



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRÍO MEDIANTE ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN

Carlos Enrique González Sicay

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández

Guatemala, febrero de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRÍO MEDIANTE
ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ENRIQUE GONZÁLEZ SICAY

ASESORADO POR EL INGENIERO VÍCTOR MANUEL RUIZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Jorge Chilo Siguere Rockstroh
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRÍO MEDIANTE ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 29 de abril de 2004.


Carlos Enrique González Sicay

Guatemala, 05 de octubre de 2006

Ingeniero
Fredy Mauricio Monroy Peralta
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala


Ing. Monroy

Por medio de la presente informo a usted, que he procedido a revisar el trabajo de graduación elaborado por el estudiante, Carlos Enrique González Sicay, con carné 1997-13140, de la carrera de Ingeniería Mecánica, cuyo título es: **"DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRÍO MEDIANTE ANALISIS DE LA CORROSIÓN"**.

Considero que el trabajo presentado por le estudiante Carlos Enrique González Sicay, ha sido desarrollado cumpliendo con los requisitos reglamentario y siguiendo las recomendaciones de la asesoría, por lo que doy mi aprobación y solicito el tramite correspondiente.

Sin otro particular me suscribo de usted,

Atentamente,


Ing. Victor Manuel Ruiz Hernández
Asesor
Colegiado No. 4620



El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRÍO MEDIANTE, ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN, del estudiante **Carlos Enrique González Sicay** recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área

Guatemala, octubre de 2006.

/behdei



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales al Trabajo de Graduación titulado DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRÍO MEDIANTE ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN, del estudiante **Carlos Enrique González Sicay**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
DIRECTOR



Guatemala, febrero de 2007.

/s/bedei

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 037.2007

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE TRABAJO EN FRIO MEDIANTE ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Enrique González Sicay** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, febrero de 2007

/gdech



AGRADECIMIENTOS A:

EL SER SUPREMO

Por permitirme terminar este trabajo.

MI MADRE

Por darme la vida, consejos y libertad de elegir mi camino.

MI TÍA

Que sin su apoyo no hubiera sido posible estudiar la carrera que hoy culmino con este trabajo.

MI ESPOSA

Por enseñarme a perseverar.

MI ABUELA

Por apoyarme siempre.

MIS HIJOS

Por cambiarme la forma de ver la vida.

**MIS HERMANOS Y
PRIMOS**

Por apoyarme siempre

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1 MARCO TEÓRICO	
1.1 Corrosión de metales	1
1.1.1 Tipos de corrosión en los metales	2
1.1.2 Qué es una reacción de oxidación-reducción (Redox).	8
1.1.3 Reacciones anódicas y catódicas	9
1.1.4 Diferencia de potencial o electronegatividad de los elementos metálicos	11
1.1.5 Potencial o electronegatividad de los metales en diversas soluciones	15
1.1.6 Ejemplos de casos microscópicos de corrosión galvánica	18
1.1.7 Efectos de la temperatura en la corrosión	20
1.2 Trabajo en frío sobre metales	22
1.2.1 Efecto del esfuerzo sobre las estructuras metálicas	23

1.2.2	Deformación plástica, deformación permanente y deslizamiento	24
1.2.3	Dislocaciones	26
1.2.4	Trabajo en frío o endurecimiento por trabajo en frío	38
1.2.5	Métodos para fijar marcas sobre metales	42

2 METALES, ALEACIONES, CARACTERÍSTICAS Y SUS APLICACIONES

2.1	Hierro y aceros	47
2.2	Aluminio	52
2.3	Magnesio	54
2.4	Cobre	55
2.5	Níquel	57
2.6	Zinc	58

3 FUNCIONAMIENTO Y METODOLOGÍA

3.1	Cómo funciona la reactivación de marcas en metales	59
3.1.1	Procesos moleculares de la estructura	59
3.1.2	Procesos macroscópicos o visuales	63
3.1.3	Efectividad del método	65
3.2	Metodología	66
3.2.1	Preparación de la pieza	66
3.2.2	Aplicación del reactivo	67
3.2.3	Neutralización de la pieza	68
3.2.4	Limpieza de la pieza	69

3.3	Determinación del reactivo a aplicar	69
3.3.1	El material de la pieza determina el reactivo a utilizar	69
3.3.2	Identificación de metales, aleaciones y/o grupos de metales	71
3.3.2.1	Prueba de magnetismo	71
3.3.2.2	Prueba de efervescencia	72
3.3.2.3	Prueba de manchado	72
3.3.2.4	Otras características que ayudan a la identificación	73

4 TRABAJO DE CAMPO

4.1	Método experimental	75
4.1.1	Descripción de la prueba de reactivación de marcas	75
4.1.2	Parámetros a medir	78
4.1.3	Características de la probeta	81
4.1.4	Características del marcado	82
4.1.5	Formas de obliterar	83
4.2	Pruebas experimentales: reactivación de marcas en aleaciones ferrosas:	83
4.2.1	Aceros de baja y alta aleación	84
4.2.2	Aceros inoxidables	88
4.2.3	Fundiciones	89
4.3	Pruebas experimentales: reactivación de marcas en aleaciones no ferrosas:	90
4.3.1	Aluminio y sus aleaciones	90
4.3.2	Cobre y sus aleaciones	96

4.3.3	Aleaciones de magnesio	103
4.3.4	Níquel	105
4.3.5	Zinc	107
4.4	Resultados y observaciones	109
CONCLUSIONES		113
RECOMENDACIONES		115
BIBLIOGRAFÍA		117
ANEXO		119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama de una semi-celda para medir el potencial	13
2	Semi-celdas	17
3	Efectos de la temperatura en la corrosión	22
4	Deslizamiento atómico	26
5	Dislocación en 2D	27
6	Dislocación en 3D	27
7	Movimiento atómico	28
8	Analogías de dislocación	29
9	Variación de la energía de la retícula con la posición de una dislocación de borde	31
10	La dislocación de borde	32
11	Desplazamiento relativo de retícula producido por el movimiento de deslizamiento de una dislocación de borde	33
12	La dislocación de tornillo	34
13	El desplazamiento helicoidal producido por dislocaciones de tornillo	35
14	Macla	37
15	Deslizamiento y macla	38
16	Correlación entre el trabajo en frío y la curva-deformación	39
17	Troquelado en frío	60
18	Alteración de la estructura	60
19	Trabajo en frío en la estructura	61
20	Oxidación y reducción de metales	63
21	Recuperación de caracteres troquelados en frío	64

TABLAS

I	Potenciales estándar oxidación-reducción para reacciones de corrosión	15
II	Potenciales de semi-celda de varias aleaciones en agua salada	17
III	Uso típico de los aceros al carbono simples	48
IV	Aceros de alta aleación	49
V	Uso típico de los aceros inoxidable	50
VI	Súper aleaciones: aleaciones de base hierro y níquel	51
VII	Uso típico del hierro blanco, gris, dúctil y maleable	52
VIII	Uso típico de las aleaciones de aluminio	53
IX	Uso típico de las aleaciones de magnesio	55
X	Uso típico de las aleaciones de cobre	56
XI	Uso típico de las aleaciones de níquel	57
XII	Colores para algunos grupos metálicos	73
XIII	Reactivos para aleaciones ferrosas	84
XIV	Aplicación de los reactivos 1 y 2, en un acero de baja aleación	85
XV	Aplicación de los reactivos 1 y 3, en un acero de baja aleación	86
XVI	Aplicación de los reactivos 1 y 4, en un acero de baja aleación	87
XVII	Aplicación de los reactivos 1 y 2, en aceros inoxidable ferríticos	88

XVIII	Aplicación de los reactivos 1, 2, 3 y 4 en fundiciones	89
XIX	Reactivos para aluminio y sus aleaciones	90
XX	Aplicación del reactivo 5 en aluminio	91
XXI	Aplicación del reactivo 6 en aluminio	92
XXII	Aplicación del reactivo 7 en aluminio	93
XXIII	Aplicación del reactivo 8 en aluminio	94
XXIV	Aplicación del reactivo 9 en aluminio	95
XXV	Reactivos para cobre y sus aleaciones	97
XXVI	Aplicación del reactivo 5 en latón	98
XXVII	Aplicación del reactivo 6 en latón	98
XXVIII	Aplicación del reactivo 7 en latón	99
XXIX	Aplicación del reactivo 9 en latón	99
XXX	Aplicación del reactivo 5 en bronce	100
XXXI	Aplicación del reactivo 6 en bronce	100
XXXII	Aplicación del reactivo 7 en bronce	100
XXXIII	Aplicación del reactivo 9 en bronce	101
XXXIV	Aplicación del reactivo 5 en cobre	101
XXXV	Aplicación del reactivo 6 en cobre	102
XXXVI	Aplicación del reactivo 7 en cobre	102
XXXVII	Aplicación del reactivo 9 en cobre	102
XXXVIII	Reactivos para aleaciones de magnesio	104
XXXIX	Aplicación del reactivo 5 en aleaciones de magnesio	104
XL	Aplicación del reactivo 6 en aleaciones de magnesio	104

XLI	Aplicación del reactivo 7 en aleaciones de magnesio	105
XLII	Aplicación del reactivo 9 en aleaciones de magnesio	105
XLIII	Reactivos utilizados en aleaciones de magnesio	106
XLIV	Aplicación del reactivo 1 en aleaciones de magnesio	107
XLV	Aplicación del reactivo 2 en aleaciones de magnesio	107
XLVI	Aplicación del reactivo 7 en aleaciones de magnesio	107
XLVII	Aplicación del reactivo 9 en aleaciones de magnesio	107
XLVIII	Reactivos para aleaciones que contengan zinc	108
XLIX	Aplicación del reactivo 1 en aleaciones de Zinc	108
L	Aplicación del reactivo 10 en aleaciones de Zinc	108
LI	Total de reactivos utilizados	109
LII	Resultados en la aplicación de cada uno de los reactivos	110

GLOSARIO

Acero	Aleación de hierro y carbono, con un contenido de 0.02 a 2.11 de carbono.
Acero inoxidable	Acero con alta aleación de cromo y con frecuencia níquel para mejorar la resistencia a la corrosión.
Ácido	Sustancia que cede iones de hidrógeno.
Agente oxidante	Sustancia que gana electrones, es decir, se reduce.
Agente reductor	Sustancia que pierde electrones, es decir, se oxida.
Aleaciones ferrosas	Combinación de elementos metálicos, que tienen al hierro como metal base.
Aleaciones no ferrosas	Combinación de elementos metálicos, que no tienen al hierro como metal base.
Aleante	Elemento metálico o no metálico, que es agregado a un metal base para dar características deseadas.
Ánodo	Electrodo de una celda en el cual el metal se disuelve; es el polo negativo.
Austenítico	Que posee la fase austenita, el cual es hierro y FCC, con un contenido máximo de 2.11% de carbono.

Base	Sustancia que cede iones hidróxidos.
Bronce	Aleación de cobre con uno o más metales como el estaño, aluminio o silicio.
Cátodo	Electrodo de una celda en el cual los iones metálicos se depositan o se producen iones negativos.
Deformación elástica	Deformación de un material por tracción o compresión, que al retirar el esfuerzo el material vuelve a sus dimensiones originales.
Deformación plástica	Deformación permanente de un material, por aplicación de tracción o compresión.
Deslizamiento	Movimiento cizallante de la estructura de un material.
Dislocación	Línea de átomos ausentes que conlleva a una región de fácil deslizamiento.
Electrolito	Sustancia que se rompe en iones cuando entra en solución.
Estampado	Método de trabajo en frío, mediante el cual se le da forma al metal con una matriz.
Ferrítico	Que posee la fase ferrita, el cual es hierro α BCC, con un contenido máximo de 0.022% de carbono.

Hierro	Elemento metálico, no posee aleantes.
Inconel	Aleación de níquel y 15% de cromo.
Ión	Átomo que ha perdido o ganado uno o más electrones.
Latón	Aleación de cobre y zinc, comúnmente en proporciones de 65 y 35%, respectivamente.
Límite elástico	También llamado límite de fluencia y es a partir de donde se considera que el material empieza a presentar deformación plástica.
Macla	Desplazamiento de los átomos de un lado del plano, en una cantidad proporcional a la distancia del plano.
Martensítico	Que posee la fase martensita, la cual es una fase fuera de equilibrio, que consiste en hierro tetragonal de cuerpo centrado con carbono en solución sólida sobresaturada.
Material homogéneo	Material que posee la misma cantidad de aleantes en toda su estructura, y las mismas características del grano.
Monel	Aleación de níquel y 30% de cobre.
Obliterar	Eliminar o borrar.
Orín	Hidróxido férrico hidratado.

Oxidación	Es cualquier cambio químico en el cual una sustancia pierde electrones.
Pasivación	Formación de una película de producto de la reacción (óxido por ejemplo) que inhibe la reacción posterior, es decir, que continúe la corrosión.
Perlita	Mezcla de las fases α y de carburo de hierro en placas paralelas, producida por la transformación de la austenita.
Reactivo	Sustancia que interviene en una reacción química.
Reducción	Es cualquier cambio químico en el cual una sustancia gana electrones.
Trabajo en frío	Deformación del material por debajo de la temperatura de recristalización.
Tratamiento térmico	Proceso en el cual un material adquiere características especiales, mediante la aplicación de cierta cantidad de calor y una forma especial de enfriamiento.

RESUMEN

En el presente trabajo se verifica si mediante la aplicación de reactivos oxidantes o reductores, o la combinación de ambos, sobre piezas a las cuales se les ha troquelado en frío caracteres y se hayan eliminado los mismos, se logran visualizar las siluetas de dichos caracteres.

Para lo anterior se estudió cómo funciona la corrosión, las características de los grupos metálicos y se estructuró un método para el trabajo de campo, este último se realizó troquelando y borrando caracteres a piezas de diferentes aleaciones, para posteriormente aplicar diferentes reactivos y verificar si los resultados eran los esperados.

Para saber más o menos qué reactivos aplicar y de esa forma reducir el número de aplicaciones y por lo tanto, tiempo, se tomó como base datos de manuales que dan características de los ácidos y compatibilidad de reacción con metales.

Los resultados y la información obtenida del trabajo de campo es valiosa, sobre todo para el área forense. Además, se confirma que el área trabajada en frío de una pieza metálica, se corroe con mayor rapidez que el resto de la misma, la cual no ha sido trabajada en frío.

OBJETIVOS

- **GENERAL**

Optimizar los métodos de aplicación de reactivos químicos para la recuperación de marcas que han sido alteradas en superficies metálicas.

- **ESPECÍFICOS**

1. Fundamentar científicamente cómo funciona la recuperación de marcas obliteradas sobre metales.
2. Elaborar un método que permita identificar el grupo metálico o aleación del que está fabricada la pieza.
3. Detallar los reactivos más útiles para la recuperación de marcas borradas sobre superficies metálicas.
4. Optimizar los procedimientos ya existentes para la recuperación de marcas sobre superficies metálicas.

INTRODUCCIÓN

Cuando se troquelan caracteres (números, letras, logotipos u otros) sobre piezas metálicas sólidas, se está realizando trabajo en frío sobre la misma, la superficie donde se realizó el trabajo en frío se corroe con más velocidad que el resto de la misma, esto se debe a que el material en los límites del grano está en un potencial de alta solución debido a las concentraciones de las dislocaciones que conducen a una unión deficiente y a una mayor energía de deformación. Esto significa que, si se aplica un ácido corrosivo a propósito sobre una pieza que ha sido trabajada en frío, mostrará corrosión diferencial en su estructura.

Lo más común y lo que cotidianamente se observa es que un ácido corroe un metal, sin embargo, cuando se tienen dos metales unidos y los mismos tienen una diferencia de potencial apreciable, existe corrosión galvánica, es decir, un metal debilita y reacciona con otro, mediante una reacción de oxidación-reducción (Redox), en la cual existe un intercambio de electrones, formando un nuevo compuesto o aleación.

La oxidación es la pérdida de electrones por parte de un metal y la reducción es la ganancia de electrones por parte del mismo, esto es la base de la corrosión, y es que en todos los tipos de corrosión siempre se lleva a cabo mediante una reacción de oxidación-reducción. Ahora bien, si se controlan

estos procesos se pueden restaurar o recobrar marcas que hayan sido borradas por esmerilamiento, limadura o desgaste de superficies metálicas.

Para ejemplificar, se tiene como muestra una pieza de acero en la cual ha sido borrado el número uno por ejemplo, si se aplica sobre el área donde anteriormente existió ese número, una solución ácida oxidante, se lograría que el metal perdiera electrones (oxidación), luego aplicamos una solución ácida reductora, pero a ésta le añadimos también un metal reductor, es decir un metal que esté dispuesto a donar electrones, se lograría no sólo que el metal después de ser reducido fuera soluble en la solución ácida reductora, sino que además reaccionará con el metal reductor, formando compuestos o aleaciones nuevas; ahora debe recordarse que la parte trabajada en frío se corroe con más velocidad que el resto de la pieza, por tanto mostraría en qué partes de la pieza se ha realizado algún tipo de trabajo en frío, esto es lo que realmente interesa.

