



11/26
68

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**CORROSIÓN, Y EROSIÓN. DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE UN DISPOSITIVO MECÁNICO
PARA PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE
TECNOLOGÍA DE MATERIALES.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

FÉLIX / PAMILA BAEZ

ASESOR: M. I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO. 2003.

A



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

**ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

**DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E**

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Corrosión, y Erosión. Diseño y fabricación de un dispositivo mecánico para pruebas en el Laboratorio de Tecnología de Materiales.

que presenta el pasante: Félix Pamela Boez
con número de cuenta: 06929360-3 para obtener el título de :

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 12 de Agosto de 2003

PRESIDENTE Ing. Sergio Pedro Acosta Torres

VOCAL M. I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

SECRETARIO Ing. Marco Antonio Hernández Rodríguez

PRIMER SUPLENTE Ing. José Castillo Sánchez

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Raymundo Morales Murguza

B

ÍNDICE.

	Página.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSIÓN.

1.1.- Corrosión, tres mecanismos principales	4
1.1.1.- Ataque químico directo	4
1.1.2.- Ataque electroquímico	4
1.1.3.- Oxidación a temperaturas elevadas	5
1.2.- Ánodo y cátodo, consideraciones electroquímicas	7
1.2.1.- El ánodo	7
1.2.2.- El cátodo	7
1.3.- Par galvánico y potenciales de electrodo	9
1.4.- Ataque electroquímico, la serie de la fuerza electromotriz (fem)	12
1.5.- Ataque electroquímico, celdas galvánicas	14
1.6.- Ataque electroquímico, celdas de concentración	16
1.6.1.- Celda de concentración de iones metálicos	16
1.6.2.- Celda de concentración de oxígeno	17
1.7.- Velocidad de corrosión	19
1.8.- Polarización	21
1.8.1.- Polarización por activación	22
1.8.2.- Polarización por concentración	24
1.9.- Pasividad	26

c

CAPITULO 2

OCHO FORMAS BÁSICAS DE CORROSIÓN.

2.1.1.- Ataque uniforme	30
2.1.2.- Corrosión galvánica	30
2.1.3.- Corrosión por aireación diferencial	33
2.1.4.- Picaduras	35
2.1.5.- Corrosión intergranular	36
2.1.6.- Disolución selectiva	38
2.1.7.- Corrosión por erosión	38
2.1.8.- Corrosión bajo esfuerzos	39
2.2.- Métodos anticorrosivos	41
2.2.1.- Selección del metal	42
2.2.2.- Recubrimientos orgánicos	42
2.2.3.- Recubrimientos inorgánicos	42
2.2.4.- Recubrimientos metálicos	43
2.2.5.- Recubrimientos chapcados de alta calidad	43
2.2.6.- Inhibidores	44
2.2.7.- Tratamientos superficiales especiales	45
2.2.8.- Protección catódica	45
2.2.9.- Aire acondicionado	46
2.3.- Pruebas de corrosión	47

CAPITULO 3

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO.

3.1.- Sobre el diseño	55
3.2.- Sobre la fabricación	68

CAPITULO 4

PUESTA EN MARCHA DEL DISPOSITIVO.

4.1.- Metodología de operación del dispositivo mecánico para pruebas de corrosión-erosión en metales	96
4.2.- Prueba demostrativa en un acero 1020 T.F. (Acero Cold Rolled)	99
CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102
APÉNDICE A	104

FE

INTRODUCCIÓN.

En la vida diaria con frecuencia consideramos a la corrosión de los metales como algo molesto que debemos prevenir y evitar, además de tener que desechar nuestros utensilios o bien tener que limpiarlos, o pintarlos frecuentemente para que puedan darnos servicio durante un poco mas de tiempo. Nos preocupamos sobre todo por los objetos expuestos al medio ambiente, principalmente cuando existe un clima húmedo y cálido.

Sin embargo hay que aclarar que la corrosión no es un hecho trivial, sino que a nivel mundial, viene a ser uno de los fenómenos más trascendentales en la economía de toda sociedad humana.

Es aquí donde el papel del Ingeniero Mecánico toma relevancia, ya que la tarea de éste es la de prevenir accidentes que cuestan vidas, colapsos en mega construcciones que cuestan dinero y mucho tiempo a un país. La clave en el éxito del diseño y construcción de grandes proyectos, está en la aplicación de conocimientos de prevención contra la corrosión dentro del mismo diseño, sólo de esta manera se puede lograr vida útil y duradera en los materiales que componen a una construcción.

El propósito principal de este trabajo, es el de proporcionar al Laboratorio de Tecnología de Materiales de la FES Cuautitlán, un dispositivo mecánico que pueda ser usado para las pruebas de corrosión-erosión en materiales metálicos. De este modo se pretende colaborar con las necesidades académicas de la facultad y así ampliar las actividades de los estudiantes dentro del laboratorio. Contándose con el apoyo de los maestros para incentivar un carácter de investigación en los alumnos, y un buen comienzo, es un buen laboratorio.

Esta tesis consta de 4 capítulos. El capítulo 1 trata sobre los aspectos generales de la corrosión principalmente desde un punto de vista electroquímico, ya que es este medio el más común en los casos de corrosión en metales. Los tópicos que se tratan son: los

mecanismos principales que son causas de la corrosión, conceptos base para entender el fenómeno físico-químico en la corrosión y técnicas para controlar los efectos de éste fenómeno, dichas técnicas se derivan de la polarización y la pasividad.

El capítulo 2 hace mención de las ocho formas básicas en que se presenta la corrosión así como sus causas y maneras de prevenir cada una de éstas, pero también, en este capítulo se estudia la importancia de los métodos anticorrosivos. Se aborda el tema imprescindible de las pruebas de corrosión, exponiendo tanto los procedimientos como la tecnología más innovadora para el trabajo de investigación en el laboratorio.

En el capítulo 3 se realizan los planos para el diseño y la posterior fabricación del dispositivo mecánico para pruebas de corrosión en metales, con base a las normas oficiales de dibujo técnico, mismas que se especifican en este apartado. Estos planos incluyen el dibujo de conjunto en el cual se muestran los componentes constituyentes para el ensamblado del dispositivo mecánico; así como los dibujos de detalle de cada una de las piezas componentes del dispositivo mencionado, en donde se especifica la información requerida para la fabricación de dicha pieza, esta información es: dimensiones, tolerancias, tipo de material, etc. En este capítulo también se llevan a cabo las hojas de fabricación para cada una de las piezas, a excepción de aquellas piezas que son compradas. Cabe mencionar que con cada una de las hojas de fabricación se anexa el dibujo de detalle de la pieza a fabricar, ya que dicha hoja de fabricación se realiza con base a éste.

En el capítulo 4 se lleva cabo la puesta en marcha del dispositivo mecánico que se construyó, señalando el procedimiento de operación al momento de realizar las pruebas de corrosión-erosión en los metales. Tal procedimiento involucra el correcto manejo del equipo así como del material y la preparación de la solución corrosiva. Para ilustrar esta metodología, se incluyen en este apartado algunas fotografías sobre el dispositivo mecánico para pruebas corrosión-erosión y también del material utilizado que fue sometido a corrosión.

OBJETIVOS.

- 1. Analizar los aspectos físico-químicos que provocan los fenómenos corrosión y erosión en un material.**
- 2. Diseñar y fabricar un dispositivo mecánico para realizar pruebas de corrosión y erosión, en el Laboratorio de Tecnología de Materiales de la facultad.**
- 3. Mostrar que es posible el equipamiento de los laboratorios de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, mediante el diseño y fabricación de equipos que hacen posible el desarrollo de prácticas y tesis.**

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSIÓN

1.1.-Corrosión, tres mecanismos principales.

La corrosión es el medio químico por el que se deterioran y destruyen los metales, y es en este medio químico en el que se conocen tres mecanismos básicos: el ataque químico directo, el ataque electroquímico, y la oxidación a elevadas temperaturas.

1.1.1.- Ataque químico directo. (no electrolitos)

Incluye todos los tipos de corrosión en los que no hay un flujo apreciable de corriente a través del metal, en distancias apreciables.

El ataque químico directo resulta una reacción uniforme sobre toda la superficie expuesta y, generalmente se produce en el material metálico una capa escamosa o un depósito de espesor uniforme. Este depósito frecuentemente se adhiere muy bien, aunque también son comunes las capas depositadas que no se adhieren. El espesor de las películas adheridas aumenta en proporción directa de acuerdo a la siguiente relación:

$$w = t,$$

donde:

w es el espesor de la película adherida y

t es el tiempo para la reacción.

1.1.2.-Ataque electroquímico.

Es el mecanismo principal de la corrosión y se caracteriza por el establecimiento de zonas catódicas y anódicas, separadas por distancias finitas y entre las que fluyen electrones, a través del metal. En el corrosivo electrolítico, la electricidad fluye por medio del movimiento de los iones, de modo que el ataque es localizado, más que uniforme, como sucede en el caso del ataque químico directo. Se presentan celdas galvánicas o de concentración, dependiendo de las circunstancias de la corrosión. A veces, existen simultáneamente ambos tipos de celdas. Además, la corrosión de celda de

concentración, se subdivide en celdas de concentración de iones metálicos y celdas de concentración de oxígeno, las cuales se explicaran con más detalle en otro apartado.

1.1.3.- Oxidación a temperaturas elevadas.

La oxidación a temperaturas elevadas, se distingue por la formación de una cascarilla cuando se expone el metal a temperaturas elevadas.

Cuando los materiales se someten a altas temperaturas (como sucede con los componentes de turbinas de gas, hornos, etc.), pueden fallar por pérdida de resistencia mecánica, o bien deteriorarse gradualmente según una reacción con la atmósfera circundante. La reacción con el oxígeno es la causa más común de deterioro. El elemento térmico o calorífico de un tostador eléctrico, es ejemplo de una aleación que resiste perfectamente el proceso de oxidación. Si se emplearan acero o cobre en dicho elemento térmico, la rápida oxidación limitaría su vida útil a unas cuantas horas de servicio. Cuando el lector desee observar de manera fácil y directa la oxidación del cobre, simplemente exponga el extremo libre de un trozo delgado de alambre de cobre en una flama de gas. En segundos se verá formarse una capa oscura de óxido cuproso (Cu_2O), que al extenderse, tenderá a proteger al metal y a reducir el grado de oxidación ulterior.

Las etapas iniciales de oxidación pueden investigarse empleando oxígeno a bajas presiones. Si el cobre se calienta en oxígeno a 500°C , acercándose a $10^{-1} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ según la figura 1.1, transcurrirán unos minutos antes de que aparezcan núcleos de óxido; sin embargo, antes de esto, una fracción de una monocapa de átomos de oxígeno (quimisorbidos) se enlaza químicamente a la superficie del metal. Generalmente los núcleos de óxido se forman *epitaxialmente* en una superficie metálica limpia; esto es, un plano de cristal en el óxido se empareja con el mismo tipo de plano en el metal. Por ejemplo, los núcleos de óxido en los planos [1 1 1] de cobre (figura 1.1) tienen sus planos [1 1 1] paralelos a los del metal. Los núcleos existentes crecen con rapidez por la

adición de átomos de oxígeno y de cobre a sus bordes hasta que, finalmente, se forma una capa continua en la superficie. En el cobre policristalino la capa de óxido en cada grano tiene una orientación y un espesor característicos.

A pesar de que muchos factores afectan el grado en que se oxidan los metales, el carácter de la capa de óxido es casi siempre decisivo. Si esta capa se agrieta o es porosa (por ejemplo, MgO en magnesio a más de 450°C), entonces el oxígeno gaseoso puede penetrar la capa y mantener una intensidad constante de oxidación, de manera que el grado de ésta aumenta en forma lineal con el tiempo, y se tiene, así, la relación:

$$w = kt \text{ ---- (1.1)}$$

donde w es el aumento en peso del espécimen.

Los óxidos que crecen en la ecuación 1.1 se llaman *protectores*.

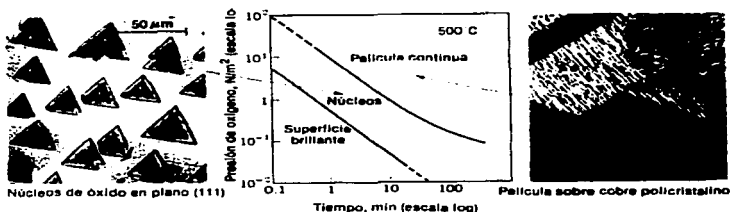


Figura 1.1 Etapas de la formación de una película de óxido en cobre a 500°C en oxígeno a bajas presiones.

Los óxidos más útiles son aquellos (como el Cu_2O) que forman una capa continua sobre la superficie del metal y, por tanto, tienden a dar mayor protección cuanto mayor sea el espesor de la capa de óxido. Generalmente, los óxidos de este tipo crecen según una ley parabólica:

$w^2 = kt + m$ ----(1.2); donde k y m son constantes que dependen de la temperatura de oxidación. Otro comportamiento común obedece a una ley logarítmica de crecimiento:

$$w = A \log t + B \text{ ----(1.3)}$$

**TESIS CON
TÍTULOS
FALLA DE ORIGEN**

1.2.- Ánodo y cátodo, consideraciones electroquímicas.

En los materiales metálicos, el proceso de corrosión es normalmente electroquímico; dicho esto sin dejar de considerar que también puede ser por ataque químico directo, como ya se ha mencionado. El proceso electroquímico es una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra.

1.2.1.-El ánodo.

Una característica de los átomos metálicos es la pérdida o ganancia de electrones en una reacción denominada *oxidación*. Por ejemplo, un metal **Me** que tiene una valencia **n** (o **n** electrones de valencia) puede experimentar corrosión según la siguiente reacción:



donde **Me** se convierte en un ión con **n+** cargas positivas al perder sus **n** electrones de valencia. Otros ejemplos de oxidación metálica son :



La zona donde tiene lugar la oxidación se denomina ánodo y la oxidación a veces se llama reacción anódica.

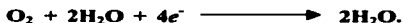
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2.2.-El cátodo.

Los electrones generados en cada átomo metálico que se oxida, se transfieren a otra especie química en un proceso que se denomina reacción de *reducción*. Por ejemplo, algunos metales experimentan corrosión en disolución ácida que contiene elevada concentración de iones hidrógeno (H^{+}). El ión H^{+} se reduce así:



y se desprende hidrógeno gas (H_2). Según la naturaleza de la disolución a la que esta expuesto el metal, puede ocurrir otras reacciones de reducción. Una disolución ácida que contiene oxígeno disuelto se puede reducir de este modo:



Los iones metálicos presentes en la disolución también se pueden reducir. Por ejemplo, los iones con más de un estado de valencia (iones multivalentes) la reducción queda así:

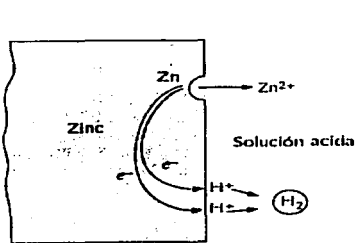


donde el ión metálico disminuye su estado de valencia al aceptar un electrón. El ión metálico también puede reducirse a metal (estado neutro) según la siguiente reacción:



La zona donde tiene lugar la reducción se denomina *cátodo*. Es posible que ocurran dos o más reacciones de reducción simultáneamente.

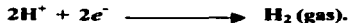
En una reacción electroquímica, deberá existir al menos una reacción de oxidación y una de reacción de reducción, a menudo la oxidación y la reducción se denominan semi-reacciones. No puede resultar acumulación de cargas de electrones e iones, es decir, la velocidad total de oxidación debe ser igual a la velocidad total de reducción o, dicho de otro modo, los electrones generados en la oxidación se deben consumir en la reducción. Como un ejemplo, el metal zinc sumergido en una disolución ácida que contiene iones H^+ . En algunas zonas de la superficie metálica, el zinc experimenta oxidación o corrosión, como lo ilustra la figura 1.2 de acuerdo a la siguiente reacción:



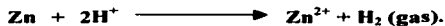
TESIS CO.
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.2 Reacciones electroquímicas de la corrosión del zinc en disolución ácida.

Como el zinc es un metal y además buen conductor eléctrico, estos electrones se transfieren a una zona próxima donde los iones H^+ se reducen:



Si no ocurren otras reacciones de oxidación o de reducción, la reacción electroquímica total es la suma de las dos reacciones anteriores, dando como resultado:



De acuerdo a las consideraciones referentes al ánodo, cátodo y reacción electroquímica, que se acaban de mencionar, se pueden formular algunas definiciones:

Ánodo; electrodo de una célula electroquímica que experimenta oxidación y que además suministra electrones a un circuito externo.

Cátodo; electrodo de una célula electroquímica donde ocurre una reacción de reducción y que también recibe electrones del circuito externo.

Nota: el término de circuito externo se comprenderá mejor cuando se defina más adelante, lo que es una celda galvánica y una celda de concentración, por el momento sólo se hace mención a este término para establecer una definición más precisa.

1.3.- Par galvánico y potenciales de electrodo.

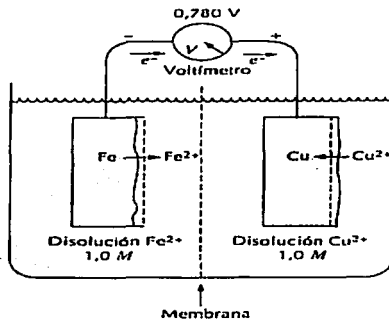
Se denomina par galvánico a dos metales conectados eléctricamente y sumergidos en un electrolito, mientras uno se convierte en ánodo y se oxida, el otro actúa como cátodo y se reduce. A continuación se explica con más detalle.

Considérese la pila electroquímica que se muestra en la figura 1.3. La mitad de la pila es un trozo de hierro puro sumergido en una disolución que contiene iones Fe^{2+} con una concentración de una molaridad (1M)^A. La otra mitad de la pila consiste en un electrodo de cobre puro en una disolución de 1M de iones Cu^{2+} . Las semipilas están separadas por una membrana que impide la mezcla de las dos disoluciones. Si los electrodos de hierro y de cobre están conectados eléctricamente, el cobre se reduce a expensas de la oxidación del hierro, según la siguiente reacción:



Los iones Cu^{2+} se depositan (electrodeposición) como cobre metálico sobre el electrodo de cobre, mientras que el hierro se disuelve (corroe) en la otra semipila y se incorpora a la disolución como iones Fe^{2+} .¹

Las reacciones de las dos semipilas están representadas por las reacciones siguientes:



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

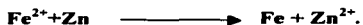
Figura 1.3 Pila electroquímica formada por electrodos de hierro y de cobre sumergidos en una disolución 1 M de sus iones. El hierro se corroe mientras el cobre se electrodeposita.

Los electrones generados en la oxidación del hierro pasan a través del circuito externo y fluyen al electrodo de cobre para reducir al Cu^{2+} . Además, existe un movimiento iónico a través de la membrana. A este dispositivo descrito se le conoce como *par galvánico*.

