



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**VALORACIÓN DE DOS RECUBRIMIENTOS  
COMERCIALES APLICADOS EN PROBETAS  
DE ALEACIÓN MgAZ31 EXPUESTAS EN TRES  
SITIOS DE MONITOREO.**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**MECÁNICA – METALMECÁNICA**

**P R E S E N T A :**

**ING. CÉSAR SINHUÉ MORENO VARELA**

TUTOR:

DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ

2006





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: Dra. León Rodríguez Frida María.

SECRETARIO: Dra. Cruz León Gloria.

VOCAL: Dr. Aguilar Márquez Armando.

1er. SUPLENTE: M. en I. Contreras Espinosa José Juan.

2do. SUPLENTE: M. en I. Hernández Gómez Víctor Hugo.

**LUGAR DONDE SE REALIZO LA TESIS:**

“FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN”

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Armando Aguilar Márquez.

---

**FIRMA**

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>6</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
<b>I ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
<b>I.1 MAGNESIO.....</b>	<b>8</b>
I.1.1 ABUNDANCIA .....	9
I.1.2 OBTENCIÓN .....	9
I.1.3 CARACTERÍSTICAS.....	9
I.1.4 PROPIEDADES .....	10
I.1.5 PRODUCCIÓN Y ECONOMÍA .....	11
I.1.6 APLICACIONES .....	17
I.1.7 PRECAUCIONES .....	18
<b>I.2 CORROSIÓN EN ALEACIONES DE MAGNESIO.....</b>	<b>19</b>
I.2.1 PROPIEDADES ATRACTIVAS Y APLICACIONES RECIENTES .....	19
I.2.2 MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO. ....	20
I.2.3 COMPORTAMIENTO DE CORROSIÓN. ....	20
I.2.4 PROSPECTIVAS.....	26
I.2.5 CAPAS EN LA SUPERFICIE DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO .....	27
I.2.6 FACTORES METALÚRGICOS .....	28
I.2.7 INFLUENCIAS EN EL AMBIENTE.....	29
I.2.8 PREVENCIÓN A LA CORROSIÓN .....	33
<b>I.3 INVESTIGACIONES PREVIAS .....</b>	<b>34</b>
<b>II MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
<b>II.1 AMBIENTES DE EXPOSICIÓN .....</b>	<b>41</b>
II.1.1 AMBIENTE RURAL. ....	41
II.1.2 AMBIENTE URBANO.....	44
II.1.3 AMBIENTE INDUSTRIAL .....	46
<b>II.2 PANELES DE EXPOSICIÓN .....</b>	<b>49</b>
<b>II.3 PREPARACIÓN DE LOS ESPECIMENES DE PRUEBA.....</b>	<b>51</b>
II.3.1 PROBETAS CON RECUBRIMIENTO DE POLIETILENO. ....	53
II.3.2 PROBETAS CON RECUBRIMIENTO DE PINTURA.....	54
II.3.3 PROBETAS SIN RECUBRIMIENTO.....	54
II.3.4 PROBETAS TESTIGO.....	55
<b>II.4 DIMENSION DE LAS PROBETAS .....</b>	<b>55</b>

<b>II.5</b>	<b>LIMPIEZA DE LOS ESPECIMENES .....</b>	<b>56</b>
<b>II.6</b>	<b>DESHIDRATACIÓN DE LOS ESPECIMENES. ....</b>	<b>56</b>
<b>II.7</b>	<b>PESAJE. ....</b>	<b>57</b>
<b>II.8</b>	<b>EMPAQUETADO.....</b>	<b>57</b>
<b>II.9</b>	<b>MONTAJE DE LAS PROBETAS .....</b>	<b>58</b>
<b>II.10</b>	<b>MONITOREOS .....</b>	<b>61</b>
<b>II.11</b>	<b>CANTIDAD DE CORROSIÓN EN LAS MUESTRAS.....</b>	<b>63</b>
<b>II.11.1</b>	<b>REMOCIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION .....</b>	<b>63</b>
<b>II.12</b>	<b>MICROSCOPIA.....</b>	<b>65</b>
<b>II.13</b>	<b>ENSAYO DE TENSIÓN .....</b>	<b>66</b>
<b>II.14</b>	<b>ENSAYO DE DUREZA .....</b>	<b>68</b>
<b>III</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
<b>III.1</b>	<b>PÉRDIDA DE MASA .....</b>	<b>70</b>
<b>III.2</b>	<b>PROPIEDADES MECÁNICAS .....</b>	<b>74</b>
<b>III.2.1</b>	<b>CARGA MÁXIMA.....</b>	<b>74</b>
<b>III.2.2</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD .....</b>	<b>78</b>
<b>III.2.3</b>	<b>DUREZA .....</b>	<b>81</b>
<b>III.3</b>	<b>MICROSCOPIA.....</b>	<b>85</b>
<b>IV</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>94</b>
	<b>GLOSARIO .....</b>	<b>99</b>
	<b>APÉNDICE.....</b>	<b>101</b>

# *Introducción*

## INTRODUCCIÓN

El hombre, con el afán de lograr mejores condiciones de vida ha usado constantemente su ingenio y diversas técnicas para conseguirlo, la mayor parte de ello se debe al uso de metales que ahora forman parte de nuestra vida cotidiana, generando la dependencia entre el desarrollo de las civilizaciones modernas con los metales y sus aleaciones, por ejemplo: encontramos metales en un simple grifo de agua, en automóviles, muebles y hasta en los complejos sistemas de transporte, y telecomunicaciones. Por ende, podemos decir que vivimos en una civilización basada en los materiales metálicos.

Sin embargo, los metales se degradan inevitablemente con el tiempo de muy diversas formas, dejan de ser funcionales, perdiendo sus propiedades eléctricas, mecánicas o decorativas.

La “corrosión” es la causa general de la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales, definiéndose como la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con su medio circundante con el consecuente deterioro de sus propiedades.

Desde que el hombre empezó a utilizar instrumentos de metal se enfrentó a la corrosión y, aunque con el avance de los conocimientos ha podido defenderse mejor de ella, es un problema permanente. Los países industrializados invierten enormes sumas en la investigación y aplicación de métodos para prevenir la corrosión.

Desde un punto de vista más químico, “corrosión” es la transformación de un metal de su forma elemental a su forma iónica o combinada en la naturaleza, es decir, a través de la corrosión los metales retornan a su forma combinada natural, formando óxidos, sulfuros, hidróxidos, etc. Ya que estos compuestos, poseen una forma termodinámicamente más estable.

Si bien los costos y pérdidas causados por este fenómeno son el principal motivo que impulsa las actividades en este campo, la disminución de la vida útil de los materiales por acción de contaminantes en el ambiente y, a su vez, la contaminación de productos y del medio circundante debido a la corrosión de los materiales en contacto con ellos, son también problemas alarmantes que no pueden ser dejados de lado. La corrosión no descansa..... por ello tampoco pueden hacerlo la ciencia y la técnica que tratan de prevenirla, desarrollando nuevos métodos y materiales cada vez más resistentes.

La corrosión es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza, rompimiento de tuberías subterráneas, picaduras y fisuras en los cascos de navíos, etc.) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelve 5 toneladas de acero en el mundo. (Unos cuantos nanómetros o picómetros invisibles en cada pieza, pero multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo...).

Se estima que los costos generados al año por corrosión, alcanzan alrededor de un 3.5% del PIB de un país, ya que cuanto mayor es el nivel de desarrollo del mismo, y por tanto sus instalaciones y procesos tecnológicos son más sofisticados, las pérdidas previstas serán mayores.

Es posible clasificar los procesos de corrosión recurriendo a criterios muy variados:

Por la morfología de ataque en: corrosión uniforme, en placas selectiva, por picaduras, en resquicio, intergranular. Según el mecanismo en: corrosión electroquímica y directa. En contacto con los medios naturales en: corrosión atmosférica, en contacto con agua dulce, marina y corrosión de materiales metálicos enterrados.

Entendamos la “corrosión atmosférica” como el deterioro que sufren los materiales metálicos cuando se encuentran en contacto con el aire a temperatura ambiente.

Debido a la gran cantidad de metal expuesto en la atmósfera, se estima que el 50% del total de las pérdidas por corrosión se producen como consecuencia de los procesos de corrosión atmosférica, debido a que, cuando la humedad relativa es superior al 40-50% distintos mecanismos facilitan la condensación de la humedad sobre la superficie metálica expuesta, propiciando la formación de una película húmeda que permite el funcionamiento del proceso electroquímico de corrosión, produciéndose entonces el deterioro indeseado en los materiales metálicos

Los contaminantes con mayor influencia en el proceso de corrosión atmosférica son el  $\text{SO}_2$ , el  $\text{NO}_2$  y el Ion cloruro  $\text{Cl}^-$ .

Las pérdidas económicas por contaminación atmosférica se pueden minimizar mediante algún medio que retrase el proceso de corrosión en el metal, como lo es el anodizado, zincado, niquelado o simplemente por medio de la aplicación de un recubrimiento resistente a los agentes corrosivos, como pinturas, barnices, etc., sin embargo el comportamiento de los recubrimientos ante condiciones atmosféricas también depende del tiempo de la humectación de la superficie y de la contaminación ambiental, no obstante, a diferencia del metal desnudo, la estabilidad de los recubrimientos de pintura puede verse afectada en grado importante por otros factores como la radiación ultravioleta y el ozono.

La corrosión es, por tanto, un fenómeno que depende del material utilizado, de la concepción de la pieza (forma, tratamiento, montaje) y del ambiente.

La primera idea es escoger un material que no se corroa en el ambiente considerado. Se pueden utilizar aceros inoxidable, aluminios, cerámicas, polímeros (plásticos)... La elección también debe tomar en cuenta las restricciones de la aplicación (masa de la pieza, resistencia a la deformación, al calor, capacidad de conducir la electricidad...).



En general, y teniendo en cuenta exclusivamente los criterios básicos sobre los mecanismos a través de los cuales ocurre la corrosión, se puede establecer que si el material metálico en servicio, presenta riesgos de corrosión electroquímica, conviene utilizar metales puros, con bajos niveles de segregación de impurezas,

El Mg es el metal más activo de la serie electroquímica entre los empleados en aplicaciones estructurales, su baja densidad lo hace muy útil en determinadas aplicaciones. Expuesto al agua, en presencia o ausencia de O<sub>2</sub>, se pasiva. La resistencia a la corrosión depende de la pureza del metal aun más que en el caso del aluminio, las impurezas del Mg comercial, principales responsables de la mayor velocidad de ataque, son el Fe y en menor grado el Ni y Cu.

Para proteger cualquier material metálico de la corrosión atmosférica, podemos utilizar recubrimientos protectores metálicos con metales más activos que el, para suministrarle protección catódica, o bien, se les puede aplicar pinturas anticorrosivas basadas en distintos vehículos de naturaleza orgánica o inorgánica con inhibidores de corrosión en su composición (pigmento).

Por lo anterior, el objetivo principal de la presente investigación, será evaluar dos diferentes recubrimientos aplicados y patentados por “Revere Graphics Word Wide” a una aleación laminada de “Magnesio AZ31” (aleación con 96% de Magnesio, 3% de Aluminio y 1% de Zinc) con respecto a un grupo de control del mismo material sin recubrimiento protector, en tres diferentes sitios de exposición centralizados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (clima templado subhúmedo), para poder determinar la durabilidad del recubrimiento, la resistencia mecánica y la pérdida de masa experimentada en el material.

# *Hipótesis* *Y* *Objetivos*

## HIPÓTESIS

1. Los recubrimientos comerciales aplicados y patentados por “Revere World Wide”, pueden ser efectivos en la protección de la aleación MgAZ31, expuesta a condiciones atmosféricas propias de la ZMCM.
2. La aleación laminada MgAZ31, puede presentar una elevada resistencia a la corrosión dentro de las condiciones propias de la ZMCM.
3. La aleación laminada MgAZ31, puede conservar sus propiedades mecánicas dentro de las condiciones propias de la ZMCM.

## OBJETIVOS

- ✓ Estimar la pérdida de masa como un índice de deterioro, en probetas de aleación MgAZ31, recubiertas con polietileno\*, expuestas en tres sitios de monitoreo de la ZMCM.
- ✓ Estimar la pérdida de masa como un índice de deterioro, en probetas de aleación MgAZ31, recubiertas con pintura♦, expuestas en tres sitios de monitoreo de la ZMCM.
- ✓ Comparar la pérdida de masa de las probetas tratadas, con probetas de control de MgAZ31, sin recubrimiento.
- ✓ Determinar y evaluar el posible cambio de las propiedades mecánicas después de un periodo de exposición de seis meses en la ZMCM.
- ✓ Determinar el deterioro sufrido en los recubrimientos aplicados a las probetas de MgAZ31.
- ✓ Determinar el deterioro sufrido en el material, mediante microscopía de barrido electrónico.

---

\* Recubrimiento aplicado y patentado por “Revere Word Wide”

♦ Recubrimiento aplicado y patentado por “Revere Word Wide”

# *Capítulo I*

## *“Antecedentes”*

# I ANTECEDENTES

## I.1 MAGNESIO

El nombre “Magnesio” procede de magnesia, que en griego designaba una región de Tesalia. A finales del siglo XVII el inglés Grew, obtuvo una sustancia a partir de las aguas de un manantial (sulfato de magnesio  $MgSO_4$ ) en Epsom (Inglaterra) a la que se llamó sal de Epsom.

En aquella época se conocían dos sustancias llamadas magnesia alba (carbonato básico de magnesio) y magnesia nigra (óxido de manganeso) mismas a las que se les llamó Magnesio y Manganeso respectivamente. El inglés Joseph Black, reconoció el magnesio como un elemento químico en 1755.

El primer científico en aislar el metal, aunque impuro, fue el químico británico Sir Humphry Davy en 1808, mediante electrólisis de una mezcla de magnesia y  $HgO$ . En 1829 Bussy preparó el metal con mayor pureza.

### I.1.1 ABUNDANCIA

El magnesio ocupa el sexto lugar en abundancia natural entre los elementos de la corteza terrestre (fig. 1.1), sin embargo no se encuentra libre, existe en la naturaleza sólo en combinación química con otros elementos, aunque entra en la composición de más de 60 minerales, los más importantes industrialmente, son los depósitos de dolomita (carbonato doble de magnesio y calcio), magnesita ( $MgCO_3$ ), brucita, carnalita y olivino así como en muchos silicatos constituyentes de rocas y sales, por ejemplo el cloruro de magnesio, que se encuentra en el mar y en los lagos salinos.

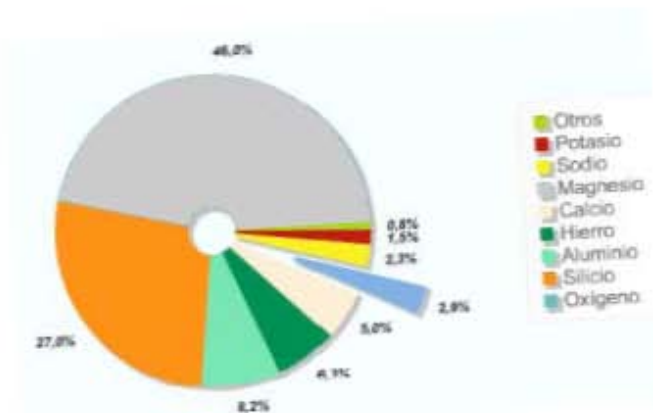


Fig. 1.1. Distribución en peso de los elementos de la corteza terrestre.

## I.1.2 OBTENCIÓN

El magnesio, al igual que otros elementos de las series 1 y 2 de la tabla periódica, puede obtenerse por electrólisis del haluro (cloruro de magnesio anhidro) fundido, al que previamente se le añade un poco de cloruro sódico para aumentar la conductividad eléctrica y disminuir el punto de fusión.

Otro método, también electrolítico, es por reducción del óxido de magnesio y fluoruro de magnesio fundido, mediante ferrosilicio.

El magnesio también puede obtenerse por calentamiento del carbonato para producir óxido que posteriormente se reduce con carbón en ausencia de oxígeno. Esta reacción se produce a una temperatura superior al punto de ebullición del magnesio, por lo que los vapores del mismo que se producen se reducen a polvo enfriándolos mediante una corriente de hidrógeno.

## I.1.3 CARACTERÍSTICAS

El magnesio es un metal relativamente blando, maleable y no muy dúctil, bastante resistente y ligero, es un 30% más ligero que el aluminio, de color blanco plateado brillante (fig. 1.2), que se deslustra cuando se expone al aire húmedo, no así en el aire seco. Es un buen conductor del calor y la electricidad. La acción de la humedad junto con el dióxido de carbono atmosférico produce una fina capa de carbonato de magnesio que, al ser porosa, termina por corroer todo el metal.



*Fig. 1.2. Apariencia del magnesio.*

Pulverizado se inflama cuando se expone al aire, ardiendo con una llama blanca intensa. En trozos mayores es difícil que se inflame pero puede suceder si se corta en láminas delgadas, por lo que en el mecanizado las virutas deben manejarse con precaución.

El magnesio tiene un fuerte poder reductor, es resistente a las bases pero se ataca con los ácidos. Tiene la propiedad de desplazar fácilmente el hidrógeno de los ácidos diluídos. Al rojo reacciona directamente con el nitrógeno y los halógenos.

## I.1.4 PROPIEDADES

General				
Nombre	Magnesio			
Símbolo	Mg			
Número atómico	12			
Serie química	Metales alcalinotérreos			
Grupo	2			
Periodo	3			
Bloque	s			
Propiedades atómicas				
Peso atómico	24,305 uma			
Radio medio†	150 pm			
Radio atómico calculado	145 pm			
Radio covalente	130 pm			
Radio de Van der Waals	173 pm			
Configuración electrónica	[Ne]3s <sup>2</sup>			
Estados de oxidación (óxido)	2 (base fuerte)			
Estructura cristalina	Hexagonal			
Propiedades físicas				
Estado de la materia	sólido (paramagnético)			
Punto de fusión	923 K			
Punto de ebullición	1363 K			
Entalpía de vaporización	127,4 kJ/mol			
Entalpía de fusión	8,954 kJ/mol			
Presión de vapor	361 Pa a 923 K			
Velocidad del sonido	4602 m/s a 293,15 K			
Propiedades Eléctricas				
Fuerza Electromotriz Térmica contra el Platino ( mV )	+0,44			
Coefficiente de Temperatura a 0-100C ( K-1 )	0,00425			
Resistividad Eléctrica @20C ( $\mu\text{Ohmcm}$ )	4,2			
Propiedades Mecánicas				
Estado del Material	Blando		Duro	
Dureza – Vickers	30-35		35-45	
Límite Elástico ( MPa )	69		100	
Resistencia a la Tracción ( MPa )	185		232	
Propiedades Térmicas				
Calor Específico a 25C ( J K-1 kg-1 )	1020			
Calor Latente de Evaporación ( J g-1 )	5254			
Calor Latente de Fusión ( J g-1 )	362			
Coefficiente de Expansión Térmica @0-100C ( $\times 10^{-6}$ K-1 )	26,0			
Conductividad Térmica a 0-100C ( W m-1 K-1 )	156			
Isótopos				
Nombre del Núclido	Vida Media	Spin	Abundancia %	Masa Atómica uma
Magnesio-24	Estable	0	78,7	23985
Magnesio-25	Estable	38109	10,13	249858
Magnesio-26	Estable	0	11,17	259826
Magnesio-27	9,45 minutos	37988	0,00	27
Magnesio-28	21 horas	0	0,00	28

Tabla 1.1 Propiedades del Magnesio. Valores en el S.I. y en condiciones normales ( 0 °C, 1 atm. †Calculado a partir de distintas longitudes de enlace covalente, metálico o iónico.

## I.1.5 PRODUCCIÓN Y ECONOMÍA

La producción mundial de magnesita en el año 2000 fue del orden de 19 millones de toneladas según el British Geological Survey <sup>[1]</sup>, mientras que el Servicio Geológico de Estados Unidos<sup>[1]</sup> el mismo año rebaja la cifra a 11.1 Mt. Estas notables diferencias deben proceder, en parte, de que la entidad estadounidense suma producciones de magnesita cruda y calcinada, pero sobre todo de la discrepancia entre las producciones que reflejan ambas estadísticas para China. Los principales países productores son China, Corea del Norte y Rusia, que en conjunto suman dos tercios de la capacidad de producción mundial.

La mayor parte de la magnesita se utiliza para la obtención de magnesia (MgO), bien de grado químico (cáustica, por calcinación a 700-1000°) o de calidad refractaria (sinterizada, por calcinación a muerte a 1500-2000°), con pequeñas cantidades para producir magnesio metal (250 kt/año) o para uso directo en neutralización de suelos. Alrededor del 79% de la magnesia producida se emplea en el sector de refractarios, predominantemente como sinter, pero también de forma creciente como magnesia electrofundida. El 21% restante se utiliza en forma cáustica, para alimentación animal y fertilizantes, fabricación de cemento y tabiques ignífugos, industrias papelera y farmacéutica, etc, así como para tratamiento de aguas y residuos.

A partir del 2001 se ha incrementado la producción de la calidad refractaria y del hidróxido de magnesio, mientras que la del resto de los productos, especialmente de la magnesita cáustica, ha decrecido ligeramente<sup>[2]</sup>. El hidróxido de magnesio, preparado en un estado intermedio de la extracción de la magnesia a partir de agua de mar o de salmueras, o por hidratación de la magnesita cáustica, con respecto a otros productos sustitutivos, presenta una mayor capacidad de absorción de metales pesados con un volumen de lodos significativamente menor.

El mercado actual de la magnesita continúa bajo el signo de un exceso de capacidad productiva, agudizado por la fuerte competencia ejercida por la magnesia obtenida a partir del agua de mar, las salmueras y otras fuentes de magnesio, como brucita, olivino y dolomita.

### I.1.5.1 PRODUCCIÓN MINERAL

Como en otras sustancias, existen fuertes discrepancias entre las publicaciones especializadas sobre los niveles de producción de magnesita de China, Rusia y Turquía. Así, para BGS (World Mineral Statistics) la producción china en 2000 fue de 9 Mt/año, una cifra enorme y difícilmente creíble, sobre todo teniendo en cuenta que para USGS (Mineral Commodity Summaries) la producción del mismo país fue de 2,5 Mt/año.



La tabla 1.2, está basada fundamentalmente en los datos del BGS. La producción está calculada con datos obtenidos de las empresas.

<b>PRODUCCIÓN MINERA MUNDIAL DE MAGNESITA CRUDA</b>				
( t de mineral)				
	1998 <sup>[3]</sup>	1999 <sup>[5]</sup>	2000 <sup>[5]</sup>	2001 <sup>[4]</sup>
Austria	722.876	748.635	725.832	700
Grecia	698.049	495.114	500	500
España <sup>[3]</sup>	424.2	505.209	534.234	750
<b>Subtotal UE</b>	<b>1.845.125</b>	<b>1.748.958</b>	<b>1.760.066</b>	<b>1.950.000</b>
Brasil	342.485	282.145	279.876	280
Colombia	9.816	10.747	10.5	1.5
<b>Subtotal Iberoamérica</b>	<b>352.301</b>	<b>292.892</b>	<b>290.376</b>	<b>281.5</b>
China	8500	8500	9000	2600
Rusia	2200	2400	2500	1000
Corea del Norte	800	800	850	1000
Turquía	877.842	826.902	1000.211	2000
Eslovaquia	1200	1200	1200	1000
India	349.852	325.864	317.255	370
Australia	360.113	280.363	349.538	540
Canadá	165	165	165	180
Irán	121.529	141.081	140	150
Serbia-Montenegro	80.923	30.624	40.925	36
<b>Subtotal otros</b>	<b>14.655.259</b>	<b>14.669.834</b>	<b>15.562.929</b>	<b>8.876.000</b>
<b>PRODUCCIÓN MUNDIAL</b>	<b>18.800.000</b>	<b>17.500.000</b>	<b>19.100.000</b>	<b>10.700.000</b>

Tabla 1.2. Producción minera mundial de magnesia cruda. (Fuentes.- 1: World Mineral Statistics 1996-2000, BGS. 2: Kramer, D. 2002. 3: Estimaciones propias a partir de datos proporcionados por las empresas).

Los EE.UU. han sido el productor más grande del mundo de magnesio metálico desde la segunda guerra mundial, y, en casi todos los años desde aquel tiempo, ha sido un exportador neto del magnesio.

La producción mundial estimada, reservas, y reservas base de magnesio en el mundo en t/año es la siguiente:

País	Producción de Magnesio		Reserva y Reserva Base de magnesita.	
	2003	2004	Reserva	Reserva base
United States	-----	-----	10,000	15,000
Australia	136	136	100,000	120,000
Austria	202	200	15,000	20,000
Brasil	78	80	45,000	65,000
China	1,070	1,100	380,000	860,000
Grecia	144	150	30,000	30,000
India	110	110	14,000	55,000
Korea del Norte	288	300	450,000	750,000
Russia	346	350	650,000	730,000
Slovakia	274	250	45,000	324,000
España	72	80	10,000	30,000
Turquía	576	600	65,000	160,000
Otros países	163	170	390,000	440,000
Total mundial (redondeado)	3,460	3,500	2,200,000	3,600,000

*Tabla 1.3. Producción minera mundial de magnesio (reservas y reservas base).*

Los recursos de que los componentes de magnesio se pueden recobrar son virtualmente ilimitados y es mundialmente extendido. Se identifican recursos mundiales de magnesita de 12 billones de toneladas, y de brucita, varios millones toneladas. Los recursos de dolomita, forsterita, minerales de evaporita, y soluciones salinas con presencia de magnesia se estiman en un billón de toneladas, además el hidróxido de magnesio se puede recobrar del agua de mar.

### **I.1.5.2 MERCADO NACIONAL**

De la investigación de campo se deduce que la producción nacional está subestimada ya que una sola empresa en el estado de Nuevo León produce 900 mil toneladas al año de cal dolomítica.

El Anuario Estadístico del COREMI estima que la producción en el 2003 ascendió a 566 mil toneladas.

### 1.1.5.2.1 PRODUCCIÓN NACIONAL DE DOLOMITA 2000 - 2004

Los principales estados productores de dolomita son Coahuila y Nuevo León. La producción del primero corresponde a una empresa de la gran minería que la usa para su autoconsumo; la producción del segundo, son empresas medianas que la explotan, procesan y venden.

Estado	Año									
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003p
Coahuila	591322	827566	830091	704219	625175	249279	258638	597430	287000	318300
Colima							39	25	119	
Chihuahua										2300
Guerrero	8417	103113	99726	198491	160305	166005	144900			
Hidalgo								800	1000	
Jalisco					36		87	227	243	67
Nuevo León								72315	169303	244629
Puebla	350									
Tabasco	1560	1091	116							
Total	601649	931770	929933	902710	785516	415284	403664	670797	457665	565296

p/ cifras preliminares

Tabla 1.4. Producción Nacional de Dolomita en t/año, por Estado 1994-2003. Fuente: Anuario Estadístico de la Minería Mexicana. COREMI

El volumen en toneladas y el valor en miles de pesos de dolomita producida durante el periodo del año 2000 a 2004 es el siguiente:

#### PRODUCCION NACIONAL DE DOLOMITA

2000	Volumen	403,664			
	Valor	80,329	2003	Volumen	565,896.00
2001	Volumen	670,797		Var %	23.6
	Var %	66.2		Valor	112,613
	Valor	133,489		Var %	23.6
	Var %	66.2	2004	Volumen	534,678.00
2002	Volumen	457,665.00		Var %	46.2
	Var %	-31.8		Valor	106,401
	Valor	91,075		Var %	46.2
	Var %	-31.8			

Tabla 1.5. Producción Nacional de Dolomita 2000-2004. Fuente: Coordinación General de Minería Dirección General de Promoción Minera

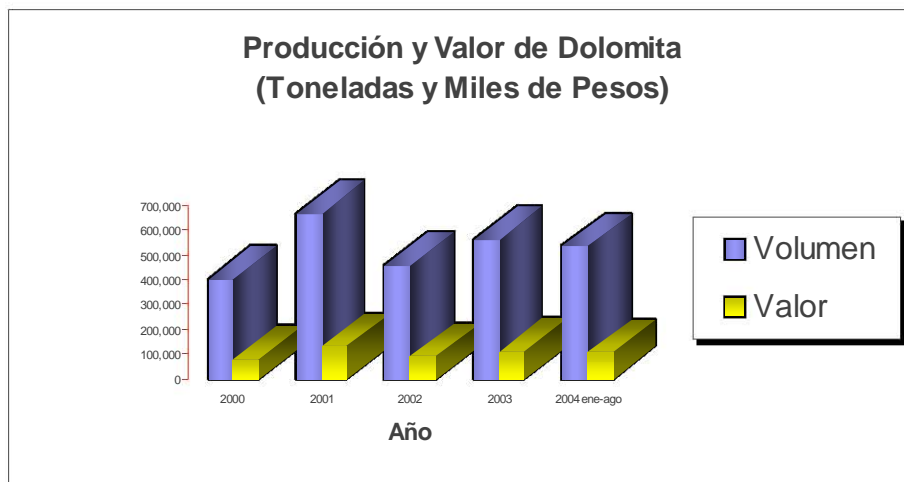


Fig 1.3. Producción y valor de dolomita 2000 – 2004.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento del porcentaje de variación del volumen y el valor en el periodo:



Fig 1.4. Gráfica DE variación del volumen y valor de dolomita durante el periodo 2000 – 2004, Fuente: Secretaría de economía. Sistema de Información Comercial de México. SICM

### I.1.5.3 COMERCIO EXTERIOR

La balanza comercial de la dolomita 1994-2004 ha sido regularmente negativa como consecuencia de las importaciones de dolomita de alta pureza que no se encuentra en México

#### I.1.5.3.1 EXPORTACIONES MEXICANAS DE DOLOMITA

Las exportaciones en el 2003 descendieron en 73%, respecto al año anterior, como resultado del recorte de las compras de dolomita mexicana por parte de Estados Unidos que descendieron en 60% y las de Guatemala en 79.1%, alcanzando las exportaciones apenas un monto total de 209 mil dólares.

#### EXPORTACIONES MEXICANAS DE DOLOMITA

209 mil dólares

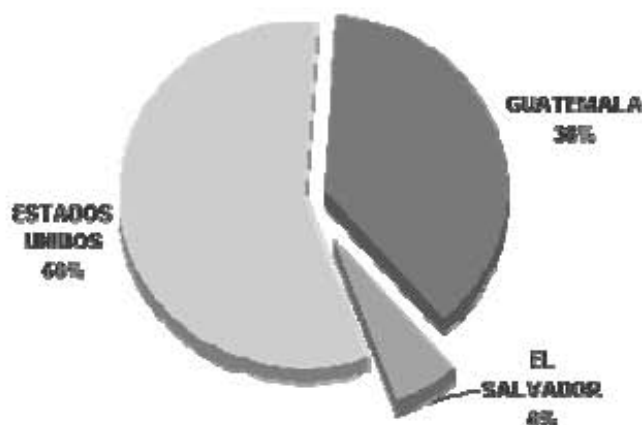


Fig 1.5. Gráfico de porcentajes de exportaciones mexicanas de dolomita..

