las proximidades a la superficie terrestre, considerándose hasta una altura de 80 Km. la proporción se considera prácticamente constante.

Y en proporciones aun menores también se pueden encontrar en la atmósfera diversos hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, peroxido de nitrógeno, peroxido de hidrógeno, halógenos y otros.

El vapor de agua no se incluye en la tabla porque su proporción en la atmósfera es variable, y porque su concentración no puede superar cierto valor, llamado valor de saturación, que depende de la temperatura. Su valor puede oscilar entre 0.01% y el 5% sí bien habitualmente varia entre 1% y 3%.

El cuadro 1 indica la composición media del aire atmosférico limpio y seco, por lo tanto sin incluir contaminantes ni al vapor de agua.

Respecto a los datos del cuadro 1, cabe destacar que el nitrógeno y el oxígeno, representan el 99.031% del total, mientras que otros muchos componentes están en tan pequeña proporción que pueden ser llamados componentes traza, nombre que se les asigna a aquellos que están presentes en cantidades menores al 0.00001%.

COMPONENTE	% EN VOLUMEN
Nitrógeno (N <sub>2</sub> ).	78.085
Oxígeno (O <sub>2</sub> ).	20.946
Aragón (Ar).	0.934
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).	0.0314
Neón(Ne).	0.00182
Helio (He).	0.000524
Metano (CH <sub>4</sub> ).	0.00015
Criptón (Kr).	0.000114
Hidrógeno (H <sub>2</sub> ).	0.00005
Monóxido de dinitrógeno (N <sub>2</sub> O).	0.000025
Monóxido de carbono (CO).	0.00001
Xenón (Xe).	0.0000087
Ozono (O <sub>3</sub> ).	0.000002
Amoniaco (NH <sub>3</sub> ).	0.0000006
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).	0.0000001
Monóxido de nitrógeno (NO).	0.00000006
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).	0.00000002
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S).	0.00000002

Cuadro 1 Gases que componen el aire atmosférico (Climent M. D. 1992).

## 2.1 Los principales contaminantes de la atmósfera dentro de los componentes naturales del aire.

Un punto a destacar es que dentro de los componentes naturales del aire podemos encontrar a los principales contaminantes de la atmósfera, lo que indica que, además de ser de origen antropogénico estos gases también pueden ser producidos por fuentes naturales, lo que distingue a los contaminantes de fuentes antropogénicas es la alta concentración en pequeñas áreas.

Como se ha dicho antes, la mezcla de los gases guarda cierta proporción prácticamente constante, pero es conveniente precisar la contribución a la composición la atmósfera de dos gases tan importantes para sus propiedades como el ozono y el dióxido de carbono.

### 2.1.1 El ozono.

El ozono no se halla uniformemente distribuido por toda la homósfera, su mayor concentración se localiza en la estratosfera, entre los 15 y los 40 Km. de altitud, alcanzando su valor máximo hacia los 25 Km., zona a la que se le suele llamar ozonósfera, en estos niveles se absorbe la radiación ultravioleta de baja frecuencia, mientras que a nivel de superficie el ozono sería considerado un contaminante debido a su fuerte poder de oxidante.

### 2.1.2 El dióxido de carbono.

El dióxido de carbono sí que mantiene aproximadamente constante su proporción en el aire respecto a la altitud, pero, en cambio se aprecian variaciones respecto al tiempo. Por un lado hay variaciones estacionales con un máximo en el mes de mayo y un mínimo en el mes de septiembre, pero lo más importante es la variación anual de la que se ha medido un constante aumento lo que tiene una incidencia directa en el efecto invernadero.

Ocasionalmente y debido a los procesos volcánicos se han podido acumular concentraciones extraordinariamente altas de CO<sub>2</sub> en puntos muy localizados. Como la molécula de dióxido de carbono tiene una masa superior al peso molecular medio del aire, estas masas de CO<sub>2</sub> ocupan zonas bajas, y pueden provocar catástrofes como la del lago Nyos en Camerún donde una capa de CO<sub>2</sub>, aparentemente de origen volcánico, produjo la muerte a cerca de 2000 personas\*, pues el CO<sub>2</sub> no es un gas tóxico “per se”, pero es irrespirable.

\*Artículo publicado por la revista Creces, diciembre de 2001. Chile.



### 3 Contaminantes atmosféricos.

#### 3.1 Definición de contaminante.

Una definición de contaminante es todo factor que contribuye o causa deterioro al medio ambiente atmosférico.

Cuando se añade una sustancia al aire puro, las propiedades de este quedan alteradas. La sustancia añadida puede ser una sustancia presente en la atmósfera natural como una sustancia ausente en ella, pero solo se considera contaminante cuando este cause efectos perjudiciales al hombre, los animales, los vegetales o a los materiales.

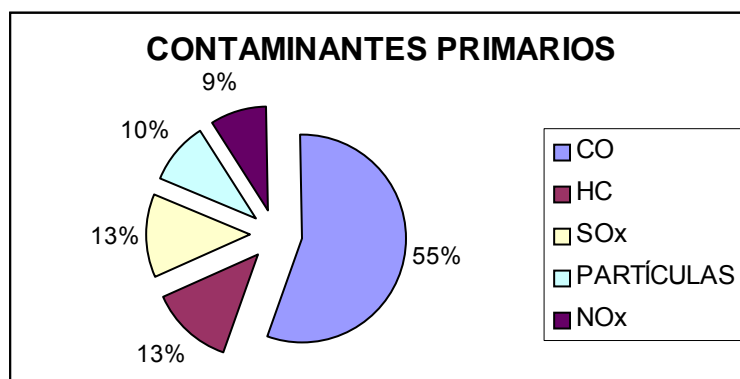
Los contaminantes pueden estar presentes en la atmósfera en forma sólida, líquida o gaseosa o como mezclas de las anteriores. De hecho el efecto de los contaminantes en esta última forma es la más activa debido a la acción sinérgica de muchos contaminantes, según la cual incrementan y potencian entre sí sus efectos cuando se presentan juntos, de manera que el efecto causado por un par de contaminantes es muy superior al que ejercerían ambos contaminantes actuando por separado.

#### 3.2 Contaminantes primarios gaseosos.

Hay cinco tipos de sustancias que son conocidas como contaminantes primarios gaseosos.

- 1.- Monóxido de carbono (CO).
- 2.- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- 3.- Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).
- 4.- Hidrocarburos (HC)
- 5.- Partículas.

La contribución relativa de estos cinco contaminantes es la que se expresa en el grafico 1, referido a la masa del contaminante emitido a la atmósfera, sin tener en cuenta que la peligrosidad de cada uno de ellos es muy diferente (Climent M. D. 1992).



Gráfica 1 Porcentaje de los contaminantes primarios en la atmósfera (Climent M. D. 1992).

Estas sustancias representan más del 90% del problema de la contaminación atmosférica, y es interesante observar que todos ellos también se producen grandes cantidades a partir de fuentes naturales, del tipo biológico, volcánico o geológico.

### 3.2.1 Producción natural y artificial de gases.

Podemos apreciar en el cuadro 2 que la producción natural de estas sustancias superan a la producción artificial.

La interpretación de estos datos podría llevar a creer que los efectos de los contaminantes no deben ser muy evidentes, dado que en la atmósfera natural se encuentran ya en cantidades superiores que las producidas por las actividades del hombre. Pero no hay que olvidar que se trata de los valores promedio, y que en los lugares próximos a las fuentes de emisión las concentraciones pueden llegar a ser muy altas.

GAS	Producción natural	Producción artificial
CO	90.6 %	9.4 %
NO <sub>x</sub>	88.7 %	11.3 %
SO <sub>x</sub>	55.3 %	44.7 %
HC	84.5 %	15.5 %
Macro partículas	88.7 %	11.3 %

Cuadro 2 Producción natural y artificial de gases (Climent M. D. 1992).

Los movimientos del aire atmosférico serán los encargados de difundir por toda la atmósfera las altas concentraciones de contaminantes, pero esto no se realiza con rapidez, puesto que la difusión atmosférica del aire de superficie es muy reducida. La mayor parte de los contaminantes no superan nunca el nivel de los 600 metros y ninguno llega más allá de los 3500 m. en cuanto el movimiento lateral del aire puede estar dificultado tanto por barreras geológicas naturales (como es el caso de la ciudad de México la cual se encuentra en una cuenca natural a 2200 m de altura) como por barreras arquitectónicas artificiales, lo que retarda la difusión de los contaminantes.

#### 4 El fenómeno de la inversión térmica.

Existe otra alteración de la atmósfera, relacionada con lo anterior, que no se refiere a las variaciones en la composición sino al gradiente vertical de temperaturas. Es el fenómeno de la inversión térmica.

El movimiento vertical del aire está determinado por la variación vertical de temperaturas en la troposfera, según la cual la temperatura disminuye con la altitud a razón de 0.64° C cada 100 m de ascenso, así la superficie terrestre calienta la porción de aire próximo a ella, este aire caliente se expande haciéndose menos denso que el que está por encima de él a menor temperatura. El aire caliente asciende y el aire frío ocupa su lugar, este se calienta y a su vez, al tomar contacto con la superficie, con lo que también ascenderá. De esta manera

se crean unas corrientes verticales de aire que contribuyen a la dispersión de los contaminantes.

Los cambios climáticos y los vientos pueden hacer que las masas de aire se desplacen, y esto, junto con la topografía del terreno ocasiona que las masas de aire queden atrapadas, entre barreras orográficas lateralmente, y superiormente por una capa de aire más caliente. Una situación de este tipo, en que una masa de aire frío queda ocasionalmente por debajo de otra masa de aire a mayor temperatura, es lo que se conoce como inversión térmica. En un caso como este el aire inferior no puede ascender a través de una capa de aire a mayor temperatura, y por tanto menos densa con lo que el aire y sus contaminantes quedan atrapados en ese lugar.

De esta forma los contaminantes no pueden dispersarse, y si se siguen incorporando más contaminantes su concentración puede llegar a ser muy alta. A este hecho se suma que en estos casos la capa superior no suele tener nubes, lo que permite que pase a su través una cantidad máxima de luz solar y que ésta interaccione con los contaminantes formando la característica neblina llamada smog fotoquímico.

##### 5 Mecanismos de dispersión y eliminación de los contaminantes.

Los contaminantes son liberados a la atmósfera en zonas e incluso en puntos muy concretos. En estos lugares la concentración del contaminante es muy alta, pero con un ritmo mas o menos rápido tenderá a diluirse en la atmósfera, o incluso salir de ella.

Los mecanismos de dispersión de los contaminantes son los siguientes:

### 5.1 Transporte.

El contaminante se desplaza de un punto de emisión hacia otro, el mecanismo de transporte puede ser diferente, clasificándose en transporte por **convección** y por **difusión**. En el primer caso se debe al viento, mientras que el transporte por difusión puede ser dividido, a su vez en dos tipos: difusión molecular y difusión turbulenta; la difusión molecular tiene su origen en la diferencia de concentración de contaminante entre dos puntos. La difusión turbulenta es originada por los remolinos que se producen en el aire, debidos, principalmente a la topografía del terreno y a la diferencia de temperaturas entre masas de aire. La difusión turbulenta es más efectiva que la molecular.

### 5.2 Reacciones químicas.

Dada la gran cantidad de contaminantes diferentes y complejidad de su química, el número de reacciones que se producen entre ellos mismos, y entre los componentes naturales de la atmósfera, es muy grande. En estas reacciones durante el día interviene la radiación solar, llevándose a cabo complejas reacciones fotoquímicas. En muchas ocasiones los productos de reacción son sustancias contaminantes que no se introdujeron directamente en la atmósfera, por lo que reciben el nombre de contaminantes secundarios.

### 5.3 Deposición.

Por este proceso los contaminantes se depositan en el suelo. Se dividen en dos tipos: deposición seca y deposición húmeda la primera es debida a dos causas, a la atracción gravitatoria que ejerce la tierra, en el caso de las partículas más grandes y a la absorción de partículas por las superficies, tanto sólidas como líquidas (océanos, ríos, mares, etc.). La deposición húmeda se produce cuando las gotas de lluvia arrastran consigo hacia la superficie a las partículas contaminantes.

#### 5.4 Decaimiento.

Este proceso es específico, se trata de la pérdida de actividad que tienen en función del tiempo las sustancias radioactivas, por tanto se refiere solo a la contaminación radioactiva, y no significa la desaparición del contaminante sino simplemente de su acción radioactiva.

El primero de los procesos estará siempre presente, sea cual sea la naturaleza de la sustancia contaminante y su destino final. El segundo de los procesos citados lleva consigo la desaparición de los contaminantes primarios, pero va acompañado de la aparición de contaminantes secundarios, que según los casos podrían ser más o menos peligrosos que los contaminantes primarios. Por último, el proceso de deposición húmeda es una de las formas principales de eliminación de contaminantes de la atmósfera, pero significa que estos contaminantes pasaran a contaminar la superficie terrestre, donde en ciertos casos pueden ser incluso más activos, por su acción sobre las aguas superficiales, las plantas y los materiales, en este último aporta un electrolito más agresivo en la corrosión húmeda.

### 6 Origen y efectos de los principales contaminantes.

#### 6.1 Monóxido de carbono.

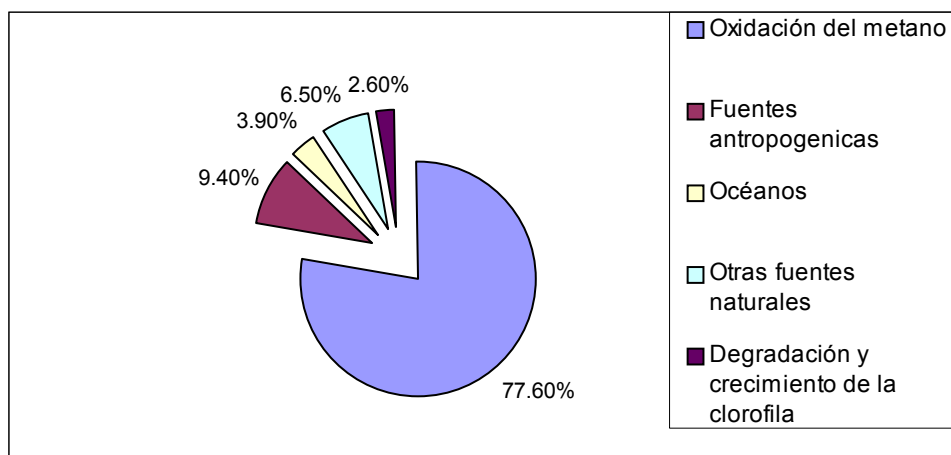
El monóxido de carbono es el contaminante del aire más abundante en la baja atmósfera, sus características son: compuesto incoloro, inodoro e insípido, gaseoso por encima de los  $-192^{\circ}$  C. Es menos pesado que el aire (96.5%) y es poco soluble al agua.

##### 6.1.1 Fuentes emisoras de CO.

Estas fuentes se pueden dividir en dos, naturales y antropogénicas es decir por actividades propias del hombre.

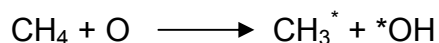
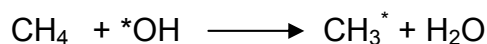
#### 6.1.1.1 Fuentes naturales de CO.

Las emisiones naturales de CO superan en cantidad la masa de las emisiones antropogénicas de todos los demás contaminantes atmosféricos combinados. Anteriormente se pensaba que el CO era casi exclusivamente un contaminante artificial, pero recientes estudios han demostrado la existencia de fuentes naturales de CO. Hay varios procesos naturales geofísicos y biológicos en los que se produce CO. Por ejemplo acción volcánica, emisiones de gas natural, descargas eléctricas en las tormentas, germinación de semillas, etc. A la atmósfera aproximadamente llega diez veces más CO procedente de fuentes naturales que debido a todas las actividades humanas (ver grafica 2).



Gráfica 2 Porcentajes de emisores de CO a la atmósfera (Climent M. D. 1992).

Las fuentes naturales de CO más importantes inician en la oxidación del metano por radicales hidroxilo bien por oxígeno atómico (O).



La primera reacción es dominante pero ambas consiguen el mismo resultado que es la obtención del radical metilo. J. C. McConnell, M. B. McElroy y S. C. Wofsy de la Universidad de Harvard, sugirieron en 1971 que, cuando el hidroxilo oxida al metano se desencadena una serie de reacciones que producen monóxido de carbono.

Paul J. Crutzen, del instituto Max Planck, sugirió que se podían formar grandes cantidades de CO sobre la pluviselva virgen por la oxidación fotoquímica de hidrocarburos distintos al metano. Estos hidrocarburos provenían de las resinas y aceites desprendidos principalmente de los árboles (Ver figura 7 ciclo del CO).

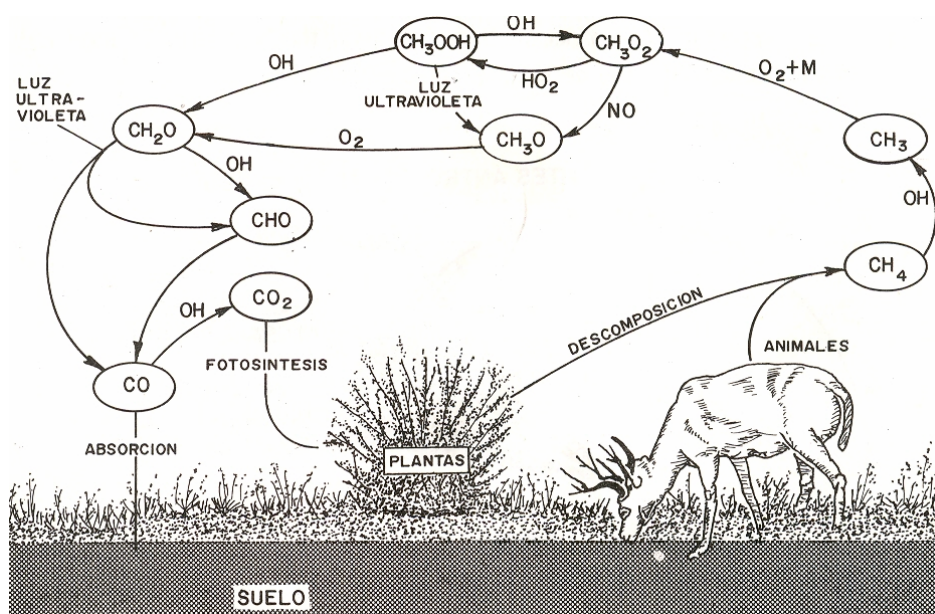


Fig. 7 Ciclo natural del CO (Climent M. D. 1992).

### 6.1.1.2 Fuentes antropogénicas de CO.

A pesar de su contribución reducida a las emisiones mundiales de CO (9.4%) el impacto de las fuentes antropogénicas no debe minimizarse pues estas se concentran en zonas muy pequeñas. Por ejemplo alrededor del 95% del CO



atmosférico en una zona metropolitana procede de las actividades humanas distribuidas aproximadamente del modo mostrado en el cuadro 3.

Fuente.	Porcentaje del total	
<b>Transporte.</b>	<b>63.8</b>	
Vehículos de motor.		59.2
Aviación.		2.4
Trenes.		0.1
Barcos.		0.3
Motores del fuel para no uso en carretera.		1.8
<b>Combustión. Fuentes estacionarias.</b>	<b>1.9</b>	
Carbón.		0.8
Aceite combustible.		0.1
Gas natural.		Despreciable.
Madera.		0.1
<b>Procesos industriales.</b>	<b>9.7</b>	
Acererías.		3.6
Refinerías.		2.2
Papeleras.		0.8
Otros (plantas de coque).		3.1
<b>Basuras.</b>	<b>7.8</b>	
Incineración.		0.8
Cremación al aire libre.		3.4
Cremación cónica.		3.6
<b>Varios.</b>	<b>16.9</b>	
Incendios forestales.		7.2
Incendios normales.		0.2
Cremación de residuos del carbón.		1.2
Cremación de productos agrícolas.		8.3

Cuadro 3 Fuentes antropogénicas del CO (Climent M. D. 1992).

El transporte aporta más del 50% y dentro de estos los vehículos que queman gasolina; la quema agrícola y los incendios forestales son los que mayor aportan dentro de las actividades antropogénicas

### 6.1.2 Formación del CO.

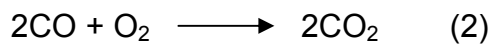
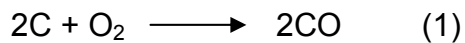
La formación del CO debido a las actividades humana es generalmente resultado de alguno de los siguientes tres procesos:

#### 6.1.2.1 La combustión incompleta de carbón o de compuestos de carbono.

Esto ocurre cuando el oxígeno disponible para hacer la combustión no es suficiente para llegar al CO<sub>2</sub>.

La formación de óxido de carbono es un proceso sencillo cuando los únicos reactivos son el O<sub>2</sub> y el C. Cuando la combustión de materiales ocurre al aire, el proceso es más complicado y envuelve una serie de reacciones. A pesar de su complejidad se conocen algunos principios generales:

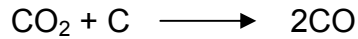
La combustión del carbono de los carburantes ocurre en dos etapas:



La primera reacción es diez veces más rápida que la segunda, de manera que se produce CO, compuesto intermedio de la combustión, si no hay suficiente oxígeno para completar la segunda reacción, o aunque haya oxígeno suficiente, si la mezcla de carburante y aire no es correcta.

#### 6.1.2.2 La reacción a altas temperaturas entre el CO<sub>2</sub> y materiales que contienen carbono.

La reacción que implica este proceso es:



Que ocurre a altas temperaturas, frecuentes en muchos procesos industriales como en la obtención del acero en altos hornos. En algunos procesos industriales como en la obtención del hierro el CO es beneficioso pues actúa como reductor del mineral, sin embargo algo de este CO puede escapar a la atmósfera y actuar como contaminante.

#### 6.1.2.3 Disociación del CO<sub>2</sub> en altas temperaturas en CO y O<sub>2</sub>.

En condiciones apropiadas, una reacción que contenga suficiente oxígeno para que la combustión sea completa puede así y todo actuar como fuente de CO, debido a la disociación del CO<sub>2</sub> a altas temperaturas.



La constante del equilibrio aumenta con la temperatura (reacción endotérmica).  $K_c$  (1745° C) =  $1.16 \cdot 10^{-4}$  y  $K_c$  (1940 ° C) =  $4.87 \cdot 10^{-4}$ .

Si una mezcla en equilibrio se enfría bruscamente, el CO presente persiste, debido a se requiere de un cierto tiempo para el establecimiento de un nuevo equilibrio a temperatura inferior.

#### 6.1.3 Procesos naturales de eliminación del CO.

Las investigaciones sobre la naturaleza de dichos procesos han revelado que:

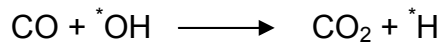
##### 6.1.3.1 Reacciones atmosféricas.

Las reacciones atmosféricas tales como:



Son muy lentas como para desaparecer un 0.1% de CO por hora de luz solar, lo que equivale a que el tiempo medio de vida del CO es de unos 3.5 meses.

Reacción del CO con los radicales hidroxilos ( $^*\text{OH}$ ):



#### 6.1.3.2 Eliminación del CO por el suelo.

Las plantas verdes en condiciones de esterilización (sin microorganismos) no asimilan CO. Sin embargo, algunos microorganismos del suelo asimilan rápidamente el CO del aire en total se han encontrado 16 hongos activos en la asimilación del CO. Experimentalmente se ha observado que la tierra de un tiesto que pesa 2.8 Kg. en tres horas elimina el CO de una atmósfera que contiene 120 ppm.

#### 6.1.4 Concentración de CO en zonas urbanas.

La concentración en esta zonas es debido a que en las zonas urbanas la producción de hongos que ayudan a la eliminación de CO es muy baja y en algunas zonas nula.

En las zonas urbanas la fuente productora de CO más importante son los automóviles (59.2%) por ello las concentraciones de este gas va de acuerdo a la densidad de población y a la actividad humana.

La concentración ambiental del CO en un punto determinado depende de las velocidades de emisión, dispersión y de eliminación. La velocidad de dispersión depende de factores meteorológicos: velocidad y dirección del viento, en las

grandes ciudades se crean turbulencias por el movimiento de los automóviles y corrientes de aire, pero por encima y alrededor de los edificios se dan prolongados periodos de estancamiento aéreo que dan origen a una inadecuada dispersión del CO.

#### 6.1.5 Efectos del CO en la atmósfera.

El CO disminuye la capacidad de auto limpieza de la atmósfera debido a que el disminuye los radicales hidroxilo, un importante <<detergente>> porque reacciona con casi todas las moléculas de gas traza en la atmósfera, incluidas las que, salvo con el son inertes. Sin el hidroxilo las concentraciones de la mayoría de los gases traza se harían mucho mayores de lo que son y la atmósfera en conjunto tendría unas propiedades químicas, físicas, y climáticas totalmente diferentes.

#### 6.2 Óxidos de Nitrógeno y sus características.

En la atmósfera se detectan tres óxidos de nitrógeno. Son: el óxido nitroso ( $N_2O$ ), el óxido nítrico (NO), y el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ).

El óxido nitroso ( $N_2O$ ) es un gas no inflamable ni tóxico, con un aroma y un sabor ligeramente dulce, se le conoce también como gas hilarante. Fue usado como uno de los primeros anestésicos y como propulsor en los primeros aerosoles.

El óxido nítrico (NO) es un gas incoloro, inodoro, no inflamable y tóxico.

El dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) es un gas pardo rojizo, no es inflamable, es tóxico y tiene un olor asfixiante.

Debido a las características antes descritas y a pesar de la cantidad significativa de óxido nitroso ( $N_2O$ ) presente en la atmósfera, solo se consideran contaminantes del aire per se, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ )

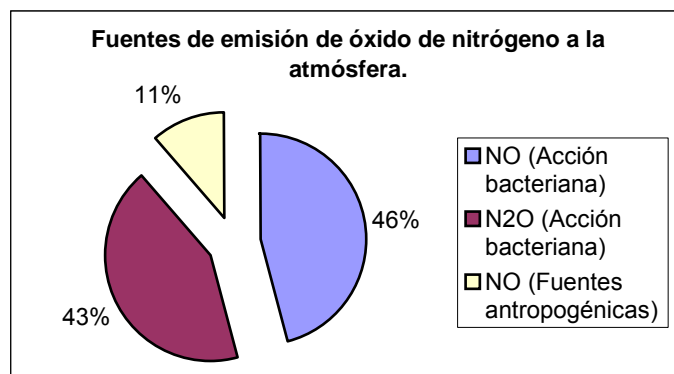
hay que considerar además que el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno participan en las reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Otra característica importante es que su presencia significativa procede de la actividad humana.

### 6.2.1 Origen de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

La presencia de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera es debida tanto a fuentes naturales como a las antropogénicas. Aunque las emisiones producidas por procesos naturales (88.7% en volumen) son mayores que las debidas a las fuentes antropogénicas (11.3% en volumen) estas son cuantitativamente significativas, por lo que no podemos concluir que no tengan importancia pues estas se concentran en zonas reducidas (Ver grafica 3).

#### 6.2.1.1 Fuentes naturales de $\text{NO}_x$ .

Casi todo el óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) atmosférico (46% en volumen) procede de fuentes naturales siendo la actividad bacteriana en el suelo, que causa la descomposición de compuestos nitrogenados, la fuente más importante de este óxido. En el suelo las bacterias autótrofas oxidan el  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ , que posteriormente es oxidado por otras bacterias a  $\text{NO}_3^-$ . Parte del  $\text{NH}_4^+$  no se oxida a  $\text{NO}_2^-$ , sino que pasa a  $\text{N}_2\text{O}$ . Estos procesos se ven incrementados por el uso excesivo de derivados amoniacales y de la urea como fertilizantes.



Gráfica 3 Origen de las emisiones de óxidos de nitrógeno (Climent M. D. 1992).

La acción bacteriana en la superficie terrestre y los rayos ultravioleta en la alta atmósfera, son principalmente las fuentes naturales de NO y N<sub>2</sub>O (45.7% en volumen).

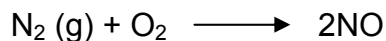
#### 6.2.1.2 Fuentes antropogénicas de NO<sub>x</sub>.

La combustión de carburantes fósiles es la principal fuente antropogénica de NO y NO<sub>2</sub>. Durante los procesos de combustión, a altas temperaturas el nitrógeno y el oxígeno reaccionan para dar fundamentalmente NO, que parcialmente se convierte en NO<sub>2</sub>.

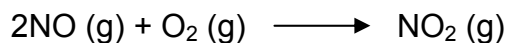
Otras fuentes antropogénicas de emisiones de NO y NO<sub>2</sub> son la eliminación de residuos sólidos, las pérdidas en procesos industriales, incendios forestales, lanzamientos de cohetes espaciales, aviación supersónica, explosiones nucleares, etc.

#### 6.2.2 Formación de los óxidos de nitrógeno.

El aire posee aproximadamente 78.7% de nitrógeno y un 21% de oxígeno, pero a temperatura ambiente estos dos gases no reaccionan, puesto que la reacción es extremadamente endotérmica. Ahora bien en altas temperaturas como las generadas en las cámaras de combustión de los vehículos (aprox. 1000 ° C instantáneos) se genera el calor necesario para producir esta reacción:



Los gases del tubo de escape contienen cantidades pequeñas pero significativas de NO al enfriarse el NO producido, reacciona con el oxígeno y forma NO<sub>2</sub>.



El dióxido de nitrógeno es el principal responsable de la contaminación en la atmósfera (smog fotoquímico).

Partiendo de mezclas gaseosas que contienen el 75% en volumen de nitrógeno y el 3% de volumen de oxígeno ha sido posible alcanzar el equilibrio a temperaturas superiores a 1000° C.

Esta es aproximadamente la proporción de nitrógeno y oxígeno que se da en las condiciones de reacción en los procesos de combustión de un motor de combustión interna, ya que la mayor parte del oxígeno reacciona con el combustible.

Durante la combustión, los gases que reaccionan están a temperaturas de llama (mas de 1000° C) durante un tiempo muy corto, como puede verse en el cuadro 4, la velocidad de reacción para formar 500 ppm de NO aumenta rápidamente a temperaturas superiores de 1700° C. Podemos incluir a la vista del cuadro que el tiempo de permanencia de los gases en la zona de combustión y a la temperatura de la llama determinan la cantidad de NO que se forma.

En la mayor parte de los equipos de combustión, los productos gaseosos, entre los que se encuentra el NO, se enfrían al momento. En estas condiciones el óxido nítrico NO, permanece en los gases a baja temperatura pues no tiene tiempo de reaccionar.

Debido a la inestabilidad del dióxido de nitrógeno a altas temperaturas la reacción del NO con O<sub>2</sub> para dar NO<sub>2</sub> no tiene lugar en las condiciones de combustión. Así pues, la mayor parte de los óxidos de nitrógeno emitidos por procesos de combustión están constituidos por óxido nítrico y cantidades muy reducidas de dióxido de nitrógeno (solo el 10% de los óxidos de nitrógeno procedentes de centrales energéticas son NO<sub>2</sub>, y solo el 2 o el 3% procedente de los automóviles).



Concentración de NO (p. p. m.)	Tiempo de oxidación.		
	25%	50%	90%
10,000	8.4 s.	24 s.	3.6min.
1,000	1.4 min.	4 min.	36.0min.
100	14.0 min	40 min.	6 hrs.
10	2.3 hrs.	7 hrs.	63 hrs.
1	24 hrs.	72 hrs.	648hrs.

Fuente: Stoquer-Seager 1981<<Química ambiental: contaminación del aire y del agua>> Blume Ecología.

Cuadro 4 Tiempos de oxidación del NO de acuerdo a su concentración.

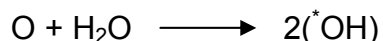
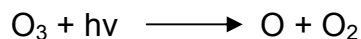
Puede verse que la velocidad de la reacción depende de la concentración de NO. Aunque en la zona de la combustión la concentración de NO puede ser de hasta de 3000 ppm, esta se reduce rápidamente a menos de 1 ppm en la atmósfera debido a la disolución de los gases de combustión en el aire. Aunque se ha citado a los aviones como fuente potencial de NO, se ha demostrado que puede disminuir su concentración ya que se producen radicales  $^*OH$  que son capaces de reaccionar con NO.

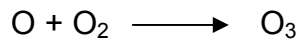
### 6.2.3 Distribución de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

#### 6.2.3.1 Los óxidos de nitrógeno en la troposfera.

La troposfera es donde tienen lugar muchos de los fenómenos que ayudan a transportar los contaminantes a grandes distancias hecho que depende de la inercia química de cada sustancia.

En esta zona existen radicales libres  $^*OH$  que son capaces de degradar a muchos contaminantes de manera que no pueden acceder a la estratosfera. La formación de radicales  $^*OH$  se puede ver representada por las siguientes reacciones:





Los radicales  $^*\text{OH}$  pueden producir efectos nocivos como la oxidación de los óxidos de nitrógeno y de azufre para dar lugar al ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y al ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), los cuales son responsables de un 30 y un 70 % respectivamente de la acidificación del agua de lluvia, de la degradación de las masas forestales y de la degradación de gran parte de la fauna acuática en lagos y ríos.

### 6.3 Contaminación en la zona urbana.

#### 6.3.1 Smog fotoquímico.

Se entiende por smog fotoquímico a la mezcla de sustancias (contaminantes primarios) y sus productos de reacción (contaminantes secundarios) existentes en la atmósfera cuando estos reaccionan en presencia de la luz solar.

En la formación del smog, además de las sustancias presentes en la atmósfera influyen las condiciones meteorológicas, como la temperatura y el establecimiento de anticiclones estacionarios en la zona que no favorecen la formación de corrientes de aire capaces de dispersar a los contaminantes, llegando a altas concentraciones de los mismos y a un aumento de reacciones entre estos.

En las ciudades, a primeras horas de la mañana se produce una emisión masiva a la atmósfera de hidrocarburos y de óxido nítrico (NO) producidos básicamente por los automóviles y fuentes estacionarias como calefacciones domésticas, añadiéndose estos efectos al hecho de que la pequeña cantidad de  $\text{NO}_2$  existente en la atmósfera al amanecer puede fotolizarse por la acción de las radiaciones solares.

Mediante una serie de reacciones se produce O, O<sub>3</sub> y radicales \*OH. Estos son capaces de oxidar a los hidrocarburos dando lugar a distintos radicales libres que en parte acaban por convertirse en radicales peróxido. Estos radicales peróxido intervienen en reacciones en cadena transformando el NO en NO<sub>2</sub> antes de desaparecer.

Al intervenir los hidrocarburos y proporcionar un camino alternativo para la formación de NO<sub>2</sub> la cantidad de ozono en la atmósfera aumenta. La concentración de ozono depende de la cantidad de luz solar y de la concentración de los contaminantes, alcanzando su valor máximo a medio día cuando la actividad solar es máxima y la concentración de hidrocarburos es grande debido a que desde las primeras horas de la mañana circulan por las calles una gran cantidad de vehículos.

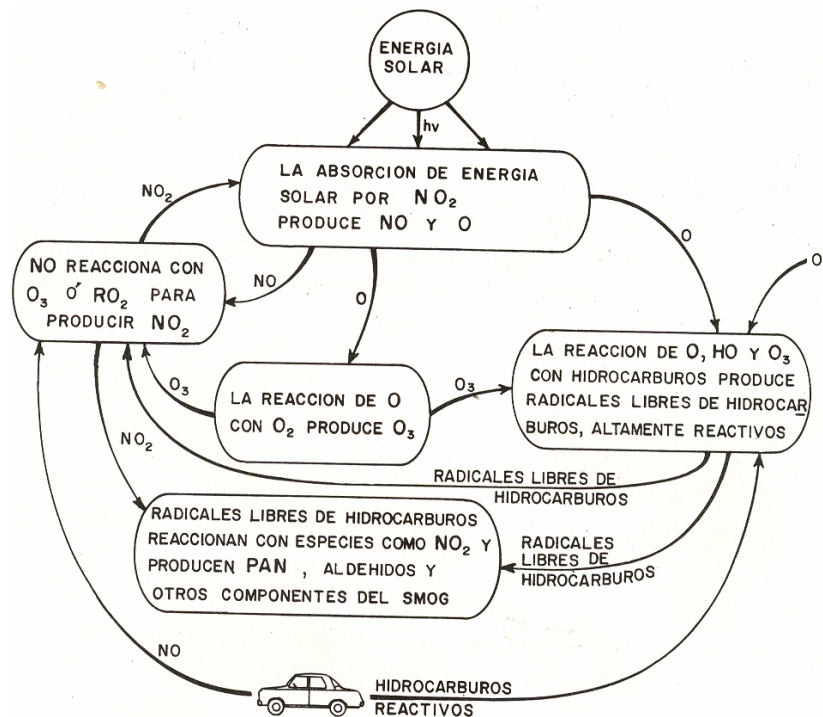


Figura 8. Ciclo de los óxidos de nitrógeno (Climent M. D. 1992).

#### 6.3.1.1 Formación del smog fotoquímico.

En el smog fotoquímico se producen un conjunto de reacciones en cadena en las que intervienen radicales libres. El proceso puede estudiarse clasificando este tipo de reacciones en cuatro grandes grupos:

#### 6.3.1.2 Reacciones de iniciación.

Son las reacciones donde por la incidencia de radiación ultravioleta proveniente del sol en diversos contaminantes y sustancias en la atmósfera se favorece la descomposición y formación de radicales libres.

#### 6.3.1.3 Reacciones de ramificación.

En este tipo de reacciones los radicales libres reaccionan con otras sustancias formando un número mayor de radicales libres distintos al inicial.

#### 6.3.1.4 Reacciones de propagación.

Se consideran reacciones de propagación a aquellas en las que unos radicales reaccionan para la formación de otros distintos, de manera que el número de radicales al final es igual al inicial.

#### 6.3.1.5 Reacciones de terminación.

En las reacciones de terminación los radicales libres reaccionan entre si o con otras sustancias para la formación de productos estables.

### 6.4 Compuestos de azufre.

La emisión de compuestos de azufre ha sido uno de los mayores problemas de contaminación desde los años 60. El interés por la contaminación se centra casi exclusivamente en la emisión de  $\text{SO}_2$  aunque se ha prestado también atención a la emisión de  $\text{SO}_3$  que esta presente del 1 al 3 % en las emisiones del  $\text{SO}_2$ .