A través de la serie de procesos anteriores se lograría recuperar las marcas que hayan sido borradas por esmerilamiento o limadura, siempre y cuando haya quedado trabajo en frío por debajo de la superficie alterada.

No todas las aleaciones se comportan como el acero, con los mismos ácidos, bases y con el mismo metal reductor, pero los procesos descritos anteriormente se utilizan ya sea, primero reduciendo el metal y luego oxidando o viceversa, siempre y cuando escojamos los reactivos y el procedimiento de aplicación adecuado, y ese es uno de los propósitos del presente trabajo, dar procedimientos e indicar qué reactivos se deben utilizar de acuerdo al metal que se trabaje, tomando en cuenta algunos métodos para la identificación de grupos de metales y/o aleaciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Corrosión de metales

Si una barra de acero es expuesta a un ambiente húmedo, durante un determinado tiempo, la superficie de la misma cambiara de color, muchas veces adquiere un tono rojizo, y esto es debido a que el acero reacciona con la humedad que se encuentra en el ambiente, dando como resultado el óxido, que es lo que le da el color rojizo a la pieza. La reacción que se lleva a cabo entre el acero y la humedad del ambiente se le denomina Corrosión, y da como resultado la debilitación del metal, produciendo diferentes efectos y características, como el cambio de color superficial, grietas, picadura, pérdida de un metal en la aleación, entre otros.

Cada metal reacciona a diferente velocidad con la humedad, además, se debe tomar en cuenta que el metal no solo reacciona con la humedad, si no, también con otros ambientes a los que es expuesto, por ejemplo, gases, ácidos y metales de otro tipo, inclusive el mismo metal puede reaccionar entre si, pero esto es debido a las diferentes fases que existen en el mismo, o sea que existe una corrosión inter-granular. De tal forma que existe una diversidad de ambientes corrosivos, a los cuales el metal reaccionará de diferente manera, presentando diferentes efectos y características. Con base en lo anterior se pueden analizar los diferentes tipos de reacciones que se llevan a cabo entre un metal y su ambiente o entre metales, tomando en cuenta la reacción química que da lugar a la corrosión.

1.1.1 Tipos de corrosión en los metales

La corrosión de un metal, básicamente se da cuando cede electrones, lo que significa que sufre un desgaste y cambia sus características originales, debilitándose. Se analizarán los fenómenos que se encuentran con más frecuencia y que se les da un nombre especial, además, se pueden utilizar como ejemplo para describir como se llevan a cabo las reacciones químicas y las características que presentan tanto a nivel macroscópico como microscópico. Los fenómenos que se analizaran son: Corrosión galvánica o inter metálica, los casos que se presentan de ésta, macroscópica y microscópicamente, disolución selectiva, daño por hidrógeno, celdas de concentración de oxígeno, y corrosión por picadura y por rendija.

1.1.1.1 Corrosión Galvánica o Inter-metálica

La corrosión galvánica ocurre cuando existen dos metales en contacto y entre ellos hay una diferencia de potencial eléctrico, de tal forma que uno de ellos dona electrones (el más electronegativo) y el otro acepta electrones (el menos electronegativo), debilitándose el primero y fortaleciéndose el segundo. Este fenómeno ocurre a gran escala por ejemplo, cuando tenemos en contacto hierro y aluminio, o a escala microscópica cuando en una barra de acero al carbono, tenemos dos o más fases, podrían ser perlita esferoidal y perlita laminar. En el primer caso, el aluminio es el metal más electronegativo, en el segundo caso la perlita laminar es la más electronegativa, de tal forma que existe una diferencia de potencial eléctrico, por lo tanto ocurre el fenómeno de corrosión galvánica, ambos fenómenos los describiremos a continuación.

Para los casos macroscópicos de corrosión galvánica se analiza la lámina galvanizada, ya que es una aplicación útil de los conocimientos que se tienen sobre la corrosión galvánica o inter metálica. La lamina galvanizada consta de acero cubierto por una capa de zinc, ¿por qué se utiliza una combinación de estos metales?, la razón es la siguiente: El acero de bajo contenido de carbono tiene un potencial eléctrico estándar, respecto al hidrógeno de -0.440 voltios y el zinc tiene -0.763 voltios, vemos que el zinc es mas electronegativo que el hierro, lo que da motivo que al estar en contacto, se corroerá en cualquier ambiente corrosivo, primeramente el zinc por ser el mas electronegativo, protegiendo la estructura de acero, que es lo que nos interese, agregando un metal de sacrificio para tal efecto, en este caso es zinc. Al igual que el anterior efecto, existen muchas aplicaciones de metales de sacrificio, así como también existen muchos casos macroscópicos de corrosión galvánica o inter-metálica.

Para los casos microscópicos de corrosión galvánica o inter-metálica se utilizará el ejemplo de la construcción de una silla con tubos metálicos de acero, cuando para ello se doblan los mismos en frío, las parte curvadas de los tubos, se corroen primero y a una mayor velocidad que el resto de la pieza, esto es debido a que en una aleación homogenizada como un tubo metálico, por ejemplo, el material en los límites del grano esta en un potencial de alta solución debido a las concentraciones de las dislocaciones que conducen a una unión deficiente y a una mayor energía de deformación, por tal motivo el material trabajado en frío tiende a corroerse más que el material homogenizado. El ambiente ataca a toda la pieza por igual, sin embargo, se corroe la parte más electronegativa, es decir, la parte doblada o trabajada en frío, debilitándose esta última y manteniéndose sin signos de corrosión las partes no trabajadas en frío, por un largo tiempo, hasta que se haya debilitado o corroído totalmente la parte curvada.

Se observa que aquí esta ocurriendo una corrosión galvánica en una pieza fabricada de metal de una sola fase, sin embargo debido al trabajo en frío realizado en partes de la pieza, se forman diferencias de potenciales eléctricos, lo cual conduce a una corrosión diferencial, por lo que si se desea saber si una pieza ha sido trabajada en frío en alguna de su partes o áreas, se tendría que atacar químicamente la pieza y la pieza mostraría donde a sido trabajada en frío, este fenómeno es la base del presente trabajo, sumado a ello algunas características de los metales, ácidos y bases que se examinarán más adelante. En el presente se dedica un sub-capítulo exclusivamente a ejemplificar la corrosión galvánica microscópica, en el cual se expone la base del por qué se logra determinar en que áreas fue la pieza trabajada en frío.

1.1.1.2 Disolución Selectiva

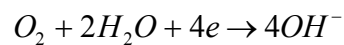
Se continúa con los tipos de corrosión, aunque anteriormente se mencionó que la base de nuestro trabajo es la corrosión diferencial, y que es un fenómeno microscópico de la corrosión galvánica. Sin embargo, las reacciones que se llevan a cabo en los restantes tipos de corrosión ayudan a comprender mejor el proceso, además de llevarse a cabo en ellas algunas reacciones que se utilizarán en la parte experimental del presente. Un ejemplo de la disolución selectiva es la tubería de hierro fundido gris, en el cual la matriz de hierro se disuelve lentamente, dejando el grafito insoluble, esto se denomina corrosión gráfrica, es decir, que se debilita únicamente la matriz de hierro. El latón presenta también este fenómeno cuando se expone al agua potable o salada, el latón puede desarrollar capas o tapones de material con la coloración del cobre, si se observa con un mayor aumento, se notará que son áreas esponjosas de baja resistencia de cobre, donde se ha extraído el zinc.

El fenómeno se lleva a cabo de la siguiente forma: El latón se disuelve ligeramente y luego los iones de cobre son desplazados por el zinc que se disuelve y el cobre se deposita, dando como resultado áreas esponjosas de baja resistencia mecánica.

1.1.1.3 Daño por presencia de hidrógeno

En el movimiento básico atómico, en la corrosión, el hidrógeno descargado en un cátodo podría formar burbujas o disolverse en el metal y luego difundirse a través de este. En el burbujeo de hidrógeno, el hidrógeno atómico (H), se difunde a través del metal y, al encontrar un vacío, se aloja en éste formando hidrógeno molecular (H₂) y ejerce alta presión teniendo a expandir el vacío. La presión del hidrógeno molecular en equilibrio con el hidrógeno atómico está por encima de las 10⁵ atmósferas (1.033x10⁶ kg /m²).

Se explica lo que son las celdas de concentración de oxígeno para una mayor comprensión, cuando se coloca una gota de agua sobre una superficie pulida de hierro, este último puede corroerse, este fenómeno se lleva cabo así:

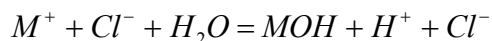


Las anteriores ecuaciones, son las de una celda por concentración de oxígeno que involucra la solución de hierro en el ánodo ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$), -0.440 voltios, y la descarga de electrones para formar (OH^-), en el cátodo ($O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$), +0.401 voltios, estos forman 0.841 voltios. El fenómeno tiene la siguiente secuencia 1) Algo de hierro se disuelve en el agua ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$). 2) El agua y el oxígeno disuelto en ella reaccionan para absorber los electrones producto de la disolución del metal ($O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$). 3) El oxígeno en el agua solamente puede reemplazarse rápidamente en el borde de la gota, en esta región existe una concentración alta de oxígeno, de tal forma que cumple la función de cátodo. 4) El hierro se disolverá dentro de la gota, pero una parte irá en la solución que esta más cercana a las regiones del borde que en el centro. Esto se debe a que hay una mayor resistencia por parte de los electrones en moverse desde el centro, es decir, los ánodos y los cátodos se favorecen cuando están más cercanos entre sí. 5) Se forma un anillo de orín en el borde de la gota, por que los iones de hierro migran más rápido que los iones de hidróxilo, de tal modo que el hidróxido férrico se oxida para formar hidróxido férrico hidratado (orín), esto ocurre en una reacción secundaria, esta secuencia de fenómenos se puede dar siempre y cuando haya en contacto metal y agua, por ejemplo en un deposito metálico para almacenar agua, se corroerá exactamente debajo de la línea de agua, de su superficie, por eso es recomendable tener lleno los tanques de almacenamiento de líquidos, para evitar que haya presencia de oxígeno y por lo mismo corrosión.

1.1.1.4 Corrosión por picadura y por resquicios (hendiduras pequeñas)

En muchos casos, la corrosión por picaduras y resquicios (hendiduras pequeñas), en lugar de un fenómeno de corrosión en toda el área de la pieza, es la que dicta la escogencia de los materiales. Es poco cómodo poseer un tanque de almacenamiento de gasolina que esta 99.9% intacto pero en el cual hay numerosas picaduras que han penetrado hacia el exterior. Esta situación molesta puede evitarse al comprender las causas de las picaduras y de ambientes que tienden a este fenómeno.

Se consideraba que una picadura simplemente era un tipo especial de corrosión por concentración de oxígeno, pero ello no explicaba la función importante de iones tales como los cloruros. El concepto mas reciente es que una picadura comienza a formarse en una discontinuidad de la superficie tal como una inclusión o marcas de esmeril. Una celda por concentración de oxígeno se desarrolla entre la discontinuidad y el material que lo circunda. El hecho de que involucre los iones de cloruro se debe a que dentro de la incipiente picadura los iones metálicos positivos se disuelven y acumulan. Éstos atraen los iones cloruro. La concentración de cloruro metálico comienza a formarse en la picadura. Si el cloruro es cloruro de hierro, por ejemplo, éste se hidroliza para dar HCl (ácido clorhídrico), mediante la siguiente reacción:



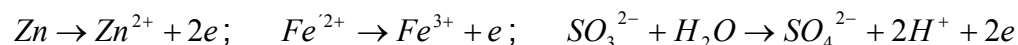
La combinación de iones cloruro e hidrógeno acelera el ataque.

1.1.2 ¿Qué es una reacción de oxidación-reducción (Redox)?

Las reacciones en que se transfieren electrones de un átomo, ión o molécula a otro se llaman reacciones de oxidación-reducción o redox. La oxidación es el proceso en que un átomo, ión o molécula pierde uno o más electrones; la reducción implica ganancia de uno o más electrones por parte de un átomo, ión o molécula. Un agente reductor es una sustancia que pierde uno o más electrones y en este proceso se oxida; un agente oxidante gana uno o más electrones y con ello se reduce. Dicho de otra forma, un reductor es un donador de electrones y un oxidante es un receptor de electrones.

La oxidación y la reducción no pueden tener lugar de forma independiente, sino simultáneamente por transferencia de electrones desde el donador al receptor. No obstante, es conveniente considerar los procesos de oxidación y de reducción por separado, expresándolos mediante semi-reacciones representada cada una de ellas por la ecuación de la semi-reacción ión-electrón. Estos son algunos ejemplos:

Semi-reacciones de oxidación:



Semi-reacciones de reducción:



Estas semi-reacciones son reversibles; en las semi-reacciones de oxidación representan una reducción si se escriben en dirección opuesta; y en las semi-reacciones de reducción son de oxidación en dirección opuesta. El fenómeno puede representarse de una forma general mediante la relación general:

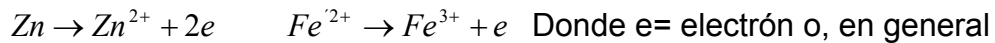


En que Ox representa la forma oxidada y Red la forma reducida de la sustancia que se transforma y n el número de electrones implicados en la semi-reacción. Combinando las ecuaciones de las semi-reacciones ión-electrón separadas previamente, se obtiene la ecuación de la reacción redox total. La transferencia de electrones de un lugar a otro constituye un flujo de corriente eléctrica. Para generar corriente eléctrica puede utilizarse una combinación adecuada de reacciones químicas (celdas galvánicas).

1.1.3 Reacciones anódicas y catódicas

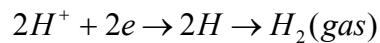
No importa que la corrosión sea espectacularmente rápida, como cuando el zinc se disuelve en ácido clorhídrico, o imperceptible, como el orín que se forma en la parte trasera del tablero de un automóvil, los tipos básicos de reacciones son los mismos.

Hay una ración anódica en la que el metal se solubiliza como ión; es decir, se corroe. Por ejemplo, en las reacciones que se acaban de mencionar,

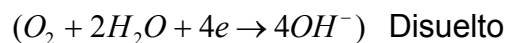


Los electrones fluyen a través de la parte metálica hasta alcanzar un punto donde pueden utilizarse (reacción catódica). Nuevamente se utilizan los ejemplos anteriores.

En el caso del zinc en un ácido, los electrones se combinan con iones hidrógeno en la superficie. Se forma hidrógeno atómico. Gran parte de éste se combina para formar hidrógeno molecular, el cual se desprende en burbujas, pero algo de él se disuelve en el metal. Esto es importante en casos de ataque de hidrógeno, que tratamos anteriormente:



En el caso de hierro la solución que rodea la pieza es neutral, y se tiene una reacción que involucra oxígeno y agua empleando los electrones del ánodo para formar iones hidróxido:



En agua pura no ocurrirá la corrosión del hierro en ausencia de oxígeno disuelto.

Para que la corrosión continúe, es esencial tener tanto reacciones anódicas como catódicas; de otra forma la carga aumenta, suspendiendo la corrosión.

La reacción anódica generalmente consiste en la disolución de un metal, pero hay una gran variedad de reacciones catódicas, dependiendo de las condiciones. En todas las reacciones catódicas son absorbidos electrones.

Hay varios puntos que se deben recalcar: En el ánodo los electrones se depositan en el metal a medida que los iones metálicos se desprenden. El metal en esta región se carga negativamente. En el cátodo, los electrones son absorbidos por iones. Esta región es positiva porque los iones con carga positiva se acumulan para recibir electrones.

1.1.4 Diferencia de potencial o electronegatividad de los elementos metálicos

Ya se han descrito los principales tipos de corrosión, la reacción de oxidación-reducción y las reacciones anódicas y catódicas, que básicamente son lo mismo solamente que se describen desde diferentes puntos de vista y con diferentes términos.

Lo anterior es muy importante para comprender la corrosión, ya que son los principios químicos por los cuales se lleva a cabo la corrosión.

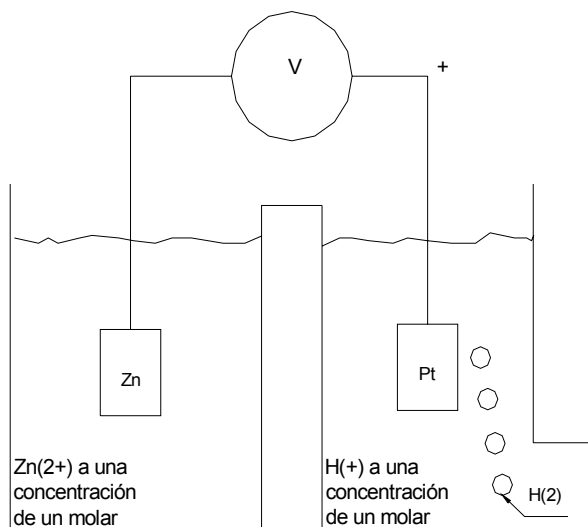
Sin embargo, no se ha examinado aún, que es lo que da lugar a que existan reacciones anódicas y catódicas, que básicamente son un tipo de redox, es decir, que da lugar a los fenómenos o tipos de corrosión. Pues bien, ahora se examinará la diferencia de potencial o electronegatividad de los metales, que es el por qué de la corrosión, se puede decir que es la fuerza impulsora.