Prácticamente el 100% de las ventas al exterior fue de dolomita cruda, hacia los siguientes destinos: Estados Unidos, 56%; Guatemala, 38% y El Salvador, 6%.

### ***1.1.5.3.2 IMPORTACIONES MEXICANAS DE DOLOMITA***

Las compras de dolomita del exterior son de alta pureza, ya que no se encuentra en México. Las industrias que realizaron tales importaciones son: acero, 81.3%, proveniente de Canadá e Italia; vidrio, 6.6%, proveniente de Estados Unidos; refractarios, 3.3%, proveniente de Estados Unidos y Europa; otros, 8.8%. Cabe señalar que el 0.1% de las importaciones fueron para la agricultura, con mineral proveniente de Guatemala.

En el 2003, las exportaciones se ubicaron en 209 mil dólares, las importaciones en 1.9 millones, dando como resultado un déficit comercial de 1.7 millones de dólares<sup>v</sup>.

### **I.1.6 APLICACIONES.**

El magnesio forma compuestos bivalentes, siendo el más importante el carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ), que se forma por la reacción de una sal de magnesio con carbonato de sodio y se utiliza como material refractario y aislante en hornos para la producción de hierro y acero, metales no férreos, cristal y cemento, así como en agricultura e industrias química y de la construcción. El metal además, se adiciona para eliminar el azufre del acero y el hierro.

El magnesio es la base de aleaciones duras y ligeras que presentan una gran resistencia a la tracción y son utilizadas en la industria automotriz y aeronáutica (motores). Cuando el peso es un factor a considerar, el metal se utiliza aleado con aluminio o cobre en fundiciones para piezas de aviones; Se han investigado aleaciones con zirconio y torio para la construcción de aviones.

Las aleaciones de magnesio, especialmente magnesio-aluminio, se emplean en componentes de automóviles, como llantas, y maquinaria diversa; en miembros artificiales, en aspiradoras e instrumentos ópticos, en productos como esquís, carretillas, cortadoras de césped y muebles para exterior, así como en envases de bebidas. El magnesio puro puede utilizarse como electrodo de "sacrificio" para proteger otros metales.

El metal sin alear se utiliza en flashes fotográficos, bombas incendiarias y señales luminosas, como desoxidante en la fundición de metales y como afinador de vacío, una sustancia que consigue la evacuación final en los tubos de vacío. Otros usos son:

---

<sup>v</sup> Fuente: Secretaría de economía. Sistema de Información Comercial de México. SICM

- Aditivo en propelentes convencionales.
- Desoxidante para el cobre, el latón y aleaciones de níquel.
- Obtención de fundición nodular (Fe-Si-Mg).
- Agente reductor en la obtención de uranio y otros metales a partir de sus sales.

El principal uso de la dolomita en México se tiene en la industria siderúrgica donde sirve para proteger los refractarios de los hornos; también en la industria de la construcción aplicada en la carpeta asfáltica funcionando como antiderrapante y brinda mayor durabilidad.

Recientemente, las aleaciones de magnesio coladas han encontrado aplicaciones en controladores de disco de computadoras y lectores de tarjetas magnéticas en cajas registradoras de supermercados.

Las aleaciones de magnesio también son usadas como componentes estructurales de automóviles y maquinaria. En los últimos años, el magnesio se convierte en un material importante usado para la desulfuración de hierro y acero.

### **I.1.7 PRECAUCIONES**

El magnesio es extremadamente inflamable, especialmente si está pulverizado. Reacciona exotérmica y rápidamente en contacto con aire o agua por lo que debe manipularse con precaución. El fuego, de producirse, no se deberá intentar apagar con agua.

## ***1.2 CORROSIÓN EN ALEACIONES DE MAGNESIO***

El magnesio es uno de los metales con menor densidad y sus aleaciones tienen propiedades especiales que resultan en aplicaciones específicas. En particular su gran relación fuerza – peso, hace a las aleaciones de magnesio bastante atractivas en aplicaciones en las que se requiere poco peso, por ejemplo, en el transporte, aeroespacio, etc. Como consecuencia estas aleaciones ligeras tienen un prominente futuro. Las aleaciones de magnesio no son tan populares como las aleaciones de aluminio, sin embargo se le comienza a dar mayor uso debido a su comportamiento ante la corrosión.

Es importante el conocimiento fundamental de los mecanismos de corrosión ya que provee las bases para diseñar nuevas aleaciones que mejoren las propiedades ante el fenómeno de corrosión.

### **1.2.1 PROPIEDADES ATRACTIVAS Y APLICACIONES RECIENTES**

El magnesio tiene un favorable factor de tamaño con un gran número de elementos solubles, como el aluminio (Al), zinc (Zn), cerio (Ce), itrio (Y), plata (Ag), zirconio (Zr), y torio (Th).

Las aleaciones de magnesio poseen grandes rangos de rigidez/peso, alta firmeza y gran capacidad ante la humedad. En términos de fuerza/peso, las aleaciones fundidas de magnesio son mejores que las aleaciones fundidas de aluminio. El magnesio y las aleaciones de magnesio son paramagnéticas, tienen relativamente alta conductividad térmica y eléctrica y buena capacidad de absorción a las vibraciones y al choque. El magnesio no es tóxico y puede ser trabajado por alguno de los métodos conocidos como el burilado, fresado, etc.

Hasta el momento las aleaciones de magnesio tienen su principal uso en aplicaciones no estructurales, sin embargo se espera que las aplicaciones estructurales de las aleaciones de sean de mayor importancia en el futuro.



## I.2.2 MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO.

La aleación AZ91D puede ser usada para explicar el método estándar utilizado para la designación de las aleaciones de magnesio. Las dos primeras letras identifican los dos elementos aleantes más importantes usando el código:

Letra clave	Descripción
A	Aluminio
E	Tierra excepcional
H	Torio
K	Zirconio
M	Manganeso
Q	Plata
S	Silicon
Z	Zinc

Tabla 1.6. Código para la identificación de las aleaciones de Mg

Los siguientes dos dígitos indican las concentraciones nominales de los dos principales elementos aleantes en porcentaje peso/peso (% w/w).

Así la aleación AZ91D es una aleación que normalmente contiene 9% de aluminio y 1% de zinc. La "D" indica que AZ91D es la cuarta aleación de magnesio de una serie que contiene el 9% de aluminio y 1% de zinc.<sup>[6]</sup>

## I.2.3 COMPORTAMIENTO DE CORROSIÓN.

El uso del magnesio ha sido limitado debido a las pobres propiedades ante la corrosión de sus aleaciones. La resistencia a la corrosión es especialmente pobre cuando la aleación contiene impurezas metálicas específicas o cuando la aleación es expuesta a un electrolito agresivo como el ion cloruro (Cl<sup>-</sup>).

La capa de óxido en el magnesio puede usualmente proporcionar una protección considerable al magnesio expuesto a corrosión atmosférica en ambientes rural, industrial y marino, como resultado la resistencia a la corrosión atmosférica de las aleaciones de magnesio es mayor a la del acero suave.

El rango de corrosión de las aleaciones de magnesio yace entre la del aluminio y la del acero suave y ocasionalmente el acero es más resistente que las aleaciones de aluminio. La resistencia de una aleación de alta pureza, por ejemplo AZ91E es de 10 – 100 veces mejor que una aleación de pureza normal e igual o mayor que el acero suave y el aluminio 380.

La corrosión del magnesio y sus aleaciones inicia usualmente por corrosión localizada pero en ocasiones la corrosión localizada es poco profunda y difusa. La morfología de corrosión del magnesio y sus aleaciones depende de la química de la aleación y las condiciones ambientales. Por ejemplo, la corrosión atmosférica es uniforme en una atmósfera industrial normal, mientras que la corrosión es lúcidamente localizada cuando la aleación es sumergida. Tunold y otros (1977) encontraron que la corrosión del magnesio de pureza comercial fue usualmente transgranular, mientras que la corrosión de las aleaciones fue más uniforme. Similarmente Makar y otros (1988) reportaron que la corrosión del magnesio puro no fue no uniforme con apariencia de picaduras, mientras que el AZ61 fue atacado relativamente de forma más uniforme y en las aleaciones rápidamente solidificadas más uniformemente que las aleaciones convencionales.

Existen dos principales razones para la pobre resistencia de corrosión de las aleaciones de magnesio <sup>[7]</sup>, la primera es debida a la corrosión galvánica interna causada por segundas fases o impurezas <sup>[8]</sup> y la segunda, a la casi-pasiva capa de hidróxido que es mucho menos estable que las capas pasivas que se forman en los metales como en el aluminio y acero suave. Esta casi-pasividad da como resultado una pobre resistencia a la corrosión en el magnesio y sus aleaciones.

Recientemente, aleaciones de magnesio han sufrido rápidamente ataque corrosivo bajo las mismas condiciones, debido principalmente a la presencia de impurezas, primordialmente hierro, níquel y cobre. Estas impurezas o sus componentes actúan como pequeños cátodos en un medio corroyente y crean micro células en la matriz anódica del magnesio. <sup>[6]</sup> En aleaciones de alta pureza dichas impurezas son controladas por debajo de las concentraciones críticas y como consecuencia son más resistentes a los medios corrosivos que las aleaciones de pureza normal. <sup>[9]</sup>

El magnesio y sus aleaciones pueden sufrir diversas y severas formas de corrosión:

### I.2.3.1 CORROSIÓN GALVÁNICA

Las aleaciones de magnesio son altamente susceptibles a la corrosión galvánica, la corrosión galvánica es observada como una fuerte corrosión localizada del magnesio adyacente al cátodo. Los cátodos pueden ser externos, por ejemplo algún metal que este en contacto con el magnesio; o internos, segunda fase o impurezas, estos dos tipos de corrosión se ilustran en la siguiente figura:

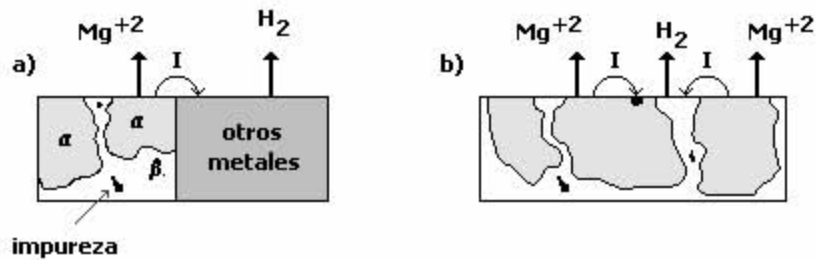


Fig. 1.6. a) Corrosión galvánica externa, b) Corrosión galvánica interna.

Los metales con poco sobrepotencial de hidrógeno como el Ni, Fe y Cu forman cátodos eficientes con el magnesio y producen corrosión galvánica severa. Los metales que combinan el potencial activo de corrosión con un alto sobrepotencial de hidrógeno como el Al, Zn, Cd y Sn producen menos daños. <sup>[10]</sup> La alta pureza no protege a las aleaciones de magnesio en contra de la corrosión galvánica si esta se encuentra acoplada con otro metal.

El rango de corrosión galvánica se ve incrementado por:

- ☠ Alta conductividad del medio.
- ☠ Potenciales elevados entre el ánodo y cátodo.
- ☠ Baja polarización entre ánodo y cátodo.
- ☠ Una porción de gran área de cátodo a ánodo.
- ☠ Poca distancia de ánodo a cátodo.

### I.2.3.2 CORROSIÓN INTERGRANULAR

El magnesio y sus aleaciones son casi inmunes al ataque intercrystalino.<sup>[11]</sup> La corrosión no penetra a través del límite de grano,<sup>[8]</sup> debido a que las fases en la frontera del grano son invariablemente catódicas hacia los granos interiores.<sup>[9][11]</sup>

La tendencia de la corrosión intergranular es concentrarse en el área adyacente a los granos frontera hasta que, eventualmente se pueden deteriorar y desprenderse.

### I.2.3.3 CORROSIÓN LOCALIZADA

El magnesio es naturalmente un metal pasivo que experimenta picaduras por corrosión a su potencial de corrosión libre  $E_{\text{corr}}$ , cuando es expuesto a iones cloruro en un medio no oxidante;<sup>[12]</sup> como resultado la corrosión de las aleaciones de magnesio en un medio neutral o alcalino se presenta típicamente en forma de picaduras. La contaminación con metales pesados promueve generalmente el ataque por picaduras.<sup>[10]</sup> En aleaciones Mg-Al los hoyos se forman a menudo como resultado de un ataque selectivo a lo largo de la malla de  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  que es seguida del deterioro y desprendimiento de grano.<sup>[12]</sup>

La corrosión en hendiduras no ocurre en las aleaciones de magnesio debido a que es insensible a las diferencias en las concentraciones de oxígeno.

La corrosión filiforme o en forma de surcos (“wormtrack”) es causada por las celdas activas de corrosión que se desplazan a través de la superficie del metal. La corrosión filiforme existe bajo revestimientos protectores y capas de anodizado. Aunque el magnesio puro desnudo no experimenta este tipo de corrosión, podría presentarse en la aleación AZ91, haciéndose ver que una capa de óxido relativamente resistente se puede formar de manera natural en esta aleación.

### **I.2.3.4 AGRIETAMIENTO DEBIDO A LA CORROSIÓN POR TENSIÓN (SCC)**

Las investigaciones sobre SCC del magnesio en soluciones acuosas ha establecido varios aspectos. El SCC es principalmente transgranular. En ocasiones se tiene SCC intergranular como resultado de la precipitación de  $Mg_{17}Al_{12}$  a lo largo de los granos frontera en aleaciones de Mg-Al-Zn. <sup>[8][11]</sup> El SCC es raramente evidenciado en aleaciones de fundición sometidas a tensión en valores superiores al 0.2% de resistencia a la tensión., pero es mas marcada en aleaciones forjadas en donde el SCC se ve seguido de un plano retorcido. <sup>[16][11]</sup> Adiciones de elementos aleantes como Al y Zn promueven el agrietamiento debido a la corrosión por tensión (SCC).

Existen pequeñas diferencias entre el comportamiento del SCC entre las aleaciones de pureza controlada y las de pureza no controlada que contienen menos de 10 ppm (w/w) de Fe. <sup>[16]</sup> En medios alcalinos con  $pH > 10.2$  se muestran muy resistentes al SCC. En soluciones neutras que contienen cloruros y en agua destilada ocurren agrietamientos; las aleaciones de magnesio son resistentes al SCC en fluoruros o soluciones que los contengan.

### **I.2.3.5 CORROSIÓN POR FATIGA**

Muy pocas investigaciones han sido realizadas para determinar la corrosión por fatiga, Speidel y otros encontraron en 1986 que los agrietamientos debidos a la fatiga por corrosión se propaga de manera combinada transgranular-intergranular y que el rango de crecimiento de las grietas de corrosión por fatiga fueron aceleradas por los mismos entornos que aceleran el SCC.

Stephens y otros, encontraron en 1995 que la resistencia a la corrosión por fatiga del AZ91-T6 fue significativamente mas baja en una solución salina al 3.5% que en el aire.

### **I.2.3.6 CORROSIÓN A TEMPERATURAS ELEVADAS**

A temperaturas elevadas en oxígeno, el rango de oxidación del magnesio es una función lineal del tiempo, indicativa de un óxido no protector en la superficie del magnesio. Cuando se incrementa la temperatura, el rango se incrementa notablemente. La mayoría de los elementos aleantes como el aluminio y el zinc incrementan el rango de oxidación. El rango de oxidación de una aleación que contiene pequeñas cantidades de cerio y lantano se encuentran considerablemente por debajo del magnesio puro.

### **I.2.3.7 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA**

La corrosión atmosférica es un proceso electroquímico el cual procede en cierta medida del electrolito. El electrolito como una sustancia neutral o ligeramente ácida es determinada por sus propiedades y la composición química de la atmósfera así como los productos de corrosión.

El oxígeno por si solo no es corrosivo en un clima a temperatura normal. Un electrolito acuoso en la superficie del metal es esencial para la corrosión atmosférica y este electrolito acuoso depende del clima, de los contenidos en la atmósfera y de la variación en la cantidad del vapor de agua (dependiente de la humedad relativa). La corrosión es severamente incrementada cuando sal, compuestos de azufre y otros contaminantes están presentes.

De acuerdo a DIN 55928 parte 1 (DIN 55928-1,1991) los climas se pueden clasificar en:

- Bajo techo o en interior.
- Rural.
- Urbana.
- Industrial.
- Marina.

Los ambientes industriales contienen compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno y otros agentes ácidos que pueden promover la corrosión del magnesio y sus aleaciones. Adicionalmente el ambiente industrial contiene aire con partículas pesadas lo que contribuye aún más a la corrosión.

El ambiente urbano es comparable con el industrial pero la concentración de contaminantes será de menor intensidad.

El ambiente rural y el ambiente bajo techo son los menos corrosivos de los ambientes atmosféricos.

El ambiente marino es caracterizado por la presencia de cloruros, un ión que es particularmente determinante en la resistencia a la corrosión del magnesio y sus aleaciones.

Esta diferenciación de los tipos de atmósferas es solo una síntesis de las atmósferas reales y es fácil de entender que en las costas se presentan ambientes combinados de (Ambiente Industrial) + (Ambiente Urbano) + (Ambiente Marino).

## I.2.4 PROSPECTIVAS

Aunque la resistencia a la corrosión de las aleaciones de magnesio es actualmente un problema serio las perspectivas de las aleaciones de magnesio son prometedoras debido a las atractivas ventajas y aplicaciones potenciales que presentan. El uso de las aleaciones de magnesio se encuentra propenso a incrementarse particularmente si su costo se puede reducir o acercarse al de las aleaciones de aluminio ya que su resistencia a la corrosión puede ser aplicada en diferentes usos.

Las aleaciones de magnesio son más resistentes a la corrosión en ambientes internos y externos que el acero suave y en ocasiones son más resistentes que algunas aleaciones de aluminio. Por ejemplo, si la concentración de impurezas es lo suficientemente baja en el AZ91D se corroe mucho más lentamente que el acero al carbón y el aluminio 380, como se muestra en la siguiente figura:

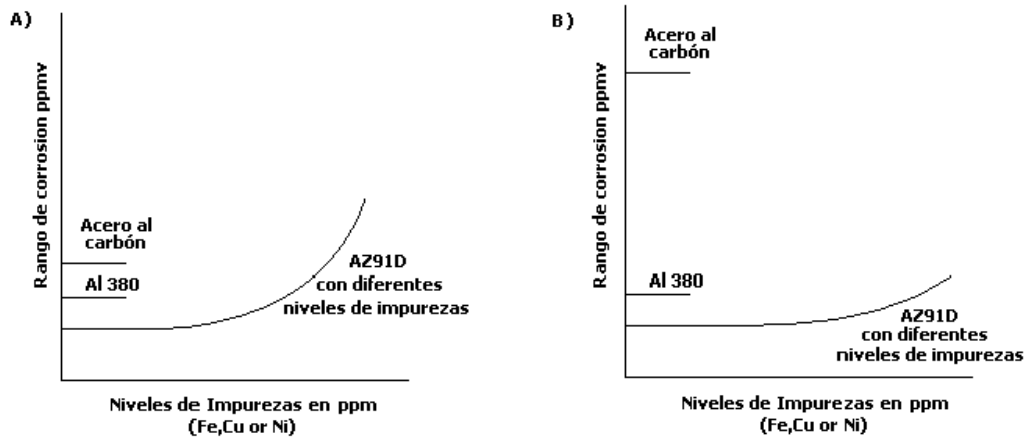


Fig. 1.7. Rangos de corrosión la aleación de magnesio AZ91D conteniendo diferentes cantidades de impurezas, A) Prueba de rocío salino, B) Expuesto a la atmósfera del río Brazos (situado en la costa del golfo de México en Texas) durante 2 años<sup>[17]</sup>.

Las aleaciones AZ91 han encontrado su aplicación en automóviles, las aleaciones de alta pureza con buena resistencia a la corrosión están siendo utilizadas en la industria nuclear. El uso de aleaciones como la AZ81, AZ63 y AM60 se encuentran en pleno crecimiento por su benéfico comportamiento ante la corrosión.

## I.2.5 CAPAS EN LA SUPERFICIE DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO

La corrosión de los metales es siempre gobernada por las características de sus capas superficiales. La naturaleza de la capa superficial del Mg es sin embargo no muy bien entendida.<sup>[10]</sup>

La capa protectora en la superficie del magnesio en la mayoría de los ambientes contiene principalmente  $Mg(OH)_2$ . Huber en (1953) y Fruhwirth y otros (1985) indican que la capa inicial que se forma es  $MgO$ , y es rápidamente remplazada por  $Mg(OH)_2$  que es un compuesto más estable, como el  $MgO$  carece de características de solidez e insolubilidad.<sup>[18]</sup>

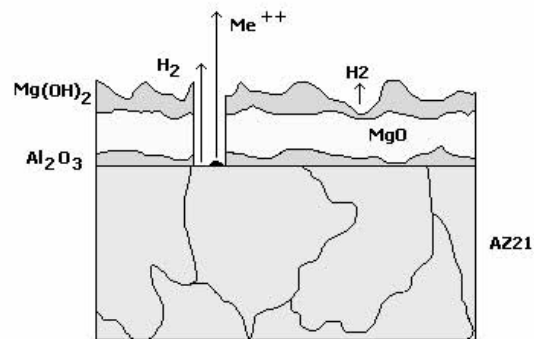


Fig. 1.8. Interfaces de corrosión en solución al potencial de corrosión para la fase alfa.

El óxido de magnesio puede reaccionar lentamente con agua para formar el hidróxido de magnesio, mediante hidratación eventual del óxido.<sup>[11]</sup>

Análisis anteriores de las capas formadas en las aleaciones de magnesio que contienen Al, Mn o Zn expuestas a la atmósfera, revelan enriquecimiento de constituyentes secundarios.<sup>[16]</sup> El análisis de la superficie indicó que el óxido formado por el aire en las aleaciones Mg-Al tiene una estructura acodada que contiene  $MgO$  / sustrato Mg-Al-óxido rica en óxido de magnesio que se disuelve cuando aumenta el contenido de Al.<sup>[19][7]</sup> Es probable que este beneficio sea debido a la fuerte tendencia del aluminio a formar una capa pasiva estable.<sup>[7]</sup>

Se encontró que en el AZ91 rápidamente solidificado es más resistente al agrietamiento en ambientes que contienen cloruros que las capas de magnesio puro.

El estudio realizado en cintas de hilado de fusión rápidamente solidificadas (RS) de Mg-Al, indica que el óxido formado en la superficie de la cinta tiene una estructura en forma de capas de  $MgO$ /óxido-Mg-Al, además los márgenes en los productos de corrosión de Al/Mg y Al/O aumenta cuando se incrementa el tiempo de inmersión en soluciones que contienen cloro.<sup>[20][21]</sup>



## I.2.6 FACTORES METALÚRGICOS

La corrosividad de las aleaciones de magnesio depende de su metalurgia y los factores ambientales que los atañen. La metalurgia del magnesio involucra aleantes e impurezas, fase de los componentes y microestructura. La manipulación metalúrgica nos provee de métodos efectivos para mejorar la resistencia a la corrosión del magnesio.

### I.2.6.1 IMPUREZAS Y LÍMITES DE TOLERANCIA

Algunos elementos son benéficos y mejoran la resistencia de corrosión mientras que otros no tienen influencia significativa. Existen elementos que afectan el comportamiento de la resistencia a la corrosión del magnesio y son determinados como impurezas.

Los rangos de corrosión aumentan entre 10 y 100 cuando las concentraciones de contaminantes críticos como Ni, Fe y Cu se incrementan. <sup>[22]</sup> A las mismas concentraciones el efecto perjudicial de estos elementos disminuye en el orden Ni>Fe>Cu. Para cada uno de estos elementos el límite puede ser ilustrado en la siguiente figura:

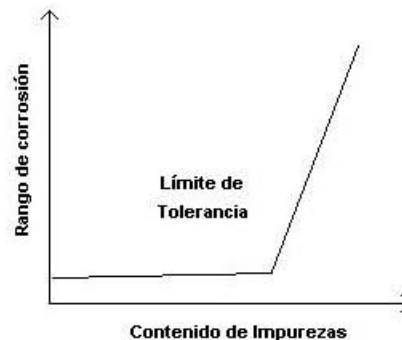


Fig. 1.9 Curva generalizada mostrando la influencia de los elementos X (Ni, Fe, Cu) en el rango de corrosión del magnesio.

Cuando la concentración de impurezas excede el límite de tolerancia el rango de corrosión es considerablemente incrementado, mientras que el rango de corrosión es bajo cuando la concentración de impurezas se encuentra por debajo del límite.

Ocasionalmente con Fe y Ni los rangos de corrosión varían ampliamente dependiendo del método de manufactura <sup>[8]</sup>, se ha encontrado que incrementando el rango de solidificación se puede aumentar el límite de tolerancia del Ni pero no para en Fe y Cu. <sup>[11]</sup>

Diferentes aleaciones poseen diversos límites de tolerancia <sup>[13]</sup> como se muestra en la siguiente tabla:

Especimen	Condición	Límites de tolerancia		
		Fe	Ni	Cu
Mg puro		170 ppm	5 ppm	1000 ppm
Mg puro		170 ppm	5 ppm	1300 ppm
AZ91		20 ppm	12 ppm	900 ppm
AZ91		0.032 Mn	50 ppm	400 ppm
AZ91	Alta presión (F)	0.032 Mn	50 ppm	400 ppm
AZ91	Baja Presión (F)	0.032 Mn	10 ppm	400 ppm
AZ91	Baja Presión (T4)	0.035 Mn	10 ppm	100 ppm
AZ91	Baja Presión (T6)	0.046 Mn	10 ppm	400 ppm
AZ91B			< 100 ppm	<2500 ppm
AZ91	Die casting	0.032 Mn	50 ppm	400 ppm
AZ91	Die casting	50 ppm	50 ppm	700 ppm
AZ91	Die casting	0.032 Mn	50 ppm	700 ppm
AZ91	Gravity casting	0.032 Mn	10 ppm	400 ppm
AM60	Die casting	0.021 Mn	30 ppm	10 ppm
AS41	Die casting	0.01 Mn	40 ppm	200 ppm

Tabla 1.7. Límites de tolerancia de impurezas para el magnesio y sus aleaciones.

## I.2.7 INFLUENCIAS EN EL AMBIENTE

No existen materiales que sean altamente resistentes a la corrosión en todos los tipos de ambiente. La alta resistencia a la corrosión reportada para materiales, siempre se refiere a un ambiente específico. Un material en particular puede tener alta resistencia a la corrosión en un ambiente pero baja resistencia a ésta en otro. Aunque las aleaciones de magnesio tienen sus propios ambientes de servicio preferentemente recomendados, pocos medios son apropiados para aleaciones de acero y aluminio. Por ejemplo, las aleaciones de magnesio son altamente estables en soluciones básicas, pero en medios neutrales y ácidos se disuelven a altas velocidades. Esto es un tanto diferente a las aleaciones de aluminio, las cuales son normalmente por completo estables en medios neutrales, pero son inestables tanto en soluciones básicas como en ácidas.

### I.2.7.1 SOLUCIONES

Las soluciones acuosas inducen agresiones que varían no solamente con la solución, sino también con el volumen, movimiento y temperatura del líquido.<sup>[23]</sup> La agresión por agua pura fría, de baja conductividad, es muy lenta. Una película continua de esta agua puede proveer de protección contra la ‘atmósfera’ y dar como resultado altos límites de resistencia que son obtenidos en aire ordinario. La reacción con el agua produce una película de poco  $Mg(OH)_2$  soluble<sup>[8]</sup>. El oxígeno disuelto no parece ser muy importante en la corrosión del magnesio y sus aleaciones en soluciones de cloruro,<sup>[10]</sup> puesto que las soluciones de sal o aún agua destilada saturada con  $CO_2$  son mucho más corrosivas.

El magnesio es muy resistente a la corrosión por álcalis si excede el pH por 10.5, el cual corresponde al pH del  $Mg(OH)_2$  saturado.<sup>[11]</sup> La agresión por soluciones de álcali diluido es insignificante a una temperatura superior al punto de ebullición.<sup>[16]</sup> Consecuentemente un 10% de solución cáustica es usada comúnmente para limpieza a temperaturas superiores al punto de ebullición.<sup>[10]</sup>

Las soluciones de cloruro de sodio que contienen cantidades apreciables de álcali, agreden al magnesio y sus aleaciones a una velocidad muy baja.<sup>[8]</sup> Con el incremento de pH sobre 10.2 en el que el  $Mg(OH)_2$  está formado, el efecto de impurezas tanto en metal y en el medio corrosivo, es aparentemente oscurecido por la gran tendencia a la formación de la película.

Los iones cloruro promueven agresiones rápidas de magnesio en soluciones acuosas neutras<sup>[8][11]</sup>. La velocidad de corrosión se incrementa rápidamente con el aumento de concentración del ion  $Cl^-$ .<sup>[12]</sup>

Pequeñas cantidades de sales disueltas en agua, particularmente cloruro o sales de metal pesado, localmente dividen la película protectora y da como resultado corrosión por picaduras.<sup>[10]</sup> En soluciones de cloruro como el agua de mar, la agresión usualmente resulta en corrosión por picaduras.<sup>[23]</sup> Song y otros (1999 ) compararon la conducta electroquímica del magnesio en soluciones de  $Na_2SO_4$  y  $NaCl$ . Ellos sospechaban que el  $Cl^-$  estaba implicado en el paso intermedio de la disolución de magnesio. La presencia de  $Cl^-$  pudo hacer la película de la superficie más activa o incrementar el área de la película libre y podría también acelerar la velocidad de la reacción electroquímica desde el magnesio hasta los iones univalentes de magnesio.

Los fluoruros neutrales o alcalinos forman  $MgF_2$  insoluble y no son muy corrosivos.<sup>[16]</sup> Los fluoruros son químicamente inertes.<sup>[8][11]</sup> Es bien sabido que el ion fluoruro es un buen inhibidor de la corrosión del magnesio y sus aleaciones<sup>[24]</sup>, por la formación de una película de  $MgF_2$  sobre la superficie del metal. El fluoruro de magnesio es altamente insoluble en ácido hidrofúrico y como consecuencia, el magnesio no se disuelve en este ácido.<sup>[23]</sup> La agresión puede, de cualquier forma, ocurrir en ácido hidrofúrico acuoso diluido y si es así, es de un tipo de picadura.