Se consideraran 3 compuestos de azufre en la atmósfera: Dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ , sulfuro de hidrógeno y los sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$  aunque existen otros pero su incidencia no es significativa.

#### 6.4.1 Fuentes naturales de compuestos de azufre.

El azufre natural emitido a la atmósfera esta representado por los aerosoles de sulfato producidos en la espuma de mar, así como también por la descomposición de la materia orgánica en zonas pantanosas, ciénegas y llanos afectados por las mareas, erosión de suelos cuyo componente principal es el yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) y la actividad volcánica son las principales fuentes naturales de estos compuestos.

#### 6.4.2 Fuentes antropogénicas de compuestos de azufre.

Las fuentes antropogénicas derivan casi exclusivamente de la combustión de recursos fósiles donde el azufre se encuentra como impureza en áreas urbanas y zonas muy contaminadas la concentración de estos compuestos esta sujeta a grandes variaciones estacionales relacionada al uso de combustible para calefactores.

##### 6.4.2.1 Fuentes de sulfuro de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Ciertas industrias como las de molido de papel y de refinado de aceite pueden emitir sulfuros de hidrógeno como parte de sus emisiones a la atmósfera, pero la dificultad de hacer las mediciones en presencia de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) por lo que se suele considerar junto con el  $\text{SO}_2$  (Climent M. D. 1992).

Una estimación de los años 60 indica que a partir de la producción mundial de unas  $40 \times 10^6$  toneladas de pulpa de papel se creaba una emisión de  $0.06 \times 10^6$  toneladas de  $H_2S$ .

#### 6.4.2.2 Fuentes de dióxido de azufre ( $SO_2$ ).

Todas las emisiones de  $SO_2$  son debidas a fuentes contaminantes antropogénicas excepto una mínima cantidad debida a la actividad volcánica. La emisión mundial anual es de  $146 \times 10^6$  toneladas de  $SO_2$  de este total el 70 % procede de la combustión de carbón el 16 % de la combustión de derivados del petróleo 4 % de las operaciones de refinado del petróleo y 9.6% de la fundición de minerales sulfurados (Climent M. D. 1992).

El dióxido de azufre es el indicador de contaminación atmosférica en la legislación vigente, y por lo tanto sus niveles junto con los de partículas suspendidas, se controlan en forma sistemática en las redes de vigilancia de la contaminación atmosférica, el destino final de los óxidos de azufre es su conversión en ácido sulfúrico, uno de los principales contribuyentes a la deposición ácida ya sea húmeda o seca.

Los datos para las fuentes de  $SO_4^{2-}$ ,  $H_2S$  y  $SO_2$ , se han combinado en el cuadro 5 para mostrar las emisiones contaminantes y naturales mundiales de los compuestos de azufre.

Emisión.	Fuente	Cantidad. ( $\times 10^6$ ton)	Azufre. ( $\times 10^6$ ton)	%
Aerosol $SO_4$	Espuma de mar.	130	44	20.0
$H_2S$	Desc. Biol. oceánica.	30	30	13.7
	Desc. Biol. Terrestre	60/80	70	33.4
	Contaminantes.	3	3	1.4
$SO_2$	Contaminantes.	146	73	33.1
	Total.		220	

Cuadro 5 Fuentes principales de compuestos de azufre en la atmósfera (Climent M. D. 1992).

Esta estimación no es muy precisa debido que alrededor del 50% del total procede de las emisiones estimadas de H<sub>2</sub>S procedentes de áreas terrestres y oceánicas y a que hay pocos datos observables en los que basar el valor de H<sub>2</sub>S estimado.

#### 6.4.3 Reacciones del dióxido de azufre en la atmósfera.

##### 6.4.3.1 Reacción con vapor de agua.

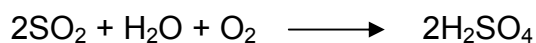
Una parte del SO<sub>2</sub> atmosférica se oxida hasta SO<sub>3</sub>, que reacciona con vapor de agua creando el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) este a su vez puede reaccionar con otras sustancias (NH<sub>3</sub>) para formar sulfatos [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] finalmente los sulfatos abandonan la atmósfera o son lavados por la lluvia.

##### 6.4.3.2 Oxidación directa.

La oxidación directa por oxígeno molecular ocurre en pocas horas debido a dos mecanismos: la oxidación catalítica y a la oxidación fotoquímica.

##### 6.4.3.3 Oxidación catalítica.

La oxidación catalítica se cree que tiene lugar en disolución (dentro de gotas de agua) interviniendo el oxígeno molecular como agente oxidante así como sales de manganeso y hierro como catalizadores.



El SO<sub>3</sub> se disuelve en el vapor atmosférico creando ácido sulfúrico y al aumentar de tamaño las gotas al combinarse con más vapor sirve como medio para que se disuelva más SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> las sales de manganeso y hierro se encuentran en las cenizas del carbón transportadas por el viento.

#### 6.4.3.4 Oxidación fotoquímica.

La oxidación fotoquímica de  $\text{SO}_2$  es la más importante en atmósferas contaminadas, donde la mezcla de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  e hidrocarburos forman partículas de materia cuando son objeto de radiación solar, siendo el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  el constituyente mayoritario de las partículas aerosoles, teniendo lugar estas reacciones a bajas concentraciones como en las áreas urbanas.

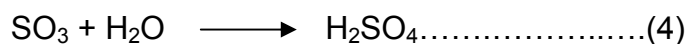
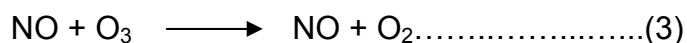
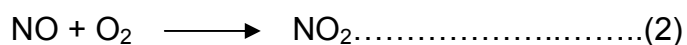
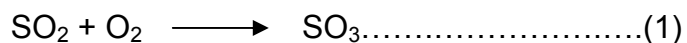
#### 6.5 Precipitación Ácida.

La sedimentación ácida o lluvia ácida, es causada por emisiones de bióxido de azufre y de óxidos de nitrógeno. Aunque existen fuentes naturales de estos gases, los contaminantes primarios del aire de fuentes antropogénicas provienen del uso del carbón en la producción de la electricidad, de la fundición de metales y de la combustión en los vehículos. Una vez que se liberan en la atmósfera, pueden convertirse químicamente en contaminantes secundarios como el ácido nítrico y el ácido sulfúrico, los cuales se disuelven fácilmente en el agua. Las gotitas de agua ácida resultantes pueden ser transportadas a grandes distancias por los vientos, y regresan a la Tierra como lluvia ácida, nieve o niebla.

De una manera natural, el bióxido de carbono, al disolverse en el agua de la atmósfera, produce una solución ligeramente ácida que disuelve con facilidad algunos minerales. Sin embargo, esta acidez natural de la lluvia es muy baja en relación con la que le imparten actualmente los ácidos fuertes como el sulfúrico y el nítrico, sobre todo a la lluvia que se origina cerca de las zonas muy industrializadas.

Se cree que estos ácidos se forman a partir de los contaminantes primarios como el bióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno por las siguientes reacciones:





La oxidación adicional de los óxidos de azufre (1) y de nitrógeno (2) puede ser catalizada por los contaminantes atmosféricos (3), incluyendo las partículas sólidas y radiación solar. Una vez formados los óxidos  $\text{SO}_3$  y  $\text{NO}_2$ , reaccionan con facilidad con la humedad atmosférica para formar los ácidos sulfúrico (4) y nítrico (5) respectivamente. Estos permanecen disociados en la atmósfera y le imparten características ácidas y, eventualmente, se precipitan con la neblina, la lluvia o la nieve, las que, por lo tanto, tendrán mayor acidez en las áreas que reciben continuamente dichos óxidos que en las que no están alteradas.

### 6.6 Hidrocarburos y compuestos orgánicos.

En la atmósfera existen cantidades apreciables de compuestos orgánicos siendo las fuentes naturales mas importantes los océanos, vegetación e incendios forestales, actividad geotérmica, procesos en yacimientos de hulla, gas natural y petróleo, la variedad de sustancias emitidas es muy grande como las parafinas que proceden de emisiones biogénicas, los océanos emiten cloruro de metilo ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), en procesos anaerobios se produce  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}$ , mercaptanos.

Los contaminantes de fuentes antropogénicas en áreas urbanas son consecuencia de la combustión incompleta o evaporación de combustibles fósiles los hidrocarburos de este tipo son los alcanos, alquenos, carbonilos, alcoholes, ácidos carboxilos e hidrocarburos aromáticos. Los vehículos de combustión interna emiten gran cantidad de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHA), desde el naftaleno hasta los que poseen varios anillos aromáticos, así como sus análogos

alki-sustituidos y derivados de este con oxígeno, azufre y nitrógeno en sus moléculas.

Las transformaciones que sufren con los radicales  $^*OH$  les convierte en radicales peroxido que en combinación con dióxido de nitrógeno dan lugar a nitratos de peroxiacilo (PAN).

Todas estas sustancias tienen probada su toxicidad y/o poder cancerígeno y al ser baja su presión de vapor, pueden encontrarse en forma gaseosa o de partícula dependiendo de la temperatura ambiental. En climas cálidos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) de 2 a 4 anillos en forma gaseosa mientras en climas fríos se encuentran en forma de partícula.

También como resultado de diversos procesos industriales como los derivados clorados aromáticos que se utilizan en la fabricación de fungicidas insecticidas herbicidas. Un gran número de derivados halogenados son utilizados como disolventes. Los compuestos organoclorados, tóxicos y bioacumulativos se originan como subproducto del proceso de blanqueado con cloro de la pasta de papel.

Teniendo así un recuento de los contaminantes atmosféricos que pueden dañar a los metales expuestos a la atmósfera, su efecto en dichos metales dependerá de la concentración en el agua de origen atmosférico que sirva de electrolito y de la agresividad de estos compuestos con el metal expuesto, modificando las características de las celdas galvánicas formadas en la superficie del metal continuamente al variar su concentración, la humedad atmosférica y la temperatura ambiental.

## 7 Corrosión atmosférica.

La corrosión atmosférica se describe como el deterioro de los materiales al contacto con el aire, el cual contiene diversos tipos de contaminantes como son el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), bióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), iones de cloro ( $\text{Cl}^-$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) entre otros; además pueden encontrarse algunos hidrocarburos y compuestos orgánicos, estos contaminantes y sus posibles orígenes se vieron en la sección de contaminantes atmosféricos.

Desde el punto de vista de los efectos y costos asociados a la corrosión atmosférica, este es el proceso mas importante ya que por si sola representa más del 50% de los costos debidos a la corrosión.

Dentro de la corrosión atmosférica se pueden dar las siguientes situaciones:

### 7.1 Corrosión atmosférica seca.

En este caso no existe evidencia visible de la capa de electrolito sobre la superficie del metal sometido a la prueba de corrosión.

### 7.2 Corrosión atmosférica bajo condiciones de humedad moderada.

### 7.3 Corrosión atmosférica bajo condiciones de humedad apreciable.

Las condiciones de humedad de los dos casos anteriores se diferencian en cuanto al espesor de la capa de humedad, siendo más grande el espesor cuando las condiciones de humedad es apreciable, haciendo que el pH del electrolito no varíe tanto con las reacciones de oxidación y reducción que originan la oxidación.

## 8 Fenómenos dentro de la corrosión atmosférica.

La gran complejidad de los fenómenos que dan lugar a la corrosión atmosférica es indiscutible ya que estos incluyen un amplio espectro de procesos físicos, químicos y electroquímicos en el dominio de las interfases gas-liquido-sólido, lo que se traduce en la imposibilidad práctica de su modelado y la dificultad de reproducir sus efectos con precisión en condiciones de laboratorio.

Las diferentes etapas por las cuales se circula para dar lugar al deterioro del metal se producen en muy diversos intervalos de tiempo, ya que los fenómenos iniciales solo requieren en algunos casos de intervalos del orden de segundos, mientras que los estados avanzados se pueden presentar después de varios años.

### 8.1 Campos que involucran la corrosión atmosférica.

Los campos que involucran la corrosión atmosférica son:

8.1.1 Química atmosférica, para el estudio de la capa gaseosa.

8.1.2 Transporte de masa y ciencia de las interfaces, para el análisis de las condiciones de interfase.

8.1.3 Química de las soluciones acuosas

Para determinar el comportamiento de capas líquidas de pequeño espesor (algunas decenas de monocapas de agua) o para el comportamiento volumétrico (para capas de humedad de un espesor capaz de ser observables a simple vista).

#### 8.1.4 Química de los depósitos y de los sólidos.

Por facilidad y con la intención de profundizar posteriormente en los efectos de la corrosión atmosférica en diversas condiciones, será necesario describir primero las diferentes etapas de esta así como sus reacciones características.

### 9 Etapas de la corrosión atmosférica.

A las etapas de la corrosión atmosférica se les ha separado en tres para su estudio:

#### 9.1 Etapas iniciales de la corrosión atmosférica.

La primera etapa de la interacción entre el sólido y la atmósfera es la reacción instantánea entre de la molécula de agua con el metal, en este caso el enlace se puede hacer de forma molecular (a través del átomo de oxígeno al metal o a algún otro constituyente superficial de carga positiva) o disociada (transferencia neta de carga de la molécula de agua al metal). La fuerza dominante para la disociación del agua es la formación de enlaces metal-oxígeno o metal-hidroxilo. Los grupos hidroxilo al formarse actúan como sitios preferentes para la disociación del agua.

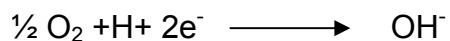
La formación de la capa superficial de ( $\text{OH}^-$ ) es un proceso muy rápido, ocurre en una pequeña fracción de segundo y provoca una superficie menos reactiva con el agua. Si se tiene una exposición mayor a la atmósfera, ahora la adsorción de agua será de forma molecular.

De los estudios realizados en superficies metálicas con capas delgadas de óxido o hidróxido han demostrado que la cantidad reversible de agua adsorbida depende de la humedad relativa, del tiempo de exposición y de la naturaleza del sustrato.

La variación de las características en la adsorción del agua por parte de las superficies metálicas depende de las propiedades de estas, de sus características superficiales, de la porosidad, así como de las partículas que luego de depositarse actúan de forma higroscópica incrementando así el espesor de la capa adsorbida.

Las superficies metálicas son muy heterogéneas debido a las irregularidades de éstas y a la presencia de defectos que interceptan a la superficie, (límites de grano, dislocaciones, precipitados, incrustaciones, diferencias de trabajo en frío, etc.) los cuales se caracterizan por su mayor nivel de energía. Por estas circunstancias la adsorción del agua por la superficie es heterogénea, de tal forma que los productos de la reacción se pueden formar como islas o películas que varía sustancialmente en su espesor sobre la superficie.

En la corrosión atmosférica las reacciones electroquímicas tienen lugar entre el sustrato sólido y la capa de agua. La heterogeneidad de la superficie da lugar a la presencia de algunos sitios de comportamiento predominantemente catódico, mientras que otras dan lugar a reacciones preferentemente anódicas. Las reacciones dominantes en la corrosión atmosférica son:



Los productos de corrosión durante las primeras etapas de deterioro se presentan en forma asilada. Las áreas anódicas se encontrarán en las zonas adyacentes a donde se depositan los productos de las reacciones, mientras que las catódicas corresponderán a las regiones definidas entre las zonas de depósito. De lo anterior se considera que las zonas anódicas y catódicas estarán separadas durante las reacciones de la corrosión atmosférica. Debido al acceso inmediato del oxígeno del aire a la capa líquida de la superficie, la reacción anódica tiende a ser la limitante en el proceso, más que la reacción catódica.

## 9.2 Etapas intermedias durante la corrosión atmosférica.

La fase acuosa actúa no solamente como un medio propicio para las reacciones electroquímicas, sino como un solvente para los constituyentes atmosféricos, sean gases o partículas. Los contaminantes atmosféricos que mayor influencia tienen en el proceso son: dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y formaldehído ( $\text{HCHO}$ ); además que en formas de partículas se tiene al cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), sulfatos de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ), cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). En algunos casos estos constituyentes están incorporados en la capa líquida como componentes de la lluvia, rocío, niebla o nieve. En otros casos, el proceso de formación de depósitos incluye impacto o difusión hacia la superficie.

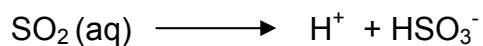
Cuando la capa acuosa y la capa atmosférica están en equilibrio, la actividad química del constituyente gaseoso disuelto en la capa acuosa es directamente proporcional a la presión parcial del mismo constituyente en la fase gaseosa. Sin embargo, en la gran mayoría de las ocasiones durante la corrosión atmosférica, las condiciones están muy alejadas del equilibrio, lo cual se debe entre otras cosas a la baja velocidad de formación de los depósitos de muchos componentes atmosféricos, la que a su vez es influida por la velocidad del viento, las características del flujo de aire y la de la capa superficial así como de la proximidad de las fuentes contaminantes.

El depósito de constituyentes atmosféricos en la capa acuosa conlleva un gran número de reacciones químicas y electroquímicas. Pueden provocar también en ocasiones productos de reacción volátiles de la fase acuosa que van a la atmósfera. Algunas reacciones químicas importantes que se pueden dar son la transformación de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), la transformación de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y la disociación de estos ácidos.

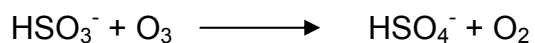
Entre los factores que hacen improbable que la capa líquida se encuentre en equilibrio químico con la atmósfera, están las variaciones diarias en las condiciones atmosféricas, tanto el espesor de la capa líquida como la composición varía durante el día y la estación.

Cuando la superficie de corrosión sufre estos ciclos de condensación y secado se pueden esperar cambios en varios órdenes de magnitud de fuerzas iónicas. De esta forma el pH de la capa acuosa puede variar de neutro para grandes espesores a muy ácida para espesores menores.

De diversos estudios que se han realizado a la fecha se puede definir la función realizada por los principales constituyentes atmosféricos (Svensson and Jhansso, A laboratory study of the effect of ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide, journal of electrochemical society, 1999) así como las transformaciones relativas a la química de la capa líquida. En el trabajo antes mencionado se evalúa el efecto sobre el zinc al ser expuesto a una atmósfera sintética controlada conteniendo ya sea dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), y ozono (O<sub>3</sub>) ó dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Cuando el zinc se expone a aire húmedo que contiene solamente dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el gas se deposita en la capa acuosa y forma iones de sulfito:



La adición de ozono acelera la formación de depósitos de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), además la reacción del ozono es mucho mayor en presencia de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Los resultados sugieren que los gases disueltos reaccionan de manera estequiométrica y forman iones bisulfato:





Por su parte el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) muestra un comportamiento distinto al del ozono en presencia de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) de tal forma que los depósitos de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) solo se pueden detectar durante la primera hora de exposición. Aun así la velocidad de formación de los depósitos es mucho mayor cuando hay dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) presente. Se puede concluir entonces que el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) fomenta la formación de iones sulfato a través de un mecanismo catalítico más que por una reacción estequiométrica.

Entonces tanto el ozono como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) estimulan la reacción de azufre acelerando de este modo la corrosión pero con mecanismos diferentes.

Efecto de los iones formados en el líquido en la disolución del metal.

Los iones formados en la capa de líquido pueden actuar de manera individual con la superficie del metal y así acelerar su disolución.

Como se describió anteriormente, la superficie de óxido metálico se caracteriza por la presencia de grupos hidroxilo adyacentes a la capa líquida, esto para condiciones iniciales de exposición atmosférica estos grupos presentan buenas propiedades de intercambio iónico, y pueden ser reemplazados fácilmente por iones de la capa líquida. Entre los iones que sufren intercambio se tiene  $\text{H}^+$ ,  $\text{HSO}_3^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ . Mientras ocurre este reemplazo, los enlaces de los átomos metálicos superficiales y sus vecinos inmediatos pueden debilitarse, facilitando así la disolución metálica. Este fenómeno se considera como uno de los procesos más importantes de corrosión atmosférica en su etapa inicial. Estos fenómenos no están completamente comprendidos a nivel molecular, sin embargo se considera que los iones de hidrógeno tienen un papel protagónico, ya que cuando se liberan pueden desplazarse entre los distintos sitios de la superficie del metal. Un átomo metálico superficial rodeado por uno o más vecinos ligados por  $\text{H}^+$  está más propenso a separarse de la red de óxido metálico. Cuando el ion metálico deja la red el enlace roto en la superficie se hidroxila inmediatamente, y los iones de

hidrogeno involucrados en este proceso son liberados y pueden tomar parte en la separación de otro átomo de la superficie metálica. De manera simultanea, mientras se da la disolución del óxido de metal, se forma un nuevo óxido metálico. Este proceso de oxidación es mucho más rápido que el proceso de disolución.

Cuando el ion metálico se disuelve en la capa liquida, se puede aparear con iones de carga opuesta que encuentre. Este proceso depende de la naturaleza del ion metálico y de los cationes presentes, aunque existen diversas posibilidades para esto se darán preferentemente aquellas que relacione ácidos fuertes con bases fuertes y ácidos débiles con bases débiles.

La fuerza de un ion aumenta generalmente con su estado de oxidación, por ejemplo el  $Fe^{+++}$  es un ácido de Lewis más fuerte que el  $Fe^{++}$ . De lo presentado en el cuadro 6 se define que un ácido suave como la plata tiene mayor probabilidad de coordinarse con un compuesto de azufre reducido que con un ion sulfato. Dicha afinidad es acorde con lo observado en los estudios realizados en depósitos formados en la plata, ya que estos indican la presencia de sulfuros de plata como productos de corrosión y en muy raras ocasiones exhiben sulfatos. Así mismo lo mencionado en el cuadro 6 sugiere que un ácido fuerte, como el ion  $Al^{+3}$  se coordina con mayor facilidad con iones de oxígeno o sulfato que con compuestos de azufre reducidos, situación que es acorde con lo observado experimentalmente.

Fuertes.	Moderados.	Suaves.
Ácidos.		
$H^+$ , $Na^+$ , $Mn^{+2}$ , $Al^{+3}$ , $Cr^{+3}$ , $Fe^{+3}$ , $Ti^{+4}$	$Fe^{+2}$ , $Ni^{+2}$ , $Cu^{+2}$ , $Zn^{+2}$ , $Pb^{+2}$	$Cu^+$ , $Ag^+$
Bases		
$H_2O$ , $(OH)^-$ , $O^{2-}$ , $(SO_4)^{2-}$ , $(NO_3)^-$ , $(CO_3)^{2-}$	$(SO_3)^{2-}$ , $(NO)^{-2}$	$R_2S$ , $RSH$ , $RS^-$

Cuadro 6 Clasificación de ácidos y bases de Lewis (Cerrud Sánchez 2003).

Cuando los productos de corrosión ya no varían con el tiempo indica que la velocidad de disolución y reformación de estos está en equilibrio, entonces estos alcanzan un espesor constante.

El tiempo requerido puede tomar varios años o hasta décadas. Esta transformación gradual concuerda con la observación común que los productos de corrosión formados luego de una exposición atmosférica muy prolongada son similares, y en algunos casos son idénticos a los minerales formados como resultado de procesos naturales de larga duración.

Por otra parte existe evidencia del efecto que en los procesos de corrosión atmosférica, tiene la luz solar (fotosensibilidad). De trabajos experimentales se ha demostrado que la velocidad de corrosión se acelera en factores aún superiores al 50%, para exposiciones prolongadas ante la presencia de luz solar. Este efecto se considera que está relacionado con la interacción de fotones con los óxidos semiconductores (creación de pares de electrón-vacancia) en la superficie de corrosión.

El hierro presenta un comportamiento muy particular de corrosión la cual es favorecida o estimulada en presencia de fotones, de tal forma que en una capa superficial húmeda, los iones de hierro forman compuestos con los iones hidroxilo. Con la adsorción de fotones del orden de  $\lambda < 400$  nm, el complejo  $\text{Fe}(\text{OH})$  sufre una transferencia de carga hacia el ion metálico, liberando el radical  $\text{OH}^\cdot$  para comenzar una serie de reacciones químicas, incluyendo la corrosión secuencial del hierro. Este proceso particular de fotocorrosión es único para el hierro dado que este elemento es el único que representa los hidróxidos sensibles a los fotones de longitudes de onda tales que penetran a la atmósfera y llegan a la superficie terrestre.

La nucleación de los productos de corrosión se facilita con la naturaleza heterogénea de la superficie del sustrato, en particular por defectos de estado

sólido que pueden actuar como sitios de nucleación. La velocidad general de formación de los precipitados, por lo tanto, esta limitada por la tasa de crecimiento mas que por la de nucleación, de esto se concluye que existirán muchos núcleos pequeños de precipitados en lugar de pocos núcleos grandes, situación que es congruente con la evidencia experimental, la cual indica que la formación de óxido se presenta en muy diversos lugares de la superficie metálica.

### 9.3 Etapas finales.

Después de una exposición prolongada, el número de núcleos de precipitados y su tamaño aumentan hasta un punto en que cubrirán por completo la superficie metálica coloreándola en algunos casos y haciéndola visible al ojo humano tal como sucede con el cobre, hierro y zinc o indetectable para el caso del aluminio y el acero inoxidable.

Cuando la capa de productos de oxidación se ha formado y cubre la superficie es necesario que las especies reactivas se transfieran de la fase líquida al interior de la sólida, o que los iones metálicos se transporten hacia el exterior; o en su defecto que ambos fenómenos se presenten simultáneamente. En general, los iones de hidrógeno y los iones de valencia -1 como los de cloro son transportados más fácilmente a través de los productos de corrosión que especies como los iones sulfato. Si la capa de productos de corrosión es porosa o delgada, el transporte de iones no es impedido de manera significativa y tiene una habilidad protectora muy pobre. Las capas de corrosión más gruesas y densas brindan una mayor resistencia a la corrosión al restringir el transporte de iones.

Además del transporte de iones, se debe considerar el transporte de electrones entre las regiones anódicas y catódicas; este es un proceso necesario para poder cerrar el ciclo de oxidación-reducción y cualquier interrupción o limitación interrumpirá el proceso corrosivo.

Mientras el sustrato metálico está cubierto con una capa delgada de óxido, el transporte de electrones a través de esta capa no es un proceso que limite la velocidad, sin embargo, cuando la capa aumenta su espesor, siendo su conductividad baja se verá afectada la velocidad del fenómeno corrosivo.

El crecimiento a largo plazo de los productos de corrosión depende de las condiciones de exposición. Cuando esta se caracteriza por variaciones diarias de humedad relativa y en espesor de la capa líquida, el desarrollo de los productos de corrosión tiene una secuencia por etapas. La primera ocurre durante el incremento del espesor de la capa líquida, cuando parte de los productos de corrosión pueden disolverse; la segunda etapa incluye la coordinación en la capa líquida de aniones metálicos y cationes disueltos, mientras que la última se da en la reducción del espesor de la capa cuando los pares iónicos nuevamente coordinados se vuelven a precipitar. Los ciclos de disolución coordinación precipitación, causan que la capa de productos de corrosión envejezca cambiando su composición química, microestructura, cristalinidad espesor y propiedades. Lo antes expuesto se ejemplifica a través de los productos de corrosión que se forman en el zinc y cobre, los cuales presentan un cambio gradual en la composición química.

En una atmósfera marina los iones  $\text{Cl}^-$  son los constituyentes atmosféricos dominantes, por ejemplo para el caso del zinc al cabo de unas pocas horas de exposición se forman islas de hidroxidocloruro de zinc (ligeramente protector), estos productos también crecen lateralmente y presentan coalescencia. Luego de unas semanas de exposición, en la superficie del zinc se habrá formado una capa de clorohidroxisulfato que se caracteriza por brindar mayor protección.

Como ya ha sido mencionado otro cambio en las características de los productos de corrosión durante la exposición prolongada es su transformación gradual de estado amorfo a uno cuasi cristalino o cristalino. Este patrón se observa durante la exposición de níquel, en este caso el hidroxisulfato de níquel que se forma originalmente es amorfo, para posteriormente transformarse en cristalino.

Si el depósito formado es protector, éste tenderá después de una exposición generalmente muy prolongada, a adquirir características estables en el tiempo, de tal forma que se alcanza un espesor constante, en donde las velocidades de oxidación y reducción del metal son prácticamente las mismas.

Esta transformación progresiva está de acuerdo con la observación común de que los productos de corrosión formados luego de una exposición atmosférica muy prolongada y son idénticas a los minerales formados como resultados de los procesos naturales. Muchos de los procesos químicos, electroquímicos, y físicos aplicables a la corrosión de los materiales operando durante periodos largos de tiempo están obviamente involucrados también en la formación de los minerales naturales.

De todo lo expuesto se concluye que existen diferencias de tiempo muy importantes entre las diferentes etapas que se presentan durante la corrosión atmosférica, ya que mientras las etapas iniciales se requieren de intervalos del orden de segundos para que alcancen condiciones de estabilidad, en el depósito se pueden requerir de periodos de hasta décadas.

### **CAPÍTULO 3.**

#### **ESTUDIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ALEACIONES Zn- Al- Cu.**

Durante la década de los 70, inicio en el Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM una serie de estudios sobre las materias primas nacionales, para la contribución del conocimiento y utilización de las mismas, en virtud de que empezaban a presentarse señales de debilitamiento en cuanto a su uso, por efecto de la sustitución que se estaba realizando en todo el mundo por materiales como el plástico y el aluminio.

Los estudios preliminares se mantuvieron con fondos del Instituto hasta 1979, año en el cual se recibieron recursos de la Organización de Estados Americanos (OEA) para desarrollo de aleaciones a base de zinc que pudieran utilizarse en sustitución del aluminio, del cual México carece y tiene que importar.

#### 1 Estudios sobre aleaciones zinc-aluminio.

De esta línea de investigación se iniciaron estudios sobre aleaciones zinc-aluminio haciendo variaciones en los porcentajes de zinc y verificando sus propiedades mecánicas bajo ciertas condiciones como en el caso de los estudios realizados por el Dr. Negrete Sánchez (Negrete, 1979) que en colaboración con el Dr. Torres Villaseñor investigaron las propiedades mecánicas bajo compresión, de las aleaciones Al+60 %p Zn, Al+70 %p Zn, Al+78 %p Zn. Al+85 %p Zn sometidas a una gama de tratamientos térmicos obteniendo diversas estructuras granulares, con el fin de determinar las mejores condiciones para la obtención de la máxima resistencia y ductilidad. Concluyendo que estas aleaciones pueden competir ventajosamente tanto en precio como en propiedades con las aleaciones de aluminio actualmente utilizadas en la construcción.

Los estudios de las aleaciones Zn-Al continuaron avanzando por diversos investigadores e instituciones que unieron esfuerzos para clasificar sus

características variando parámetros predeterminados y estudiando la respuesta a los cambios realizados en la aleación; tal es el caso de la investigación del efecto del recosido en las propiedades mecánicas de aleaciones Zn-Al con contenidos entre el 60 y el 80% de zinc (R. Campos, 1980), sabiendo que estas tienen una gran variedad de propiedades mecánicas de acuerdo al tratamiento térmico dado y a la velocidad de deformación llegando a encontrarse que las aleaciones con 60 y 78 % de zinc suelen presentar bajo ciertas condiciones propiedades superplásticas.

Los estudios anteriores dejaron ver que las propiedades de súper plasticidad se obtienen al conseguir un tamaño de grano muy fino; para obtener este tipo de estructura granular en las aleaciones de Zn-Al se estudio la influencia de la duración del tratamiento a solución en las aleaciones Zn 22% Al (M. Mendoza, 1981). Este tipo de aleación ha demostrado tener excelentes propiedades mecánicas así como propiedades superplásticas al obtener deformaciones superiores al 1000% a temperaturas cercanas a la temperatura eutectoide (275° C). Este estudio condujo a la conclusión que la estructura de grano ultra fino propicia el comportamiento superplástico, así como el tiempo de recosido alrededor de los 20 horas, propicia el mejor comportamiento superplástico con el consecuente descenso de las propiedades mecánicas y la dureza; un templado con agua a temperatura ambiente después del recosido es necesario para lograr la estructura granular deseada; además que un tiempo mayor de 20 horas empieza a bajar la ductilidad y a aumentar la dureza debido a un aparente crecimiento de grano.

## 2 Estudios sobre aleaciones zinc-aluminio-cobre (Zinalco).

Con las características encontradas en estas aleaciones se empezó a mostrar un mayor interés en las mismas y se empezó a experimentar con la adición de elementos de aleación como el cobre y la plata.



Los “efectos que tuvo la adición de cobre en la estructura y propiedades mecánicas de la aleación superplástica Zn 22% p Al” fueron estudiados (L. Valdés, 1981), observándose una mejora apreciable en las propiedades mecánicas, así como en la deformación plástica a temperatura ambiente con la adición de porcentajes hasta un 2% de cobre seguido de un templado en aire o en agua lo que hace posible una estructura granular fina que da las propiedades de plasticidad en el material; mayores cantidades aumentan la resistencia mecánica pero disminuye la deformación plástica sensiblemente a temperatura ambiente, cantidades de 2% y menores entran en la aleación como solución sólida en las fases  $\alpha$  rica en Al y  $\beta$  rica en Zn de la aleación aumentando su resistencia y su plasticidad sin modificar notoriamente su microestructura en comparación con las aleaciones sin cobre; cantidades de 4% de Cu o mayores se propicia la aparición de una fase  $\epsilon$  a los 340°C y es posible mantener la presencia de esta fase con un templado, esta fase aumenta la dureza del material así como el incremento en su resistencia mecánica, pero disminuye su plasticidad a temperatura ambiente, en cuanto a la resistencia a la corrosión esta se ve mejorada con la adición de cobre desde pequeñas cantidades (menores a 0.5%) y aumenta con el aumento del porcentaje de cobre en la aleación Zn-Al.

Al observar los resultados de este último estudio se generó un gran interés en las aleaciones Zn-Al-Cu, a las que se le llamo **Zinalco**, por ser una palabra compuesta por las primeras letras de los metales que la componen, se continuaron estudios sobre este tipo de aleaciones para poder caracterizar todas sus propiedades así fue como iniciaron las investigaciones de posibles procesos y aplicaciones de esta aleación. Parte de los cuales se resumen en el trabajo “Microestructura y propiedades mecánicas del zinalco” (G. Torres, 1988) en el que plantean un mecanismo de deformación para los materiales superplásticos y observaron los efectos de la rapidez de la deformación en el material de acuerdo a su microestructura, así como las principales propiedades mecánicas de estas, dando a conocer que es un material con características intermedias entre el hierro y el aluminio, con la resistencia del hierro con bajo contenido de carbón y la

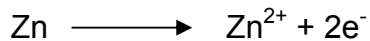
resistencia a la corrosión similar a la del aluminio, con su punto de fusión inferior al del aluminio, bronce, latón o hierro de fundición lo que conlleva un ahorro considerable de energía en el proceso de obtención y manufactura del material.

### 3 Resistencia a la corrosión de las aleaciones zinc-aluminio-cobre (Zinalco).

En cuanto a la resistencia a la corrosión del zinalco, los estudios se iniciaron en las aleaciones zinc aluminio, siendo estas aleaciones la base del zinalco, uno de los primeros estudios fue la influencia de la microestructura en la resistencia a la corrosión de la aleación Zn-22% p Al (L. Hernández, 1981-1 y L. Hernández 1981-2) estudios donde por medio de tratamientos térmicos obtuvieron 3 diferentes microestructuras, las cuales fueron sometidas a ciclos alternados de humedad y sequedad durante un periodo de 64 días, evaluando las superficies por medio de microscopia electrónica de barrido y la corrosión por el método de ganancia de peso.

Todas las microestructuras en prueba mostraron un comportamiento parabólico en su ganancia de peso, lo que indica la formación de una capa de óxido protectora que impide que continúe la corrosión del material; este tipo de capa protectora se denomina capa pasiva la cual ofrece una protección al material del medio corrosivo, tal como ocurre en los materiales ya conocidos con buena resistencia a la corrosión como el aluminio y el acero inoxidable. Las observaciones hechas durante el proceso de corrosión de este material muestran que el óxido formado en la superficie es la unión de dos tipos de óxido, en la fase  $\alpha$  rica en aluminio se forma una capa delgada de óxido y en la fase  $\beta$  rica en zinc se forma una capa mas gruesa pero mas porosa, esta última tiende a unirse con las capas vecinas formando una capa compacta debido a la disolución de los hidroxilos cuando se encuentra en la fase húmeda y a la deposición de estos cuando se evapora el agua al acercarse la fase seca; este es el doble mecanismo de corrosión que se propone en existencia de un doble mecanismo de oxidación en la aleación eutectoide Zn-22% p Al (L. Hernández 1981-2).

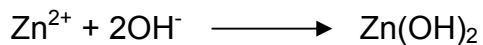
El proceso electroquímico de disolución metálica (primera parte del doble mecanismo de corrosión), anterior al de precipitación, consta de dos reacciones que se desarrollan paralelamente. La reacción anódica de disolución:



Y la reacción catódica de reducción de oxígeno:



Los productos de ambas reacciones seguramente se unirán para formar una capa compacta de  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  de acuerdo con:



La formación del óxido compacto se debe a la precipitación conjunta de plaquitas de  $\text{ZnO}$  o de  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , paralelas a la superficie anódica sobre el óxido en forma de red subyacente, las condiciones estáticas de la gota favorecen esta precipitación.

Una vez que los cationes metálicos han pasado al líquido, el paso de precipitación depende del grado de saturación de esos iones en la capa de electrolito inmediatamente sobre el área anódica. Si hay un gran número de iones disueltos incluso puede desarrollarse una red tridimensional.

La capa pasiva varía de acuerdo a la microestructura del material que le da origen, siendo un factor de esto la distancia que separa a las zonas de óxido más grueso (zonas ricas en zinc) que son las que forman el óxido que tiende a “soldarse” con las capas de óxido vecinas y en algunas ocasiones si la distancia es pequeña puede cubrir zonas con óxido de aluminio formando una capa compacta de acuerdo al método antes mencionado. La microestructura con una mayor ganancia

de peso antes de estabilizarse fue la que le proporciona las características de súper plasticidad, la de granos fino al tener una mayor área en exposición, indicando que su capa de protección es mayor espesor y la que la estructura de fundición es la que tiene una menor ganancia de peso y una capa protectora de menor espesor.