Se tomará como ejemplo para explicar este principio lo siguiente: ¿Por qué el zinc se corroe en ácido diluido no oxidante como el HCl (ácido clorhídrico), mientras que el cobre no lo hace?. Cada metal tiene una fuerza impulsora diferente para solubilizarse, la cual puede medirse como voltaje. De un lado, se ve que elementos, como el zinc, tienen un fuerte voltaje negativo con respecto al hidrógeno. Por otro lado, con los metales nobles, como el oro, plata y cobre, no hay potencial impulsor para reemplazar el hidrógeno. Sin embargo, con un ácido oxidante, el cobre se disuelve debido a la diferencia de potencial entre la reacción $O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$ y el cobre.

Se debe conocer como se determina el potencial de cada uno de los metales, porque da otro punto de vista sobre la corrosión. Para poder explicar los principios básicos que determinan el potencial, se tomará una celda galvánica. Para establecer las condiciones normales se coloca un electrodo del metal que se va a ensayar en una solución de concentración 1 molar de sus iones. Una membrana semipermeable divide la celda. En la otra mitad de la celda se coloca un electrodo de platino en una solución de concentración de 1 molar de iones hidrógeno (producidos por un ácido).

Una corriente de hidrógeno burbujéa alrededor del electrodo de platino. Ver la figura 1. Por lo tanto, el platino solo sirve para absorber el gas y no toma parte en la reacción.

Figura 1. Diagrama de una semi-celda para medir el potencial



Si el metal es más reactivo que el hidrógeno, tenemos las siguientes reacciones de semi-celda cuando se conectan los electrodos:



Desarrollándose los potenciales indicados en la tabla I. Por otra parte, si el metal es más noble (menos reactivo) que el hidrógeno, tenemos:



Con estos ejemplos en mente se debe visualizar la situación si el metal no estuviera rodeado por una concentración de 1 molar de sus iones.

Si la concentración de los iones es menor que 1 molar, la fuerza impulsora para disolverlo sería mayor debido a que hay menos iones disponibles para la reacción inversa $M^+ + e \rightarrow M^0$. En cuanto en el voltaje del electrodo cuando se cambia diez veces en concentración 0.1 molar, por ejemplo, es de 0.0591 voltios. Esto es para el caso en el cual hay una transferencia de un electrón por ión que va a la solución. En el caso de iones bivalentes, el cambio de voltaje es de 0.0295 voltios y para los iones trivalentes 0.0197 voltios.

Si la concentración es mayor que 1 molar, el voltaje impulsor es correspondientemente menor. Estos efectos se derivan de la muy conocida ecuación de Nernst, la cual se puede simplificar para acomodarla a este caso a 25°C:

$$E = E_0 + \frac{0.0592}{n} \log C_{ion}$$

Donde

E = nueva fuerza electromotriz (fem),

E_0 = fuerza electromotriz estándar de la tabla I,

n = número de electrones transferidos como $M^0 + ne \rightarrow M^{n+}$

C_{ion} = concentración molar de iones.

Tabla I. Potenciales estándar oxidación-reducción para reacciones de corrosión

	Reacción de corrosión	Potencial voltios vs. electrodo normal de hidrógeno
↑ Más catódico.	$Au \longrightarrow Au^{3+} + 3e$	+1.498
	$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e$	+1.229
	$Pt \longrightarrow Pt^{2+} + 2e$	+1.200
	$Pd \longrightarrow Pd^{2+} + 2e$	+0.987
	$Ag \longrightarrow Ag^+ + e$	+0.799
	$2Hg \longrightarrow Hg_2^{2+} + 2e$	+0.788
	$Fe^{2+} \longrightarrow Fe^{3+} + e$	+0.771
	$4(OH)^- \longrightarrow O_2 + 2H_2O + 4e$	+0.401
	$Cu \longrightarrow Cu^{2+} + 2e$	+0.337
	$Sn^{2+} \longrightarrow Sn^{4+} + 2e$	+0.150
	$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e$	0.000
↓ Más anódico	$Pb \longrightarrow Pb^{2+} + 2e$	-0.126
	$Sn \longrightarrow Sn^{2+} + 2e$	-0.136
	$Ni \longrightarrow Ni^{2+} + 2e$	-0.250
	$Co \longrightarrow Co^{2+} + 2e$	-0.277
	$Cd \longrightarrow Cd^{2+} + 2e$	-0.403
	$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e$	-0.440
	$Cr \longrightarrow Cr^{3+} + 3e$	-0.744
	$Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2e$	-0.763
	$Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e$	-1.662
	$Mg \longrightarrow Mg^{2+} + 2e$	-2.363
	$Na \longrightarrow Na^+ + e$	-2.714
	$K \longrightarrow K^+ + e$	-2.925

1.1.5 Potencial o electronegatividad de los metales en diversas soluciones

Aún hay correcciones más serias que hacer al voltaje impulsor de un par de corrosión determinado, debido a que los metales rara vez se encuentran en soluciones de sus propias sales.

Por ejemplo, el orden de los potenciales de semi-celda en agua salada se da en la tabla II, para un grupo de aleaciones comerciales. Obsérvese que el aluminio y el zinc han cambiado de lugar comparados con la secuencia del potencial estándar de la tabla I.

Se revisa ahora el ánodo, el cátodo y sus potenciales de electrodo, porque éstos pueden ser difíciles de identificar. Se considera un pedazo de aluminio y un pedazo de hierro colocado en agua salada, pero sin conectarlos. Ver figura 2. Ambos metales tienden a corroerse debido a los ánodos y los cátodos localizados dentro de cada material. Esto se presenta debido a deshomogeneidades tales como impurezas y límites de granos. Al conectar los metales, el aluminio se vuelve anódico respecto al hierro, figura 3. Esto se puede determinar de la información de la tabla II, comparando el aluminio 1100 y el acero dulce (de bajo contenido de carbono). Se encuentra corrosión acelerada del aluminio y poca o ninguna corrosión del hierro.

El aluminio es, por lo tanto, el ánodo, y entrega electrones al circuito externo, o se al hierro. Por convención, la corriente es positiva y debe fluir en dirección opuesta al flujo de electrones. Sin embargo, el aluminio va a continuar entregando electrones al cátodo, los electrones se “deben consumir completamente”. Esto se logra en la superficie electrolito-hierro por medio de la reacción catódica $O_2 + 2H_2 + 4e \rightarrow 4OH^-$.

Figura 2. Semi-celdas (a) Ambos metales tienden a corroerse debido a los ánodos y cátodos localizados dentro de cada material. (b) Cuando los electrodos están conectados, el hierro no se corroe y el aluminio se convierte en ánodo.

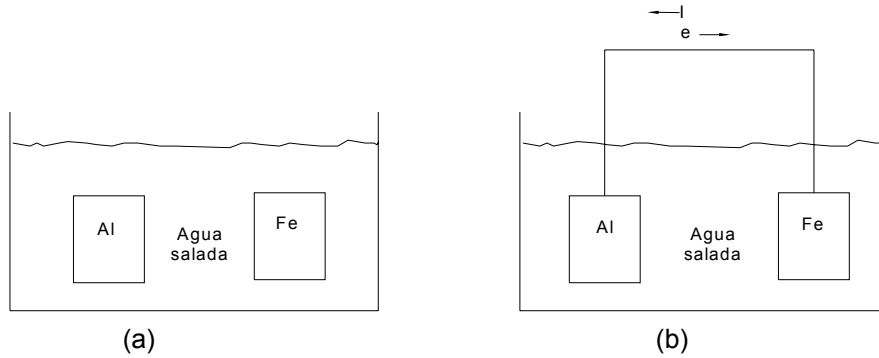


Tabla II. Potenciales de semi-celda de varias aleaciones en agua salada

Metal o aleación ^a	Potencial ^b voltios 0.1 N escala calomel
Magnesio	-1.73
Zinc	-1.10
7072, Alclad 3003, Alclad 6061, Alclad 7075	-0.96
520-T4	-0.92
5056, 7079-T6, 5456, 5083, 514.0, 518.0	-0.87
5154, 5254, 5454	-0.86
5052, 5652, 5086, 1099	-0.85
3004, 1185, 1060, 1260, 5050	-0.84
1100, 3003, 6053, 6061-T6, 6062-T6, 6063, 6363, Alclad 2014, Alclad 2024	-0.83
413, cadmio	-0.82
7075-T6, 356.0-T6, 360.0	-0.81
2024-T81, 6061-T4, 6062-T4	-0.80
355.0-T6	-0.79
2014-T6, 850.0-T5	-0.78
308.0	-0.77
380.0F, 319.0F	-0.75
296.0-T6	-0.72
2014-T4, 2017-T4, 2024-T3 y T4	-0.68 a -0.70 ^d
Acero blando	-0.58
Plomo	-0.55
Estaño	-0.49
Cobre	-0.20
Bismuto	-0.18
Acero inoxidable (serie 300, tipo 430)	-0.09
Plata	-0.08
Níquel	-0.07
Cromo	-0.4 a +0.18

Para prevenir dificultades con la polaridad y por lo tanto confusión en la identificación del ánodo y cátodo, se debe diferenciar entre circuitos externos e internos. Por ejemplo, el cátodo acepta electrones del circuito externo y por lo tanto es positivo. Sin embargo, acepta iones positivos del circuito interno (como sucede en las soluciones ácidas con la migración del ión H^+) y por lo tanto es negativo. Este concepto es muy importante en el caso de las baterías. Éstas se identifican positivas (más) y negativas (menos) en términos de la forma como se utilizaran en el sentido externo. Por lo tanto, el ánodo es el electrodo negativo y el cátodo es positivo, lo cual corresponde a la misma convención que se adopta para las celdas de corrosión.

1.1.6 Ejemplos de casos microscópicos de corrosión galvánica

Anteriormente ya se ejemplificó este tipo de corrosión, pero por ser la base del presente trabajo, se profundizara en ello.

Se supone que se tiene una muestra de una aleación con presencia de varias fases. ¿No podrán estos actuar como pequeños pares galvánicos y corroerse? De hecho, este efecto es la razón por la cual se puede distinguir las diferentes fases en la micro estructura. Generalmente no hay mucho que ver en la condición de las superficies pulidas; únicamente después del ataque químico se hacen visibles los detalles de la estructura. Existen muchos casos comerciales en los cuales es importante este comportamiento. Se analizan algunos ejemplos, en los cuales se concluirá dando la base del presente trabajo.

Deterioro de la soldadura del acero inoxidable de 18% Cr, 8% Ni: El acero inoxidable tipo 304 contiene como máximo 18% Cr, 8% Ni y 0.08% C. Generalmente se suministra como la estructura austenítica de una sola fase, que se obtiene por enfriamiento rápido desde temperaturas elevadas. Sin embargo, la fase $M_{23}C_6$ (es un carburo de hierro-cromo que puede tener hasta un 30% en peso de hierro. Con este porcentaje en peso de Fe, el contenido de cromo es mayor del 60% en peso para la estequiometría indicada) se puede precipitar, si el acero se recalienta en el campo bifásico. Durante la soldadura de la zona de la misma se calienta al estado líquido y se enfría lo suficientemente rápido como para evitar la precipitación del carburo. Sin embargo, hay una región adyacente a la soldadura que se calienta lo suficiente para precipitar $M_{23}C_6$. Esto generalmente ocurre en los límites de los granos. Debido al alto contenido de cromo del carburo, las regiones se empobrecen de cromo en el proceso de formar el carburo. El nivel de cromo cae por debajo del 10% en estas regiones cercanas al límite del grano. Por lo tanto, las regiones bajas en cromo no son pasivas (<10-13% Cr), mientras que el resto de la matriz es pasiva. La pregunta es ¿cómo perjudica esto al acero tipo 304?, y la respuesta es que se lleva a cabo acción galvánica entre la región de los límites del grano y las regiones con alto contenido de cromo dentro del grano. Con lo cual se corroe la matriz de hierro baja en cromo. Las partículas de $M_{23}C_6$ se recuperan después de la corrosión.

Se analiza rápidamente el caso del acero al carbono, con lo cual se demostrará que la acción galvánica no afecta solamente a los aceros de alta aleación. Un caso interesante en la tubería lisa de acero al carbono simple se denomina “corrosión en anillo serpeante”. Este ataque selectivo tiene lugar cerca del extremo del tubo que ha sido calentado especialmente para forjar la porción del reborde.

Este tratamiento produce una estructura de carburo de hierro esferoidizada que tiene un potencial de solución diferente que el resto no tratado del tubo. Se produce una forma circular de ataque cerca de la unión de las dos regiones.

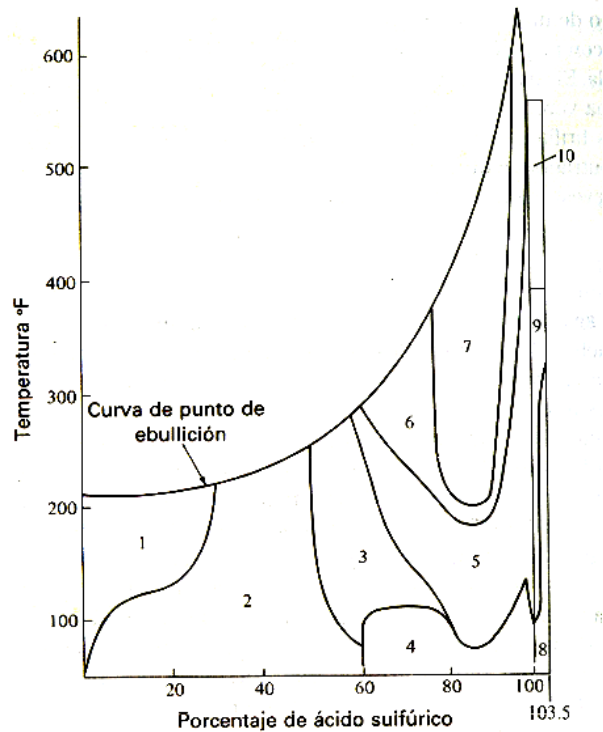
1.1.7 Efectos de la temperatura en la corrosión

Existen dos parámetros que inciden en la velocidad de la corrosión, la concentración del corrosivo y la temperatura a la que se encuentra la pieza y el ambiente, sin embargo la concentración se analizará en el área experimental o sea el trabajo de campo. Por el momento se dará una breve descripción de cómo afecta la temperatura a la velocidad de corrosión. Se tomará para este caso como ambiente corrosivo la inmersión de varios metales a diferentes temperaturas en ácido sulfúrico. En la figura 3, se tienen áreas en las cuales los materiales sufren un desgaste causado por la corrosión, aceptable, pero se analizará solamente el plomo, el acero inoxidable tipo 316 y el oro, comencemos con el plomo: El plomo en contacto con ácido sulfúrico, puede permanecer en él, con una concentración desde 0% hasta 96%, a una temperatura de hasta 175°F, sin presentar corrosión mayor a 20 milésimas de pulgada por año (desde la zona 1 hasta la zona 5). El acero inoxidable tipo 316, en contacto con ácido sulfúrico, puede permanecer en él, con una concentración hasta de 10%, a una temperatura de hasta 210°F (zona 1); con una concentración hasta 25%, a una temperatura de hasta 95% (zona 2); con una concentración de 80%, a una temperatura de hasta 140°F (zona 4), aproximadamente, sin presentar corrosión mayor a 20 milésimas de pulgada por año.

Y el oro que puede permanecer en contacto con ácido sulfúrico con una concentración de 0% hasta 100%, a una temperatura de hasta 600°F (en todas las zonas), sin presentar corrosión mayor a 20 milésimas de pulgada por año (una milésima de pulgada por año, es la cantidad de grosor del material que pierde en toda el área que presenta corrosión).

Se nota que la temperatura afecta significativamente la velocidad de la corrosión, dando como resultado que la velocidad de la corrosión es proporcional a la temperatura. Sin embargo para este caso, también la concentración es un factor muy importante, y que no puede interpretarse como la temperatura, donde la velocidad de la corrosión es proporcional a la misma, con la concentración por ejemplo, para las aleaciones que contengan alguno de los metales: hierro, cromo, níquel, titanio y aluminio, a temperatura ambiente, conforme se aumenta la concentración aumenta la velocidad de la corrosión, pero llega a un porcentaje en el cual, la velocidad de la corrosión en vez de aumentar se detiene, e incluso, evita que siga la corrosión al disminuir la concentración de nuevo, a este fenómeno se le denomina pasividad y la explicación es la siguiente: Cuando se sumerge acero inoxidable por ejemplo, en ácido nítrico al 5%, el metal se corroe a una velocidad que da lugar al desprendimiento de material de la pieza, conforme la reacción continúa, pero si se sumerge acero inoxidable en ácido nítrico al 80%, la velocidad de la corrosión es tan rápida, que no da lugar a que ocurra desprendimiento de material conforme la reacción continúa, lo que da motivo a que se forme una capa de óxido de hierro, la cual evita que el fenómeno continúe, debido a que existe una barrera entre el acero y el ácido nítrico, y esa barrera es la capa de óxido.

Figura 3. Efectos de la temperatura en la corrosión.