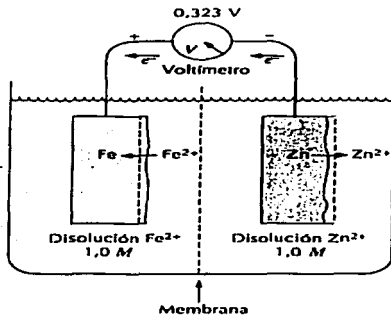
Ahora se explicará lo que es el potencial de electrodo: Entre las dos semipilas existe un potencial eléctrico o voltaje, y su magnitud se determina conectando un voltímetro en el circuito externo. La *pila galvánica* cobre-hierro genera un potencial de 0.780V a 25°C

¹ La concentración de las disoluciones líquidas se suele expresar en términos de "molaridad", M, el número de moles de soluto por millón de milímetros cúbicos (10^6 mm^3 , o 1000 cm^3) de disolución.

de temperatura^B. Como otro ejemplo, consideramos ahora la misma semipila de hierro conectada a un electrodo de zinc sumergido en una disolución 1M de iones Zn^{2+} (figura 1.4). En este caso el zinc actúa de ánodo y se corroe, mientras que el Fe se convierte en el cátodo. La reacción electroquímica es la siguiente:



El potencial asociado a esta pila es de 0.323V^C.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.4 Pila electroquímica formada por electrodos de hierro y zinc sumergidos en una disolución 1 M de sus iones. El zinc se corroe y el hierro se electrodeposita.

Debido a que diferentes pares de electrodos tienen distinto voltaje, se puede decir que la magnitud de este voltaje representa la fuerza motriz de la reacción electroquímica de oxidación-reducción. Por este motivo, los metales se pueden clasificar en función de su tendencia a experimentar oxidación cuando forman pares galvánicos con otros metales. Una semipila como la descrita (es decir, un electrodo de un metal puro sumergido en una disolución 1M de sus iones a 25°C) se denomina *semipila estándar*.

^B Valores tomados del libro Callister, Jr. Ciencia e Ingeniería de los Materiales, pag.570, tomo II.
^C *ibídem*.

Deberá considerarse a manera de introducción todo lo descrito que hace referencia a par galvánico y potencial de electrodo, y así poder comprender mejor la serie de la fuerza electromotriz (fem).

1.4.- Ataque electroquímico, la serie de la fuerza electromotriz (fem).

Como ya se dijo en el apartado anterior, los voltajes medidos en las pilas sólo representan diferencias de potencial eléctrico y es conveniente establecer un punto de referencia o pila de referencia, que pueda servir para comparar otras semipilas. Esta pila de referencia, escogida arbitrariamente, es el electrodo estándar de hidrógeno (figura 1.5). Consiste en un electrodo inerte de platino sumergido en una disolución 1M de iones H^+ , saturada con burbujas de gas hidrógeno que atraviesan la disolución a una presión de una atmósfera a 25°C. El platino no interviene directamente en la reacción; sólo actúa como una superficie sobre la cual, los átomos de hidrógeno pueden ser oxidados o los iones de hidrógeno pueden ser reducidos. La *serie de fuerzas electromotrices (fem)* se obtiene acoplando semipilas estándar de varios metales al electrodo estándar de hidrógeno y clasificándolas de acuerdo con el voltaje medido.

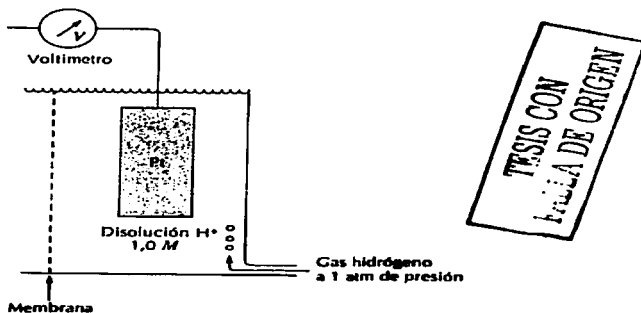


Figura 1.5 Semipila estándar de hidrógeno utilizada como referencia.

La Tabla 1.1 representa las tendencias a la corrosión de varios metales; los de arriba (p.ej., oro y platino) son nobles o químicamente inertes. A medida que se desciende hacia la parte baja de la tabla, la actividad aumenta y son más susceptibles a oxidarse. El sodio y el potasio tienen alta reactividad.

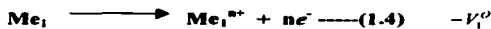
Tabla 1.1 Potenciales de semicelda.

	Reacciones del electrodo	Potencial de electrodo estándar V° (V)
↑ Inactividad creciente (catódicos)	Au ³⁺ + 3e ⁻ → Au	+1,420
	O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O	+1,229
	Pt ²⁺ + 2e ⁻ → Pt	+1,2
	Ag ⁺ + e ⁻ → Ag	+0,800
	Fe ³⁺ + e ⁻ → Fe ²⁺	+0,771
	O ₂ + 2H ₂ O + 4e ⁻ → 4(OH ⁻)	+0,401
	Cu ²⁺ + 2e ⁻ → Cu	+0,340
	2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂	0
	Pb ²⁺ + 2e ⁻ → Pb	-0,126
	Sn ²⁺ + 2e ⁻ → Sn	-0,136
↓ Actividad creciente (anódicos)	Ni ²⁺ + 2e ⁻ → Ni	-0,250
	Co ²⁺ + 2e ⁻ → Co	-0,277
	Cd ²⁺ + 2e ⁻ → Cd	-0,403
	Fe ²⁺ + 2e ⁻ → Fe	-0,440
	Cr ³⁺ + 3e ⁻ → Cr	-0,744
	Zn ²⁺ + 2e ⁻ → Zn	-0,763
	Al ³⁺ + 3e ⁻ → Al	-1,662
	Mg ²⁺ + 2e ⁻ → Mg	-2,363
	Na ⁺ + e ⁻ → Na	-2,714
	K ⁺ + e ⁻ → K	-2,294

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los voltajes indicados en la Tabla 1.1 se refieren a las semirreacciones de *reducción*, con los electrones en el primer miembro de la ecuación química. Para la oxidación, el sentido de la reacción es el inverso y el signo de voltaje cambiado.

Considérese las reacciones generalizadas que implican la oxidación de un metal Me₁ y la reducción de un metal Me₂:



donde los V⁰ son los potenciales estándar tomados de la serie de *fem* estándar.

Como el metal Me_1 se oxida, el signo de V_1^o es opuesto al que aparece en la Tabla 1.1. Sumando las ecuaciones 1.4 y 1.5 se obtiene:



y el potencial total de la pila ΔV^o es:

$$\Delta V^o = V_2^o - V_1^o \text{ ----(1.7)}$$

Para que esta reacción transcurra espontáneamente, ΔV^o debe ser positivo. Si es negativo, la reacción espontánea es la inversa de la ecuación 1.6. Cuando se acoplan semipilas estándar, los metales situados en la parte inferior de la Tabla 1.1 experimentan oxidación (corrosión) mientras que los situados arriba, se reducen.

Las predicciones del comportamiento metálico, basadas en la serie de la fuerza electromotriz, presuponen que los metales que reaccionan tienen superficies limpias y brillantes. Si la superficie de un metal no está limpia o si se cubre con productos de la reacción, las predicciones no son dignas de confianza. La formación de películas retardadoras de la corrosión sobre las superficies metálicas, se conoce como *pasivación*.

1.5.- Ataque electroquímico, celdas galvánicas.

Cuando se conectan eléctricamente dos metales distintos y se sumergen en una solución electrolítica, se forma una celda galvánica. En la figura 1.6 se muestra una de esas celdas galvánicas típicas. El metal que tenga el potencial de electrodo algebraicamente mayor tiende a sufrir un ataque y se convierte en el ánodo. Cuando éste último se disuelve, se deposita en el cátodo una cantidad electroquímicamente equivalente de hidrógeno, o del elemento metálico de menor potencial de electrodo. En esa forma, el ánodo se disuelve y el cátodo queda protegido. Cuando se disuelve el ánodo, para formar iones, se liberan electrones. Éstos fluyen por cualquier conexión eléctrica presente, y llegan al cátodo. Allí, neutralizan las cargas positivas de los iones que salen de la solución.

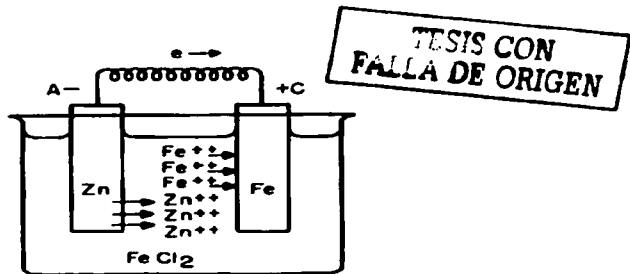


Figura 1.6 En una celda galvánica, se sumergen en un electrolito dos electrodos de diferentes metales. El metal más activo se convierte en el ánodo A, que está cargado negativamente, y que tiende a recibir un ataque. El metal menos activo se convierte en el cátodo C, que está cargado positivamente y tiende a ser protegido. Los electrones fluyen por el conductor de conexión, del ánodo al cátodo.

Inicialmente, esa celda producirá cierto voltaje, dependiendo de los metales que se seleccionen como electrodos, el tipo y la concentración del electrolito y la temperatura de la celda. El voltaje disminuirá muy pronto y la rapidez del ataque se hará menor, debido a la polarización, que se produce a causa del vaciado de iones del electrolito en la región del cátodo, y por la excesiva concentración de iones en la zona del ánodo. Si la celda es de tal índole que se descargue hidrógeno en el cátodo y se libere oxígeno en el ánodo, el voltaje de la celda se reducirá todavía más, puesto que los electrodos quedarán recubiertos por burbujas gaseosas. El efecto neto es una disminución de la actividad de la celda, en comparación con la que tenía inicialmente, cuando las dos superficies electrónicas limpias se sumergieron en el electrolito.

La rapidez del ataque galvánico depende del área del cátodo en relación a la del ánodo y varía en forma directamente proporcional a la razón del área del cátodo a la del ánodo. Así pues, un área anódica relativamente pequeña será atacada con mucha mayor rapidez que si es grande. En el acero no protegido de los cascos de barcos se produce una corrosión galvánica. El acero es anódico con respecto al latón de los tornillos y

remaches y, por lo tanto, el casco sufre un ataque selectivo. El casco es inerte en las zonas protegidas por pintura o recubrimientos plásticos; pero las grietas pequeñas en la capa de recubrimiento dejan expuestas superficies anódicas relativamente pequeñas. En esas regiones, el ataque es muy rápido, a menos que se tomen medidas preventivas. Los efectos del área explican el rápido ataque que se produce cuando se utilizan remaches de acero para fijar miembros de cobre, mientras que el empleo de remachas de cobre para fijar miembros de acero produce una corrosión insignificante.

1.6.- Ataque electroquímico, celdas de concentración.

Si se sumergen dos pedazos del mismo metal, conectados eléctricamente, en dos concentraciones diferentes de oxígeno disuelto o de un electrolito, se produce una celda de concentración. Se producirá el mismo resultado si, se exponen dos áreas de un mismo pedazo de metal a dos concentraciones distintas de oxígeno disuelto o un electrolito. El ataque se produce en la superficie, en la zona de baja concentración de oxígeno o electrolito, y ese metal o superficie metálica se convierte en el ánodo. El metal que se encuentra en la zona de alta concentración se convierte en el cátodo de la celda, y los electrones fluyen al interior del metal, de la zona anódica a la catódica. Entonces, las celdas de concentración son de dos tipos: a) *celdas de concentración de iones metálicos* y b) *celdas de concentración de oxígeno*.

1.6.1.- Celda de concentración de iones metálicos.

En este tipo de celda, el voltaje producido está relacionado directamente con la diferencia en las concentraciones de las soluciones en las zonas del ánodo y el cátodo; porque la tendencia a entrar en solución o el potencial de solución de un metal, en contacto con una solución de sus iones, es inversamente proporcional a la concentración de sus iones. El voltaje, en la celda de concentración, es la diferencia en el potencial de solución de las dos semiceldas de que se compone. Es así como en la figura 1.7, el cobre en la solución al cinco por ciento de CuCl_2 será anódico en relación al cobre de la solución al diez por ciento.

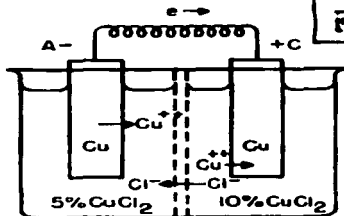


Figura 1.7 En una celda de concentración, se sumergen dos electrodos del mismo metal en dos concentraciones diferentes del mismo electrolito, separadas por una placa porosa, que retrasa la mezcla de las soluciones. El ánodo marcado con la letra A, es atacado, saliendo de él Cu, que entra en solución. El cátodo, marcado como C, es protegido, y los iones de Cu^{++} se depositan en él, como cobre metálico. Los iones Cl^- pasan a través de la placa porosa, de derecha a izquierda, y los electrones fluyen por el conductor, como se indica. La región de baja concentración de iones, en el electrolito, es anódica, y la de alta concentración, catódica.

En la figura 1.8 que representa un corte seccional a través de una unión remachada sumergida, vemos un ejemplo de celda de concentración de iones metálicos. El espacio entre las placas superpuestas se hace progresivamente menor, a medida que nos acercamos al remache. La concentración de iones en el líquido, entre las placas, aumenta, a medida que disminuye la distancia al remache. La concentración de iones es más baja en los extremos de la junta (marcada como A en la figura 1.8), ya que una solución nueva de baja concentración de iones, reemplaza continuamente a la solución en la que se han ido acumulando iones; por lo tanto, A se vuelve anódica con respecto a C, y el ataque se produce como se indica.

1.6.2.- Celda de concentración de oxígeno.

Para que esta celda funcione, se consideran más las diferencias en la concentración de oxígeno disuelto que las diferencias de concentración de iones metálicos. En estas celdas, la zona de baja concentración de oxígeno se hace anódica; mientras que la de alta concentración de oxígeno se vuelve catódica.

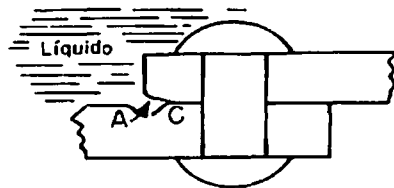
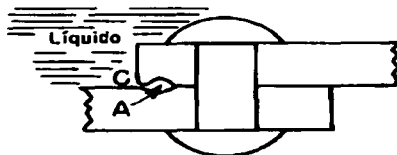


Figura 1.8 Se ilustra el mecanismo, por medio del cual, la corrosión de celda de concentración puede producir un ataque cerca de una junta de remache sumergida en agua aireada. En la figura, A es anódica, con una baja concentración de iones en una solución móvil, que impide la concentración; C es catódica, con una alta concentración de iones, en donde la zona estancada permite la acumulación.

En la figura 1.9 se ilustra que la existencia de oxígeno en las profundidades de la hendidura es nula, y que hay pocas probabilidades de que pueda ser reemplazado. En los extremos de la junta (marcados con C en la figura 1.9), un flujo de solución nueva con alta concentración de oxígeno reemplaza continuamente todo el oxígeno que tenga tendencia a consumirse en esa zona. Por eso, el área anódica A se encuentra, en este caso, muy al interior de la hendidura, y la zona catódica C, está a cierta distancia del remache. En comparación con la celda de concentración de iones metálicos, se invierte la posición de las zonas del ánodo y el cátodo.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 1.9 En esta figura, A es anódica, con baja concentración de oxígeno, ya que el oxígeno no puede ser reemplazado por el líquido, a medida que se usa en la corrosión; C es catódica, con elevada concentración de oxígeno, debido a que el suministro de oxígeno está siendo reemplazado continuamente por la nueva solución móvil.

La corrosión en una celda de concentración de oxígeno puede demostrarse, colgando verticalmente un pedazo de lámina delgada de acero en un vaso de precipitado con agua. La corrosión se producirá con mayor rapidez en torno al fondo de la lámina de acero que cerca de la superficie, porque el aire se disuelve en la superficie del agua y se difunde hacia abajo. Por lo tanto, en la parte superior de la lámina metálica, la concentración de oxígeno será mayor y esa zona se hace catódica. A mayores distancias bajo la superficie del agua, disminuye la concentración de oxígeno y el acero se vuelve anódico.

A continuación, se resumen la naturaleza de las celdas galvánicas y las celdas de concentración:

Áreas catódicas(+).

- Electrolito concentrado
- Solución estancada (celdas de concentración de iones metálicos)
- Solución aireada (celdas de concentración de oxígeno)
- Metales inactivos (altos potenciales monoelectrónicos)
- Electrones del cátodo descargan iones en la solución
- Protección

Áreas anódicas(-).

- Electrolito diluido
- Solución móvil (celdas de concentración de iones metálicos)
- Solución desaireada (celdas de concentración de oxígeno)
- Metales activos (bajos potenciales monoelectrónicos)
- Los electrones quedan atrás en el ánodo, conforme los átomos del metal se convierten en iones y se disuelven
- Ataque

1.7.- Velocidad de corrosión.

Como ya se mencionó, los potenciales de semipila de la *fem* son parámetros termodinámicos que se refieren a sistemas en equilibrio. En la realidad, los sistemas que experimentan corrosión no están en equilibrio: hay un flujo de electrones del ánodo al

cátodo. Lo anterior significa que los parámetros potencial de semipila no se pueden aplicar.

Además, los potenciales de semipila representan la cuantía de una fuerza impulsora, o de la tendencia a que ocurra una determinada reacción de semipila. Sin embargo, cabe destacar que aunque estos potenciales indican el sentido de una reacción espontánea, no aportan información a cerca de la velocidad de corrosión. Es decir, aunque un potencial ΔV calculado para una reacción específica de corrosión sea un número relativamente grande, la reacción puede transcurrir a una velocidad insignificante. Desde el punto de vista técnico es interesante predecir la velocidad de corrosión del sistema, y para ello se requiere la utilización de los parámetros que se discuten a continuación.

La velocidad de corrosión, o la velocidad de eliminación de material como consecuencia de la acción química, constituye un importante parámetro de la corrosión. Se puede expresar como la *velocidad de penetración de la corrosión (VPC)* o la pérdida de espesor del material por unidad de tiempo. La fórmula para este cálculo es:

$$VPC = \frac{KW}{\rho At} \text{ ----(1.8)}$$

donde:

W es la masa perdida después del tiempo de exposición t

ρ y A representan la densidad y el área de la muestra, respectivamente

K es una constante cuya magnitud depende del sistema de unidades utilizado.

La VPC se expresa en milímetros por año (mm/a) o milésimas de pulgada por año (mpa). En el primer caso:

$$K=87.6,$$

W, ρ , A, y t se expresan en miligramos, gramos por centímetro cúbico, centímetros cuadrados y horas.

En el segundo caso:

K=534, y las unidades de los otros parámetros son los mismos que para milímetros por año, excepto A que se expresa en pulgadas cuadradas. Para la

mayoría de las aplicaciones se acepta una velocidad de penetración de la corrosión inferior a 0.50 mm/a (20mpa).

Puesto que existe una corriente eléctrica asociada con las reacciones de corrosión electroquímicas, se puede expresar la velocidad de corrosión en función de esta corriente o, más específicamente, de la densidad de corriente; es decir, de la corriente por unidad de superficie de material corroído. La densidad de corriente se designa con la letra i . La velocidad r en $\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, se determina utilizando la expresión:

$$r = \frac{i}{n\mathfrak{S}} \quad \text{-----(1.9)}$$

donde:

n es el número de electrones asociados con la ionización de cada átomo metálico y

\mathfrak{S} es $96500 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$.

1.8.- Polarización.