Una vez que se agrego el cobre a este tipo de aleaciones comenzó una nueva etapa de estudios sobre la corrosión de la nueva aleación, como se había dicho anteriormente (G. Torres, 1988) la adición de cobre a las aleaciones zinc aluminio aumento sus propiedades mecánicas, y de acuerdo con algunos autores (M. J. Stewart, 1973 y Dollar D.,1972), el cobre en pequeñas cantidades (menores al 0.5%) aumenta la resistencia a la corrosión intergranular de la aleación binaria eutectoide de Zn-Al.

Otro estudio que corrobora el mecanismo de corrosión anterior pero ahora en la aleación de Zn-77% p- Al-21% p - Cu-2% p es aquel en el cual se somete a oxidación térmica previa preparación, dicha aleación (L. Valdez, 1984) en la cual se exponen a alta temperatura muestra el crecimiento de una capa de óxido delgado y compacto de manera casi inmediata (4 a 7 min.) en condiciones de 300° C en un horno de atmósfera libre, cubriendo totalmente la superficie a los 10 minutos, el engrosamiento del óxido sigue un comportamiento parabólico y es apreciable el grosor a los 40 minutos, obteniendo una capa de óxido de color agradable, con buen brillo y apariencia.

Una segunda parte de este estudio hace mención de una exposición atmosférica al sur de la ciudad de México en la cual se exponen las probetas con tratamientos de 2 y 4 horas en horno observándose dos etapas en la construcción de las graficas de gravimetría, la primera una ganancia de peso y la segunda con una ligera pérdida de peso, proponiendo nuevamente el doble mecanismo de corrosión observado y propuesto por L. Hernández en 1981.

Los estudios sobre corrosión de las aleaciones de zinc continúan para caracterizar el comportamiento de esta aleación en diversos medios corrosivos como el análisis de la superficie en corrosión ambiental de la aleación zinc (Zn-22Al-2Cu) en la cual exponen a una atmósfera controlada para observar el desarrollo del óxido en la superficie del metal (Guerrero R. 2002) así como el comportamiento de la aleación de zinc al tratar de crear una capa pasiva al exponer el material en gas flúor teniendo la experiencia de el comportamiento de este tratamiento de pasivación en una aleación binaria como el zinc (Elizalde T. 1995) además de explorar nuevas aplicaciones a este material del cual poco a poco se encontraran nuevos usos y aplicaciones.

Un estudio en el cual se identificaron las posibles reacciones y productos de corrosión al exponer al zinc a una solución de cloruro sodio por periodos de 1, 3 y 5 días de inmersión en dicha solución, determinando las cantidades adheridas de productos de corrosión por medio de la integración de la corriente de reducción estableciendo así las posibles reacciones y cantidad de corrosión (Genescá J. 1994).

#### 4 Procesos de transformación del zinc.

Los procesos de transformación a los que puede ser sometido el zinc han sido estudiados en una cooperación de la UNAM con la industria privada (G. Torres, 1988), dentro de estos procesos transformación se encuentran:

##### 4.1 Fundición.

El bajo punto de fusión permite la utilización de procesos de fundición por gravedad en molde de arena sin la necesidad de utilizar fundentes, escoriadores o desgasificantes, en el caso de fundición en molde permanente se utilizan moldes convencionales de hierro colado o acero, pudiéndose utilizar un desmoldante comercial para zinc o en su defecto petróleo para desmoldar la pieza.

## 4.2 Inyección.

El zinalco es un material con resistencia similar a la del acero a bajo carbono, que con su bajo punto de fusión y su elevada fluidez se puede inyectar a baja presión en maquinas de cámara fría siguiendo procedimientos similares a los utilizados para aleaciones de aluminio y zinc, el acabado en la elaboración de piezas por este método es bueno y evita maquinados posteriores en piezas elaboradas, reduciéndolos a un simple rebabeo y calibrado.

## 4.3 Extrusión.

La extrusión directa en este material ha mostrado algunos problemas relacionados con la fricción en la extrusión de perfiles ligeros, lo que ocasiona que se requieran presiones muy altas de trabajo poniendo en peligro la seguridad del equipo de trabajo, por lo que se realizaron algunos estudios sobre la posibilidad de realizar la extrusión inversa (J. Negrete, 1988) obteniendo los parámetros óptimos de temperatura, velocidad lubricante y tipo de dado a utilizar, quedando el diseño del proceso mas económico y con mejores resultados tanto en propiedades mecánicas como en acabado.

## 4.4 Forjado.

Lo procesos de forja aplicables al zinalco son los de dado abierto y dado cerrado obteniendo piezas de buena calidad, con temperaturas relativamente bajas, el rebabeo con troquel produce superficies de corte lisas sin desgarramientos del material, la combinación de este proceso con la extrusión, permite la fabricación en frío de diversas piezas, partiendo de una barra redonda, cuadrada o hexagonal.

## 4.5 Laminación.

La lámina de zinalco se produce por procesos convencionales de reducción del espesor, siendo los desbastes fuertes en caliente y la calibración en frío. Las principales cualidades que muestra la laminación del zinalco es su resistencia a la corrosión, así como la capacidad de deformación pues se trata de una aleación superplástica, buena adherencia a la pintura (electroestática, epoxy, etc.) y su alta resistencia mecánica.

#### 4.6 Trefilado.

La producción de alambre de zinalco partiendo de una barra extruida, constituye otro logro tecnológico, ya que por su resistencia mecánica rigidez y alta resistencia a la corrosión lo hacen apto para múltiples aplicaciones, esta presentación lo hace apto para la fabricación de tornillos remaches etc., de pequeñas dimensiones donde la resistencia a la corrosión es un factor importante.

#### 4.7 Termoformado.

Con la estructura granular fina (menos de 10 micrómetros) esta aleación tiene la característica de un comportamiento superplástico, permitiendo que el material se pueda deformar fácilmente al alcanzar la mitad de su temperatura absoluta de fusión (en grados Kelvin), con este hecho se sugiere el uso de los procedimientos del termoformado puedan ser usados para el conformado este material. Las técnicas del termoformado permiten el uso de la presión atmosférica y vacío al utilizar láminas de un grosor igual o menor a 1 mm o presiones de hasta 20 atmósferas para materiales más gruesos.

Las ventajas de este proceso es la eliminación de las costosas maquinas hidráulicas o mecánicas, las piezas de forma compleja pueden ser fabricadas de una sola operación evitando etapas sucesivas de ensamblado y soldadura, el costo de las matrices es bajo ya que no tiene desgaste por golpes u otra clase de esfuerzos.

Una desventaja del proceso, es la baja productividad de piezas por unidad de tiempo, dado que los tiempos involucrados por cada pieza son del orden de minutos y otro problema crítico que se presenta en el conformado superplástico es la cavitación, o sea la formación de huecos dentro del material al sobrepasar 500% de deformación. Estos huecos debilitan el material, en algunos casos se ha podido eliminar la cavitación utilizando presión hidrostática.

## 5 Maquinado.

El zinalco presenta excelente comportamiento en todas las operaciones de maquinado (fresado, taladrado, torneado, rimado y roscado) dependiendo de la velocidad de maquinado y magnitud del desgaste se produce una rebaba corta como la del latón, o una larga en forma de viruta como con el acero y sin producir atascamiento como con el aluminio.

## 6 Acabados.

### 6.1 Limpieza.

Como en todos los metales antes de proceder a tener un buen acabado superficial, es necesario remover todas las impurezas depositadas mediante la acción de un proceso de desengrase. En el caso del zinalco debe utilizarse un desengrasante de muy baja alcalinidad, utilizado por inmersión para la remoción de grasas de los tradicionales sellos crómicos.

### 6.2 Pulido.

El pulido puede darse mecánicamente con pastas a base de ceras y abrasivos ligeros aplicados con mantas de algodón.



### 6.3 Recubrimientos.

#### 6.3.1 Pintura.

Puede utilizarse pintura electrostática en polvo, elaborada con resinas sintéticas del tipo termo fijo seco al 100% sólido sintetizable. Esta pintura es biodegradable sin uso de algún solvente, no contaminante y cuya película es del tipo duroplástica con una dureza Erichsen y flexible al mismo tiempo, su elongación al efecto del mandril cónico es de 28 -32%, con resistencia al impacto de 140-160 lb-plg. Resistente a la acción de ácidos diluidos, acetonas y álcalis, resistente a la intemperie y a la exposición en cámara salina de acuerdo a la norma B-117.

Las pinturas, lacas automotivas y resinas epoxy, horneables o de secado rápido a la intemperie, proporcionan acabados adecuados a diversas aplicaciones específicas.

#### 6.3.2 Pavonado.

Otros medios de recubrimiento probados en el zinalco han sido el pavonado o zinaldic, este es un proceso que consiste en aplicar un cobrizado después del desengrasado como base para posteriores recubrimientos como cromado, latonado, niquelado y cobrizado. El zinaldic tiene una apariencia negra como el del pavonado.

### 7 Características del las aleaciones zinc-aluminio-cobre.

Las características del las aleaciones zinc-aluminio-cobre varían dependiendo de los diferentes porcentajes de los aleantes, la siguiente tabla muestra las características de 2 tipos de aleaciones que se vendieron comercialmente, estas pueden variar de las encontradas en la literatura o en artículos de investigación, esta variación se debe a el método de preparación de la aleación, la pureza de los

componentes, manufactura posterior a la fundición, como se vio en los estudios de Hallen J. (1994), las impurezas de otros materiales como el Fe en forma de  $FeAl_3$ , disminuye sus propiedades mecánicas, haciendo esta aleación frágil dependiendo de la cantidad de impurezas.

Con las características mencionadas y su resistencia a la corrosión hacen de las aleaciones de zinalco un material muy prometedor para la industria y una gran aplicación de las materias primas nacionales.

Las principales propiedades del zinalco comercial en comparación con otros materiales comerciales se pueden ver en las tablas del anexo d.

Material	Zinalco 1				Zinalco 2	
Propiedad						
Proceso	FA	FP	Extruido	Laminado	FA	FP
Densidad ( $gr/cm^3$ )	5.4				5.4	
Temperatura de fusión ( $^{\circ}C$ )	421-481				421-481	
Coef. de expansión térmica ( $\mu m m^{-1} K^{-1}$ )	26				26	
Conductividad térmica ( $W m^{-1} K^{-1}$ )	126				126	
Conductividad eléctrica (%I. A. C. S.)	38				38	
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	300-310	350-390	400-420
Esfuerzo de cedencia al 0.2% (MPa)	280-300	290-310	280-320	270-290	260-270	340-370
Modulo de elasticidad (GPa)	110-130				110-130	
% de deformación en tensión	3-5	8-10	30-35	80-100	5-7	6-10
Dureza Rb (BRINELL 500-10-305)	50-56	60-65	40-55	25-30	65-80	55-70
Resistencia al impacto (J)	2-3 (2)	2-3 (2)	50-55 (1)	8-9 (2)	2-3 (2)	2-3 (2)

FA= Fundición en arena

FP= Fundición a presión

MP= Molde permanente

Cuadro 7 Propiedades del zinalco comercial (fuente catalogo de zinalco industrial S. A. de C. V. IUSA)

## CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 1 Exposición atmosférica.

Para la exposición atmosférica de las probetas de la aleación Zn-21%wtAl 2-wt%Cu se realizaron los procedimientos que a continuación se describen:

#### 1.1 Construcción de los bastidores para exposición.

La construcción de los bastidores se basó en la norma ASTM G 50 “Practica Estándar para Conducir Pruebas de Corrosión Atmosférica en Metales” fabricándolo de aluminio 5052 para evitar el deterioro de estos durante el periodo de exposición de los metales, dicho bastidor consta de dos secciones, la base y el marco o cuadro.

##### 1.1.1 Características de la base.

Para proporcionar la suficiente rigidez a la base se utilizó un perfil de aluminio de forma T para su construcción, esta se formó de las partes mencionadas en el cuadro 8.

Pieza	Cantidad	Dimensiones
Pierna delantera	2	0.8567 m
Pierna trasera	2	1.7699 m
Largueros frontales	2	1.0366 m
Largueros laterales	2	1.3783 m

Cuadro 8 Piezas utilizadas en la base del bastidor.

Las dimensiones se calcularon para que el marco tenga un ángulo de exposición de 30 grados como lo recomienda la norma ASTM G-50 en su punto 5.6 “Base y marco de exposición”.

La unión de las piezas de las bases marcos y soportes en L se hizo mediante tornillos, tuercas y rondanas de acero inoxidable.

La parte del marco o cuadro se fabrico de aluminio 5052, para el marco se utilizo una canaleta en U y para los soportes de las probetas se uso un perfil en L con las dimensiones y cantidades mencionadas en el cuadro 9.

Pieza	Cantidad	Espesor	Dimensiones(mm)
Canaleta corta	2	Estándar	1036
Canaleta larga	2	Estándar	1835
Soportes en L	16	Estándar	1028

Cuadro 9 Piezas utilizadas en el marco del bastidor y aisladores.

Los planos del bastidor se podrán consultar en el anexo b. El bastidor cumple con los requerimientos de la norma ASTM G-50.

#### 1.1.2 Construcción de sujetadores o porta muestras.

Para el diseño de los porta probetas se tomaron en cuenta 2 normas: ASTM G-50 en su punto 8.1 el cual indica que se deben usar unos aisladores para colocar las probetas en el bastidor de modo que no exista contacto eléctrico con otras probetas o el bastidor durante la exposición.

Y la norma ASTM G-31 “Practica Estándar para Pruebas de Corrosión por Inmersión de Metales en Laboratorio” en su punto 8.10 método de soporte de especímenes; da algunas indicaciones que se consideraron importantes y a tomar en cuenta tales como:

8.10.1 El dispositivo de soporte y el contenedor no deben ser afectados por o ser causa de contaminación de la solución de la prueba; en nuestro caso los contaminantes atmosféricos.

8.10.2 El método de soporte de los especímenes deberá variar con el aparato utilizado para conducir la prueba, pero deberá ser diseñado para aislar el espécimen unos de otros física y eléctricamente y aislar al espécimen de cualquier contenedor metálico o dispositivo de soporte usado con el aparato.

8.10.3 La forma del aislador y de los especímenes de prueba deberá asegurar un libre contacto del espécimen con la solución corrosiva, en este caso la atmósfera.

8.10.4 Algunos soportes comunes son de vidrio, barras cerámicas, montajes de vidrio, ganchos de vidrio y varios aisladores o soportes metálicos con cubiertas.

De estos puntos se decidió utilizar el acrílico pues no reacciona con el metal a exponer y también es un buen aislante eléctrico.

Para el caso de esta aleación y debido a que el material del que se disponía para la fabricación de las probetas no cubrían las medidas sugeridas por los estándares y el medio de sujeción habitual quitaría gran parte de la superficie de exposición, por lo que se decidió fabricar unos sujetadores especiales de acrílico que permitirían una máxima área de exposición sin tener riesgo de crear pares galvánicos, ni estancamientos de líquidos pluviales.

Estos porta probetas se pueden colocar en los soportes del bastidor directamente por medio de tornillos especiales (acero inoxidable) o grapas de plástico.

Los sujetadores o porta muestras se componen de tres piezas que son: una base cuadrada de acrílico y dos cubos con un desbaste de 2mm X 2mm en una de sus aristas, estos cubos se unieron entre si con un tornillo de acero inoxidable; el conjunto de los tres elementos (dos cubos y el tornillo) formaron una pequeña prensa y esta a su vez se fijo a la base de acrílico, por medio de dos pijas, y todo el conjunto del porta muestra se fijo al bastidor por medio de un tornillo de acero inoxidable.

Las piezas de acrílico que conforman cada porta muestra tienen las dimensiones mostradas en el cuadro 10.

Pieza	Cantidad	Alto (mm)	Largo (mm)	Ancho ( mm)
Base	1	55	70	3
Cubo con cuerda	1	20	18	18
Cubo sin cuerda	1	20	18	18

Cuadro 10 Piezas utilizadas en los porta muestra.

Los tornillos necesarios y sus características para cada porta muestra se enlistan en el cuadro número 11.

Pieza	Cantidad	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Cabeza
Tornillo de acero inox.	1	6.35	76.2	Gota
Pija de sujeción	2	2.9	12.7	Gota
Tornillo de acero inox.	1	6.35	25.4	Hexagonal
Tuerca de acero inox.	1	Para tornillo de 6.35 mm de diámetro		
Rondana plana	1	Para tornillo de 6.35 mm de diámetro		

Cuadro 11 Características de los tornillos usados por cada porta muestra.

Todos los tornillos usados son de cuerda estándar, por conveniencia en el uso de herramienta y facilidad de en la adquisición de los materiales.

Los planos de los porta muestra se podrán consultar en el anexo b.

## 1.2 Características de los sitios de prueba seleccionados.

Los sitios de prueba fueron establecidos en tres puntos con clasificación de ambiente urbano, industrial y rural para estimar cual es el efecto de estos ambientes en la aleación Zn-21%wtAl 2-wt%Cu.

La clasificación de los centros de exposición se escogieron de acuerdo a sus características ambientales y a el tipo de monitoreo ambiental con el que cuenta el

SIMAT (Sistema de Monitoreo atmosférico), de la Ciudad de México, que de acuerdo a sus estudios realizados sobre contaminantes y datos meteorológicos, coinciden con las atmósferas típicas a las cuales se realizan los estudios de corrosión atmosférica.

Dentro de los datos que refieren a la contaminación atmosférica se encuentran el Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los Cloruros (Cl<sup>-</sup>) que serían los que podrían atacar mas severamente al metal en estudio.

De los puntos propuestos por el SIMAT para la exposición de las probetas se eligieron los siguientes tres mostrados en el cuadro 12.

Centro de Monitoreo	Zona	Tipo	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
Merced	CE	Urbano	19°25' 27.792"	99° 07' 09.397"
Xalostoc	NE	Industrial	19° 31 39.893	99° 04' 35.201"
Villa de las flores	NE	Rural o suburbano	19° 39' 27.617"	99° 05' 46.704"

Cuadro 12 Ubicación de los puntos de exposición.

Los cuales tienen sus direcciones en:

#### 1.2.1 Centro de monitoreo Merced.

Ubicación: Centro de Salud "Luís E. Ruiz".

Dirección: Avenida Congreso de la Unión No. 148, Colonia Merced Balbuena, Delegación Venustiano Carranza, México D. F. C. P. 15860.

Localización del bastidor: La Estación de Monitoreo (EM) y el bastidor se localizan en la azotea del Centro de Salud (inmueble de un nivel de construcción).

Entorno:

El Centro de Salud "Luís E. Ruiz" se encuentra en un área urbana, principalmente habitacional y comercial con escuelas de educación básica, canchas deportivas y parques con vegetación de temporal. Se ubica sobre la Avenida Congreso de la Unión que presenta circulación en ambos sentidos y flujo vehicular alto de autos particulares, servicio de transporte público y vehículos automotores de diversa clase, a 200 m al sureste de la EM se encuentran los campos de tiro de la policía.

Parámetros de monitoreo:

Red automática de monitoreo: SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>.

Red manual: PST, PM<sub>10</sub>, Pb, PM<sub>2.5</sub>.

Red meteorológica: TMP, HR, VV, DV, UVA, UVB.

Red depósito atmosférico: Ninguno.

#### 1.2.2 Centro de monitoreo Xalostoc.

Ubicación: Distribuidora Volkswagen (VW) "Santa Clara".

Dirección: Km. 13.5 de la antigua carretera a Pachuca (Vía Morelos) y Calle del Hierro, Colonia Xalostoc, Municipio Ecatepec de Morelos, Estado de México, C. P. 55540.

Localización: La estación de monitoreo se localiza al nivel de piso dentro de las instalaciones de la distribuidora VW, en medio de las instalaciones del servicio de lavado y del servicio de pintura, el bastidor se localiza en la azotea de una escuela primaria de dos niveles sobre la Calle Oro en la parte noreste de la distribuidora de autos.

Entorno:



La distribuidora Volkswagen "Santa Clara" se encuentran en un área principalmente industrial y habitacional. Se ubica sobre la antigua carretera México-Pachuca, ahora llamada "Vía Morelos" esquina con la Calle Oro, la Vía Morelos presenta circulación en ambos sentidos con flujo vehicular alto de autos particulares, camiones de carga, autobuses a diesel, microbuses y taxis; la Calle Oro presenta circulación en un solo sentido con flujo vehicular moderado de camiones de carga, servicio de transporte público y vehículos automotores de diversa clase.

A 20 m al este de la estación de monitoreo se encuentra el área del taller mecánico, a 40 m al sureste se encuentra una industria jabonera, a menos de 100 m de este a sur, se encuentra una zona industrial (químicas, del vestido, de consumo alimenticio y de productos metálicos y de madera). A 3 m al norte de la estación de monitoreo en la Calle Oro, se encuentran jardineras con escasa cubierta vegetal de temporal.

Parámetros de monitoreo:

Red automática de monitoreo: SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>.

Red manual: PST, PM<sub>10</sub>, Pb.

Red meteorológica: TMP, HR, VV, DV.

Red depósito atmosférico: pH, DT, DH, DS, CE, Cationes y Aniones.

1.2.3 Centro de monitoreo Villa de las flores.

Ubicación: Escuela Primaria del Estado de México "Lic. Benito Juárez García".

Dirección: Calle Primavera y Calle Palma Cristi s/n, Colonia Villa de las Flores, Municipio Coacalco, Estado de México, C. P. 55710.

Localización: La estación de monitoreo se localiza a nivel del piso en la parte posterior de los edificios de la escuela, al sur del patio de la escuela y al oeste de una calle poco transitada, el bastidor se colocó en la azotea de la escuela de 2 niveles.

Entorno:

La escuela primaria "Lic. Benito Juárez García", se encuentra en un área suburbana, principalmente habitacional con algunos comercios y servicios. Se ubica sobre la Calle Primavera y Calle Palma Cristi, ambas vialidades presentan circulación en un sentido y flujo vehicular bajo de autos particulares, servicio de transporte público y vehículos automotores de diversa clase.

A 5 m al sur de la estación de monitoreo se localizan 2 tanques de gas LP, a 20 m al suroeste se encuentra un parque con cubierta vegetal de temporal; a 27 m al norte de la EM se encuentran los contenedores de basura de la escuela. A 200 m al este se encuentra el Boulevard Coacalco que presenta flujo vehicular moderado de autos particulares, microbuses, pick-up y taxis. A 250 m al oeste de la estación de monitoreo se encuentra una zona donde se construye una área habitacional.

Parámetros de monitoreo:

Red automática de monitoreo: SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>.

Red manual: Ninguno.

Red meteorológica: TMP, HR, VV, DV.

Red depósito atmosférico: Ninguno.

Se solicitó saber los parámetros de las zonas donde se colocaron los bastidores para corroborar que corresponden a los sitios en los que se deseaba hacer la exposición de las probetas.

Lo anterior esta de acuerdo a la norma ASTM G-50 en su punto 4 “Sitios de Prueba” subíndice 1, el cual nos indica que las locaciones serán escogidas de un número de locaciones de ambientes atmosféricos donde la aleación o metal podrá ser usado. La selección deberá incluir sitios típicos de atmósferas urbana, industrial, rural y marina.

### 1.3 Colocación y orientación de los bastidores.

La colocación de los bastidores se realizo en lugares claros, bien drenados, de tal forma que los especímenes se sujeten a los efectos totales de la atmósfera del sitio de la prueba. Las sombras de los árboles edificios y/o estructuras no interferirán con los especímenes.

La orientación de los bastidores fue hecha como en la mayoría de los estudios de corrosión atmosférica de metales que se han reportado basados en un ángulo de 30° y orientados hacia el sur para lograr una exposición máxima al sol. Lo anterior esta de acuerdo con las sugerencias en a norma ASTM G 50 en su puntos 4.2 y 5.6 pertenecientes a las secciones “Sitios de Prueba” y “Marco y Estante de Exposición” respectivamente.

### 1.4 Fabricación de los especímenes de prueba.

Los especímenes de prueba se obtuvieron de una placa irregular de Zn-21%wt Al-2wt% Cu de dimensiones aproximadas 88.9 mm de alto por 450.5 mm de largo por 1.68 mm de espesor, de esta placa se consiguieron 16 probetas, a través de corte con cizalla y posterior maquinado, previniendo el sobrecalentamiento del metal con liquido refrigerante (aceite soluble) para evitar modificar la estructura con una elevada temperatura de corte al maquinar el perímetro, la identificación se realizo por medio de un rayador para metal con punta de carburo de tuxteno.

Se obtuvieron de dicho material los especímenes, de dimensiones 36.53 mm de largo, 75.08 mm de alto y 1.68 mm de espesor en promedio, de las cuales se colocaron 15, divididos en 3 grupos de 5 en los diversos bastidores y se guardo uno y sobrantes como testigos; la selección de las probetas a ser expuestas en los bastidores se hizo utilizando una tabla de números aleatorios para asegurar que la exposición se hiciera al azar.

#### 1.5 Preparación de las probetas para la exposición ambiental.

Las probetas a ser expuestas a condiciones atmosféricas recibieron la siguiente preparación antes de iniciar la exposición atmosférica en los bastidores.

##### 1.5.1 Identificación de las probetas.

Se realizó la identificación de los especímenes a ser expuestos de acuerdo con el tipo de material y los ambientes a los cuales serán expuestos, como la aleación Zn-21%wtAl 2-wt%Cu ha mostrado poseer una resistencia aceptable en laboratorio se decidió marcar las diferentes probetas por medio de un rayador para metales con punta de tuxteno proporcionándoles una numeración consecutiva.

##### 1.5.2 Limpieza de probetas.

Como el objetivo es establecer el grado de corrosión por exposición atmosférica en 3 diversos ambientes, se desea que el material se encuentre en la forma mas cercana a las condiciones de trabajo de este en los ambientes de exposición, por lo que no será sometido a una limpieza que destruya o afecte la capa pasiva del material, debido a que esta ya existirá cuando el material se encuentre en forma de alguna aplicación estructural; la limpieza se efectuó realizando un lavado con un detergente para quitar excesos de grasa y polvo, seguida de lavados al metal con alcohol etílico y posteriormente con acetona, ambos grado reactivo, para asegurar que este libre de grasas, posteriormente se dejaron en un desecador por

un periodo de 24 horas para evitar cualquier rastro de humedad que pudiera afectar el siguiente paso.

#### 1.5.3 Registro de pesos y medidas.

Se registraron las medidas con un micrómetro de puntas intercambiables marca Starrett modelo No.224 Set AA con un rango de 0 a 4 pulgadas y el peso de cada probeta con una balanza analítica SAUTER modelo D-7470 para su posterior colocación en bolsas plásticas para transporte a las zonas de exposición.

#### 1.5.4 Registro fotográfico de las probetas antes de exposición.

Debido a que algunas de las probetas presentaban ligeras irregularidades en la superficie, se decidió fotografiar todas las probetas antes de la exposición para mantener un registro visual de cómo pudiera evolucionar la corrosión en la superficie de estas, el registro se realizó mediante una cámara digital fuji film 5500 a una resolución de 6 mega píxeles, manteniendo estos en reserva para futura consulta.

Los anteriores puntos estarán respaldados por la norma ASTM G 50 "Practica Estándar para Conducir Pruebas de Corrosión Atmosférica en Metales" en su sección 7 "Preparación de los Especímenes de Prueba", la norma ASTM G-1 en su sección 6 "Métodos para Preparar Especímenes para Prueba".y con la norma ASTM G-33 "Practica Estándar para el Registro de Datos de Pruebas de Corrosión Atmosféricas de Especímenes de Acero con Recubrimiento" en su sección 4 "Datos a Ser Registrados Antes de la Prueba".

#### 1.6 Colocación de las probetas en los sitios de exposición.

La colocación de las probetas en los bastidores fue hecha de tal manera que no existiera ningún contacto de la probeta con otro material que no fuera el acrílico

del porta probeta, con la finalidad de evitar cualquier tipo de par galvánico con el bastidor o cualquier otra probeta.

Se establecieron lugares específicos en los bastidores para los diversos materiales que serían expuestos a condiciones atmosféricas en las tres zonas determinadas, evitando algún tipo de escurrimiento de líquidos pluviales entre las probetas y/o productos de corrosión que se desprendan de las probetas, quedando asignados para el zinalco los aisladores del bastidor 10 y 11.

En la colocación de las probetas tanto en los porta probeta como en la colocación de estos en los aisladores del bastidor, se utilizaron guantes de látex para evitar dejar rastros de grasa digital que pudieran afectar la corrosión en la superficie del material y mantener el peso constante en las muestras.

Se estableció un registro de la posición de cada espécimen en los aisladores del bastidor para futuras referencias así como el registro de la fecha y hora de la colocación.

#### 1.7 Recolección de datos de probetas durante la exposición.

Como se recomienda en la norma ASTM G 33 en su sección 5 “Datos a Ser Registrados Durante las Inspecciones de Campo”. Se realizaron inspecciones periódicas, registrando por medio fotográfico la evolución de la prueba, las inspecciones empezaron a los 14 días de iniciada la exposición, y continuaron cada 7 días durante los primeros 6 meses; después de este periodo se dejó de revisar las probetas debido a que no mostraron un cambio evidente en la superficie del material, debido a que el tiempo de lluvia había terminado.

Las anotaciones de este registro se guardaron para futuras referencias.

### 1.8 Levantamiento de las probetas.

La recolección de probetas se hizo una vez cumplido el periodo preestablecido de exposición teniendo cuidado de no perturbar las superficies de la probeta, para evitar cualquier pérdida de productos de corrosión y depósitos sólidos. Nuevamente se utilizaron guantes de látex para evitar dejar rastros de grasa digital que pudieran afectar los productos de corrosión en la superficie del material y/o aumentar el peso de las probetas expuestas.

Las probetas se guardaron en cajas petri para evitar pérdida de productos de corrosión y partículas depositadas sobre la superficie durante su traslado al laboratorio.

Se tomaron fotografías del estado de las probetas antes de retirarlas del bastidor como se recomienda en la norma ASTM G-33 en su sección 6 “Datos a Ser Registrados Cuando las Muestras son Retiradas en la Conclusión de la Prueba”.

### 1.9 Registro el peso de las probetas después de exposición.

Se registra el peso de las probetas con los productos de corrosión en las cajas petri, que previamente habían sido pesadas, obteniendo el peso de las probetas restando el peso de la caja vacía del peso de la caja con la probeta, registrándolos para su posterior evaluación.

### 1.10 Limpieza después de exposición atmosférica.

La limpieza se llevo a cabo siguiendo las indicaciones de la norma G 1-90 sección 7 “Métodos para Limpieza Después de la Prueba” utilizando el medio químico para la remoción de los productos de corrosión.

Se hizo esta selección debido a que los métodos mecánicos y electrolíticos no eran viables en el momento de hacer la limpieza.

Para la limpieza por productos químicos se prepararon las soluciones de la sección C.9 del anexo 1 de la norma ASTM G 1-90 especificadas para zinc y aleaciones base zinc.

Las sustancias que se utilizaron fueron las siguientes:

Sustancia	Componentes	Formula	Cantidades	Tiempo	Temperatura	Notas
C.9.1	Hidróxido de amonio	NH <sub>4</sub> OH	150 ml	15 a 20 s	Ebullición	1
	Agua	H <sub>2</sub> O	s. p. h. 1l			
	Tritóxido de cromo	CrO <sub>3</sub>	50 gr.			
	Nitrato de plata	AgNO <sub>3</sub>	10 gr.			
C.9.2	Cloruro de amonio	NH <sub>4</sub> Cl	100 gr.	2 a 5 min	70°C	
	Agua	H <sub>2</sub> O	s. p. h. 1l			
C.9.3	Trióxido de cromo	CrO <sub>3</sub>	200 gr.	1 min.	80°C	2
	Agua	H <sub>2</sub> O	s. p. h. 1l			
C.9.5	Persulfato de amonio	((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	100 gr.	5 min.	20 a 25°C	3
	Agua	H <sub>2</sub> O	s. p. h. 1l			
C.9.6	Acetato de amonio	(CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> )	100 gr.	2 a 5 min	70°C	
	Agua	H <sub>2</sub> O	s. p. h. 1l			

- 1) El nitrato de plata debe de ser disuelto en agua y adicionarlo al ácido crómico hirviendo para prevenir la excesiva cristalización del cromato de plata. El ácido crómico debe estar libre de sulfatos para prevenir el ataque al metal base.
- 2) La contaminación por los cloruros de los productos de corrosión formados en ambientes salinos en el ácido crómico se debe evitar para prevenir el ataque al metal base del zinc.
- 3) Particularmente recomendado para aceros galvanizados.

Cuadro 13 Sustancias utilizadas en la limpieza química según norma ASTM G-1.

### 1.10.1 Ejemplo del procedimiento de limpieza de los productos de corrosión.

Un ejemplo del procedimiento de limpieza de los productos de corrosión con las sustancias químicas es el listado a continuación:



Sustancia C.9.1.

a) Se colocó la sustancia en un vaso de precipitado, cuidando que el volumen pudiera cubrir la probeta cuando este en el vaso.

b) Se colocó con unas pinzas la probeta dentro del líquido, cuidando que las pinzas sean de un metal que no reaccioné con los líquidos ni con el material a limpiar, en este caso el zinalco.

c) Dejar transcurrir el tiempo requerido por la norma para que los productos de corrosión se desprendan, se agitó la sustancia por medio de una varilla de vidrio para que la reacción de la sustancia con los productos de corrosión de la superficie de la probeta fuera máxima.

d) Se extrajo la probeta del vaso de precipitado con las pinzas, se enjuagó con agua destilada y se cepilló ligeramente con una brocha de cerdas naturales, para remover los productos de corrosión que estuvieran ligeramente adheridos y así evitar algún tipo de raspadura y/o pérdida de material.

e) Se secó el material con aire a presión sobre una toalla de papel para evitar que se oxidará con los residuos de agua.

f) Se guardó por un período de 24 horas en un desecador para eliminar rastros de humedad.

d) Se registró el peso de la probeta y el aspecto de la superficie de la probeta para futura referencia y análisis de pérdida de peso.

El procedimiento es básicamente el mismo en las demás sustancias con excepción de C.9.2, C.9.3 y C.9.6 las cuales la sustancia deberá de llevarse a una

temperatura de 70, 80 y 70° C respectivamente, antes de introducir la probeta a limpiar; para llevar a esa temperatura se utilizó una parrilla eléctrica con agitador magnético marca THERMOLYNE modelo SP-A1025B y una mosca así como un termómetro de mercurio para verificar la temperatura.

Nota:

Se deben aplicar todas las precauciones respecto a las condiciones de seguridad usando el equipo de protección necesario al hacer la limpieza con las soluciones químicas ya que estas pueden resultar peligrosas a la salud, como ejemplo tenemos la sustancia 1 el componente Hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) que daña fundamentalmente el tracto respiratorio superior y ocasiona lesiones similares a las producidas por los cáusticos alcalinos tipo lejía. Produce edema de glotis. También produce lesión térmica a consecuencia de las elevadas temperaturas alcanzadas. Estas lesiones van desde el eritema y edema de las mucosas, hasta quemaduras de todas las capas del tracto respiratorio. Las quemaduras conducen a una necrosis por licuefacción de los tejidos y a una agresión química más profunda.<sup>1</sup>

#### 1.11 Establecer el grado de corrosión.

Para establecer el grado de afectación por la corrosión atmosférica de las probetas se decidió utilizar el método del porcentaje de pérdida de peso, se analizaron las pérdidas de peso después de cada lavado.

Se realizaron otros estudios para estimar el grado de afectación mostrado por las probetas al ser expuestas al ambiente atmosférico, para tratar de relacionar el grado de corrosión con el cambio en las propiedades sufridas por el material, estos estudios fueron los siguientes:

#### 1.12 Estudios no destructivos.

##### 1.12.1 Difracción de rayos X.

Este estudio, tuvo la finalidad de establecer los posibles productos de corrosión formados en la superficie del metal, al ser sometido a las distintas atmósferas consideradas en el estudio y su comparación con la muestra testigo.

---

(1) Información tomada de la página <http://www.estrucplan.com.ar> referente a toxicología del amoníaco.

Para la realización de esta prueba se utilizó el difractómetro SIMENS modelo 5000 K  $\alpha$  con un emisor de cobre a una longitud de onda  $\lambda = 1.546 \text{ \AA}$  con monocromador de grafito que se localiza en la Facultad de Química de la UNAM.

#### 1.12.2 Microscopia de barrido electrónico.

El estudio de microscopia de las superficies, se realizó para observar la superficie del zinc antes de los lavados con las sustancias recomendadas por la norma ASTM G-1, observando las incrustaciones y productos de corrosión así como considerar si existía algún dato que estableciera alguna relevancia en el comportamiento del material.

Para este estudio se utilizó un microscopio de barrido electrónico modelo JEOL JSM-25S II Scanning Microscope, las fotografías se tomaron mediante una cámara Kodak de 35 mm, con la técnica de apertura prolongada del diafragma del obturador.

#### 1.12.3 Pruebas de dureza.

La prueba de dureza se realizó con un probador de la dureza digital Mitutoyo modelo 94014201, usando la escala Rockwell B con la aplicación de 100 Kg. y una punta de bola de 1/16 de diámetro, de acuerdo con las tablas proporcionadas por los fabricantes del probador de la dureza. Se realizaron 12 pruebas por probeta, 6 por cada lado y se determinó si hay diferencia significativa entre: las tres estaciones y las tres estaciones con la probeta testigo, la que no fue expuesta, esta comparación se realizó por medio de sistemas estadísticos.

#### 1.12.4 Evaluación de las probetas para detección de picaduras por corrosión atmosférica.

Se decidió realizar una evaluación de las probetas para la detección de posibles picaduras resultantes de la corrosión atmosférica, según la norma ASTM G-46 “Guía Estándar para la Examinación y Evaluación de la Corrosión por Picaduras”; esta guía intenta asistir en la selección de procedimientos que pueden ser usados en la identificación, examinación de picaduras así como en la evaluación de la corrosión por picaduras para determinar la extensión y el efecto de estas.

#### 1.12.5 Examinación e identificación de las picaduras.

##### 1.12.5.1 Inspección visual.

Una inspección visual de la superficie metálica corroída es usualmente benéfica y deberá ser hecha bajo luz ordinaria con o sin uso de un lente de baja aumento, para determinar la extensión y aparente localización de las picaduras.

Se fotografiaron las superficies de la probeta antes y después de la exposición para la evaluación del aspecto físico de la probeta después de la exposición; con la superficie después de la limpieza de los productos de corrosión.