El sulfato de magnesio es fácilmente soluble en ácido sulfúrico diluido; no hay ninguna película protectora que se forme en este ácido, así que su agresión es rápida. El sulfato de magnesio es, de cualquier forma, solo escasamente soluble en ácido sulfúrico concentrado. Cuando, por esa razón, el magnesio está sumergido en un ácido fuerte (ácido sulfúrico), la agresión inicial produce una capa de sulfato de magnesio, la cual rápidamente satura el ácido en la interfase, y la reacción es reducida a un desvanecimiento a baja velocidad.<sup>[23]</sup>

Los nitratos, fosfatos y sulfatos agreden al magnesio, pero no al mismo grado que los cloruros<sup>[8]</sup>. Las soluciones de silicato, fluoruro, fosfato y dicromato son menos corrosivas que el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{ClO}_4^-$ , la velocidad de corrosión es moderadamente alta y los cambios potenciales muy pequeños con densidad corriente.<sup>[12]</sup>

Las sales oxidantes, especialmente las que contienen átomos de cloro o azufre, son más corrosivas que las sales no oxidantes, pero los cromatos, vanadatos, fosfatos y muchos otros son formadores de película y tienden a retardar la corrosión. El ácido crómico embiste al magnesio y sus aleaciones muy lentamente.<sup>[8]</sup>

Una solución en ebullición del 20% de  $\text{H}_2\text{CrO}_3$  en agua es muy usada para remover los productos de corrosión de las aleaciones de magnesio sin atacar la base metálica.<sup>[10]</sup>

El magnesio es fácilmente atacado por todos los ácidos minerales excepto el ácido crómico y el hidrofúrico.<sup>[16][10][11]</sup> Las señales del ion cloruro incrementa marcadamente la velocidad de corrosión. Algunos ácidos orgánicos especialmente aquellos que contienen grupos reactivos polares, fácilmente agreden al magnesio y sus aleaciones.

Los ácidos más fuertes como el acético y el tartárico, son frecuentemente usados en una concentración de 10% en productos fundidos y forjados. Muchos líquidos orgánicos como el etanol, alcoholes metilados, aceites y agentes degradantes, son un poco inertes al magnesio a temperatura ambiente interna.<sup>[8][23]</sup>

### **1.2.7.2 LA ATMÓSFERA**

En general, el ataque atmosférico en condiciones húmedas es ampliamente superficial. Si la atmósfera es limpia, pero no seca y la humedad se aproxima al 100% un patrón disperso de manchas de corrosión eventualmente aparece, pero áreas considerables de superficies inafectadas permanecen por un largo tiempo. Si de cualquier forma, la superficie se vuelve contaminada por polvo corrosivo o partículas catódicas, toda la superficie rápidamente se cubre con una capa grisácea de producto corrosivo.<sup>[23]</sup>

Una superficie limpia y desprotegida de aleación de magnesio, expuesta a atmósferas internas o externas libres de aerosoles salinos desarrolla una capa gris que protege al metal de la corrosión.<sup>[10]</sup>

La humedad juega una mayor parte en la corrosión del magnesio y sus aleaciones.<sup>[16]</sup> El vapor de agua en el aire incrementa la corrosión,<sup>[10]</sup> La velocidad de ataque es insignificante a baja humedad, pero se incrementa considerablemente sobre el 90% de la humedad relativa (RH).<sup>[25][10]</sup> A mayor RH, superior a 90%, menor corrosión resulta de la formación de una capa casi invisible de  $Mg(OH)_2$  amorfo. A medida que la humedad se incrementa (más de este nivel), se desarrollan películas de manchas gruesas cuyo principal producto de corrosión es  $Mg(OH)_2$  cristalino.<sup>[10]</sup>

El cloro seco, yodo, bromo y flúor no causan corrosión a temperaturas ambiente aún cuando contienen 0.02% de agua, pero el cloro húmedo, yodo y bromo bajo un punto de rocío causan ataques severos.<sup>[10]</sup>

Las soluciones salinas son corrosivas, pero las partículas de sal deshidratadas casi no producen efectos así que componentes de magnesio sin pintura expuestos cerca de ambientes marinos, invariablemente tienen una superficie empañada y discretamente áspera, con ningún evidente producto de corrosión.<sup>[23]</sup>

El  $SO_2$ , ya sea en fase gaseosa o líquida, no causa corrosión<sup>[16]</sup> pero el  $SO_2$  húmedo es severamente corrosivo por la formación de ácidos sulfurosos y sulfúricos.<sup>[10]</sup> En contraste, el  $SO_2$  es muy efectivo porque reduce la oxidación del magnesio a altas temperaturas; el gas natural no ataca al Mg pero la presencia del vapor de agua puede dar como resultado una ligera corrosión.<sup>[16]</sup>

### **1.2.7.3 SUELO**

El magnesio es bastante resistente a la corrosión en los suelos, la presencia de calcio y sales de magnesio en la mayoría de los suelos tiende a inhibir la corrosión,<sup>[16]</sup> pero cabe mencionar que la corrosividad es dependiente del tipo de suelo al que se encuentre expuesta la aleación.

### **1.2.7.4 TEMPERATURA**

Las altas temperaturas dan como resultado una rápida corrosión, el rango de corrosión cuando se incrementa la temperatura es más grande que el rango relativamente estático del incremento del magnesio puro. Esto es debido a la presencia de pequeñas cantidades de impurezas que se activan a altas temperaturas, parece que el comienzo de la corrosión por picaduras de una determinada aleación depende de la temperatura, así que es probable que exista una temperatura crítica de picaduras, bajo la cual la corrosión es uniforme<sup>[8]</sup>. En contraste la corrosión del AZ31 dentro de perclorato de magnesio, se incrementa gradualmente con el aumento de temperatura.

### I.2.7.5 VELOCIDAD DEL FLUJO

La velocidad de flujo de una solución acuosa es crítica cuando afecta a la capa protectora de hidróxido. La corrosión se presenta de manera más rápida cuando la solución en la que se encuentra sometida la aleación es agitada. <sup>[10]</sup>

### I.2.8 PREVENCIÓN A LA CORROSIÓN

Debido a que las aleaciones de magnesio son relativamente activas, la prevención a la corrosión es de mucho interés, algunas estrategias de prevención incluyen:

- ✍ **Uso de aleaciones de alta pureza:** Reducen impurezas por debajo de su límite de tolerancia.
- ✍ **Uso de aleaciones nuevas:** Desarrollar aleaciones con nuevos elementos, fases y distribuciones de su microestructura.
- ✍ **Modificación de la superficie:** Incluyendo implantación de iones y aleaciones laser.
- ✍ **Uso de capas protectoras o revestimientos:** Tratamientos protectivos y decorativos aplicados en la superficie.

#### I.2.8.1 TRATAMIENTOS PROTECTIVOS Y DECORATIVOS

Los tratamientos protectivos del magnesio pueden clasificarse en diferentes grupos:

1. **Anodizado:** Los tratamientos anodizados incluyen tratamientos propios y anodizados de fluoruro. Los depositos forman un revestimiento duro parecido a la cerámica que confiere resistencia a la abrasión y protección a la corrosión.
2. **Tratamiento químico:** Los componentes son sumergidos en soluciones de cromo que limpian y pasivan la superficie hasta un cierto límite mediante la formación de una capa de  $Mg(OH)_2$  y un componente de cromo.
3. **Sello con resina epoxica:** El componente es calentado de 20 a 200° C para remover la humedad, enfriado a 60° C, sumergido en la solución de resina, drenado, secado y cocido.

### **I.3 INVESTIGACIONES PREVIAS**

Debido a que las pérdidas por corrosión están directamente relacionadas con el tipo de atmósfera donde se encuentran expuestos los materiales, durante la celebración del II Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección en Noviembre de 1986 en Maracaibo, Venezuela, tuvo lugar una mesa redonda durante la cual se expusieron ideas básicas para la elaboración de un Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica (MICAT). El tema suscitó gran interés y las delegaciones asistentes al congreso como Argentina, Colombia, España, México, Portugal y Venezuela expresaron su intención de participar en el proyecto.

Con el desarrollo del proyecto se pretendió conseguir:

- ✓ Mayor conocimiento acerca de los mecanismos de corrosión atmosférica en las distintas atmósferas de Ibero América.
- ✓ Establecer, a través de adecuados tratamientos estadísticos de resultados, expresiones matemáticas que permitan el cálculo de la corrosión atmosférica en función de parámetros climáticos y de contaminación.
- ✓ Elaborar el MICAT.

Dentro de este proyecto, México tomó un papel importante; contando dentro del grupo operativo al instituto de investigaciones eléctricas “IIE”, Facultad de Química de la “UNAM” y el instituto de Metalurgia de la “Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Para la elaboración del MICAT , se consideró la clasificación de Köppen en donde se reconocen cinco grandes tipos de climas:

1. A: Tropical Lluvioso con temperatura media mensual superior a 18° centígrados, lluvias anuales superiores a 750 mm.
2. B: Clima seco.
3. C: Clima templado húmedo, donde la temperatura media del mes más cálido es superior a 18° C y la temperatura del mes más frío es inferior a 0° C.
4. D: Clima frío o boreal, donde la temperatura media del mes más cálido es superior a 10° C y la temperatura del mes más frío es inferior a 0° C.
5. D: Clima polar, donde la temperatura media del mes más cálido es inferior a 10° C y la temperatura del mes más frío es inferior a 0° C.

Cada uno de ellos se subdivide en tipos climáticos basados en la distribución de lluvia, frío o grado de sequedad durante las diferentes estaciones a lo largo del año, en donde las letras minúsculas indican el grado de precipitación:

- Estación Húmeda: Lluvias todo el año.
- Estación con lluvias monzónicas: Con ciclones tropicales en verano.
- Estación seca en verano y con lluvias en invierno.
- Estación seca en invierno y con lluvias en verano.
- Lluvia escasa todo el año.

Las estaciones de ensayo se situaron en las distintas zonas climáticas existentes en México de acuerdo con Köppen<sup>[26]</sup>, como se muestra en la siguiente tabla:

Estación de Ensayo	Zona	Clima	Sitio	Organismo	Atmósfera Aparente
México D.F. M1	Meseta Central	Templado Subhúmedo	Fac. Química	UNAM	Urbana
Cuernavaca M2	Meseta Central	Tropical Húmedo	Casa Particular	IIE	Urbana
San Luis Potosí M3	Meseta Central	Seco Estepario	Instituto De Metalurgia	UASLP	Urbana
Acapulco M4	Meseta Central	Tropical Húmedo	Comisión Federal de Electricidad	IEE	Urbana

Tabla 1.8 Características de la estaciones de ensayo del proyecto MICAT de acuerdo con Köppen<sup>[9]</sup>.

En las estaciones de ensayo del MICAT-México, las probetas de ensayo fueron fijadas en pupitres metálicos tipo Hudson formando un ángulo de 45 grados con la horizontal. La exposición de las probetas fueron mirando al sur. Para la caracterización de la atmósfera se recurrió a datos meteorológicos y de contaminación atmosférica, quedando situada la estación de México en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México en una zona básicamente urbana.<sup>⊕</sup>

La composición química de los materiales utilizados en el proyecto se muestran en la tabla 1.9.

Material	Composición Química							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	N	Cu
Acero	0,0414	0,75	0,78	0,017	0,0	0,0	0,27	0,007
	Al	Sn	Fe	Pb	Cd	Cu		
Cinc	0,62		0,05	0,0	0,0	0,0		
	Al	Sn	Zn	Pb	Fe			
Cobre	0,0	0,0	0,07	0,0	0,033			
	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Si		
Aluminio	0,014	0,83	0,03	0,9	0,04	0,28		

Tabla 1.9. Composición química de los materiales utilizados en el proyecto MICAT.

Las probetas utilizadas fueron en forma plana, con dimensiones de acuerdo al material,<sup>[27]</sup> la matriculación de las mismas fue por técnica de estampación.<sup>[28]</sup>

<sup>⊕</sup> Información suministrada por el Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.



Las secuencias de los periodos de exposición de las probetas incluyeron tres exposiciones correlativas de exposición (series 11, 12 y 13), una exposición de dos años (serie 21), una exposición de tres años (serie 31) y una exposición de cuatro años (serie 41), como se aprecia en la siguiente figura:

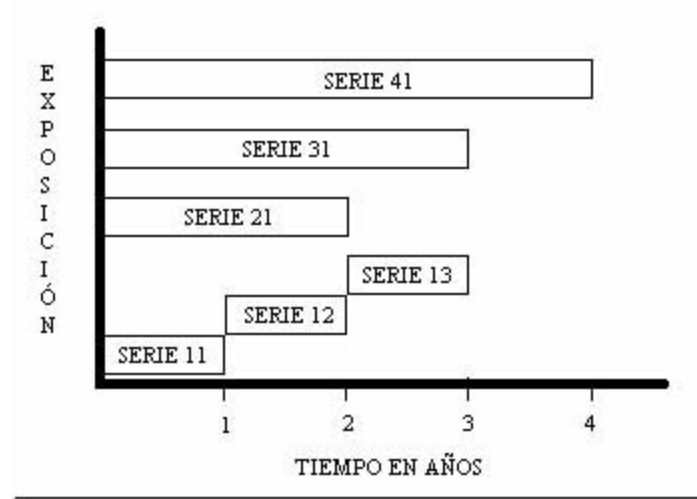


Fig. 1.10 Cronograma de exposición de probetas en la atmósfera.

Cada serie se expuso en cuadruplicado, tres probetas para la determinación de pérdida de masa y una para el análisis de productos de corrosión, morfología de ataque, etc.

La medición de la corrosión atmosférica se determinó por medio de la pérdida de masa después de haber retirado los productos de corrosión. <sup>[28]</sup>

La evaluación de la corrosión por picaduras fue hecha revisando la superficie afectada por medio de técnicas microscópicas. <sup>[29]</sup>

En las siguientes tablas se muestran agrupados los resultados, para cada metal, los datos de corrosión anual de los tres primeros años de exposición (series 11-13), así como los datos correspondientes a los periodos de 2, 3 y 4 años (series 21,31 y 41).

Identificación	Estación	Corrosión. $\mu\text{m}/\text{año}$					
		Serie 11	Serie 12	Serie 13	Serie 21	Serie 31	Serie 41
M1	México, D.F.	15.4	8.6	5.1	9.2	6.6	
M2	Cuernavaca	15.2	11.4	13.7	11.8	8.8	7.3
M3	San Luis Potosí	37.5	26.4	29.4	25.4	22.7	20.3
M4	Acapulco	22.6	24.8	18.8	13.6	10.1	10.0

Tabla 1.10. Datos de corrosión del acero al carbono correspondiente a un año de exposición (Series 11, 12 y 13) dos años de exposición (Serie 21), tres años de exposición (Serie 31) y cuatro años de exposición (Serie 41).

Identificación	Estación	Corrosión. $\mu\text{m/año}$					
		Serie 11	Serie 12	Serie 13	Serie 21	Serie 31	Serie 41
M1	México, D.F.	0.81	0.83	0.81	0.47	0.43	
M2	Cuernavaca	1.16	1.99	0.95	1.35	0.84	1.03
M3	San Luis Potosí	1.39	2.95	0.98	1.72	1.67	1.55
M4	Acapulco	1.71	1.44	1.23	1.67	1.04	1.78

Tabla 1.11. Datos de corrosión del cinc correspondiente a un año de exposición (Series 11, 12 y 13) dos años de exposición (Serie 21), tres años de exposición (Serie 31) y cuatro años de exposición (Serie 41).

Identificación	Estación	Corrosión. $\mu\text{m/año}$					
		Serie 11	Serie 12	Serie 13	Serie 21	Serie 31	Serie 41
M1	México, D.F.	0.48	0.84	0.60	0.76	0.52	
M2	Cuernavaca	0.23	0.28	0.40	0.28	0.27	0.41
M3	San Luis Potosí	0.67	0.48	0.43	0.54	0.56	0.54
M4	Acapulco	1.01	1.55	1.12	0.75	0.66	0.95

Tabla 1.12. Datos de corrosión del cobre correspondiente a un año de exposición (Series 11, 12 y 13) dos años de exposición (Serie 21), tres años de exposición (Serie 31) y cuatro años de exposición (Serie 41).

Identificación	Estación	Corrosión. $\mu\text{m/año}$					
		Serie 11	Serie 12	Serie 13	Serie 21	Serie 31	Serie 41
M1	México, D.F.	0.42	0.08	0.16	0.11	0.14	
M2	Cuernavaca	0.14	0.11	0.46	0.11	0.14	0.10
M3	San Luis Potosí	1.78	0.62	0.46	0.70	0.70	0.59
M4	Acapulco	2.46	1.70	0.73	1.05	0.76	0.57

Tabla 1.13. Datos de corrosión del aluminio correspondiente a un año de exposición (Series 11, 12 y 13) dos años de exposición (Serie 21), tres años de exposición (Serie 31) y cuatro años de exposición (Serie 41).

Mediante este proyecto se consiguieron estimaciones de la corrosión atmosférica a largo plazo, una basada en la norma ISO 9224: <sup>[30]</sup>

$$C = A t^n$$

Donde C es la corrosión en  $\mu\text{m}$  al cabo de t años de exposición y n un exponente generalmente menor a la unidad, función a su vez del tipo de atmósfera y composición del metal. <sup>[31]</sup>

Se obtuvieron posibles valores para el exponente “n” para diferentes materiales y tipos de atmósferas <sup>[30]</sup>, como se muestra a continuación:

Material	Atmósfera Rural	Atmósfera Urbano Industrial	Atmósfera Marina
Acero	0,50	0,60	0,70
Zinc	0,65	0,90	0,90
Cobre	0,60	0,70	0,70
Aluminio	0,70	0,90	0,75

*Tabla 1.14. Posibles valores para el exponente “n” de corrosión atmosférica para periodos largos de tiempo.*

A pesar de los posibles exponentes encontrados en el desarrollo del proyecto MICAT, no podemos utilizar esta ecuación para el magnesio y sus aleaciones, aun considerando la similitud del aluminio con el mismo, ya que no ha sido estudiado de igual forma que los materiales mencionados, por tal motivo se estudiará el magnesio durante un periodo de seis meses para cuantificar la corrosión que puede sufrir en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

# *Capítulo II*

## *“Material Y Métodos”*

# I MATERIAL Y MÉTODOS

Por la disposición de recursos, tanto humanos como materiales, lo anterior sugiere que se lleven a cabo diversas pruebas (cuantificación de la cantidad de corrosión, pruebas mecánicas de resistencia, dureza y microscopía) y análisis estadísticos (prueba t, análisis de varianza, comparaciones entre tratamientos, etc.) para alcanzar el objetivo la investigación planteada.

Para llevar a cabo las pruebas y análisis, existen dos factores: los sitios de exposición, es decir:

- Ambiente Rural (Estación Villa de las Flores).
- Ambiente Urbano (Estación Merced).
- Ambiente Industrial (Estación Xalostoc).

y los recubrimientos aplicados, esto es:

- Recubrimiento de Pintura
- Recubrimiento de Polietileno
- Sin recubrimiento (grupo de control.).

de tal forma que tendremos para el análisis estadístico por tratamientos, un diseño 3x3, determinándose como tratamientos:

- |                        |   |  |
|------------------------|---|--|
| 1. Ambiente Rural      | – | Probetas con recubrimiento de pintura.     |
| 2. Ambiente Rural      | – | Probetas con recubrimiento de polietileno. |
| 3. Ambiente Rural      | – | Probetas sin recubrimiento.                |
| 4. Ambiente Urbano     | – | Probetas con recubrimiento de pintura.     |
| 5. Ambiente Urbano     | – | Probetas con recubrimiento de polietileno. |
| 6. Ambiente Urbano     | – | Probetas sin recubrimiento.                |
| 7. Ambiente Industrial | – | Probetas con recubrimiento de pintura.     |
| 8. Ambiente Industrial | – | Probetas con recubrimiento de polietileno. |
| 9. Ambiente Industrial | – | Probetas sin recubrimiento.                |

Por otro lado, se dejaron 3 especímenes empaquetados al vacío (sin exposición) que se clasificarán en tres tratamientos más, como elementos testigos o grupo de control de comparación para las pruebas de tensión y dureza, esto es:

10. Probetas con recubrimiento de pintura - Sin exposición ambiental.
11. Probetas con recubrimiento de polietileno - Sin exposición ambiental.
12. Probetas sin recubrimiento - Sin exposición ambiental.

Partiendo de la hipótesis y diseño, describiremos la selección de los medios de exposición, preparación de muestras y pruebas realizadas.

## **I.1 AMBIENTES DE EXPOSICIÓN**

Los sitios elegidos, se deben a la posibilidad de sondeo por parte del “Sistema de Monitoreo Atmosférico Nacional”, sobre los principales contaminantes atmosféricos y condiciones climáticas que afectan a la mayoría de los materiales.

Se seleccionaron tres sitios de exposición:

1. Ambiente Rural (Estación Villa de las Flores).
2. Ambiente Urbano (Estación Merced).
3. Ambiente Industrial (Estación Xalostoc).

### **I.1.1 AMBIENTE RURAL.**

Se eligió como ambiente rural el sitio determinado por el SIMAT como estación de monitoreo (EM) “**Villa de las Flores**”. Se ubica en la zona NE del Valle de México, dentro de la Escuela Primaria del Estado de México "Lic. Benito Juárez García", Calle Primavera y Calle Palma Cristi s/n, Colonia Villa de las Flores, Municipio Coacalco, Estado de México, CP 55710. Se encuentra en un área suburbana, principalmente habitacional con algunos comercios y servicios.



Fig. 2.1 Mapa de localización estación Villa de las Flores. (detalle de nomenclatura en tabla 2.4)

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. Se ubica con una latitud: 19° 39' 27.617" longitud: 99° 05' 46.704".



*Fig. 2.2 Estación Merced.*

## PARAMETROS DE MONITOREO

Los parámetros de monitoreo en esta estación son:

SO <sub>2</sub> .	CO.	NO <sub>2</sub> .
PM <sub>10</sub> .	TMP.	HR.
VV.	DB.	

*Tabla 2.1 Parámetros de monitoreo en estación "Villa de las Flores".*



### I.1.2 AMBIENTE URBANO

Como ambiente urbano, se prefirió la localidad determinada por el SIMAT como EM “Merced” Se localiza en la zona centro de la “Ciudad de México”, dentro del Centro de Salud "Luis E. Ruiz". Avenida Congreso de la Unión No. 148, Colonia Merced Balbuena, Delegación Venustiano Carranza, México D.F. CP 15860.

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, microbuses, autobuses, pick-up, camiones de carga, tráileres y motocicletas.

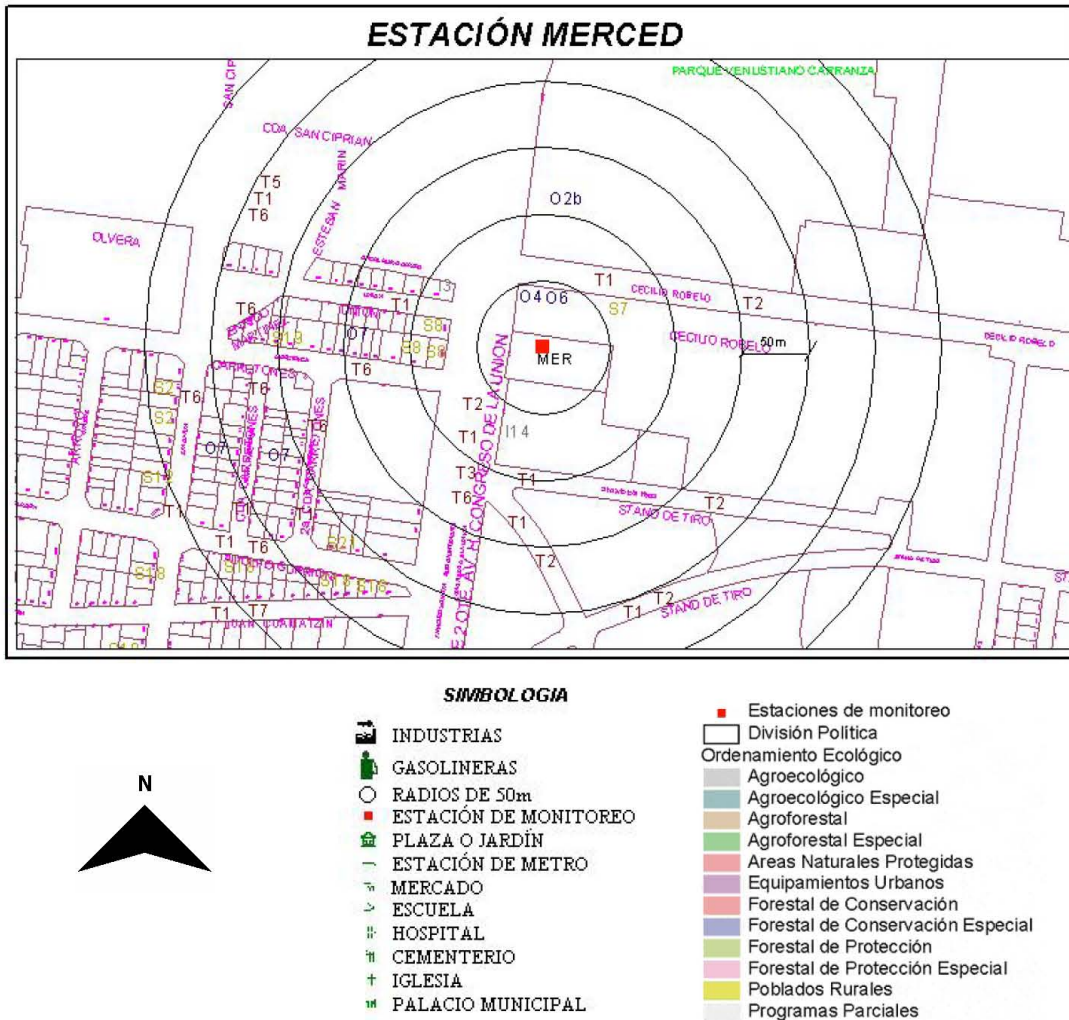


Fig. 2.3 Mapa de localización estación Merced. (detalle de nomenclatura en tabla 2.4)

La EM se localiza en la azotea del Centro de Salud (inmueble de un nivel de construcción). Se puede encontrar con una latitud: 19° 25' 27.792" y longitud: 99° 07' 09.397.



Fig. 2.4 Estación Merced.

## PARAMETROS DE MONITOREO

Los parámetros de monitoreo en esta estación son:

SO <sub>2</sub> .	CO.	NO <sub>2</sub> .
NO <sub>3</sub> .	O <sub>3</sub> .	PM <sub>2.5</sub>
PM <sub>10</sub> .	PST.	Pb.
TMP.	HR.	UVA.
UVB.	VV.	DB.

Tabla 2.2 Parámetros de monitoreo en estación "Merced".

### I.1.3 AMBIENTE INDUSTRIAL

Como ambiente industrial, se seleccionó la zona NE del “Valle de México”. Por carencia de espacio, la colocación del bastidor de prueba se realizó a 100 m de la EM del SIMAT “Xalostoc”, dentro de la Escuela Primaria "Cuahutemoc", Calle Oro #9 entre Vía Morelos Y Xicotencatl, Colonia Xalostoc, Municipio Ecatepec de Morelos, Estado de México, CP 55540.

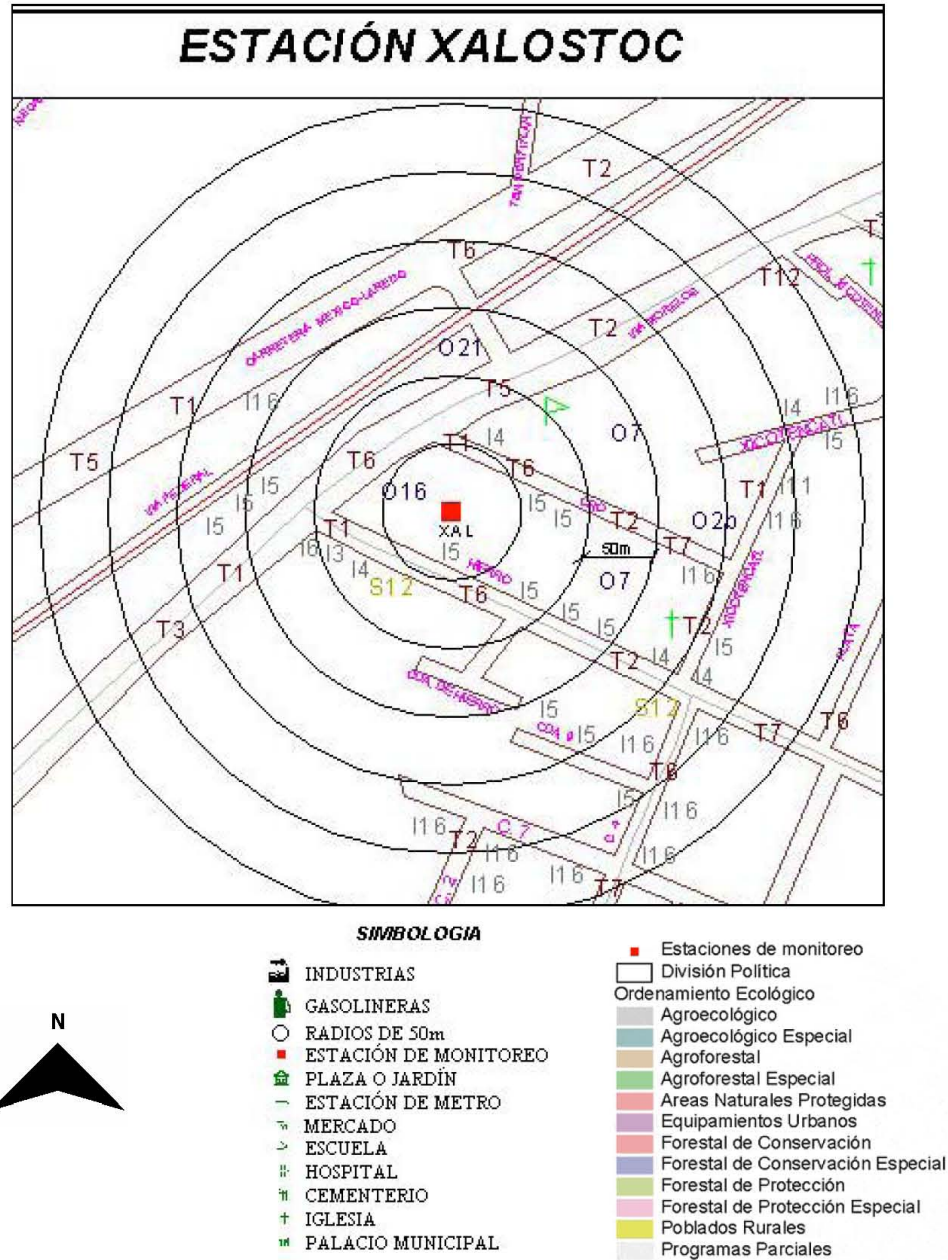


Fig. 2.5 Mapa de localización estación “Xalostoc”.(detalle de nomenclatura en tabla 2.4)

A 20 m al este de la EM 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 de industrias (químicas, del vestido, de consumo alimenticio y de productos metálicos y de madera). A 3 m al norte de la EM en la Calle Oro, se encuentran jardineras con escasa cubierta vegetal de temporal

La EM 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 en la dirección antes mencionada.