La figura 1.10 muestra una pila electroquímica estándar Zn-H₂ en cortocircuito, de modo que la oxidación del zinc y la reducción del hidrógeno tienen lugar en sus respectivas superficies de electrodo. Los potenciales de los dos electrodos no tienen el mismo valor que el anotado en la Tabla 1.1 porque aquí, el sistema no está en equilibrio. La variación del valor de cada potencial de electrodo se denomina *polarización* y la magnitud de esta variación es el *sobrevoltaje*, normalmente representado por el símbolo η . El sobrevoltaje se expresa en términos de más o menos voltios (o milivoltios) respecto al potencial de equilibrio. Por ejemplo, supóngase que el electrodo de zinc en la figura 1.10 tiene un potencial de -0.621V después de conectarlo al electrodo de platino. El potencial de equilibrio es -0.763V (tabla 1.1) y, por lo tanto, $\eta = -0.621\text{V} - (-0.763\text{V}) = +0.142\text{V}$. Hay dos tipos de polarización, activación y de concentración; cuyos mecanismos se analizan a continuación porque controlan la velocidad de las reacciones electroquímicas.

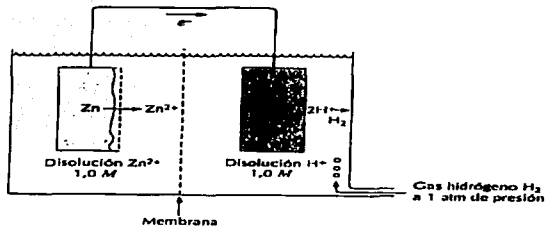
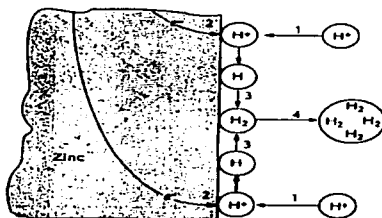


Figura 1.10 Pila electroquímica formada por electrodos de zinc e hidrógeno estándares que han sido cortocircuitados.

1.8.1.- Polarización por activación.

Todas las reacciones electroquímicas consisten en una serie de etapas que transcurren sucesivamente en la intercara *electrodo metálico-disolución electrolítica*. La polarización de activación se refiere a aquella condición en la que, la velocidad de la reacción está controlada por la etapa de la serie que transcurre a la velocidad más baja. El término *activación* se aplica a este tipo de polarización porque esta etapa más lenta, la que limita la velocidad, está relacionada con una barrera de energía de activación. A modo de ilustración, considérese la reducción de los iones hidrógeno para formar burbujas de gas hidrógeno en la superficie del electrodo de zinc (figura 1.11).

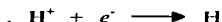


TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 1.11 Representación esquemática de las posibles etapas de la reacción de reducción del hidrógeno. La velocidad está controlada por polarización de activación.

Es verosímil considerar que esta reacción transcurre mediante la siguiente serie de etapas:

1. Adsorción en la superficie del zinc de iones H^+ de la disolución.
2. Transferencia de electrones del zinc al átomo de hidrógeno.



3. Combinación de dos átomos de hidrógeno para formar una molécula de hidrógeno.



4. Coalescencia de muchas moléculas de hidrógeno para formar una burbuja.

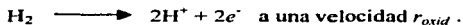
La más lenta de estas etapas determina la velocidad de la reacción global.

La relación entre el sobrevoltaje η_a y la velocidad de corriente i , en la polarización de activación, es: $\eta_a = \beta \log \frac{i}{i_0}$ -----(1.10), donde β e i_0 son constantes para cada semipila

particular. El parámetro i_0 se denomina *densidad de corriente de intercambio*, que merece una breve explicación. El equilibrio de alguna reacción de semipila es, a nivel atómico, realmente un estado dinámico. Es decir, los procesos de oxidación y de reducción están ocurriendo, pero ambos a la misma velocidad, de modo que no existe una reacción resultante. Por ejemplo, en la pila estándar de hidrógeno (figura 1.5) en la superficie del electrodo de platino, tiene lugar la reacción de los iones hidrógeno de la disolución:



parecido, el gas hidrógeno en la disolución experimenta oxidación:

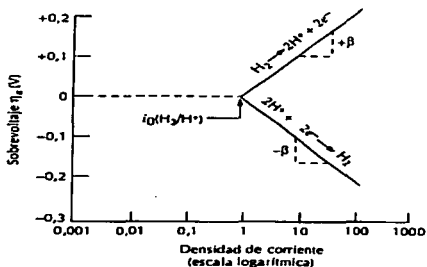


Existe equilibrio cuando $r_{red} = r_{oxid}$. La densidad de corriente de intercambio es la

densidad de corriente de la ecuación 1.9 en el equilibrio o: $r_{red} = r_{oxid} = \frac{i_0}{n\beta}$ -----(1.11).

La utilización del término *densidad de corriente* para i_0 es un tanto inexacto, ya que no existe una corriente resultante. Además, el valor de i_0 se determina experimentalmente y varía de un sistema a otro.

De acuerdo con la ecuación 1.10, al representar gráficamente el sobrepotaje en función del logaritmo de la densidad de corriente, resultan segmentos de rectas, como lo indica la figura 1.12 para el electrodo de hidrógeno. El segmento de línea con pendiente $+\beta$ corresponde a la semirreacción de oxidación, mientras que la línea con pendiente $-\beta$ es para la reducción. Es de destacar que ambos segmentos de línea tienen su origen en i_0 (H_2/H^+), la densidad de corriente de intercambio, y a sobrepotaje cero: es el punto en que el sistema está en equilibrio y no existe una reacción neta.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 1.12 Representación gráfica del sobrepotaje de la polarización de activación frente al logaritmo de la densidad de corriente para las reacciones de oxidación y de reducción del electrodo de hidrógeno.

1.8.2.- Polarización por concentración.

Existe polarización por concentración cuando la velocidad de reacción está limitada por la difusión en la disolución. Por ejemplo, considérese de nuevo la evolución del hidrógeno en la reacción de reducción. Cuando la velocidad de reacción es baja y/o la concentración de ión H^+ es alta, dentro de la disolución siempre existe un adecuado

suministro de iones hidrógeno a la región próxima a la intercara del electrodo (figura 1.13 a). Por el contrario, aparece una zona de agotamiento en la vecindad de la intercara cuando las velocidades de reacción son altas y/o las concentraciones de H^+ son bajas, puesto que los iones H^+ no llegan con suficiente velocidad para satisfacer la reacción (figura 1.13 b). De este modo, la difusión del H^+ en la intercara ejerce el control de la reacción y el sistema se dice que está polarizado por concentración. La polarización por concentración generalmente tiene lugar sólo en las reacciones de reducción, porque en la oxidación, existe un abastecimiento virtualmente ilimitado de átomos metálicos en la intercara del electrodo que se está corroyendo.

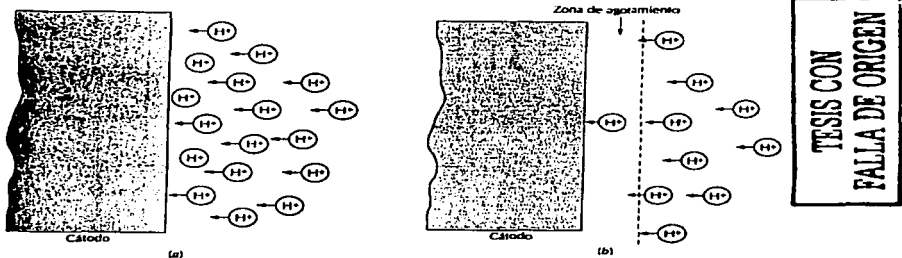


Figura 1.13 Representación esquemática de la distribución del H^+ en la vecindad del cátodo en la reducción del hidrógeno para (a) baja velocidad de reacción y/o alta concentración y (b) alta velocidad de reacción y/o baja concentración, donde se forma una zona de agotamiento debido a la polarización de concentración.

Los datos de polarización por concentración también se representan normalmente como sobrevoltaje frente al logaritmo de la densidad de corriente, como se indica en la figura 1.14. La expresión matemática que relaciona el sobrevoltaje de la polarización por

concentración, η_c , y la densidad de corriente, i , es: $\eta_c = \frac{2.3RT}{n\mathfrak{N}} \log\left(1 - \frac{i}{i_L}\right)$. De la figura

1.14 se deduce que el sobrepotencial es independiente de la densidad de corriente hasta que i se aproxima a i_L . En esta condición, η_c se decrece abruptamente en magnitud.

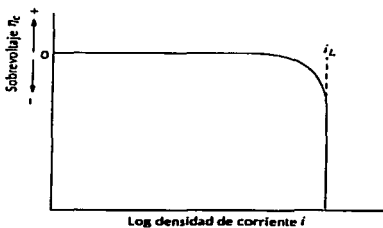
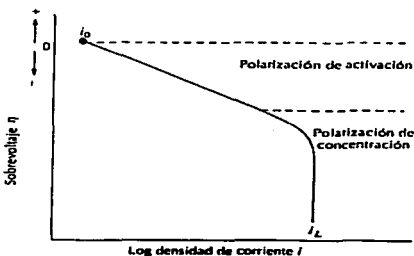


Figura 1.14 Representación gráfica del sobrepotencial frente al logaritmo de la densidad de corriente en las reacciones de reducción para polarización de concentración.

En las reacciones de reducción pueden existir polarización por concentración y polarización por activación. En estas circunstancias, el sobrepotencial total es la suma de ambas contribuciones al sobrepotencial. La figura 1.15 muestra esquemáticamente η frente a $\log i$.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

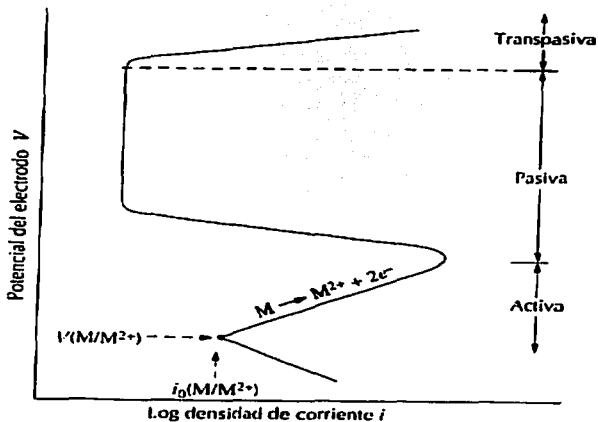
Figura 1.15 Representación gráfica del sobrepotencial frente al logaritmo de la densidad de corriente en las reacciones de reducciones para polarización combinada activación-concentración.

1.9.- Pasividad.

Algunos metales y aleaciones normalmente activos, en condiciones ambientales particulares, pierden la reactividad química y se convierten en extremadamente inertes. Este fenómeno, denominado *pasividad*, tiene lugar en el cromo, hierro, níquel, titanio y muchas de sus aleaciones. Este comportamiento pasivo resulta de la formación, en la superficie del metal, de una muy delgada película de óxido altamente adherida que actúa como barrera protectora contra una posterior corrosión. Los aceros inoxidables resisten a la corrosión en una gran variedad de ambientes como consecuencia de la pasivación. Contienen, como mínimo, un 11 % de cromo, que, como elemento aleante, forma una disolución sólida con el hierro, y minimiza la formación de herrumbre. En atmósferas oxidantes se forma una película superficial protectora.

El aluminio es altamente resistente a la corrosión en la mayoría de los ambientes porque también se pasiva. Si se estropea la película protectora, normalmente se rehace muy rápidamente. Sin embargo, un cambio en las características del ambiente (por ejemplo, alteración de la concentración de los agentes corrosivos) puede transformar un material pasivo en activo. Por consiguiente, el deterioro de una película pasiva preexistente puede causar un substancial incremento (tanto como 100 000 veces) en la velocidad de corrosión.

El fenómeno de la pasivación se explica en términos de las gráficas del potencial de polarización-log de la densidad de corriente, que ya se han discutido. Las gráficas de la polarización de un metal que se pasiva tienen la forma general mostrada en la figura 1.16. A potenciales relativamente bajos, dentro de la región *activa*, el comportamiento es lineal, como el de los metales normales. Incrementando el potencial de corrosión, la densidad de corriente desciende bruscamente a un valor muy bajo y permanece independiente del voltaje: es la denominada región *pasiva*. Finalmente, a valores de potencial más elevados, la densidad de corriente incrementa de nuevo con el aumento del potencial en la región *transpasiva*.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.16 Gráfica de polarización de un metal que presenta transición activa-pasiva.

La figura 1.17 ilustra cómo un metal puede experimentar comportamiento activo y pasivo dependiendo del medio corrosivo. En esta figura se incluye la curva de polarización de la oxidación en forma de S, de un metal Me con comportamiento activo-pasivo y, además, las gráficas de polarización de la reducción en dos disoluciones denominadas 1 y 2. La gráfica 1 y la gráfica de la polarización de la oxidación intersecan en el punto A, en la región activa, dando una densidad de corriente de corrosión i_c (A). La intersección de la gráfica 2 en el punto B, que está dentro de la región pasiva, y corresponde a la densidad de corriente i_c (B). La velocidad de corrosión del metal Me en la disolución 1 es mayor que en la disolución 2 ya que i_c (A) es mayor que i_c (B) y la velocidad es proporcional a la densidad de corriente de acuerdo con la

ecuación 1.9. La diferencia de velocidades de corrosión de las dos disoluciones puede ser muy importante considerando que la escala de la densidad de corriente en la figura 1.17 es una escala logarítmica.

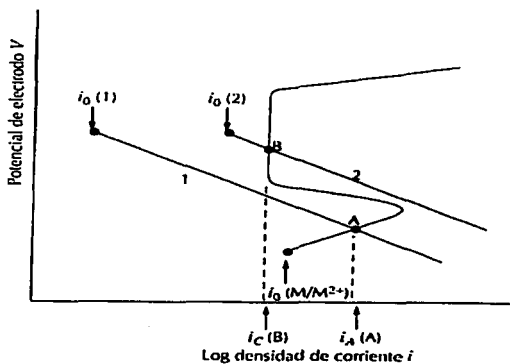


Figura 1.17 Demostración de cómo un metal activo-pasivo puede exhibir ambos comportamientos corrosivos.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 2

OCHO FORMAS BÁSICAS DE CORROSIÓN.

Conviene clasificar la corrosión según el modo en que ésta se manifiesta. En forma frecuente la corrosión metálica se clasifica en ocho formas básicas, a saber: uniforme, galvánica, por aireación diferencial, picaduras, intergranular, selectiva, erosión y corrosión bajo esfuerzo. A continuación se discuten las causas y procedimientos para prevenir cada una de estas formas de corrosión.

2.1.1.- Ataque uniforme.

El ataque uniforme es una forma de corrosión electroquímica que ocurre con igual intensidad en toda la superficie expuesta y suele producir herrumbre o depósito. A nivel microscópico, las reacciones de oxidación y de reducción tienen lugar al azar sobre la superficie metálica. Algunos ejemplos familiares son la herrumbre del acero y del hierro y el deslustrado de la vajilla de plata. Esta es probablemente la forma más común de corrosión y también la menos molesta porque se puede predecir y paliar con relativa facilidad. Este tipo de corrosión se explicó detalladamente en la Sección 1.1.

2.1.2.- Corrosión galvánica.

La corrosión galvánica ocurre al unir eléctricamente dos metales o aleaciones, que tienen distinta composición, mientras están expuestos en un electrolito. Este es el tipo de corrosión o disolución que se describió en la Sección 1.5. El metal menos noble o el más activo experimenta corrosión en un ambiente particular; el metal inerte, el cátodo, queda protegido de la corrosión. Por ejemplo, los tornillos de acero se corroen en contacto con latón en un ambiente marino; o si un tubo de cobre se une con un tubo de acero en un calentador de agua doméstico, el acero se corroe en la vecindad de la unión. Según la naturaleza de la disolución, aparecen una o más reacciones de reducción que ocurren en la superficie del material catódico. La figura 2.1 es una fotografía que muestra la corrosión galvánica.

La serie galvánica (tabla 2.1) indica la reactividad relativa, en agua de mar, de varios metales y aleaciones. Al conectar dos aleaciones sumergidas en agua de mar, la situada en la posición más baja de la serie experimenta corrosión. Algunas aleaciones de la tabla 2.1 están agrupadas en corchetes. Las aleaciones de estos grupos tienen generalmente el mismo metal base, y hay poco riesgo de corrosión al conectar dos aleaciones del mismo grupo. También cabe destacar que algunas aleaciones están tabuladas dos veces, como por ejemplo el níquel y el acero inoxidable: en estado activo y en estado pasivo.

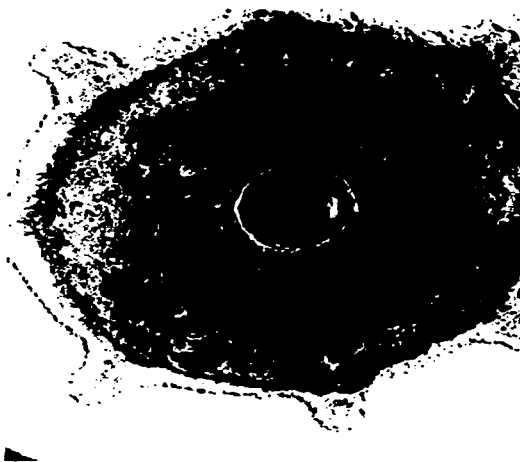
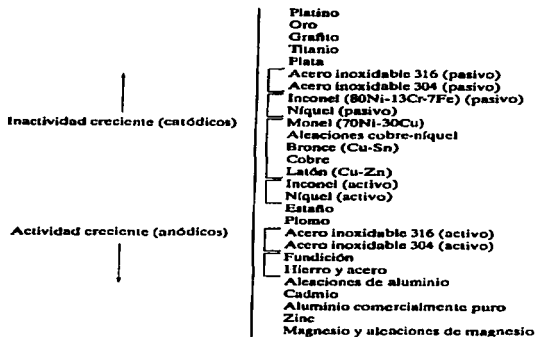


Figura 2.1 Corrosión galvánica del magnesio moldeado alrededor de un núcleo de acero.

La velocidad del ataque galvánico depende la relación de las áreas del ánodo y del cátodo expuestas al electrolito, y es directamente proporcional a dicha relación de áreas; esto es, para una determinada área catódica, un ánodo muy pequeño se corroe más rápidamente

que un ánodo grande, ya que la velocidad de corrosión depende más de la densidad de corriente que de la simple intensidad.

Tabla 2.1. La serie galvánica.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

La corrosión galvánica se reduce significativamente tomando las siguientes precauciones:

1. Si hay que unir dos metales distintos, escoja dos que estén situados en la serie galvánica en posiciones próximas.
2. Evite una relación de áreas ánodo-cátodo desfavorable; utilice un área anódica tan grande como sea posible.
3. Aísle eléctricamente los metales distintos.
4. Conecte eléctricamente un tercer metal anódico a los otros dos: así se consigue protección catódica.

2.1.3.- Corrosión por aireación diferencial.