Para exponer completamente las picaduras se utilizaron los procedimientos de limpieza por medio de sustancias químicas recomendados en la norma ASTM G-1, en este procedimiento se recomienda probar la profundidad de las picaduras con una herramienta con punta para determinar la extensión de las picaduras debajo de la superficie corroída, pero en el caso del la aleación en estudio no se observo que existieran las probetas picaduras de gran tamaño como para proceder así.

Después del procedimiento de remoción de los productos de corrosión se realizo otra inspección visual bajo luz ordinaria para determinar el tamaño de las

picaduras y su distribución, seguida de una inspección mas detallada auxiliándose de un microscopio metalográfico IROSCOPE modelo MG 70, a poca magnificación (20x).

Se auxilio de una rejilla plástica con cuadrícula de 3mm x 3mm para el conteo del porcentaje de área afectada por las picaduras en las probetas seleccionadas para tal efecto.

En el caso de las probetas de la aleación en estudio, las probables picaduras son de tamaño muy reducido en áreas que no tenían un defecto en la superficie que actuaran como potenciador de estas, por lo que se sospecha de que sean producto de la perdida de zinc del material producida por la corrosión del material o/y de la limpieza de las probetas por medios químicos; pero de acuerdo a las variaciones de peso no es muy probable lo segundo.

1.12.5.2 Procedimiento para identificación de picaduras por medio de líquidos penetrantes.

Un segundo método utilizado para la evaluación de las posibles picaduras fue el de líquidos penetrantes, recomendado en la norma ASTM G-46 “Guía estándar para la examinación y evaluación de la corrosión por picaduras” en su sección 4.2.4 de inspecciones no destructivas. Donde para evaluar las posibles picaduras o defectos abiertos en la superficie del metal, se aplica un líquido penetrante que de manera subsecuente se exuda de la superficie al aplicar un revelador, después los excesos del líquido penetrante son removidos y se observa la superficie del metal; el método para la aplicación de los líquidos penetrantes fue el siguiente:

El procedimiento que se siguió para la aplicación de líquidos penetrantes fue el resultado de la consulta de los documentos informativos del producto proporcionadas por el fabricante en la compra y por Internet, así como de la experimentación de 3 distintos métodos de aplicación, para poder lograr una

observación óptima de posibles picaduras, lo anterior fue debido a la obtención de una excesiva fluorescencia en la superficie de observación con los primeros dos métodos de aplicación, lo cual nos indicaba 2 posibles causas:

- Un exceso de material fluorescente sobre la superficie y al aplicar el revelador este solo hacia que se distribuyera el material fluorescente de manera uniforme.
- La superficie presentaba una corrosión uniforme en toda la superficie lo que ocasionaba que el líquido penetrante se incrustará en toda la superficie y al aplicar el revelador este saliera a la superficie dejando ver la superficie totalmente fluorescente.

Una vez establecido el método de óptimo, se procedió a la aplicación de los líquidos a las probetas que mostraron una mayor diferencia de peso de cada estación de exposición, después de haber sido sometidas a los procesos de limpieza por medio químico según lo recomienda la norma ASTM G 1, aunque la aplicación fue hecha simultáneamente, los resultados de esta fueron observados de manera individual y registrados a través de fotografía digital.

En el cuadro 14, se muestran las características de las probetas a las que fueron aplicados los líquidos. Estas probetas fueron anteriormente seccionadas para el análisis con difracción de rayos X y microscopía de barrido electrónico.

Exposición	Probeta	Peso inicial	%de perdida de peso
Merced	3	25.5280	0.014594520
Xalostoc	10	25.5371	0.022958646
Villa	16	24.2828	0.011080917
Testigo	9	25.0739	0.0253744

Cuadro 14 Probetas utilizadas en la aplicación de líquidos penetrantes.

#### 1.12.5.2.1 El procedimiento de aplicación de los líquidos penetrantes.

El procedimiento de aplicación de los líquidos utilizados para este estudio fue el siguiente:

1. Se realizó una limpieza de los productos de corrosión de acuerdo a la norma ASTM G1 sección 7.2, utilizando una limpieza por medio de reactivos químicos para desprendimiento de productos de corrosión.
2. Se aplicó el líquido limpiador SPOTCHECK<sup>®</sup> SKC-S CLEANER/REMOVER para quitar cualquier tipo de impureza por manipulación ya sean grasas u otras impurezas en la superficie de la muestra.
3. Aplicación de líquido penetrante ZYGLO<sup>®</sup> PENETRANT ZL-27A y esperar 10 minutos para que penetre en las posibles picaduras o defectos superficiales de la probeta.
4. Remoción de excesos a través de una limpieza con un paño de algodón humectado con líquido limpiador SPOTCHECK<sup>®</sup> SKC-S cleaner/remover y aplicación de líquido revelador.
5. Observación bajo una fuente de luz ultravioleta, para la detección de picaduras que se revelaran a través de un resplandor fluorescente.

#### 2 Exposición a condiciones severas de salinidad.

Para la realización de la segunda parte de este estudio se realizó una exposición a condiciones severas de salinidad de la aleación Zn-21%wtAl 2-wt%Cu en una cámara de corrosión salina marca ATLAS modelo MPF-20 w/PC.

Los materiales para la exposición en cámara salina son las mismas probetas que fueron expuestas a condiciones atmosféricas, las cuales se prepararon para una segunda exposición en cámara salina y así establecer el comportamiento de la aleación Zn-21%wtAl 2-wt%Cu en una prueba de 1000 horas de exposición continuas a condiciones de severas de salinidad.

2.1 Procedimiento para la preparación y limpieza de las probetas que se colocaran en la cámara salina.

El procedimiento para la preparación y limpieza de las probetas que se colocaran en la cámara salina para su exposición se estableció como sigue:

En este caso, las probetas que fueron sometidas a la prueba de cámara salina ya habían sido expuestas a condiciones ambientales y a los procesos de limpieza química, debido a que esto podría afectar los resultados de la segunda prueba; se decidió someterlas a una limpieza mas profunda que evite todo tipo de efectos adversos durante la aplicación de la prueba en cámara salina y en la interpretación de resultados de la segunda prueba, por esta razón, las probetas fueron lijadas consecutivamente con papel abrasivo de los números 280, 350, 400, 500, y 600, para eliminar cualquier tipo de picadura o deformación iniciada en las etapas anteriores de exposición o limpieza, así como las deformaciones que tenia el material en su estado original. En este caso la capa pasiva que se forma en el materia fue destruida por lo que se considerara que el material ha sido recién maquinado.

2.2 Limpieza previa de probetas.

La limpieza se efectuó realizando un lavado con un detergente para quitar excesos de grasa y polvo, seguida de lavados al metal con alcohol etílico y posteriormente con acetona, ambos grado reactivo, para asegurar que este libre de grasas



posteriormente se dejaron en un desecador por un periodo de 24 horas para evitar cualquier rastro de humedad que pudiera afectar el siguiente paso.

### 2.3 Registro de pesos y medidas.

Se registraron las medidas con un micrómetro de puntas intercambiables marca Starrett modelo No.224 Set AA con un rango de 0 a 4 pulgadas y el peso de cada probeta con una balanza analítica SAUTER modelo D-7470, para su posterior colocación en bolsas plásticas para transporte.

### 2.4 Registro fotográfico de las probetas antes de exposición.

Debido a que en este tipo de estudio es muy agresivo con las superficies del material expuesto cuando este no tiene ningún tipo de recubrimiento, se decidió fotografiar todas las probetas antes de la exposición, para mantener un registro visual y así establecer cómo evoluciona la corrosión en la superficie de estas, el registro se realizó mediante una cámara digital fuji film 5500 a una resolución de 6 mega píxeles, manteniendo estos en reserva para futura consulta.

Los puntos anteriores están respaldados por la norma ASTM G 50 "Practica Estándar para Conducir Pruebas de Corrosión Atmosférica en Metales", en su sección 7 "Preparación de los Especímenes de Prueba", la norma ASTM G-1 en su sección 6 "Métodos para Preparar Especímenes para Prueba".y con la norma ASTM G-33 "Practica Estándar para el Registro de Datos de Pruebas de Corrosión Atmosféricas de Especímenes de Acero con Recubrimiento" en su sección 4 "Datos a ser registrados antes de la prueba".

### 2.5 Colocación de las Probetas en la Cámara salina.

Una vez terminada la preparación de las probetas, se procede a la colocación de estas en la cámara salina, para lo cual se hizo uso de la norma ASTM B-117 en su sección 7 la cual nos indica lo siguiente:

La posición de los especímenes en la cámara de niebla salina durante la prueba deberá de ser tal que cumpla las siguientes condiciones:

Los especímenes se colocaran a 30 grados de la vertical paralelos a la dirección principal del flujo de la niebla a través de la cámara, basada en la superficie dominante a probarse.

Los especímenes no deberán tener contacto entre ellos o con otro material metálico o cualquier material pueda actuar como mecha.

Cada espécimen será colocado de forma tal que permita la libre caída de la niebla en los especímenes.

Se colocaran de forma tal que no se permita que la solución salina de un espécimen gotee sobre otro.

Para la colocación de los especímenes en la cámara salina, se utilizó un soporte hecho de naylamit para mantener las probetas a un ángulo de exposición de 30°.

Se colocaron 5 soportes espaciados de manera uniforme dentro de la cámara, en cada soporte se pueden colocar 14 probetas, en los cuales se colocaron tanto probetas de acero con diversos recubrimientos y como las probetas de zinalco, para llevar a cabo ambas pruebas de manera simultanea, la colocación aleatoria de las probetas de la aleación Zn-21%wtAl 2-wt%Cu se muestra en el cuadro 15.

Soporte	1	2	3	4	5
Probeta	13, 4	8, 2	11, 14	6, 12	7

Cuadro 15 Colocación de las probetas en los soportes dentro de la cámara salina.

## 2.6 Características de la cámara de niebla salina.

Las características de la cámara salina son las siguientes:

Marca	Atlas	Dimensiones internas		Dimensiones externas	
Modelo	MPF-20	Largo	1.270 m	Largo	1.930 m
Capacidad interna	565 l.	Ancho	0.737 m	Ancho	0.889 m
Espacio de prueba	0.94 m <sup>2</sup>	Alto	0.635 m	Alto	1.422 m
Plano de prueba	10.1 m <sup>2</sup>	Volumen total de la cámara	982.5 l.	Reserva de solución	132 l.

Cuadro 17 Características y capacidades de la cámara salina utilizada.

## 2.7 Características de la solución salina empleada.

La solución salina fue preparada disolviendo 5 partes por peso de cloruro de sodio en 95 partes de agua conforme a la especificación ASTM D 1193, agua tipo IV.

La sal utilizada esta libre de níquel y cobre y no contiene mas de 0.1% de ioduro de sodio en su base seca y no mas de 0.3% de impurezas totales.

El pH de la solución salina es tal que cuando se atomizó a 35° C, la solución colectada estará en un rango de pH de 6.5 a 7.2, antes de que la solución sea atomizada esta libre de sólidos suspendidos, la medición del pH deberá ser hecha de manera electrolítica a 25° C.

## 2.8 Preparación de la solución salina.

Para la preparación de la solución salina se utilizo el siguiente material:

- Una balanza analítica de viga triple marca OHANUS capacidad de 0 gr. a 2610 gr.
- Un depósito de plástico graduado de capacidad 20 lts.

- Para agitar la solución se utilizó un sistema de aireación con el que cuenta el depósito externo de la cámara salina, mediante el cual se mezcló el agua con la sal hasta que se logró disolverse la totalidad de esta.
- Agua destilada grado reactivo según norma ASTM D1193.
- Cloruro de sodio (NaCl) grado reactivo.
- El cotejo del pH se realizó a través de un medidor de pH marca OAKTON modelo PC-510, el cual posee la capacidad de censar la temperatura, las partículas por millón en la solución y la conductancia.

Las características de la solución fueron medidas en cada paro preestablecido de 24 horas.

Para la calibración del medidor de pH se utilizó una solución buffer de pH 7 y un vaso de precipitado de 100 ml donde se colocó la solución buffer para la calibración.

## 2.9 Inicio de la prueba en cámara de niebla salina.

El inicio de la prueba en cámara salina se estableció para el día 2 de diciembre de 2005 a las 19 horas.

Para iniciar el funcionamiento de la cámara salina se establecieron los parámetros de trabajo bajo los cuales la cámara estará programada, estos se muestran en el cuadro 17.

Parámetro.	
Temperatura de la cámara.	35° C
Temperatura de la torre de burbujeo	48° C
Temperatura de bulbo húmedo	35° C
Presión del flujo de aire	15 PSI

Cuadro 17 Parámetros de funcionamiento de la cámara salina.

Los paros fueron programados cada 24 horas para la observación del desarrollo de la corrosión en las probetas y registrarlos por medio de fotográfico, y recolectar el agua para pruebas de pH, como lo indica la norma ASTM B-117 en su sección 11 “Continuidad de la Exposición” la cual establece que “la prueba debe ser continua implicando que la cámara será cerrada y la operación del rocío será continua excepto por las cortas interrupciones diarias necesarias para inspeccionar, verificar nivel y llenar el deposito de la solución salina, reiniciar o remover los especimenes de prueba, y hacer los registros necesarios como se describe en la sección 9 las interrupciones deberán ser fijadas en un horario y mantenerse al mínimo.

Se realizo una corrida de prueba para calibrar el flujo del rocío en la cámara salina y establecer los puntos de recolección del mismo, quedando la altura del aspersor a una altura de la boquilla de 6.5 cm. y los recolectores a una distancia de 40 cm. del aspersor.

Una vez realizadas las pruebas anteriores y la calibración se colocaron las probetas y se inicio la prueba de las 1000 horas según lo establecido.

2.10 Limpieza de las probetas después de la exposición en la cámara de niebla salina.

Terminada la prueba se prosiguió como lo indica la norma ASTM B-117, en la sección 13 "Limpieza de los Especímenes de Prueba".

Los especímenes deberán ser tratados de la siguiente manera:

- Los especímenes se moverán de manera cuidadosa para prevenir daños en la superficie y/o pérdida de productos de corrosión.
- Los especímenes serán lavados suavemente o pueden sumergirse en agua corriente limpia a una temperatura mayor de los 38° C para quitar depósitos de sal de su superficie e inmediatamente después se secan.

2.11 Análisis y Evaluación de la Corrosión en Cámara de niebla Salina.

2.11.1 Registro el peso de las probetas después de exposición.

Se registra el peso de las probetas con los productos de corrosión en las cajas petri, que previamente habían sido pesadas, obteniendo el peso de las probetas restando el peso de la caja vacía del peso de la caja con la probeta, registrándolos para su posterior evaluación.

2.11.2 Limpieza después de exposición en la cámara de niebla salina.

La limpieza se lleva a cabo siguiendo las indicaciones de la norma G 1-90, sección 7 "Métodos para Limpieza Después de la Prueba" utilizando el medio químico para la remoción de los productos de corrosión.

Se hizo esta selección debido a que los métodos mecánicos y electrolíticos no eran viables en el momento de hacer la limpieza.

Se llevo a cabo la misma metodología de limpieza que con la exposición atmosférica de las probetas para homogeneizar el procedimiento y se obtenga menor variación en los resultados obtenidos.

Para la limpieza por productos químicos se prepararon las soluciones de la sección C.9 del anexo 1 de la norma ASTM G 1-90 especificadas para zinc y aleaciones base zinc.

En el caso de las probetas sometidas a prueba en la cámara de niebla salina se observo un mayor ataque al material, por lo que se hicieron los siguientes estudios y pruebas para determinar el grado de corrosión que se obtuvo con la prueba y determinar como se afecto el material.

#### 2.11.3 Pérdida y/o ganancia de peso.

A través de uno de estos métodos se estableció el grado de corrosión de las probetas expuestas en cámara de niebla salina.

#### 2.11.4 Conteo de área afectada por la corrosión.

El área afectada se estableció por medio de una mica con una cuadrícula de 3mm x 3mm, la que fue sobrepuesta sobre la superficie afectada y realizando un conteo del total de cuadrículado afectado haciendo una regla de tres simple se estableció el porcentaje de área afectado. El objetivo de esta prueba es establecer el grado de corrosión por exposición a condiciones severas de salinidad.

## **CAPÍTULO 5.**

### **RESULTADOS.**

Los resultados serán presentados de acuerdo al tipo de prueba, por un lado los resultados de la exposición atmosférica y por otro los resultados de la exposición en cámara salina.

1 Resultados de exposición de la aleación Zn -21%wt Al -2%wt Cu a la atmósfera.

1.1 Limpieza inicial, registro de peso, dimensiones y fotográfico de las probetas antes de exposición.

Antes de la exposición se realizó la medición y registro del tamaño de las probetas así como de su peso, guardando estos datos para futuras referencias; también se hizo un álbum fotográfico para observar las diferencias entre las probetas antes y después de ser expuestas en atmósfera.

La limpieza se realizó con un detergente alcalino para quitar el exceso de grasa en la superficie, seguido de un lavado con acetona y uno con alcohol etílico, ambos grado reactivo, esto para asegurar la completa ausencia de grasa u otro contaminante que impida o aumente el grado de corrosión del material en estudio.

En el registro de las medidas, como se mencionó con anterioridad se usó un micrómetro de puntas intercambiables marca Starrett modelo No.224 Set AA con un rango de 0 a 4 pulgadas.

Para el registro del peso de las probetas, estas se sometieron a un proceso de desecación durante un período de 3 semanas, evitando así cualquier rastro de humedad en ellas que modificara su peso real. Se respetó el orden de colocación en los bastidores de acuerdo al punto de exposición.



Estación	Num. de probeta	Peso original (g)	Alto (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)
Merced	11	24.881	75.1670667	35.2228333	1.69333333
Merced	7	25.1549	75.3618	35.2555	1.70603333
Merced	14	24.5395	75.2602	35.231	1.6764
Merced	3	25.528	75.5988667	35.2473333	1.7145
Merced	8	24.132	74.9977333	35.2146667	1.47743333
Xalostoc	15	24.0166	74.9384667	35.231	1.64676667
Xalostoc	10	25.5371	75.0908667	35.231	1.73566667
Xalostoc	2	25.0127	75.5226667	35.2636667	1.7145
Xalostoc	6	24.6779	75.2771333	35.2555	1.6764
Xalostoc	4	25.528	75.5396	35.2146667	1.7272
Villa	16	24.2828	75.7258667	35.1983333	1.64676667
Villa	12	24.5033	75.3279333	35.231	1.65946667
Villa	13	25.1927	74.9723333	35.2555	1.71873333
Villa	1	24.881	75.4549333	35.2555	1.69333333
Villa	5	24.0785	75.1332	35.231	1.64253333
Testigo	9	25.0739	74.7691333	35.2473333	1.71026667

Cuadro 18 Pesos y medidas de las probetas para exposición ambiental.

## 1.2 Recolección de datos visuales durante la prueba.

El registro fotográfico se hizo con una periodicidad semanal, anotando ligeras variaciones en la tonalidad de las probetas con el transcurso del tiempo (fotografía 1). En la comparación se puede observar que en los primeros 3 meses (90 días de exposición) la diferencia fue un ligero cambio en el tono del gris del material haciéndolo mas oscuro al transcurrir el tiempo, tal como lo contemplan en los estudios realizados (L. Hernández 1981-2). Indican que con el tiempo se desarrolla una capa de óxido de color gris oscuro no muy agradable a la vista, después de este tiempo no se vio cambio aparente en la tonalidad de las probetas.

Merced P 7

Xalostoc P10

Villa P1



Probetas con 14 días de exposición, en las 3 diferentes áreas de exposición.



Probetas con 120 días de exposición, en las 3 diferentes áreas de exposición.



Probetas con 240 días de exposición, en las 3 diferentes áreas de exposición.

Fotografía 1 Probetas en diferentes tiempos de la exposición atmosférica.

### 1.3 Levantamiento de probetas.

Los levantamientos se hicieron en 3 ocasiones, los primeros dos levantamientos se realizaron a los 80 y 160 días respectivamente para la observación del avance de la corrosión, y el tercero donde se recogieron las 3 últimas probetas de cada bastidor se realizo a los 240 días de exposición, estas ultimas se utilizaron para el calculo del porcentaje de peso perdido.

### 1.4 Limpieza de los productos de corrosión y registro de peso de las probetas.

El lavado de las probetas con exposición atmosférica se realizo con las sustancias recomendadas en la norma ASTM G-1 (Cuadro 13 capítulo 4) y se hicieron las siguientes observaciones durante estos procesos de limpieza.

Primer lavado, sustancia C.9.1.

Se ennegreció la superficie del material al contacto con la sustancia 1, formando una ligera capa de color negro pero soluble al agua con que se enjuagó el material, después de que transcurrió el tiempo indicado de inmersión en la sustancia 1.

Segundo lavado, sustancia C.9.2.

No se observo reacción instantánea como en el caso anterior, solo la formación de algunas burbujas de gas (al parecer H) sobre la superficie del material y un ligero cambio de color después del desecado.

Tercer lavado, sustancia C.9.3.

El material se volvió de un color gris mas claro al desprenderse un poco de los productos de corrosión durante la reacción en la inmersión en la sustancia 3 y durante en el enjuagué posterior.

Cuarto lavado, sustancia C.9.5.

Durante la inmersión el material desprendió una considerable cantidad de burbujas de gas, el resultado final fue un color gris claro en el material después de enjuagar y mantener en el desecador el material, cabe hacer notar que este lavado se hizo a temperatura ambiente.

Quinto lavado, sustancia C.9.6.

En este lavado el metal desprendió gas en una cantidad mucho menor que en la anterior, pero la superficie del material volvió a un gris mas oscuro.

#### 1.5 Diferencias peso para análisis estadístico.

En exposición atmosférica se inicio por obtener los resultados de las diferencias peso de las probetas después de ser expuestas con respecto a su peso sin exposición, este no se estudio estadísticamente debido a que las probetas presentaban partículas de polvo en diferente grado, debido al lugar de exposición y esto resultaría en una falsa medición de los productos de corrosión, el estudio se realizo utilizando los datos de la diferencia de peso al final del 5° lavado y el peso sin exponer de las probetas, para establecer si existía una diferencia de peso significativa debida a los diversos puntos de exposición.

Primero se registraran las medidas de peso y longitud de las probetas para su posterior análisis.

Nota.

Las probetas 3, 10, 16 expuestas en las zonas de monitoreo de la Merced, Xalostoc, Villa de las Flores y la probeta 9 tomada como testigo, fueron seccionadas para los estudios de difracción de rayos X y dureza, por lo que aparecen en la tabla 5.2 con la marca “sin lavado”, pero en el siguiente renglón se encuentra el peso de la sección de mayor tamaño de cada probeta que fue

sometida a los lavados con las diferentes sustancias, tomando el peso de estas secciones proporcionalmente con el peso de la probeta original para su análisis.

El registro de los pesos de las probetas con un tiempo de exposición de 240 días en las diversas etapas de limpieza quedo como sigue:

Lugar de exp.	# de probeta	Peso original (g)	Peso c/polvo (g)	Lav c/agua (g)	Sust 1 (g)	Sust 2 (g)	Sust 3 (g)	Sust 4 (g)	Sust 5 (g)
Merced	3	25.528	26.1982	26.0696	sin lavado				
		8.3593			8.3511	8.3497	8.3433	8.2412	8.2373
Merced	7	25.1549	25.156	25.1541	24.947	25.1246	25.1084	24.7924	24.781
Merced	8	24.132	24.1329	24.1297	24.11	24.1096	24.1005	23.7355	23.726
Xalostoc	6	24.6779	24.6803	24.6759	24.655	24.6534	24.6389	24.3493	24.332
Xalostoc	10	25.5371	25.5362	25.5318	sin lavado				
		8.5458			8.537	8.5356	8.5288	8.3537	8.3496
Xalostoc	15	24.0166	24.0186	24.0152	23.997	23.9919	23.976	23.7667	23.752
Villa	1	24.881	24.8762	24.874	24.849	24.8447	24.8202	24.5151	24.501
Villa	12	24.5033	24.4963	24.3395	24.052	24.4713	24.4583	24.2822	24.268
Villa	16	24.2828	24.2813	24.2786	sin lavado				
		8.0589			8.0515	8.0494	8.0447	7.9748	7.9696
Testigo.	9	8.3569	8.3569	8.3569	8.351	8.3497	8.3448	8.1627	8.1602

Cuadro 19 Pesos de las probetas del tercer levantamiento después de exposición y limpieza.

### 1.6 Análisis estadístico de los porcentajes de pérdida de peso.

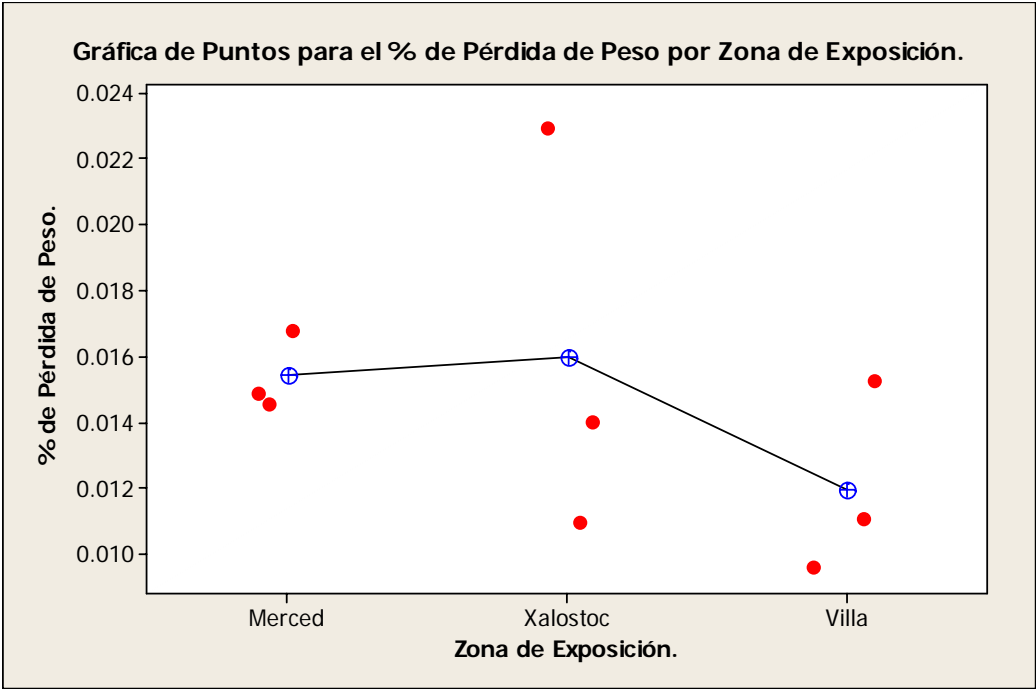
Del análisis estadístico de los datos obtenidos del porcentaje de peso perdido por las probetas se obtuvieron los siguientes resultados, al aplicar el método de análisis ANOVA al problema por medio del programa minitab nos da como resultado la siguiente información:

Sitio de monitoreo	Número de muestras	Media de % de pérdida de peso	Desviación estándar
Merced	3	0.015436	0.001215
Xalostoc	3	0.015992	0.006219
Villa	3	0.011984	0.002939

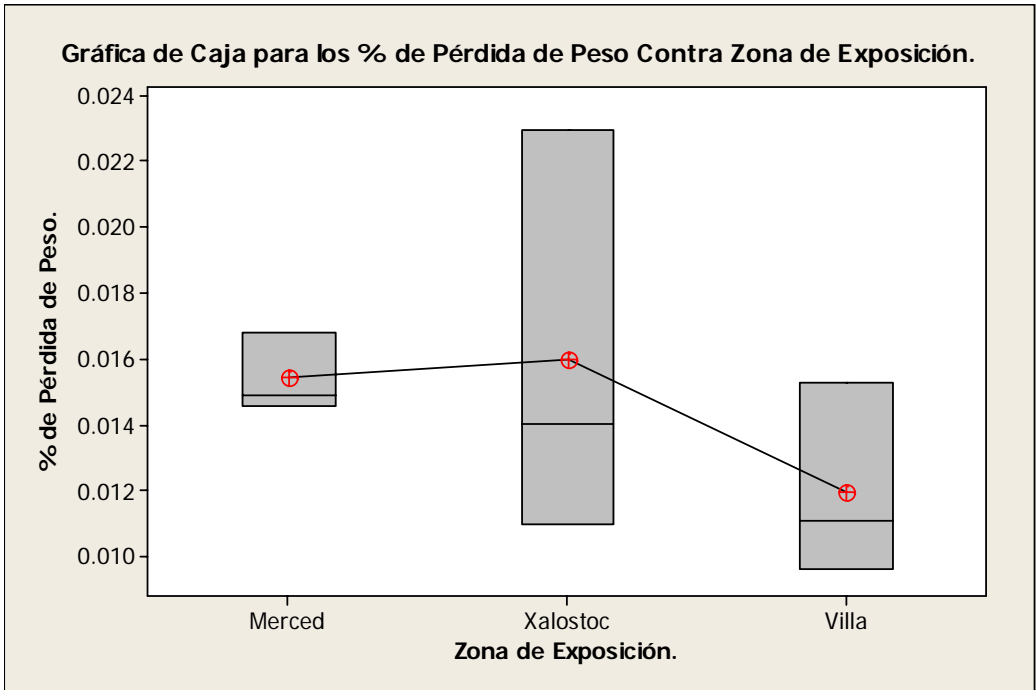
Cuadro 20 Media y desviación estándar de el porcentaje de pérdida de peso.

No se detecto diferencia significativa en el porcentaje de la pérdida de peso de las probetas debido a la zona de monitoreo donde fueron expuestas dichas probetas.

En las graficas siguientes se muestran los valores individuales en una grafica de puntos y las medias en un diagrama de caja para los valores de los porcentajes de pérdida de peso.



Gráfica 4 Gráfica de puntos para las zonas de exposición.

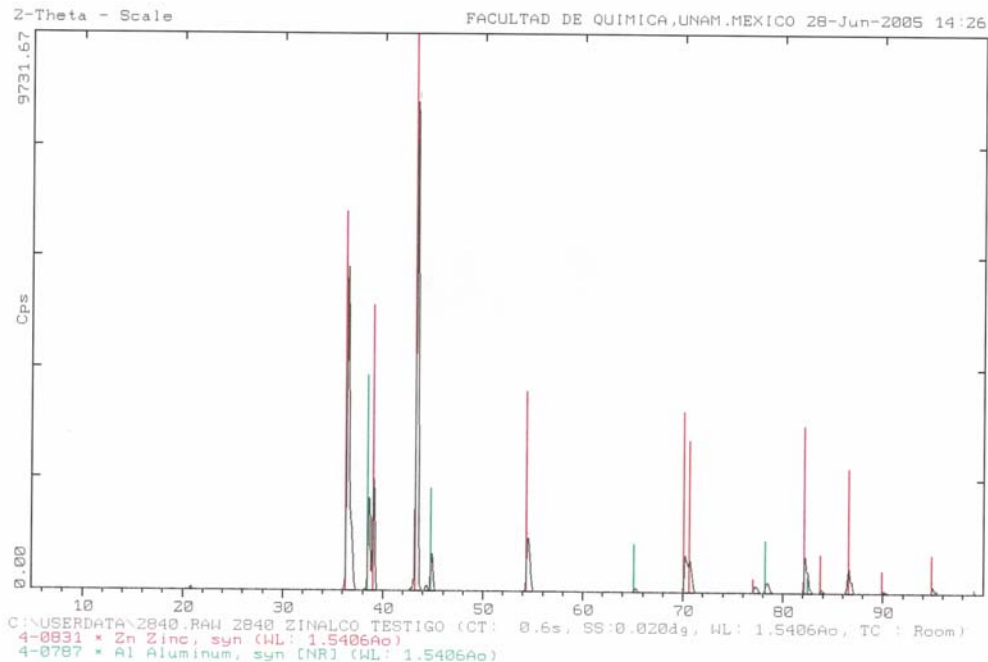


Gráfica 5 Diagrama de caja para pérdida de peso por las zonas de exposición.

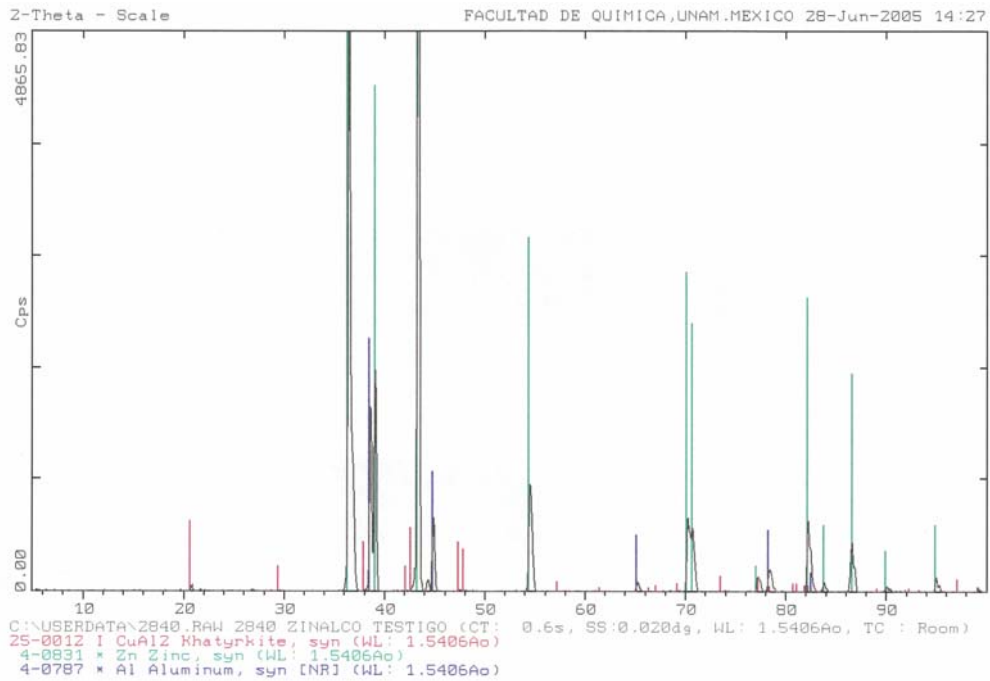
## 1.7 Difracción de Rayos X.

En este estudio no fue posible la identificación de los productos de corrosión formados en la superficie de la aleación por este método, debido a la naturaleza del óxido de aluminio, la cual es amorfa y no hace posible una correcta difracción de los rayos X para lograr identificar los productos de corrosión, dando como resultado solamente las difracciones características de los componentes de la aleación.

Se hicieron varias pruebas, tanto en la probeta testigo para establecer los componentes de la aleación y para lograr la calibración del equipo y en la probeta de sitio de exposición dos, la Merced, considerando que esta es una de las zonas con un mayor índice de contaminantes y finalmente una comparación de las gráficas obtenidas comparando las dos probetas testigo y la expuesta dando como resultado lo siguiente

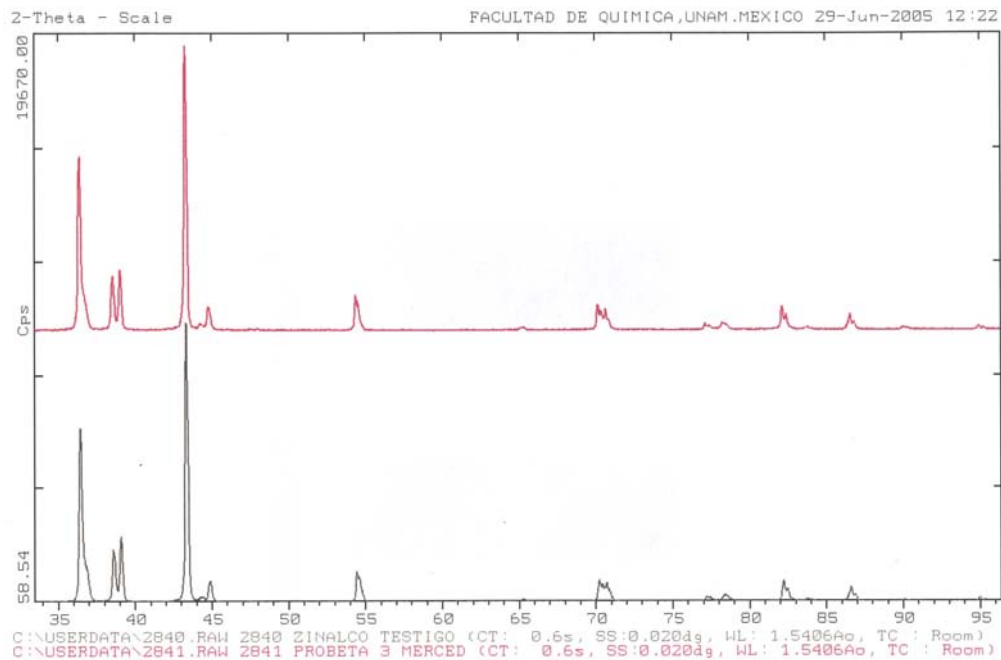


Gráfica 6 Calibración del equipo con la probeta testigo.



Gráfica 7 Identificación de los componentes de la aleación por medio de difracción de rayos X.