Fig. 2.6 Estación "Xalostoc".

## PARAMETROS DE MONITOREO

Los parámetros de monitoreo en esta estación son:

SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>
O <sub>3</sub>	PM10	PST
PM10	Pb	TMP
HR	VV	DV
DT	DH	DS
CE	C <sup>+</sup>	A <sup>-</sup>

Tabla 2.3 Parámetros de monitoreo en estación "Merced".

INDUSTRIA (1)		TRANSPORTE (3)	
I1	Cementera	T1	Autos particulares
I3	Industria de consumo alimenticio	T2	Taxis
I4	Industria del vestido	T3	pasajeros ligeros
I5	Industria química	T4	pasajeros pesados
I6	Industria química y de transformación	T5	pasajeros a diesel
I7	Madera y derivados	T6	carga ligeros
I8	Materiales para construcción	T7	carga pesados
I13	Planta de tratamiento de aguas residuales	T8	transporte que no usa combustible
I14	Productos de consumo varios	T9	Aeronaves
I16	Productos metálicos	T10	Motocicletas
I17	Productos vegetales	a	Tránsito vehicular elevado
I18	Papel Reciclado	b	Tránsito vehicular moderado
I19	Solventes y plásticos	c	Tránsito vehicular bajo

SERVICIOS (2)			
N	Almacén de Combustibles	S17	Talleres de pintado
S2	Baños públicos	S18	Talleres mecánicos
S3	Carga de Aeronaves (hangares y/o aeropuertos)	S19	Tintorerías
S4	Central de Autobuses	S20	Tiraderos a cielo abierto
S5	Contenedores de basura	S21	Tortillerías
S6	Distribuidora de gas (gaseras)	S22	Paraderos de Microbuses
S7	Gasolineras	S23	Carpinterías
S8	Hoteles	S24	depósitos de Cartón
S10	Panificadoras	S25	Fotocopiadoras
S11	Paraderos de Autobuses	S26	Herrerías
S12	Puestos de comida asada al carbón	S27	Hojalaterías
S13	Rellenos sanitarios	S28	Restaurantes de comida asada con leña
S14	Restaurantes de comida asada al carbón	S29	Talleres Eléctricos
S15	Rosticerías	S30	Tlapalerías
S16	Talleres de impresión (artes gráficas y serigrafía)	S31	Construcciones
		S32	Hospitales

OTROS (4)			
O2	Suelo sin pavimentar	O12	Restaurantes a Gas
O2b	Pasto	O13	Comercios varios (tienditas)
O3	Suelo con cubierta vegetal permanente	O14	Suelo con cubierta vegetal de temporal
O4	Campos de fútbol sin cubierta vegetal	O15	Edificio de dos pisos Escuela
O5	Campos de fútbol con cubierta vegetal permanente	O16	Estacionamiento
O6	Campos de fútbol con cubierta vegetal sintética	O17	Lavandería Automática
O7	Zona habitacional	O18	Productos de Limpieza
O7a	Unidad habitacional	O19	Molino
O7b	Casa habitación (zona residencial)	O20	Veterinaria
O8	Semáforos	O21	Vulcanizadora
O9	Refacciones Mecánicas	O22	Bodega de Materiales
O10	Bodegas	O23	Campos de cultivo
O11	Canchas Pavimentadas		

Tabla 2.4 Nomenclatura de referencia para los mapas de las estaciones.

## I.2 PANELES DE EXPOSICIÓN

Se construyeron cuatro paneles de exposición que soportan como máximo 70 especímenes normalizados <sup>[28]</sup> para pruebas de corrosión atmosférica.

Los bastidores de soporte forman un ángulo de  $30^\circ$  con la horizontal y tiene una separación con el nivel de piso de 85 cm. <sup>[27]</sup>

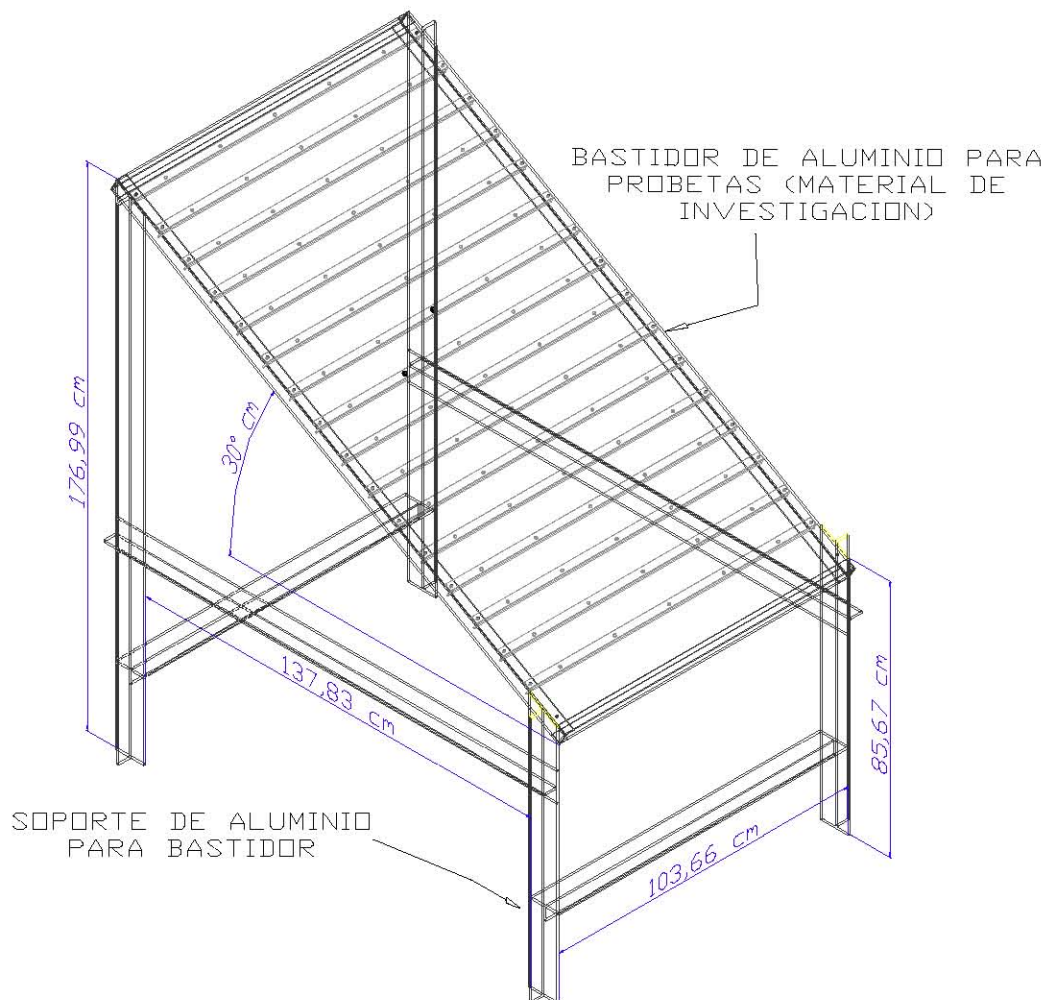


Fig. 2.7 rack de exposición para especímenes de prueba en corrosión atmosférica.



*Fig.2.8 Paneles de exposición atmosférica en sus diferentes vistas.*

### ***I.3 PREPARACIÓN DE LOS ESPECIMENES DE PRUEBA.***

A partir de una lámina de magnesio AZ31 recubierta por un lado de polietileno y por el otro con pintura con dimensiones 18x24x0.250 pulgadas, se obtuvieron por corte con máquina “JET 2500, HEAVY DUTY HACK, SAWING MACHINE” 46 piezas primarias.



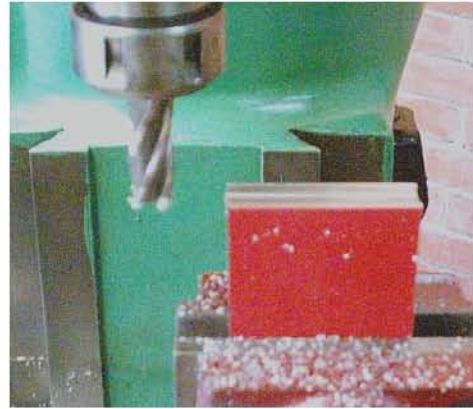
*Fig. 2.9 Cortadora Jet 2500 utilizada para el corte inicial de lámina de Mg AZ31.*

Las Piezas primarias fueron rectificadas por grupos, mediante una fresa “OIMSA FTX-8” para homogeneizar los tamaños de las mismas y aproximarlas a 3.2 x 4.5 x 0,250 pulgadas.



*Fig.2.10 Fresa OIMSA FTX-8 Utilizada para la rectificación de placas primarias.*





*Fig. 2.11* Proceso de rectificación para homogeneización.

Una vez rectificadas, las muestras se abastecieron de un barreno de 3/8" con un taladro fresador vertical "WT , DM 30, 8 3/8" x 28 3/4", para su posible sujeción en el rack de exposición atmosférica.



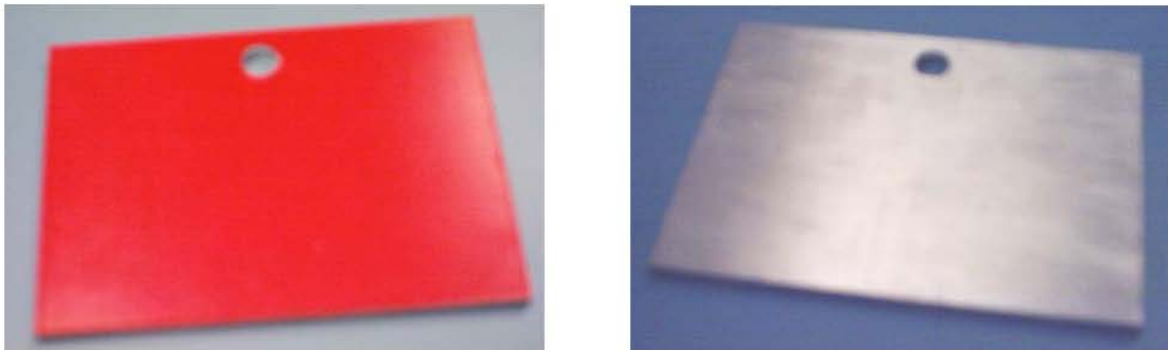
*Fig. 2.12* Taladro fresador vertical WT, utilizado para los barrenos de sujeción de las probetas.

De las 46 piezas iniciales se eligieron 39 probetas completamente al azar para formar 4 grupos que se trataron y trabajaron de diversas formas para obtener:

- ✚ Probetas con recubrimiento de polietileno.
- ✚ Probetas con recubrimiento de pintura.
- ✚ Probetas sin recubrimiento.
- ✚ Probetas testigo para ensayos mecánicos.

### I.3.1 PROBETAS CON RECUBRIMIENTO DE POLIETILENO.

Estas probetas se lograron mediante el lijado con papel exfoliante del número 60, sobre la cara con presencia de pintura<sup>1</sup>, dejando 14 especímenes de simple cara con polietileno; mismos que fueron marcados mediante un burilado eléctrico con designaciones únicas para su fácil identificación.<sup>[28]</sup>

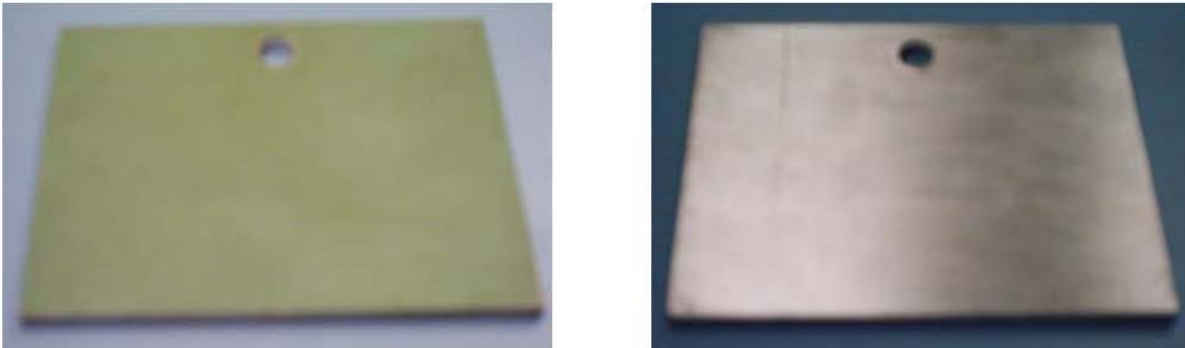


*Fig. 2.13 la imagen muestra un espécimen de simple cara sin recubrimiento en el reverso y un recubrimiento de polietileno en el anverso cuyas dimensiones son 3.2 x 4.5 x 0,250 pulgadas aproximadamente.*

<sup>1</sup> Pintura patentada por Revere Graphics World Wide.

### I.3.2 PROBETAS CON RECUBRIMIENTO DE PINTURA.

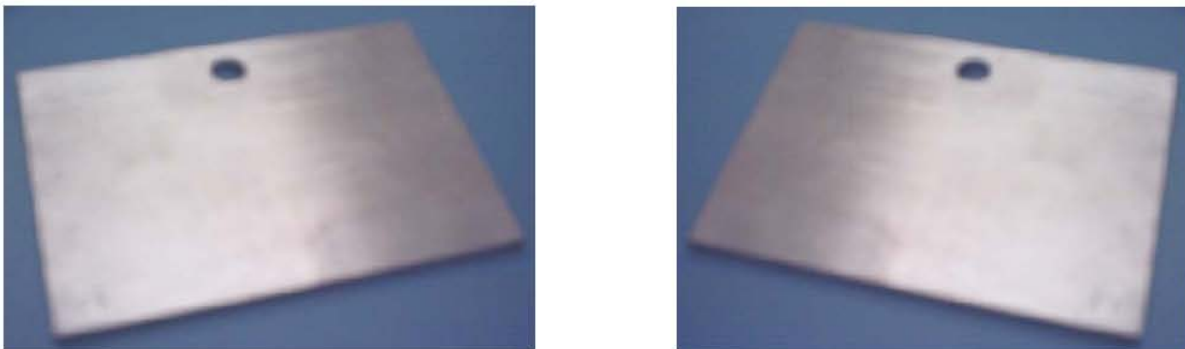
Estas especímenes se lograron, al igual que los anteriores, mediante el lijado con papel exfoliante del número 60, pero sobre la cara con polietileno,<sup>2</sup> dejando 14 especímenes de simple cara con pintura. De igual manera que los anteriores, se marcaron con designaciones notables para su posible identificación.



*Fig. 2.14 la imagen muestra un espécimen de simple cara sin recubrimiento en el reverso y un recubrimiento de pintura en el anverso, de dimensiones 3.2 x 4.5 x 0,250 pulgadas aproximadamente.*

### I.3.3 PROBETAS SIN RECUBRIMIENTO.

Dichas probetas se obtuvieron, mediante el lijado con papel exfoliante del número 60, en ambas caras (polietileno y pintura), dejando 14 especímenes de simple cara sin recubrimiento, marcados con designaciones capitales



*Fig. 2.15 La imagen muestra un espécimen de doble cara sin recubrimiento por ambos lado, cuyas dimensiones son 3.2 x 4.5 x 0,250 pulgadas aproximadamente.*

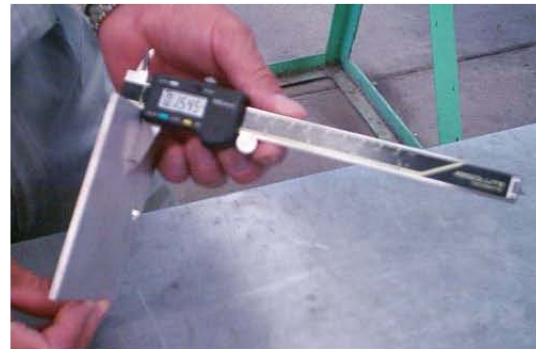
<sup>2</sup> Polietileno patentado por Revere Graphics World Wide.

### I.3.4 PROBETAS TESTIGO

Se resguardaron tres muestras, una de cada recubrimiento, con el fin de poder tener un medio de comparación de las pruebas mecánicas con un grupo que no halla sido expuesto en los sitios mencionados, las cuales fueron tomadas como probetas testigo.

### I.4 DIMENSION DE LOS PROBETAS

Una vez identificadas, las muestras se dimensionaron con un vernier electrónico Mitutoyo CD-6" C.



*Fig. 2.16 Las imágenes muestran un espécimen de doble cara sin recubrimiento durante el proceso de medición de sus dimensiones con un vernier electrónico Mitutoyo CD-6" C, donde se denota que el instrumento provee cuatro cifras singnificativas,*

## **I.5 LIMPIEZA DE LOS ESPECIMENES**

Los especímenes fueron lavados con agua destilada y limpiados con alcohol grado reactivo, para eliminar agentes contaminantes que pudieran propiciar algún proceso corrosivo no deseado.



*Fig. 2.17 Proceso de limpieza. a) Lavado con agua destilada. b) Limpieza con alcohol grado reactivo.*

## **I.6 DESHIDRATACIÓN DE LOS ESPECIMENES.**

Subsiguientemente a la limpieza las muestras se deshidrataron durante un periodo de 72 hrs. dentro de un desecador de calcio en forma de campana como se muestra en la siguiente figura, para retirar la posible presencia de humedad en la superficie.



*Fig. 2.18 Desecador de calcio utilizado para la deshidratación de las probetas.*

## 1.7 PESAJE.

Posteriormente al proceso de deshidratación, las muestras se pesaron con una balanza analítica “Sauter KG, D-7470, EBINGEN 1”, con el fin de determinar el peso inicial de las probetas en investigación.



a)



b)



c)

Fig. 2.19 Proceso de pesaje. a) Balanza analítica sauter utilizada durante el transcurso del pesaje. b) Obtención de la medida de masa. c) Registro del instrumento en donde se observa que el mismo proporciona 4 cifras significativas.

## 1.8 EMPAQUETADO

Las muestras fueron empaquetadas al vacío en bolsas de resina para su fácil traslado al sitio de exposición y así poder evitar cualquier agente contaminante no deseado en el estudio.

## **1.9 MONTAJE DE LAS PROBETAS**

Se tomaron tres probetas de cada tratamiento para cada sitio de exposición, mismos que se soportaron en el rack de investigación con grapas automotrices de Nylamid con diámetro de columna de 3/8" y diámetro de estribo de 45/64", y, como aislamiento de contacto entre el travesaño y la placa, se utilizaron empaques circulares con diámetros interior y exterior idénticos a la grapa automotriz para evitar algún proceso de corrosión galvánica inesperado por contacto de los materiales metálicos. Las muestras fueron colocadas el día 19 de agosto de 2004.

La distribución, colocación, dimensiones y características de las probetas, se muestran en las siguientes imágenes y tablas:



*Fig.2.20 Bastidor para pruebas de corrosión atmosférica montado en el ambiente rural a los tres meses de exposición, en donde se aprecia claramente la colocación y tratamientos de las probetas en estudio.*

ESTACIÓN "VILLA DE LAS FLORES"							
Posición en Rack	# Probeta	Tratamiento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área de exposición (cm <sup>2</sup> )	Peso inicial
7	3	Pintura	11.5024	8.3591	0.3886	93.64500	65.50200
8	8	Pintura	11.5253	8.2563	0.3899	92.65049	64.81037
4	9	Pintura	11.4567	8.3515	0.3861	93.17552	64.81773
10	11	Pintura	11.5303	8.2639	0.3886	92.78029	64.84633
13	16	Polietileno	11.4846	8.3299	0.3899	93.16091	65.21753
15	18	Polietileno	11.4719	8.3376	0.3886	93.14253	65.16153
2	23	Polietileno	11.5126	8.2639	0.3886	92.63336	64.62567
14	26	Polietileno	11.5011	8.2766	0.3899	92.68497	64.95047
11	27	Sin recubrimiento	11.5087	8.3731	0.3874	93.85886	65.28287
9	28	Sin recubrimiento	11.4821	8.3464	0.3861	93.32932	64.50993
1	33	Sin recubrimiento	11.4694	8.3680	0.3874	93.47094	65.01933
3	34	Sin recubrimiento	11.5024	8.3706	0.3886	93.77647	65.35171

Tabla 2.5 Distribución, colocación, dimensionamiento y peso inicial de las probetas montadas en la estación "Villa de las Flores".



Fig. 2.21 Bastidor para pruebas de corrosión atmosférica montado en el ambiente urbano a los tres meses de exposición, en donde se aprecia claramente la colocación y tratamientos de las probetas en estudio.



ESTACIÓN "MERCED"							
Posición en Rack	# Probeta	Tratamiento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área de exposición (cm <sup>2</sup> )	Peso inicial
7	1	Pintura	11.5494	8.3845	0.3899	94.33115	65.92963
14	4	Pintura	11.5532	8.2575	0.3886	92.89584	64.94407
5	7	Pintura	11.5291	8.0543	0.3899	90.35388	63.18403
6	12	Pintura	11.4808	8.3706	0.3886	93.59575	65.49500
9	14	Polietileno	11.5532	8.2690	0.3886	93.02789	65.05713
12	15	Polietileno	11.3754	8.2664	0.3874	91.52878	63.81517
2	20	Polietileno	11.4846	8.3718	0.3899	93.64223	65.61977
13	22	Polietileno	11.5456	8.2766	0.3886	93.05286	64.86627
3	31	Sin recubrimiento	11.4275	8.2664	0.3848	91.95921	63.54157
1	32	Sin recubrimiento	11.4973	8.3464	0.3874	93.45652	65.03747
10	37	Sin recubrimiento	11.3487	8.2829	0.3874	91.49568	63.45383
15	38	Sin recubrimiento	11.5049	8.2804	0.3861	92.76033	64.14087

Tabla 2.6 Distribución, colocación, dimensionamiento y peso inicial de las probetas montadas en la estación "Merced".

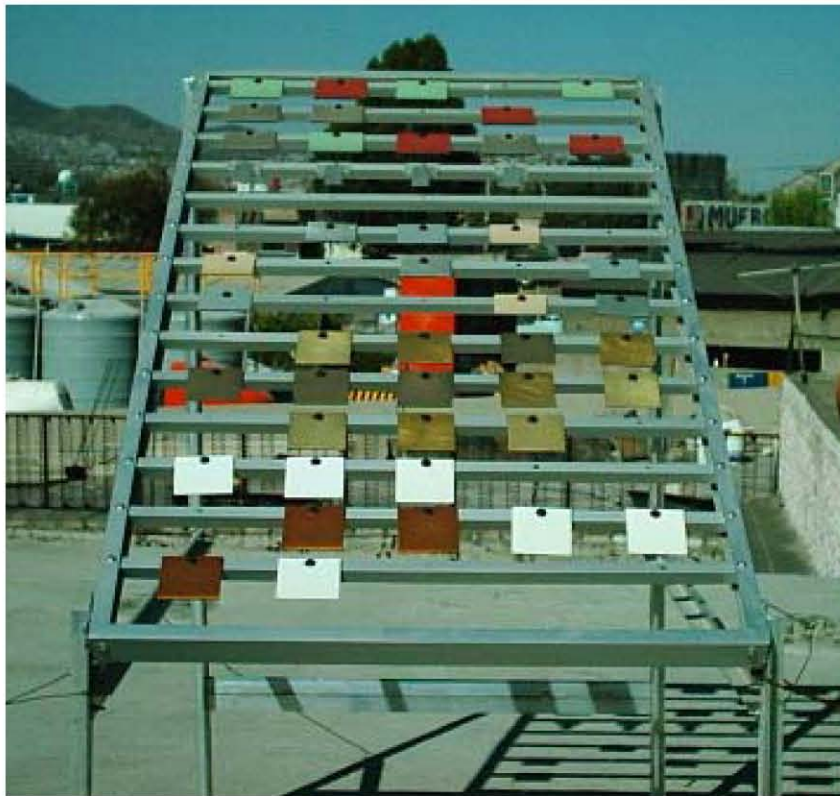


Fig. 2.22 Bastidor para pruebas de corrosión atmosférica montado en el ambiente industrial a los tres meses de exposición, en donde se aprecia claramente la colocación y tratamientos de las probetas en estudio.

ESTACIÓN "XALOSTOC"							
Posición en Rack	# Probeta	Tratamiento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área de exposición (cm <sup>2</sup> )	Peso inicial
12	2	Pintura	11.5583	8.2868	0.3899	93.27541	65.40767
1	6	Pintura	11.4884	8.3655	0.3874	93.60117	65.15033
3	10	Pintura	11.4211	8.2664	0.3874	91.90672	64.14967
5	13	Pintura	11.5316	8.2829	0.3886	93.01046	65.13773
15	17	Polietileno	11.5075	8.3731	0.3886	93.84822	65.63863
13	21	Polietileno	11.4567	8.3337	0.3899	92.97182	65.11937
2	24	Polietileno	11.5481	8.2652	0.3899	92.94189	65.08683
9	25	Polietileno	11.5545	8.2664	0.3886	93.00905	64.90103
11	29	Sin recubrimiento	11.4795	8.3579	0.3874	93.43933	64.85847
6	30	Sin recubrimiento	11.4732	8.3566	0.3874	93.37169	64.95113
7	35	Sin recubrimiento	11.4770	9.2977	0.3874	104.20418	64.36547
14	36	Sin recubrimiento	11.5024	8.2791	0.3861	92.72469	64.10863

Tabla 2.7 Distribución, colocación, dimensionamiento y peso inicial de los especímenes de prueba montados en la estación "Xalostoc".

## I.10 MONITOREOS

Las muestras se monitorearon mensualmente para verificar el correcto posicionamiento con respecto al ángulo de incidencia solar y el posible desarrollo corrosivo presentado sobre la superficie de las placas.

Las siguientes figuras muestran las probetas expuestas a condiciones ambientales en la fase intermedia del periodo de prueba.



Fig. 2.23 Monitoreo al tercer mes en la estación "Villa de las Flores", donde se aprecia el correcto posicionamiento de las probetas y los efectos causados en los recubrimientos de las mismas por los diversos contaminantes de la zona, así como el asentamiento de ellos sobre la superficie de las placas.



*Fig. 2.24 Monitoreo al tercer mes en la estación “Merced”, donde se aprecia el correcto posicionamiento de las probetas y los efectos causados en los recubrimientos de las mismas por los diversos contaminantes de la zona, así como el asentamiento de ellos sobre la superficie.*



*Fig. 2.25 Monitoreo al tercer mes en la estación “Xalostoc”, donde se aprecia el correcto posicionamiento de las probetas y los efectos causados en los recubrimientos de los mismos por los diversos contaminantes de la zona, así como el asentamiento de ellos sobre la superficie de las placas.*

## I.11 CANTIDAD DE CORROSIÓN EN LAS MUESTRAS

Las muestras se desmontaron el día 17 de febrero de 2005 y se empaquetaron nuevamente en bolsas de resina para su traslado al laboratorio, ya in situ, se realizaron las pruebas correspondientes para la correcta cuantificación de cantidad de corrosión:

### I.11.1 REMOCIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSION

Como primera instancia se eliminaron los productos superficiales adheridos a las probetas, mediante lavado con agua destilada, con el fin de poder apreciar mediante un microscopio metalográfico el posible daño por corrosión causado a los especímenes.

Posteriormente, las muestras se deshidrataron por 72 hrs. Y se lavaron por inmersión, durante un minuto, con una solución de trióxido de cromo, nitrato de plata y nitrato de bario, con la finalidad de remover los productos de corrosión que, generalmente se acumulan en las zonas en las que existen picaduras.<sup>[28]</sup>



a)



b)

*Fig. 2.26 Lavado por inmersión de probetas de Mg AZ31. a) inmersión de la muestra.. b) extracción de la muestra después de un minuto de inmersión, en donde se puede apreciar, que los productos de corrosión han sido removidos por completo.*

Una vez eliminados los productos de corrosión, las muestras se deshidrataron nuevamente por un periodo de 72 Hrs, para eliminar la posible humedad restante al proceso de lavado; se pesaron y se determinó la pérdida de masa en cada probeta, así como la pérdida de masa en las mismas.<sup>[28]</sup>



a)



b)

*Fig. 2.27 Pesaje y deshidratación de especímenes para la cuantificación de pérdida de masa. a) Balanza analítica utilizada en el pesaje y equipo de cómputo para el registro del mismo. b) Deshidratador de calcio usado para la eliminación de humedad en las muestras.*

## 1.12 MICROSCOPIA

Con apoyo de un microscopio “IROSCOPE MG-70”, se analizaron todas y cada una de las muestras a diferentes aumentos, para dar cuenta, en primera instancia, del ataque sufrido tanto en los recubrimientos como en el metal mismo.<sup>≡</sup>



*Fig. 2.28 Microscopio IROSCOPE MG-70 utilizado en el análisis superficial de los especímenes en estudio.*

De lo anterior, se maquinaron y pulieron muestras de 2x2 cm., extraídas de las probetas que presentaron características diferentes, para someterlas a una microscopía de barrido electrónico con un microscopio electrónico de columna JOEL, JSM-255II.



*Fig. 2.29 Microscopio Electrónico de columna, JOEL, JSM-255II, utilizado para la microscopía de barrido electrónico, en las probetas.*

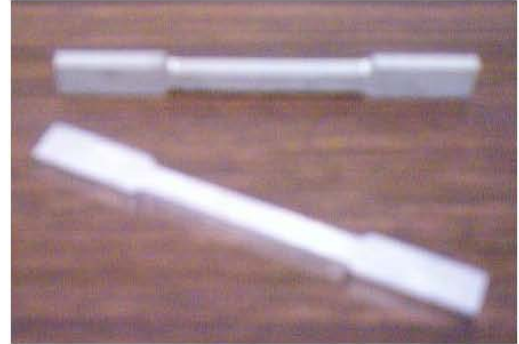
<sup>≡</sup> ver capítulo III, resultados de la microscopía.