1.2 Trabajo en frío sobre metales

Para la fabricación de piezas metálicas se utiliza una diversidad de métodos, pero se pueden clasificar en dos grupos, métodos trabajados en frío y métodos trabajados en caliente, (aunque ha progresado bastante la metalurgia de polvos) la diferencia radica en que las piezas trabajadas en frío, la temperatura a la cual se manufacturan es inferior a un tercio de la temperatura de fusión del material, mientras que las piezas trabajadas en caliente el proceso se lleva a cabo por encima de esta temperatura.

El grupo que interesa es el que abarca los métodos de trabajo en frío, de ellos existen varios, por ejemplo: repujado, forjado, embutido profundo, laminado, extrusión, formado, trefilado y el estampado, entre otros, más adelante se hablara más ampliamente sobre los métodos que interesan. Ahora, lo importante es lo que estos métodos de trabajo en frío le ocasionan a la estructura del material a la hora de efectuarlos. La estructura cambia, sus características originales desaparecen y adquiere nuevas, para algunas aplicaciones mejores, para otras introducen desventajas, una desventaja para los metales utilizados en la industria, es la característica que permite realizar el presente trabajo, y esta es que el trabajo en frío, vuelve al material más anódico, mas propenso a la corrosión. Para comprender este fenómeno, primero se debe comprender que es lo que sucede a la estructura del material cuando se realiza trabajo en frío sobre él.

1.2.1 Efectos del esfuerzo sobre las estructuras metálicas.

Cuando un material se tensa por debajo de su límite elástico, la deformación resultante es temporal. La supresión del esfuerzo da como resultado un retorno gradual del objeto a sus dimensiones originales. Cuando un material se tensa más allá de su límite elástico, tiene lugar una deformación plástica o permanente, y no regresará a su forma original por la sola aplicación de una fuerza. La posibilidad de que un metal sufra deformación plástica es probablemente su característica más relevante en comparación con otros materiales. Todas las operaciones de formado, como son troquelado, prensado, hilado, laminado o rolado, forjado, estirado y extrusión, se relacionan con la deformación plástica. El comportamiento de un metal cuando se deforma plásticamente y el mecanismo mediante el cual ocurre es de interés esencial para perfeccionar la operación de trabajado.

Se puede llegar a la conclusión de que los metales se comportan de dos formas bajo esfuerzo, la primera es que se puede deformar un metal, mediante la aplicación de esfuerzo, y al liberarse la pieza regresará a su condición original, la otra es que se deforma un metal, mediante esfuerzo, y al suprimir el esfuerzo el material no regresa a su condición original, es decir, que la deformación permanece, todo va a depender de la cantidad de esfuerzo aplicado, para cada material existe, por supuesto, un esfuerzo límite en el cual el material deja de comportarse elástico e inicia a comportarse plásticamente.

1.2.2 Deformación plástica, deformación permanente y deslizamiento.

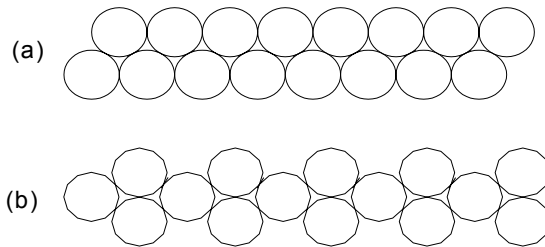
Si el monocristal de un metal es esforzado tensilmente más allá de su límite elástico, se alarga en forma ligera, aparece un escalón sobre la superficie indicando un desplazamiento relativo de una parte del cristal con respecto al resto y la elongación se detiene. Al aumentar la carga se producirá movimiento en otro plano paralelo y dará como resultado otro escalón. Es como si delgadas secciones vecinas del cristal se hubieran deslizado una sobre otra como cartas de baraja. Cada alargamiento sucesivo necesita un esfuerzo aplicado mayor y resulta en la aparición de otro escalón, que es realmente la intersección de un plano de deslizamiento con la superficie del cristal. El aumento progresivo de la carga eventualmente produce fractura del material.

Las investigaciones han demostrado que el deslizamiento ocurría en ciertos planos de átomos en el cristal y a lo largo de ciertas direcciones e estos planos.

El mecanismo mediante el cual un metal es deformado plásticamente se mostró de esta manera, que era un nuevo tipo de flujo, ampliamente distinto al flujo de líquidos o gases. Es un flujo que depende de la estructura perfectamente repetitiva del cristal que permite que los átomos en una cara de un plano de deslizamiento se rompan por esfuerzo cortante de sus vecinos originales de la otra cara, que permite el deslizamiento en forma organizada a lo largo de esta cara, llevando su propia mitad del cristal con ellos y por último unirse otra vez en un nuevo conjunto de vecinos casi tan perfectamente como antes. Cualquier movimiento en el cristal tiene lugar ya sea a lo largo de estos planos o de los paralelos a ellos.

Un factor más importante para determinar el movimiento de deslizamiento es la dirección y sentido del esfuerzo cortante sobre el plano de deslizamiento. El deslizamiento ocurre en direcciones en que los átomos están más empaquetados, ya que esto requiere la mínima cantidad de energía. También cabría esperar, ya que los átomos no están unidos por enlace directo sino que se mantienen juntos simplemente por los electrones libres, que estas filas de átomos compactamente empaquetados podrían deslizarse entre sí en forma muy fácil sin separarse. En la figura 4 se ve que los átomos de una fila en a) están juntos y las filas se hallan más apartadas verticalmente que las de b), de manera que se necesita menor fuerza para un desplazamiento horizontal dado, como sugiere la pendiente de las barras negras entre los átomos. Además, se necesita menor desplazamiento para mover los átomos a posiciones inestables, de donde tenderán hacia posiciones estables cuando estas se hallan cercanas entre sí.

Figura 4. Deslizamiento atómico: El flujo plástico se presenta cuando planos de átomos se deslizan uno sobre otro. Los planos de empaquetamiento compacto hacen esto más fácilmente en a) que los planos alineados en otra dirección como en b)



1.2.3 Dislocaciones

Ahora se analizarán las dislocaciones, que realmente son defectos de la estructura cristalina del material, las cuales son el producto de fundición, laminación, etc. Realmente existen millones de dislocaciones en una pieza de material, que son las que hacen la diferencia entre resistencia al esfuerzo real y teórico, pero esa no es la razón por la cual se analizarán las dislocaciones, sino por su influencia para disminuir la resistencia a la corrosión de un material. Existen dos tipos básicos de dislocaciones, de borde y de tornillo.

1.2.3.1 Dislocaciones de borde

Las dislocaciones de borde pueden visualizarse muy fácilmente como un medio plano extra de átomos en una retícula.

Lo anterior se muestra en dos dimensiones en la figura 5 y en tres dimensiones en la figura 6.

A la dislocación se le llama defecto lineal debido a que la localización de los puntos defectuosos producidos en la retícula por la dislocación se halla a lo largo de una línea. Esta línea corre a lo largo de la parte baja del medio plano extra mostrado en la figura 6.

Figura 5. Dislocación en 2D

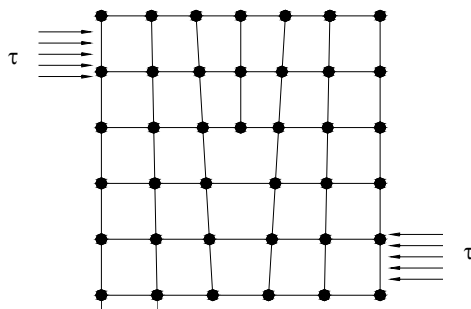
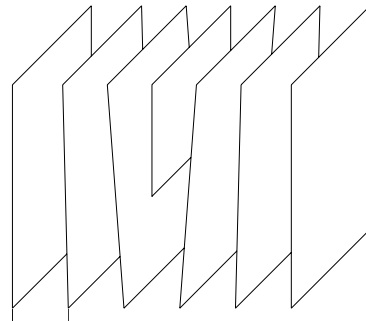
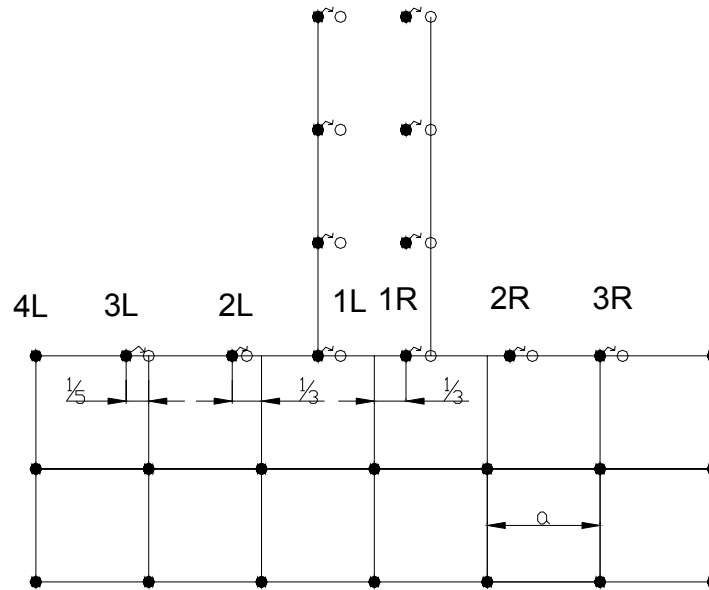


Figura 6. Dislocación en 3D



Si se aplica un esfuerzo cortante τ a un cristal que contiene una dislocación, como se muestra en la figura 5, el medio plano extra de átomos es empujado hacia la derecha hasta que por último emerge sobre la superficie formando el principio de la línea de deslizamiento. Ahora se considera lo que implica realmente el movimiento de la dislocación. Los círculos oscuros de la figura 7 muestran la situación de los átomos cuando el medio plano extra se sitúa en la posición 1. En este esquema simplificado, el medio plano extra de átomos yace sobre un plano situado simétricamente entre los dos átomos inferiores y ha empujado sus primeros vecinos más próximos, 3L y 1R, fuera de sus sitios reticulares por $1/3a$, los segundos vecinos más próximos 3L y 2R, por $1/5a$, y los terceros vecinos, 4L y 3R, no son afectados.

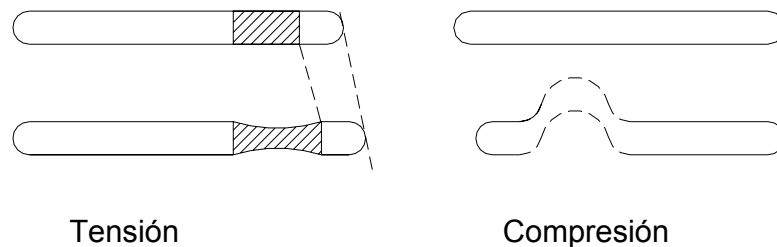
Figura 7. Movimiento atómico: Un dibujo simplificado del movimiento atómico asociado con el movimiento de una dislocación de borde.



Si un esfuerzo cortante hace que todos los átomos se muevan solo un poco hacia las posiciones de los círculos mostrados en blanco, el medio plano extra estará ahora a una longitud de un parámetro de retícula, a , a la derecha en la posición 2. Nótese que después de que el medio plano extra de átomos se ha movido a la posición 2, está compuesto de átomos diferentes en su totalidad. Los átomos que formaban el medio plano extra en la posición 1 se han desplazado sólo una pequeña distancia, $\frac{1}{6}a$, y al hacerlo se han desplazado fuera del plano de simetría, mientras que los átomos en 1R se desplazaron $\frac{1}{6}a$ hacia el plano de simetría y forman ahora el medio plano extra en la posición 2. Considérese el átomo 3R. Conforme el medio plano extra se desplaza hacia la derecha, este átomo se cambiará progresivamente hacia su derecha. El átomo 3R se cambiará hacia la derecha $\frac{1}{2}a$ cuando el plano extra se halle encima de él, y se cambiará a la derecha por exactamente a .

Nótese que este cambio se realiza por una alteración local, restringido a la región que rodea inmediatamente la dislocación, en forma similar al movimiento de una onda sobre la superficie del agua estancada. Por analogía, considérese una persona que trata de jalar una pesada alfombra sobre el piso, ejerciendo un jalón estacionario la alfombra, conforme él la jala, una onda propagante pasará debajo de la alfombra y puede moverse ésta en pequeños saltos con esfuerzo considerablemente menor. Millones de personas hacen uso diariamente de las ondas propagantes para extender las sábanas y las cobijas de las camas. Otras dos analogías interesantes sobre las dislocaciones las ha hecho notar Orowon. Un gusano se impulsa extendiendo una sección de su cuerpo moviendo así su cabeza hacia delante como se muestra en la figura 8a. Moviendo la sección que está en tensión a lo largo de su cuerpo hasta la cola, se impulsa todo el cuerpo hacia delante. La víbora jala su cola hacia adelante generando una región de compresión, la cual corre entonces hasta su cabeza moviendo de esa forma todo su cuerpo hacia adelante, como se muestra en la figura 8b. La naturaleza parece tener muchos ejemplos de movimiento análogo al movimiento de la dislocación.

Figura 8. Analogías de dislocación.

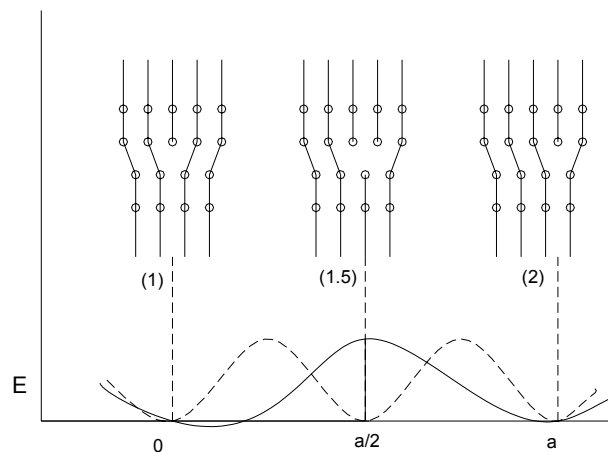


Ahora se considerará la cantidad de energía necesaria para mover una dislocación. Regresemos a la figura 7 y nótese que el movimiento de los átomos es simétrico con respecto al centro de línea, como se muestra en el cuadro de la parte baja de la figura. Por ejemplo, el movimiento del átomo 1L con relación a la red circundante es igual y opuesto al movimiento del átomo 1R. De aquí que si un enlace químico de un átomo 1R se contrae por la misma cantidad. Desde luego, la energía requerida para extender enlaces durante este movimiento será compensada por la energía liberada en contraer enlaces. Por lo tanto, este modelo simplificado muestra que en primera aproximación la energía para mover una dislocación será cero. Esto explica porque los metales son más débiles de lo que indica la resistencia teórica. Si existen dislocaciones en los sistemas de deslizamiento, su movimiento ocurrirá a esfuerzos cortantes muy bajos y su movimiento causará deslizamiento.

La figura 9, ilustra cómo el movimiento de las dislocaciones requiere un esfuerzo cortante finito. La parte superior de esta figura muestra una red como una dislocación moviéndose hacia la derecha. Las tres configuraciones de la parte de arriba que muestran el plano extra de átomos corresponden a las posiciones 1 y 2 de la figura 7 y también a una posición intermedia entre éstas dos posiciones. De aquí que las tres configuraciones representan un movimiento del plano extra hacia la derecha por vector de la red, a . La energía asociada con la dislocación será la misma en las posiciones 1 y 2. La energía será la misma en una posición intermedia solamente si el movimiento de los átomos ha sido completamente simétrico, conforme la dislocación se movió a la posición intermedia. El movimiento atómico simétrico descrito antes (figura 7) es solamente una aproximación de primer orden. Consecuentemente, la energía de la dislocación en posiciones intermedias se incrementará sobre sus energías en la posiciones 1 y 2.

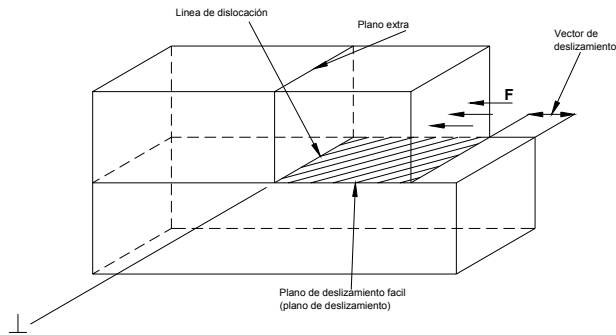
Las curvas de la figura 9 muestran dos posibles curvas de energía que dan la energía de la dislocación en todas las posiciones intermedias desde 1 hasta 2. Si la función energía tiene un valor mínimo cuando la dislocación se sitúa en los puntos 1 y 2, como se muestra para ambas curvas, entonces se requerirá una fuerza para moverla fuera de sus situaciones simétricas en las posiciones 1 ó 2. Esta fuerza que se requiere para mover una dislocación es la fuerza de Peierls o fuerza de Peierls-Nabarro. Los valores calculados de la fuerza de Peierls concuerdan razonablemente bien con los medidos del ERC en cristales iónicos, pero se ha hallado que son algo mayores que los ERC medidos en metales.

Figura 9. Variación de la energía de la retícula con la posición de una dislocación de borde.