La corrosión electroquímica también tiene lugar cuando la concentración de iones o de gases disueltos en la disolución electrolítica es diferente de la concentración que se da entre dos regiones de la misma pieza metálica. Así se forma una *pila de concentración* y la corrosión ocurre en los sitios de menor concentración. Un buen ejemplo de este tipo de corrosión tiene lugar en grietas y rendijas o debajo de depósitos de suciedad o de productos de corrosión, donde la disolución permanece estancada y existe un empobrecimiento localizado del oxígeno disuelto. La corrosión ocurre con frecuencia en estas zonas y se denomina *corrosión por aireación diferencial* (figura 2.2).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.2 Corrosión por aireación diferencial ocurrida en las zonas que han estado cubiertas por arandelas en una lámina sumergida en agua de mar.

La rendija debe ser grande para que la disolución pueda penetrar, no obstante suficientemente estrecha para que exista estanquidad; generalmente la anchura es de varias milésimas de pulgada.

El mecanismo propuesto para la corrosión por aireación diferencial está esquematizado en la figura 2.3. Una vez consumido el oxígeno dentro de la rendija, ocurre la oxidación del metal en esta posición. Los electrones procedentes de esta reacción electroquímica se desplazan a través del metal hasta la región externa vecina, donde intervienen en una reducción (véase Sección 1.2). En muchos ambientes acuosos, la disolución dentro de la rendija tiene una alta concentración de iones H^+ y Cl^- , que son especialmente corrosivos.

Muchas aleaciones que se pasivan son susceptibles de experimentar corrosión por aireación diferencial porque la película protectora a menudo se destruye mediante los iones H^+ y Cl^- .

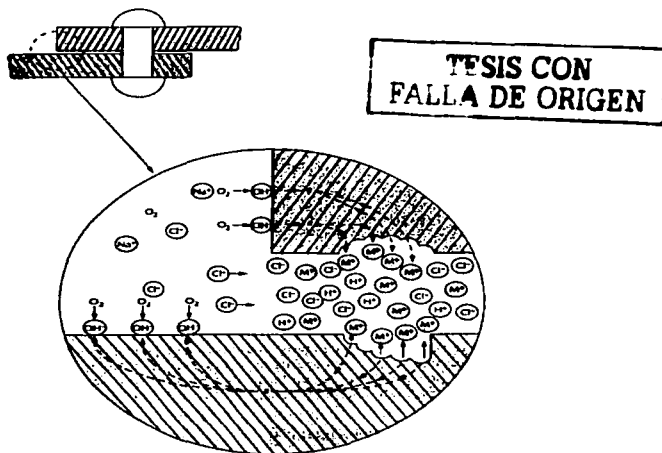


Figura 2.3 Ilustración esquemática del mecanismo de la corrosión por aireación diferencial entre dos láminas atornilladas

La corrosión por aireación diferencial se previene utilizando las uniones soldadas en lugar de las uniones atornilladas o por remachado, utilizando juntas no absorbentes cuando es posible, eliminando frecuentemente los depósitos acumulados y diseñando recipientes sin áreas estancas y que aseguren un completo drenaje.

2.1.4.- Picaduras.

La *picadura* es otra forma de ataque corrosivo muy localizado, que forma agujeros o pequeños hoyos. Corrientemente, las picaduras penetran desde la superficie horizontal hacia el interior en dirección casi perpendicular. Es un tipo de corrosión extremadamente insidioso ya que muchas veces es indetectable, con muy poca pérdida de material, hasta que ocurre una falla. La figura 2.4 muestra un ejemplo de corrosión por picadura.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.4 Picaduras en una lámina de acero inoxidable 304 que ha estado sumergida en una disolución de ácido clorhídrico diluido.

El mecanismo de la corrosión por picadura se parece al de la corrosión por aireación diferencial, porque la corrosión transcurre dentro de la picadura, con la reducción complementaria en la superficie. Se supone que la gravedad es la causante del crecimiento hacia abajo de la picadura, la disolución se concentra dentro de la picadura a medida que ésta progresa hacia abajo. La picadura se inicia en un defecto superficial localizado, como una pequeña grieta o una ligera modificación de la composición. Se ha observado que las muestras con superficies pulidas presentan gran resistencia a la corrosión por picaduras. A veces los aceros inoxidables presentan susceptibilidad a la corrosión por picaduras; sin

embargo, la resistencia a este tipo de corrosión aumenta significativamente aleándolos con un 2% de molibdeno.

2.1.5.- Corrosión intergranular.

Como su nombre lo indica, la *corrosión intergranular* ocurre preferentemente a lo largo de los límites de grano de algunas aleaciones en ambientes específicos y, como consecuencia, la muestra se desintegra a lo largo de los límites de grano. Este tipo de corrosión predomina en algunos aceros inoxidable, que, cuando se calientan a temperaturas comprendidas entre los 500 y los 800 °C durante períodos suficientemente largos, se sensibilizan para el ataque intergranular. Se cree que este calentamiento permite la formación de pequeñas partículas de precipitados de carburo de cromo (Cr_{23}C_6) por reacción entre el cromo y el carbono en el acero inoxidable. Estas partículas, como ilustra la figura 2.5, se forman a lo largo de los límites de grano. El cromo y el carbono difunden hacia los límites de grano para formar los precipitados y dejan regiones vecinas al límite de grano empobrecidas en cromo; es decir, regiones altamente susceptibles de corroerse.

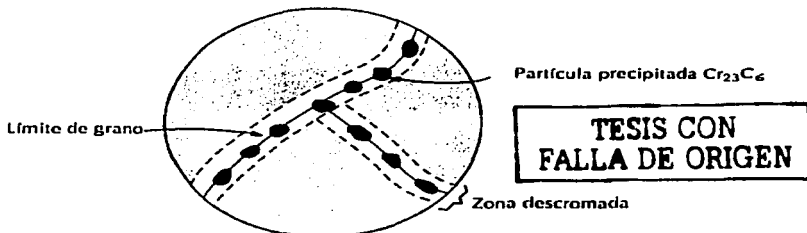


Figura 2.5 Ilustración esquemática de partículas de carburo de cromo precipitadas a lo largo de límites de grano del acero inoxidable y las zonas vecinas descromadas.

En la soldadura del acero inoxidable, la corrosión intergranular se convierte en un problema grave, denominado *sensibilización por soldadura*. La figura 2.6 muestra este tipo de corrosión intergranular.

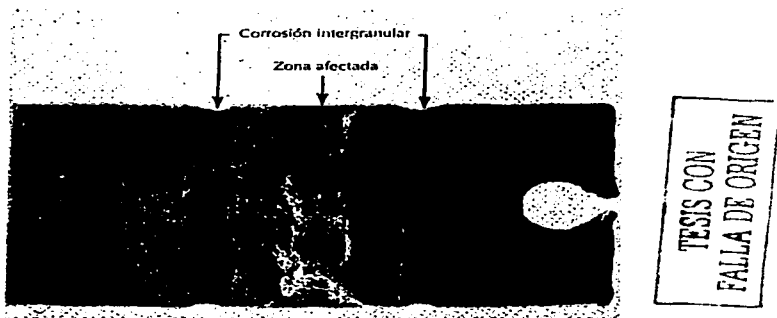


Figura 2.6 Zona afectada por el calor en un acero inoxidable. Paralelamente al cordón de soldadura se han formado surcos en el material sensibilizado por el calor de la soldadura.

La prevención de la corrosión intergranular del acero inoxidable se realiza con las siguientes medidas:

1. Sometiendo el material sensibilizado a un tratamiento térmico a elevada temperatura con fin de disolver el cromo y enfriando rápidamente.
2. Ajustando el contenido de carbono por debajo del 0.03% en peso para minimizar la formación del carburo.
3. Aleando el acero inoxidable con elementos, tales como el niobio o el titanio, que tengan mayor tendencia a formar carburos que el cromo, de modo que el Cr permanezca en disolución sólida.

2.1.6.- Disolución selectiva.

La *disolución selectiva* ocurre al eliminar preferentemente un elemento de una aleación sólida monofásica por un proceso corrosivo. El ejemplo más común es el deszincado del latón amarillo, que consiste en la eliminación selectiva del zinc que está aleado con cobre. Las propiedades mecánicas de la aleación empeoran significativamente ya que en la zona deszincada queda una masa de cobre poroso. El color del material cambia del amarillo al color rojo del cobre. La eliminación selectiva también tiene lugar en otras aleaciones, ya que el aluminio, el hierro, el cobalto, el cromo y otros elementos son susceptibles de disolución selectiva.

2.1.7.- Corrosión por erosión.

Al combinar la acción del ataque químico y la abrasión mecánica o el desgaste, como consecuencia del movimiento de un fluido, se origina la *corrosión por erosión*. Potencialmente, todas las aleaciones metálicas son susceptibles de experimentar corrosión por erosión en mayor o menor grado. Este tipo de corrosión perjudica especialmente a las aleaciones que se pasivan formando una película superficial protectora; la acción abrasiva puede erosionar la película dejando al descubierto la superficie metálica. Si la película protectora no es capaz de autogenerarse continua y rápidamente, la corrosión puede ser severa. Los metales blandos, tales como el cobre y el plomo, también son susceptibles de corrosión por erosión. Corrientemente se identifica por la aparición en la superficie metálica de surcos y ondas con contornos característicos de la corriente del fluido.

La naturaleza del fluido influye decisivamente en el comportamiento corrosivo. Normalmente un aumento en la velocidad del fluido se traduce en un aumento de la velocidad de corrosión. Además, una disolución incrementa el carácter erosivo si contiene burbujas o partículas sólidas en suspensión.

La corrosión por erosión se suele presentar en tuberías, especialmente en codos, ángulos y cambios bruscos de diámetro: posiciones donde el fluido cambia de dirección y suele convertirse en turbulento. Hélices, alabes de turbina, válvulas y bombas, corren riesgo de

experimentar este tipo de corrosión. La figura 2.7 ilustra acerca de la corrosión por erosión producida en un codo.



Figura 2.7 Fallo por erosión en un codo que formaba parte de un sistema de condensación de vapor.

Un procedimiento para paliar la corrosión por erosión consiste en cambiar el diseño para eliminar los efectos de turbulencia. También existen materiales con elevada resistencia a la corrosión por erosión. Además, eliminando las partículas y las burbujas de la disolución, disminuye la posibilidad erosiva.

2.1.8.- Corrosión bajo esfuerzos.

La acción combinada de un esfuerzo de tensión aplicado y de un ambiente corrosivo produce *corrosión bajo esfuerzos*; ambos factores son necesarios. Algunos materiales potencialmente inertes en un medio corrosivo particular pueden experimentar este tipo de corrosión al aplicarles un esfuerzo. Se forman pequeñas grietas que luego se propagan en dirección perpendicular al esfuerzo (figura 2.8) y, como consecuencia puede aparecer un

fallo. La apariencia del fallo es el característico de los materiales frágiles, aunque la aleación metálica que experimenta esta corrosión sea intrínsecamente dúctil. Además, la magnitud del esfuerzo aplicado puede ser significativamente inferior a la resistencia a la tracción. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a la corrosión bajo tensiones en determinados ambientes, especialmente con moderados niveles de esfuerzos. Por ejemplo, la mayoría de los aceros inoxidables se corroen en disoluciones con cloruros, mientras que los latones son vulnerables al ponerlos en contacto con el amoníaco. La figura 2.9 muestra una corrosión bajo tensiones intergranular de un latón.

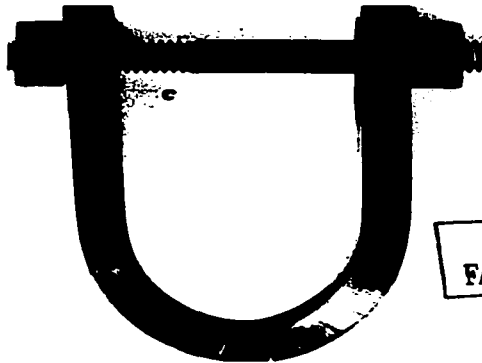


Figura 2.8 Fotografía mostrando una barra de acero doblada en forma de "herradura de caballo" mediante un conjunto de tornillos y tuercas. Mientras permaneció sumergida en agua de mar aparecieron grietas debido a la corrosión bajo esfuerzos en la zona donde el esfuerzo de tensión es mayor.

El esfuerzo que genera la corrosión no necesita ser aplicado externamente, sino que puede ser residual, resultado de un cambio súbito de temperatura y su posterior contracción o, en el caso de aleaciones bifásicas, resultado de distintos coeficientes de dilatación.

Además, los productos de corrosión sólidos o gaseosos atrapados internamente pueden causar tensiones internas.

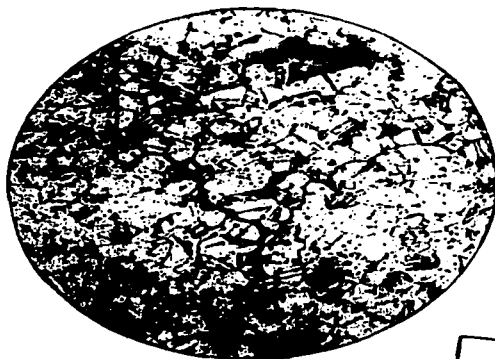


Figura 2.9 Fotomicrografía mostrando corrosión bajo tensiones intergranular de un latón.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Disminuyendo la magnitud del esfuerzo aplicado se elimina total o parcialmente esta forma de corrosión. Además, mediante un apropiado recocido se eliminan esfuerzos residuales internos.

2.2.- Métodos anticorrosivos.

Como resultado de las experiencias acumuladas y el estudio de los mecanismos mediante los que se produce la corrosión, se han desarrollado métodos apropiados para impedirla o reducirla. A continuación, se presentan algunos de ellos:

2.2.1.- Selección del metal.

Uno de los métodos más sencillos para el mejoramiento de la resistencia a la corrosión, es el empleo de un metal o una aleación que sea más resistente a ella. Aunque este procedimiento puede hacer que sean más altos los costos iniciales, no deben pasarse por alto los ahorros resultantes de los costos más bajos de mantenimiento y sustitución.

Las predicciones relativas a la resistencia específica a la corrosión en un medio ambiente particular, son arriesgadas. Afortunadamente, hay numerosas referencias que indican los resultados de muchas investigaciones sobre el comportamiento de corrosión. Algunas de ellas, incluidas en los siguientes y últimos apartados de este capítulo, pueden proporcionar la información específica que se necesite o, por lo menos, una indicación general sobre lo que puede esperarse.

2.2.2.- Recubrimientos orgánicos.

Se utilizan comúnmente para mejorar la resistencia a la corrosión. La expresión *recubrimientos orgánicos* incluye las películas orgánicas, tales como pinturas, resinas, barnices, grasa, placas adhesivas de material plástico, y otros materiales similares. Aunque algunos de los recubrimientos orgánicos, como las pinturas, tienen probabilidades de contener materiales inorgánicos, el material predominante es orgánico. La calidad de esos recubrimientos puede mejorarse, o reducirse el costo, mediante el uso de rellenos inorgánicos; sin embargo, básicamente, la protección se proporciona mediante la exclusión de la humedad, el aire y otros medios corrosivos. Puesto que los recubrimientos son orgánicos, se descomponen a temperaturas elevadas. Dichos recubrimientos se recomiendan principalmente para usarse a temperaturas inferiores a la de ebullición del agua.

2.2.3.- Recubrimientos inorgánicos.

Incluyen materiales de cerámica, tales como los vidriados. Buenos ejemplos son los utensilios de cocina esmaltados, las tinas del baño y los lavabos. Esas cubiertas son eficaces a causa de la exclusión de medios corrosivos. Resisten temperaturas muy por

encima de las que provocan que los recubrimientos orgánicos pierdan su eficiencia. Aunque los recubrimientos inorgánicos son duros y resistentes al desgaste, son frágiles y se encuentran sujetos a daños causados por los choques térmicos.

2.2.4.- Recubrimientos metálicos.

Se utilizan para protección contra los daños estructurales superficiales o para mejorar la apariencia. Se aplican por medio de muchas técnicas, que incluyen la electrodeposición, la inmersión, la aspersión con metales fundidos atomizados o pulverizados, y la reacción con metales en polvo que lo rodean, a temperaturas elevadas. A veces se logra una protección, debido a que el recubrimiento metálico es más resistente al efecto del medio ambiente que el material básico. El estaño aplicado al acero proporciona una protección de este tipo. Puesto que el acero es anódico con respecto al estaño, la eficiencia del recubrimiento sólo es válida mientras la capa es continua. Si se desarrolla un orificio diminuto o se la superficie tiene raspaduras, se acelera la corrosión del acero. La razón desfavorable de la superficie anódica a la catódica, hace aumentar la gravedad de la perforación de la capa de estaño. A ciertos tipos de recipientes se les aplican recubrimientos resinosos, para completar o reemplazar el recubrimiento de estaño sobre el acero.

En otras aplicaciones, se selecciona un recubrimiento anódico con respecto al metal básico. Es este procedimiento, el metal básico catódico se protege y al método se le llama *protección catódica*. En tanto queda algo del recubrimiento anódico, se tiene cierta protección. Los defectos en el recubrimiento anódico no son graves, debido a que la razón del área del ánodo a la del cátodo es favorable. Un ejemplo de este tipo de recubrimiento es el zinc aplicado al alambre de acero para cercas o a las láminas de acero, para producir acero galvanizado.

2.2.5.- Recubrimientos chapeados de alta calidad. Estos se utilizan a veces para mejorar la resistencia a la corrosión bajo esfuerzo; pero deben seleccionarse y aplicarse cuidadosamente. Los recubrimientos anódicos con respecto al metal básico tienen las

mayores probabilidades de provocar dificultades, debido al peligro que representan los defectos mínimos en los recubrimientos, con la aceleración asociada de la corrosión. Con frecuencia se acumula hidrógeno en el metal chapeado o en el bifásico, como resultado de la limpieza con ácidos antes de la deposición del recubrimiento metálico, lo cual constituye una causa de dificultades en ciertos tipos de recubrimientos. Los metales depositados como recubrimientos en ciertos baños pueden desarrollar grandes esfuerzos residuales de tensión, que son perjudiciales tanto para la resistencia a la fatiga como para la resistencia a la corrosión bajo esfuerzo.

2.2.6.- Inhibidores.

Los inhibidores son productos químicos que, al añadirse a los medios corrosivos, los vuelven inertes o que, cuando se aplican a la superficie de un metal, reaccionan para producir pasivación. Si se añaden cantidades insuficientes de inhibidores, de tal modo que el sistema esté sólo parcialmente protegido, es probable que la corrosión se intensifique y pueden resultar picaduras y daños graves. Esta dificultad puede superarse, ajustando la concentración del inhibidor utilizado.

Los aceites solubles añadidos a los sistemas de enfriamiento de los automóviles forman emulsiones de aceite y agua, que depositan una película aceitosa por toda la superficie del sistema. Debido a la carga que llevan, las partículas de aceite son atraídas hacia las zonas anódicas, que es donde son más necesarias.

Otros inhibidores parecen tener eficacia al retrasar ya sea la reacción catódica o la anódica. Por ejemplo, el fosfato de sodio es eficaz para proteger al acero contra el ataque del agua, provocando la formación de una película adhesiva y pasiva de Fe_2O_3 en el ánodo. En el agua debe haber suficiente oxígeno presente para que el fosfato de sodio sea eficaz. En algunos casos, ciertos aniones complejos se fijan firmemente al ánodo, formando, en efecto, una película pasiva. Otros inhibidores dan buenos resultados, porque forman una película catódica a través de la no fluyen con facilidad los electrones y el oxígeno, de modo que se retardan las reacciones catódicas.

2.2.7.- Tratamientos superficiales especiales.