### 1.13 ENSAYO DE TENSIÓN

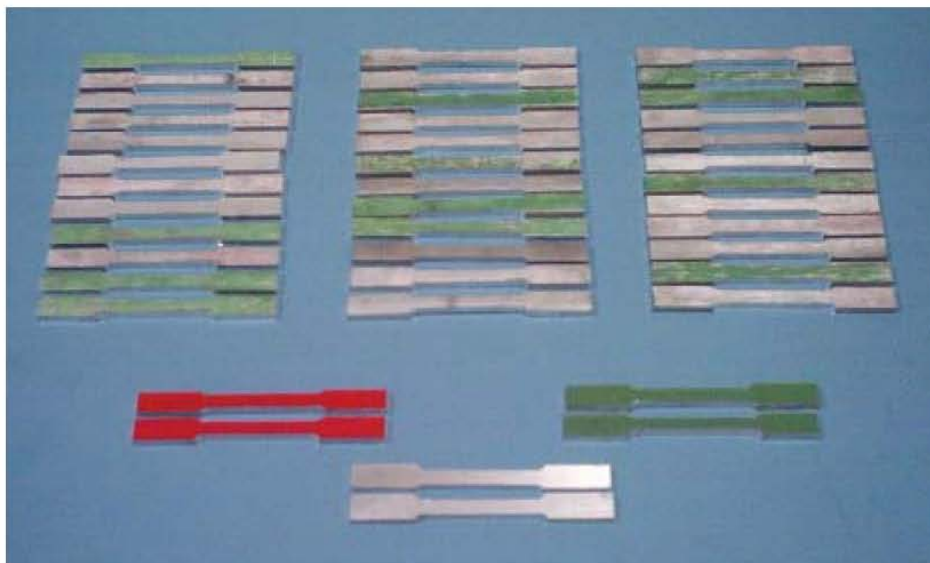
De las muestras expuestas, y de las muestras resguardadas como testigo, se obtuvieron probetas estandarizadas para pruebas de tensión, mediante proceso de corte y fresado.



a)



b)



c)

Fig. 2.30 Probetas estandarizadas para ensayo de tensión. a) Proceso de fresado para la obtención de las mismas. b) Probeta terminada. c) Conjunto de probetas agrupadas por estación.

Las piezas anteriores se sometieron a pruebas de resistencia mecánica en una Máquina Universal, INSTRON 4206, SOFTWARE INSTRON SERIE IV, como se aprecia en la figura 2.31 b).



a)



b)

*Fig. 2.31 Ensayo de tensión. a) Máquina universal INSTRON 4206 utilizada en el ensayo de tensión. b) Probeta bajo de tensión.*



## I.14 ENSAYO DE DUREZA

Por último, y posteriormente a la obtención de las probetas de tensión, se realizó el ensayo de dureza Rockwell F con una precarga de 60 kgf., por medio de un Durómetro “Wilson/Rockwell, Hardness Tester, B504-R” como se aprecia a continuación.



a)



b)

Fig. 3.32 Ensayo de dureza Rockwell F. a) Durómetro Wilson/Rockwell, Hardness Tester, B504-R y equipo de cómputo utilizado para el registro de dureza. b) Probeta bajo Ensayo.

*Capítulo III*

*“Resultados*  
*Y*  
*Discusión”*

# I RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera concreta, se presentarán los resultados de todas y cada una de las pruebas realizadas, así como la discusión de los mismos, que darán pauta a las subsecuentes conclusiones del presente trabajo.

En la presente investigación, se analizaron 36 probetas de Magnesio AZ31 (96% Mg, 3% Al y 1% de Zn) expuestas en tres diferentes sitios de exposición (ambientes industrial, urbano y rural) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Se determinaron como factores a los sitios de exposición, es decir al sitio rural, urbano y rural y a los recubrimientos aplicados, esto es, al recubrimiento de polietileno, al recubrimiento de pintura y al grupo de control (probetas sin recubrimiento); de lo anterior se desprendió un diseño 3x3 para el análisis estadístico, obteniéndose los siguientes resultados.

## I.1 PÉRDIDA DE MASA

Se determinó la pérdida de masa, mediante la diferencia de peso inicial con respecto al peso final de los especímenes después del periodo de investigación, y se calculó la cantidad de corrosión en  $\mu\text{m}/\text{y}$ , arrojando los siguientes resultados.<sup>[28]</sup>

Ambiente Rural ZMCD: Estación “Villa de las Flores”			
Posición en Rack	# Probeta	Tratamiento	Cantidad de corrosión $\mu\text{m} / \text{y}$
7	3	Pintura	26.9357
8	8	Pintura	27.6379
4	9	Pintura	27.8811
10	11	Pintura	25.2630
13	16	Polietileno	20.4786
15	18	Polietileno	22.8177
2	23	Polietileno	22.1248
14	26	Polietileno	23.4466
11	27	Sin recubrimiento	17.4836
9	28	Sin recubrimiento	12.9968
1	33	Sin recubrimiento	19.5681
3	34	Sin recubrimiento	17.1622

Tabla 3.1 Cantidad de corrosión del Mg AZ31 expuesto en la estación “Villa de las Flores”, durante un periodo de seis meses en ambiente rural de la ZMCD.

Ambiente Urbano ZMCD: Estación “Merced”			
Posición en Rack	# Probeta	Tratamiento	Cantidad de corrosión $\mu\text{m} / \text{y}$
7	1	Pintura	24.6448
14	4	Pintura	22.7753
5	7	Pintura	21.4406
6	12	Pintura	22.5696
9	14	Polietileno	20.4129
12	15	Polietileno	20.2929
2	20	Polietileno	21.6820
13	22	Polietileno	18.9362
3	31	Sin recubrimiento	18.5411
1	32	Sin recubrimiento	18.9883
10	37	Sin recubrimiento	11.5479
15	38	Sin recubrimiento	19.4482

Tabla 3.2 Cantidad de corrosión del Mg AZ31 expuesto en la estación “Merced”, durante un periodo de seis meses en ambiente urbano de la ZMCD.

Ambiente Industrial ZMCD: Estación “Xalostoc”			
Posición en Rack	# Probeta	Tratamiento	Cantidad de corrosión $\mu\text{m} / \text{y}$
12	2	Pintura	21.2781
1	6	Pintura	20.6850
3	10	Pintura	20.7701
5	13	Pintura	22.6958
15	17	Polietileno	18.0228
13	21	Polietileno	18.2640
2	24	Polietileno	18.2342
9	25	Polietileno	18.5851
11	29	Sin recubrimiento	14.4388
6	30	Sin recubrimiento	15.2770
7	35	Sin recubrimiento	12.7918
14	36	Sin recubrimiento	14.8557

Tabla 3.3 Cantidad de corrosión del Mg AZ31 expuesto en la estación “Xalostoc”, durante un periodo de seis meses en ambiente Industrial de la ZMCD.

Del análisis de varianza de dos vías para verificación de diferencias significativas en la cantidad de corrosión en  $\mu\text{m}/\text{y}$  de las probetas, podemos decir con un 95% de confiabilidad que la cantidad de corrosión, se ve afectada tanto por el sitio de exposición, como por el tipo de recubrimiento aplicado.

Del análisis con respecto al sitio de exposición, se deduce con un 95 % de confiabilidad que el medio ambiente afecta ligeramente al material, de hecho, por las comparaciones realizadas, solo existe evidencia estadística que nos permite determinar que el material se corroe de manera distinta en ambientes rurales e industriales en la ZMCM.

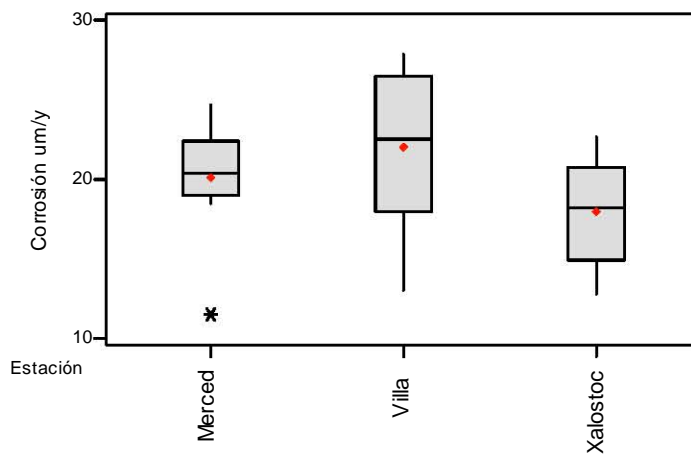


Figura 3.1 Gráfico de caja del análisis de la cantidad de corrosión del Mg AZ31 de acuerdo al sitio de exposición.

Del análisis con respecto al recubrimiento, se deduce con un 95 % de confiabilidad que la cantidad de corrosión difiere en cada grupo, es decir que los recubrimientos se corroen de manera diferente en cada uno de los sitios de exposición.

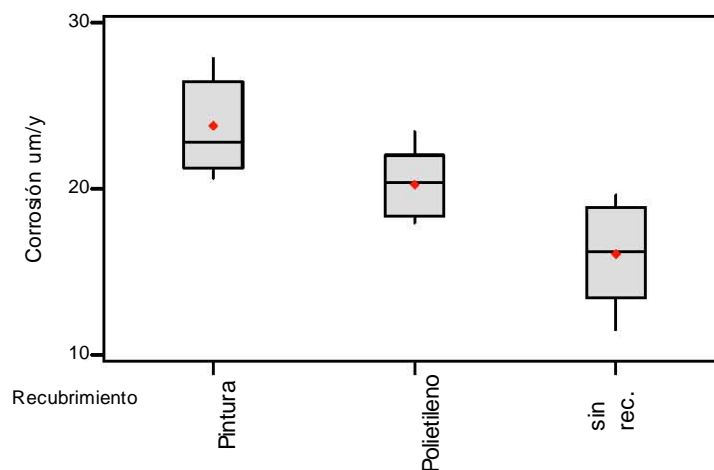


Figura 3.2 Gráfico de caja del análisis de la cantidad de corrosión del Mg AZ31 de acuerdo al recubrimiento aplicado.

De los resultados del modelo lineal por factores se desprende que no existe suficiente evidencia estadística, que nos permita determinar, que la cantidad de corrosión se ve afectada por la interacción de los ambientes de exposición y los recubrimientos, como se aprecia en los siguientes gráficos de efectos principales e interacción entre factores; por otra parte se reafirma, que la cantidad de corrosión depende ligeramente del ambiente y fuertemente del recubrimiento.

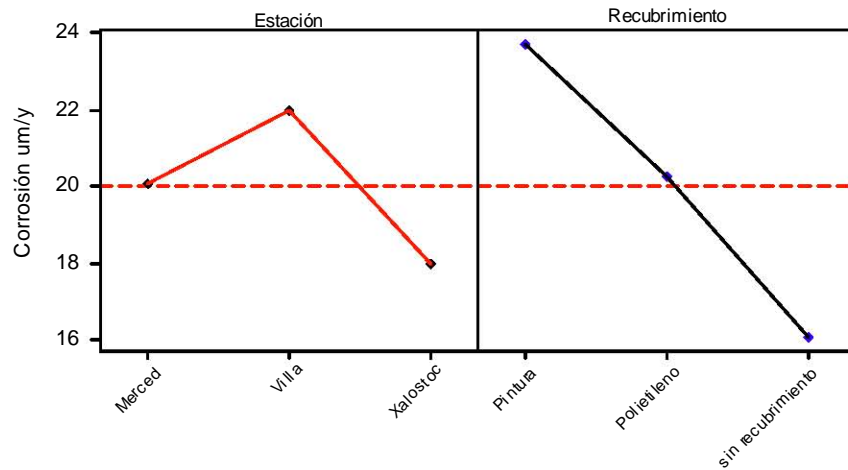


Fig. 3.3 Gráfico de efectos principales en donde aprecian las diferencias existentes entre los diferentes ambientes de exposición y los recubrimientos aplicados a las probetas.

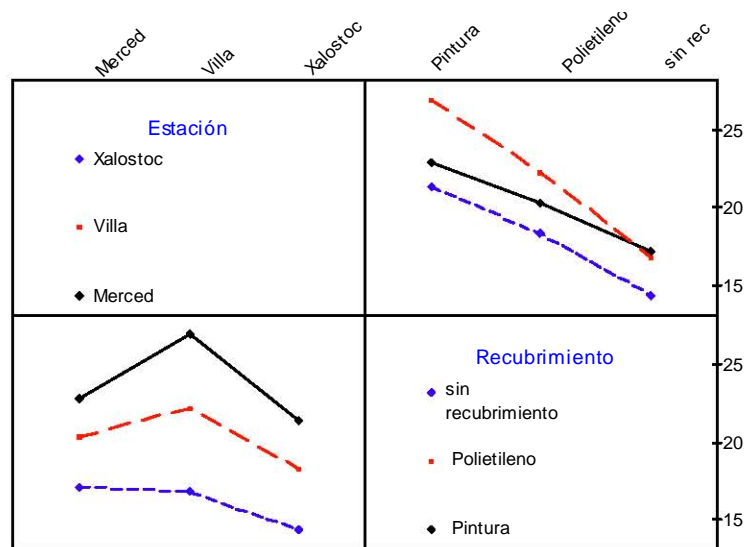


Fig. 3.4 Gráfico de interacción entre sitios de exposición y recubrimientos de las probetas, en donde los trazos paralelos demuestran que no existe correlación entre los sitios de exposición y los recubrimientos.

## I.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

A partir del de los ensayos mecánicos antes mencionados, y aplicando análisis estadísticos, se obtuvieron los siguientes resultados para “Carga Máxima” y “Módulo de Elasticidad”:

### I.2.1 CARGA MÁXIMA

Del gráfico de efectos principales (fig. 3.5), se podría pensar que la carga máxima de los especímenes se ve afectada, tanto por el sitio de exposición como por el recubrimiento, sin embargo, del análisis varianza de una y dos vías, así como del modelo general lineal, determinamos con un 95% de confiabilidad, que la carga máxima que soportan los especímenes en estudio, no se ve afectada, ni por el ambiente de exposición, ni por el recubrimiento, como se aprecia en el gráfico de interacción (fig. 3.6) y en los gráficos de caja del análisis por factores, (figs. 3.7, 3.8).

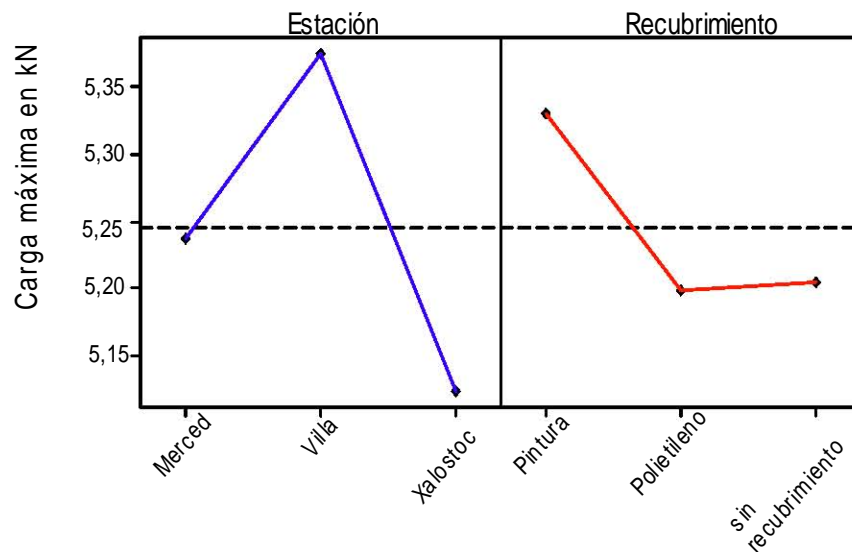


Fig. 3.5 Gráfico de efectos principales en donde aprecian las diferencias aparentes sobre la carga máxima, debido a los sitios de exposición y a los recubrimientos aplicados a las probetas.

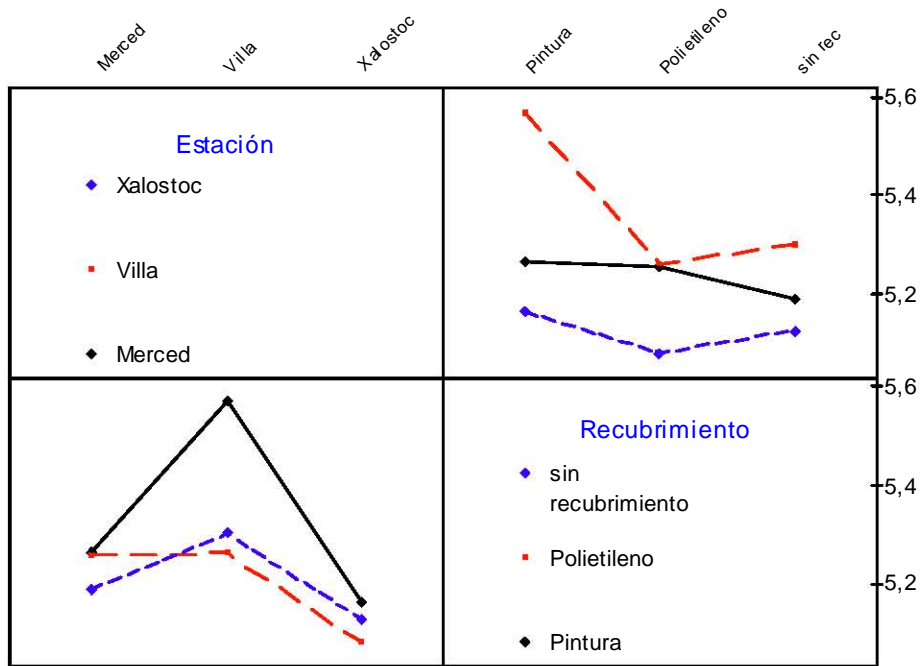


Fig. 3.6 Gráfico de interacción entre sitios de exposición y recubrimientos de las probetas, en donde el paralelismo demuestra que no existe correlación entre los sitios de exposición y los recubrimientos.

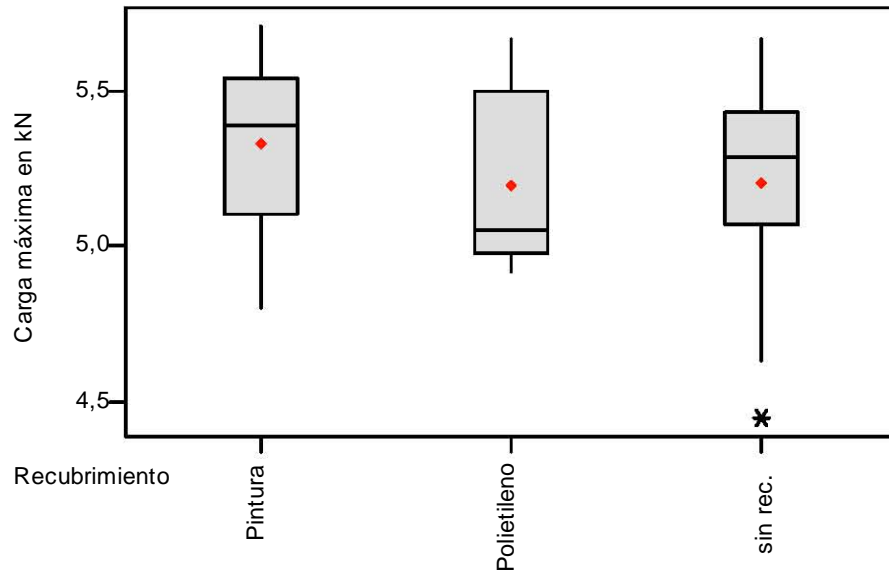


Fig. 3.7 Gráfico de caja del análisis de Carga Máxima del Mg AZ31 de acuerdo al recubrimiento aplicado.



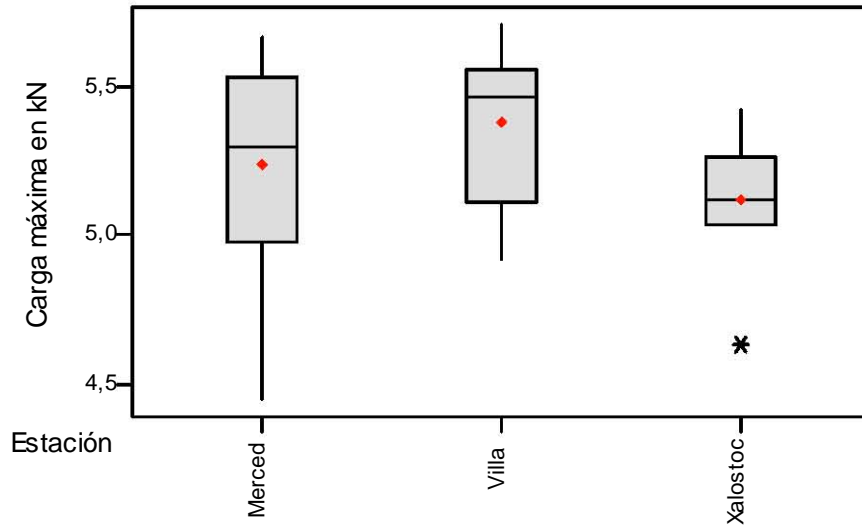


Fig. 3.8 Gráfico de caja del análisis de Carga Máxima del Mg AZ31 de acuerdo al sitio de exposición.

En el análisis de varianza por tratamientos no existe suficiente evidencia estadística que nos permita determinar que la carga máxima de ninguna de las probetas que fueron expuestas, difiere de la carga máxima que puede soportar una probeta sin haber sido expuesta a condiciones ambientales, por lo tanto, podemos asegurar con un 95 % de confiabilidad que la carga máxima tolerable de las probetas no se ve afectada por el sitio de exposición durante el periodo descrito con anterioridad.

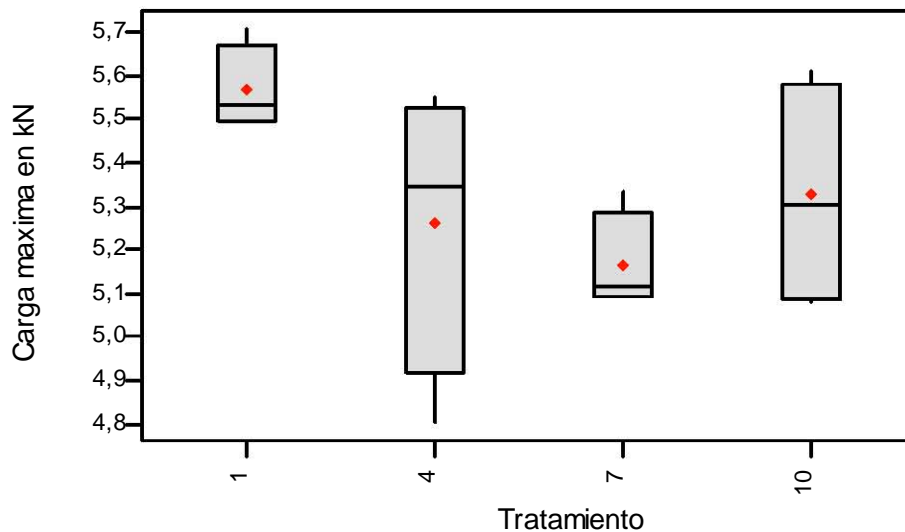


Fig. 3.9 Gráfico de caja del análisis de Carga Máxima de las probetas de Mg AZ31 con recubrimiento de pintura, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

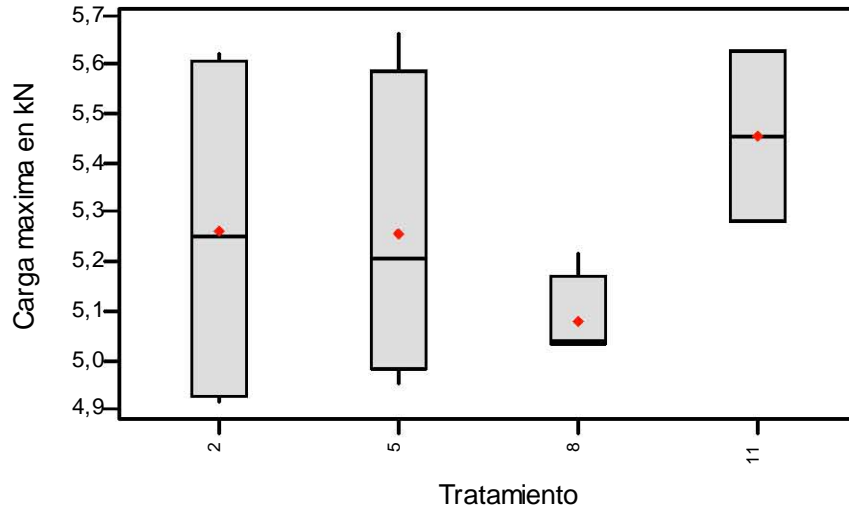


Fig. 3.10 Gráfico de caja del análisis de Carga Máxima de las probetas de Mg AZ31 con recubrimiento de polietileno, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

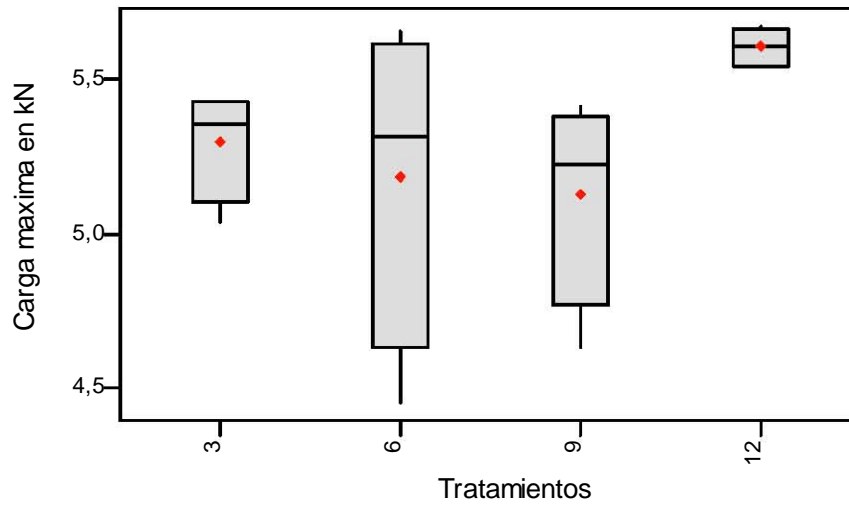


Fig. 3.11 Gráfico de caja del análisis de Carga Máxima de las probetas de Mg AZ31 sin recubrimiento, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

### I.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Del análisis de varianza de dos vías, decimos, que con un 95 % de confiabilidad, el módulo de Young no se ve afectado por el sitio de exposición, y que no existe interacción entre los ambientes de exposición y los recubrimientos; sin embargo, el módulo de elasticidad de las probetas es afectado por el recubrimiento aplicado, como se aprecia en el gráfico de efectos principales para el módulo de Young (fig. 3.12).

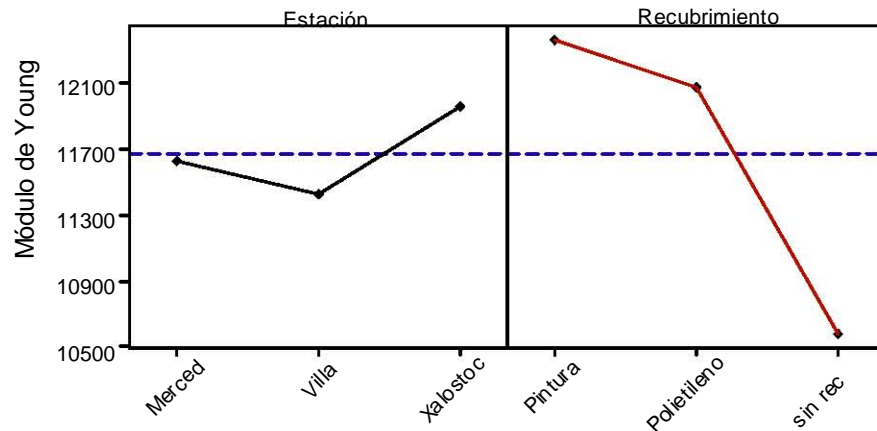


Fig. 3.12 Gráfico de efectos principales en donde observa las diferencias significativas sobre el módulo de elasticidad con respecto a los recubrimientos aplicados a las probetas.

Del análisis con respecto al recubrimiento, se confirma con un 95 % de confiabilidad que el módulo de Young de las muestras es realmente afectado por el tipo de recubrimiento utilizado.

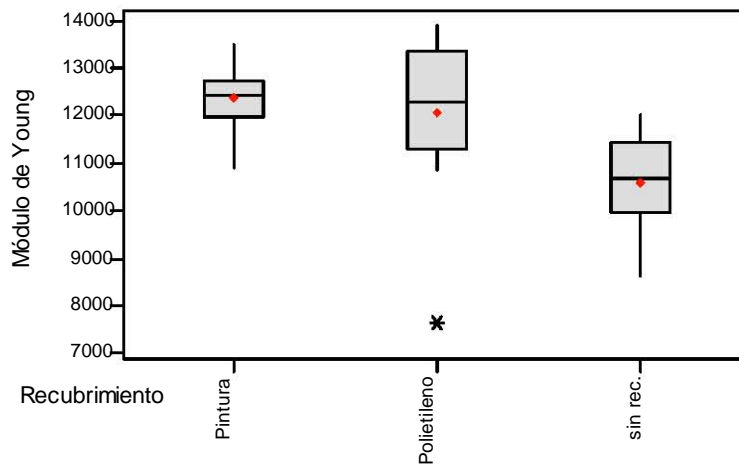


Fig. 3.13 Gráfico de caja del análisis del Módulo de Elasticidad del Mg AZ31 de acuerdo al recubrimiento aplicado.

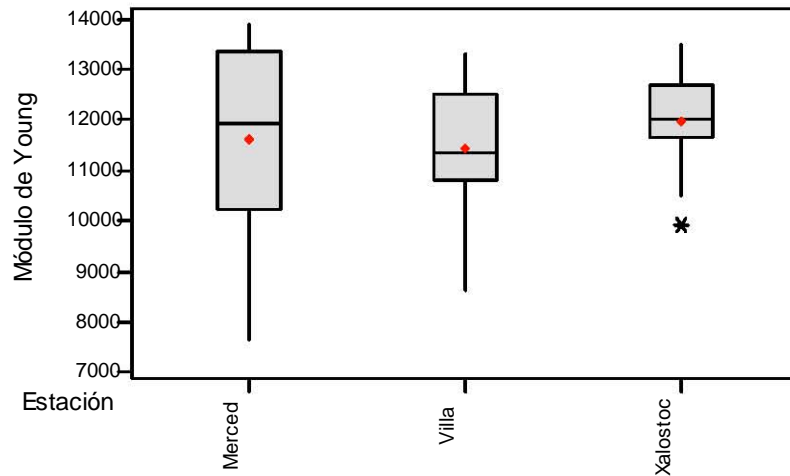


Fig. 3.14 Gráfico de caja del análisis del Módulo de Elasticidad del Mg AZ31 de acuerdo al recubrimiento aplicado.

Por otro lado, del modelo general lineal, determinamos con un 95 % de confiabilidad, que no existe interacción entre los recubrimientos aplicados y los sitios de exposición del experimento, como se puede ver en el gráfico de interacción mostrado a continuación.