Ahora se considera la dislocación de borde desde un punto de vista un poco diferente. Supóngase que se aplica una fuerza a la mitad superior del lado derecho del monocristal que se muestra en la figura 10.

Figura 10. La dislocación de borde.

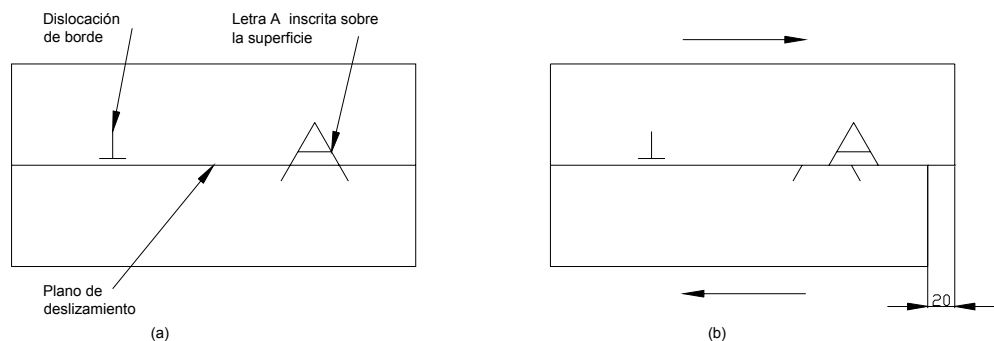


La fuerza hace que los átomos sobre la superficie del lado derecho se deslicen hacia la izquierda por un espaciado atómico y el movimiento se muestra por el vector de deslizamiento en la figura. Debido a que los átomos sobre la superficie del lado izquierdo no se han desplazado hacia la izquierda, este movimiento debe necesariamente generar un medio plano extra de átomos como se muestra en la figura. Hay un punto por recalcar antes de explicar las dislocaciones de tornillo. El deslizamiento de la dislocación hace que los átomos de un lado del plano de deslizamiento se desplacen un vector de Burgers con relación a los átomos del lado opuesto del plano de deslizamiento.

La figura 11, muestra la localización de una dislocación de borde y su plano de deslizamiento en un cristal. La letra A está inscrita sobre la superficie de modo que corta al plano de deslizamiento, como se muestra, y se aplica un esfuerzo cortante haciendo que la dislocación se mueva hacia la derecha por deslizamiento.

La figura 11 ilustra que el efecto neto del paso de esta dislocación es simplemente un traslado de la mitad superior del cristal por un vector b con relación a la mitad inferior del cristal.

Figura 11. Desplazamiento relativo de retícula producido por el movimiento de deslizamiento de una dislocación de borde.



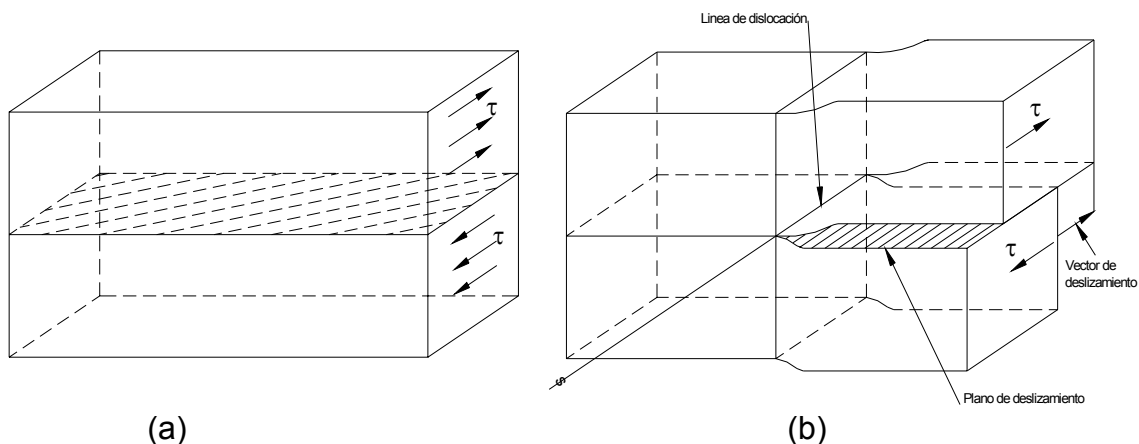
Ahora se resumen algunas de las propiedades más significativas de la dislocación de borde.

- La dislocación de borde puede visualizarse como un medio plano extra de átomos.
- El vector de Burgers es perpendicular a la línea de dislocación.
- El plano de deslizamiento se define por la línea de dislocación y el vector de Burgers.
- El movimiento por deslizamiento hace que los átomos sobre el plano de deslizamiento se desplacen un vector de Burgers con relación a los átomos bajo el plano de deslizamiento.
- El movimiento de trepado ocurre cuando cambia el tamaño del medio plano extra y es acompañado por generación o aniquilación de vacancias.

1.2.3.2 Dislocaciones de tornillo

Hay un segundo tipo fundamental de dislocación, la dislocación de tornillo, la cual es más difícil de visualizar geoméricamente. El origen de la dislocación de tornillo se atribuye frecuentemente a Burgers en 1939. Supóngase que se tomase una placa y se le aplicase un esfuerzo cortante en el extremo como se muestra en la figura 12a. Este esfuerzo cortante podría hacer que la placa se desgarrase en forma muy parecida a como se rompe un pedazo de papel a la mitad, según se ve en la figura 11b. El desplazamiento mostrado en la figura 12b. Es una representación de la geometría de una dislocación de tornillo. Nótese que la mitad superior del bloque se mueve (disloca) con respecto a la mitad inferior por un vector de deslizamiento fijo a través de algún plano de deslizamiento. La línea de dislocación de tornillo se sitúa en el borde principal de la alteración del bloque y es paralela al vector de deslizamiento. La dislocación de tornillo se simboliza algunas veces con una S entre la línea, como se muestra en la figura 14b. En la figura 12, no se puede apreciar claramente por qué la dislocación se llama dislocación de tornillo.

Figura 12. La dislocación de tornillo



La figura 13 muestra el circuito de Burgers en este plano en sentido de las manecillas del reloj mirando hacia abajo el sentido positivo de la línea de dislocación. El vector de Burgers es paralelo a la línea que apunta hacia el observador. Nótese que mirando abajo el sentido positivo de la línea de dislocación, un movimiento en sentido de las manecillas del reloj sobre los planos perpendiculares a la línea provoca un avance de alejamiento desde el observador. Por ello a la dislocación de la figura 13, se le llama a veces dislocación de tornillo derecho.

Figura 13. El desplazamiento helicoidal producido por dislocaciones de tornillo.

Para la convención de sentidos de las manecillas del reloj, del circuito de Burgers, se tiene:

- Dislocación de tornillo derecho: El vector de Burgers apunta en el sentido negativo a la línea.
- Dislocación de tornillo izquierdo: El vector de Burgers apunta en el sentido positivo de la línea.

Se enlistan ahora algunas propiedades de la dislocación de tornillo.

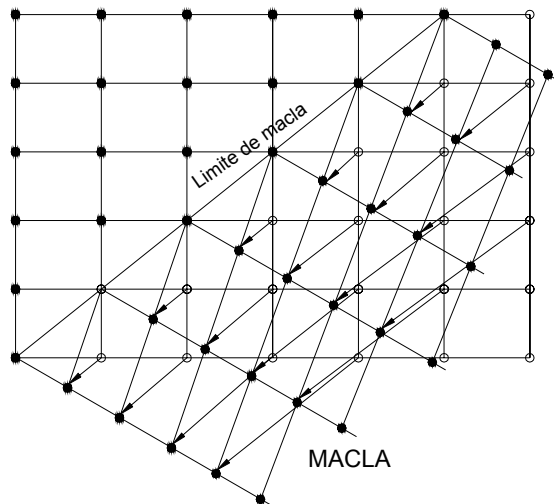
- El vector de Burgers es paralelo a la línea de dislocación. Por lo tanto, el plano de deslizamiento no se especifica al especificarse la línea de dislocación y el vector b , como ocurre con una dislocación de borde.
- El movimiento por deslizamiento hace que la línea de dislocación se mueva en ángulos rectos con la dirección de deslizamiento. Desde luego, el movimiento de la línea es en ángulos rectos con el vector de esfuerzos y el deslizamiento producido por el esfuerzo.
- No hay forma de visualizar esta dislocación como un plano extra de átomos.
- El paso de la línea de dislocaciones causa un movimiento de átomos a través del plano de deslizamiento por un vector b de uno con relación a otro, análogo al de la figura 11

1.2.3.3 Maclaje

Se definirá otro tipo de deformación plástica diferente a los anteriormente mencionados que se llama maclaje. Este, es especialmente importante en los cristales hexagonales ya que el deslizamiento normalmente puede darse en un solo plano. Si este plano es normal al eje de la probeta, no hay esfuerzo cizallante, y si el fenómeno de maclaje no pudiera suceder, se presenta una fractura frágil. La diferencia esencial entre las dos clases de deformación plástica es que en el deslizamiento cada átomo en un lado del plano de deslizamiento se mueve una distancia constante, mientras que en el maclaje el movimiento es proporcional a la distancia del límite de la macla como se puede observar en la figura 14. El maclaje es más común en metales BCC y HCP y puede suceder más rápidamente que el deslizamiento.

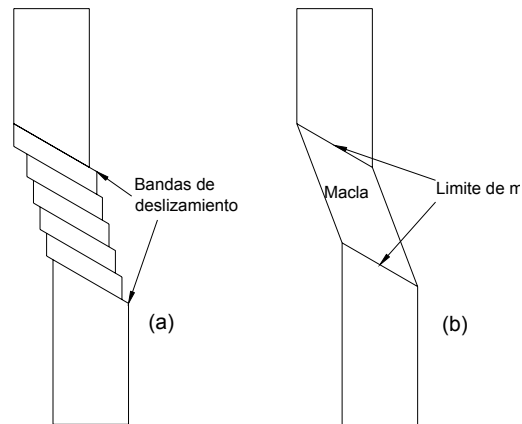
Por lo tanto, cuando ocurre una carga por impacto, encontramos frecuentemente maclaje formado mecánicamente en vez de bandas de deslizamiento. En las estructuras FCC generalmente se forma maclaje solo por calentamiento (recocido) de las estructuras trabajadas en frío.

Figura 14. Macla: formación de una red tetragonal por medio de un cizallamiento uniforme de los átomos paralelos al límite de macla. La red inclinada se forma después del maclaje.



Las diferencias entre el deslizamiento y el maclaje son a veces difíciles de comprender. La figura 15, muestra dos cristales sencillos después de la deformación plástica, en la figura 15a, la deformación es por deslizamiento, mientras en la figura 15b, ocurre el maclaje. Cada plano, con un espesor de aproximadamente 1000 átomos, se mueve una cantidad integral con relación a un plano adyacente. El movimiento es análogo a aquel que sucede cuando se colocan las manos por encima y por debajo de un juego de cartas y luego se mueven en direcciones opuestas.

Figura 15. Deslizamiento y macla: (a) Cristal sencillo que presenta deslizamiento. (b) Un cristal sencillo con una macla mecánica.



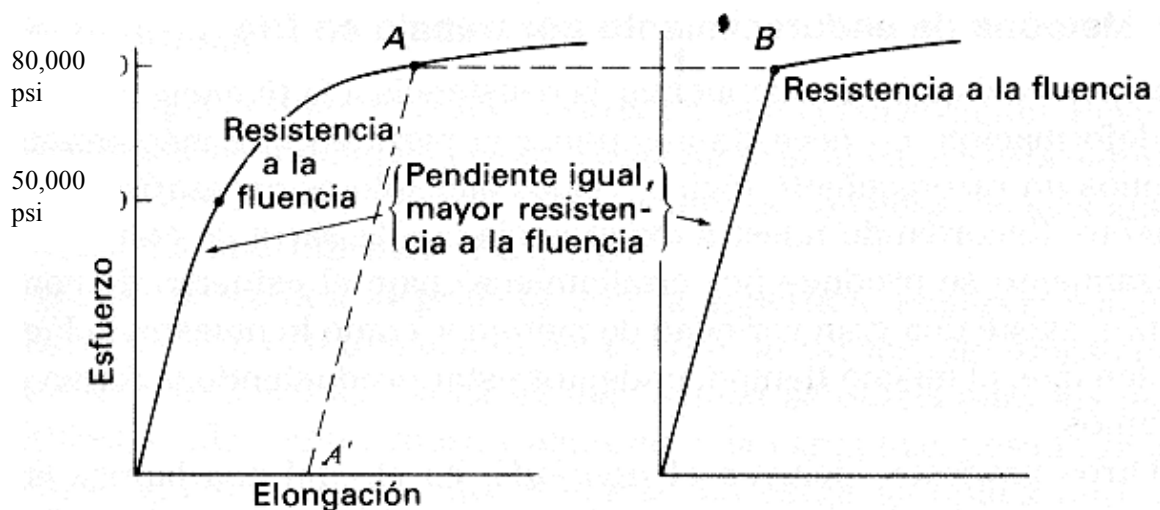
1.2.4 Trabajo en frío o endurecimiento por trabajo en frío

Cuando se fabrican piezas para máquinas y se desean pequeñas tolerancias, o se desea colocar la marca u otro dato sobre piezas metálicas se utiliza trabajo en frío.

Existen muchas formas de trabajo en frío, para dar forma u colocar los datos sobre las piezas, estas se describirán más adelante. Por el momento se utilizara lo descrito anteriormente sobre trabajo en frío en metales para explicar científicamente que ocurre a nivel estructural.

A medida que se aplica un esfuerzo en la región de deformación plástica, ocurre un deslizamiento en los planos de orientación preferida, produciéndose dislocaciones y su movimiento. Sin embargo, al presentarse más y más deslizamiento, las dislocaciones interactúan, se amontonan y forman un nudo de dislocaciones. Esto hace que cada vez sea más difícil el deslizamiento. Todo ello lo muestra la curva creciente de esfuerzo-deformación de la figura 16 a y b, respectivamente.

Figura 16. Correlación entre el trabajo en frío y la curva-deformación.



Es importante recordar que el deslizamiento requiere de movimientos de átomos y de movimiento de dislocaciones. Como las dislocaciones también tienen un campo de esfuerzo y otras dislocaciones se producen por el deslizamiento, se estorban mutuamente formando nudos de dislocaciones. El efecto neto es que se hace más difícil cualquier deslizamiento adicional.

Se llega al punto crucial del argumento. Cuando obtuvimos el punto A en la figura 16a, ya se habían ocupado todos los planos y sitios de dislocación de fácil deslizamiento. Cuando se retiró la carga, esta situación no varió. Por lo tanto, cuando se aplicó nuevamente la carga, no era posible obtener una deformación plástica hasta no alcanzar el nivel de esfuerzo del punto A. En consecuencia, se encuentra únicamente deformación elástica hasta un nivel mucho más alto que el de la figura 16a y la resistencia a la fluencia fue, correspondientemente, mayor.

A este fenómeno se le llama endurecimiento por trabajo, endurecimiento por deformación, o trabajo en frío. El término “frío” es relativo; significa que se trabaja a una temperatura que no altera los cambios estructurales producidos por la deformación. En otras palabras, el trabajo en frío hace que los átomos se muevan y que se formen nudos de dislocaciones.

Un material se considera trabajado en frío si sus granos están en una condición distorsionada después de finalizada la deformación plástica. Todas las propiedades de un metal que dependan de la estructura reticular se ven afectadas por la deformación plástica o por el trabajo en frío. La resistencia a la tensión, la resistencia a la cedencia o fluencia y la dureza aumentan, mientras que la ductilidad, representada por el porcentaje de alargamiento, disminuye.

Aunque la resistencia y la dureza aumentan, la rapidez de cambio para cada uno no es la misma. La dureza suele aumentar más rápidamente en el primer 10% de reducción, en tanto que la resistencia a la tensión aumenta más o menos linealmente.

La resistencia a la cedencia aumenta más rápidamente que la resistencia a la tensión, así que a mayor intensidad de deformación plástica, el intervalo entre las resistencias de cedencia y de tensión disminuye. Esto es importante en ciertas operaciones de formado en que se necesita una deformación apreciable; por ejemplo, en el estirado la carga debe tener un valor superior al punto de cedencia para lograr una deformación apreciable, pero debe ser menor a la resistencia a la tensión para evitar fallas. Si el intervalo es reducido, se necesita un control muy preciso de la carga aplicada.

La ductilidad sigue una trayectoria opuesta a la de la dureza, un gran decremento en el primer 10% de reducción y después una disminución con una rapidez menor. La distorsión de la estructura reticular impide el flujo de electrones y disminuye la conductividad eléctrica. Este efecto es leve en metales puros, pero apreciable en aleaciones.

El incremento en energía interna, sobre todo en las fronteras de grano, hace al material más susceptible a la corrosión inter granular, con lo cual se reduce la resistencia a la corrosión. Conocida como esfuerzo de corrosión, esta es una aceleración de la corrosión en ciertos medios debida a los esfuerzos residuales resultantes del trabajo en frío.

Este es el efecto que más interesa, ya que es en él que se apoya el presente trabajo para la determinación de las áreas sobre las cuales se ha realizado trabajo en frío.