Estos tiene el fin de evitar la corrosión por esfuerzo. Estos tratamientos deben incluir operaciones de nitruración y trabajos en frío, como el martillado o el laminado en frío. Se producen así esfuerzos residuales y superficiales de compresión, que deben vencerse antes de que pueda producirse una corrosión.

2.2.8.- Protección catódica.

Se logra cuando una estructura metálica que normalmente sería atacada, se hace catódica, haciendo pasar por ella una corriente inversa. La electricidad puede provenir de cualquier fuente de cd, como un generador, un rectificador o una celda galvánica. Los principios de la protección catódica se aplican a las estructuras subterráneas, tales como tuberías, tanques de almacenamiento y cimientos estructurales. Como se muestra en la figura 2.10, se utilizan rectificadores y generadores, así como también ánodos enterrados de zinc, aluminio o magnesio. La protección catódica se usa también para proteger las superficies internas de los depósitos de almacenamiento de agua y los condensadores. Muchos calentadores domésticos de agua van equipados con varillas consumibles de magnesio o zinc, suspendidas en el depósito.

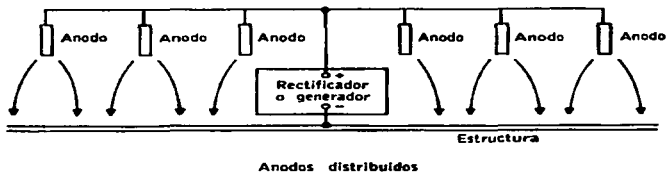


Figura 2.10 Ánodos de drenaje forzados y distribuidos, para la protección de estructuras subterráneas.

Estos metales se disuelven selectivamente, proporcionando protección para cualquier superficie expuesta de acero. La prevención de la corrosión de los cascos, el timón, las hélices y los cigüeñales de los barcos, se lleva a cabo por medio de ánodos de zinc o magnesio que se colocan en el casco, cerca de los tornillos. Sin esos ánodos, las porciones de acero del barco serían anódicas con respecto a los tornillos de latón. La fijación de los ánodos hace que el acero sea catódico, lo cual le da protección. (Ver figura 2.11) Asimismo, se logra la protección del casco mediante la utilización de fuentes apropiadas de cd.

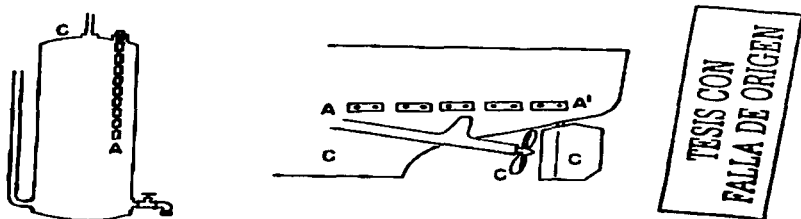


Figura 2.11 (a) Se suspenden varillas de zinc o magnesio en los depósitos de agua, para evitar la corrosión. El zinc o el magnesio se convierten en el ánodo A, y el depósito se vuelve el cátodo C. De A a C fluyen electrones por el interior de la estructura metálica, mientras que el ánodo se disuelve selectivamente. (b) Una línea de barras anódicas de zinc o magnesio, AA', fija al casco de un barco, hace a éste y a la pala del timón catódicos. Sin las barras anódicas, el casco y la pala del timón serían anódicas con respecto a los tornillos y remaches, y sufrirían corrosión. Los ánodos se sacrifican deliberadamente, para proteger partes esenciales de la estructura. Es necesario una sustitución periódica

2.2.9.- Aire acondicionado.

Se usa el aire acondicionado para retrasar o evitar la corrosión. El aire acondicionado se hizo popular para proteger los barcos *mothballed*, después de la Segunda Guerra Mundial y la Guerra de Corea. Esta técnica de preservación implica el sellado de los espacios que contienen el equipo que deben protegerse, seguido por la eliminación de la mayor parte de la humedad del aire. Este método es eficaz, debido a que el aire *seco*, a las temperaturas atmosféricas, no provoca la corrosión de los metales y las aleaciones estructurales comunes.

2.3 Pruebas de corrosión.

No es necesario realizar una prueba de corrosión en un material cada vez que se encuentra éste en un nuevo ambiente, o realizar dicha prueba en el lugar donde es encontrado el material de construcción. Existen extensos datos sobre las características de corrosión de todos los materiales en todos los ambientes. Una tabulación típica de datos de corrosión se muestra en la figura 2.12. Datos similares están ahora disponibles en bases de datos computarizados. Para usar estos datos, el diseñador establece la naturaleza química del elemento corrosivo y su concentración, temperatura, y otra información pertinente, como la aireación y el estado de esfuerzo. La reacción de varios metales a este ambiente específico puede obtenerse entonces de los datos de corrosión estudiados. Tome el ejemplo del ácido acético; los círculos oscuros muestran bajos índices de corrosión. Se puede ver que los metales que se listaron sólo tienen bajos índices de corrosión en condiciones de operación limitadas.

Es típico presentar los índices de corrosión en unidades de superficie removida o penetración por unidad de tiempo. Estas unidades pueden ser milipulgadas por año (mpy), milímetros por año (mmpy), micrómetros por año (μ mpy), o miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd). Las unidades de penetración por unidad de tiempo, pueden ser particularmente favorables para ser usadas en la determinación de vida de servicio útil del componente de un equipo. Si está determinado que un recipiente tendrá una velocidad de corrosión de un milímetro por año (mmpy), y el espesor de pared es de 10 mm y el mínimo de espesor de pared requerido para operación bajo esfuerzos es de 5 mm, esto significa que la vida del recipiente puede ser de 5 años. Esta es una práctica común para calcular el espesor de la pared del recipiente cada año con las medidas ultrasónicas de espesor, y así, puede verificarse la predicción de la velocidad de corrosión.

Si los datos de corrosión existentes no se aplican a un material y ambiente en particular, pueden justificarse las pruebas de corrosión de laboratorio. Muchos de los datos existentes se obtuvieron por pruebas de inmersión relativamente simples, como se

muestra en las figuras 2.13 y 2.14. La prueba de inmersión simple en un vaso de precipitados es una prueba usada ampliamente en pruebas de corrosión localizada y

Corrosivos	Carpenter 20Cb-3	Tipo 316 18-8 Mo	Tipo 304 18-8	Tipo 430 17% Cr.	Tipo 410 17% Cr.
Acido acético aerado 7.12	●	○	○	○	○
Acido acético no aerado	●	○	○	○	○
Acido acético vaporizado	○	○	○	○	○
Anhidrido acético en solu- ción 4.7.8	○	○	○	○	○
Acetona 4	○	○	○	○	○
Cloruro de aluminio 8.13	○	○	○	○	○
Sulfato potásico de aluminio	○	○	○	○	○
Sulfato de aluminio	○	○	○	○	○
Carbonato de amonio	○	○	○	○	○

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

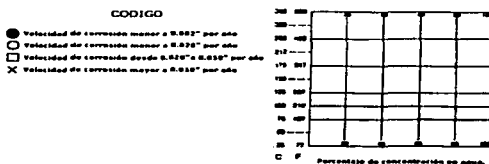
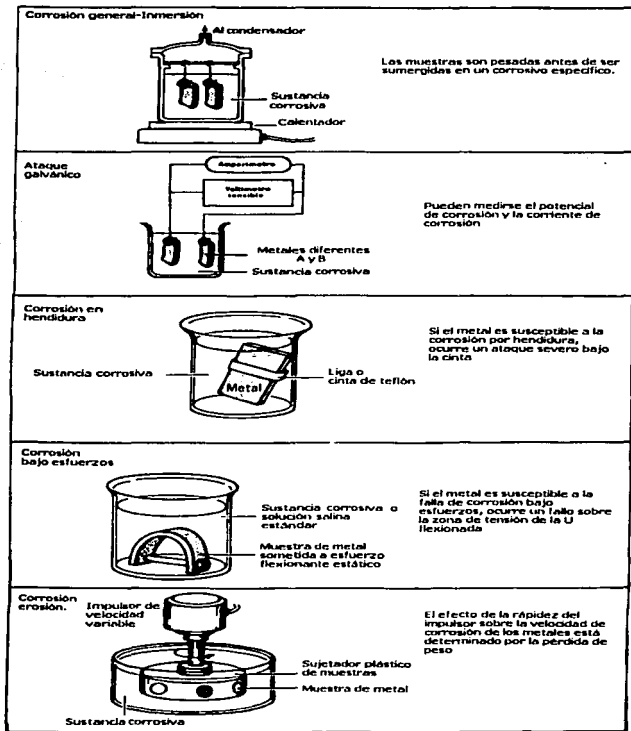


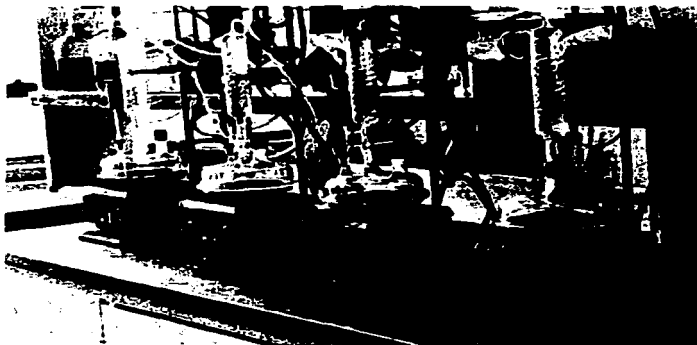
Figura 2.12 Datos típicos de corrosión. (Cortesía de National Association of Corrosión Engineers.)



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.13 Técnicas de laboratorio para pruebas de corrosión.

constante. La susceptibilidad al ataque galvánico puede calcularse por dispositivos electrónicos que miden el potencial de corrosión y la corriente. Una prueba fácil para la susceptibilidad a la corrosión en hendiduras es poner una liga de hule a la muestra y sumergirla. La liga simula una hendidura. Hay muchas pruebas para corrosión bajo esfuerzo; puede usarse cualquier técnica que imponga un esfuerzo de tensión en la muestra. La prueba final mostrada en la figura 2.13 es una técnica para precisar el efecto de la velocidad del fluido sobre la corrosión. Pueden colocarse partículas abrasivas en el fluido y determinar el comportamiento de la corrosión.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.14 Pruebas de corrosión por inmersión.

Además de estos ensayos de laboratorio, hay muchas técnicas y dispositivos para realizar pruebas de corrosión en el lugar de los hechos (in situ). Existen dispositivos inteligentes para medir electrónicamente la velocidad de corrosión en los ambientes de la producción de corrosivos. Cierta dispositivo es una sonda de alambre que se inserta en un recipiente o tubería, cuando el alambre se corroe, se incrementa su resistencia. La revisión periódica con un dispositivo resistencia-verificación produce una velocidad de la corrosión. El alambre esta hecho del material de interés. Dispositivos electrónicos miden la erosión y el

desgaste de pared. Así, puede usarse un programa para computadora donde estén involucrados técnicas y dispositivos para supervisar las características de la corrosión. Una limitación de muchos de estos dispositivos y ensayos de laboratorio es que puede tomar semanas, meses, o incluso años para conseguir los datos deseados de la velocidad de corrosión. Esto es cierto especialmente para los aceros inoxidable y otros materiales resistentes a la corrosión. Una técnica popular actualmente usada por ingenieros de la corrosión es el estudio de la polarización. Esta técnica, normalmente produce los datos de corrosión en cuestión de horas.

Ya que la corrosión es electroquímica en naturaleza, pueden usarse las técnicas eléctricas para supervisar la corrosión. Las probetas del material de interés constituyen el ánodo en una celda electroquímica especial, y puede obtenerse la *huella digital* de un metal particular en un ambiente específico, mediante el monitoreo electrónico de la corriente de corrosión, ya que el potencial de celda es variable dependiendo el caso. Estas pruebas se llaman *estudios de polarización*.

La figura 2.15 es una ilustración de un método de polarización y los tipos de datos que se generan en la polarización del ánodo. Estas técnicas se describen con detalle en las especificaciones ASTM G5 y G61, pero esencialmente, estas especificaciones involucran desde la fabricación de un alfiler muy pequeño hasta los materiales propuestos. El alfiler se coloca en un soporte especial, y se instala en un recipiente de vidrio que contenga la celda de la solución de interés. Otros dos electrodos se introducen en la celda, y se conectan a las fuentes de energía e instrumentación necesarios. Los *Potencioestatos* que se controlan por computadora están comercialmente disponibles y la corrosión experimentada puede programarse también en la computadora. El experimento se concluirá en aproximadamente una hora, incluyendo el trazado gráfico de datos, y hará cálculos sobre cuestiones tales como la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión. La determinación de las velocidades de corrosión por pruebas de inmersión simple, comúnmente toma 30 días como mínimo.

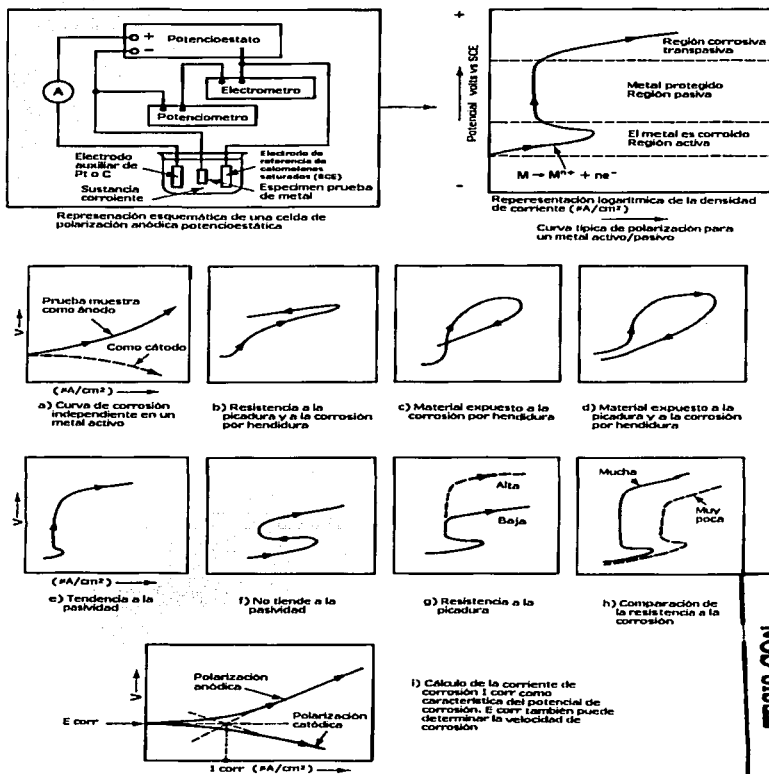
La polarización maneja la oxidación o la reacción de reducción del espécimen de un metal, esencialmente a través de la aplicación de un voltaje relativo a un electrodo de referencia. Existen dos electrodos de referencia común, a saber: el electrodo de *calomelanos saturados* (cloruro mercurioso) y el de gas de hidrógeno-platino. Se dice que el espécimen se polariza si el potencial del espécimen se mueve desde el potencial de corrosión a través de la aplicación de corriente. Si el potencial es el electrodo positivo al potencial de corrosión, el espécimen está siendo anódicamente polarizado y la reacción de la oxidación está ocurriendo en la superficie del espécimen. La aplicación de una corriente que hace el potencial de electrodo negativo al potencial de corrosión catódica polariza la superficie del espécimen, manejando de este modo la reacción de reducción; el espécimen es protegido. Se usan las porciones lineales de estas curvas para determinar la corriente de corrosión que puede convertirse a su vez a una velocidad de corrosión (figura 2.15i).

Se usan dos tipos principales de técnicas para estudiar las características de la corrosión, a saber: 1) La corriente de la corrosión se varía en varios decenios y el potencial de la muestra con respecto al electrodo de referencia se graba continuamente: esto es la polarización *potencioestática*.

2) El potencial con respecto al electrodo de referencia se varía en un rango predeterminado y la corriente de corrosión se graba continuamente: es la polarización *potenciodinámica*.

Ambas técnicas producen curvas que pueden interpretarse para reducir los tipos de factores de corrosión listadas en la figura 2.15.

El punto importante de esta discusión es que, el material a utilizar debería emplear los datos publicados sobre las características de la corrosión para ayudar a la selección del material: pero si los datos apropiados no están disponibles, que es a menudo el caso, pueden usarse técnicas sofisticadas de laboratorio para proteger los materiales propuestos y así desarrollar la información pertinente de la velocidad de corrosión. Pueden



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.15 Disposición esquemática de una polarización potencioestática (ASTM G5). Las figuras de la (a) a la (i) son ejemplos de contornos de curvas que son obtenidas y su interpretación.

usarse las técnicas de polarización electroquímica para determinar la velocidad de corrosión de un metal en una solución en particular, los efectos de la temperatura sobre los procesos de corrosión, la cinética o mecanismos de los procesos de corrosión, la pasividad de un metal en una solución, e incluso los parámetros eléctricos que deben usarse al proteger catódicamente a un metal de la corrosión en un ambiente. La polarización es la única de las condiciones, como técnica avanzada, para tratar con los procesos de corrosión.

CAPITULO 3.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO.

En el presente capítulo se tratan los pormenores relacionados con el diseño y la construcción del dispositivo mecánico, en donde es preciso mencionar que la idea de construir dicho dispositivo, surge al observar el funcionamiento del dispositivo mostrado en la figura 2.13. Por lo tanto se habrá de implementar dicho sistema al dispositivo mecánico a construir.

De esta forma, el objetivo principal de este trabajo es el de contribuir con la docencia y mostrar que se puede apoyar a los laboratorios de IME con dispositivos como el que se va a construir, utilizando las herramientas y recursos afines que la institución puede ofrecer. Cumplir con dicho objetivo en esta tesis, es también cumplir con la necesidad de ofrecer una alternativa más para posteriores investigaciones y pruebas de laboratorio en este dispositivo mecánico, desde luego, trabajo de investigación por parte de los alumnos que pueda crear un banco de datos aún no existente con respecto a pruebas en corrosión - erosión. Es importante hacer notar que en el campo de pruebas de laboratorio en corrosión-erosión de metales, todavía no están normalizadas dichas pruebas.

3.1 Sobre el diseño.

En el dibujo de detalle que es la representación de una pieza en un todo completo (dimensiones, acabados, detalles), se hará uso de la norma NOM-Z-24-1985. Esta misma norma se tomará en cuenta para el dibujo de conjunto, que es la parte del diseño donde se muestra reunidos los diversos componentes que se asocian para formar un todo.

- **Dimensiones del papel de dibujo.**

En las dimensiones normalizadas para papeles se hará uso de la norma NOM-Z-68-1986. En lo que se refiere al dibujo de detalle y el de fabricación se usaran hojas A4, para el dibujo de conjunto la hoja A3.

Para los márgenes y cuadros de referencia se utilizará la norma NOM-Z-66-1986, NOM-Z-68-1986 y NOM-Z-71-1986.

- **Escalas.**

Algunos de los dibujos en este capítulo no se pudieron realizar a su tamaño real y hubo de ampliarlos o reducirlos según la necesidad, aquí se aplico la norma NOM-Z- 65-1986.

- **Acotaciones.**

Uno de los aspectos más importantes a la hora de documentar los diseños son las acotaciones, aquí se utilizará la norma NOM-Z-25-1986.