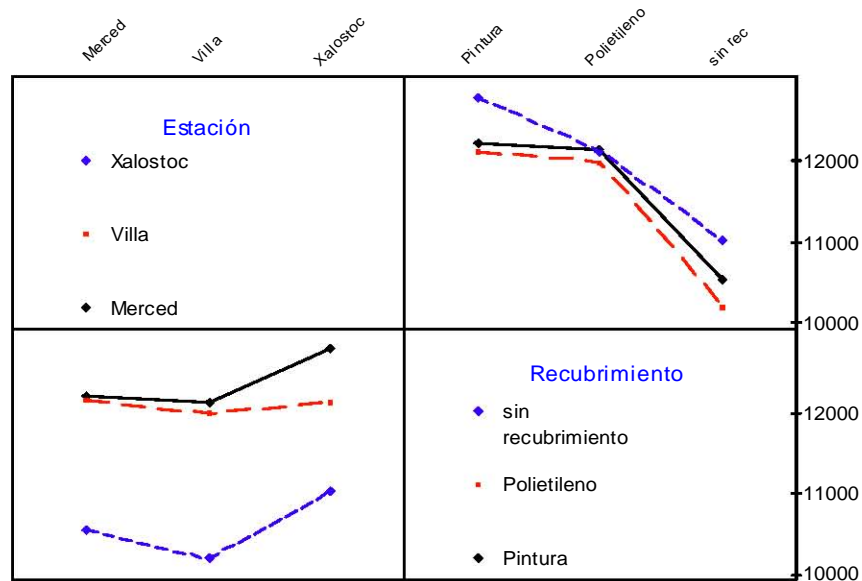


Fig. 3.15 Gráfico de interacción entre sitios de exposición y recubrimientos de las probetas, en donde el paralelismo demuestra que no existe correlación entre los sitios de exposición y los recubrimientos.

Asimismo, el análisis de varianza por tratamientos no muestra suficiente evidencia estadística que nos permita determinar que el Módulo de Young de cada espécimen expuesto, difiere en su módulo de elasticidad con los no expuestos a condiciones ambientales, por lo que, podemos asegurar con un 95 % de confiabilidad que el Módulo de Elasticidad del material no se ve afectado por el ambiente de exposición durante el periodo ya mencionado.

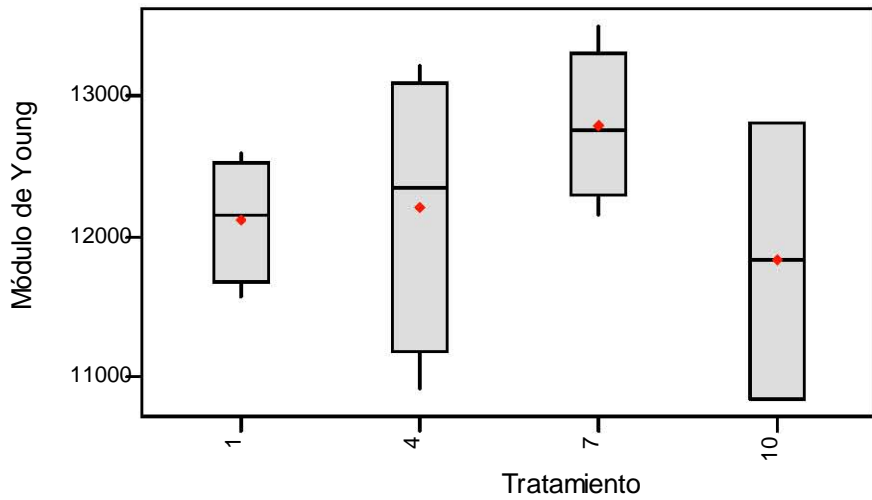


Fig. 3.16 Gráfico de caja del análisis del Módulo de Elasticidad de las probetas de Mg AZ31 con recubrimiento de pintura, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

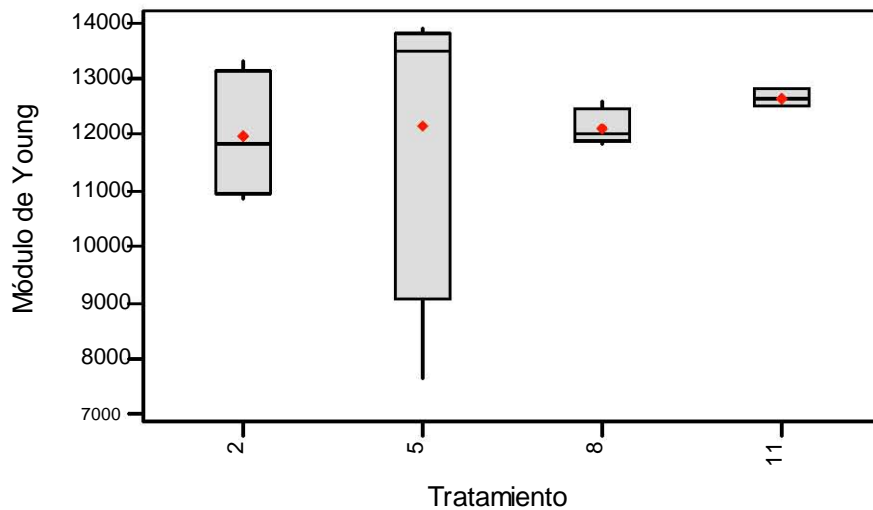


Fig. 3.17 Gráfico de caja del análisis del Módulo de Elasticidad de las probetas de Mg AZ31 con recubrimiento de polietileno, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

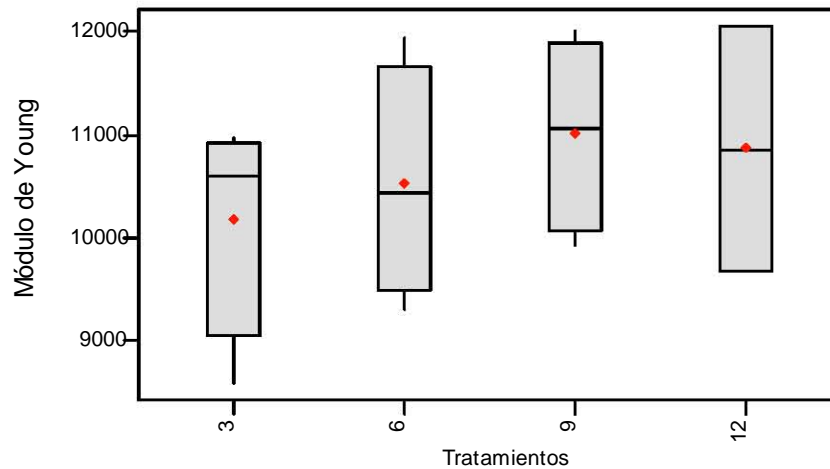


Fig. 3.18 Gráfico de caja del análisis del Módulo de Elasticidad de las probetas de Mg AZ31 sin recubrimiento, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

### I.2.3 DUREZA

A pesar de que se podría pensar que la Dureza Rockwell F de los especímenes se ve afectada, tanto por el sitio de exposición como por el recubrimiento aplicado a las probetas, partiendo del gráfico de efectos principales (fig. 3.7); del análisis de varianza de una y dos vías, así como del modelo general lineal, determinamos con un 95% de confiabilidad, que la Dureza Rockwell F que presentan los especímenes después del periodo de exposición, no se ve afectada, ni por el ambiente de exposición, ni por el recubrimiento, y que a la vez no existe interacción como se aprecia en el gráfico de efectos principales y de interacción entre los factores.

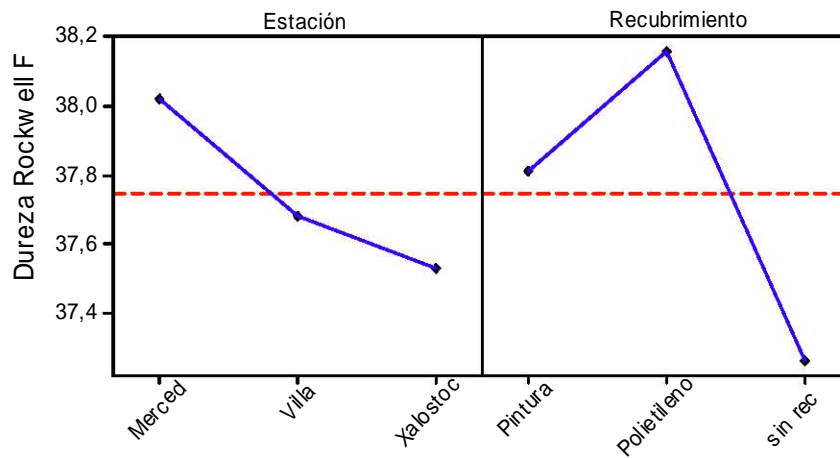


Fig. 3.19 Gráfico de efectos principales en donde aprecian las diferencias aparentes sobre la Dureza Rockwell F de las muestras, debido a los ambientes de exposición y a los recubrimientos aplicados.

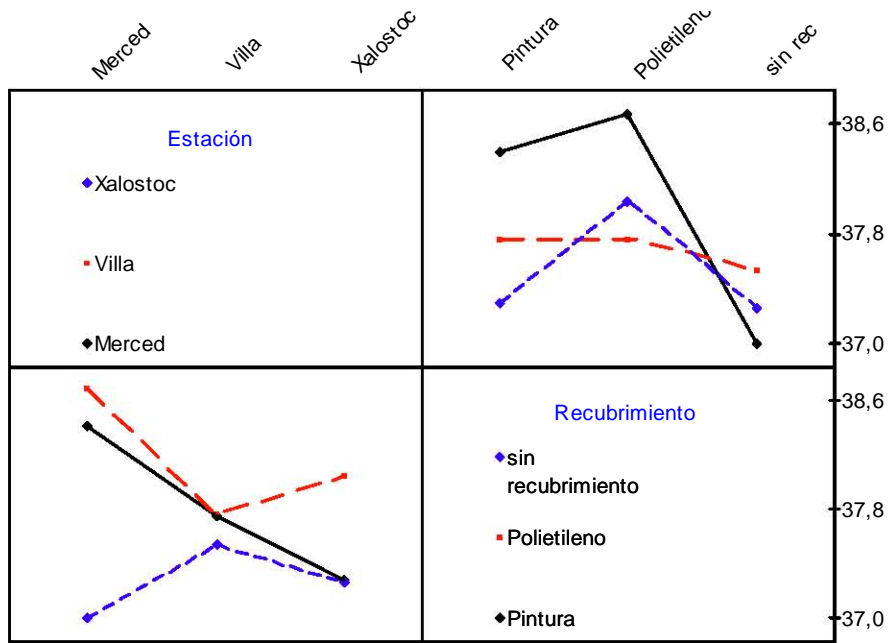


Fig. 3.20 Gráfico de interacción entre ambientes de exposición y recubrimientos de los especímenes de prueba, en donde el paralelismo demuestra que no existe correlación entre los ambientes de exposición y los recubrimientos, sin embargo existe un ligero cruce de líneas que, de acuerdo al análisis realizado es no significativo . T

Ahora bien, del análisis de varianza por tratamientos determinamos que no existe suficiente evidencia estadística que nos permita determinar que La Dureza Rockwell F de cada probeta expuesta, difiere de la de la dureza de las probetas no expuestas a condiciones ambientales, por lo que, con un 95 % de confiabilidad, aseguramos que la dureza del material no se ve afectado por el sitio de exposición en el periodo de tiempo establecido.

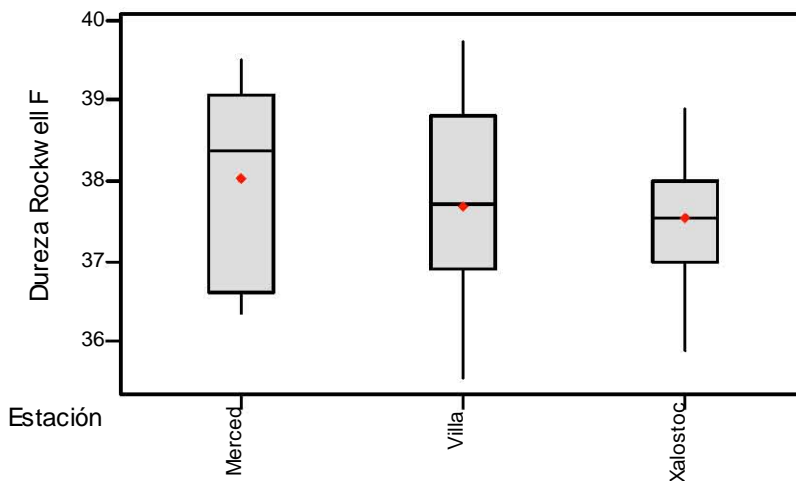


Fig. 3.21 Gráfico de caja del análisis de Dureza del Mg AZ31 de acuerdo al sitio de exposición.

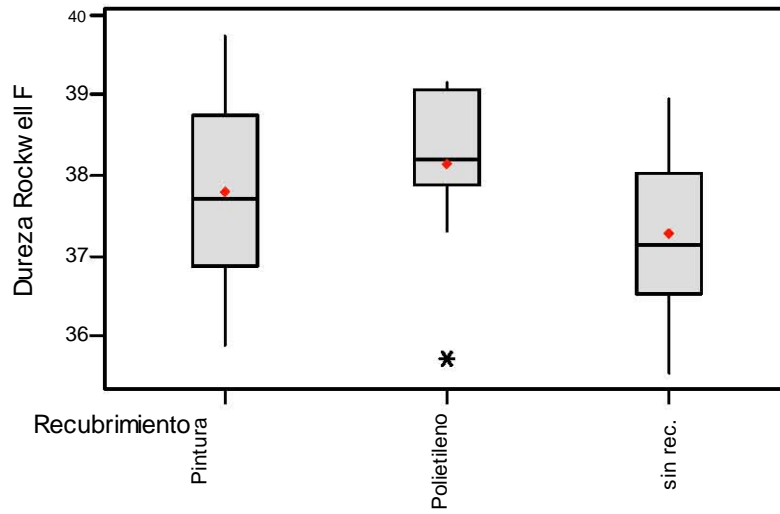


Fig. 3.22 Gráfico de caja del análisis de Dureza del Mg AZ31 de acuerdo al recubrimiento utilizado.

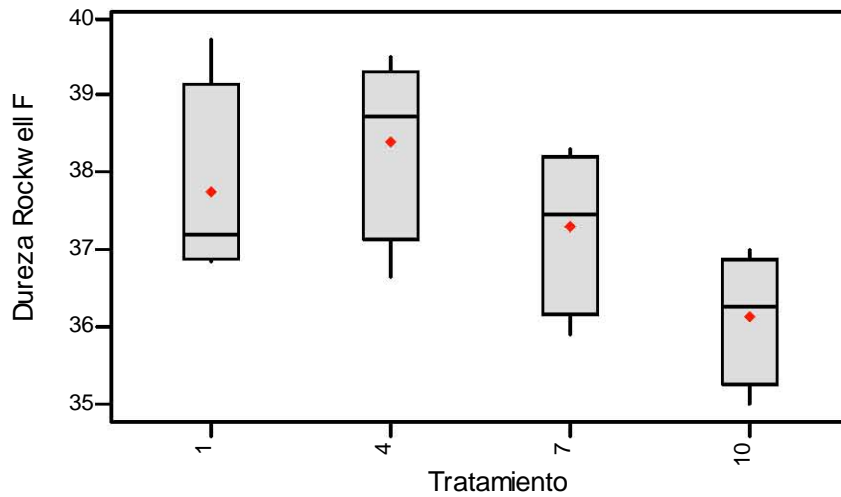


Fig. 3.23 Gráfico de caja del análisis de Dureza de las probetas de Mg AZ31 Con recubrimiento de pintura, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.



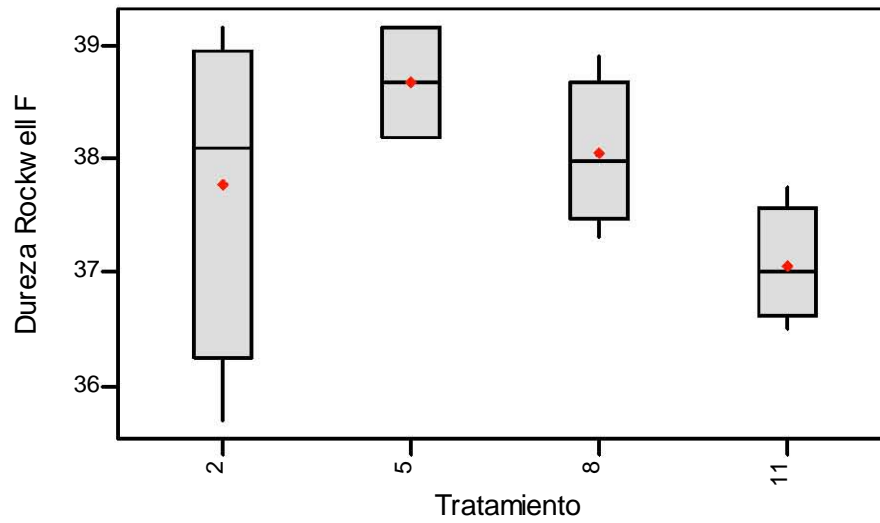


Fig. 3.24 Gráfico de caja del análisis de Dureza de las probetas de Mg AZ31 con recubrimiento de polietileno, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

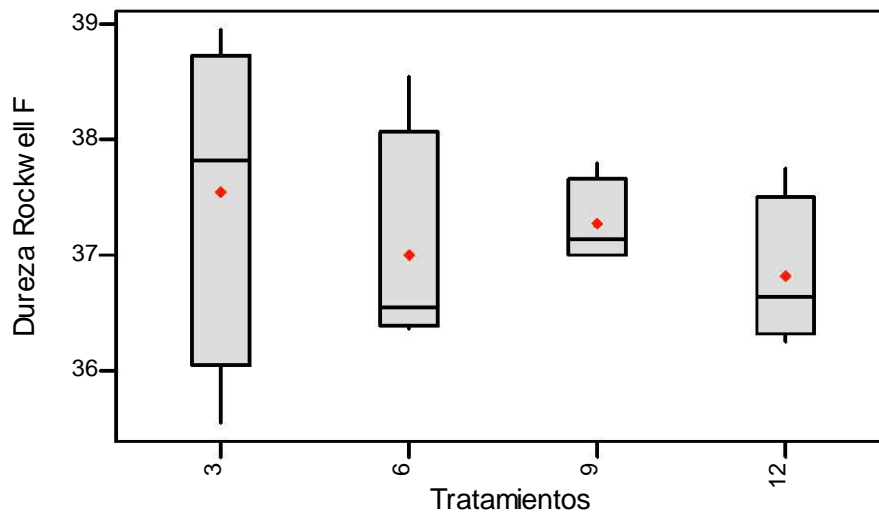
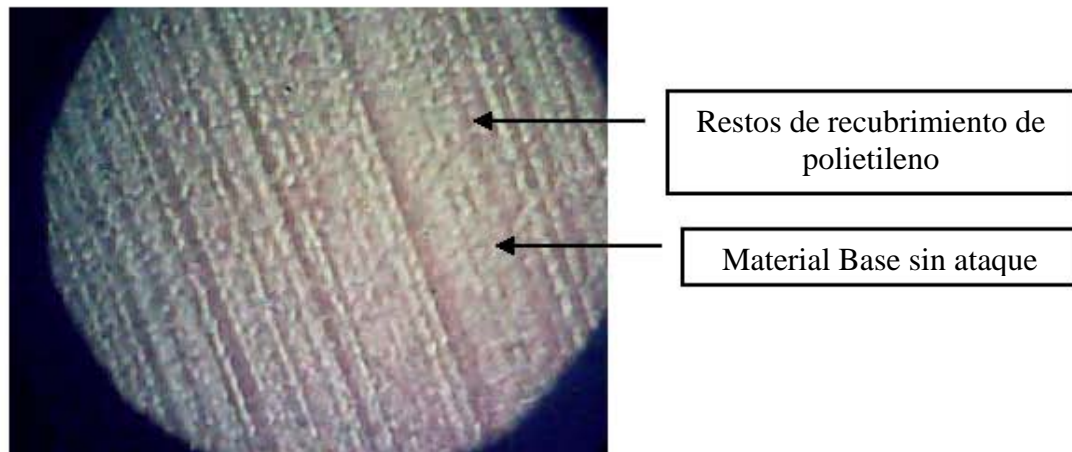


Fig. 3.25 Gráfico de caja del análisis de Dureza de las probetas de Mg AZ31 sin recubrimiento, con respecto al grupo de control que no fue expuesto a condiciones ambientales.

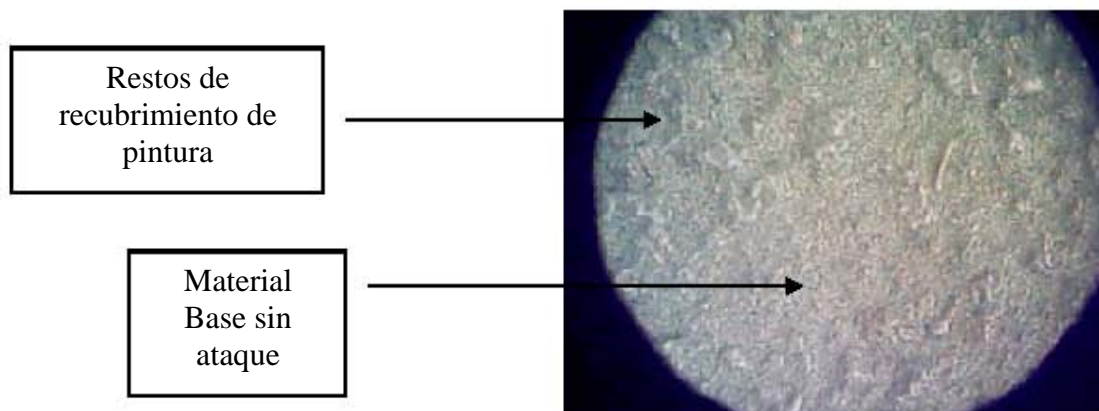
### 1.3 MICROSCOPIA

De la microscopia realizada con el equipo *IROSCOPE MG-70* en las probetas con recubrimiento, se observa que los recubrimientos se deterioraron en gran forma, lo que concuerda con los resultados obtenidos en el análisis de la pérdida de masa y cantidad de corrosión.

El deterioro del recubrimiento es altamente significativo, sin embargo estos recubrimientos no permitieron el ataque al material metálico como se puede apreciar en las siguientes figuras, en donde se muestran las piezas más características del estudio.



*Fig. 3.26 Fotografía de la probeta # 26 a 400 aumentos, montada en en la estación “Villa de las Flores” después del proceso de remoción de los productos de corrosión, en donde se aprecia claramente que el recubrimiento fue severamente atacado, mientras que el metal base no presenta ningún ataque.*



*Fig. 3.27 Fotografía de la probeta # 9 a 400 aumentos, montada en la estación “Villa de las Flores” después del proceso de remoción de los productos de corrosión, en donde se aprecia claramente que el recubrimiento fue severamente atacado, mientras que el metal base no presenta ningún ataque.*

De la microscopía de barrido electrónico, en el ambiente industrial, en las probetas sin recubrimiento, se encontraron picaduras de aproximadamente 1,3 micras, como se muestra en la siguiente figura.

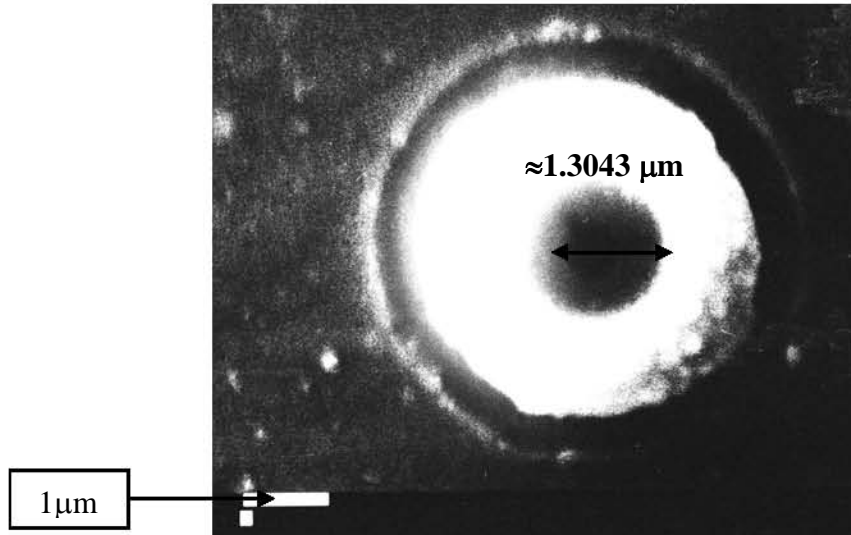


Fig. 3.28 Fotografía de la microscopía de barrido electrónico a 10,000 aumentos, realizada a la muestra # 36, donde se aprecia claramente una de las picaduras de aproximadamente 1.3043 micras, provocada por el ataque corrosivo. La barra debajo de la imagen es de 1 micra de dimensión.

En el ambiente rural, se encontraron picaduras de aproximadamente 1.8 micras, como se muestra en la siguiente figura.

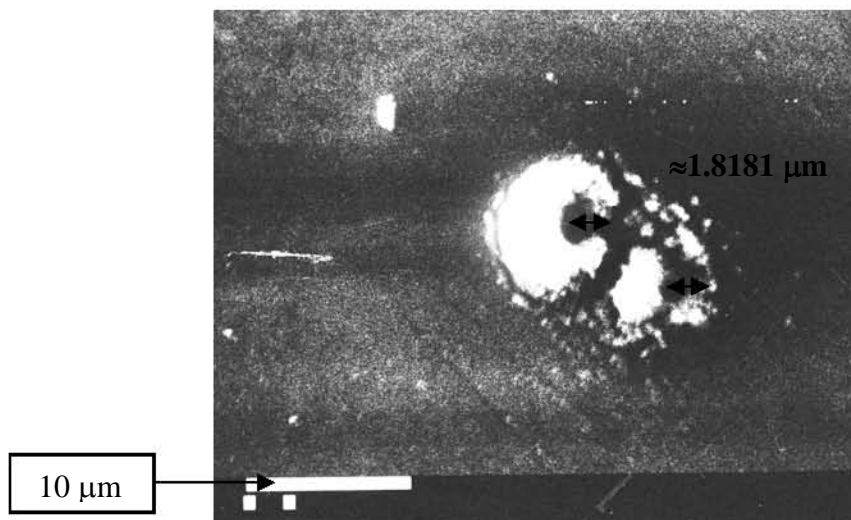


Fig. 3.29 Fotografía de la microscopía de barrido electrónico a 4,500 aumentos, realizada a la muestra # 33, donde se aprecia claramente una de las picaduras de aproximadamente 1,8181 micras, provocada por el ataque corrosivo. La barra debajo de la imagen es de 10 micras de dimensión.

En el ambiente urbano se encontraron picaduras de aproximadamente 2.44 micras, como se muestra en la siguiente figura.

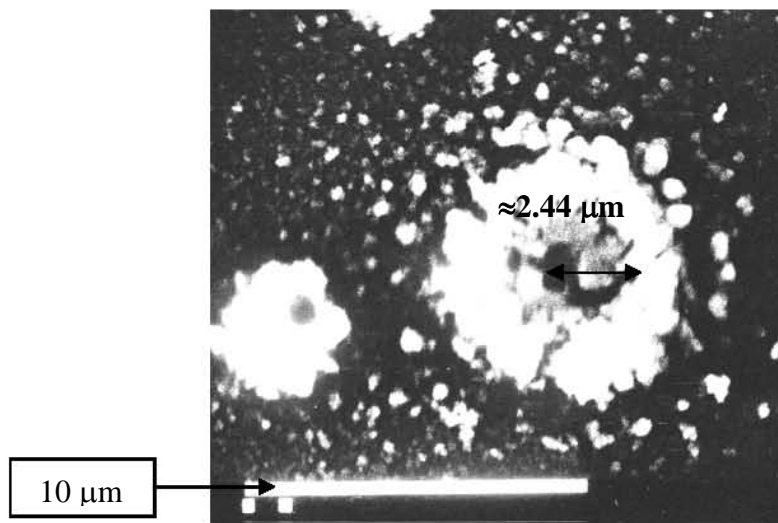


Fig. 3.30 Fotografía de la microscopía de barrido electrónico a 4,500 aumentos, realizada a la muestra # 32, donde se aprecia claramente una de las picaduras de aproximadamente 2,44 micras, provocada por el ataque corrosivo. La barra debajo de la imagen es de 10 micras de dimensión.

Aunado a las picaduras, en la zona urbana, se encontró corrosión intergranular, únicamente en la muestra 37, como se observa en las siguientes figuras.

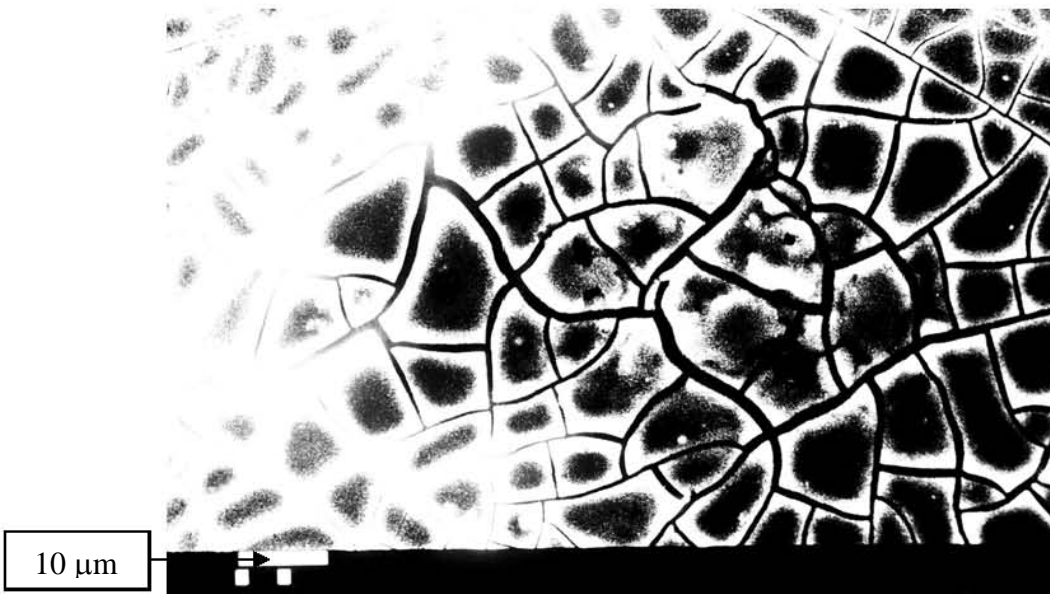
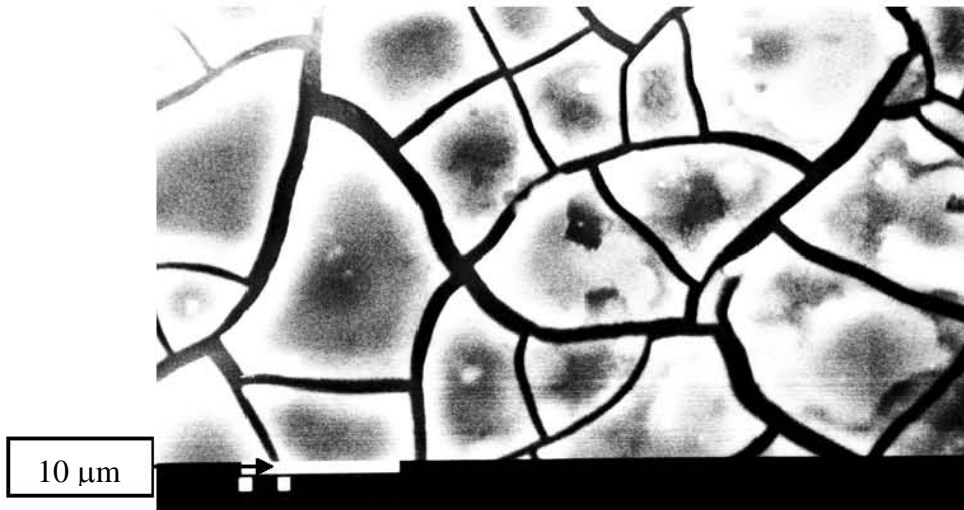


Fig. 3.31 Fotografía de la microscopía de barrido electrónico a 1000 aumentos, realizada a la muestra # 37, donde se aprecia claramente el ataque corrosivo en los límites de grano. La barra debajo de la imagen es de 10 micras de dimensión.