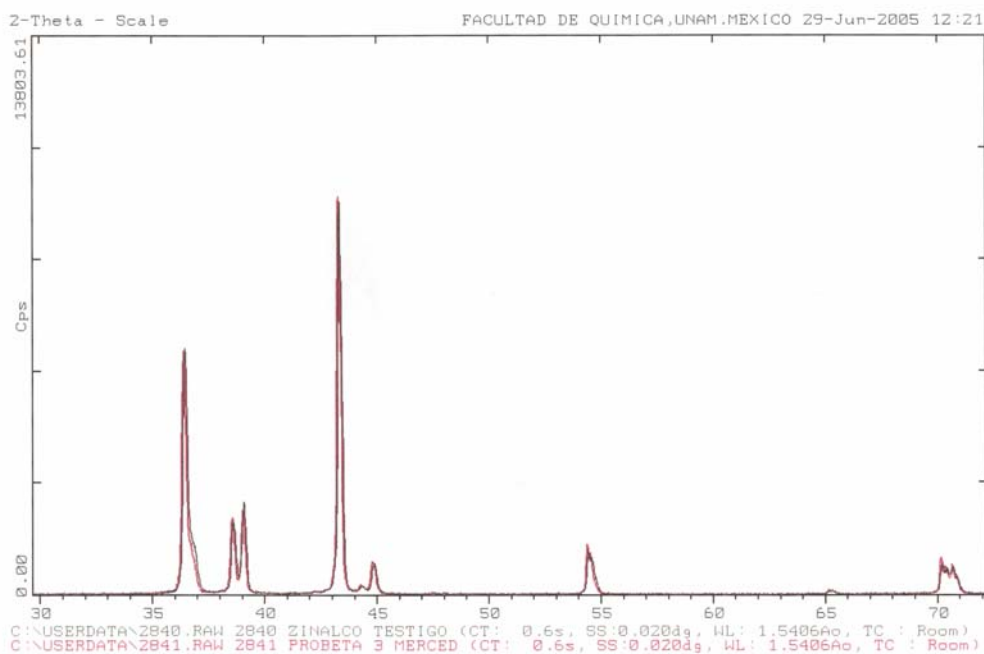
Cambio de color en la grafica para una mayor facilidad de identificación de componentes



Gráfica 8 Comparación de las graficas que muestran los componentes de la aleación por medio de difracción de rayos X. Comparación de la probeta testigo en color negro con la probeta expuesta en la merced nótese la similitud de las graficas, estas solo muestran los componentes de la aleación.



En la siguiente gráfica se trasponen las gráficas para asegurar lo antes dicho.



Gráfica 9 Sobre posición de las graficas de las probetas 3 merced y 9 testigo mostrando la completa similitud de ambas.

De lo anterior se concluye que por medio de este estudio y por las características de los óxidos de aluminio no fue posible identificar los óxidos formados en la superficie de la aleación.

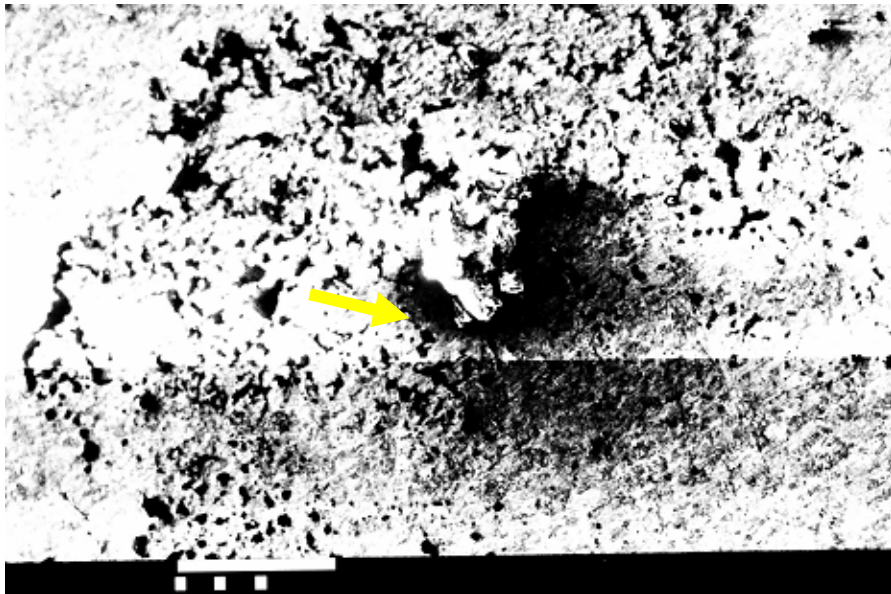
Se decidió no continuar con la prueba en las demás probetas pues se considero que se tendrían los mismos resultados que los aquí expuestos.

## 1.8 Microscopia de Barrido Electrónico.

En la prueba de microscopia de barrido electrónico se observó la superficie de las probetas expuestas en las tres estaciones así como la probeta testigo, todas ellas sin limpieza de los productos de corrosión con las sustancias que recomienda la norma ASTM G-1. En esta prueba se observó material incrustado así como ralladuras superficiales resultantes del manejo del material que se mostraron en las siguientes fotografías:

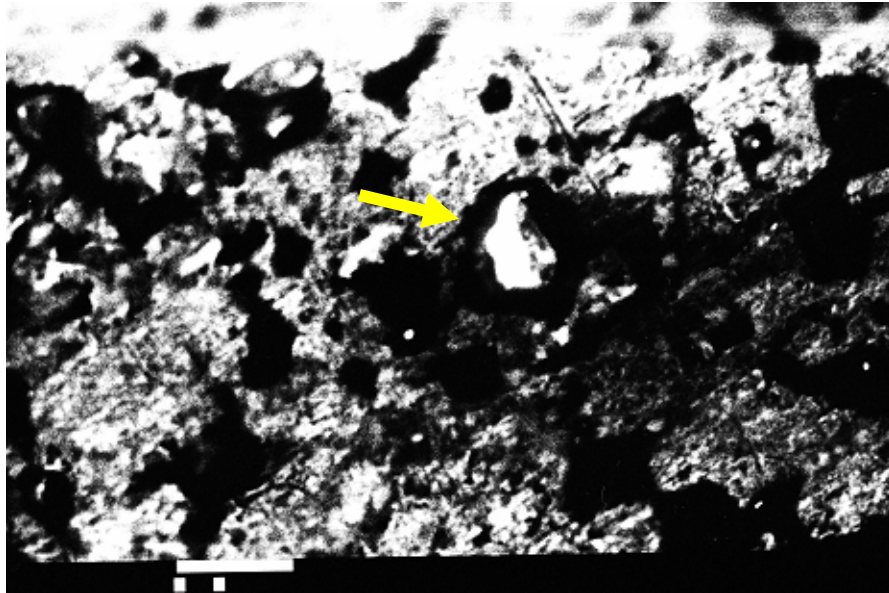
- Probeta 9 Testigo.

En esta probeta observamos las condiciones de la superficie del material sin exposición con los defectos que esta pudiera tener y poder así comparar con las que fueron expuestas en los diferentes ambientes.



Fotografía 2 Probeta 9, 2 kX Aumentos.

En esta fotografía se observan una zona con imperfecciones en la superficie, por el tamaño puede ser pérdida superficial de zinc, estas zonas en la exposición atmosférica pueden actuar como zonas iniciadoras de corrosión, ya sea de picaduras o corrosión uniforme como sucedió en este caso.



Fotografía 3 Probeta 9, 2 kX Aumentos.

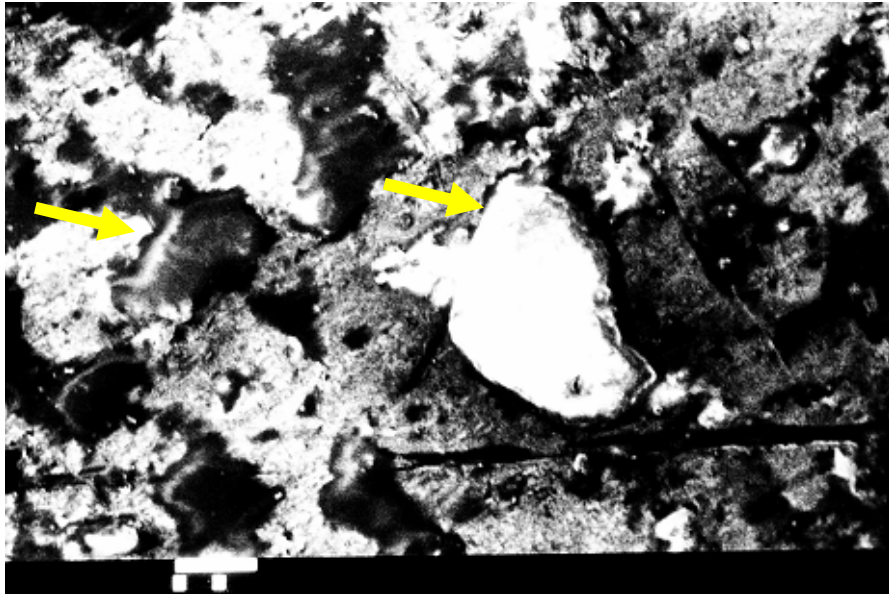
La fotografía muestra otra zona del material donde parece tener impurezas que ocasionaría la formación de microceldas galvánicas favoreciendo así la corrosión en puntos localizados de la superficie. Todas las probetas que fueron sometidas a exposición y la testigo fueron obtenidas de la misma placa podríamos considerar que tienen las propiedades mecánicas y características superficiales uniformes.



Fotografía 4 Probeta 9, 100 X Aumentos.

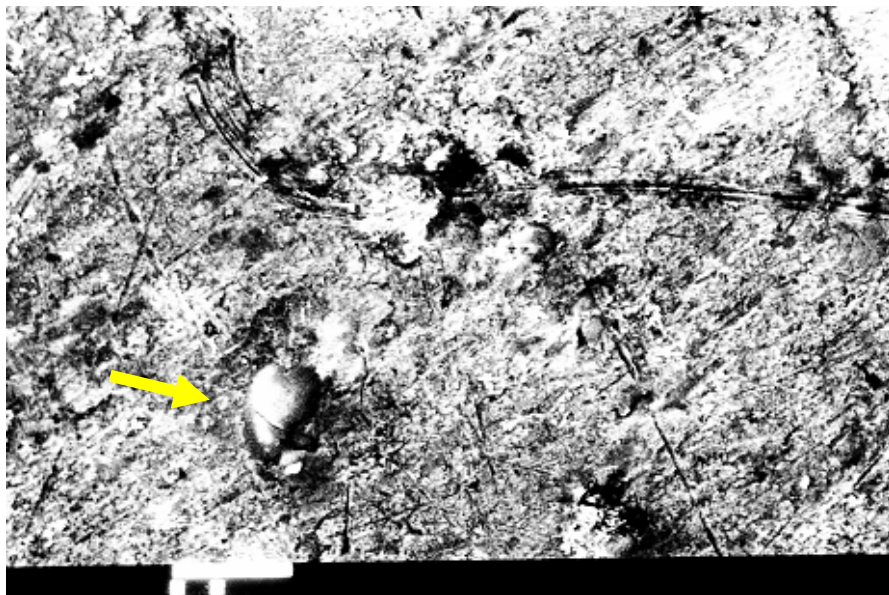
Zona con discontinuidades debidas a pérdida de material superficial obsérvese que las zonas oscuras son ricas en aluminio y las zonas blanquecinas siendo estas ricas en zinc, son las que al parecer se han desprendido con el

procedimiento de limpieza aplicado a todas las probetas; dejando la superficie porosa aumentando el área de exposición.



Fotografía 5 Probeta 9, 1 kX Aumentos.

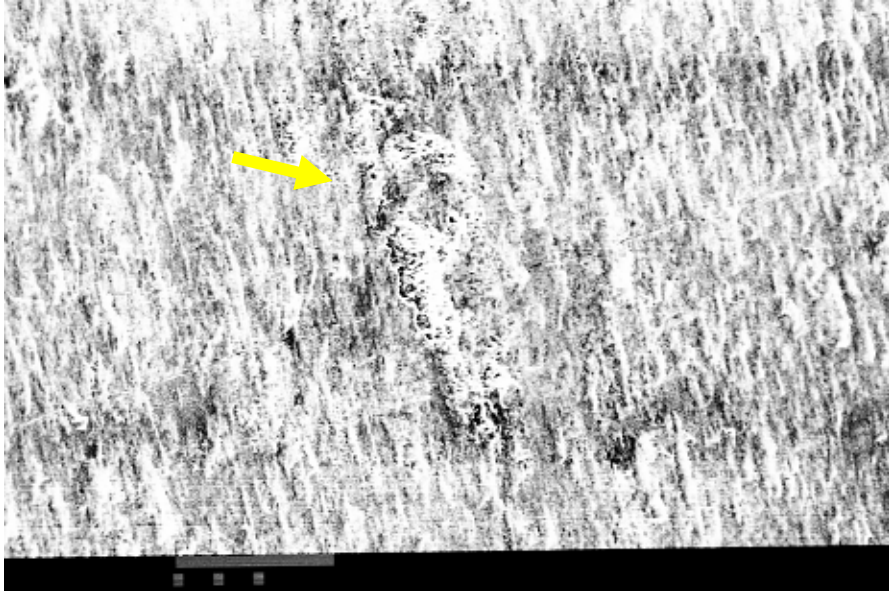
Misma zona que la anterior pero con un acercamiento de 1000 X, aquí podemos ver que en la superficie inicia el crecimiento del óxido por zonas la fase alfa (aluminio) tiene un óxido oscuro mientras la fase beta (zinc) tiene el óxido blanquecino.



Fotografía 6 Probeta 9, 1.5 kX Aumentos.

Esta zona esta relativamente uniforme con una ligera capa de óxido, se observan ralladuras y posiblemente algunas impurezas en la superficie del metal.

- Probeta 3 Zona de exposición: Merced Tiempo de exposición: 240 Días.



Fotografía 7 Probeta 3, 1.5 kX Aumentos.

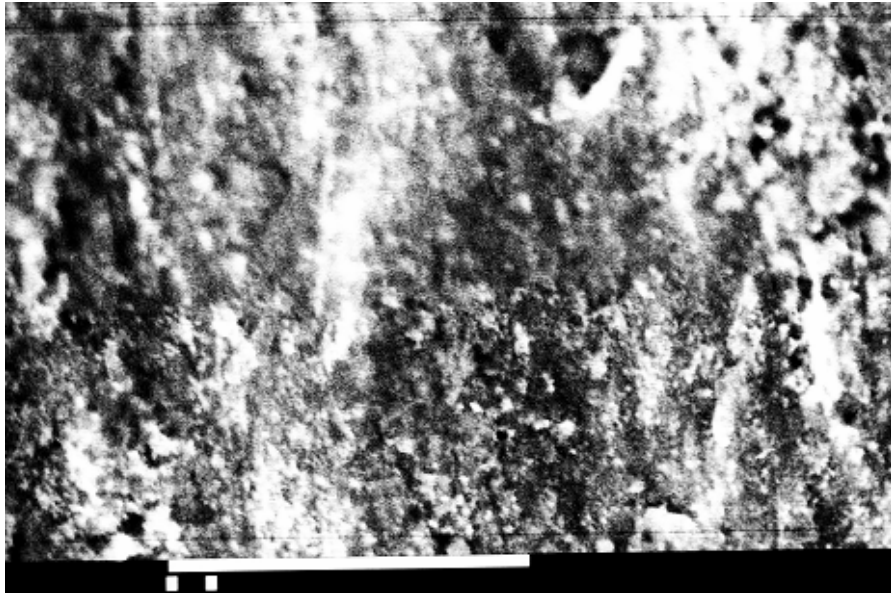
Superficie de óxido relativamente continua, que muestra una imperfección posiblemente resultado de algún material que se pego a la probeta y creo una pérdida de zinc debido a un efecto galvánico entre el mismo material y/o con el material que se adhirió a la probeta.



Fotografía 8 Probeta 3, 4.5 kX Aumentos.

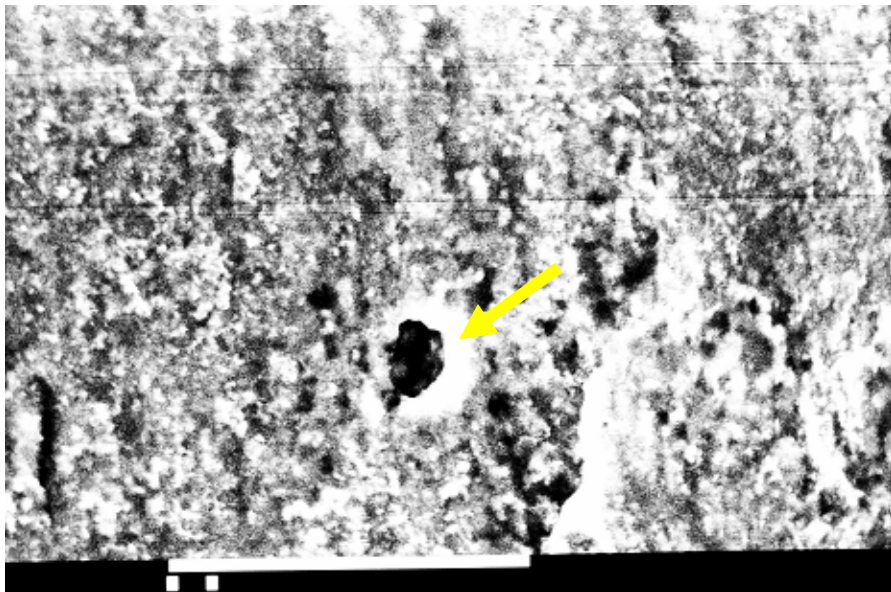
Misma zona aumentando el acercamiento muestra diversas formaciones granulares posiblemente es el crecimiento en red del óxido de zinc debido a que los hidróxidos diluidos en agua se depositan en la superficie al evaporarse esta,

pues predomina el gris claro y partes oscuras que son óxido de zinc y óxido de aluminio respectivamente. El material granular extraño se muestra mas claro en la fotografía.



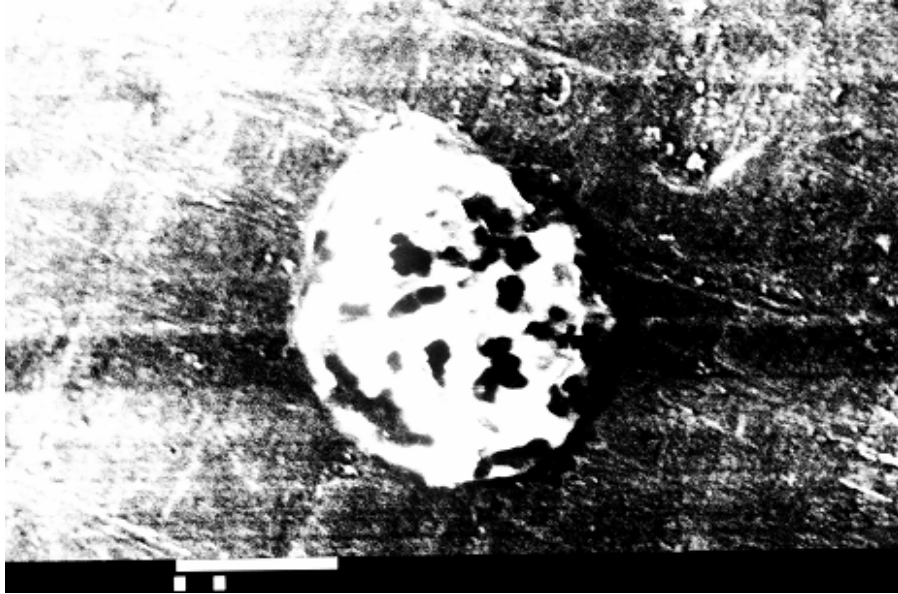
Fotografía 9 Probeta 3, 2.5 kX Aumentos.

Zona de óxido continua como se especifica en los estudios previos (L. Hernández 1981-2). Donde indica que después de determinado tiempo el óxido de zinc crece y se une fuertemente al óxido de aluminio aunado con la disolución y precipitación de este último se crea una capa protectora de óxido continuo.



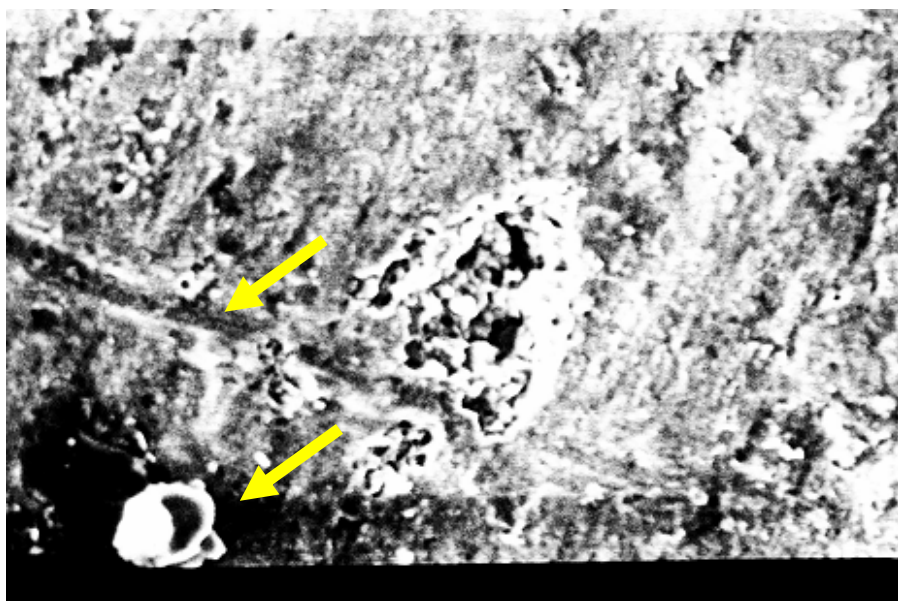
Fotografía 10 Probeta 3, 4.5 kX Aumentos.

Posible concentración de óxido de aluminio que sobresale de la red compuesta por los óxidos de zinc que se ve gris y el aluminio negro o una partícula que se adhirió a la superficie de la probeta durante la exposición, la zona gris oscura puede ser óxido de aluminio parcialmente cubierto por precipitaciones de óxido de zinc.



Fotografía 11 Probeta 10, 4.5 kX Aumentos.

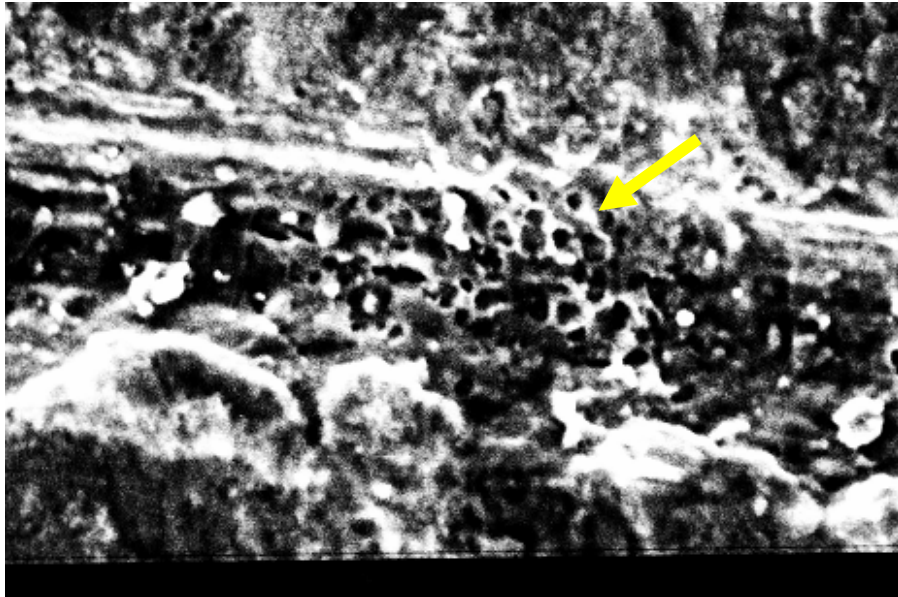
Posible incrustación de material extraño debido a la exposición, se ve que la capa de óxido debajo de el es continua pero empezaba un efecto galvánico al verse alrededor solo óxido de aluminio (oscuro) se ven pequeñas incrustaciones o polvo alrededor.



Fotografía 12 Probeta 10, 4.5 kX Aumentos.

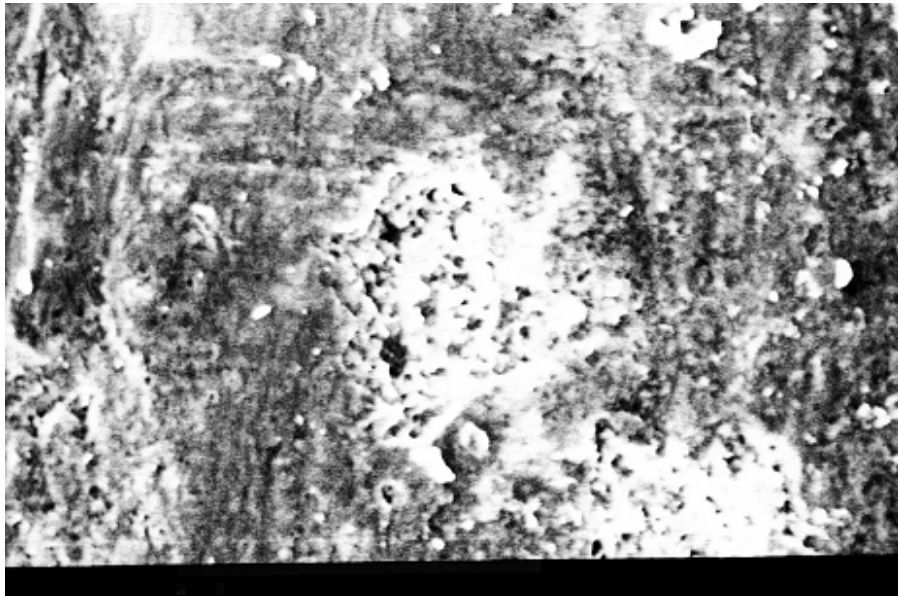
Rayón en el material resultado de la manipulación antes de la exposición, nótese que esta cubierto de óxido y alrededor algunas zonas de óxido de aluminio, así como en la zona inferior una incrustación de material extraño.





Fotografía 13 Probeta 10, 7 kX Aumentos.

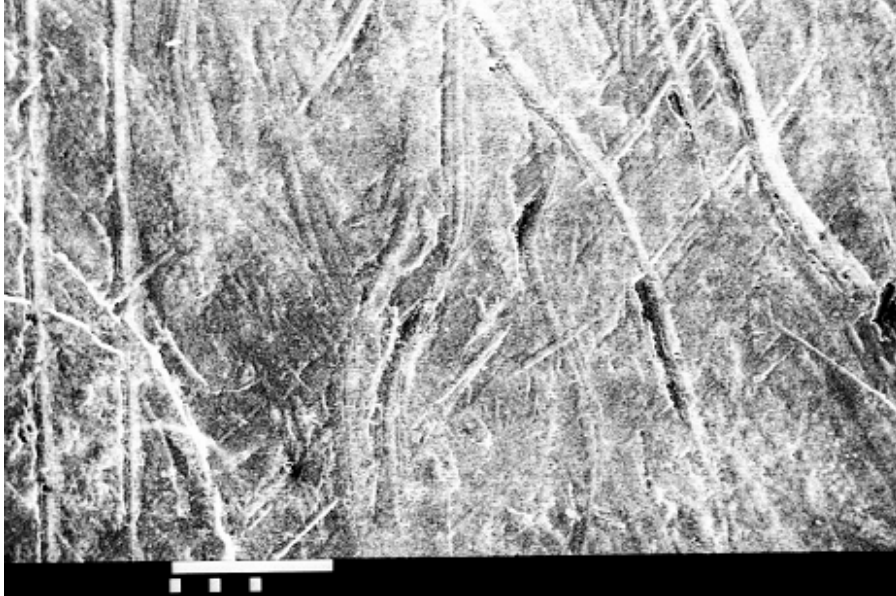
Acercamiento al rayón, aquí se muestra una discontinuidad en el óxido debido a la ruptura de este y al crecimiento de una nueva capa de óxido (posiblemente) más delgada, se ve porosa y con pequeños pedazos del material incrustados, las capas más gruesas se ven como placas superpuestas resultantes de la unión íntima de las capas de óxidos por precipitación de los hidróxidos.



Fotografía 14 Probeta 10, 4.5 kX Aumentos.

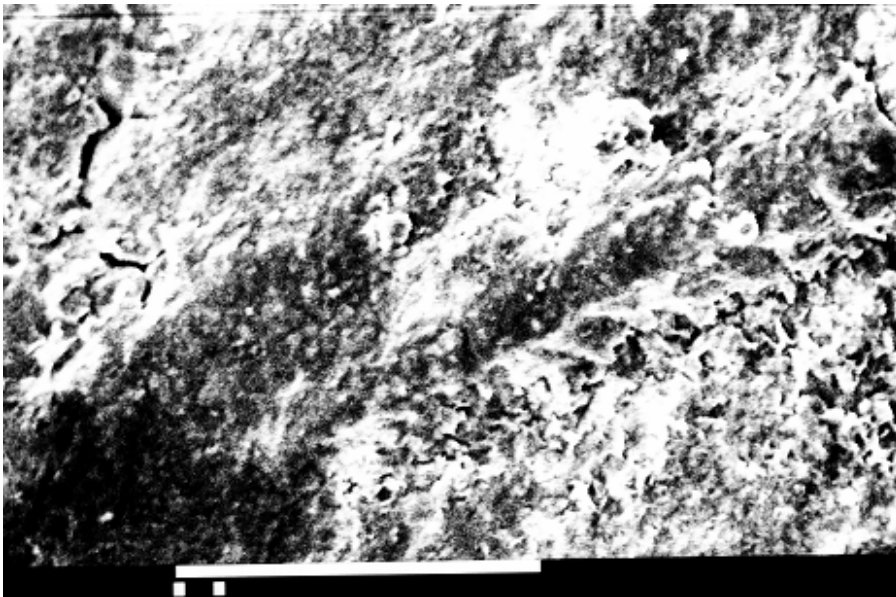
Zonas con mayor número de imperfecciones en la capa de óxido, en forma de pequeñas islas, posiblemente debidas a la precipitación de materiales sólidos sobre la superficie creando zonas donde se da una corrosión por la creación de micro celdas galvánicas, esto debido al tipo de zona donde se dio la exposición.

- Probeta 16 Zona Villa de las Flores Tiempo de exposición: 240 Días.



Fotografía 15 Probeta 16, 300 X Aumentos.

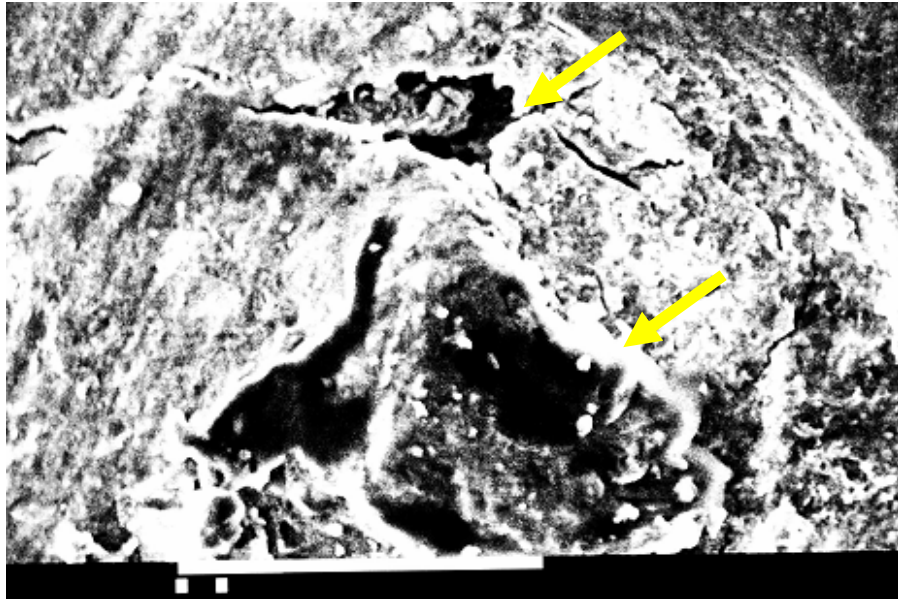
En esta fotografía a pocos aumentos se puede ver la capa de óxido que se formó y que protege al metal, esta capa recibe el nombre de capa pasiva y evita que el material continúe reaccionando con el medio ambiente. Solo se observan algunos lugares donde la capa de los productos de corrosión del zinc no ha cubierto completamente la fase alfa.



Fotografía 16 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.

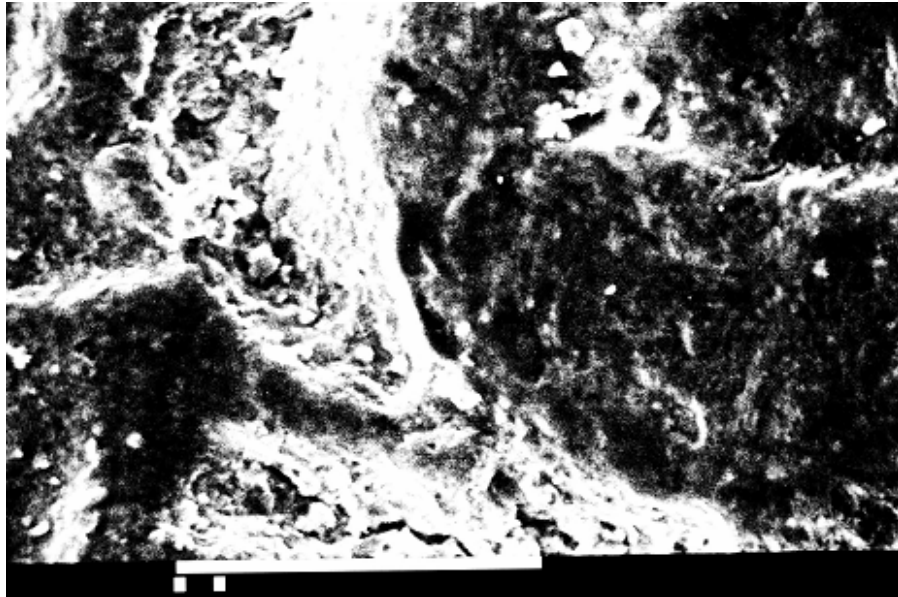
Crecimiento regular del óxido en forma de red ya avanzado pero más homogéneo y al parecer compactado, se observa una menor cantidad de productos de

corrosión que en las anteriores probetas; en esta se observa que la capa de óxido tendera a unirse en la sección centro derecha mientras en las demás zonas se observa una capa uniforme.



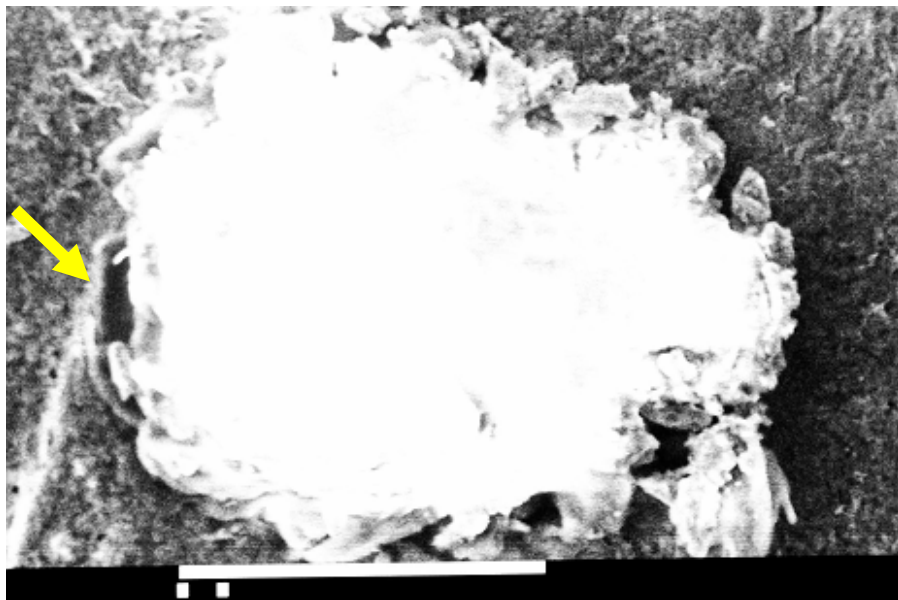
Fotografía 17 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.

La fotografía muestra una cavidad en los productos de corrosión, en la parte superior de esta y en la inferior al parecer un montículo posiblemente debido a una incrustación de un material extraño que se unió a la probeta debido a material corroído.



Fotografía 18 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.

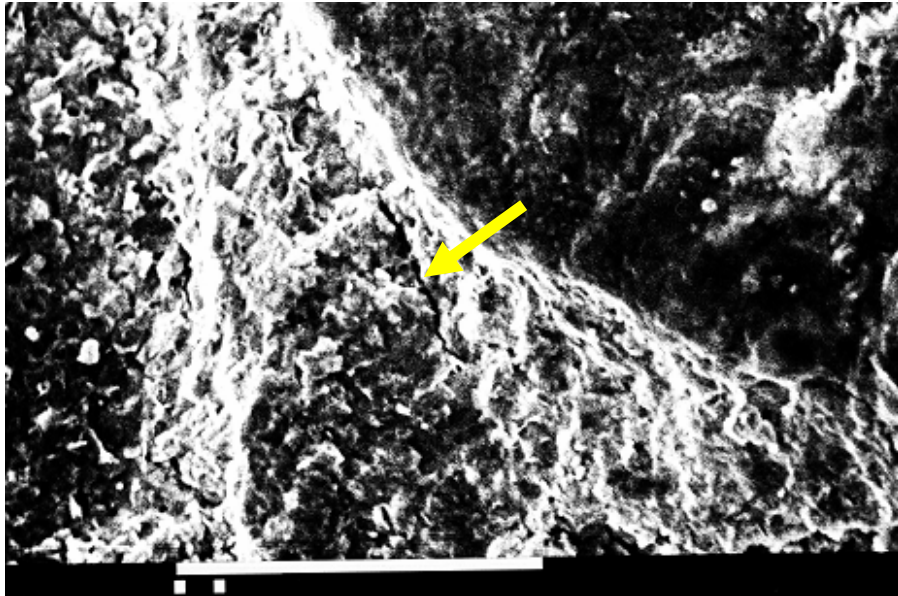
Esta fotografía al parecer muestra la unión de óxidos de aluminio y óxidos de zinc tal como se esperaba (L. Hernández 1981-2); en esta zona la fase es predominante aluminio, pues muestra óxido negro y la parte blanca hidróxidos de zinc que iniciaban su deposición sobre la fase alfa.



Fotografía 19 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.

Posible incrustación que genero un crecimiento en el óxido de zinc de forma muy localizada al formarse una celda galvánica, esto se concluye debido a lo localizado de los productos de corrosión y a que al parecer en la parte media de lado

izquierdo se alcanza a ver una cavidad mas oscura desechedando la idea que se tratara de polvo sobre la superficie.



Fotografía 20 Probeta 16, 4.5 kX Aumentos.

Unión de los productos de corrosión del aluminio y zinc, nótese que la parte oscura (óxidos de aluminio) se observa mas compacto que la parte blanca (óxidos de Zinc) que se observa menos uniforme en su superficie, creando la ilusión de una red sobre el óxido de aluminio, se observa un agrietamiento en la capa de óxido en la parte media de la fotografía.