2.2.2 Métodos para fijar marcas sobre metales

Existe una cantidad grande de métodos para realizar marcas sobre metales, sin embargo los más utilizados son los siguientes:

1.2.2.1 Marcas obtenidas por vaciado

Este tipo de marcación, propia de grandes motores, tornos, grúas, entre otros, se obtienen por colado del metal constitutivo de la pieza al estado de fusión en el momento de la fabricación de esta. El molde posee, en lugar adecuado y en bajo relieve la marca correspondiente que quedará asentada en sobre relieve en la pieza terminada.

Se comprende que si esta marcación es eliminada por corte, limado, esmerilado u otro método de remoción de material, no será viable recuperar la marca, dado que el metal que la constituía presentaba una identidad integral de composición y tratamiento térmico respecto del que conforma la pieza en su totalidad, no habiendo sufrido distorsión alguna en su estructura cristalográfica que posibilite su recuperación.

1.2.2.2 Marcas obtenidas por escritura con metal fundido

Estas marcas, habitualmente de gran tamaño, se usan para identificar la fábrica del objeto marcado y eventualmente algún otro dato genérico. Este tipo de marcación da origen a una interesante modificación de la estructura cristalina metálica, sin embargo no es trabajo en frío, ya que el metal cambia su estructura por el calentamiento del área al colocar la marca. Solamente se menciona y se aclara que si se puede recuperar la marca por el método que se analiza en el presente trabajo, ya que el mismo detecta las alteraciones en la estructura cristalina del metal, pero no es objeto de estudio debido a que se sale de los límites del presente por no ser específicamente trabajo en frío.

1.2.2.3 Marcas obtenidas por grabado eléctrico

Para efectuar este tipo de marcas se utilizan aparatos eléctricos vibratorios, que producen en la superficie metálica puntos o pequeños cráteres, los que conforman números y letras. Este método, deja la posibilidad de regenerar los caracteres eliminados y que hayan sido marcados por el mismo, debido a que este método causa deformación en la estructura cristalina del metal, ya que la punta del marcador golpea el metal formando un pequeño cráter con lo que desplaza material.

1.2.2.4 Marcas obtenidas por estampado en pequeñas láminas metálicas

Las chapas son generalmente de aluminio y se graban por medio de punzones aplicados, bien en el reverso, de tal manera que la marcación aparece en sobre relieve, o sea en el anverso, dando como resultado la aparición de la marca en bajo relieve. Éste es un proceso en el cual la estructura cristalina del metal se deforma totalmente, por las dislocaciones que provoca el movimiento del metal, de tal forma que si se quisiera eliminar la marca de cualquiera de los dos lados, siempre quedara residuo del trabajo en frío que se realizó, con lo cual se puede regenerar los caracteres eliminados.

1.2.2.5 Marcación por estampado mediante cuños metálicos aplicados por percusión:

Se utiliza para realizar este tipo de marcación, punzones de acero duro, la base de cada uno de los cuales lleva en sobre relieve la imagen especular de un número, letra o signo. El grabado se produce en la superficie metálica a marcar mediante un golpe fuerte y seco, que provoca la introducción del punzón hasta una profundidad adecuada. El signo queda marcado, pues, en bajo relieve. La profundidad oscila alrededor de un milímetro. Las grandes empresas poseen, para la realización de este grabado en serie, un equipo estándar tal que la marcación obtenida presenta características constantes, es decir, los números, letras y signos muestran en todos los objetos una serie de distribución regular, equidistantes entre si, igualdad de profundidad, entre otros.

Este método de grabado en frío es el que más se utiliza para la marcación de aparatos fabricados en serie, en particular armas y automotores (chasis y motores), y es, además, el que más se presta a la regeneración de los caracteres cuando han sido eliminados, existiendo un amplio margen de posibilidades de regeneración parcial o total, siempre que la operación sea conducida respetando la metodología adecuada.

2. METALES, ALEACIONES, CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

2.1 Hierro y Aceros.

Se estudiarán algunas especificaciones y usos del hierro y acero, comenzaremos con diferenciar el hierro del acero.

El hierro es el metal en estado puro, si se le puede llamar así, ya que siempre contiene un porcentaje mínimo de impurezas, sin embargo éstas no son tomadas en cuenta debido a la baja influencia que generan al momento de trabajar el mismo.

El acero es hierro más un pequeño porcentaje de carbono, y dependiendo del porcentaje de este último recibe un nombre específico, en general el acero contiene menos del 2.1% de carbono. Los aceros que contienen menos del 0.77% de carbono se les denomina hipoeutectoides y alguna de sus características es la buena ductilidad y tenacidad. Los aceros que contienen de 0.77 a 2.11% de carbono, se denominan hipereutectoides, y son útiles cuando se requiere mayor resistencia, dureza y resistencia al desgaste. Además, se describirán algunas especificaciones y usos de estos materiales. Por ejemplo el hierro para forja, hierro en lingotes y hierro forjado. A continuación se presenta la tabla III, en la que se muestra el uso típico del hierro y acero dependiendo del contenido de carbono

Tabla III. Uso típico de los aceros al carbono simples

Número de acero	Contenido de carbono, porcentaje	Condición	Porcentaje de elongación	Dureza BHN	Uso típico
Hierro gris en lingotes	0.02	Recocido	48	69	Tubería, arquitectura
		Laminado en caliente	47	83	
		Trefilado en frío	12	142	
1010	0.10	Laminado en caliente	28	95	Guardafangos de automóviles
		Trefilado en frío	20	105	
1020	0.20	Laminado en caliente	25	11	Formas estructurales
		Estirado en frío	15	121	
1040	0.40	Laminado en caliente	18	149	Cigüeñales
		Estirado en frío	12	170	
1060	0.60	Laminado en caliente	12	201	Cinzel
		Estirado en frío	10	183	
1080	0.80	Laminado en caliente	10	229	Piezas resistentes al desgaste
		Estirado en frío	10	192	
1095	0.95	Laminado en caliente	10	248	Cuchillas de corte
		Estirado en frío	10	197	

Existen otros tipos de aceros denominados aceros aleados y se pueden clasificar de dos formas, de baja y alta aleación. Los aceros de baja aleación contienen menos del 2.1% de carbono y no se adiciona más del 5% de aleación.

Los aceros de alta aleación son aquellos en los cuales se adiciona más del 10% de aleación, estos pueden dividirse en grupos, dependiendo de los elementos que contenga la aleación, lo cual se presenta en la tabla IV. Cada uno de los aceros presentados en la tabla anteriormente mencionada, tiene características apropiadas para determinado uso.

Tabla IV. Aceros de alta aleación

Tipo	Composición química, porcentaje
Acero inoxidable Austenítico	18 Cr, 8 Ni, balance Fe
Acero inoxidable Ferrítico	16 Cr, 0.1 C
Acero inoxidable Martensítico	17 Cr, 1 C
Acero inoxidable endurecido por precipitación	17 Cr, 7 Ni, 1 Al
Acero Maraging	18 Ni, 7 Co
Acero para herramienta, acero de alta velocidad	18 W, 4 Cr, 1 V
Acero al Manganeso, austenítico	12 Mn

Los aceros inoxidables por ejemplo, tienen como característica principal la resistencia a la corrosión. Para dar una mejor visualización de lo indicado anteriormente, se presentan en la tabla V, características y usos de los aceros inoxidables, endurecido por precipitación y martensítico envejecible. Además, el acero inoxidable se separa en las tres subdivisiones que posee que son austenítico, ferrítico y martensítico, que reciben su nombre de acuerdo a la estructura predominante.

Tabla V. Uso típico de los aceros inoxidables

Número de acero	Análisis químico	Condición	Porcentaje de elongación	Dureza BHN	Uso típico
Aceros austeníticos					
301	17 Cr, 7 Ni	Recocido	60	160	Equipo de transporte liviano y resistente a la corrosión
		Trabajado en frío	9	388	
304	19 Cr, 10 Ni	Recocido	60	149	Equipo químico en general
		Trabajado en frío	12	240	
347	18 Cr, 11 Ni	Recocido		160	Construcción soldada
Aceros ferríticos					
430	16 Cr, <0.1 C	Recocido	25	140	Guarniciones para automóviles, implementos de cocina
		Trabajado en frío	20	200	
Aceros martensíticos					
410	12 Cr, 0.15 C	Recocido	30	155	Resortes de uso general, reglas
		Templado y revenido	20	300	
440C	17 Cr, 1 C	Recocido	14	230	Instrumentos, cuchillería, válvulas
		Templado y revenido	2	580	
Aceros endurecidos por precipitación					
17-7PH	17 Cr, 7 Ni, 1 Al	Endurecido	6	400	Partes de cuerpos de aviones
Aceros martensíticos envejecidos					
Acero martensítico envejecible	18 Ni, 7 Co	Martensítico envejecido	11	500	Componentes de aviones

Existe un grupo de materiales denominado Superaleaciones, y tiene dos características principales que son resistencia a la oxidación y resistencia mecánica, se utilizan en maquinaria que trabaja en condiciones de alta temperatura, altas velocidades y/o grandes cargas, como ejemplo se tienen rotores y álabes de turbinas, cámaras de combustión de motores y algunas partes de compresores. Se presenta en la tabla VI, diferentes superaleaciones.

Tabla VI. Super aleaciones: aleaciones de base hierro y níquel

Código y nombre	Análisis químico, porcentaje							
	Fe	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Mo	Otros
HF (tipo 18/8)	Balance	10	20					0.3 C
Incoloy 901	Balance	43	13		0.2	3.0	6	0.01 B
Inconel 718	18	52	19		0.6	0.8	3	5.0 Nb
Waspalloy	2	Balance	20	13	1.3	3.0	4	
Inco 713	2	Balance	13		6.0	0.8	4	2.0 Nb
Udimet 500	4	Balance	18	18	3.0	3.0	4	
Udimet 700	1	Balance	15	18	4.5	3.5	5	
In 100	1	Balance	10	15	5.5	0.5	3	
René 41	5	Balance	19	1.5	1.5	3.0	10	

Por último se describirán los usos que se le dan al Hierro Blanco, Hierro Gris, Hierro Dúctil e Hierro Maleable. El primero de ellos contiene 3% de Carbono y sus características son: carburo en forma masiva, lo cual lo hace duro y frágil; el segundo de ellos es el Hierro Gris, este contiene 3% de Carbono pero por la forma de enfriarse y debido a que es colado, presenta en su estructura grafito laminar; el tercero de ellos es el Hierro Dúctil, la cantidad de carbono también es de 3%, la diferencia es que se le agrega pequeñas cantidades de Magnesio, dando como resultado un grafito esferoidal.

El último de ellos es el Hierro Maleable, el cual tiene también la misma cantidad de Carbono, pero el grafito está en forma de terrones. En la tabla VII, se dan algunos ejemplos de los usos de los cuatro anteriores tipos de materiales.

Tabla VII. Uso típico del hierro blanco, gris, dúctil y maleable

Grupo	Uso típico
Hierro blanco	Piezas resistentes al desgaste
Hierro gris	Tubos, artefactos sanitarios, herramienta para máquinas, bloque de motor, superficies de desgaste y ejes de levas.
Hierro dúctil	Tubería de servicio pesado, cigüeñales, piezas de máquinas de alta resistencia.
Hierro maleable	Ferretería, accesorios, cuerpos de bombas y yugos de alta resistencia.

2.2 Aluminio.

El aluminio es utilizado mucho en estado altamente puro, es decir, no aleado, pero tratado, como por ejemplo, endurecido por medio de trabajo en frío. Sin embargo, también es utilizado el aluminio aleado, el cual mejora mucho de su estado puro, el elemento aleante dependerá de las propiedades que se necesitan obtener. Generalmente se forman aleaciones de aluminio con cobre, manganeso, silicio, magnesio, hierro y zinc. En la tabla VIII, se presenta el número de aleación, la composición química y el uso típico.

Tabla VIII. Uso típico de las aleaciones de aluminio

Aleación	Análisis químico	Condición	Uso típico
Aleaciones trabajadas de una fase			
1060	99.6 mínimo de Al	Trabajado en frío	Lámina, platina y tubería
3003	1.2 Mn	Trabajada en frío	Paneles para camión y ductos
5052	2.5 Mg, 0.2 Cr	Trabajado en frío	Carrocerías para bus, aplicaciones marinas
5050	1.2 Mg	Trabajado en frío	Lámina, guarniciones, tuberías de gas.
Aleaciones trabajadas de dos fases			
2014	4.5 Cu, 0.8 Si, 0.8 Mn, 0.5 Mg	Tratada térmicamente	Estructuras de avión
6061	1 Mg, 0.6 Si, 0.2 Cr, 0.3 Cu	Tratada térmicamente	Equipos de transportes, tuberías
7178	7 Zn, 0.3 Mn, 3 Mg, 0.3 Cr, 2 Cu	Tratada térmicamente	Partes estructurales de aviones
296.0	4.5 Cu	Envejecida	Partes para avión, carcazas de bombas
356.0	7 Si, 0.4 Mg	Envejecida	Transmisión de automóvil, carcazas, ruedas.
71.0	5.5 Zn, 0.6 Mg, 0.5 Cr, 0.15 Ti	Envejecida	Partes para máquinas
208.0	3 Si, 4 Cu	Fundido	General
380.0	8 Si, 3.5 Cu	Fundido	Fundición por inyección
390.0	17 Si, 1 Fe, 4.5 Cu, 0.5 Mg	Fundido	Fundición por inyección

2.3 Magnesio

En el medio las aleaciones de magnesio son bastante comunes, de hecho son tan comunes como las de aluminio, por ejemplo en los automóviles Volkswagen, se utilizan aleaciones de magnesio, tanto como se utilizan las de aluminio, y es que en este caso el factor peso es la característica principal, debido a que el magnesio es dos tercios la densidad del aluminio.

Sin embargo el magnesio se corroe mas rápidamente que el aluminio en ambientes como el agua salada, por esta razón los motores fuera de borda no se pueden fabricar de aleaciones de magnesio. Otra diferencia del magnesio y el aluminio es que el primero de ellos generalmente se trabaja en caliente, en comparación con el segundo que se puede trabajar en frío y en caliente.

Las aleaciones de magnesio se utilizan generalmente en aviones y naves espaciales, maquinaria, herramienta y equipo para el transporte de materiales. En la tabla IX se dan los usos típicos de las aleaciones de magnesio, donde E.R. significa Tierras raras.

Tabla IX. Uso típico de las aleaciones de magnesio

Aleación	Análisis químico	Condición	Uso típico
Aleaciones trabajadas			
AZ31B	3 Al, 1 Zn, 0.2 Mn	Condición final	Lámina y platina
AZ80A	8 Al, 0.2 Zn, 0.2 Mn	Envejecido	Forjas y extrusiones
ZK60A	6 Zn, 0.5 Zr	Envejecido	
HK31A	3 Th, 1 Zr	Trabajado en frío	Temperaturas elevadas
Aleaciones para fundición			
AZ63A	6 Al, 3 Zn, 0.13 Mn	Fundido	Fundición en arena en general
AZ91C	9 Al, 1 Zn, 0.13 Mn	Fundido	Fundición de alta resistencia
QE22A	2 Ag, 2 R.E.	Tratamiento por solución y envejecimiento artificial	Usos para máxima resistencia
EZ33A	3 R.E, 3 Zn	Envejecido	Temperaturas elevadas
EK31Z	3 R.E, 1 Zr	Tratamiento por solución y envejecimiento artificial	

2.4 Cobre

Las aleaciones de cobre tiene una combinación especial de características: Conductividad eléctrica y térmica alta, alta resistencia a la corrosión, gran ductilidad en general y maleabilidad y un color llamativo para usos en arquitectura. Entre las aleaciones mas utilizadas que tienen como base el cobre, tenemos el latón, que es una aleación de cobre y zinc, y sus porcentajes más comunes son 65% Cu, 35% Zn, y 70% Cu, 30% Zn.

El bronce, el cual es una aleación de cobre y un metal determinado, como el estaño, aluminio o silicio. También se tienen el cuproníquel, el cual es una aleación que tiene muy buena resistencia. En la tabla X, se presentan las aleaciones y los usos típicos que se da a cada una de las aleaciones.

Tabla X. Uso típico de las aleaciones de cobre

Aleación	Análisis químico	Condición	Uso típico
Aleaciones trabajadas en una sola fase			
C11000	ETP, 99.9 Cu	Recocido	Arquitectónico, eléctrico
		Trabajado en frío	
C26800	65 Cu, 35 Zn (Latón amarillo)	Recocido	Plomería, parrillas
		Trabajado en frío	
C61400	91 Cu, 7 Al, 2 Fe (Bronce al aluminio)	Trabajado en frío	Tubería para condensadores
C71500	70 Cu, 30 Ni	Recocido	Tubería para desalinización
		Trabajado en frío	
Aleaciones trabajadas polifásicas			
C17200	98 Cu, 2 Be Beryllium copper	Recocido	Resortes, herramientas
		Endurecido precipitación	
Aleaciones fundidas			
C81100	Cu	Fundido	Conductores eléctricos
C83600	85 Cu, 5 Sn, 5 Zn, 5 Pb	Fundido	Válvulas, bujes
C93700	80 Cu, 10 Sn, 10 Pb	Fundido	Bujes, bombas
C96400	70 Cu, 30 Ni	Fundido	Válvulas marinas
C82400	98 Cu, 2 Be	Fundido	Matrices, herramienta
C90500	88 Cu, 10 Sn, 2 Ni	Fundido	Engranajes
C95300	89 Cu, 10 Al, 1 Fe	Fundido	Engranajes, bujes
		Tratado térmicamente	

2.5 Níquel

El níquel es un elemento semejante al hierro en resistencia, pero sus aleaciones tienen una excepcional resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas. Las aleaciones más utilizadas, son Monel e Inconel. En la tabla XI, se presentan las aleaciones de níquel y los usos típicos.