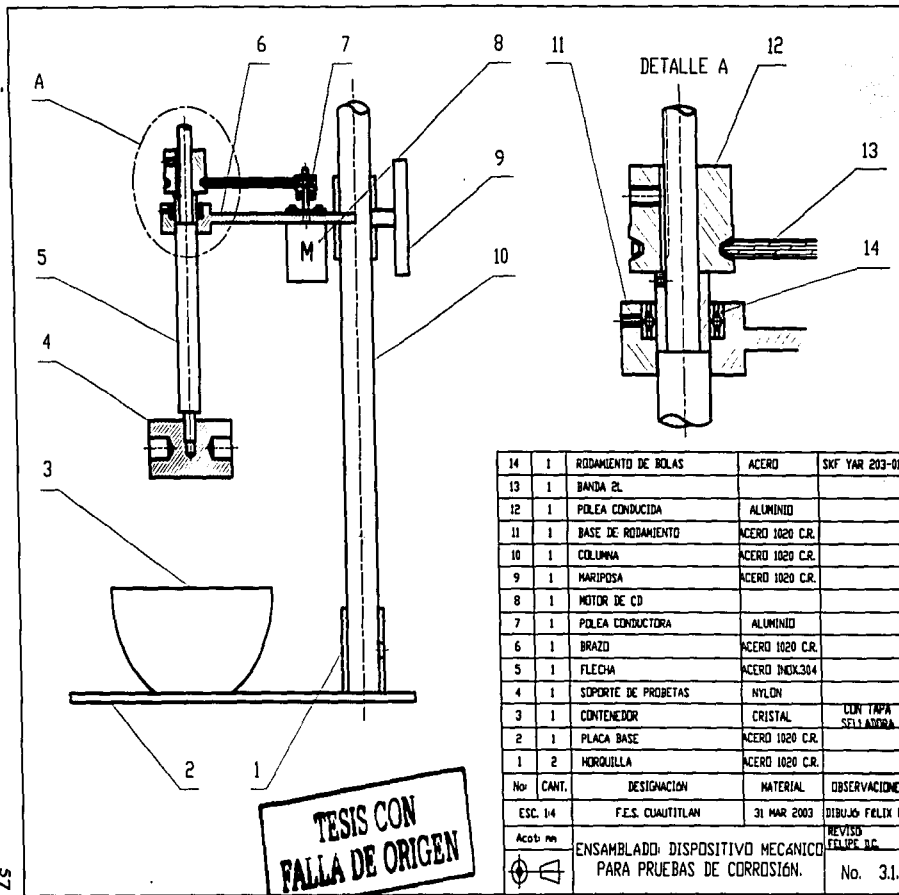
- **Rayados.**

En algunos dibujos de detalle se hizo necesario para su clara identificación, un rayado o achurado que pudiera identificar las superficies de corte o sección de una pieza y se utilizo la norma NOM-Z-5-1985.

- **Ajustes y tolerancias.**

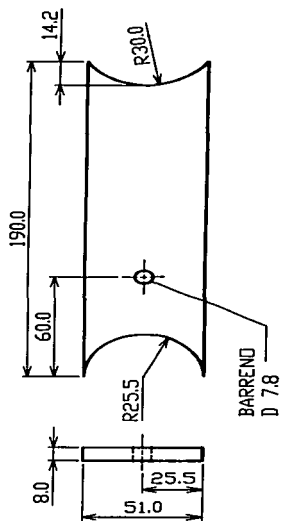
Se deberá tomar en cuenta al momento de diseñar una pieza el grado de error implícito en las medidas de diseño y de fabricación, ya que en éste último proceso tales errores pueden ser originados por desgaste, elementos imperfectos en la misma máquina, las deformaciones de la pieza durante el maquinado, etc. Se utilizara la norma NOM-Z-67-1986.

En la figura 3.1.1 se muestra el dibujo de conjunto. En las figuras 3.1.2 a 3.1.11 se muestran los dibujos de detalle de las diferentes piezas que componen el dispositivo mecánico a construir, en donde se muestran la forma, las dimensiones, los materiales, tolerancias y acabados.



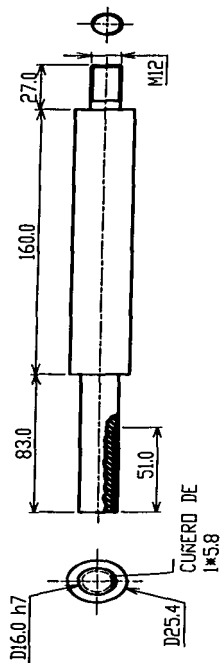
14	1	RODAMIENTO DE BOLAS	ACERO	SKF YAR 203-010
13	1	BANDA EL.		
12	1	POLEA CONDUCTIVA	ALUMINIO	
11	1	BASE DE RODAMIENTO	ACERO 1020 C.R.	
10	1	COLUMNA	ACERO 1020 C.R.	
9	1	MARIPOSA	ACERO 1020 C.R.	
8	1	MOTOR DE CD		
7	1	POLEA CONDUCTORA	ALUMINIO	
6	1	BRAZO	ACERO 1020 C.R.	
5	1	FLECHA	ACERO INOX304	
4	1	SOPORTE DE PROJETAS	NYLON	
3	1	CONTENEDOR	CRISTAL	CON TAPA SELLADORA
2	1	PLACA BASE	ACERO 1020 C.R.	
1	2	MORQUILLA	ACERO 1020 C.R.	
No	CANT.	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACIONES
ESC. 1:4		F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJO: FÉLIX P.R.
Aprob. por		ENSAMBLADO: DISPOSITIVO MECÁNICO PARA PRUEBAS DE CORROSIÓN.		REVISO: FÉLIX P.R.
				No. 3.1.1

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



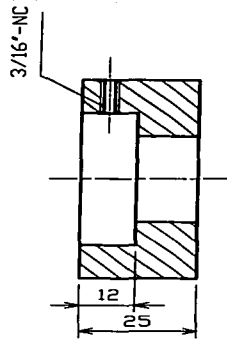
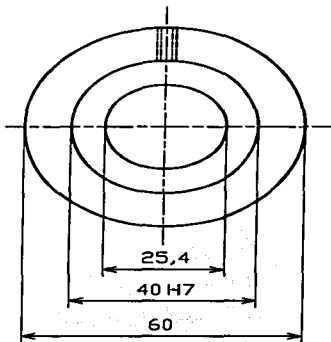
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:2	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B
Acot: mm	BRAZO MAT: ACERO 1020 C.R. ▽		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.1.2

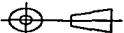


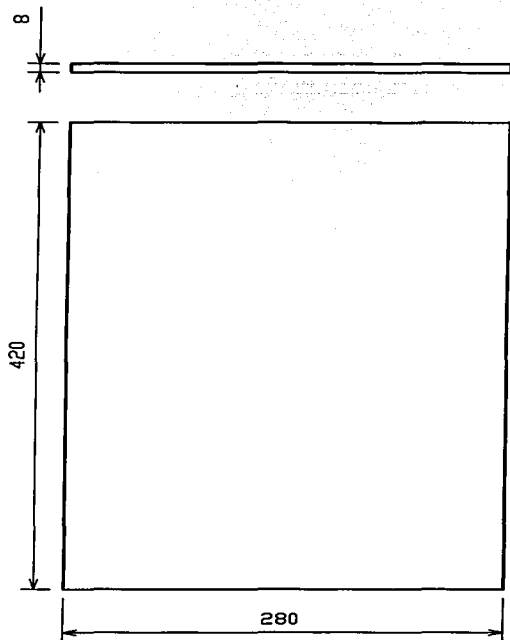
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:2	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJO: FÉLIX P.B
Acot: mm	FLECHA		REVISO: FELIPE D.C.
	MAT: ACERO INOX. 304 ∇		No. 3.1.3



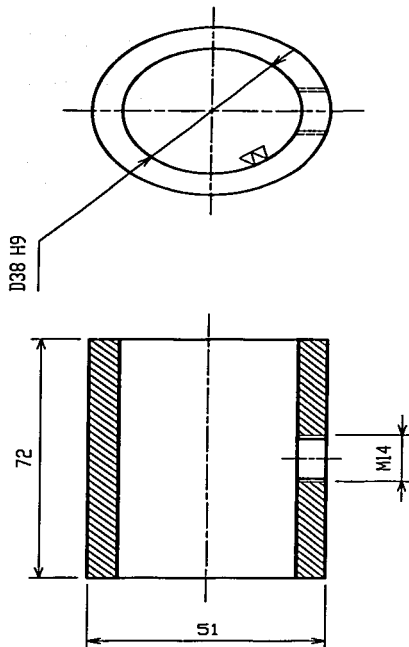
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJO: FELIX P.B
Acot: mm	BASE RODAMIENTO MAT: ACERO 1020 C.R. ∇		REVISO: FELIPE D.C.
			No. 3.1.4

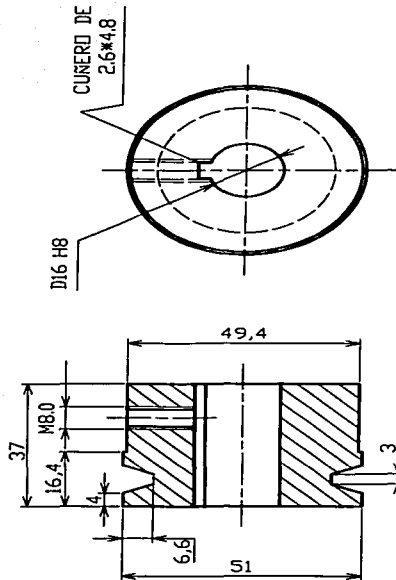


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESC. 1:3	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B
Acot: mm	PLACA BASE		REVISÓ: FELIPE D.C.
	MAT: ACERO 1020 C.R. ∇		No. 3.15

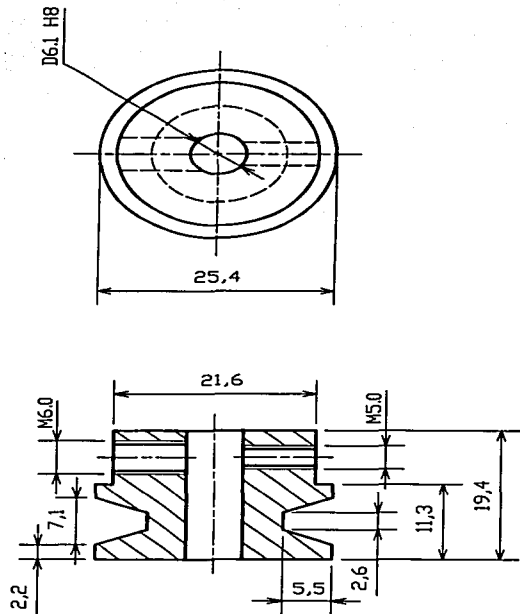


ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJO: FELIX P.B
Acot: mm	HORQUILLA		REVISO: FELIPE D.C.
	MAT: ACERO 1020 C.R. $\nabla < \nabla >$		No. 3.1.6



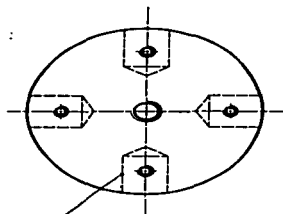
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	POLEA CONDUCTIDA MAT: ALUMINIO W		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.1.7

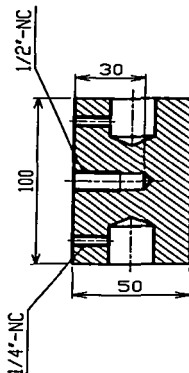


**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

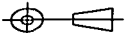
ESC. 2:1	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B
Acot: mm	POLEA CONDUCTORA MAT: ALUMINIO		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.1.8

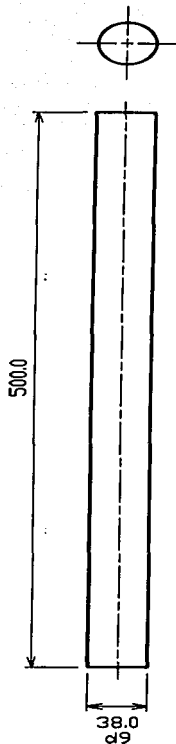


4 AGUJEROS EQUIDISTANTES
DE 19*23 DE PROFUNDIDAD.

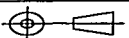


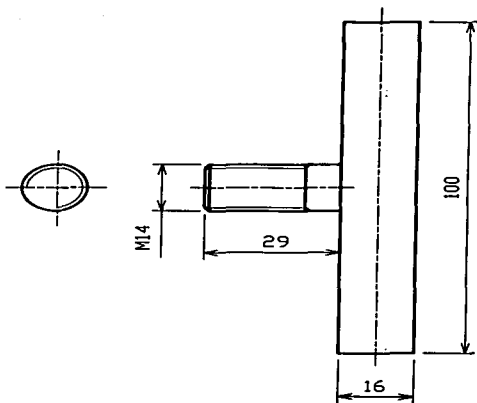
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:2	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B
Acot: mm	SOPORTE DE PROBETAS MAT: NYLON		REVISÓ: FELIPE D.C.
	▽		No. 3.1.9



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESC. 1:3	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJO: FÉLIX P.B
Aco: mm	COLUMNA MAT: ACERO 1020 C.R. ∇		REVIS: FELIPE D.C.
			No. 3.1.10



**TESIS CON
 PALLA DE ORIGEN**

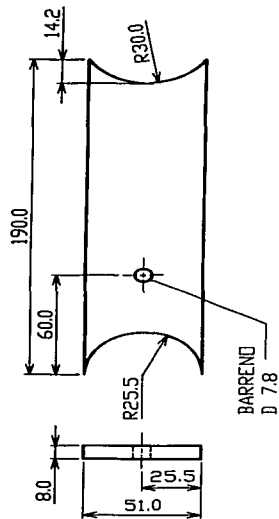
ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B.
Acot: mm	MARIPOSA MAT: ACERO 1020 C.R. ▽		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.1.11

3.2 Sobre la fabricación.

Para la fabricación de los elementos que componen el dispositivo mecánico para las pruebas de corrosión en metales, se realizaron una serie de operaciones con un orden específico para facilitar el maquinado de las piezas. También se requirió la selección de los dispositivos auxiliares que permitieron la inmovilización de dichas piezas para así obtener una aproximación favorable acorde a las dimensiones que se especifican en el dibujo de detalle.

Para cumplir con estos requisitos en el maquinado de las piezas se utilizaron las hojas de fabricación; donde se describe el proceso que debe efectuarse en el orden indicado. El contenido de las hojas de fabricación esta conformado por la información del equipo utilizado, la herramienta, el dispositivo de sujeción, el lubricante, y además se incluyen los croquis que muestran la sujeción de las piezas a maquinar.

Cada uno de los elementos que se acaban de describir para la fabricación del dispositivo se muestran en los siguientes dibujos de este capítulo.



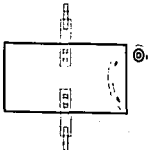
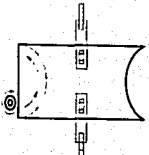

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:2	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B
Acot: mm	BRAZO MAT: ACERO 1020 C.R. ▽		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.1

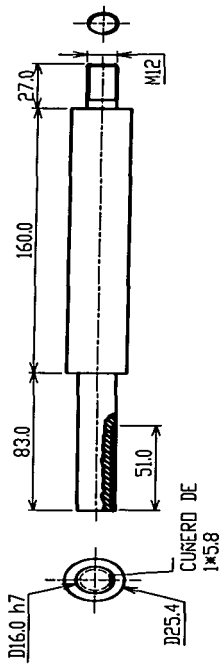
PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: BRAZO.

MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Maquinar un corte redondeado en un extremo de la placa. R = 30 mm.	Fresadora vertical.	Cortador frontal d = 5/16"	Bridas de altura ajustable.	Aceite soluble.	
2	Maquinar un corte redondeado en el extremo opuesto de la placa. R = 25.5 mm.	Fresadora vertical.	Cortador frontal d = 5/16"	Bridas de altura ajustable.	Aceite soluble.	
3	Taladrar agujero pasado.	Taladro de columna.	Broca de 5/6".	Bridas de altura ajustable.	Aceite soluble.	
4						

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



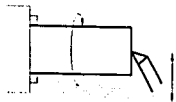
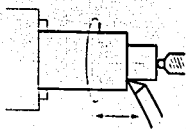
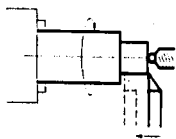
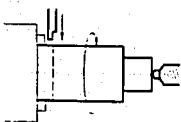
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:2	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	FLECHA MAT: ACERO INOX. 304 ∇		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.2

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: FLECHA.

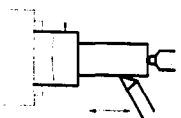
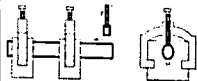
MATERIAL: ACERO INOXIDABLE 304.

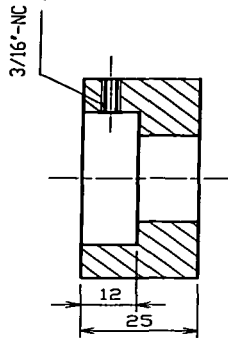
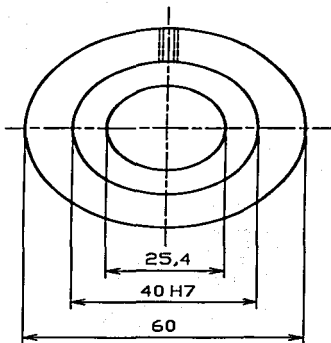
OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrentar en una cara	Tomo	Buril	Chuck	Aceite soluble	
2	Cilindrar. D = 12mm L = 27 mm.	Tomo	Buril	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	
3	Roscar cuerda M12.	Tomo	Buril para roscado.	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	
4	Cortar la flecha hasta 270 mm de longitud.	Tomo	Herramienta de tronzado.	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

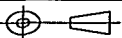
SUBPRODUCTO: FLECHA.

MATERIAL: ACERO INOXIDABLE 304.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
5	Sujetar la flecha al tomo por el extremo de la cuerda y cilindrar. D = 16mm L = 63mm	Torno	Bunil	Chuck	Aceite soluble	
6	Maquinar el cuñero de 1 x 5.8 mm, una longitud de 51 mm.	Fresadora vertical.	Cortador vertical de 1/4"	Mordazas.	Aceite soluble	



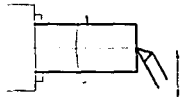
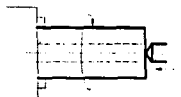
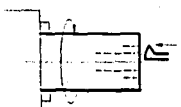
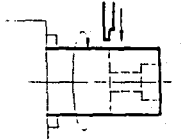
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	BASE RODAMIENTO		REVISÓ: FELIPE D.C.
	MAT: ACERO 1020 C.R. ∇		No. 3.2.3

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: BASE RODAMIENTO.