Se agradece la colaboración en la toma de fotografías de esta sección al técnico en Microscopia de Barrido Electrónico Rodolfo Robles Gómez.

## 1.9 Pruebas de Dureza.

Ahora se analizará si existe alguna diferencia significativa en la propiedad mecánica de dureza debido a la zona de monitoreo de las probetas que sufrieron exposición atmosférica, así como con la probeta testigo que no tuvo exposición alguna, todas después de el proceso de limpieza.

Exposición de cara a luz solar 240 días.							
Lugar de exp.	Num.	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 4	Dureza 5	Dureza 6
Merced	3	40.9	43.3	44.2	34.7	44.2	42.5
Merced	7	41.3	39.8	39.9	39.2	40.8	40.3
Merced	8	33.2	38.1	38.1	37.8	34.2	34.3
Xalostoc	6	34.3	34	33.9	33.5	33.4	33.4
Xalostoc	10	42.8	44.9	45.8	44.3	44.8	45.5
Xalostoc	15	22.9	39.4	38.1	39.6	40	38.5
Villa	1	33.8	33.8	32.1	34.4	33.6	36.7
Villa	12	41.6	38	41.2	39.1	40.9	42.2
Villa	16	31.1	37.7	37.4	38.3	40.7	39.5
Testigo	9	50.2	47.1	51.1	47.8	48.8	47.9
Testigo		45.4	51.2	46.5	49.2	48.9	47.8
Testigo		47.8	49.15	48.8	48.5	48.85	47.85

Cuadro 21 Pruebas de dureza de las probetas con 240 días de exposición.

Con estos datos se estableció por medio estadístico si existió alguna variación significativa en la propiedad mecánica de la dureza con respecto a la zona de monitoreo, para averiguar si la dureza se vio afectada por el grado de corrosión.

Esto se estableció por medio de un análisis normal de varianza, determinando si existe diferencia significativa entre la dureza de las probetas con respecto a las zonas de exposición.

De los datos anteriores se obtuvo lo siguiente:

Sitio de Monitoreo	# de Probetas	Dureza Promedio	Desviación Estándar
Merced	3	39.267	2.958
Xalostoc	3	38.283	5.701
Villa	3	37.339	3.218
Testigo	3	48.492	0.325

Cuadro 22 Dureza promedio y desviación estándar de las probetas expuestas a condiciones atmosféricas.

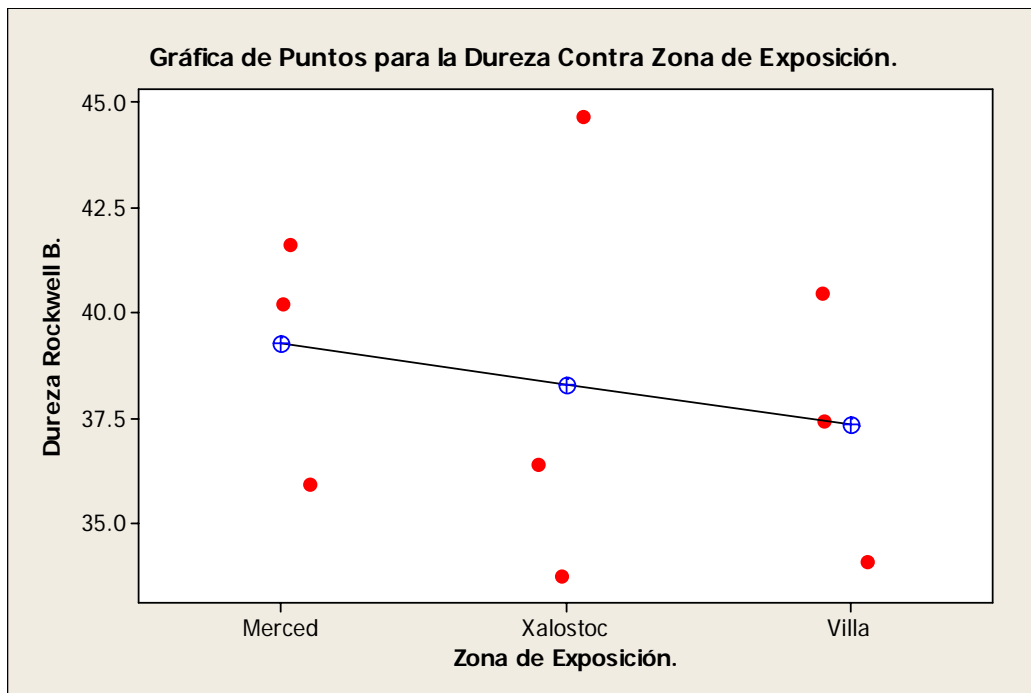
Mediante un análisis normal de varianza de un solo sentido no se detectaron diferencias significativas en la dureza de las probetas expuestas en las 3 zonas de monitoreo.

De lo anterior podemos concluir que la propiedad mecánica de dureza de las probetas no se ve afectada por los tres diferentes ambientes donde fueron expuestas.

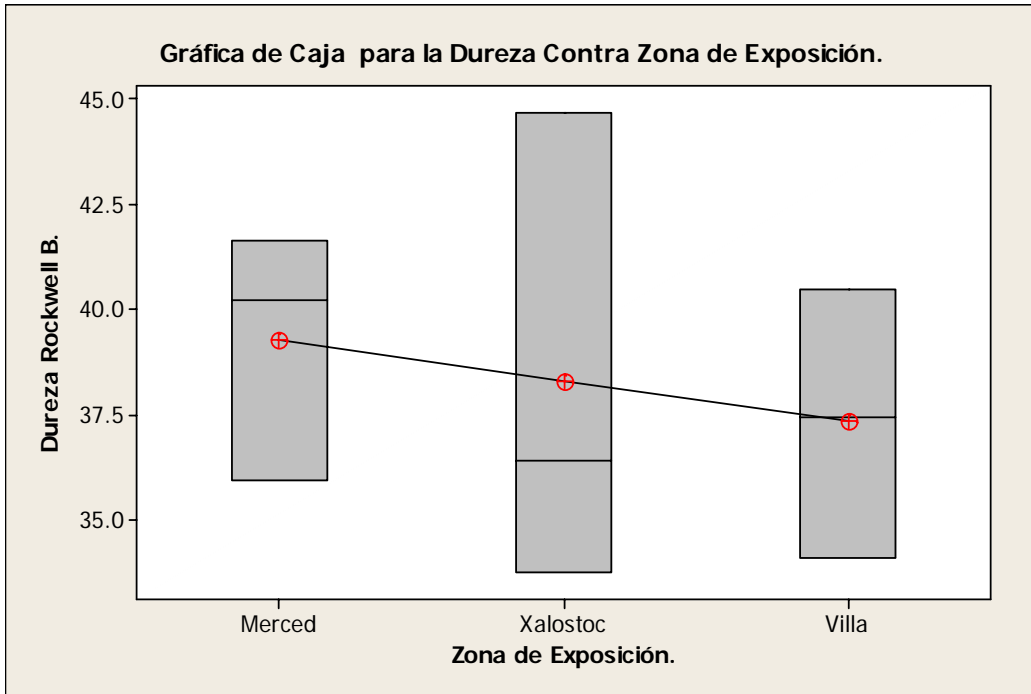
Sin embargo si se detecto diferencia significativa entre las durezas de las probetas expuestas en Xalostoc y Villa de las Flores al hacer las comparaciones de las durezas de las tres zonas de monitoreo con la probeta testigo.

Lo anterior se confirmo al realizar una comparación Tukey la cual nos confirma lo anterior.

En las siguientes gráficas se muestran los valores individuales de la dureza por probeta en una gráfica de puntos y las medias en un diagrama de caja para los valores de la dureza de las probetas de las 3 zonas de monitoreo.

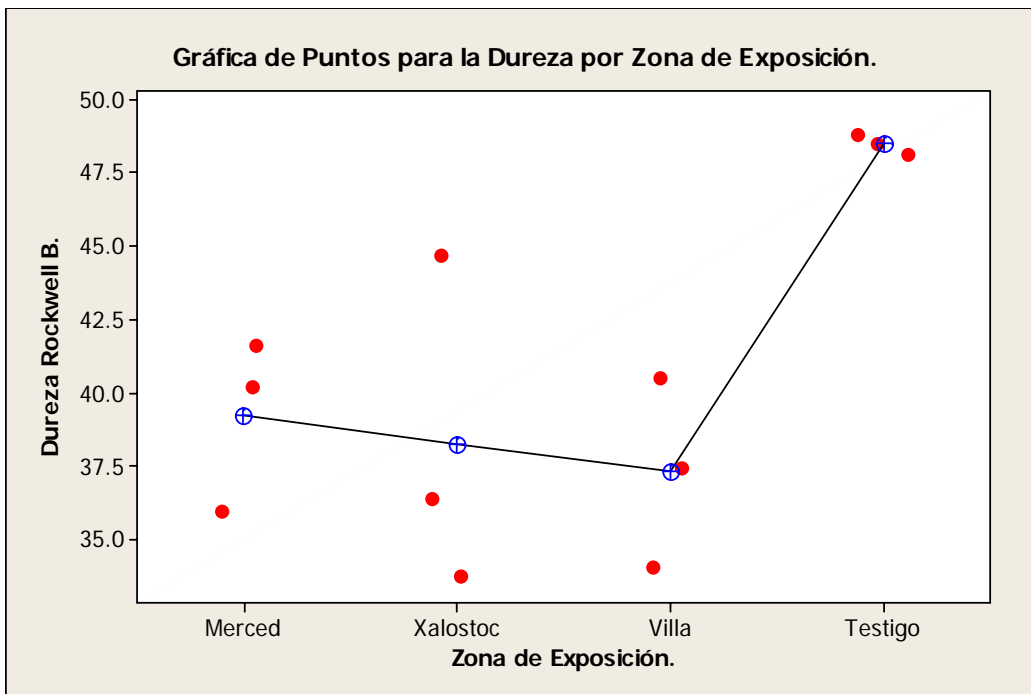


Gráfica 10 Gráfica de puntos para las zonas de exposición por dureza.



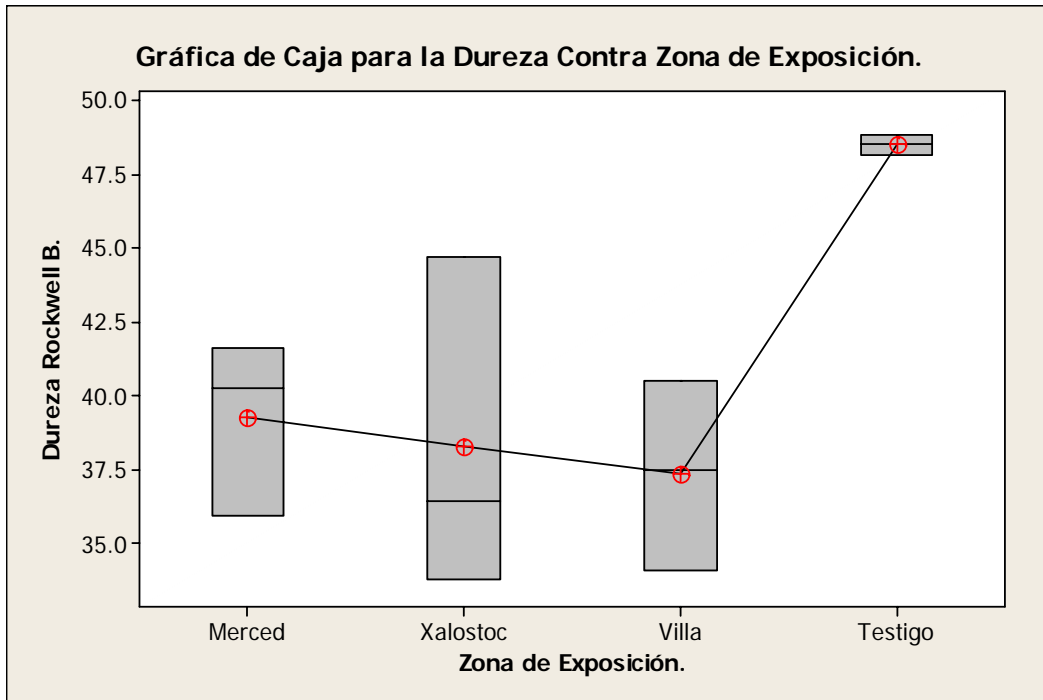
Gráfica 11 Gráfica de caja para la dureza contra las zonas de exposición.

Al hacer el análisis de varianza y las comparaciones con las probetas testigo se obtuvieron las siguientes gráficas donde se muestran los valores individuales de la dureza por probeta en una gráfica de puntos y las medias en un diagrama de caja de las probetas de las 3 zonas de monitoreo y las probetas testigo.



Gráfica 12 Gráfica puntos para las zonas de exposición y testigo por dureza.





Gráfica 13 Gráfica de caja para las zonas de exposición y testigo por dureza.

## 1.10 Porcentaje de Área Afectada por la Corrosión por Picaduras.

En la identificación de las picaduras se establecieron dos métodos el visual y el de líquidos penetrantes.

En el primer método se estableció un porcentaje de área afectado por las picaduras en las probetas que tuvieron una mayor diferencia de peso por cada sitio de exposición, esto debido a que en la exposición atmosférica se observó una corrosión uniforme de la superficie de la mayoría de las probetas, debido a la función de la capa pasiva que se forma sobre esta, siendo muy poco visible los efectos de la corrosión, sino por el cambio de color de la probeta.

Llegando al siguiente resultado:

Probeta	Colocación	alto	Largo	% de Área Afectada
3	Merced	30	30	57
10	Xalostoc	30	30	54
16	Villa	30	30	32
9	Testigo	30	30	0

Cuadro 23 Porcentaje de área afectada por picaduras observables a simple vista en probetas con 204 días de exposición.

En esta prueba las probetas mostraban antes de la exposición ligeras irregularidades en la superficie del metal esto podría haber afectado el área atacada en el conteo pues no puede saberse con seguridad si hubo un crecimiento de estas irregularidades debidas a la corrosión ó al efecto del proceso de limpieza.

La mayoría de las probetas mostraron un cambio de coloración uniforme, al parecer lograron formar una capa pasiva que las protegió de picaduras observables a simple vista, pero después del procedimiento de limpieza de productos de corrosión las probetas con mayor índice de pérdida de peso mostraron zonas con lo que parecían algunas picaduras muy ligeras que es lo que se reporto.

### 1.10.1 Prueba con Líquidos Penetrantes.

Los resultados de la prueba con líquidos penetrantes fueron los siguientes:

Se aplicaron los líquidos según lo estipulado en las instrucciones citadas en el capítulo 4 Material y Métodos, observándose una superficie más limpia y con pocas secciones de color fluorescente en lo que podríamos decir que son picaduras, algunas de estas se encontraban con anterioridad a la exposición atmosférica en la superficie y eran visibles a simple vista y otras que se revelaron a la luz ultravioleta bajo la cual se observa en el último punto.

Lo anterior podría ser el resultado de dos efectos independientes; uno la pérdida de zinc o aluminio de la superficie durante la exposición atmosférica debido a la formación de hidróxidos y disolución de los mismos, lo que da lugar a una capa de óxido protectora a largo plazo en el material (Valdés 1984, oxidación térmica de la aleación Zn Al Cu) pero dejando zonas de la fase  $\beta$  rica en zinc con menor cantidad de zinc lo que originaría pequeñas hendiduras en la superficie que fueron descubiertas nuevamente con el procedimiento de limpieza.

La pérdida de zinc o aluminio de la superficie durante el procedimiento de limpieza química, existe la posibilidad de que la presencia de huecos en la superficie pudiera ser el resultado de los efectos de la limpieza química, que al eliminar pequeñas cantidades de productos de corrosión incrustados y/o pequeñas cantidades de material base que dejarían una superficie porosa.

En ambas, la superficie tendría porosidades donde se introduciría el líquido penetrante y al aplicar el líquido revelador, este sacaría el líquido fluorescente a la superficie produciendo la fluorescencia de la superficie.

En las siguientes fotografías se muestran el aspecto de la probeta en las diversas etapas en el proceso de la aplicación de los líquidos para la identificación de las picaduras.



Fotografía 21 Probeta con el líquido limpiador.



Fotografía 22 Probeta con líquido penetrante.



Fotografía 23 Probeta con líquido penetrante seco.



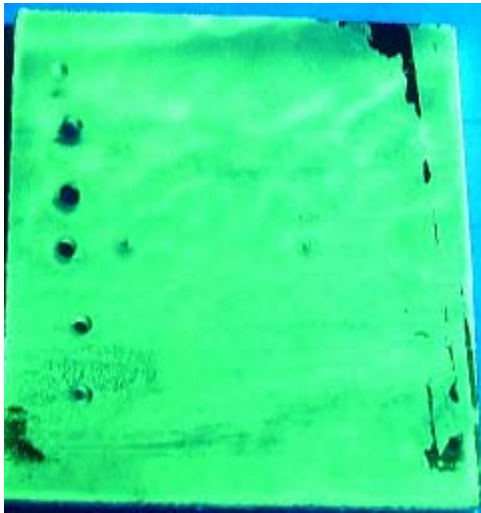
Fotografía 24 Probeta con líquido revelador.

Ahora se explicara cada etapa de la aplicación de los líquidos:

- En la fotografía 21 la probeta después de la limpieza con el líquido SPOTCHECK<sup>®</sup> SKC-S CLEANER/REMOVER.
- En la fotografía 22 la probeta después de aplicar el líquido penetrante, nótese que el líquido penetrante aun esta en forma líquida ZYGLO<sup>®</sup> PENETRANT ZL-27A.
- En la fotografía 23 el líquido penetrante seco quedando una capa opaca de color verde claro.

- En la fotografía 24 la probeta después de aplicar el líquido revelador.

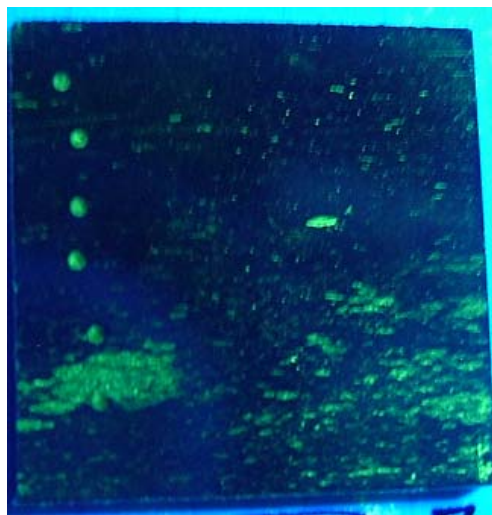
En las siguientes fotografías se muestran los diversos resultados obtenidos en cada método que se experimento en la aplicación de los líquidos sobre la misma probeta, quedando sin duda como el método más apropiado el número 3, obteniéndose con este la mejor definición de las áreas afectadas mediante los indicadores fluorescentes bajo la luz ultravioleta.



Fotografía 25 Probeta después de aplicar revelador y dejar secar y vista con luz ultravioleta.

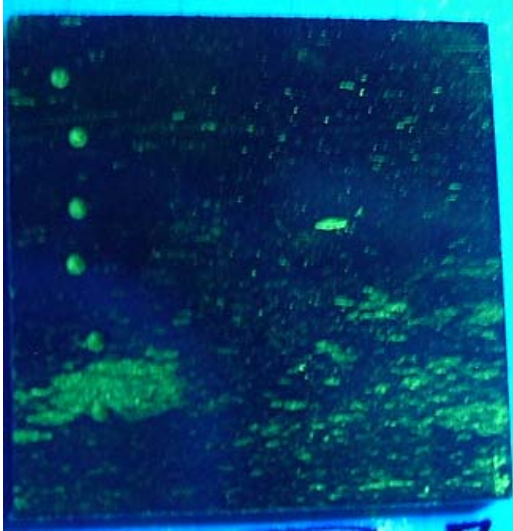


Fotografía 26 Probeta después de aplicar revelador limpiando exceso y dejando secar, vista con luz ultravioleta.

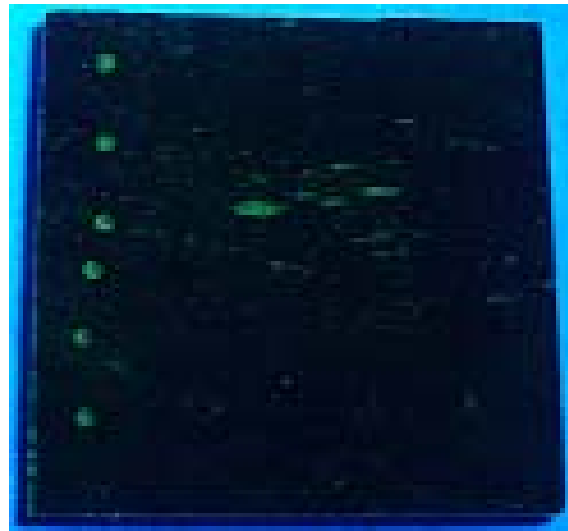


Fotografía 27 Probeta después de aplicar revelador limpiando exceso, dejando secar, aplicando revelador y limpiando excesos, vista con luz ultravioleta.

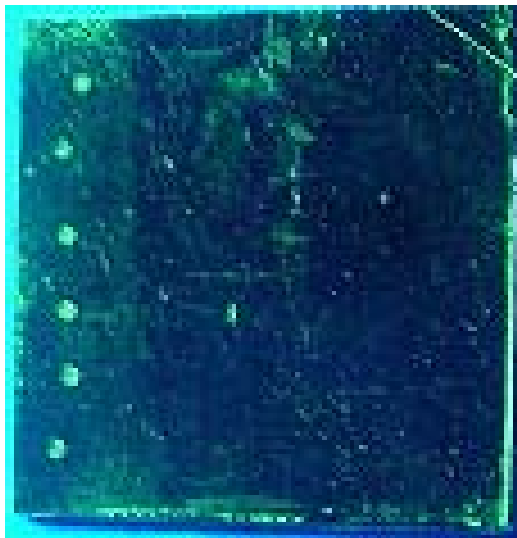
Los resultados del tercer método de aplicación se muestran en las siguientes fotografías:



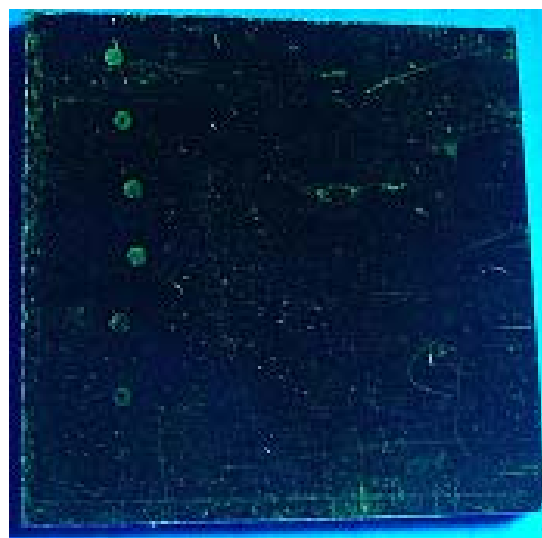
Fotografía 28 Prueba 3 Merced.



Fotografía 29 Prueba 10 Xalostoc.



Fotografía 30 Prueba 16 Villa.



Fotografía 31 Prueba 9 Testigo.

Las probetas se presentan en orden descendente de afectación superficial, siendo las mas afectadas las que muestran una mayor cantidad de fluorescencia bajo la luz ultravioleta (La tonalidad varía debido al ángulo de incidencia del haz de luz sobre la probeta)

La fotografía 28 y la fotografía 30 corresponden a las que muestran mayor indicador fluorescente y a simple vista una mayor afectación en la superficie de la aleación.

La correspondencia de las fotografías con los datos se da en la siguiente tabla:

Fotografía	Probeta	Estación	Tiempo de Exp.	% Grado de Picaduras
28	3	Merced	240 Días	22.41
29	10	Xalostoc	240 Días	10.12
30	16	Villa	240 Días	13.27
31	9	Testigo	s/exp.	4.54

Cuadro 24 Porcentaje de área afectada por picaduras observables con líquidos penetrantes en probetas con 204 días de exposición.

Con lo anterior se puede concluir que las picaduras que ya tenía el material, aceleraron el proceso de picadura al exponerlo a la atmósfera previa limpieza, estas zonas con picaduras y/o fallas en la superficie al parecer fueron el resultado del proceso de rolado como se explica en la parte de descripción del material antes de exposición, las pocas zonas dañadas al parecer aumentaron con el poco tiempo de exposición.

2 Resultados de exposición de la aleación Zn-21%wt Al -2%wt Cu a condiciones severas de salinidad.

### 2.1 Fabricación e identificación de especímenes de prueba.

Las probetas fueron reutilizadas como se había mencionado en el capítulo anterior, estas fueron maquinadas nuevamente del perímetro y las caras fueron lijadas en secuencia con papel de lija de los números 280, 360, 400, 500, y 600 hasta dejar la superficie libre de imperfecciones.

Se identificaron con el grabado del mismo número que le fue otorgado a cada probeta en el experimento anterior, por medio de un rayador de metal con punta de carburo de tuxteno.

### 2.2 Limpieza inicial, registro de peso dimensiones y fotográfico de las probetas antes de exposición.

La limpieza fue un proceso igual que el utilizado para el experimento anterior para eliminar suciedad superficial, asegurando la completa ausencia de grasa u otro contaminante que impida o aumente el grado de corrosión del material en estudio.

En el registro de las medidas como se menciona con anterioridad se usó un micrómetro de puntas intercambiables marca Starrett modelo No.224 Set AA con un rango de 0 a 4 pulgadas.

Se hizo un álbum fotográfico de las probetas después de la limpieza previa a la exposición (fotografía 33 y 34) y del grabado del número de identificación para llevar una bitácora del proceso de corrosión antes y después de la exposición.



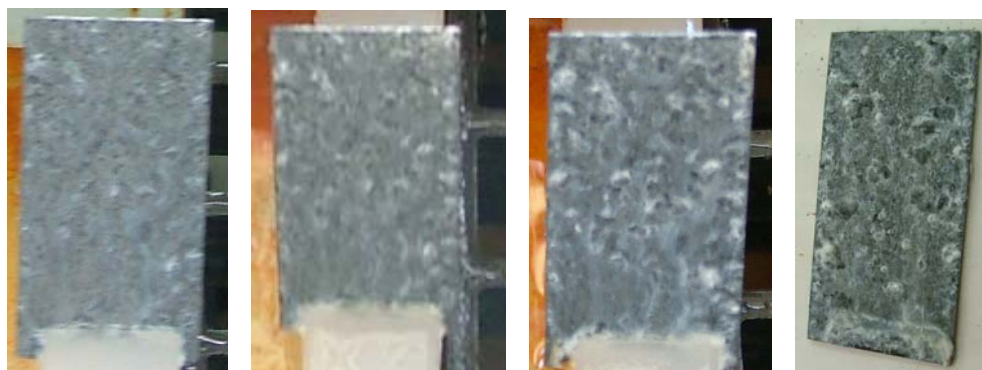
Para el registró del peso de las probetas, estas se sometieron a un proceso de desecación durante un periodo de 2 días, evitando así cualquier rastro de humedad en ellas que modificara su peso real.

Probeta	Alto (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Peso (g)
1	71.882	35.8648	1.26435556	2578.03355	17.3968
2	71.9666667	35.8563333	1.48448889	2580.46079	20.4756
4	71.9328	35.9664	1.41393333	2587.16386	19.5064
5	71.882	35.8648	1.35466667	2578.03355	18.7229
6	71.9836	35.8394	1.39982222	2579.84903	19.4078
7	71.9158667	35.8478667	1.28128889	2578.0304	17.6089
8	71.9666667	35.8732667	1.41111111	2581.67942	19.473
11	71.9412667	35.8817333	1.45908889	2581.37735	20.1034
12	72.0428667	35.8902	1.43368889	2585.63289	19.7419
13	72.0174667	35.9240667	1.45344444	2587.16027	20.0847
14	71.9582	35.9240667	1.40828889	2585.03117	19.5225
15	72.009	35.9156	1.25588889	2586.24644	17.3298

Cuadro 25 Pesos y medidas de las probetas para exposición en cámara de neblina salina.

### 2.3 Recolección de datos visuales durante la prueba.

La recolección de datos de las probetas fue una inspección visual del estado de estas y un registro fotográfico del deterioro en las primeras etapas de la corrosión, así como un registro de la temperatura, pH de la solución salina utilizada en la prueba y condiciones de trabajo de la cámara salina tal como lo indica la norma ASTM B-117 estos datos se podrán ver en el anexo c.



Fotografía 32 Probeta después de 3, 5, 12 y 14 días de exposición.

#### 2.4 Levantamiento de probetas.

El levantamiento de las probetas en esta segunda etapa del experimento se realizo al cumplirse las 1000 horas de exposición continua en la cámara de niebla salina, se siguieron las instrucciones para el levantamiento según la norma ASTM B-117. Fotografía 35.

#### 2.5 Limpieza de productos de corrosión y registro de peso de las probetas.

La limpieza de los productos de corrosión de las probetas con exposición en cámara de niebla salina se realizo con las sustancias recomendadas en la norma ASTM G-1 (Cuadro 13 capítulo 4) y se hicieron las siguientes observaciones durante estos procesos de limpieza.

Observaciones hechas en el momento de realizar la limpieza química de los productos de corrosión.

Primer lavado, sustancia C.9.1.

Se ennegreció la superficie del material al contacto con la sustancia C.9.1, formando una ligera capa de color negro pero soluble al agua con que se enjuagó el material después de que transcurrió el tiempo indicado de inmersión en la sustancia 1, pero en este caso no se vieron removidos completamente los productos de corrosión de la superficie, quedando como en la fotografía 36 que muestra como quedo la superficie del metal y parte de los productos de corrosión de color amarillo debido al trióxido de cromo y secciones donde quedo blanquecino debido a productos de corrosión.

Segundo lavado, sustancia C.9.2.

No se observó reacción violenta como en el caso anterior solo la formación de algunas burbujas de gas (al parecer H) sobre la superficie del material y un ligero cambio debido al desprendimiento de los productos de corrosión pero quedando todavía gran parte de estos como se muestra en la fotografía 37, el color de los productos de corrosión siguió siendo blanquecino pero quitó la mayoría de las zonas teñidas de amarillo debido a la sustancia de limpieza anterior, esto se vio después del enjuague posterior a la inmersión en la sustancia C.9.2.

Tercer lavado, sustancia C.9.3.

El material se volvió de un color gris más claro al desprender casi la totalidad de los productos de corrosión, durante la reacción en la inmersión, la sustancia C.9.3 se observó una reacción relativamente violenta, quedando después del enjuague zonas oscuras dentro de las picaduras como se muestra en la fotografía 38.

Cuarto lavado, sustancia C.9.5.

Durante la inmersión el material desprendió una considerable cantidad de burbujas de gas, resultando en un color gris claro, aclarando un poco las zonas oscuras que quedaron en la limpieza anterior en el material después de enjuagar y mantener en desecado el material, cabe hacer notar que este lavado se hizo a temperatura ambiente, fotografía 39.

Quinto lavado, sustancia C.9.6.

En este lavado el metal desprendió gas pero en una cantidad menor que en la anterior, pero volvió la superficie del material a un gris más claro casi terminó con las zonas oscuras de las picaduras, fotografía 40.

Nota.

En este ciclo de limpiezas la sustancia con mayor acción de desprendimiento de productos de corrosión fue la C.9.3 de la norma ASTM G-1 (Cuadro 4.6 Capítulo 4).

Probeta 4 antes y después de ser expuesta en cámara de niebla salina, y en las diversas etapas de limpieza de los productos de corrosión.



Fotografía 33 Probeta 4 antes de exposición en cámara salina parte anterior.



Fotografía 34 Probeta 4 antes de la exposición en cámara salina parte posterior.



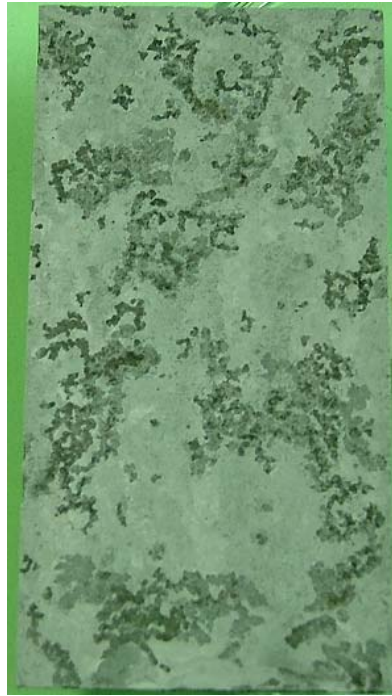
Fotografía 35 Probeta 4 después de exposición en cámara salina.



Fotografía 36 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.1.



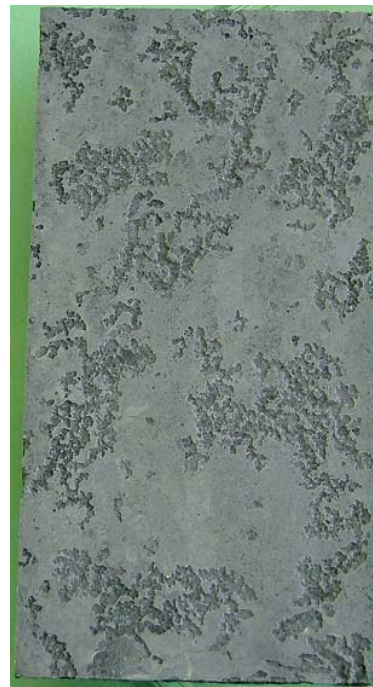
Fotografía 37 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.2.



Fotografía 38 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.3.



Fotografía 39 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.5.



Fotografía 40 Probeta 4 después de la limpieza con la sustancia C.9.6.

## 2.6 Diferencias Peso para Análisis Estadístico.

El registro de los pesos se hizo antes y después de la exposición en cámara de niebla salina así como después de cada lavado con las sustancias recomendadas en la norma ASTM G-1.

Los datos en negrillas son probetas que se dejaron como testigos para comparar los pesos y así ver el grado de corrosión que sufrieron las probetas con la exposición en cámara de niebla salina.

Probeta	Peso	Peso de exp.	Lavado 1	Lavado 2	Lavado 3	Lavado 4	Lavado 5	Dif de peso
<b>1</b>	<b>17.3968</b>	<b>17.3449</b>	<b>17.3862</b>	<b>17.3856</b>	<b>17.3814</b>	<b>17.2032</b>	<b>17.1985</b>	<b>0.1983</b>
2	20.4756	20.6622	20.4622	20.3936	19.8972	19.6072	19.5981	0.8775
4	19.5064	19.6444	19.4946	19.4059	18.8857	18.6159	18.6083	0.8981
<b>5</b>	<b>18.7229</b>	<b>18.7214</b>	<b>18.7066</b>	<b>18.7059</b>	<b>18.7004</b>	<b>18.5527</b>	<b>18.5477</b>	<b>0.1752</b>
6	19.4078	19.4967	19.3626	19.2274	18.8417	18.617	18.6008	0.807
7	17.6089	17.8	17.6008	17.4895	17.1158	16.7231	16.7157	0.8932
8	19.473	19.6283	19.4204	19.3302	18.9331	18.6613	18.6581	0.8149
11	20.1034	20.2718	20.0588	19.9921	19.5475	19.3219	19.3151	0.7883
12	19.7419	19.8774	19.6937	19.6271	19.1392	18.9916	18.9818	0.7601
13	20.0847	20.2684	20.0362	19.9633	19.4932	19.2005	19.1939	0.8908
14	19.5225	19.6852	19.5015	19.4208	18.9517	18.6679	18.665	0.8575
<b>15</b>	<b>17.3298</b>	<b>17.3277</b>	<b>17.3064</b>	<b>17.3002</b>	<b>17.2972</b>	<b>17.058</b>	<b>17.0561</b>	<b>0.2737</b>

Cuadro 26 Pesos de las probetas después de limpieza de productos de corrosión con los líquidos recomendados en ASTM G-1.

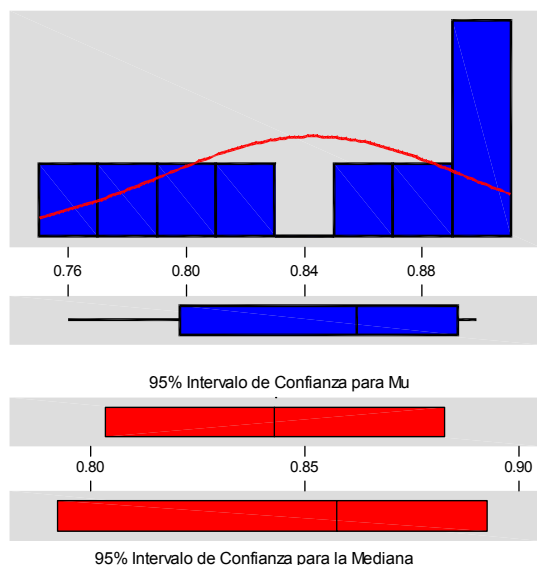
Del análisis estadístico de los datos obtenidos de la pérdida de peso por las probetas se obtuvieron los siguientes resultados, al aplicar un método de análisis estadístico básico para establecer el comportamiento del metal en esta prueba; nos da lo siguiente:

Variable	# de Probetas	Media	Mediana	Media Truncada	Desviación Estándar
Perdida de peso	9	0.8430	0.8575	0.8430	0.0515

Variable	Cuadrado del Error Medio	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
Perdida de peso	0.0172	0.7601	0.8981	0.7977	0.8920

Cuadro 27 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.

## Estadística Descriptiva



Variable: Pérdida de Peso

Prueba de Normalidad Anderson-Darling

A-Cuadrada: 0.418  
Valor P: 0.255

Media 0.843044  
Desviación Estándar 0.051468  
Varianza 2.65E-03  
Asimetría -4.2E-01  
Curtosis -1.48708  
N 9

Mínimo 0.760100  
1er Cuartil 0.797650  
Mediana 0.857500  
3er Cuartil 0.892000  
Máximo 0.898100

95% Intervalo de Confianza para Mu  
0.803483 0.882606

95% Intervalo de Confianza para Sigma  
0.034764 0.098601

95% Intervalo de Confianza para la Mediana  
0.792562 0.892653

Gráfica 14 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.