Tabla XI. Uso típico de las aleaciones de níquel

Aleación	Análisis químico	Condición	Uso típico
Aleaciones trabajadas de una fase			
Níquel 200	99.5 Ni	Recocido	Piezas resistentes a la corrosión
		Trabajado en frío	
Monel 400	66 Ni, 32 Cu	Recocido	Piezas resistentes a la corrosión
		Trabajado en frío	
Inconel 600	78 Ni, 15 Cr, 7 Fe	Recocido	Piezas resistentes a la corrosión
		Trabajado en frío	
Aleaciones polifásicas			
Duraníquel 301	94 Ni, 4.5 Al, 0.5 Ti	Recocido	Piezas resistentes a la corrosión
		Trabajado en frío	Piezas de alta resistencia
Monel K500	65 Ni, 2.8 Al, 0.5 Ti, 30 Cu	Recocido	Piezas resistentes a la corrosión
		Trabajado en frío	Piezas de alta resistencia
Aleaciones fundida de una sola fase			
Níquel 210	95 Ni, 0.8 C	Fundido	Condensadores
Monel 411	64 Ni, 32 Cu, 1.5 Si	Fundido	Equipo para laminar papel
Inconel 610	68 Ni, 15 Cr, 2 Nb, 10 Fe	Fundido	Equipo para laminar papel
Aleaciones fundidas polifásicas			
Monel 505	63 Ni, 29 Cu, 4 Si	Envejecida	Asientos para válvulas
Inconel 705	68 Ni, 9 Fe, 6 Si, 15 Cr	Envejecida	Múltiple de escape

2.6 Zinc.

Una gran cantidad de partes de automóviles, juguetes y materiales de construcción se hacen de aleaciones de zinc. El zinc posee un bajo punto de fusión, por lo que se puede utilizar para formar partes por el método de inyección. En el zinc no se tienen muchos datos de resistencia a la fluencia debido al bajo punto de fusión que posee este material en particular, por lo que no debe utilizarse a temperaturas elevadas, porque se presenta el fenómeno denominado fluencia lenta o “Creep”, la cual consiste en que el material se deforme plásticamente debido a la temperatura.

3. FUNCIONAMIENTO Y METODOLOGÍA

3.1 Cómo funciona la determinación de trabajo en frío sobre metales

3.1.1 Procesos moleculares de la estructura

Una pieza de metal, la cual ha sido fabricada para cierto propósito, tiene característica para el mismo, por ejemplo un cuchillo de mesa fabricado de un acero inoxidable 430, el cual tiene una homogeneidad y orientación del grano debido al trabajo en frío por medio del cual se formó la plancha y el método por el cual se le da la forma (estampado), tomando en cuenta la dirección del grano, de tal forma que el cuchillo de mesa, no sufra deformación cuando se utilice. Al mismo tiempo que se le da forma, se le troquea en una de sus caras las palabras “stainless steel”, que significa acero inoxidable, lo cual se hace para identificarlo. Qué es lo que sucede en todo el proceso?. Los bordes del cuchillo se formaron aplicando esfuerzo de corte, de tal forma que se separó el metal, las curvas se realizaron aplicando esfuerzo de flexión que rebasa el límite elástico, con lo cual la deformación es permanente, las palabras “stainless steel” se colocan en una de sus caras mediante troqueles que posee el molde del estampado.

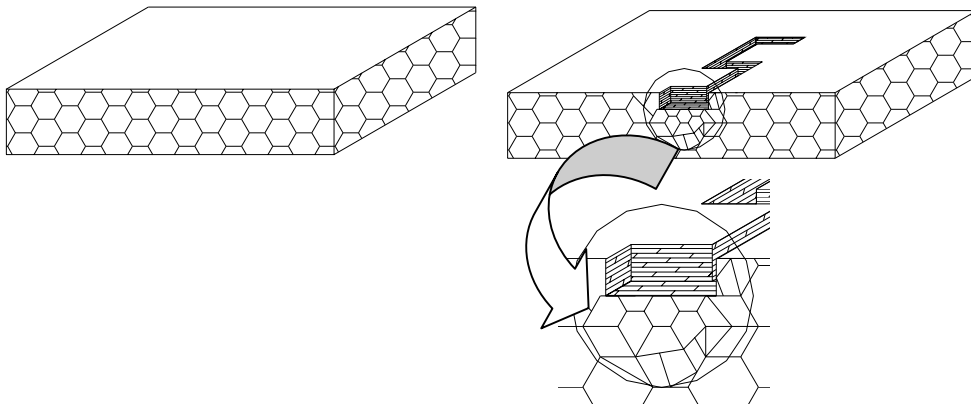
En todo el proceso se esta realizando trabajo en frío, debido a que existe deformación y por lo tanto endurecimiento de la pieza, pero para el propósito del presente trabajo se analizará ampliamente lo que sucede al colocar las palabras “stainless steel” en una de las caras del cuchillo de mesa.

Esto es lo más interesante, cuando formamos las palabras “stainless steel”, se realiza deformación por medio de trabajo en frío, seguro que existe deslizamiento en la estructura del material del que esta fabricado el cuchillo de mesa, y por lo tanto se producen dislocaciones en los planos de orientación preferida. Se muestran en la figura 17, las palabras “stainless steel”.

Figura 17. Troquelado en frío.



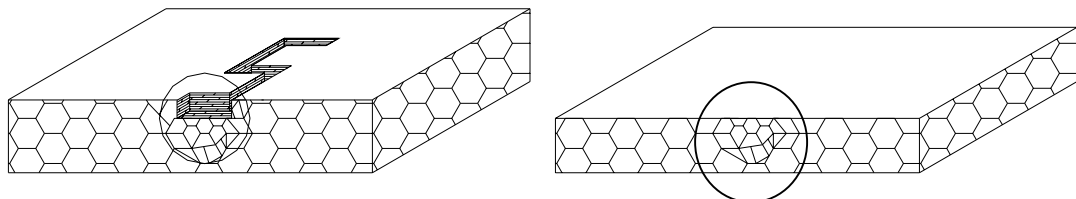
Figura 18. Alteración de la estructura: Se observa en la figura de la izquierda que la estructura es homogénea en toda la pieza. En la figura de la derecha se amplía la parte encerrada con un círculo, y se muestra como varía la estructura del material debido al trabajo en frío aplicado para troquelar la letra “S” sobre la pieza.



La orientación del grano del material del que se fabricó el cuchillo de mesa no cambió, solamente existen alteraciones de la estructura del material en el área donde se realizó trabajo en frío, esto es la consecuencia del deslizamiento de material, producido para formar las palabras “stainless steel”, al realizar lo anterior se produjeron millones de dislocaciones en la estructura, lo anterior se representa en la figura 18.

Ahora si se toma una limadora y se eliminaran las palabras “stainless steel”, y se pule, el cuchillo de mesa quedará como si nunca hubieran estado estas palabras en una de sus caras. Si se desea saber que estaba troquelado y en que área del cuchillo, se puede determinar debido a que las palabras “stainless steel”, son el resultado visible del trabajo en frío realizado sobre la pieza, es decir, es el movimiento de metal resultante del esfuerzo al que fueron sometidas las áreas que formaron las palabras anteriormente mencionadas, el cual puede eliminarse, sin embargo debajo del resultado del trabajo en frío, que son las palabras “stainless steel”, existe deformación de la estructura cristalina que no se nota a simple vista, sin embargo se conserva. En la figura 19, se representa lo descrito anteriormente.

Figura 19. Trabajo en frío en la estructura: Se observa en la figura de la izquierda que tiene troquelada la letra “S”. En la figura de la derecha se observa que ha sido eliminada la porción de material en la cual estaba troquelada la letra “S”, sin embargo se conserva la alteración en la estructura del material.



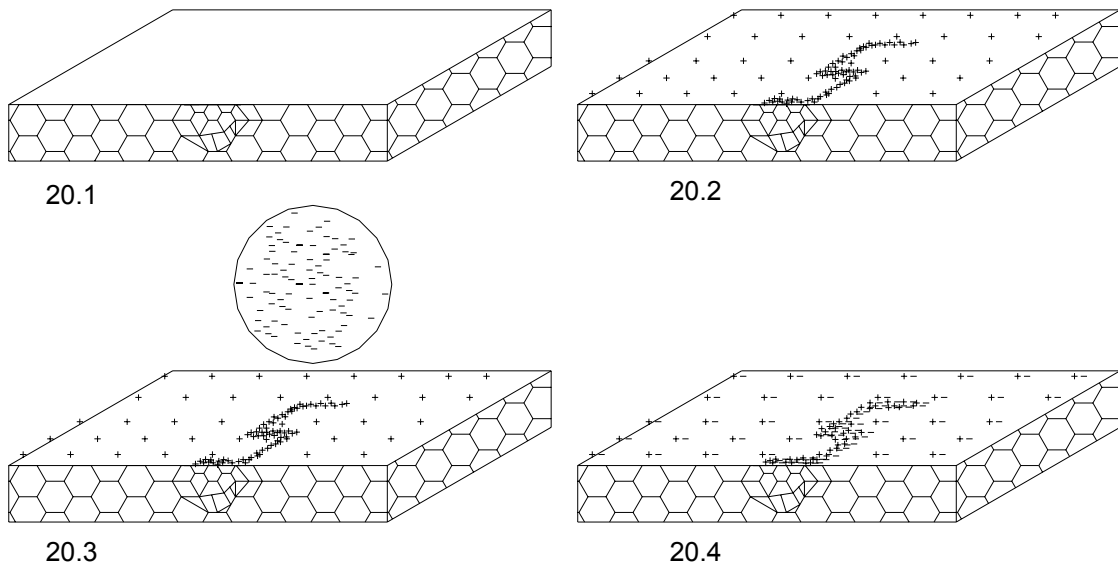
Existen diversas formas de determinar en que áreas se realizó trabajo en frío localizado, se puede realizarlo mediante métodos magnéticos, métodos de aplicación de calor, de tal forma que el metal alcance el punto de recristalización, entre otros.

Existe un método en el cual se aplican químicos y se basa en un efecto galvánico o corrosión galvánica. El efecto galvánico que se mencionó anteriormente sobre el cual se basa la determinación de trabajo en frío localizado en un área específica, se lleva a cabo gracias a que material en los límites del grano, el área que fue trabajada en frío, esta en un potencial de alta solución debido las concentraciones de las dislocaciones que conducen a una unión deficiente, y a una mayor energía de deformación.

Se explica lo anterior, es decir, que cuando se troquelan las palabras “stainless steel”, se realiza trabajo en frío, por lo tanto existe deslizamiento y una serie de dislocaciones en la estructura cristalina del material, por lo tanto el área donde estaban troqueladas las palabras “stainless steel” se corroerá a una velocidad mayor que el resto de la pieza, porque en esta área existen miles de dislocaciones que hacen que el material sea mas electronegativo, y que pueda reaccionar fácilmente con un agente oxidante y/o reductor.

El método químico mediante el cual se determinara el área y la silueta del trabajo en frío, se basa en reducir y oxidar la pieza con ácidos, agregando metales fijadores. En la figura 20 se muestra dicho efecto.

Figura 20. Oxidación y reducción de metales: En 20.1, se muestra la pieza en la cual se ha eliminado la letra “S”. En 20.2, se muestra que se le ha aplicado un químico oxidante, por lo cual el metal pierde electrones, más en el área donde se encontraba troquelada la letra “S”. En 20.3, se esta aplicando un químico reductor, al cual se ha agregado una sal metálica que reacciona con el metal de la pieza. En la imagen 20.4, se evidencia que se corroe con más intensidad el área donde se eliminó la letra “S”, en este caso se forma un compuesto visible, producto del resultado de la reacción de la sal metálica y el metal de la pieza.



3.1.2 Procesos macroscópicos o visuales

Lo que se observa sobre una pieza, en la cual se desea determinar si existió trabajo en frío localizado, como por ejemplo la palabra “stainless steel” en el cuchillo de mesa, es la silueta de las mismas palabras, es decir, que se visualiza la diferencia de la cantidad de corrosión sobre la pieza debido a que la velocidad de la misma es más alta en el área donde se encontraban troqueladas las palabras “stainless steel”.

En la figura 21, se observa lo indicado en el párrafo anterior.

Figura 21. Recuperación de caracteres troquelados en frío. En la imagen de la izquierda se observa la parte de un cañón de un arma de fuego, en el cual se había eliminado el número de registro. En la imagen de la derecha, se observa “BA911”, este es el número de registro, el cual había sido eliminado para esconder su identidad.



Dependiendo del material de la pieza, así será la facilidad de observar si existió algún troquelado mediante trabajo en frío en la pieza, eso es debido a que no todos los materiales se corroen con la misma velocidad. Además, también dependerá de la concentración del reactivo que estamos aplicando.

Realmente el proceso macroscópico es lo que mas interesa en este caso, que es visualizar las siluetas de las áreas trabajadas en frío, pero cuando la cantidad de trabajo en frío es pequeña, las siluetas se observarán leves y costará definir las.

3.1.3 Efectividad del método

Existen varios métodos para determinar el trabajo en frío en piezas metálicas, el método químico es bastante efectivo, y no daña la pieza, aunque es una prueba destructiva, solamente en el sentido que con cada aplicación de químicos sobre el material, existe un desgaste leve del metal y después de cierta cantidad de aplicaciones no quedará trabajo en frío para seguir realizando la prueba. Sin embargo el cambio que genera no daña la resistencia del material, siempre y cuando se neutralice la pieza después de la aplicación de los químicos.

Si se dice que es una prueba destructiva, es porque se destruye el trabajo en frío que existe en la pieza con las reacciones que se llevan a cabo, pero si comparamos este método químico con un método en el cual la pieza se calienta hasta la temperatura de recristalización para lograr ver si existe trabajo en frío al acomodarse la estructura del material, en este último método se está cambiando la estructura interna de la pieza perdiendo las propiedades para la que fue fabricada. Si se compara el método químico con un método magnético en el cual la pieza no sufre desgaste, ni reacción alguna, el método químico no se ve tan aconsejable, pero no todos los metales son magnéticos, de tal forma que no es aplicable a todos ellos.

Después de realizar estas comparaciones, se ve que el método químico es bastante efectivo y no cuesta demasiado dinero, porque no exige demasiado equipo como se verá mas adelante.

Hay que tomar en cuenta dos factores muy importantes que son la experiencia y la paciencia de la persona que utilizan este método, debido a que algunas veces se verá el trabajo en frío en las primeras dos aplicaciones, que relativamente estamos hablando de cinco minutos, pero, en otras puede tomar una y hasta dos horas. La principal debilidad del método es que si la cantidad de trabajo en frío o deformación de la estructura del material es muy baja, no se observarán las siluetas o se observarán por unos pocos segundos y luego desaparecerán, o en otro caso pueden aparecer parcialmente de modo que no se logre definir la forma original.

3.2 Metodología

3.2.1 Preparación de la pieza

Para lograr observar bien las siluetas del trabajo en frío, se debe remover del área a trabajar, la herrumbre, grasa y pintura, entre otros, aplicando un solvente, para las pruebas del presente trabajo se utiliza acetona, pero puede utilizarse cualquier solvente capaz de limpiar el área de trabajo de la pieza.

Luego, ya que el área a tratar este limpia se deben de eliminar los rayones y protuberancias de la misma. La forma mas recomendable es utilizar papel lija No. 280 como máximo, si las protuberancias o los rayones son muy pronunciados, de lo contrario es aconsejable utilizar papel lija No. 500 o 600, el papel lija se debe aplicar a modo de no causar rayones y dejar la pieza similar a la superficie de un espejo.

Cuando exista un rayón que no permita dejar la superficie totalmente lisa, se dejará el rayón y se aplicará el reactivo, de tal forma que no se cometa el error de eliminar el trabajo en frío no visible, oculto debajo de la superficie, por eliminar totalmente el rayón. Es de gran utilidad contar con una herramienta rotativa a la cual se le pueda cambiar el papel lija, en ese caso es aconsejable utilizar papel lija No. 500 o de grano más pequeño, ya que debido a la alta velocidad de la herramienta es más rápido.

3.2.2 Aplicación del reactivo

Después, de pulir el área a trabajar se debe eliminar cualquier sustancia que pueda causar interferencia y para eso aplicamos un solvente orgánico, luego se realiza lo siguiente:

- Con hisopos de algodón y base de madera se debe aplicar suavemente el primer reactivo, se debe cambiar de hisopo después de una cuantas aplicaciones, debido a que el reactivo arrastra material. Se debe eliminar el exceso de reactivo para visualizar el área, con el fin de verificar si se observan algunas siluetas o parte de ellas. Se repite el proceso anterior como mínimo tres veces.
- Si existiera un segundo reactivo a aplicar, se procede de la misma forma que se aplico el primero, tomando muy en cuenta que con cada porción de reactivo aplicado se debe eliminar el exceso y verificar si las siluetas están surgiendo.