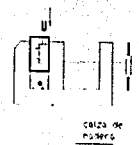
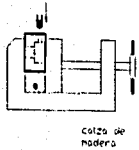
MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

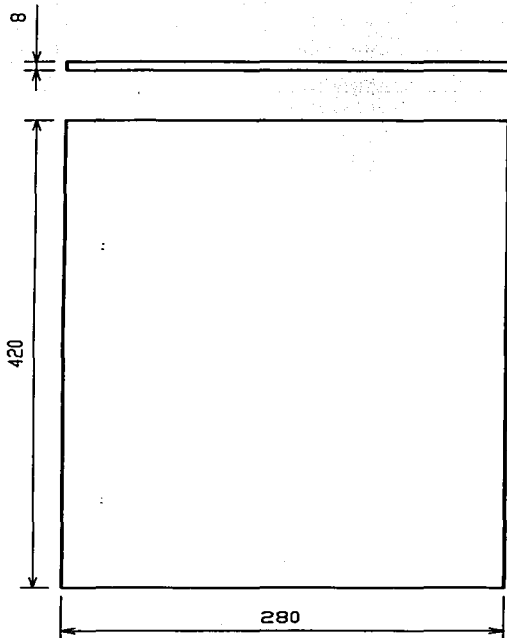
OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrentar una cara	Torno	Buil	Chuck	Aceite soluble	
2	Barrenar. L = 25 mm	Torno	Broca de 1"	Broquero	Aceite soluble	
3	Maquinar caja. D = 40mm L = 12mm	Torno	Buil para interiores	Chuck	Aceite soluble	
4	Cortar la base de rodamiento hasta 25 mm de longitud.	Torno	Herramienta de tronzado.	Chuck	Aceite soluble	

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

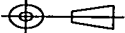
SUBPRODUCTO: BASE RODAMIENTO.

MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
5	Barrenar.	Taladro de columna	Broca ahusada D = 4.2 mm	Presna	Aceite soluble	 colza de madera
6	Roscar	Manual	Machuelo de 3/16" NC	Presna y maneral para machuelo	Petróleo	 colza de madera



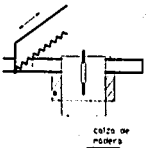
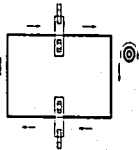
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

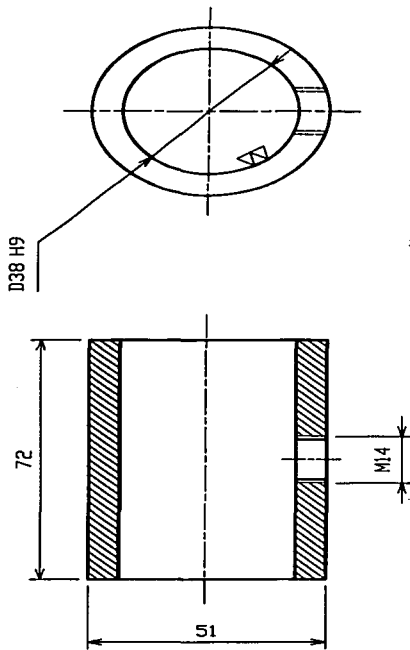
ESC. 1:3	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	PLACA BASE MAT: ACERO 1020 C.R. ∇		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.4

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

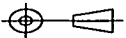
SUBPRODUCTO: PLACA BASE.

MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

OP. #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Cortar una placa de acero de 284 x 424 (mm)	Segueta mecánica	Sierra	Prensa	Aceite soluble	
2	Maquinar contorno de la base removiendo 2 mm de espesor de material	Fresadora vertical	Fresa de ranurado y costado D = 1/2"	Bridas de altura ajustable	Aceite soluble	



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

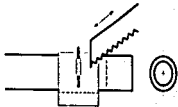
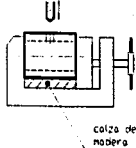
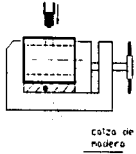
ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTILAN	31 MAR 2003	DIBUJO: FELIX P.B
Acot: mm	HORQUILLA		REVISO: FELIPE D.C.
	MAT: ACERO 1020 C.R. ∇ (∇)		No. 3.2.5

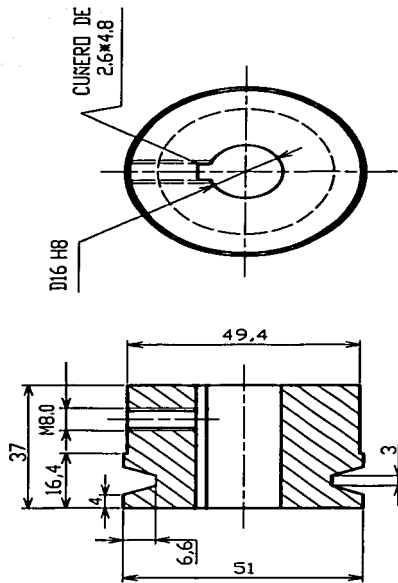
**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: HORQUILLA.

MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Cortar el tubo L = 72 mm	Segueta mecánica	Sierra	Presna	Aceite soluble	
2	Barrenar	Taladro de columna	Broca ahusada D = 12 mm	Presna	Aceite soluble	
3	Roscar con machuelo	Taladro de columna	Machuelo M14	Presna	Aceite soluble	



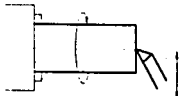
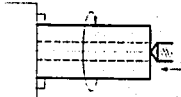
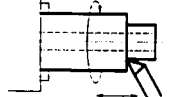

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FELIX P.B
Acot: mm	POLEA CONDUCTIDA MAT: ALUMINIO		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.6

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: POLEA CONDUCTIDA.

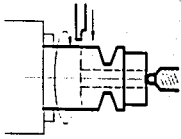
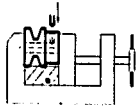
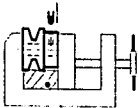
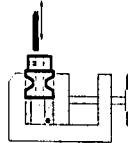
MATERIAL: ALUMINIO.

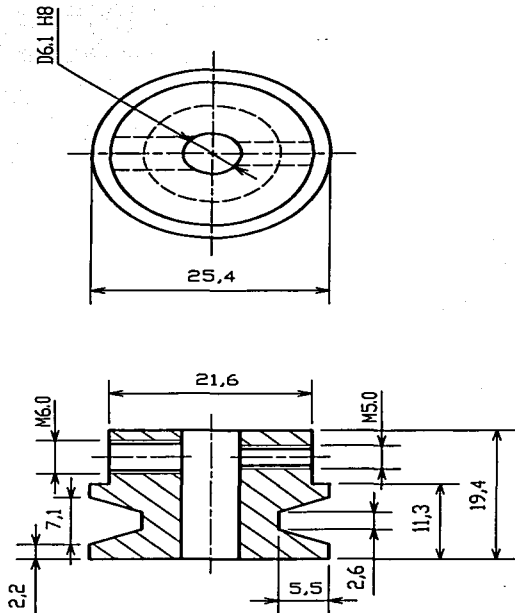
OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrentar una cara	Tomo	Buril	Chuck	Aceite soluble	
2	Barrenar. L = 40 mm	Tomo	Broca 5/8"	Broquero	Aceite soluble	
3	Cilindrar. D = 49.4 mm L = 20.6 mm	Tomo	Buril.	Chuck.	Aceite soluble	
4	Ranurar.	Tomo	Buril de forma	Chuck.	Aceite soluble	

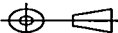
PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: POLEA CONDUCTIDA.

MATERIAL: ALUMINIO.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
5	Cortar la polea. L = 37 mm	Tomo	Herramienta de tronzado	Chuck	Aceite soluble	
6	Barrenar	Taladro de columna	Broca ahusada. D = 6.75 mm	Prensa	Aceite soluble	 calza de madera
7	Roscar con machuelo	Manual	Machuelo M8	Prensa y maneral para machuelo	Petróleo	 calza de madera
8	Maquinar el cuttero de 2.8 x 4.8 mm	Brochadora	Brocha de 4.8 mm de ancho	Prensa	Aceite soluble	 calza de madera

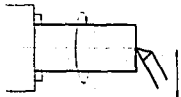
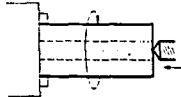
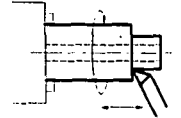
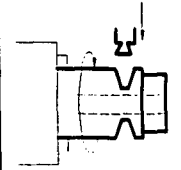


ESC. 21	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	POLEA CONDUCTORA MAT: ALUMINIO ∇		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.7

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: POLEA CONDUCTORA.

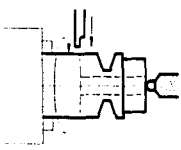
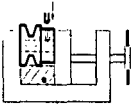
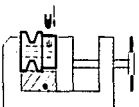
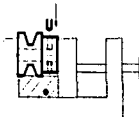
MATERIAL: ALUMINIO.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrenar una cara	Tomo	Buril ..	Chuck	Aceite soluble ..	
2	Barrenar. L = 20 mm	Tomo	Broca 6.1 mm	Broquero	Aceite soluble	
3	Cilindrar. D = 21.6 mm L = 8.1 mm	Tomo	Buril.	Chuck.	Aceite soluble	
4	Ranurar.	Tomo	Buril de forma	Chuck.	Aceite soluble	

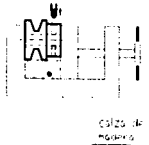
PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: POLEA CONDUCTORA.

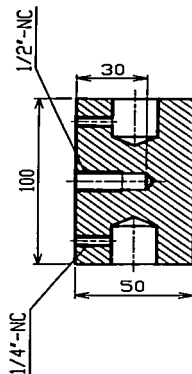
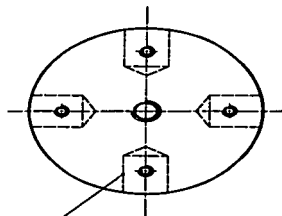
MATERIAL: ALUMINIO.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
5	Cortar la polea. L = 19.4 mm	Tomo	Herramienta de tronzado	Chuck	Aceite soluble	
6	Barrenar	Taladro de columna	Broca. D = 4 mm	Prensa	Aceite soluble	 colza de madera
7	Roscar con machuelo	Manual	Machuelo M6	Prensa y maneral para machuelo	Petróleo	 colza de madera
8	Rotar longitudinalmente 180° la pieza a barrenar	Taladro de columna	Broca ahusada. D = 4.2 mm	Prensa	Aceite soluble	 colza de madera

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.
 SUBPRODUCTO: POLEA CONDUCTORA.
 MATERIAL: ALUMINIO.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
9	Roscar con machuelo	Manual	Machuelo M5	Prensa y maneral para machuelo	Petróleo	 <p style="text-align: right; font-size: small;"> C3123-04 MACHUELO </p>

4 AGUJEROS EQUIDISTANTES
DE 19*23 DE PROFUNDIDAD.



ESC. 1/2	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	SOPORTE DE PROBETAS MAT: NYLON		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.8

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: SOPORTE DE PROBETAS.

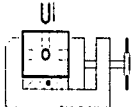
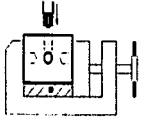
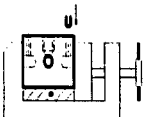
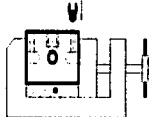
MATERIAL: NYLON.

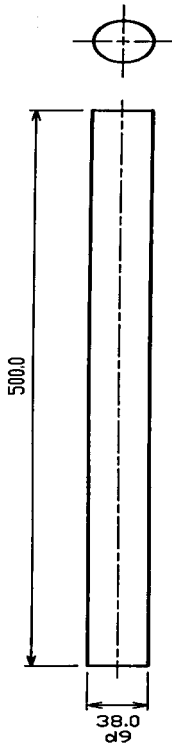
OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrentar una cara	Torno	Buril	Chuck		
2	Cilindrar. D = 100mm L = 55 mm.	Torno	Buril	Chuck y contrapunto.		
3	Cortar hasta 50 mm de longitud.	Torno	Herramienta de tronzado.	Chuck y contrapunto.		
4	Barrenar 4 agujeros equidistantes de 23 mm de profundidad.	Taladro de columna	Broca de 3/4"	Prensa		

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

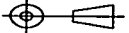
SUBPRODUCTO: SOPORTE DE PROBETAS.

MATERIAL: NYLON.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
5	Girar la pieza 90° y barrenar en el centro a una profundidad de 30 mm.	Taladro de columna	Broca D = 7/16"	Prensa		 <p>calza de madera</p>
6	Roscar con machuelo.	Taladro de columna	Machuelo 1/2"NC	Prensa		 <p>calza de madera</p>
7	Barrenar 4 agujeros equidistantes.	Taladro de columna	Broca D = 3/16"	Prensa		 <p>calza de madera</p>
8	Roscar con machuelo en los 4 agujeros equidistantes.	Manual	Machuelo 1/4"NC	Prensa y manual para machuelo		 <p>calza de madera</p>



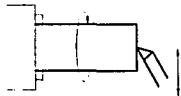
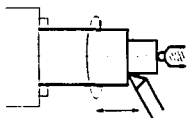
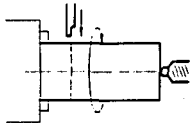
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

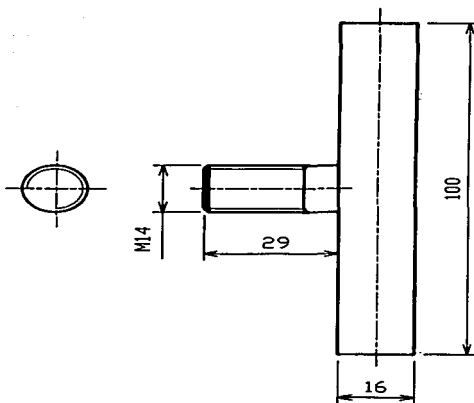
ESC. 1:3	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	COLUMNA MAT: ACERO 1020 C.R. W		REVISÓ: FELIPE D.C.
			No. 3.2.9

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

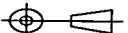
SUBPRODUCTO: COLUMNA.

MATERIAL: ACERO 1020 C.R..

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrentar una cara	Torno	Buril	Chuck	Aceite soluble	
2	Cilindrar. D = 38 mm L = 500 mm.	Torno	Buril	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	
3	Cortar la columna a 500 mm de longitud.	Torno	Herramienta de tronzado.	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	



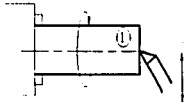
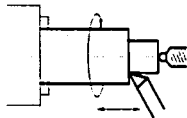
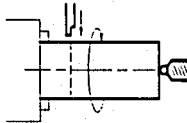
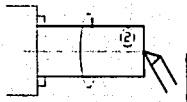
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESC. 1:1	F.E.S. CUAUTITLAN	31 MAR 2003	DIBUJÓ: FÉLIX P.B
Acot: mm	MARIPOSA		REVISÓ: FELIPE D.C.
	MAT: ACERO 1020 C.R. ▽		No. 3.2.10

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: MARIPOSA.

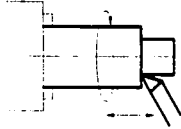
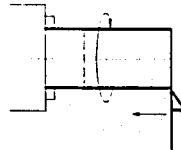
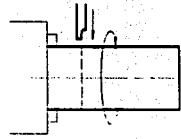
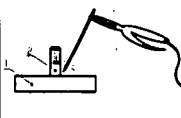
MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
1	Refrentar una cara para la pieza 1	Torno	Buril	Chuck	Aceite soluble	
2	Cilindrar. D = 16 mm L = 100 mm.	Torno	Buril	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	
3	Cortar la pieza 1 hasta 100 mm de longitud.	Torno	Herramienta de tronzado.	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	
4	Refrentar una cara para la pieza 2	Torno	Buril	Chuck y contrapunto.	Aceite soluble	

PRODUCTO: MÁQUINA PARA PRUEBA DE CORROSIÓN-EROSIÓN.

SUBPRODUCTO: MARIPOSA.

MATERIAL: ACERO 1020 C.R.

OP #	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	HERRAMENTAL	DISPOSITIVO	LUBRICANTE	CROQUIS
5	Cilindrar. D = 14 mm L = 29 mm	Torno	Buril	Chuck	Aceite soluble	
6	Maquinar cuerda. L = 25 mm.	Torno	Buril para roscado	Chuck	Aceite soluble	
7	Cortar la pieza 2 a una longitud de 29 mm.	Torno	Herramienta de trozado	Chuck	Aceite soluble	
8	Unir la pieza 1 y la pieza 2.	Soldadura de arco	Porta-electrodo y planta para soldar			

CAPITULO 4.

PUESTA EN MARCHA DEL DISPOSITIVO.

Para llevar a cabo las pruebas en el Laboratorio de Materiales, se deben seguir ciertas normas de seguridad para utilizar el material, sustancias químicas y equipo. En este capítulo se menciona la metodología de operación del dispositivo y algunas otras sugerencias sobre la realización de las pruebas de corrosión-erosión.

4.1 Metodología de operación del dispositivo mecánico para pruebas de corrosión erosión en metales.

- a) Debe mantenerse el brazo del dispositivo en la parte más alta de la columna y asegurarla ahí por medio de la mariposa. El brazo es el soporte del motor, el rodamiento y la flecha. A su vez, la flecha contiene a la polea conducida y al soporte de las probetas (ver dibujo de conjunto).
- b) Hasta este momento el soporte de las probetas no debe estar sujeto a la flecha.
- c) Las muestras de metal a corroerse se introducen en los orificios del soporte de probetas y se aseguran ahí con los tornillos prisioneros.
- d) La tapa de vidrio tiene un orificio en el centro, y, por medio de este orificio se hace introducir la tapa en el extremo de la flecha hasta deslizarla a la parte más alta y sostenerla ahí con una mano asida a la flecha.
- e) Con la otra mano libre, se inserta el soporte de probetas(que ya transporta las muestras de metal) a la cuerda de la flecha.
- f) Se deja descansar la tapa de vidrio sobre la superficie del soporte de probetas.
- g) Una vez que se tiene el suficiente espacio sobre la placa base del dispositivo, se procede a colocar el recipiente de vidrio que contiene a la sustancia corrosiva previamente preparada, justo debajo del soporte de probetas.
- h) Con una mano, se sujeta con firmeza a la flecha(ya que ahora es más pesada por efecto de los elementos descritos) y con la otra mano se libera la presión de la mariposa contra la columna haciendo descender aquella lentamente hasta que el soporte de las probetas quede ligeramente por debajo de la superficie líquida.

- i) Se centra el agujero de la tapa (la tapa ya se encuentra en perfecto contacto con la goma selladora del recipiente) con la flecha del dispositivo para evitar posibles fricciones de estos dos elementos.
- j) Se verifica la tensión y linealidad de la banda entre las dos poleas para evitar forzar al motor.
- k) Finalmente, se enciende el motor y las muestras de metal quedan sujetas a la velocidad centrífuga dentro del líquido corrosivo.

Las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 muestran aspectos importantes en el diseño físico del dispositivo, así también como la ilustración de algunos de los pasos que se acaban de describir para poder operar el dispositivo.

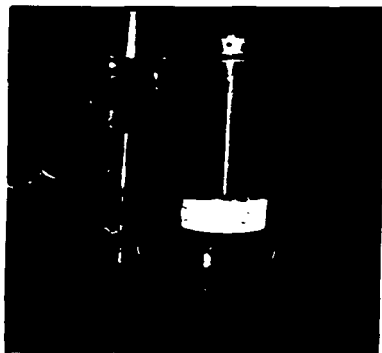


Figura 4.1 Imagen en perspectiva isométrica que muestra el dispositivo completo.