Se realizó un análisis normal de varianza de un solo sentido para detectar si existe diferencia significativa entre la pérdida de peso de las probetas expuestas a condiciones severas de salinidad y las que se mantuvieron como testigo, obteniendo lo siguiente:

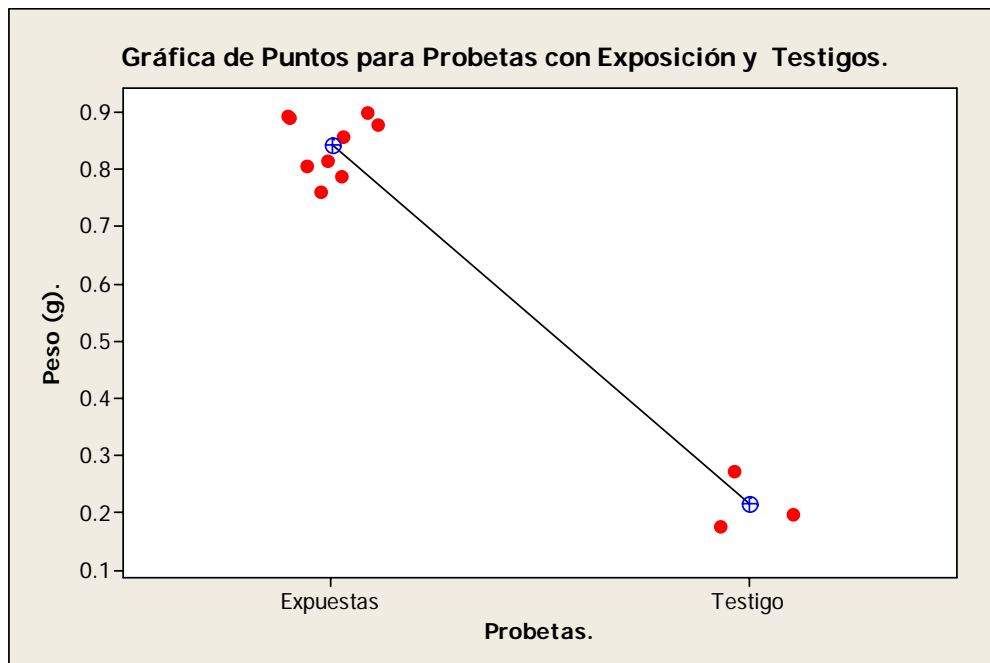
Probetas.	# de Probetas	Pérdida de Peso Promedio	Desviación Estándar
Expuesta.	9	0.84304	0.05147
Testigo.	3	0.21573	0.05151

Cuadro 28 Pérdida de peso promedio y desviación estándar de las probetas expuestas y testigos.

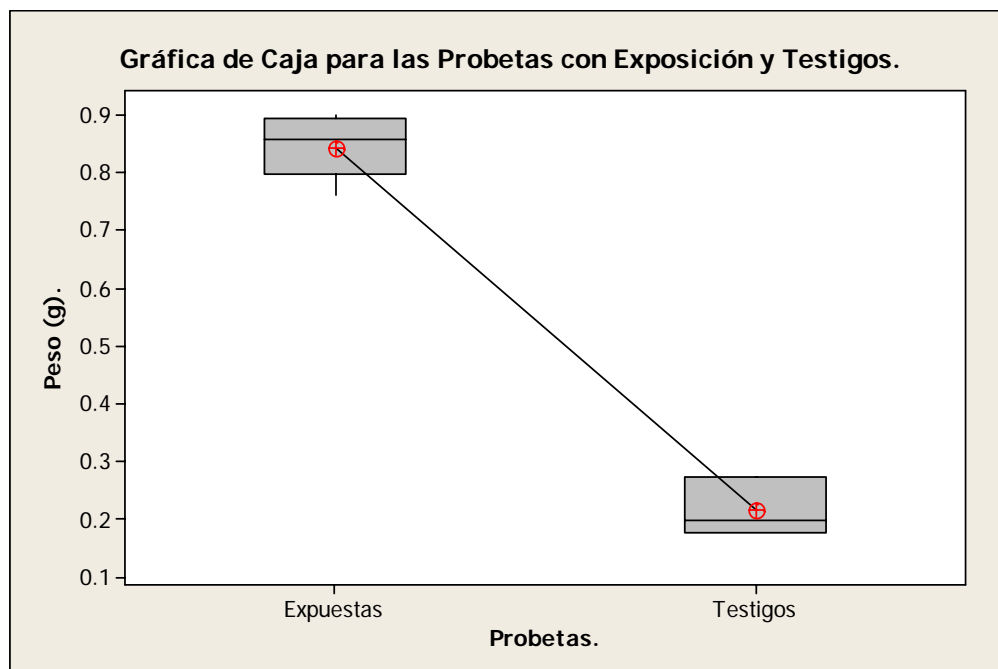
Del análisis de varianza se observa que existe una diferencia de peso altamente significativa entre las probetas expuestas y las testigos.

De lo anterior se establece que existe diferencia significativa entre la pérdida de peso de las probetas expuestas y las testigos debido a la corrosión y al proceso de limpieza de productos de corrosión.

En las siguientes graficas se muestran los valores individuales en una gráfica de puntos y las medias en un diagrama de caja para los valores de pérdida de peso.



Gráfica 15 Gráfica de puntos para probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.



Gráfica 16 Gráfica de cajas para probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.



## 2.7 Porcentaje de área afectada por la corrosión por picaduras.

En esta sección se hizo una revisión del área afectada por la corrosión debida a la exposición en cámara de niebla salina similar a la que se propone en la norma ASTM G-46.

Probeta	Alto (mm)	Largo(mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	% de Área Afectada
1	71.882	35.8648	2578.03355	0
2	71.9666667	35.8563333	2580.46079	58.6805556
4	71.9328	35.9664	2587.16386	72.2222222
5	71.882	35.8648	2578.03355	0
6	71.9836	35.8394	2579.84903	68.4027778
7	71.9158667	35.8478667	2578.0304	31.25
8	71.9666667	35.8732667	2581.67942	53.8194444
11	71.9412667	35.8817333	2581.37735	58.6805556
12	72.0428667	35.8902	2585.63289	69.0972222
13	72.0174667	35.9240667	2587.16027	67.7083333
14	71.9582	35.9240667	2585.03117	73.2638889
15	72.009	35.9156	2586.24644	0

Cuadro 29 Porcentaje de área afectada por picaduras observables a simple vista en probetas con 1000 hrs. de exposición.

Del análisis de la forma de las picaduras presentadas en las probetas se llega a la conclusión de que las probetas presentan tres tipos diferentes de picaduras:

Tipo A: estrecha y profunda.

Tipo B: elíptica.

Tipo C: amplia y baja.

Para mayor información de las diversas formas de las picaduras referirse a la norma ASTM G-46 figura 1.

## **CAPÍTULO 6.**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

1 Exposición de la aleación Zn-21%wt Al-2%wt Cu a tres ambientes atmosféricos diferentes.

#### 1.1 Pérdida de Peso por Exposición Atmosférica.

Del análisis estadístico de la pérdida de peso de las probetas expuestas a tres ambientes diferentes, se concluye que no existe diferencia significativa en las diferentes zonas de exposición. Esto se puede deber a que la capa protectora que se forma en esta aleación, logro compactarse lo suficiente en el tiempo de exposición, para brindar una protección suficiente para que no se desgastara el material debido a la corrosión, de tal manera que no hubo diferencia significativa de pérdida de peso entre las zonas de exposición.

En este caso, se observo por medio de la microscopia de barrido electrónico que las probetas expuestas en Villa de las Flores desarrollaron una capa protectora de menor espesor, respecto a las otras dos zonas de exposición, pero lo suficiente para protegerla en los 240 días de exposición, esta capa protectora al parecer se vio afectada por el medio ambiente, debido a que durante el proceso de limpieza química perdió una mayor cantidad de peso por la formación de óxidos, o pérdida de material base.

#### 1.2 Prueba de Difracción de Rayos X.

La aplicación de dicha prueba a las probetas resulto inocua, pues la naturaleza de los óxidos de aluminio es tal, que no es posible la identificación de los diversos óxidos por este medio, pues son amorfos y al efectuarse el estudio de difracción de los rayos X estos no logran dar una lectura de los elementos superficiales, dando como resultado solo la frecuencia de los elementos que componen la aleación tal como se mostró en las graficas resultantes, por lo que se recomienda hacer un análisis químico del agua que se utilizó para la primer limpieza después de haber retirado las probetas de los bastidores de

exposición, para identificar los hidróxidos y contaminantes que pudieran reaccionar con esta aleación, por lo cual se deja propuesto este estudio como una línea de investigación nueva.

### 1.3 Microscopia de Barrido Electrónico.

En este estudio se observaron los productos de corrosión sobre las probetas expuestas durante 240 días en los 3 distintos ambientes (urbano, industrial y rural) además de una que no estuvo en exposición la que llamamos testigo.

De las observaciones hechas en las 3 probetas expuestas y la testigo se puede concluir que:

Tras un proceso de limpieza (solo agua para eliminar polvo), las probetas fueron sometidas a este estudio, las observaciones de la superficie de estas probetas mostraron diferentes grados en el crecimiento de la capa pasiva que protege a este material dependiendo de la zona donde fue expuesta.

En la probeta 9 que se denominó testigo se observaron diversas discontinuidades (ralladuras e impurezas superficiales) en la superficie, que durante una exposición pudieran tener efectos sobre el comportamiento de la corrosión comportándose como un potenciador para esta.

Se presumen las mismas condiciones para las demás probetas, debido a que todas estas fueron obtenidas de la misma placa que la testigo, suponiendo una uniformidad en el material y condiciones de este antes de la exposición.

En la probeta 3 zona de exposición 1, la Merced, la superficie de la probeta mostró una capa de óxido blanquecino (óxido de zinc) uniforme en aumentos de 1.5 kX, al parecer mas gruesa que en las probetas expuestas en los otros dos sitios, pero al tomar un acercamiento a mayor número de aumentos se observaron algunas imperfecciones en esta capa de óxido mostrando la existencia de óxido de aluminio bajo la capa blanquecina como se mencionó en estudios anteriores (L. Hernández 1981-2).

En la probeta 10 zona de exposición 2, Xalostoc, la superficie de la probeta mostró posibles incrustaciones de materiales extraños que potenciaron la formación de picaduras, así como un posible proceso de repasivación de la superficie en partes donde el óxido superficial sufrió daños por ralladuras, mismas que volvían a ser cubiertas con la capa de óxido que eventualmente volvería a cubrir el metal en la zona dañada; el grosor de la capa de óxido se considera menor que en la Merced, debido posiblemente a que la lluvia resultó ser más agresiva en esta zona industrial que en la urbana, disolviendo los hidróxidos y precipitándolos al suelo en lugar de que se quedaran en la superficie de la probeta para engrosar la capa de óxido protector como sucedió en la zona de la Merced.

En la probeta 16 zona de exposición 3, Villa de las Flores, la superficie de la probeta mostró una capa de óxido aún en formación, posiblemente debido a que el ambiente de exposición no resultó tan agresivo como en las dos zonas de exposición anteriores, fueron mas notorias las áreas donde la precipitación de los hidróxidos de zinc no cubrían totalmente las zonas de fase alfa, ricas en aluminio mostrando aun el óxido de aluminio (en las fotos color negro) esto en los diferentes aumentos a los que fue observado.

De lo anterior se concluye que el doble mecanismo de corrosión establecido con anterioridad (L. Hernández 1981-2) se cumple con la exposición atmosférica total, pero se ve afectado por la contaminación del tipo de ambiente donde el material fue expuesto, afectando la velocidad e intensidad en que este mecanismo se presenta.

También se considera que estos resultados pudieran variar con el tiempo de exposición, debido a que, estudios de exposición en otros metales tienen duración de uno a 10 años de exposición, con los respectivos levantamientos; pero este estudio puede establecer una base de lo que pudiera suceder en las etapas tempranas de una exposición más prolongada, como la que se hizo en la siguiente sección de este estudio, por medio de la exposición en cámara de neblina salina, siendo esta una exposición acelerada.

#### 1.4 Dureza.

El análisis estadístico de las pruebas de dureza de las probetas expuestas a tres ambientes (urbano, industrial y rural), no mostró diferencia significativa. Lo que indica que la dureza no se ve afectada por la zona de exposición.

Pero el análisis estadístico por medio de una comparación Tukey de la dureza entre las tres zonas de exposición y la probeta testigo, revelo la existencia de una diferencia significativa entre la testigo y las probetas de las zonas de exposición 2 y 3 (Xalostoc y Villa de las Flores), posiblemente debido a que la capa de productos de corrosión aún estaba en formación y no era uniforme en toda la superficie, al someter las probetas a los procesos de limpieza de productos de corrosión, la superficie pudo quedar un poco porosa, variando el grado de la dureza debido al grado de corrosión que tuvo la superficie en el lugar donde se aplico la carga en la prueba de dureza.

Con la probeta de la zona de exposición 1 (Merced) al ser más uniforme la capa de productos de corrosión y al aplicarle el procedimiento de limpieza con productos químicos, esta quito la mayoría de los óxidos quedando el material base solamente sin ser muy poroso y en la testigo su capa de óxido no era afectada por los contaminantes ambientales, la capa era más ligera y se retiro con el procedimiento de limpieza con productos químicos, quedando el material base más uniforme, no afectando la dureza.

#### 1.5 Porcentaje de Área Afectada por Picaduras.

En esta parte del experimento como se menciona en el capítulo 4 “Material y Métodos”, el material expuesto ya contaba con una capa de óxido protector formada durante el almacenamiento, esto para mantener lo mas cercano a la realidad las condiciones de exposición; al observar las probetas de cerca antes de la exposición, mostraban algunas imperfecciones en su superficie debidas al proceso de manufactura, estas imperfecciones pudieron actuar como un acelerador en el proceso de la formación de picaduras, en la exposición

atmosférica las picaduras resultaron ser superficiales y de tamaño reducido, se considera que esto se debió a que se cumplió el ciclo de corrosión de este material para que se desarrollara la capa de óxido protectora y que impidió que las picaduras crecieran más notablemente, los porcentajes de área afectada por la corrosión son aproximados debido al método empleado para su evaluación, se considera que para tener una mejor perspectiva de esto, posiblemente sería necesario periodo más prolongado de exposición para evaluar en diferentes tiempos.

#### 1.5.1 Prueba con Líquidos Penetrantes.

La prueba de líquidos penetrantes, mostró que la superficie quedó con una porosidad no perceptible a simple vista después del procedimiento de limpieza de los productos de corrosión, en las diversas pruebas de aplicación de los líquidos penetrantes se mostraba una total impregnación de estos en la superficie del material y solo modificando el procedimiento de aplicación se pudieron observar las áreas con picaduras más definidas, estableciendo que el material no se vio muy afectado por estas, la porosidad de la superficie del material se debió al procedimiento de limpieza de los productos de corrosión.

## 2 Exposición en Cámara de Niebla Salina.

El material al ser expuesto en la cámara salina sufrió una corrosión altamente visible por varias razones.

### 1.- El tiempo de duración de la prueba.

La duración de esta prueba piloto fue establecida en 1000 horas, tomando como referencia el tiempo para materiales con superficie protegida a la corrosión, aunque en este tipo de prueba no hay una equivalencia directa establecida exactamente entre la duración de una prueba atmosférica y una en cámara salina. Se encontraron estudios desde 250 hrs. para pruebas de calidad en regaderas para baño, lo cual nos da una idea de la duración de un objeto en contacto con agua y periodos de sequedad con una vida útil de más de 250 horas en cámara salina.

### 2.- El mecanismo de corrosión establecido en estudios anteriores no cumplió con el ciclo de humedad y sequedad.

Según se estableció en estudios previos (L. Hernández 1981-2), el doble mecanismo de corrosión en este material requiere de periodos de sequedad para llegar a formar por deposición y compactación de los hidróxidos de zinc la capa pasiva en la superficie del metal, al carecer prácticamente de estos periodos de sequedad en la cámara de neblina salina, los productos de corrosión del zinc resultaron ser excesivamente porosos, quedando partículas de agua atrapadas entre estos espacios, los que continuaron creciendo y formando picaduras muy pronunciadas y de varios tipos, solo pequeñas porciones de la superficie no fueron afectadas por la corrosión en alto grado, debido a que esta superficie se compone principalmente de la fase alfa, la cual esta compuesta principalmente de aluminio, y este, formo su capa pasiva de forma inmediata, luego sobre la capa pasiva de aluminio se deposito una gran cantidad de hidróxidos de zinc, que fueron arrastrados por la humedad durante la prueba, creando una capa blanca no uniforme sobre toda la superficie de la

probeta, solo donde se creó la capa de óxido de aluminio no se formaron picaduras visibles quedando la superficie prácticamente intacta.

Lo anterior, está en concordancia con los estudios sobre la corrosión del zinc realizados (Torres Villaseñor, 1985) estableciendo que la ganancia de peso, es debida principalmente a la corrosión de la fase rica en zinc, la corrosión termina cuando se forma la capa pasiva en la superficie y/o cuando hay una capa de óxido de aluminio en la superficie.

Otro estudio de la corrosión del zinc en exposición por inmersión en una solución de cloruro de sodio, (Genescá J. 1984) estableció que la parte más activa de esta aleación es la fase beta rica en zinc.

Debido a este comportamiento se considera que este material no sería de mucha utilidad en condiciones de alta humedad salubre.

Se realizó un estudio estadístico básico de la pérdida de peso de las probetas para establecer los máximos, mínimos y medias entre las probetas expuestas en la cámara, solo se realizó la comparación Tukey entre estas y las probetas testigo y resultó con una diferencia altamente significativa, lo que indica que esta prueba afectó demasiado al material expuesto.

En síntesis el material se comportó como se esperaba durante el periodo de exposición en las tres zonas de exposición elegidas para esta prueba, resistente a la corrosión prácticamente sin picaduras, por lo que se estima que sería un buen sustituto económico del aluminio estructural utilizado en aplicaciones arquitectónicas. Pero no es recomendable en ambientes con una humedad muy alta con alto contenido de sal y en su caso podría ser utilizado con un recubrimiento para la protección contra la corrosión en ambiente salino.



## ANEXO A. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.

En este anexo se presentan los análisis estadísticos utilizados en el desarrollo del presente trabajo, separándolos por tipo de exposición y tipo de prueba.

### 1 Exposición atmosférica.

#### 1.1 Porcentaje de pérdida de peso.

Del análisis estadístico de los datos se obtuvieron los siguientes resultados:

Nuestra hipótesis nula es que no hay variación significativa en la pérdida de peso debida a la zona de exposición:

$$H_0: \mu_m = \mu_x = \mu_v = \mu$$

La hipótesis alternativa será que al menos media una será diferente:

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Por medio de un análisis normal de varianza (ANOVA), se tendrán las siguientes consideraciones:

Los datos son el resultado de un experimento bien controlado donde los únicos factores que pueden variar son el factor a estudiar y la variación natural del sistema.

El tratamiento de los datos es completamente al azar para la distribución uniforme de las posibles variaciones aleatorias naturales del sistema debida a factores que no se pueden controlar.

Al aplicar el método de análisis ANOVA al problema a través del programa minitab nos da como resultado la siguiente información:

Análisis de varianza para perdida de peso.					
Fuente de variación	G. L.	S. C.	C. M.	F	P
% de perdida de peso	2	0.0000283	0.0000141	0.87	0.466
Error	6	0.0000976	0.0000163		
Total	8	0.0001259			

Cuadro 30 Análisis normal de varianza aleatoria.

95% intervalo individual de confianza para la media.  
Basado en una desviación estándar en pool.

Nivel	N	Media	Desv. Est.	
1	3	0.015436	0.001215	(-----*-----)
2	3	0.015992	0.006219	(-----*-----)
3	3	0.011984	0.002939	(-----*-----)

Desv. Est. en pool= 0.004033

-----+-----+-----  
0.0100 0.0150 0.0200

Cuadro 31 Comparación de los intervalos de confianza.

Intervalo	Merced-Xalostoc	Merced-Villa	Xalostoc-Villa
Significancia	Ns	ns	ns

Cuadro 32 Niveles de significancia entre los intervalos.

Siendo: ns no hay significancia.

\* hay diferencia significativa.

Comparación Tukey dos a dos.

Rango de error de Frecuencia = 0.0500

Rango de error individual = 0.0220

Valor critico = 4.34

Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón).

	Merced	Xalostoc
Xalostoc	-0.010661 0.009548	
Villa	-0.006653 0.013556	-0.006097 0.014113

Cuadro 33 Comparaciones Tukey.

Comparación de Fisher comparación dos a dos.

Rango de error de Frecuencia = 0.109

Rango de error individual = 0.0500

Valor critico = 2.448

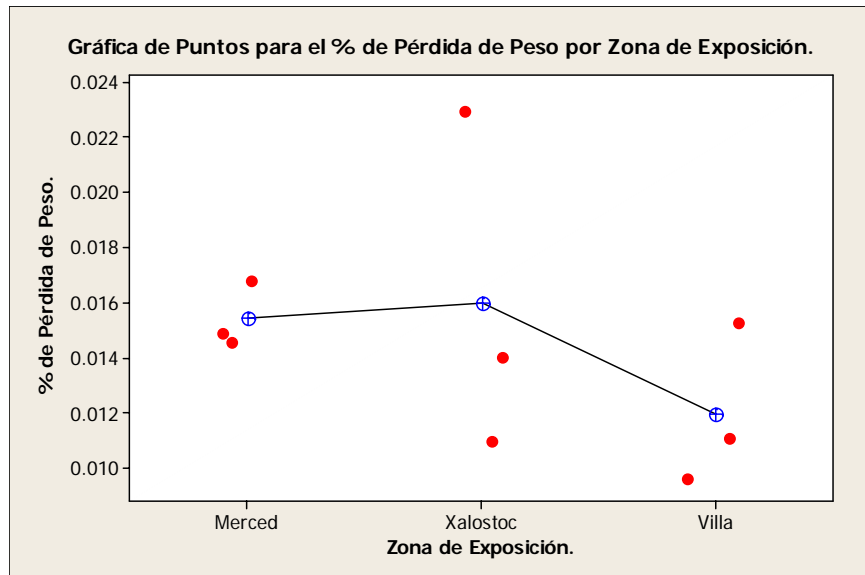
Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón).

	Merced	Xalostoc
Xalostoc	-0.008617 0.007504	
Villa	-0.004609 0.011512	-0.004053 0.012068

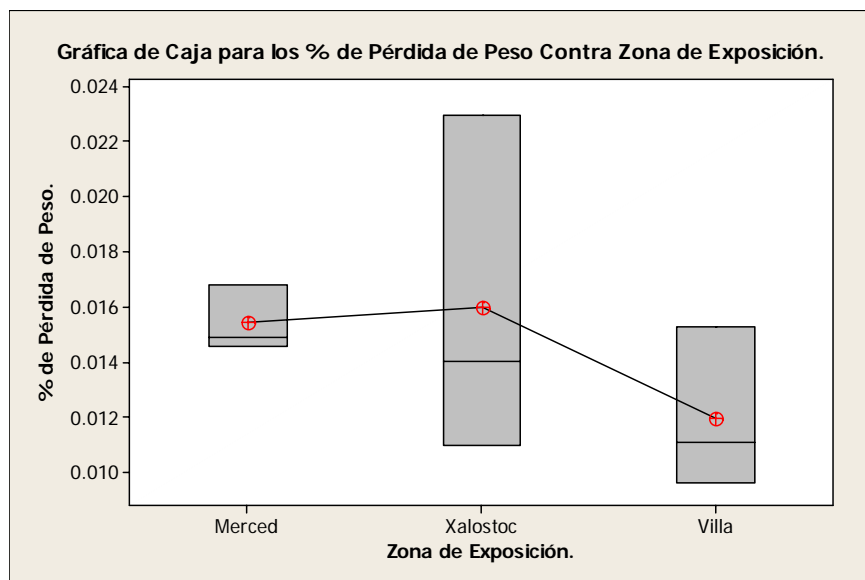
Cuadro 34 Comparación Fisher.

De lo anterior podemos concluir que no hay diferencia significativa en la pérdida de peso debida a la zona de exposición al comparar estas entre si.

Esto lo podemos ver en las siguientes gráficas.



Gráfica 17 Gráfica de puntos para el % de peso para las 3 zonas de exposición atmosférica.



Gráfica 18 Diagrama de caja para la pérdida de peso en las 3 zonas de exposición.

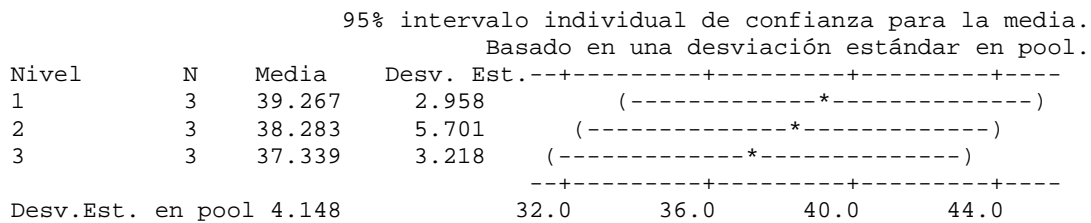
## 1.2 Análisis estadístico de las pruebas de dureza.

Con estos datos se estableció por medio estadístico si existió algún cambio en la propiedad mecánica de la dureza con respecto a la zona de monitoreo, en caso de ser afectada la dureza por el grado de corrosión.

Al aplicar el método de análisis ANOVA al problema a través del programa minitab nos da como resultado la siguiente información:

Análisis de Varianza para la Dureza.					
Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	F	P
Dureza	2	5.6	2.8	0.16	0.854
Error	6	103.2	17.2		
Total	8	108.8			

Cuadro 35 Análisis normal de varianza aleatoria.



Cuadro 36 Comparación de los intervalos de confianza.

Intervalo	Merced-Xalostoc	Merced-Villa	Xalostoc-Villa
Significancia	Ns	ns	ns

Cuadro 37 Niveles de significancia entre los intervalos.

Siendo: ns no hay significancia.

\* hay diferencia significativa.

Comparación Tukey dos a dos.

Rango de error de frecuencia = 0.0500

Rango de error individual = 0.0220

Valor Critico = 4.34

Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón).

	Merced	Xalostoc
Xalostoc	-9.409 11.376	
Villa	-8.465 12.320	-9.448 11.337

Cuadro 38 Comparaciones Tukey.

Comparación Fisher dos a dos

Rango de error de frecuencia = 0.109

Rango de error individual = 0.0500

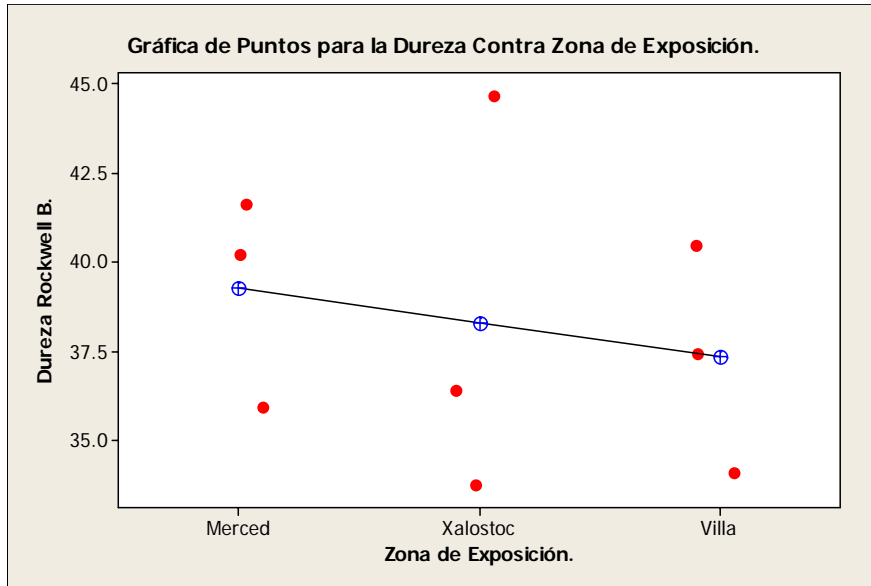
Valor critico = 2.448

Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón).

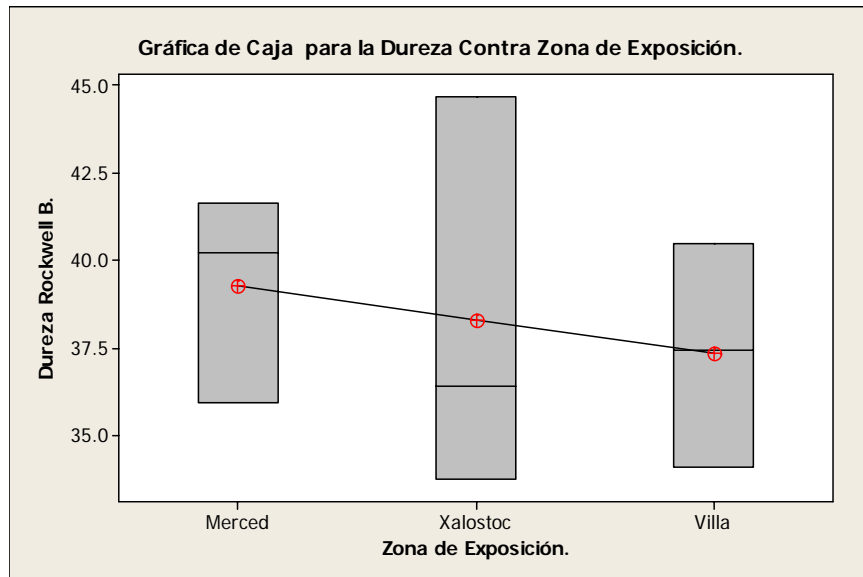
	Merced	Xalostoc
Xalostoc	-7.307 9.273	
Villa	-6.362 10.218	-7.346 9.234

Cuadro 39 Comparaciones Fisher.

De lo anterior podemos concluir que no existe diferencia significativa en la propiedad mecánica de dureza entre las probetas expuestas en los tres diferentes ambientes.



Gráfica 19 Gráfica de puntos para la dureza en las 3 zonas de exposición.



Gráfica 20 Gráfica de caja para la dureza en las 3 zonas de exposición.

### 1.2.1 Análisis de la dureza de las probetas expuestas y la probeta testigo.

Ahora se analizará si existe diferencia significativa en la dureza de las probetas expuestas y la probeta testigo.

#### Análisis de varianza para la dureza.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	F	P
C1	3	239.5	79.8	6.17	0.018
Error	8	103.4	12.9		
Total	11	342.9			

Cuadro 40 Análisis de varianza aleatoria para dureza.

95% intervalo individual de confianza para la media.  
Basado en una desviación estándar en pool.

Nivel	N	Media	Desv. Est.	Intervalo de Confianza
1	3	39.267	2.958	(-----*-----)
2	3	38.283	5.701	(-----*-----)
3	3	37.339	3.218	(-----*-----)
4	3	48.492	0.325	(-----*-----)

Desv.Est. en pool=3.596  
36.0          42.0          48.0          54.0

Cuadro 41 Comparación de los intervalos de confianza de las 4 variables.

Intervalo	Merced-Xalostoc	Merced-Villa	Merced-Testigo	Xalostoc-Villa	Xalostoc-Testigo	Villa-Testigo
Significancia	Ns	ns	ns*	ns	*	*

Cuadro 42 Comparaciones entre los intervalos.

Siendo: ns no hay significancia.

\* hay diferencia significativa.

#### Comparación de Tukey dos a dos

Rango de error de frecuencia = 0.0500

Rango de error individual = 0.0126

Valor crítico = 4.53



Intervalos para (nivel de significancia columna) – (nivel de significancia renglón)

	Merced	Xalostoc	Testigo
Xalostoc	-8.420 10.387		
Villa	-7.476 11.331	-8.459 10.348	
Testigo	-18.629 0.179	-19.612 -0.805	-20.556 -1.749

Cuadro 43 Comparaciones Tukey.

Comparación Fisher dos a dos.

Rango de error de frecuencia = 0.176

Rango de error individual = 0.0500

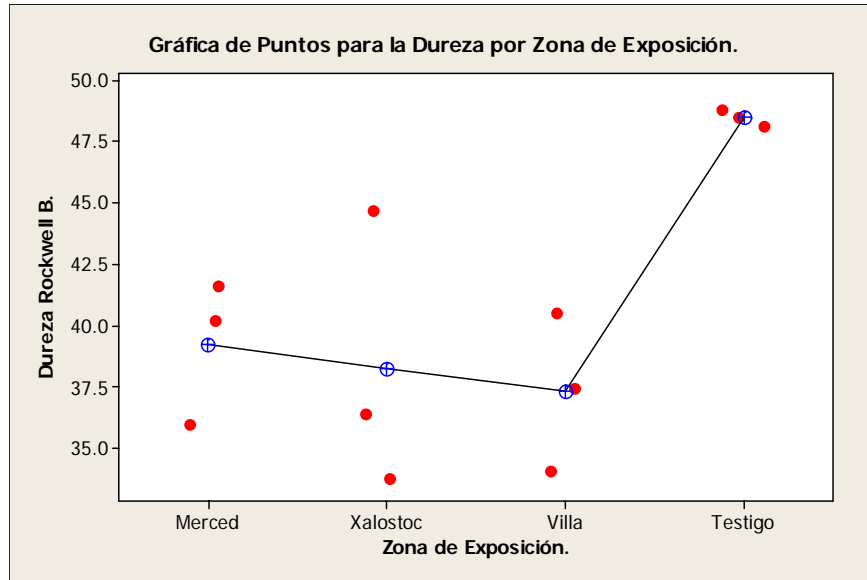
Valor critico = 2.306

Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón)

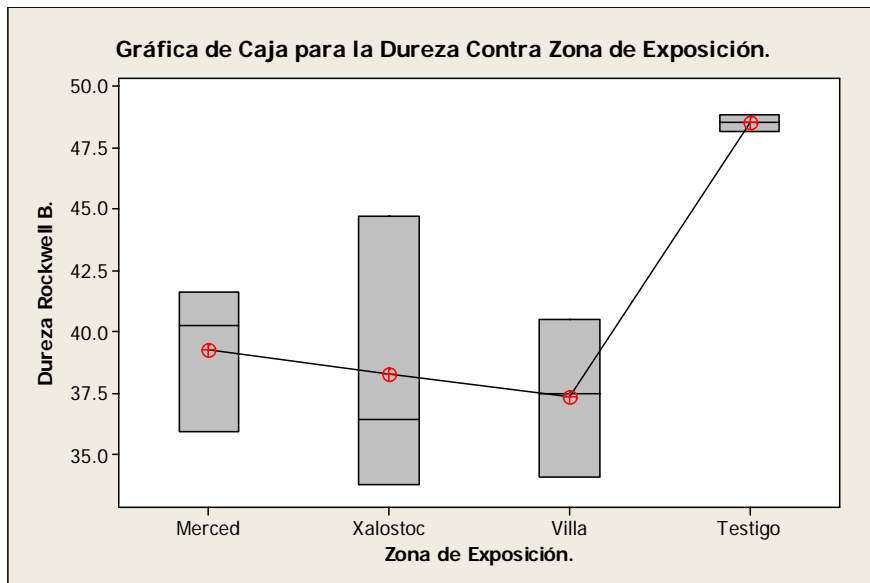
	Merced	Xalostoc	Villa
Xalostoc	-5.786 7.753		
Villa	-4.842 8.698	-5.825 7.714	
Testigo	-15.995 -2.455	-16.978 -3.439	-17.923 -4.383

Cuadro 44 Comparaciones Fisher.

De acuerdo con el análisis normal de varianza entre las estaciones no existe diferencia significativa en la dureza del material después de someter al material a la exposición atmosférica y a el procedimiento de limpieza de los productos de corrosión, pero si existe diferencia significativa entre la testigo y las probetas expuestas en las zonas de Xalostoc y Villa de las Flores, pero no con la Merced de acuerdo a la prueba de análisis normal de varianza y a las comparaciones Tukey pero de acuerdo con las comparaciones Fisher si existen diferencias significativas entre las zonas de exposición y la testigo.



Gráfica 21 Gráfica puntos para la dureza por zona de exposición y testigo.



Gráfica 22 Gráfica de caja para las durezas de las 3 zonas de exposición y testigo.

### 1.3 Análisis de pérdida de peso de las probetas expuestas a condiciones severas de salinidad.

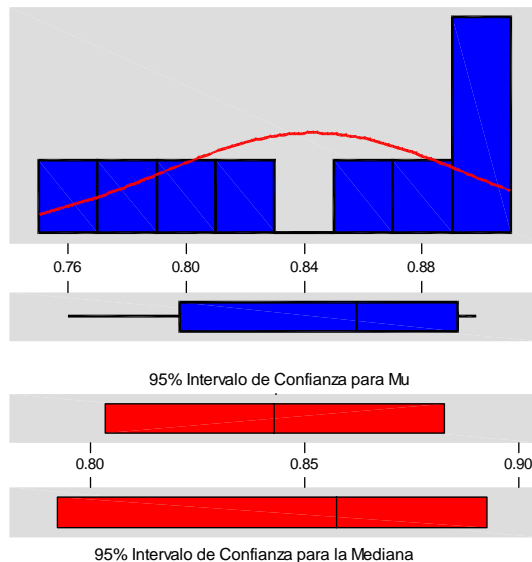
Con los datos se aplico un análisis estadístico básico para establecer el comportamiento del metal en esta prueba; de lo que obtuvimos:

Variable	# de Probetas	Media	Mediana	Media Truncada	Desviación Estándar
Perdida de peso	9	0.8430	0.8575	0.8430	0.0515

Variable	Cuadrado del Error Medio	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
Perdida de peso	0.0172	0.7601	0.8981	0.7977	0.8920

Cuadro 45 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.

#### Estadística Descriptiva



Variable: Perdida de Peso

Prueba de Normalidad Anderson-Darling

A-Cuadrada: 0.418  
Valor P: 0.255

Media 0.843044  
Desviación Estándar 0.051468  
Varianza 2.65E-03  
Asimetría -4.2E-01  
Curtosis -1.48708  
N 9

Mínimo 0.760100  
1er Cuartil 0.797650  
Mediana 0.857500  
3er Cuartil 0.892000  
Máximo 0.898100

95% Intervalo de Confianza para Mu

0.803483 0.882606

95% Intervalo de Confianza para Sigma

0.034764 0.098601

95% Intervalo de Confianza para la Mediana

0.792562 0.892653

Gráfica 23 Datos estadísticos de la pérdida de peso por exposición en cámara salina.