*Fig. 3.32 Fotografía de la microscopía de barrido electrónico a 2000 aumentos, realizada a la muestra # 37, donde se aprecia claramente el ataque corrosivo en los límites de grano. La barra debajo de la imagen es de 10 micras de dimensión.*

# *Capítulo IV*

## *“Conclusiones”*

## IV CONCLUSIONES

1. Sabemos que el ambiente rural es el menos corrosivo para los materiales, sin embargo, contrario a lo que podría suponer, el ambiente industrial resultó ser el menos corrosivo de los ambientes atmosféricos en este estudio, debido a que, es esencial un electrolito acuoso sobre la superficie del metal para la corrosión atmosférica, y durante el periodo de estudio, las muestras colocadas en el sitio “Xalostoc”, no recibieron tantas precipitaciones como en los sitios “Villa de las Flores “ y “Merced”. Por lo que podemos deducir que la humedad es un factor importante en la pérdida de peso de las probetas.
2. El recubrimiento de polietileno aplicado y patentado por “Revere Graphics World Wide”, no es adecuado para proteger al magnesio AZ31 en condiciones ambientales de la ZMCM, por un periodo mayor a 5 meses, debido a que se corroe de manera altamente significativa. El comportamiento ante la corrosión de este recubrimiento es distinto para cada ambiente de exposición como se muestra en la siguiente gráfica, en donde se puede observar que la mayor cantidad de corrosión se presenta en el ambiente rural, mientras que la menor cuantía de corrosión para el polietileno es en el sitio industrial.

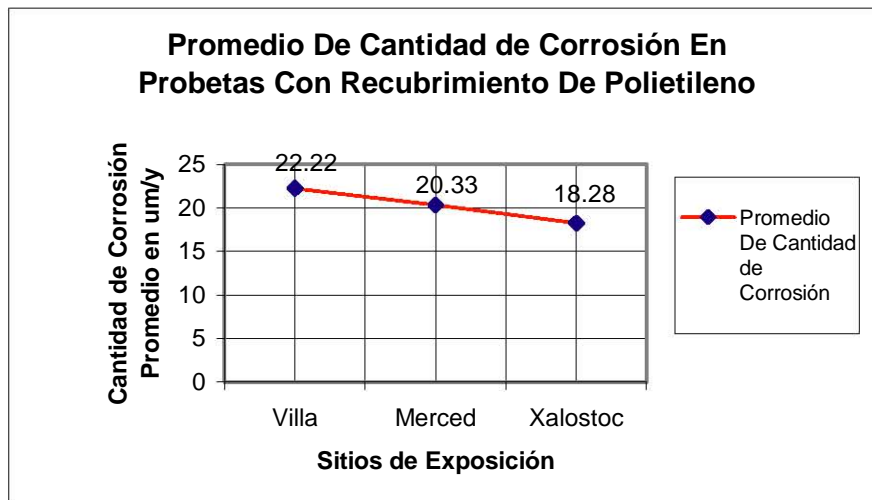


Fig. 4.1 Gráfica de promedios de cantidad de corrosión por sitio de exposición, de las probetas de Mg AZ31 con recubrimiento de polietileno en estudio.

3. El recubrimiento de pintura aplicado y patentado por “Revere Graphics World Wide”, tampoco es adecuado para proteger al magnesio AZ31 en condiciones ambientales de la zona metropolitana de la ciudad de México, por un periodo mayor a 5 meses, debido a que, también se corroe de manera altamente significativa. El comportamiento ante la corrosión de este recubrimiento, al igual

que el polietileno, es distinto para cada ambiente de exposición como se muestra en la siguiente gráfica, en donde se puede observar que la mayor cantidad de corrosión se presenta en el ambiente rural, mientras que la menor cuantía de corrosión para la pintura es en el sitio industrial. Además la pintura se degrada más severamente que el polietileno de acuerdo con los valores promedio de cantidad de corrosión mostrados en los resultados.

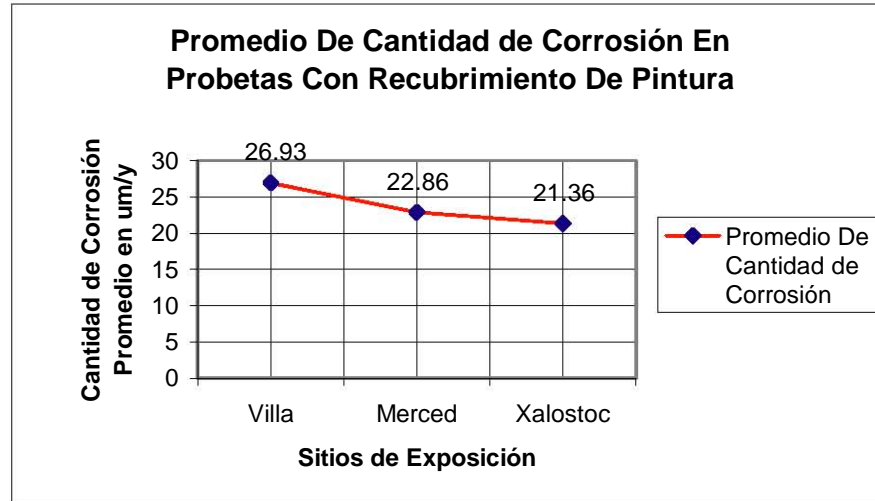


Fig. 4.2 Gráfica de promedios de cantidad de corrosión por sitio de exposición, de las probetas con recubrimiento de pintura del estudio.

4. El magnesio AZ31, se degrada de mayor forma en el ambiente urbano, mientras que en el ambiente industrial, la cantidad de corrosión es menor, para el ambiente rural, se presenta una cantidad de corrosión intermedia.

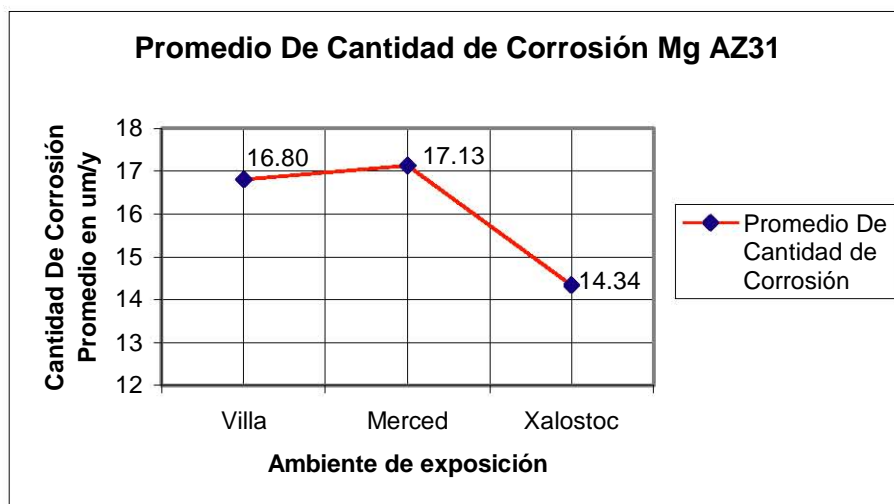


Fig. 4.3 Gráfica de promedios de cantidad de corrosión por estación, del Mg AZ31 en estudio.



5. El Mg AZ31 recubierto con polietileno, pierde en promedio 22.2169  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente rural, 20.3310  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente urbano y 18.2765  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente industrial de la ZMCM.
6. El Mg AZ31 recubierto con pintura, pierde en promedio 26.9294  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente rural, 22.8575  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente urbano y 21.3572  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente industrial de la ZMCM.
7. El Mg AZ31, pierde en promedio 26.9294  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente rural, 22.8575  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente urbano y 21.3572  $\mu\text{mpy}$  en el ambiente industrial de la ZMCM.
8. De acuerdo con los resultados, a pesar de que existe corrosión tanto en los recubrimientos como en el MgAZ31 mismo, la carga máxima que pueden soportar los especímenes de cualquier tratamiento, y en cualquier ambiente de exposición de la ZMCM, no difiere de manera significativa, comparada con especímenes no expuestos, por lo tanto si este material es utilizado en cuestiones estructurales, podemos garantizar que por lo menos puede resistir en promedio una carga máxima de 5 kN, con una durabilidad media de seis meses.
9. Al igual que la carga Máxima, garantizamos que el material, indistintamente del recubrimiento que se elija, ó, ya sea sin recubrimiento, y del sitio en el cual se coloque, puede mantener un Módulo de elasticidad promedio de 12 kN con una durabilidad media de 6 meses.
10. Asimismo, avalamos que la dureza media del material será 36 unidades Rockwell F, con una durabilidad promedio de seis meses, indistintamente del recubrimiento utilizado y el sitio de exposición en el cual se sitúe.
11. El tamaño de las picaduras encontradas en el Mg AZ31 sin recubrimiento, situado en tres diferentes ambientes de la ZMCM es insignificante, por lo que, de la misma manera que las características anteriores garantizamos la durabilidad media del material por un periodo mínimo de seis meses.

12. Aunque la corrosión provocada en el MgAZ31 por las diferentes estaciones de exposición fue aparentemente uniforme, la corrosión del magnesio inicia usualmente por corrosión localizada, aunque esta, en ocasiones, es poco profunda y difusa como se apreció en la microscopía, mismo que concuerda con las investigaciones de Makar y otros, que en 1988 reportaron que la corrosión del magnesio puro, fue no uniforme con apariencia de picaduras.
13. La corrosión intergranular encontrada en la probeta # 37, que fue situada en el sitio urbano (Estación Merced) de la ZMCM, se debe a un defecto de fabricación de la lámina inicial, ya que, al parecer se presentó corrosión galvánica interna provocada por alguna impureza, de no ser así, todas y cada una de las probetas sin recubrimiento, situadas en la misma estación, deberían presentar este tipo de ataque corrosivo.
14. El Mg AZ31, por si mismo, ofrece una buena resistencia a la corrosión, es resistente y durable, sin embargo, el tiempo de exposición para este estudio, fue demasiado corto, por lo que, esta investigación queda abierta a un tiempo de análisis más extenso y con una población mucho mayor, con el fin de poder instaurar mediante un diseño factorial, alguna superficie de respuesta que nos permita determinar, con exactitud, en que tiempos se podrían encontrar las fases iniciales de corrosión por picaduras, si es posible que se genere la corrosión filiforme en el material y en que tiempo se presenta esto, y, si la corrosión intergranular, efectivamente se debe al defecto del material o en realidad se ostenta por el tiempo de exposición a condiciones ambientales diversas.
15. Por otra parte, y no solo para este material, es necesario desarrollar un recubrimiento extremadamente duradero, ya que esto reduciría considerablemente los costos ocasionados por la corrosión, de aquí que se proponga probar nuevamente este material, pero revestido con algún recubrimiento orgánico, ya que son mucho más económicos que los recubrimientos sintéticos.

# Referencias y Bibliografía

**REFERENCIAS:**

- [1] British Geological Survey. 2001. World Mineral Statistics 1996-2000.
- [2] Kramer D. 2002. Magnesium Compunds. Mineral Commodity Summaries . US Geological Survey Statistics and Information
- [3] Olmedo, F., Yusta I., Pesquera Y., Velasco F. El yacimiento de magnesita de Eugui (Navarra). In García-Guinea & Martínez-Frías, 1992, Yacimientos Minerales de España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Colección Textos Universitarios, 15. Madrid. ISBN 84-00-07263-4637-648.
- [4] Doval M., Brell M., Galán E. El yacimiento de magnesita de Incio, Lugo, España. Boletín Geológico y Minero, 88-1, 50-64. Instituto Geológico y Minero de España, Servicio de Publicaciones. Madrid.
- [5] Sánchez-España J., García de Cortázar A. 2002. The discovery of the Borobia world-class stratiform magnesite deposit (Soria, Spain): a preliminary report. Mineralium Deposita, 37: 240-243.
- [6] Polmear I.J. 1989. Light Alloys. Metallurgy of the Light Metals. Second Edition: Edward Arnold. Melbourne.
- [7] Makar G.L., Kruger K. 1990. J. Electrochem. Soc. 137(2). Pp 414-421.
- [8] Emley E.F. 1966, Principles of Magnesium Technology. New York. Pergamon Press. Pp 685-695.
- [9] Shreir L.L. 1965. Corrosion. Volume 1. Metal/Environment Reactions. Magnesium and Magnesium Alloys: Newness-Butterworths. 4: 86-100. London.
- [10] Froats A., Arune T.K., Hawke D., Unsworth W., Hillis J. 1987. Corrosion of Magnesium and Magnesium Alloys. In Metals Handbook, Volume 13. Corrosion. 9<sup>th</sup> edn. Metals Park. Ohio: ASM International. Pp 740-754.
- [11] Makar G.L., Kruger K. 1993. J. Int. Mater. Rev. 38(3). Pp 138-153.
- [12] Turnold R., Holtan H., Berfe M., Lasson A., Steen Hansen R. 1977. Corros. Sci.: 17,353-365.
- [13] Albright D.L. 1988. Relationship of Microstructure and Corrosion Behavior in Magnesium Alloys Ingots and Castings, in: Advances in Magnesium Alloys and Composites. Paris H.G., Hunt W.H. eds. International Magnesium Association and the nouns Ferrous Metals Committee, The Minerals, Metals and Materials Society. Phoenix. Arizona. Pp 57-75.
- [14] Hoch G.M. 1974. Int. Corrosion. Conf. Ser., Vol. NACE-3:134.
- [15] Nisancioglu K., Lunder O., Aune T. 1990. Corrosion Mechanism of AZ91 Magnesium Alloy, in : Proc. 47<sup>th</sup> World Magnesium Conference. Cannes. France. 1990. International Magnesium Association. Mcleen Virginia. Pp 43-50.
- [16] Loose W.S. 1946. in: Corrosion and Protection of Magnesium. Pidgeon L.M., Mathes J.C. Woldmen et All eds. Am. Soc. Mets. Pp 173-260.
- [17] Hillis J.E., Reichel K.N. 1986. High Purity Magnesium AM60 Alloy: The Critical Contaminant Limits and the Salt Water Corrosion Performance. Society of Automotive Engineers Technical Paper Series # 860288. Detroit.
- [18] Hawkee D.L. 1975. Corrosion and Wear Resistance of Magnesium Die Castings. SYCE 8<sup>th</sup> International Die Casting Exposition and Congress. Detroit 1975. Paper No. G-T75-114.

- [19] Makar G.L., Kruger K., Joshi A. 1988. The Effect of Alloying Elements on the Corrosion Resistance of Rapidly Solidified Magnesium Alloys, in: Advances in Magnesium Alloys and Composites. Paris H.G., Hunt W.H. eds. International
- [20] Kruger K., Long G.G., Tanaka D. 1986. Fundamental Understanding of the Effect of Alloying Elements on the Corrosion Resistance of RS Mg Alloys. Report No. ADA176/970/2GAR. The Johns Hopkins University. Baltimore. P 26.
- [21] Long G.G., Kruger K., Tanaka D., Zhang Z. 1987. Annual Report. National Synchrotron Light Source, Brookhaven National Laboratory. Baltimore. MD. P 233.
- [22] Hillis J.E., Murray R.W. 1987. Finishing Alternatives of High Purity Magnesium Alloys. SDCE 14<sup>th</sup> International Die Casting Congress and Exposition. Toronto. Paper No. G-T87-003.
- [23] Tawil D.S. 1987. In: Corrosion and Surface Protection Developments. Proc. Conf. Magnesium Technology. Institute of Metals. London. Pp 66-74.
- [24] Bothwell M.R. 1967. In: The Corrosion Of Light Metals. John Wiley and Sons. P 257.
- [25] Whitby L. 1933. Trans. Faraday Soc. 29. P 844.
- [26] Mariaca R. L., Genesca L. J., Uruchurtu Ch. J., Salvador H. L., 1996, Corrosividad Atmosférica. (MICAT MÉXICO). Ed. Plaza y Valdés Editores.
- [27] ASTM G50. Conducting Atmospheric Corrosion tests on Metálas, ASTM, 1991.
- [28] ASTM G1 Preparing Clearing and Evaluation Corrosion Tests Specimens. ASTM. 1991.
- [29] ASTM G46. Examination and Evaluation of Pitting Corrosion, ASTM, 1991.
- [30] ISO 9226. Corrosion of Metals and Alloys. Guiding Values for the Corrosivity Categories of Atmospheres. International Standards Organization. 1992.
- [30] Murcillo et All. Trabajo pendiente de publicación.

**LIBROS CONSULTADOS:**

1. Mariaca R. L., Genesca L. J., Uruchurtu Ch. J., Salvador H. L., 1996, Corrosividad Atmosférica. (MICAT MÉXICO). Ed. Plaza y Valdés Editores.
2. Otero H. E. 2001. Corrosión y Degradación de Materiales. Ed. Síntesis. Madrid, España.
3. Chatterjee U.K., Bose S.K., Boy S.K. 2001. Environmental Degradation of metals. Indian Institute of Technology. Karagpur, India.
4. Bilurbina A. L., Liesa M. F., Iribarren L. J. 2003. Corrosión y Protección. Editions UPC.
5. Chawla S.L., Gupta R.K. 1993. Materials Selection for Corrosion Control. ASM International.
6. Cahn R.W., Haasen P., Kramer E. J., 1995. Materials Science and Technology. A Comprehensive Treatment. Corrosion and Environment Degradation Vol. II. Ed. WILEY-VCH.
7. Verlag C., Barton K. 1973. Schetz gegen. Atmosphärische Korrosion. Ed. Weinheim.
8. Leygraf Ch., Graedel T. 2000. Atmospheric corrosion. Ed. WILEY-VCH.
9. Jiménez C., Blanca E. La Contaminación Ambiental en México. 1ª Edición. Editorial Limusa.
10. Richard Wilson & John Spengler. Particles in our Air. Editorial Harvard.
11. Del Pont, L. M., 1984. El Crimen de la contaminación. Biblioteca de Ciencias Sociales y Humanidades. UAM-Azcapotzalco. Editorial Villicaña. México.
12. Brown Leyma. 1998. Química de la Ciencia. 7ª Edición. Editorial Prentice hall.
13. Comisión Nacional de los Derechos Humanos. 1992. La Contaminación Atmosférica en México. Dirección de Publicaciones. México.
14. Cantú R. P. 1993. La contaminación ambiental. Editorial Diana.
15. Environmental Protection Agency, Aire y Radiación (6205j). 2001. El Sol, la radiación ultravioleta y usted. EPA-430-K-01-009.
16. Carreño V., Redondas A., Cuevas E. 2002. Índice UV para la población España. 1ª Edición. España.
17. Herbert H. Atmospheric Corrosion. Test methods. Lawson. ASCI. National Association of Corrosion Engineers.
18. Kramer D. 2002. Magnesium Compounds. Mineral Commodity Summaries. US Geological Survey Statistics and Information.
19. Anuario Estadístico de la Minería Mexicana. Industria Siderúrgica. Edición 2003.
20. British Geological Survey. 2001. World Mineral Statistics 1996 - 2000.

**NORMAS CONSULTADAS:**

21. ASTM G1. Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM 1990 (Reapproved 1994).
22. ASTM G16-95. Standard Guide for Applying Statistics, to Analysis of Corrosion Data. ASTM 1995.
23. ASTM G46-94. Standard guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. ASTM 1994.
24. ASTM G50. Standard practice for Conducting Atmospheric Corrosion Test on Metals. ASTM 1976 (Reapproved 1992).
25. ISO 8565. Corrosion of Metals and Alloys, Guiding Values For the Corrosivity Categories of atmospheres. International Standards Organization. 1992.
26. ISO 9226. Metales y aleaciones. Ensayos de corrosión atmosférica. Requisitos generales para realizar ensayos in situ.

**OTRAS FUENTES :**

27. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.  
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/>
28. Red automática de Monitoreo Atmosférico.  
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnrama2.htm>
29. Red Manual De Monitoreo Atmosférico.  
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnredma2.htm>
30. Red De Depósito Atmosférico.  
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnredda2.htm>
31. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente.  
<http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/340DepAc.html>
32. The green lane  
<http://www.ec.gc.ca/acidrain/acidfact.htm>.

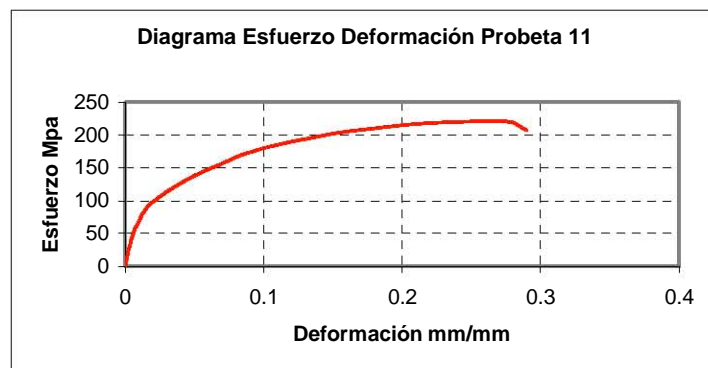
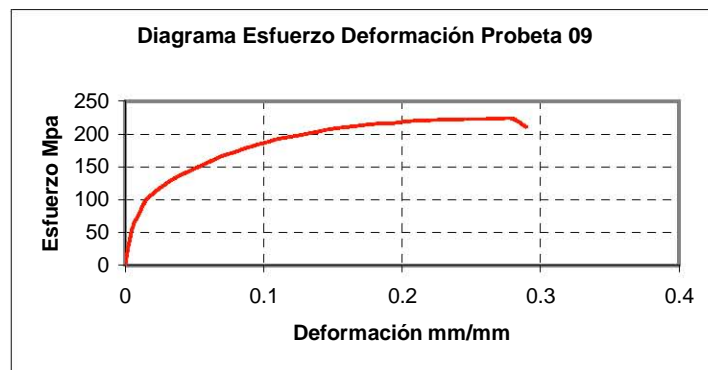
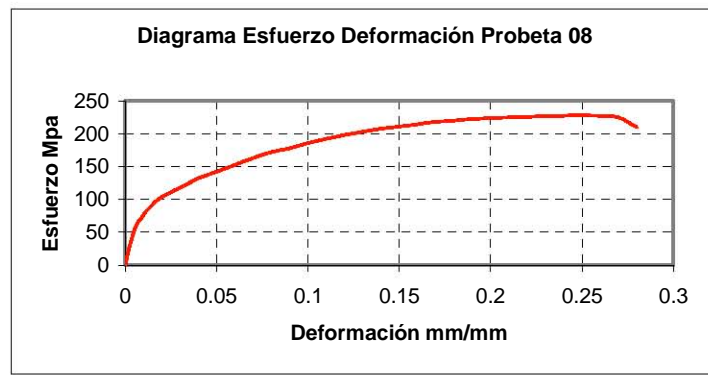
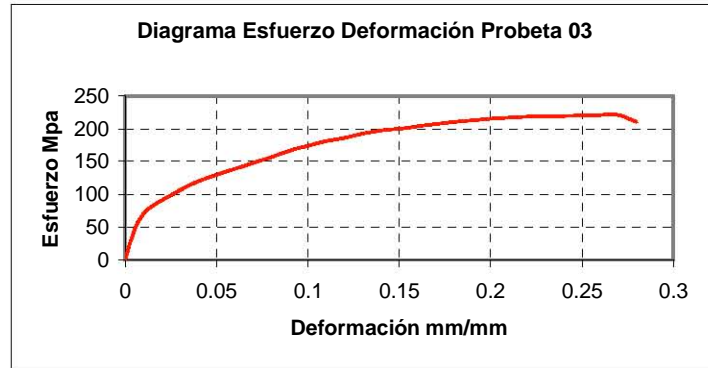
# *Glosario*

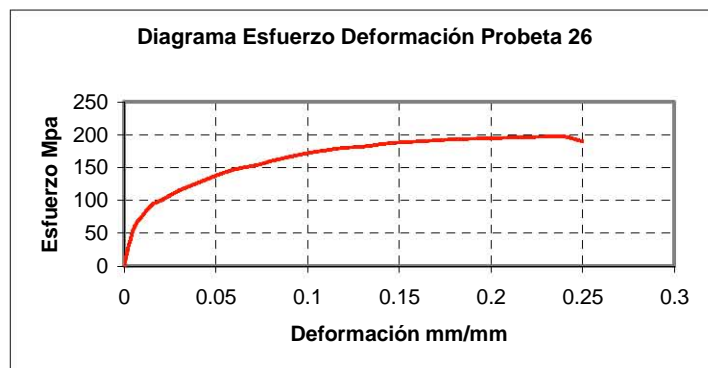
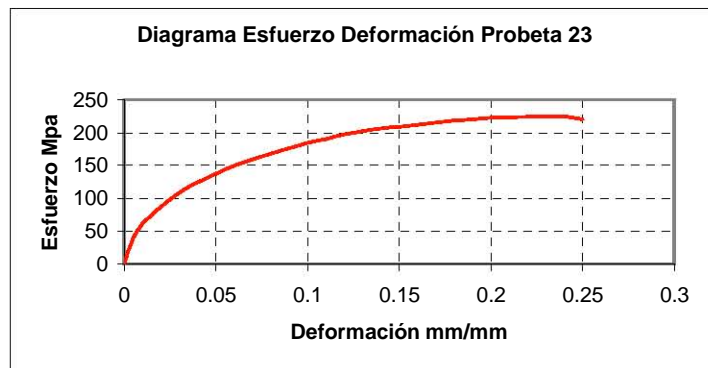
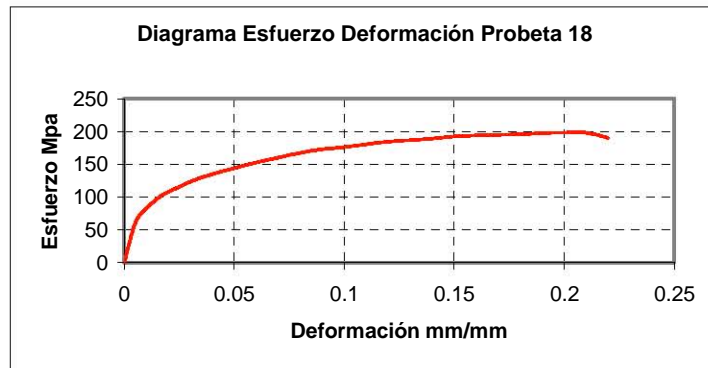
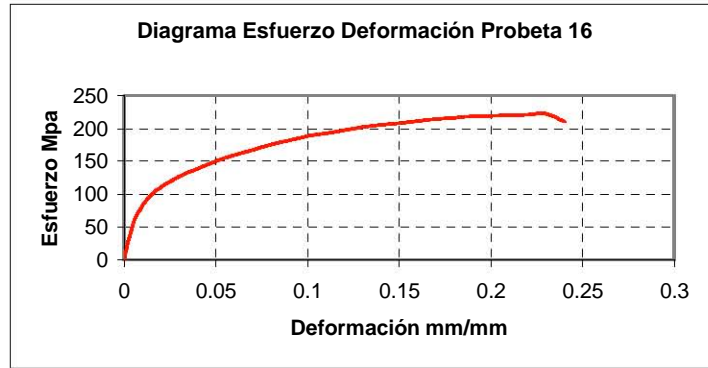


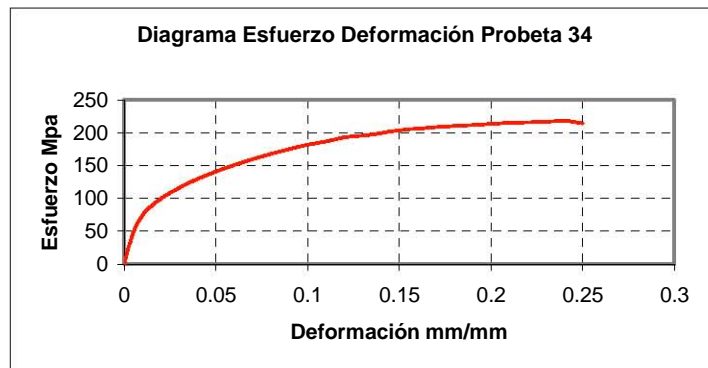
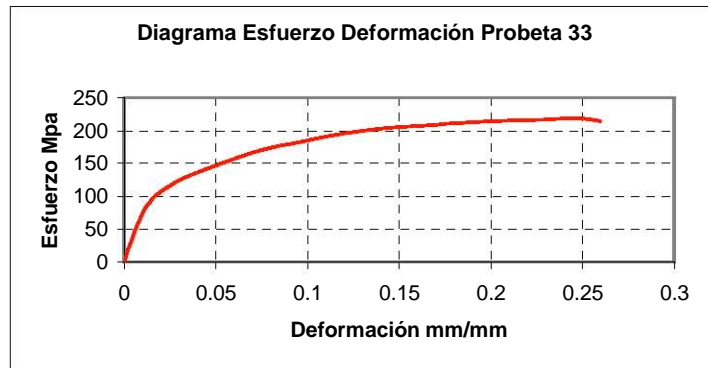
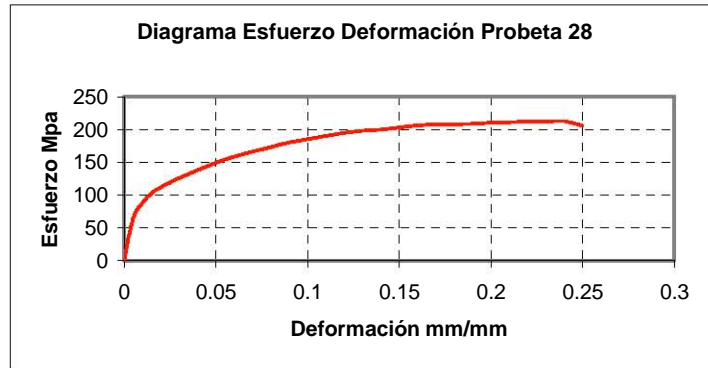
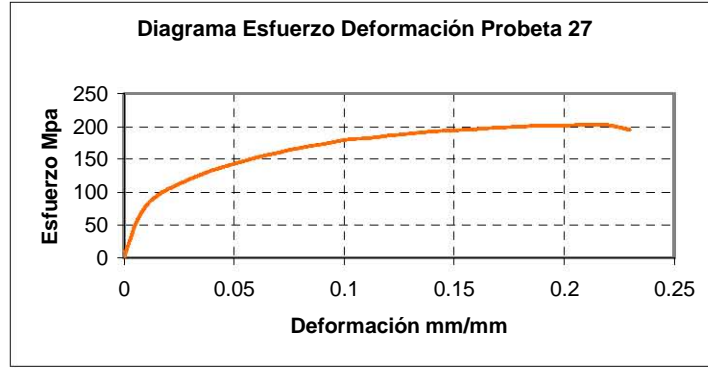
ASTM:	American Society for Testing and Materials.
PIB:	Producto interno Bruto.
RAMA:	Red Automática de Monitoreo Atmosférico.
SIMAT:	Sistema de Monitoreo Atmosférico.
ZMVM:	Zona Metropolitana del Valle de México.
ZMCM:	Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
GDF:	Gobierno del Distrito Federal.
REDMA:	Red Manual de Monitoreo Atmosférico.
PST:	Partículas Suspendidas Totales.
OMS:	Organización Mundial de la Salud.
COHB:	Carbo hemoglobina.
UV:	Ultravioleta.
CFC:	Clorofluocarbonos.
PH:	Potencial de iones hidrógeno contenidos en una solución.
TACGD:	Trasportación aérea de contaminantes a grandes distancias.
REDDA:	Red de depósito atmosférico.
COREMI:	Consejo de recursos minerales.
Ppmbv :	Partes por billón volumétricas.
$E_{corr}$ :	Potencial de corrosión.
SCC:	Stress corrosion cracking.
Ppm:	Partes por millón.
HR	Humedad relativa.
Forsterita:	Mineral más importante de la familia del olivino, ( $Mg_2SiO_4$ ).
Evaporita:	Roca sedimentaria formada de la evaporación de agua de mar.
Cromita:	Mineral óxido negro producto del cromo y el hierro ( $FeCr_2O_4$ ).
TLACA:	Trayectoria de Largo Alcance de Contaminantes aéreos.
GT:	Total general de las observaciones o gran total.
SC:	Suma de cuadrados.
CM:	Cuadrado Medio.
gl:	Grados de libertad
EM:	Estación de Monitoreo.