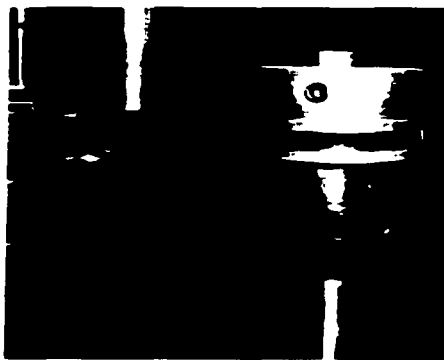


Figura 4.2 Disposición de la polea conducida en la flecha y el rodamiento que se aloja en la base del rodamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 4.3 Orificio del soporte de las probetas donde se coloca la muestra de metal.



Figura 4.4 Relación del soporte de las probetas el recipiente y la placa base.

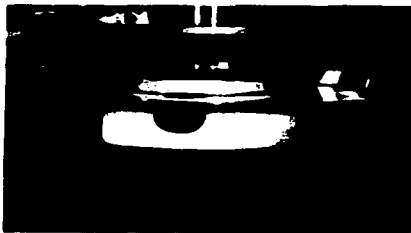


Figura 4.5 Muestras de metal sumergidas en el líquido corrosivo.



Figura 4.6 Polea conducida y polea conductora.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

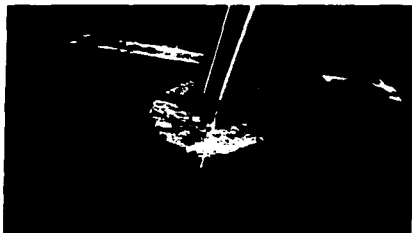


Figura 4.7 Puesta en marcha del dispositivo.

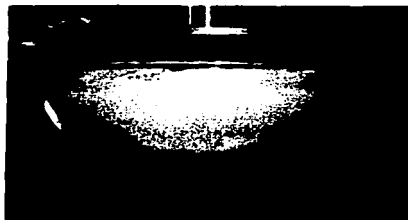


Figura 4.8 Turbulencia en el interior del recipiente.

4.2 Prueba demostrativa en un acero 1020 T.F. (acero cold rolled).

Para realizar esta prueba en el laboratorio, se preparó como líquido corrosivo una solución salina conteniendo 120 g. de sal común disueltos en 2000 ml de agua.

Se cortan cuatro muestras de una barra redonda de acero 1020 con una longitud en cada una de estas muestras de 18 mm aproximadamente. Se realizó un desbaste básico solamente en una cara de cada una de las muestras.

Se sujetan las muestras en el soporte de probetas, mostrándose hacia el exterior las caras desbastadas de modo que éstas pudieran ser vistas por el ejecutante de la prueba. Una sugerencia importante es que las caras de las muestras queden alineadas con el contorno lateral del soporte de probetas, para evitar que las muestras corten el líquido en el momento en que está funcionando el dispositivo, ya que esto provoca un contacto intermitente de las muestras con el corrosivo.

Luego, se siguió la metodología descrita en el punto 4.1.

Durante la prueba, las muestras estuvieron sometidas a corrosión-erosión durante 80 min aproximadamente. Para calcular la velocidad tangencial en las muestras se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_{tan} = \omega \times r \dots\dots\dots (E 4.1)$$

Donde:

V_{tan} = velocidad tangencial

ω = velocidad angular del motor (rpm) = 650 rpm

r = radio del soporte de probetas (cm) = 5 cm

Sustituyendo valores en la ecuación E 4.1, se tiene:

$$V_{tan} = (650 \text{ rev/min}) (5 \text{ cm}) (2\pi/\text{rev}) (1 \text{ m}/100 \text{ cm})$$

$$V_{tan} = 189.9 \text{ m/min.} \approx 190 \text{ m/min.}$$

Se retiraron las muestras del soporte de probetas y los resultados de la prueba se exponen en las figuras 4.9 y 4.10.

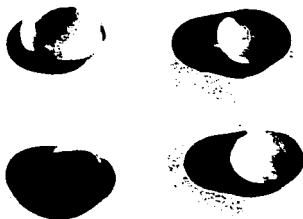


Figura 4.9 Muestras de acero 1020 con desbaste básico en una cara.



Figura 4.10 Probetas de la figura 4.9, pero ahora mostrando el deterioro causado por la corrosión y que se puede identificar por las manchas cobrizas en la superficie de las muestras.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CONCLUSIONES.

Después del trabajo realizado (investigación técnica, fabricación y puesta en marcha del equipo) se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. Al estudiar las causas y efectos de la corrosión erosión se puede ver que entran en juego múltiples factores, los cuales hay que tomar en cuenta al momento del diseño de un sistema de prevención a la corrosión erosión, inclusive es un acto de investigación conjunta con otras disciplinas más allá de la metalurgia, como la química y la electrónica.
2. La fabricación del dispositivo mecánico, demuestra que es factible llevar a cabo la realización de este tipo de proyectos en las instalaciones de los Laboratorios de Máquinas Herramientas de esta facultad, porque se cuenta con la maquinaria y herramienta necesarios.
3. Los materiales y elementos empleados en la construcción del dispositivo, son fáciles de conseguir y no son caros.
4. Se valúa la importancia de tener en el Laboratorio de Materiales un dispositivo mecánico como el que se diseño y fabricó aquí en la FESC, para poder realizar pruebas de corrosión-erosión en distintos líquidos corrosivos y con distintos materiales.
5. La metodología de operación del dispositivo mecánico es muy simple y práctica, y esto ayuda a realizar pruebas rápidas, eficientes y seguras para el experimentador.
6. La prueba que se realizó es de tipo demostrativa, ya que este ensayo se hizo sólo para mostrar la metodología de operación al realizar pruebas de corrosión-erosión en el dispositivo que se fabricó.
7. El resultado de la muestra de metal con que se experimentó, puede ser visto como un hecho que pone en evidencia, el proceso natural de que los metales vuelven a su condición primitiva y que ello conlleva al deterioro del mismo. No obstante, es este proceso el que provoca la investigación y el planteamiento de fórmulas, que permiten alargar la vida útil de los materiales sometidos a este proceso de deterioro.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1. William D. Callister Jr.**
Ciencia e ingeniería de los materiales, tomo II.
Editorial Reverté.
España. 1996.
- 2. Carl A. Keyser.**
Ciencia de los materiales para ingeniería.
Editorial Limusa.
México. 1975.
- 3. James F. Shackelford.**
Ciencia de los materiales para ingenieros, 3a edición.
Editorial Prentice Hall Hispanoamericana.
México. 1992.
- 4. Lawrence H. Van Vlack .**
Materiales para ingeniería.
Compañía Editorial Continental.
México. 1991.
- 5. Richard A. Flinn.**
Materiales de ingeniería y sus aplicaciones.
Editorial McGraw Hill.
México, D.F.. 1991.
- 6. A. G. Guy.**
Fundamentos de ciencia de materiales.
Editorial McGraw Hill.
México, D.F.. 1981.
- 7. J. C. Anderson.**
Ciencia de los materiales, 2ª edición.
Editorial Limusa.
México, D.F.. 2000.

8. **Donald R. Askeland.**
La ciencia e ingeniería de los materiales.
Grupo Editorial Iberoamérica
México, D.F.. 1987.
9. **Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.**
Normas básicas para dibujo técnico.
UNAM, Cuautitlán.
México. 2002.
10. **Kenneth G. Budinski.**
Engineering Materials, 4th edition.
Editorial Prentice Hall.
U.S.A. 1992.
11. **W. Bolton.**
Engineering Materials 2.
Heinemann: London.
Great Britain. 1987.

APÉNDICE A

Tabla A1.- Ajustes recomendados para ensambles árbol- agujero

AJUSTES DE USO CORRIENTE			Ejes	H6	H7	H8	H9	H11	
Piezas móviles <i>una en relación a la otra</i>	<i>Piezas cuyo funcionamiento requiere de mucho juego (dilatación, mala alineación, apoyos muy largos .etc)</i>		c				9	11	
			d				9	11	
	<i>Caso corriente de piezas que giran o deslizan sobre un casquillo o cojinete (Engrase correcto asegurado)</i>		e		7	8	9		
			f	6	6-7	7			
<i>Piezas con guiado preciso para movimientos de poca amplitud</i>		g	5	6					
Piezas fijas <i>Una en relación a la otra</i>	<i>Posibilidad de montaje y desmontaje sin deteriorar las piezas</i>	<i>El acoplamiento no puede transmitir esfuerzos</i>	<i>Es posible el montaje a mano</i>		h	5	6	7	8
					js	5	6		
			<i>Montaje con mazo de madera</i>		k	5			
					m		6		
	<i>Imposibilidad de desmontar sin deteriorar las piezas</i>	<i>El acoplamiento puede transmitir esfuerzos</i>	<i>Montaje con prensa</i>		p		6		
			<i>Montaje con prensa o por dilatación</i>		s			7	
			<i>(comprobar que las dilataciones a que se somete el metal no rebasan el límite elástico)</i>		u			7	
			x			7			

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla A2.- Tolerancias para agujeros en μm (micrómetros)

AGUJEROS	Hasta 3 incluido	3 a 6 incluido	6 a 10	10 a 18	18 a 30	30 a 50	50 a 80	80 a 120	120 a 180	180 a 250	250 a 315	315 a 400	400 a 500
D 10	+60 +20	+78 +30	+98 +40	+120 +50	+149 +65	+180 +80	+220 +20	+260 +120	+305 +145	+355 +170	+400 +190	+440 +210	+480 +230
F 7	+16 +6	+22 +10	+28 +13	+34 +16	+41 +20	+50 +25	+60 +30	+71 +36	+83 +43	+96 +50	+108 +56	+119 +62	+131 +68
G 6	+8 +2	+12 +4	+14 +5	+17 +6	+20 +7	+25 +9	+30 +10	+34 +12	+39 +14	+44 +15	+49 +17	+54 +18	+60 +20
H 6	+6 +0	+8 0	+9 0	+11 0	+13 0	+16 0	+19 0	+22 0	+25 0	+29 0	+32 0	+36 0	+40 0
H 7	+0 +0	0 0	+15 0	+18 0	+21 0	+25 0	+30 0	+35 0	+40 0	+46 0	+52 0	+57 0	+67 0
H 8	+14 +0	+18 0	+22 0	+27 0	+33 0	+39 0	+46 0	+54 0	+63 0	+72 0	+81 0	+89 0	+97 0
H 9	+25 +0	+30 0	+36 0	+43 0	+52 0	+62 0	+74 0	+87 0	+100 0	+115 0	+130 0	+149 0	+155 0
H 10	+40 0	+48 0	+58 0	+70 0	+84 0	+100 0	+120 0	+140 0	+160 0	+185 0	+210 0	+230 0	+250 0
H 11	+60 0	+75 0	+90 0	+110 0	+130 0	+160 0	+190 0	+210 0	+250 0	+290 0	+320 0	+360 0	+400 0
H 12	+100 0	+120 0	+150 0	+180 0	+210 0	+250 0	+300 0	+350 0	+400 0	+460 0	+520 0	+570 0	+630 0
H 13	+140 0	+180 0	+220 0	+270 0	+330 0	+390 0	+460 0	+540 0	+630 0	+720 0	+810 0	+890 0	+970 0
J 7	+4 -6	+6 -6	+8 -7	+10 -8	+12 -9	+14 -11	+18 -12	+22 -13	+26 -14	+30 -16	+36 -16	+39 -18	+43 -20
K 6	0 -6	+2 -6	+2 -7	+2 -9	+3 -11	+3 -13	+4 -15	+4 -18	+4 -21	+5 -24	+5 -27	+7 -29	+8 -32
K 7	0 -10	+3 -9	+5 -10	+6 -12	+6 -15	+7 -18	+9 -21	+10 -25	+12 -28	+13 -33	+16 -36	+17 -40	+18 -45
M 7	-2 -12	0 -12	0 -15	0 -18	0 -21	0 -25	0 -30	0 -35	0 -40	0 -46	0 -52	0 -57	0 -63
N 7	-4 -14	-4 -16	-4 -19	-5 -23	-7 -28	-8 -33	-9 -39	-10 -45	-12 -52	-14 -60	-14 -66	-16 -73	-17 -80
N 9	-4 -29	0 -30	0 -36	0 -43	0 -52	0 -62	0 -74	0 -87	0 -100	0 -115	0 -130	0 -140	0 -155
P 6	-6 -12	-9 -17	-12 -21	-15 -26	-18 -31	-21 -37	-26 -45	-30 -52	-36 -61	-41 -70	-47 -79	-51 -87	-55 -95
P 7	-6 -18	-8 -20	-9 -24	-11 -29	-14 -35	-17 -42	-21 -51	-24 -59	-28 -68	-33 -79	-36 -86	-41 -98	-45 -108
P 9	-9 -31	-12 -42	-15 -51	-18 -61	-22 -74	-26 -88	-32 -106	-37 -124	-43 -143	-50 -165	-56 -186	-62 -202	-68 -233

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TRABAJOS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla A3.- Tolerancias para árboles o ejes en μm (micrometros)

EJES	Hasta 3 incluido	3 a 6 incluido	6 a 10	10 a 18	18 a 30	30 a 50	50 a 80	80 a 120	120 a 180	180 a 250	250 a 315	315 a 400	400 a 500
a 10	-270 -330	-270 -345	-280 -370	-290 -400	-300 -430	-320 -470	-360 -560	-410 -600	-580 -710	-820 -950	-1050 -1240	-1350 -1560	-1650 -1900
c 11	-60 -120	-70 -145	-80 -170	-95 -205	-110 -240	-130 -280	-150 -330	-180 -390	-230 -450	-280 -530	-330 -620	-400 -720	-480 -840
d 9	-20 -45	-30 -60	-40 -75	-50 -93	-65 -117	-80 -142	-100 -174	-120 -207	-145 -245	-170 -285	-190 -320	-210 -350	-230 -385
d 10	-20 -60	-30 -78	-40 -98	-50 -120	-65 -149	-80 -180	-100 -205	-120 -230	-145 -305	-170 -355	-190 -400	-210 -440	-230 -480
d 11	-20 -80	-30 -105	-40 -130	-50 -160	-65 -195	-80 -240	-100 -290	-120 -340	-145 -395	-170 -460	-190 -510	-210 -570	-230 -630
e 7	-14 -24	-20 -32	-25 -40	-32 -50	-40 -61	-50 -75	-60 -107	-72 -152	-85 -125	-100 -146	-110 -162	-125 -185	-135 -198
e 8	-14 -28	-20 -38	-25 -47	-32 -59	-40 -73	-50 -89	-60 -106	-72 -126	-85 -148	-100 -172	-110 -191	-125 -214	-135 -232
e 9	-14 -39	-20 -50	-25 -61	-32 -75	-40 -92	-50 -112	-60 -134	-72 -159	-85 -185	-100 -215	-110 -240	-125 -265	-135 -290
f 6	-6 -12	-10 -18	-13 -22	-16 -27	-20 -33	-25 -41	-30 -49	-36 -58	-43 -68	-50 -79	-56 -88	-62 -108	-68 -108
f 7	-6 -16	-10 -22	-13 -28	-16 -34	-20 -41	-25 -50	-30 -60	-36 -71	-43 -83	-50 -96	-56 -106	-62 -119	-68 -131
f 8	-6 -20	-10 -28	-13 -35	-16 -43	-20 -53	-25 -64	-30 -76	-36 -89	-43 -106	-50 -122	-56 -137	-62 -151	-68 -165
g 5	-4 -6	-5 -9	-6 -11	-7 -14	-8 -16	-9 -20	-9 -23	-10 -27	-12 -32	-14 -35	-15 -40	-17 -43	-18 -47
g 6	-2 -8	-4 -12	-5 -14	-6 -17	-7 -20	-7 -25	-9 -29	-10 -34	-12 -39	-14 -44	-15 -49	-17 -54	-20 -60
h 5	-4 -4	-5 -5	-6 -6	-7 -8	-8 -9	-9 -11	-10 -13	-11 -15	-12 -18	-14 -20	-15 -23	-17 -25	-18 -27
h 6	0 -6	0 -8	0 -9	0 -11	0 -13	0 -16	0 -19	0 -22	0 -25	0 -29	0 -32	0 -36	0 -40
h 7	0 -10	0 -12	0 -15	0 -18	0 -21	0 -25	0 -30	0 -35	0 -40	0 -46	0 -52	0 -57	0 -63
h 8	0 -14	0 -18	0 -22	0 -27	0 -33	0 -39	0 -46	0 -54	0 -63	0 -72	0 -81	0 -89	0 -97
h 9	0 -25	0 -30	0 -36	0 -43	0 -52	0 -62	0 -74	0 -87	0 -100	0 -115	0 -130	0 -140	0 -155
h 10	0 -40	0 -48	0 -58	0 -70	0 -84	0 -100	0 -120	0 -140	0 -160	0 -185	0 -210	0 -230	0 -250
h 11	0 -60	0 -75	0 -90	0 -110	0 -130	0 -160	0 -190	0 -220	0 -250	0 -290	0 -320	0 -360	0 -440
h 13	0 -140	0 -180	0 -220	0 -270	0 -330	0 -390	0 -460	0 -540	0 -630	0 -720	0 -810	0 -890	0 -970
j 6	+4 -2	+2 -2	+3 -3	+4 -4	+5 -4	+6 -5	+7 -6	+8 -7	+9 -8	+11 -9	+12 -10	+13 -11	+14 -12
js 5	+2 -2	+2.5 -2.5	+3 -3	+4 -4	+4.5 -4.5	+5.5 -5.5	+6.5 -6.5	+7.5 -7.5	+9 -9	+10 -10	+11.5 -11.5	+12.5 -12.5	+13.5 -13.5
js 6	+3 -3	+4 -4	+4.5 -4.5	+5.5 -5.5	+6.5 -6.5	+8 -8	+9.5 -9.5	+11 -11	+12.5 -12.5	+14.5 -14.5	+16 -16	+18 -18	+20 -20
js 9	+12 -12	+15 -15	+18 -18	+21 -21	+26 -26	+31 -31	+37 -37	+43 -43	+50 -50	+57 -57	+65 -65	+70 -70	+77 -77
js 11	+30 -30	+37 -37	+45 -45	+55 -55	+65 -65	+80 -80	+95 -95	+110 -110	+125 -125	+145 -145	+160 -160	+180 -180	+200 -200
k 5	+4 -4	+6 -6	+7 -7	+9 -9	+11 -11	+13 -13	+15 -15	+18 -18	+21 -21	+23 -23	+24 -24	+25 -25	+26 -26
k 6	+6 -6	+9 -9	+10 -10	+12 -12	+15 -15	+18 -18	+21 -21	+25 -25	+28 -28	+33 -33	+36 -36	+40 -40	+45 -45
m 5	+6 +2	+9 +4	+12 +6	+15 +7	+17 +8	+20 +9	+24 +11	+28 +13	+33 +15	+37 +17	+43 +19	+46 +21	+50 +23
m 6	+8 +10	+12 +4	+15 +6	+18 +7	+21 +8	+25 +9	+30 +11	+35 +13	+40 +15	+46 +17	+52 +20	+57 +21	+63 +23
n 6	+12 +10	+16 +8	+19 +10	+23 +12	+28 +15	+33 +17	+39 +20	+43 +21	+52 +23	+60 +25	+66 +26	+71 +27	+80 +37
p 6	+12 +6	+20 +12	+24 +15	+29 +18	+35 +22	+42 +22	+51 +26	+59 +32	+68 +37	+79 +43	+88 +50	+98 +56	+108 +68