#### 1.3.1 Comparación de medias entre las probetas expuestas y las testigos por medio de un análisis de normal de varianza.

Análisis de varianza para perdida de peso					
Fuentes	G.L.	S.C.	C.M.	F	P
C1	1	0.88542	0.88542	334.14	0.000
Error	10	0.02650	0.00265		
Total	11	0.91192			

Cuadro 46 Análisis normal de varianza aleatoria.

Individual 95% intervalo de confianza para la media.  
Basado en una desviación estándar en pool.

Nivel	N	Media	Desv. Est.	
1	9	0.84304	0.05147	(-*-)
2	3	0.21573	0.05151	(---*--)

Desv.Est. en pool = 0.05148

Cuadro 47 Comparación de los intervalos de confianza.

Intervalo.	Con exposición-sin exposición
Significancia.	**

Cuadro 48 Comparaciones entre intervalos.

Siendo: ns no significante.

\*\* Altamente significativa.

Comparación Tukey dos a dos.

Rango de error de frecuencia = 0.0500

Rango de error individual = 0.0500

Valor critico = 3.15

Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón)

	Expuesto en cámara salina
Sin exposición	0.55085 0.70378

Cuadro 49 Comparación Tukey.

Comparación Fisher dos a dos.

Rango de error de frecuencia = 0.0500

Rango de error individual = 0.0500

Valor critico = 2.228

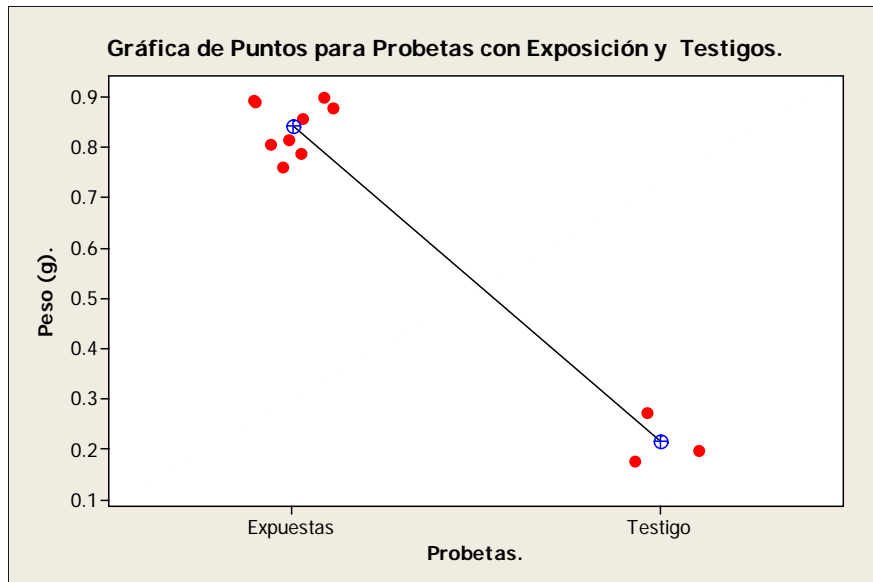
Intervalos para (nivel de significancia columna) - (nivel de significancia renglón)

	Expuesto en cámara salina
Sin exposición	0.55085 0.70377

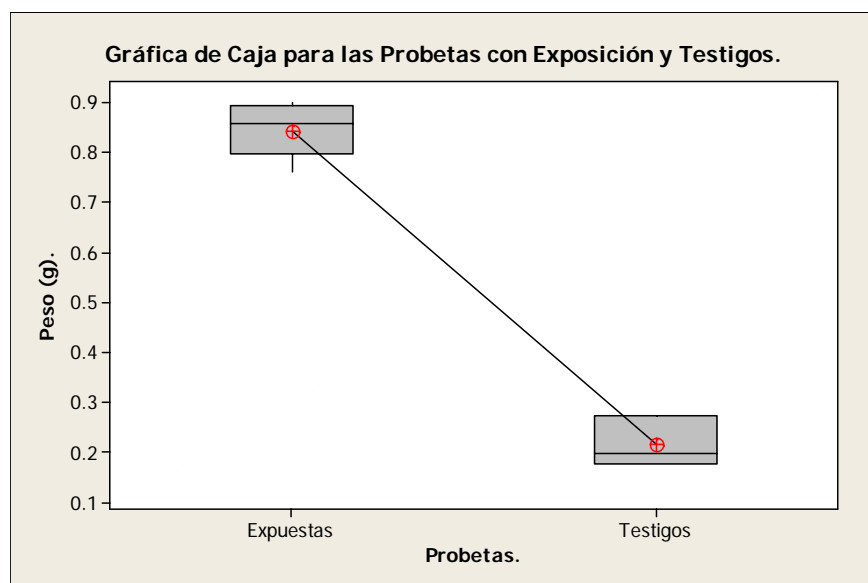
Cuadro 50 Comparación Fisher.

Concluyendo en este último análisis existe diferencia altamente significativa entre las diferencias de peso de las probetas expuestas en cámara salina y las testigos.

De lo anterior se establece que existe diferencia significativa entre la pérdida de peso de las probetas expuestas y las testigos debido al proceso corrosión en la cámara salina después de la limpieza de productos de corrosión.



Gráfica 24 Gráfica de puntos para la pérdida de peso de las probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.



Gráfica 25 Gráfica de cajas para probetas expuestas en cámara de niebla salina y testigos.

## ANEXO B

### PLANOS DEL BASTIDOR DE EXPOSICIÓN Y PORTA PROBETA.

Fabricación.

Elaboración de un bastidor de aluminio bajo la norma ASTM G 50-76, que de acuerdo a esta se realizo de la forma siguiente.

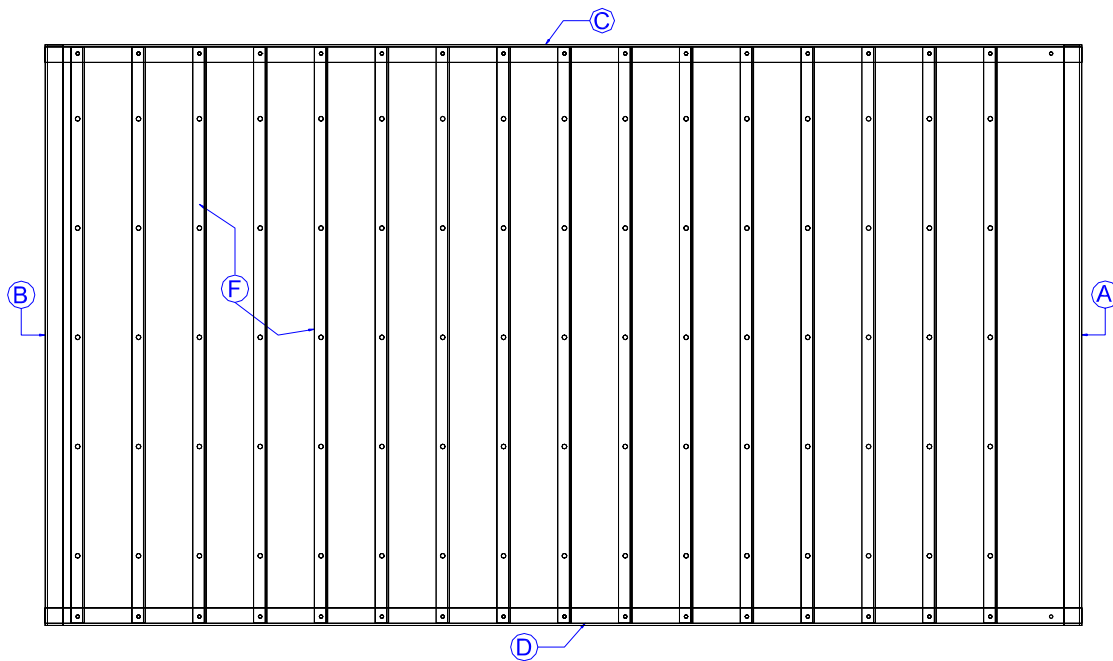


Fig. 9 Bastidor para exposición atmosférica vista superior.

Con las medidas que establece la norma ASTM G 50-76 las cuales se muestran en el siguiente cuadro.

Bastidor para colocacion de probetas

Medidas según la Norma ASTM (American Society for testing and Materials)  
Disgnation G 50-76 "Conducting Atmospheric Corrosion Test on Materials"

Colocacion	Requerimiento	Length in	Leg in	leg in		Longitud cm	Ancho cm	Alto cm
F	16	40.5	0.9375	1.375		102.87	2.38125	3.4925
		Length	Largo	Ancho	Largo	cm	cm	cm
A	1	40.8125	1.25	2	1.25	103.66	3.175	5.08
B	1	40.8125	1.25	2	1.25	103.66	3.175	5.08
C	1	72.90625	1.25	2	1.25	185.18	3.175	5.08
D	1	72.90625	1.25	2	1.25	185.18	3.175	5.08

Cuadro 51 Medidas del bastidor según norma ASTM G-50.

El soporte para las probetas se compone de las siguientes piezas:

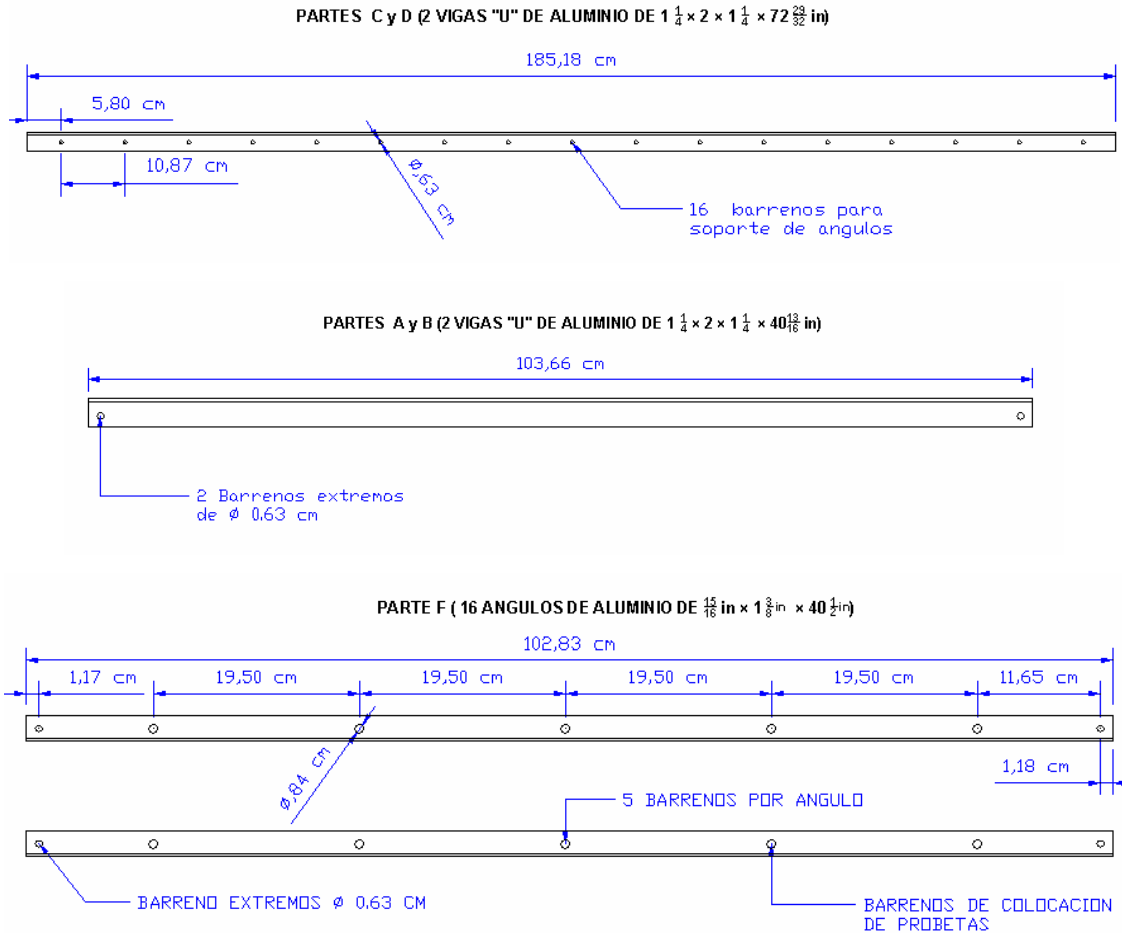


Fig. 10 Desglose de piezas del bastidor de exposición.

El soporte del bastidor también fue realizado en aluminio, con una inclinación de  $30^\circ$  respecto a la horizontal.

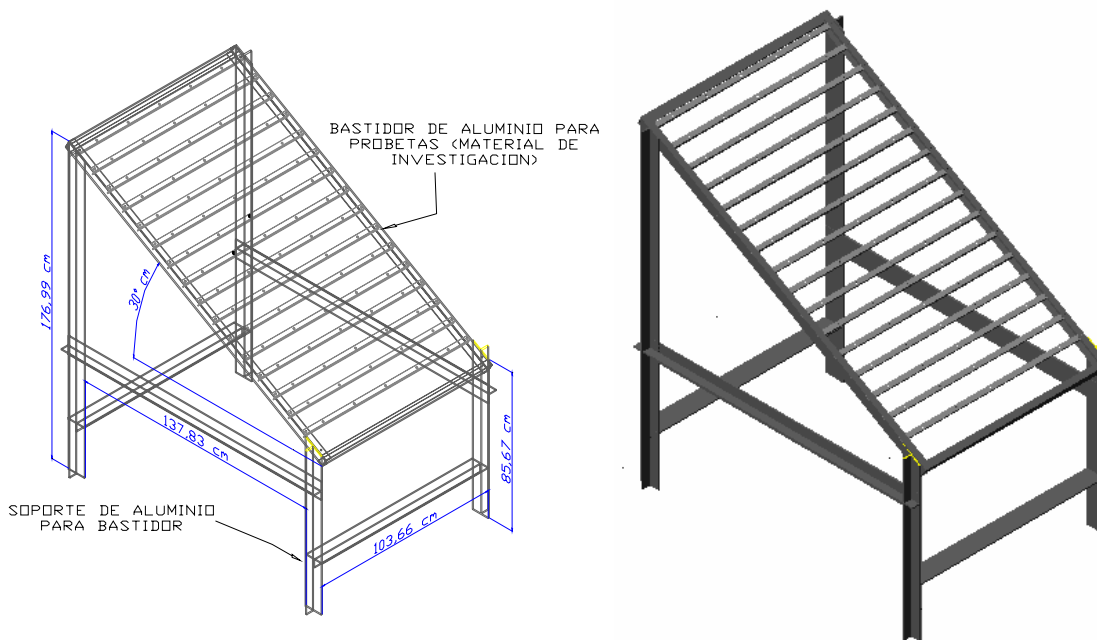


Fig. 11 Dimensiones del bastidor armado.

Se fabricaron 4 bastidores, de los cuales se colocaron solo 3, uno en la zona de la Merced considerada Zona Urbana, el segundo en la zona de Xalostoc considerada Zona Industrial y por ultimo el tercero en la zona de Villa de las Flores considerada Zona Rural.

Construcción de sujetadores o porta muestras.

Para el diseño del porta muestra se tomaron en cuenta 2 normas: ASTM G-50 en su punto 8.1 el cual indica que se deben usar unos aisladores para colocar las probetas en el bastidor de modo que no exista contacto eléctrico con otras probetas o el bastidor durante la exposición.

Se decidió utilizar el acrílico pues no reacciona con el metal a exponer y también es un buen aislante eléctrico.

Estos porta muestras se pueden colocar en los soportes del bastidor directamente por medio de tornillos especiales (acero inoxidable) o grapas de plástico.



Los sujetadores o porta muestras se componen de tres piezas que son: una base cuadrada de acrílico y dos cubos con un desbaste de 2mm X 2mm en una de sus aristas, estos cubos se unieron entre si con un tornillo de acero inoxidable; el conjunto de los tres elementos (dos cubos y el tornillo) formaron una pequeña prensa y esta a su vez se fijo a la base de acrílico, por medio de dos pijas, y todo el conjunto del porta muestra se fijo al bastidor por medio de un tornillo de acero inoxidable.

Las piezas de acrílico que conforman cada porta muestra tienen las siguientes dimensiones:

Pieza	Cantidad	Alto (mm)	Largo (mm)	Ancho ( mm)
Base	1	55	70	3
Cubo con cuerda	1	20	18	18
Cubo sin cuerda	1	20	18	18

Cuadro 52. Piezas utilizadas en los porta muestra.

Los tornillos necesarios y sus características para cada porta muestra se enlistan en el cuadro número 4.

Pieza	Cantidad	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Cabeza
Tornillo de acero inox.	1	6.35	76.2	Gota
Pija de sujeción	2	2.9	12.7	Gota
Tornillo de acero inox.	1	6.35	25.4	Hexagonal
Tuerca de acero inox.	1	Para tornillo de 6.35 mm de diámetro		
Rondana plana	1	Para tornillo de 6.35 mm de diámetro		

Cuadro 53 Características de los tornillos usados por cada porta muestra.

Todos los tornillos usados son de cuerda estándar, por conveniencia en el uso de herramienta y facilidad de en la adquisición de los materiales.

Los porta probeta terminados quedaron como el siguiente:



Fotografía 41 Porta muestra terminado.

## ANEXO C.

### CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CÁMARA SALINA Y PARÁMETROS DE LA CÁMARA SALINA.

Condiciones de operación de la cámara salina durante la exposición de la aleación de Zn-21wt%Al-2wt%Cu.

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO</b>		<b>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUATITLAN</b>			
		<b>Hoja de recolección de datos para solución salina</b>			
		<b>MAESTRÍA EN INGENIERÍA</b>			
Fecha	Salinidad	Potencial	Acidez	Temperatura	Part. Suspendidas
	MS	mV	pH	°C	ppt
08/12/05	46.9	31.92	6.17	18.6	23.85
10/12/05		19.8	6.39	22.9	23.56
11/12/05	26.5	19.7	6.37	23.5	24.58
16/12/05	12.72	21.2	6.65	22.3	23.68
17/12/05	47	17.1	6.32	21.6	24.67
19/12/05	45	33.4	6.2	25	25.1
21/12/05	43	43.2	5.99	24.4	23.2
23/12/05	48	37.2	6.04	26	23.54
26/12/05	43	30.9	6.22	26.2	5.9
28/12/05	48.7	59.2	5.81	26.9	24.3
30/12/05	45	30.8	6.25	27.9	25.2
02/01/06	48.6	21.7	6.41	26.6	24.3
04/01/06	46.5	24.4	6.37	26.8	23.3
06/01/06	47	20.9	6.37	26	23.5
09/01/06	42	14.9	6.51	28.7	5.68
11/01/06	46.4	20.2	6.38	28.9	23.2
18/01/06	48.2	12	6.5	18.6	24.1

Cuadro 54 Condiciones de la solución salina empleada en la exposición.

Monitoreo de los parámetros de la cámara salina

Días de Prueba	Horas de Prueba	Temperatura de cámara [°C]	Temperatura programada de cámara [°C]	Temperatura de torre de Burbujeo [°C]	Temperatura Programada de torre de Burbujeo [°C]	Temperatura de Laboratorio [°C]
02/12/2005	24	34.65	35	47.93	48	20.42
03/12/2005	24	34.99	35	47.96	48	16.78
04/12/2005	24	34.72	35	47.86	48	23.46
05/12/2005	24	34.68	35	47.54	48	25.04
06/12/2005	24	35.00	35	48	48	21.05
07/12/2005	24	34.38	35	47.32	48	24.45
08/12/2005	24	35.11	35	47.93	48	23.24
09/12/2005	24	34.99	35	47.97	48	18.29
10/12/2005	24	35.11	35	47.98	48	22.55
11/12/2005	24	34.85	35	47.86	48	18.72
12/12/2005	24	35.095	35	47.92	48	22.37
13/12/2005	24	34.99	35	47.94	48	20.59
14/12/2005	24	35.16	35	47.96	48	21.19
15/12/2005	24	35.03	35	47.95	48	19.95
16/12/2005	24	34.68	35	47.35	48	20.59
17/12/2005	24	35.00	35	47.98	48	21.19
18/12/2005	24	34.38	35	47.86	48	19.95
19/12/2005	24	35.11	35	47.92	48	21.05
20/12/2005	24	34.99	35	47.94	48	22.37
21/12/2005	24	35.11	35	47.96	48	20.59

Cuadro 55 Condiciones de trabajo de la cámara de niebla salina.

Monitoreo de los parámetros de la cámara salina..... Cont.

Días de Prueba	Horas de Prueba	Temperatura de cámara [°C]	Temperatura programada de cámara [°C]	Temperatura de torre de Burbujeo [°C]	Temperatura Programada de torre de Burbujeo [°C]	Temperatura de Laboratorio [°C]
22/12/2005	24	34.85	35	47.95	48	21.19
23/12/2005	24	34.85	35	47.54	48	19.95
24/12/2005	24	35.095	35	47.93	48	20.59
25/12/2005	24	34.99	35	47.96	48	21.19
26/12/2005	24	35.16	35	47.86	48	22.55
27/12/2005	24	34.65	35	47.54	48	18.72
28/12/2005	24	34.99	35	48	48	22.37
29/12/2005	24	34.72	35	47.32	48	20.59
30/12/2005	24	34.68	35	47.98	48	21.19
31/12/2005	24	34.99	35	47.86	48	19.95
01/01/2006	24	35.11	35	47.94	48	21.05
02/01/2006	24	34.85	35	47.96	48	24.45
03/01/2006	24	34.85	35	47.95	48	23.24
04/01/2006	24	35.11	35	47.89	48	18.29
05/01/2006	24	34.99	35	47.93	48	22.55
06/01/2006	24	35.11	35	47.96	48	18.72
07/01/2006	24	34.85	35	47.26	48	22.37
08/01/2006	24	35.095	35	47.98	48	20.59
09/01/2006	24	34.99	35	47.86	48	21.19
10/01/2006	24	35.16	35	47.94	48	19.95
11/01/2006	24	35.03	35	47.96	48	22.37
12/01/2006	16	34.68	35	47.58	48	20.59

Cuadro 56 Condiciones de trabajo de la cámara de niebla salina continuación.

## ANEXO D.

### COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ZINALCO COMERCIAL CON OTROS MATERIALES.

Material	Zinalco 1				Zinalco 2		Al 380	Al 6063 T5	Latón	Latón
Propiedad									SAE 70C	SAE 88
Proceso	FA	FP	Extruido	Laminado	FA	FP	FP	Extruido	FP	Extruido
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	5.4				5.4		2.74	2.74	8.5	8.5
Temperatura de fusión (°C)	421-481				421-481		540-595	616-654	902-940	800-895
Coeficiente de expansión térmica (μmm <sup>1</sup> °K <sup>1</sup> )	26				26		21.8	21.8	19	20
Conductividad térmica (Wm <sup>1</sup> °K <sup>1</sup> )	126				126		96	96	121	117
Conductividad eléctrica (%I. A. C. S.)	38				38		27	55	28	27
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	300-310	350-390	400-420	317	150	353	358
Esfuerzo de cedencia al 0.2% (MPa)	280-300	290-310	280-320	270-290	260-270	340-370	158	110	117	234
Modulo de elasticidad (GPa)	110-130				110-130		71	71	111	96
% de deformación en tensión	3-5	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	3-5	2-5	15	12
Dureza Rb (BRINELL 500-10-305)	50-56	60-65	40-55	25-30	65-80	55-70	47-52	17	60	68
Resistencia al impacto (J)	2-3 (2)	2-3 (2)	50-55 (1)	8-9 (2)	2-3 (2)	2-3 (2)	2-3	-	15	15
FA= Fundición en arena										
FP= Fundición a presión										
MP= Molde permanente										

Cuadro 57 Comparación de las propiedades del zinalco con las de aluminio y latón.

Material	Zinalco 1				Zinalco 2		Bronce	Hierro	Acero	Acero inox.
Propiedad							SAE 65	gris	SAE1010	304-304L
Proceso	FA	FP	Extruido	Laminado	FA	FP	FA	FA	CRS	Laminado
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	5.4				5.4		8.9	7.4	7.8	7.9
Temperatura de fusión (°C)	421-481				421-481		820-990	1232	1400	1399-1454
Coefficiente de expansión térmica (µmm <sup>1</sup> *K <sup>1</sup> )	26				26		18.3	11.9	15.347	20.2
Conductividad térmica (Wm <sup>1</sup> *K <sup>1</sup> )	126				126		59	54.2	12	16.3
Conductividad eléctrica (%I. A. C. S.)	38				38		10	6	462	-
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	300-310	350-390	400-420	242	214		578
Esfuerzo de cedencia al 0.2% (MPa)	280-300	290-310	280-320	270-290	260-270	340-370	124	124	379	242
Modulo de elasticidad (GPa)	110-130				110-130		96	172	200	205
% de deformación en tensión	3-5	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	12	2	25	55
Dureza Rb (BRINELL 500-10-305)	50-56	60-65	40-55	25-30	65-80	55-70	62	89	75	95
Resistencia al impacto (J)	2-3 (2)	2-3 (2)	50-55 (1)	8-9 (2)	2-3 (2)	2-3 (2)	15	54-88	176	81
FA= Fundición en arena.										
FP= Fundición a presión.										
MP= Molde permanente.										

Cuadro 58 Comparación de las propiedades del zinalco con las de bronce hierro acero y acero inoxidable.

Material	Zinalco 1				Zinalco 2		Zamak	Zamak
Propiedad							No. 3 AG-40.A	No. 5 AG-41.A
Proceso	FA	FP	Extruido	Laminado	FA	FP	FP	FP
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	5.4				5.4		6.6	6.7
Temperatura de fusión (°C)	421-481				421-481		381-387	380-386
Coefficiente de expansión térmica (µmm <sup>1</sup> °K <sup>1</sup> )	26				26		27.4	27.4
Conductividad térmica (Wm <sup>1</sup> °K <sup>1</sup> )	126				126		113	109
Conductividad eléctrica (%I. A. C. S.)	38				38		27	26
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	300-310	350-390	400-420	283	331
Esfuerzo de cedencia al 0.2% (MPa)	280-300	290-310	280-320	270-290	260-270	340-370	-	-
Modulo de elasticidad (GPa)	110-130				110-130		103	102
% de deformación en tensión	3-5	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	10	7
Dureza Rb (BRINELL 500-10-305)	50-56	60-65	40-55	25-30	65-80	55-70	49	57
Resistencia al impacto (J)	2-3 (2)	2-3 (2)	50-55 (1)	8-9 (2)	2-3 (2)	2-3 (2)	58	65
FA= Fundición en arena.								
FP= Fundición a presión.								
MP= Molde permanente.								

Cuadro 59 Comparación de las propiedades del zinalco con las del Zamak.



Material	Zinalco 1				Zinalco 2		Aleaciones ZA						
							ZA-8	ZA-8	ZA-12			ZA-27	
Propiedad													
Proceso	FA	FP	Extruido	Laminado	FA	FP	MP	FP	FA	MP	FP	FA	FP
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	5.4				5.4		6.3		6.3			5	
Temperatura de fusión (°C)	421-481				421-481		375-404		377-432			375-484	
Coeficiente de expansión térmica (μmm <sup>1</sup> °K <sup>1</sup> )	26				26		23.2		24.1			26	
Conductividad térmica (Wm <sup>1</sup> °K <sup>1</sup> )	126				126		115		116			125.5	
Conductividad eléctrica (%I. A. C. S.)	38				38		27.7		28.3			29.7	
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	300-310	350-390	400-420	221-225	365-386	276-317	310-345	393-414	400-441	407-441
Esfuerzo de cedencia al 0.2% (MPa)	280-300	290-310	280-320	270-290	260-270	340-370	207	283-296	270	248-276	310-331	365	359-379
Modulo de elasticidad (GPa)	110-130				110-130		85.5	85.5	83	83	83	75	75
% de deformación en tensión	3-5	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	1-2	6-10	1-3	1.5-2.5	4-7	3-6	2-3.5
Dureza Rb (BRINELL 500-10-305)	50-56	60-65	40-55	25-30	65-80	55-70	52-56	58-60	58-59	52-58	58-59	62-67	65-68
Resistencia al impacto (J)	2-3 (2)	2-3 (2)	50-55 (1)	8-9 (2)	2-3 (2)	2-3 (2)	-	32-48	23-27	-	20-37	31-54	9-16
FA= Fundición en arena.													
FP= Fundición a presión.													
MP= Molde permanente.													

Cuadro 60 Comparación de las propiedades del zinalco con las de aleaciones Zn-Al.

## Bibliografía.

1. Aguirre Gómez A., Cedillo M. Ma. del C., Delgadillo G. G., León R. Ma. F. (1985) "Manual de laboratorio Química 1 Ingeniería Agrícola" segunda edición UNAM, México.
2. Ávila Javier, Genescá Joan (2003) "Mas allá de la herrumbre 1" Editorial Fondo de cultura económica, Primera reimpresión México.
3. Ávila Javier, Genescá Joan (2003) "Mas allá de la herrumbre, 2 La lucha contra la corrosión" Editorial Fondo de cultura económica. Tercera edición. México.
4. Ávila Javier, Genescá Joan (1995) "Mas allá de la herrumbre, 3 Corrosión y medio ambiente" Editorial Fondo de cultura económica. Primera reimpresión. México.
5. Bastenier Enrique, Homrok John P. (1973) "Limpieza y desengrase de los metales" Ediciones Cedel. Barcelona España.
6. Bosch G. C. (1978) "La técnica de investigación documental". Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Brown L. T., Lemay H. E. Burten E. B. (1998) "Química la ciencia central" Ed. Prentice Hall. 5ª edición. México.
8. Campos R., Negrete J., Hernández L., Torres G, (1980), "Efecto del recosido en las propiedades mecánicas de aleaciones Zn Al", VI Congreso Academia Nacional de Ingeniería.
9. Carmona Estrada Socorro (1998) "Tratamiento térmico de la aleación Zn 21 Al 2.1 Cu obtenida por colada continua" Tesis de maestría UNAM. México.

10. Cerrud Sánchez S., Jacobo Armendáriz V. H., Ortiz Prado A., Schouwenaars Franssens R. (2003) "Corrosión y Protección" Facultad de Ingeniería UNAM, México.
11. Climent M. D., Aznar P., Fernández I. (1992) "Conocer la química del medio ambiente la atmósfera" servicio de publicaciones Universidad Politécnica de Valencia. España.
12. Dollar D. L., J. A. Clum and R. E. Miller, Technical note. "Boiling water corrosion of superplastic Zn-Al alloys with selected ternary additions" Corrosion Nace. 28 (1972) **P 296**.
13. Faires Moring V., Max Simmang C. (1990) "Termodinámica" segunda edición Ed. UTEHA. México.
14. Elizalde Torres J., Zironi E. P., Torres Villaseñor G., Cota L. S., Baños L. Rickards J., Saniger J. M. (1996) "Corrosion of a zinc-aluminium-copper alloy by fluorine gas", Materials Letters, 26, **P. 41-45**.
15. Genescá J., Uruchurtu J. (1994). "Corrosion resistance of zinalco alloy in sodium chloride solution" Advances in Science, Technology and Applications of Zn-Al Alloys. **P 215-218** Edited by G. Torres Villaseñor, Y. H. Zhu And C. Piña. Instituto de Investigación en Materiales, UNAM, México.
16. Guerrero R., Farias M. H., Cota Araiza L., (2002) "Surface analysis of the environmental corrosion of zinalco (Zn-22Al-2Cu) alloy". Applied Surface Science 195 **P. 137-145**.
17. Guerrero R., Farias M. H., Cota Araiza L., (2002) "Corrosion study of Zn-22Al-2Cu alloy with the surface modified by an Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film". Surface Review Letters. Vol. 9 Nos. 5 & 6 **P. 1697-1701**.

18. Guerrero R., Cota L., Machorro R. (1999) "Electropolishing of zinc and characterization of resulting surface". Surface Engineering Vol. 15 No. 5 **P. 418-422.**
19. Hallen J, González J. L., Mosqueda A., García J. and Orozco E., (1994), "Microstructure and temperature influence on the mechanical properties of a Zn- Al- Cu alloy". Recent Advances in Science, Technology and Applications of Zn Al alloys. **P 51.** Edited by G. Torres Villaseñor, Y. H. Zhu And C. Piña. Instituto de Investigación en Materiales, UNAM, México.
20. Hernández L., Ugalde A., Torres G., (1981) "Influencia de la microestructura en la resistencia a la corrosión de la aleación Zn 22% p Al". VII Congreso ANIAC. Oaxaca, México.
21. Hernández L., Torres G., (1981) "Existencia de un doble mecanismo de oxidación en la aleación eutectoide Zn-22% p Al". III Encuentro de Investigación Metalúrgica. Instituto de Saltillo, Coahuila México.
22. M. J. Stewart, (1973) "Superplastic forging of Zn-Al-Cu alloys" Canadian Metallurgical Quarterly 12 (2) **P 159-170.**
23. Martínez Flores E., Torres Villaseñor G., (1997) "Compression ductility of Zn -21 Al- 2 Cu prepared by powder metallurgy techniques". Materials and Design Vol. 8 No. 3 **P. 127-130.**
24. Martínez Flores E., Torres Villaseñor G., (2003) "Estructura y propiedades de la aleación Zn Al Cu reforzada con partículas de alúmina". Materials and Design No. 24 **P. 281-286.**
25. Mendoza M., Osorio C., Torres Villaseñor G., (1981), "Influencia de la duración del tratamiento a solución sobre las propiedades mecánicas de Zn-22Al", VII Congreso ANIAC, Oaxaca, México.

26. Merino Muñoz José (2000) "Tratamiento térmico de la aleación comercial zinalco en molde de arena" Tesis de licenciatura UNAM. México.
27. Negrete J., Torres G, (1979) "Aleaciones Zn-Al como alternativa a las aleaciones ricas en Al", Memoria Quinto Congreso Academia Nacional de Ingeniería.
28. Negrete J., Torres G., Turrubiarres D., Rocha A, (1988), "Extrusión inversa del zinalco", 1<sup>er</sup> Congreso de la Asociación latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol. 1 Río de Janeiro, Brasil.
29. Posadas Dionisio (1980) "Introducción a la Electroquímica" Ed. Secretaria general de la Organización de los estados americanos, programa regional de desarrollo científico y tecnológico. Washington E. U. A.
30. Quadri de la Torre Gabriel, Sánchez Cataño Luis R. (1994) "La ciudad de México y la contaminación atmosférica" Editorial Limusa Noriega editores. México.
31. Raman, S. Nasrazadani, L Sharma and A. Razvan (1987). "Morphology of rust phases formed on weathering steels during outdoor atmospheric exposure in open, bold locations". *Praktische Metallographie*. 24 12 **P 557**.
32. Spedding, D. J., (1981) "Contaminación atmosférica". Editorial Reverté. Barcelona, España.
- 33.** Torres G., (1988), "Microestructura y propiedades mecánicas del zinalco", *Ciencia No.39 Pág. 103-111*.
34. Torres G., (1988), "Desarrollo industrial del zinalco", Cuadernos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos num. 4 Nueva Época.

35. Torres Villaseñor G., Ugalde A., Hernández y Singer I. L., (1984) "Water vapour corrosion of lamellar superplastic and cast dendritic Zn-21Al alloy" *Corrosion Science* 24 (3) **Pág. 159-166.**
36. Torres Villaseñor (1997) "Metales que se comportan como plásticos", *Investigación y Ciencia* No. 248 **Pág. 80-85.**
37. Torres Villaseñor Gabriel (1990) "Trabajos realizados sobre el zinalco en el periodo 1979-1990" Instituto de Investigaciones en Materiales, con fondos de la OEA, UNAM, México.
38. Torres Villaseñor Gabriel (1994) "Recent Advances in Science, Technology and applications of Zn-Al Alloys" editado por Chu, Yao-hua, Piña-Barba, C., Torres Villaseñor, G. Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, México.
39. Valdés L., Estrada I., Negrete J, Torres G. (1981), "Efectos del Cu en la estructura y propiedades mecánicas de la aleación superplástica Zn-22Al". VII Congreso ANIAC, Oaxaca, México.
40. Valdez L., Negrete J., Torres G., (1984), Oxidación térmica de Zn- Al- Cu, VI Encuentro de Investigación Metalúrgica, Saltillo Coahuila, México.
- Normas ASTM consultadas y aplicadas.

ASTM B-117 "Método Estándar de Prueba de Neblina Salina".

ASTM D-1193 "Métodos para la Preparación de Agua Grado Reactivo Tipo I y IV".

ASTM G-1 "Practica Estándar para la Preparación, Limpieza y Evaluación de los Especímenes de la Prueba de Corrosión".

ASTM G-15 “Terminología Relacionada con Corrosión y Pruebas de Corrosión”.

ASTM G-16 “Guía Estándar para Aplicación de Estadística al Análisis de Datos de Corrosión”.

ASTM G-31 “Practica Estándar para Pruebas de Corrosión por Inmersión de Metales en Laboratorio”.

ASTM G-33 “Practica Estándar para el Registro de Datos de Pruebas de Corrosión Atmosféricas de Especímenes de Acero con Recubrimiento”.

ASTM G-46 “Guía Estándar para el Examen y Evaluación de la Corrosión por Picaduras”.

ASTM G-50 “Practica Estándar para Conducir Pruebas de Corrosión Atmosférica en Metales”.

ASTM G-85 “Practica Estándar para Prueba Modificada de Neblina Salina”.

- Revistas y catálogos.

Tecno-industria, (Diciembre Enero 1994).

Catalogo Zinalco Industrial S. A., grupo industrial IUSA.

- Páginas de Internet visitadas.

<http://estrucplan.com.ar/> Marzo 2006.

[http://fisicanet.com.ar/quimica/qu\\_3\\_corrosion.php](http://fisicanet.com.ar/quimica/qu_3_corrosion.php) Febrero 2006.

<http://www.sma.df.gob.mx> Octubre 2005.

<http://www.elsevier.com/locate/apsusc> Septiembre 2005.