# Apéndice

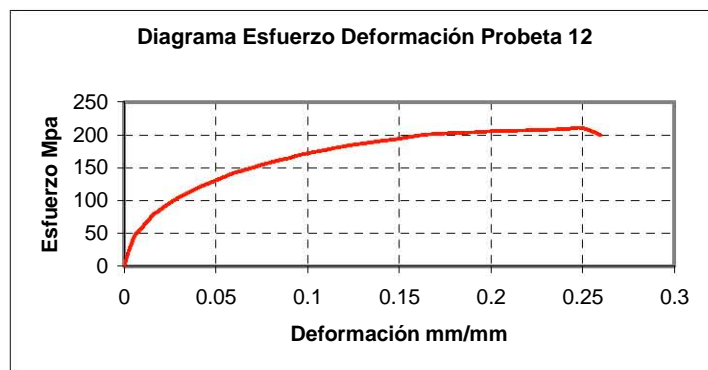
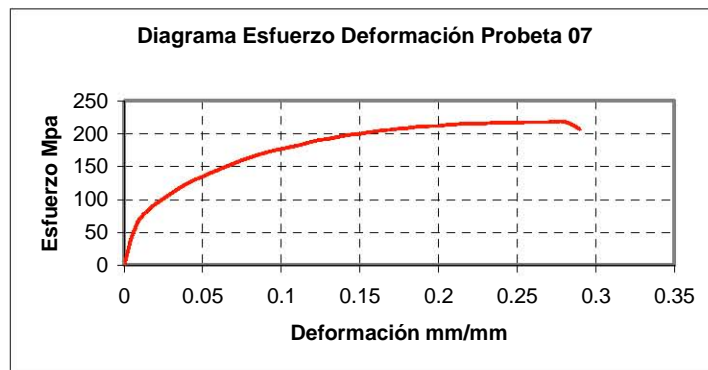
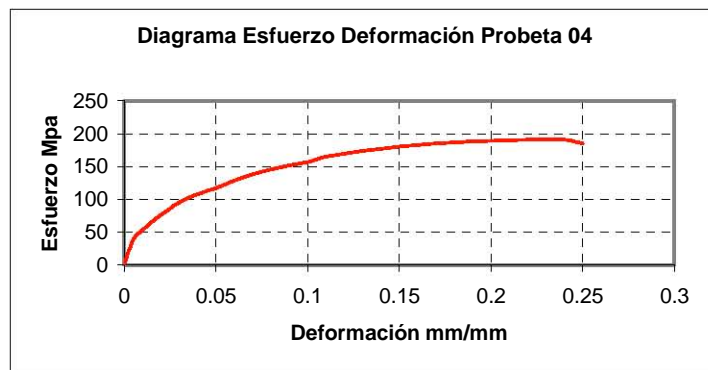
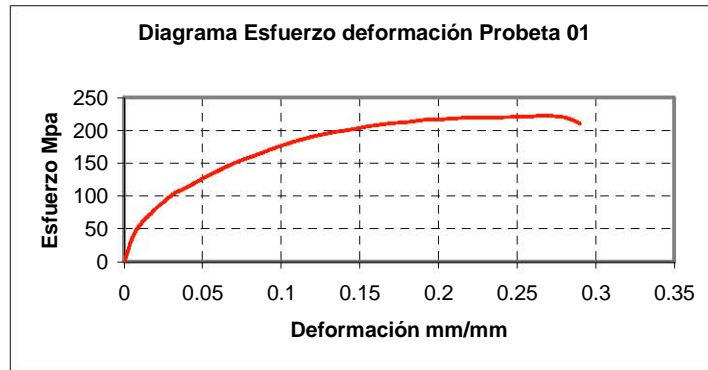
**DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN ESTACIÓN VILLA DE LAS FLORES**

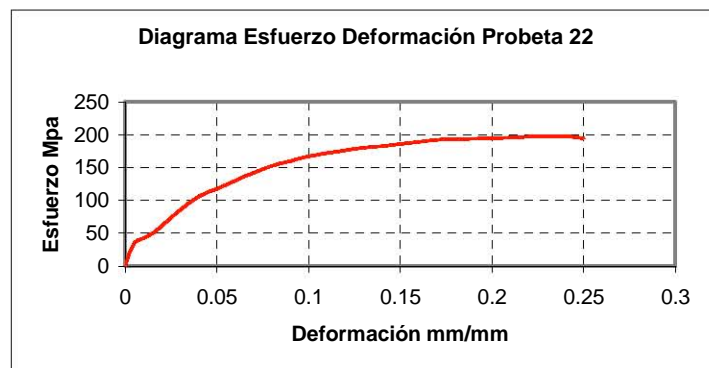
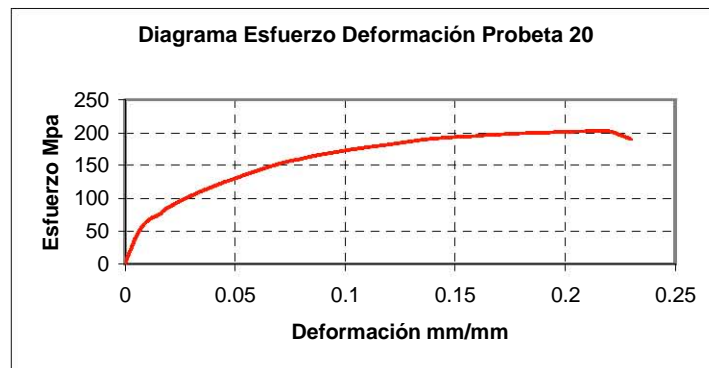
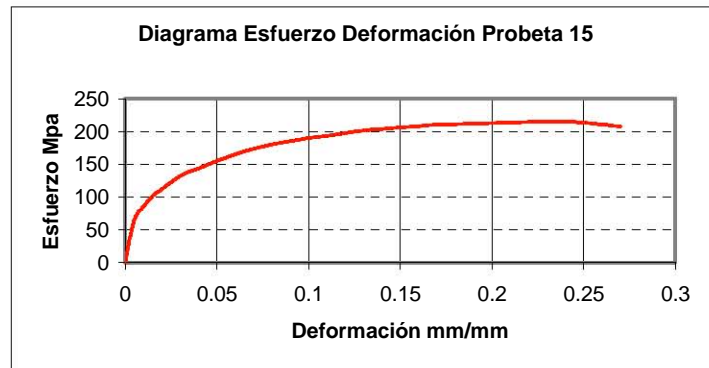
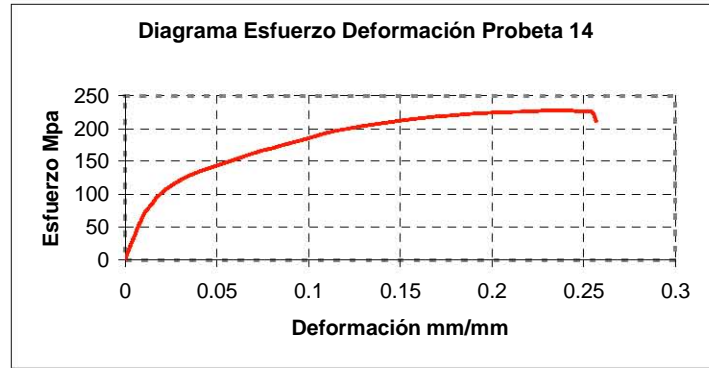


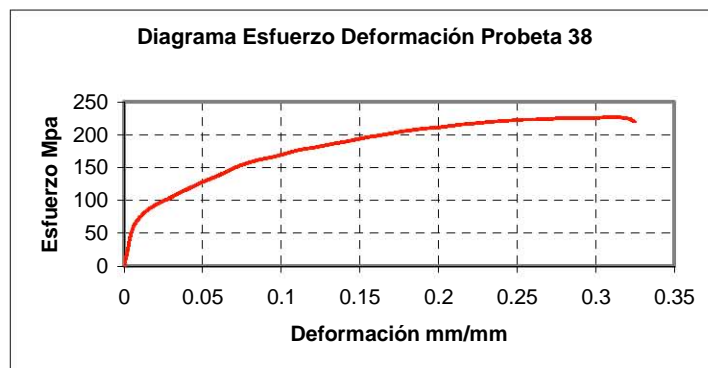
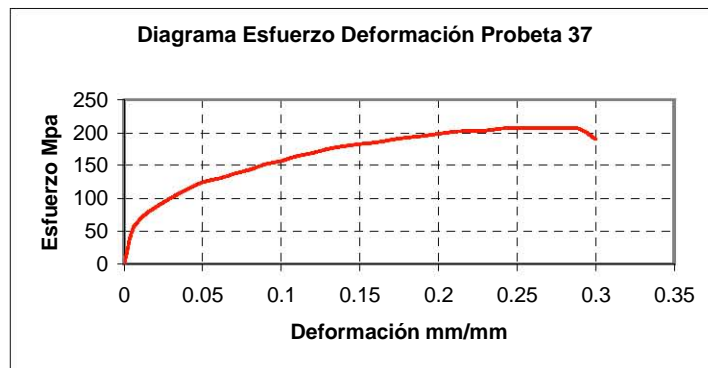
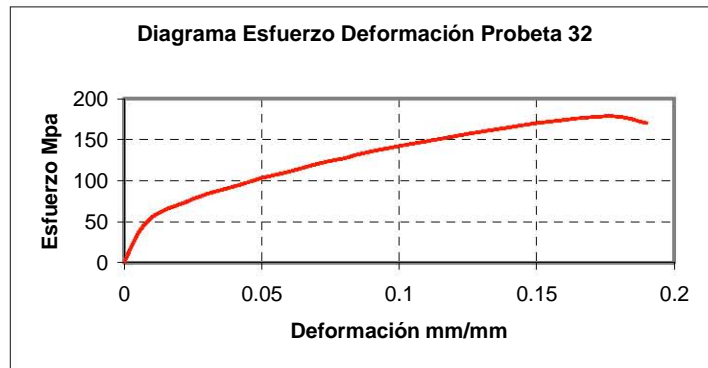
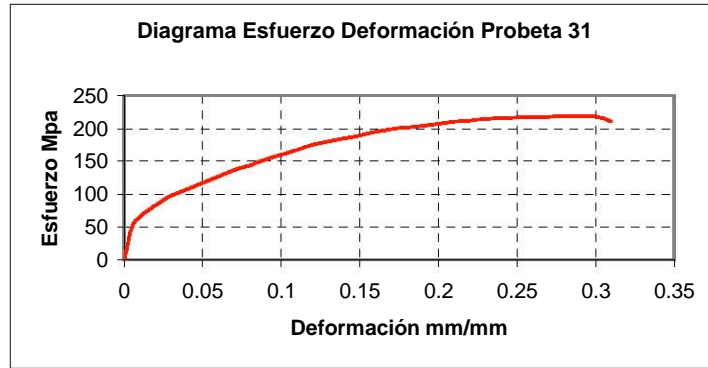




**DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN ESTACIÓN MERCED**

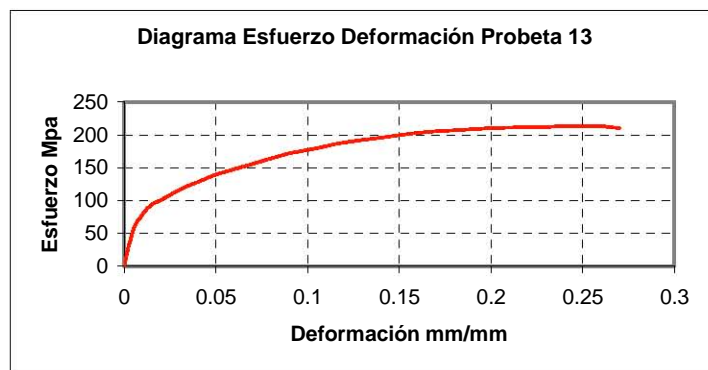
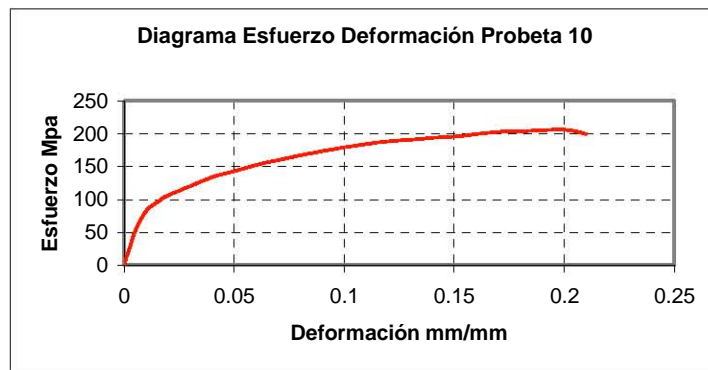
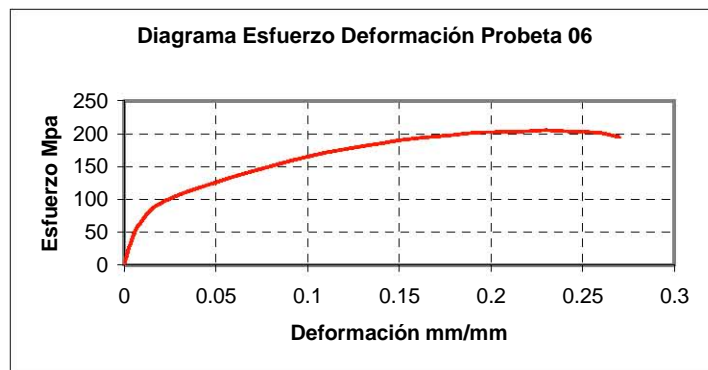
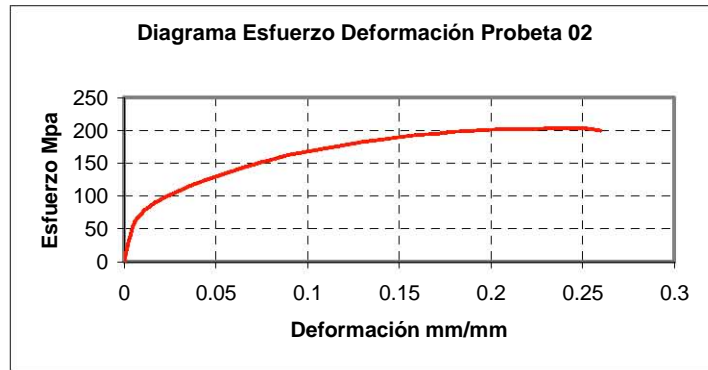


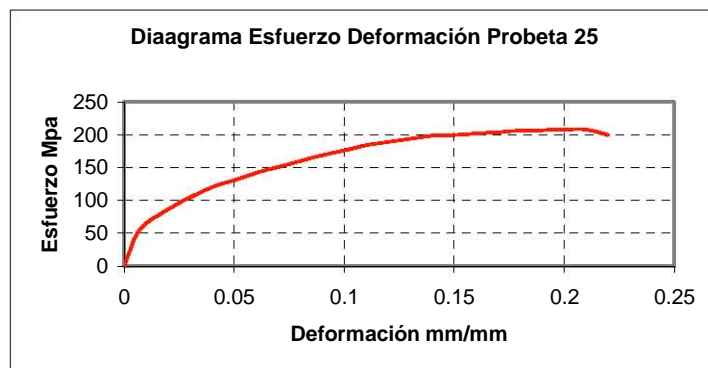
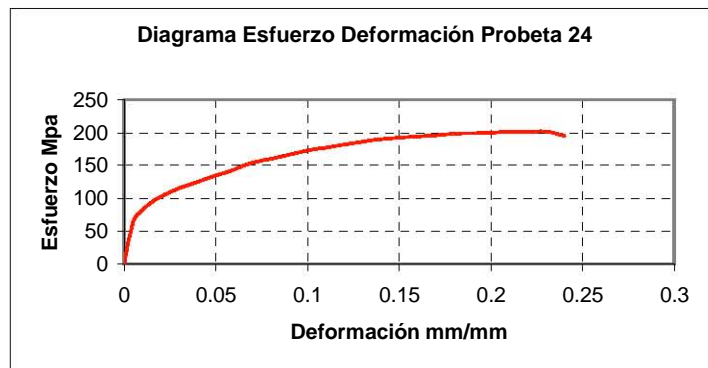
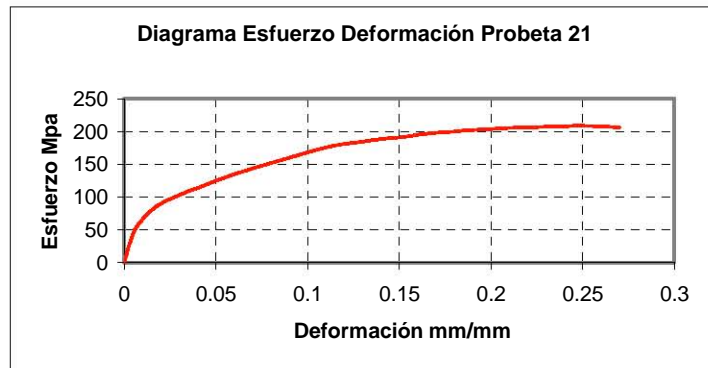
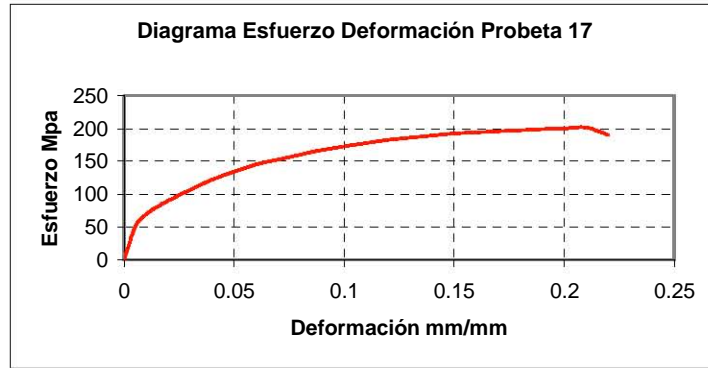


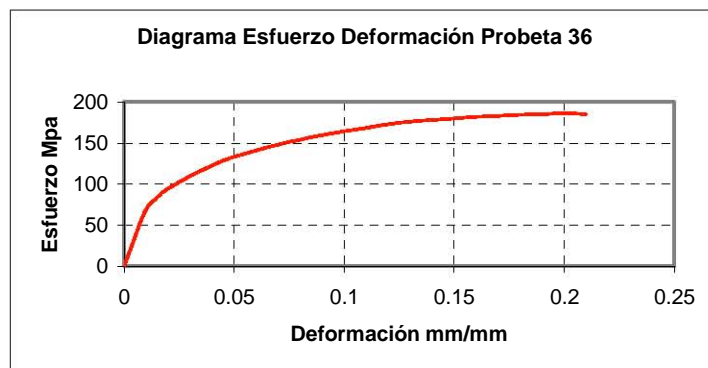
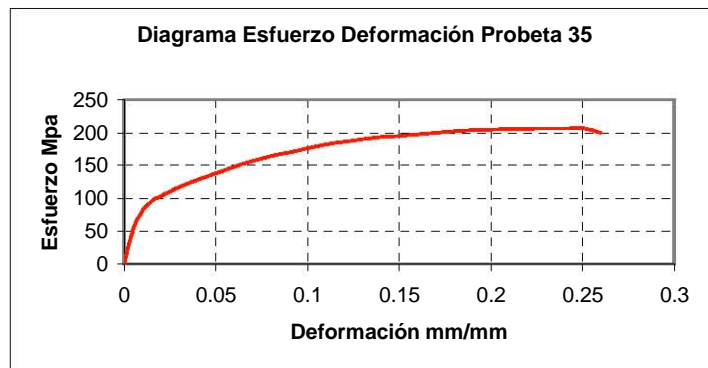
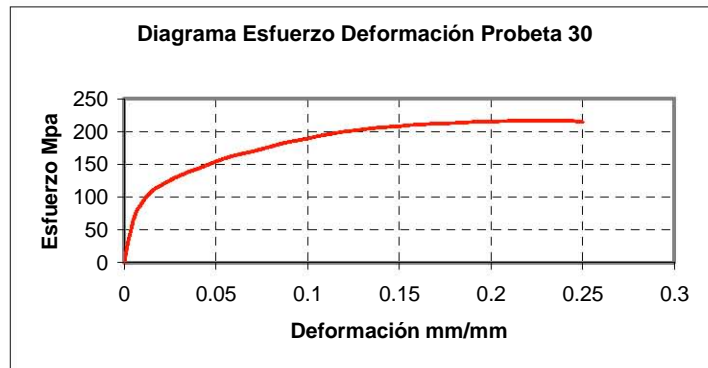
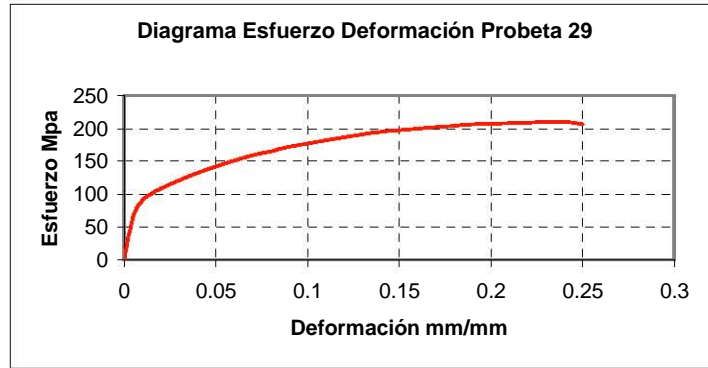




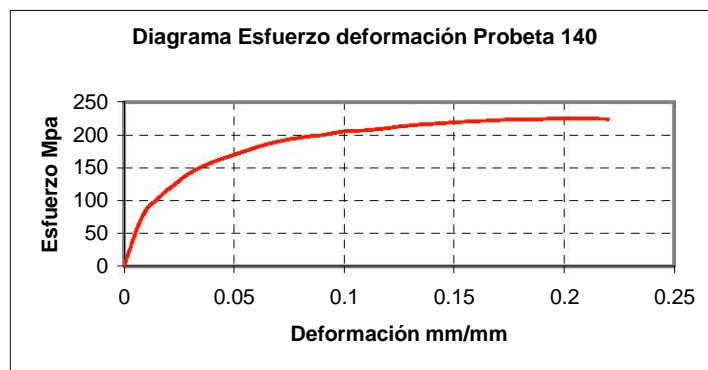
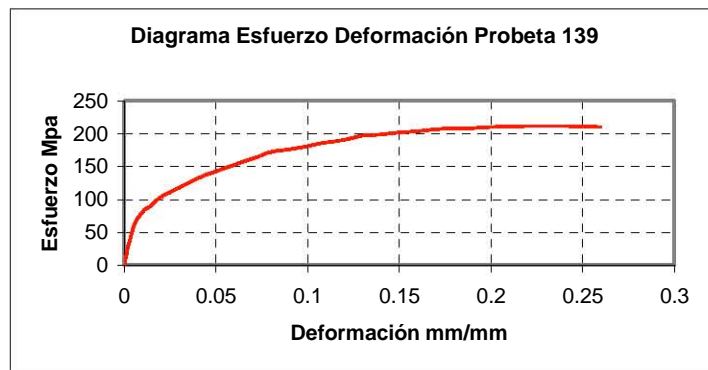
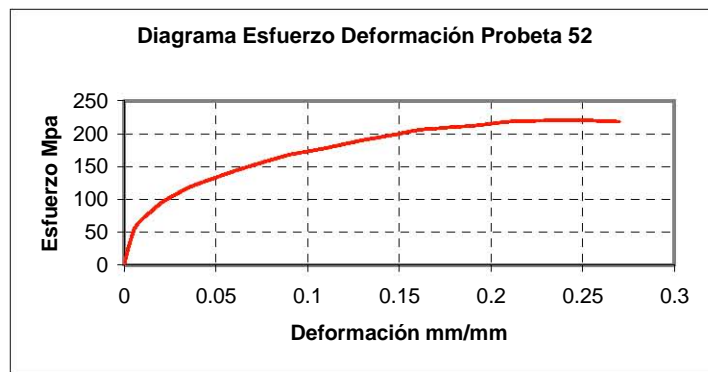
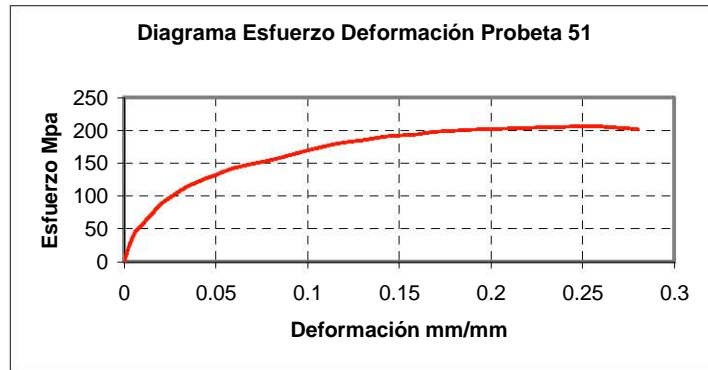
**DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN ESTACIÓN XALOSTOC**

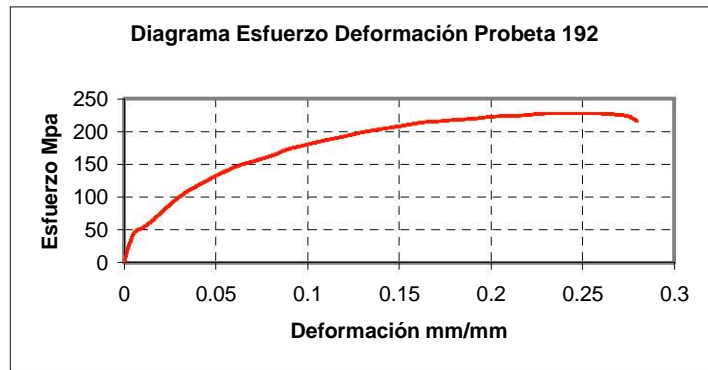
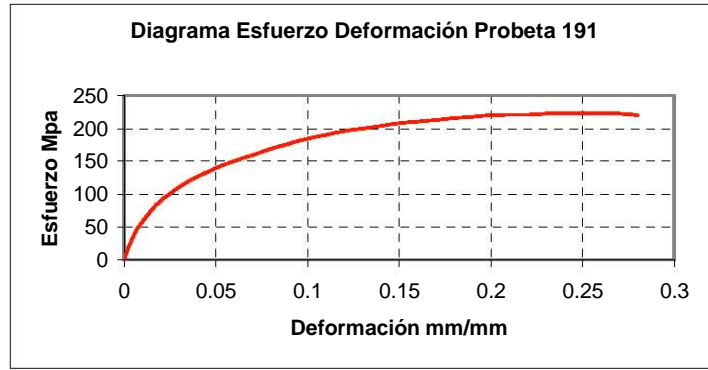






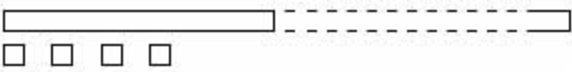
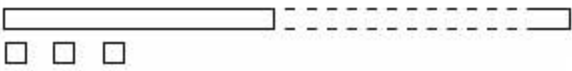
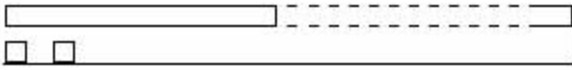
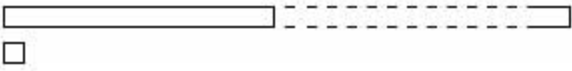
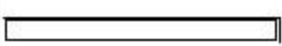
DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROBETAS TETIGO

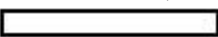




**MARCADOR DE MICRAS DEL MICROSCOPIO DE BARRIDO  
ELECTRÓNICO**

El marcador de micras del microscopio de barrido electrónico de columna JOEL, JSM-255II, se muestra en pantalla como se aprecia en la siguiente tabla.

<b>Presentación En Pantalla Del Marcador De Micras</b>		
<i>Aumentos</i>	<i>Marcador de Micras en Pantalla</i>	<i>Longitud Calibrada</i>
10x – 70x		1000 $\mu\text{m}$
100x – 700x		100 $\mu\text{m}$
1000x – 7000x		10 $\mu\text{m}$
10000x – 70000x		1 $\mu\text{m}$
100000x		0.1 $\mu\text{m}$

En donde el número de cuadros, “ □ “, indica el número de dígitos a partir del punto decimal, la barra “  “, indica la longitud calibrada.