- Si no se logra observar nada aún, se debe aplicar el primer reactivo nuevamente, seguido de la aplicación del segundo reactivo, siguiendo lo indicado anteriormente. Si después de diez aplicaciones no se logra observar nada, se debe cambiar de reactivo, a uno más fuerte, si existiera. Si no se logra visualizar nada con el nuevo reactivo, significa que la porción de trabajo en frío debajo de lo visible fue eliminada, de tal forma que no se debe proseguir con las aplicaciones.

3.2.3 Neutralización de la pieza

En esta etapa se neutralizan los reactivos que se utilizaron, de manera de evitar al máximo la continuación del proceso de corrosión. Los reactivos que se utilizan son altamente corrosivos y en su mayoría son ácidos, de tal manera que se siguen los pasos siguientes:

- Se elimina el exceso de los reactivos, limpiándolo con algodón u otro material que sea absorbente.
- Luego se debe neutralizar el área en la cual se aplicaron los reactivos, si se utilizaron ácidos, es recomendable utilizar una solución de agua y bicarbonato de sodio.

- Seguidamente aplicar abundante agua sobre el área trabajada, de tal manera de eliminar todos los anteriores compuestos utilizados, incluyendo la solución de bicarbonato de sodio. Se debe secar la pieza.

3.2.3 Limpieza de la pieza.

Para este paso, lo más importante es eliminar y proteger a la pieza de la corrosión, de tal forma que se realiza lo siguiente:

- Pulir la pieza a manera de eliminar la herrumbre producto de lo realizado anteriormente.
- Cubrir el área pulida que fue trabajada, con aceite mineral o sintético, de manera que este evite que el metal se siga corroyendo.

3.3 Determinación del reactivo a aplicar.

3.3.1 El material de la pieza determina el reactivo a aplicar.

Previamente a aplicar el o los reactivos se debe determinar cuales son los más adecuados para el tipo de material del que está construida la pieza.

Existen diversos reactivos para determinar si existieron marcas troqueladas a través de trabajo en frío que hayan sido eliminadas por métodos de remoción de material, esto es debido a que como se vio en el Capítulo 2, existen diversas aleaciones metálicas y cada una de ellas tiene diversas características que las distinguen entre sí, dependiendo de las aplicaciones para las que fueron diseñadas.

Sin embargo para el presente estudio se necesita generalizar más este tipo de reactivos, es decir, no asignar un reactivo específico para un determinado metal, si no más bien un reactivo para un grupo metálico, para lo cual se tomará como referencia el metal base de la aleación.

De tal forma que no se necesita determinar la composición química y los porcentajes de la aleación que se trabajará, si no, bastará conocer el grupo metálico al que pertenece. En el ASTM (American Society for Testing of Materials) Metals Handbook, se encuentran extensas tablas de ataque químico, sin embargo el presente análisis es un poco diferente, debido a que el ataque químico que ellos describen, es utilizado para lograr observar en un microscopio el tipo de estructura que posee la pieza, mientras que el presente análisis trata de determinar donde la estructura cristalina del metal se encuentra deformada.

De tal forma que se describirán los reactivos y los métodos de aplicación que funcionan con cada grupo metálico, existen varios reactivos que se pueden utilizar con un mismo grupo metálico, sin embargo se necesita iniciar con el más débil e ir aumentando conforme se nota que la reacción es muy lenta.

3.3.2 Identificación de metales.

Para identificar los diferentes grupos metálicos existe una serie de pruebas, las cuales nos dan generalidades, sin embargo son de gran utilidad para poder realizar la aplicación de los diferentes reactivos. Se verá cada una de estas pruebas y los resultados que generan.

3.3.2.1 Prueba de magnetismo.

La primera de las pruebas es para determinar si el material que se va a trabajar tiene, o no, como base el hierro. Es conocido que el hierro es por excelencia un material magnético, lo que significa que al acercar un pedazo de magnetita al material, la misma se adherirá. Con base en lo anteriormente explicado se realiza la prueba, con el objetivo de determinar si el material tiene como base el hierro, esto es positivo si la magnetita se adhiere a la pieza que trabajaremos. Con esta prueba se realiza la primera división para poder determinar grupo el grupo metálico al que pertenece.

Sin embargo podríamos tener incerteza con la aplicación de estos dos reactivos, debido a que existen varios metales que tienen como base el hierro, por ejemplo los aceros de baja aleación y los aceros inoxidable, ya que ambos no reaccionan de la misma forma, tienen variaciones pequeñas que a la larga producen resultados diferentes.

3.3.2.2 Prueba de efervescencia.

La segunda prueba que se realiza es la prueba de efervescencia, y ésta se realiza cuando ya descartamos que el material tiene como base hierro. Esta prueba esta fundamentada en que el aluminio es efervescente cuando entra en contacto con ácido clorhídrico. Por lo que la prueba consiste en aplicar una pequeña cantidad de ácido clorhídrico sobre una pequeña área de la pieza, previamente limpia y pulida. Por lo que si al momento de aplicar el ácido clorhídrico, este se vuelve efervescente, significa que tiene como base aluminio.

Con esta prueba se realiza otra división y un avance significativo, para poder realizar la determinación del grupo metálico al que pertenece, se procederá a utilizar reactivos que sean compatibles con este metal. Sin embargo en este caso también podríamos tener incerteza con la aplicación de los reactivos, debido a que existen varios metales que tienen como base aluminio.

3.3.2.3 Prueba de manchado.

Esta es una prueba bastante fácil de realizar y da una muy buena aproximación de las características del metal, sin embargo para realizarla es necesario contar con experiencia. La prueba consiste básicamente en depositar sobre una pequeña porción de la pieza, previamente limpiada y pulida, una pequeña cantidad de ácido nítrico concentrado, esta parte del metal se tornará de algún color el cual nos indicará a que grupo metálico pertenece.

La prueba que se realiza en el presente trabajo consiste en depositar dos gotas de ácido nítrico al metal, previamente limpiado y pulido, y se esperan 10 minutos, se observa el color, se repite en otra área, con el fin de asegurar la prueba, la tabla XII da los resultados para algunos grupos metálicos.

Tabla XII. Colores para algunos grupos metálicos

Grupo metálico	Color
Acero de baja aleación	Azul
Acero inoxidable ferrítico	Azul con tono gris
Cobre	Verde con tono amarillo
Bronce	Celeste
Latón	Verde

3.3.2.4 Otras características que ayudan a la identificación.

Las otras características que se pueden tomar en cuenta para poder elegir los reactivos adecuados, son el color del metal, el peso y la dureza, entre otras. Aunque para utilizar estas características se debe tener mucha experiencia, debido a que existen metales que tienen características parecidas. De tal forma que las características del metal de deben tomar como última opción. Por ejemplo la aleación denominada Especial K, al que también se le denomina K-100, VEW K990, en el AISI: 01, el cual tiene la composición química C: 1.05, Si: 0.2, Mn: 0.3, tiene las siguientes características: Dureza 170 Brinell, color blanco.

Los datos anteriores se obtuvieron de un distribuidor local de metales, por lo que es recomendable contar con tablas que nos proporcionen estos datos, no poseer solamente tabla de un distribuidor, sino de varios para tener una mejor certeza de los datos que se utilizan.

En el Anexo 1 se muestran los pasos básicos que se llevan a cabo en la aplicación del método de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión.

4 TRABAJO DE CAMPO

4.1 Método experimental.

En el presente capítulo se utilizará toda la información de los capítulos anteriores, mediante la experimentación, para encontrar nueva y muy valiosa información. Se diseñará un método, tomando como base las características de las aleaciones metálicas, los reactivos con que se cuenta y el posible tipo de marcado o troquelado. Además, se tomará muy en cuenta la forma en que fueron eliminados los caracteres, debido a que como se mencionó, de ello depende bastante que se logre el objetivo. Lo que se realizará es comprobar lo mencionado en los capítulos anteriores mediante trabajo real.

4.1.1 Descripción de la prueba de reactivación de marcas.

Lo que se busca es recuperar todos los caracteres mediante la aplicación de reactivos químicos, de manera que se definirá un método para el objetivo.

4.1.1.1 Determinar existencia de eliminación de caracteres

Como primer paso se debe estar seguro de que fueron eliminados caracteres de determinada área, y esto se debe llevar a cabo primeramente mediante una inspección visual.

En esta inspección visual se buscan señales de limadura, esmerilamiento u otros indicios visuales, que orienten, en el caso de que se encuentren caracteres en dicha área se debe determinar su autenticidad.

La comprobación de la autenticidad de caracteres se sale de los límites del presente trabajo, pero se mencionaran a manera de buscar bibliografía sobre el tema en caso de necesitarlo o estar interesado en el tema.

Uno de ellos es la prueba de correlatividad, esta es así, en las armas de fuego, vehículos y otros, tiene un número de serie o registro y este en algunos tiene correlatividad y significado, es decir, la posición y el tipo de cada carácter tiene un significado. Por ejemplo un arma de fuego, tipo pistola, marca Colt, modelo 1911, con número de registro C458645, basados en la bibliografía especializada en el tema informa que esta arma en específico, el número de registro tiene como primer carácter la letra C y significa que es comercial o civil, es decir, que no fue fabricada para ningún ejercito, de manera que si se encuentra un arma con estas características que tiene como primer carácter del número de registro la letra X, inmediatamente se descubre que no es original y que en esa área existió otro caracter.

Otra prueba que ayuda mucho es la prueba de comparación de caligrafía; esto es comparando los trazos de los caracteres, para verificar si son originales de fábrica.

El que no se observen indicios visuales, no asegura que no fueron eliminados de dicha área caracteres, debido a que existen técnicas de remoción de material, que pueden tender a confusión. Por tal razón, se debe realizar una medición de las dimensiones de la pieza, y compararlas con las dimensiones de otra pieza con las mismas características o con las especificaciones del fabricante; esto indicará si eliminaron material y la cantidad en unidades métricas. Las pruebas anteriores indicarán si existe eliminación de marcas o caracteres, que se encontraban impresas o troqueladas sobre la pieza que estamos trabajando.

4.1.1.2 Evaluación de la extensión del área a trabajar

Para determinar la extensión del área en la cual se aplicarán los reactivos es necesario conocer el tamaño del área que ocupaba la marca o los caracteres eliminados. Conociendo la extensión del área, se tendrá una mayor eficiencia y eficacia al aplicar los reactivos, de tal manera que es importante. Para conocer la extensión del área a trabajar se pueden utilizar los parámetros o características propias de la pieza, los más importantes son: Si son caracteres, la cantidad y el tamaño de los caracteres que regularmente trae troquelados la pieza y si es una marca, el tamaño de la marca.

Otra característica que se debe tomar en cuenta es la ubicación de la marca o caracteres, por ejemplo lado derecho o izquierdo de la pieza, además se puede buscar un punto de referencia para determinar el área donde se aplicarán los reactivos, por ejemplo, se encuentra a dos centímetros del borde frontal y a un centímetro del borde inferior.

Con los parámetros o características anteriores, se puede ubicar y determinar con un alto grado de certeza el área a trabajar. Lo anterior con el propósito de evitar la aplicación de los reactivos en un área demasiado grande, ya que traería como consecuencias desperdicio de reactivos, tiempo y lo más importante, se estaría dañando superficialmente la pieza en un área mayor.

4.1.1.3 Sometimiento de la pieza a la determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión

En esta etapa del método se realizará la determinación del o los reactivos a aplicar mediante la identificación de metales descrita en el numeral 3.3, seguido de los pasos descritos en los numerales 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 y 3.3.4, del capítulo 3, en el orden siguiente: Limpieza del área a trabajar, aplicación del o los reactivos, neutralización de la pieza y por último la limpieza de la pieza.

4.1.2 Parámetros a medir.

Para llevar a cabo un buen método experimental se definirán los parámetros a medir, esto con el propósito de saber que es lo se busca, y no perder la dirección del método o proceso, evitando exceso de trabajo y desperdicio de reactivos y tiempo.

4.1.2.1 Grupo metálico versus posibles reactivos

Con esto se medirá el grado de efectividad de los diferentes reactivos aplicados a un grupo metálico en específico. Se pretende verificar si el grupo metálico interacciona con el reactivo, altamente compatible, compatible, utilizable o no utilizable. Para comprender los términos se explicará cada uno de ellos.

Altamente compatible, significa que éstos son o es el reactivo que se debe utilizar para maximizar la visibilidad de los caracteres que se pretenden recuperar, en el menor tiempo de exposición y con el menor número de aplicaciones, la desventaja de este tipo de reactivos es que pueden visualizarse los reactivos rápidamente, pero así desaparecerán también, y no se volverán a visualizar de nuevo.

Compatible, significa que este reactivo o reactivos, darán visibilidad de los caracteres que se pretenden recuperar, pero con un mayor tiempo de exposición y mayor número de aplicaciones, se puede utilizar perfectamente y no incidirá en el resultado, la ventaja de este tipo de reactivos es que corroerá el metal de una forma diferencial y a una velocidad baja, con lo cual se pueden ir visualizando los caracteres conforme van apareciendo, esta es una ventaja que no se tiene con los reactivos altamente compatible.

El término utilizable, significa que puede utilizarse, pero dará poca visibilidad de los caracteres, con un tiempo alto de exposición y un alto número de aplicaciones, teniendo como desventaja perder la cantidad de deformación estructural que permanece por debajo del fondo visible, sin embargo es útil cuando el analista nota que al aplicar un reactivo altamente compatible con el grupo metálico, los componentes resultantes de las reacciones tienden a oscurecer el área de trabajo, lo cual no sucederá con un reactivo utilizable.

Y cuando se dice que un reactivo es no utilizable, significa que no se debe ni siquiera intentar aplicarlo a este tipo de metal, ya que causaría corrosión severa y se pasivará, ó en caso contrario no causará corrosión y si la causa no será la deseada.

4.1.2.2 Tiempo de aplicación

Con esto se pretende dar un estimado de tiempo durante el cual se debe aplicar un reactivo, para cambiar a uno más fuerte, o dar un estimado de tiempo para un tipo de metal con el cual se logra una buena visibilidad de los caracteres a recuperar.

Realmente, lo anterior es muy relativo porque los elementos de la aleación que se este trabajando pueden acelerar o desacelerar la reacción, pero puede servir de parámetro. Además, puede indicar si con un mayor tiempo de aplicación mejorará la reacción o por el contrario, solo incrementará el rango de corrosión sin dar resultados útiles.

4.1.3 Características de la probeta

Para poder realizar la recuperación de marcas o caracteres trabajados en frío y que fueron eliminados, no importan las dimensiones de la probeta, ya que no influye con el análisis. Las características de la probeta que influyen en el análisis son:

4.1.3.1 Troquelado o marcado de los caracteres

La primer característica y la más importante es que el troquelado o marcado de los caracteres se haya realizado por medio de trabajo en frío. Esto incluye todas las formas de marcado o troquelados por medio de trabajo en frío que existen, no importando si la colocación se realiza de forma manual o automatizada. Los métodos más importantes para fijar marcas sobre metales, se describieron en el numeral 1.2.5, del capítulo 1, del presente trabajo.

4.1.3.2 Composición química de la aleación metálica

En el presente se describieron en el numeral 3.3.2, los métodos que pueden dar un buen aproximado del grupo metálico al que pertenecen, pero para corroborar estos métodos, se conocerá previamente un aproximado de la composición química de la aleación.

Lo anterior con la finalidad de no cometer o inducir errores en el resultado, debido a que no solo se esta demostrando la recuperación de trabajo en frío, sino el método en su totalidad. Por lo tanto se deben de conocer todos los datos de la pieza o probeta a trabajar.

4.1.3.3 Someter la probeta a tratamiento térmico o recalentamiento después del trabajo en frío

Esta característica es de suma importancia, debido a que si la probeta es sometida a un recalentamiento no intencional o a un tratamiento térmico, esto causará que las estructura granular se homogenice, de tal manera que no se logrará llevar con éxito el método, porque se estará aplicando el método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión en un lugar donde no existe diferencia de estructura granular en el sentido de electronegatividad, es decir, que no existe diferencia de potencial eléctrico.

4.1.4 Características del marcado

La probeta tendrá como mínimo un marcado de cinco caracteres, no importando si son letras o números, con una profundidad de aproximadamente un milímetro, lo mas importante es la profundidad ya que las dimensiones de área no interfieren en el análisis.

También se pueden analizar piezas a las cuales se les haya colocado los caracteres con marcador electrónico, debiendo tener en cuenta que estos difícilmente penetrarán a una profundidad mayor de medio milímetro.

4.1.5 Forma de obliterar

La eliminación de los caracteres que fueron troquelados previamente mediante trabajo en frío, tienen que ser eliminados por medio de métodos mecánicos de remoción de material y no por medio de llenado con soldadura o fundición. Es decir, no importa si se eliminaron con piedra de pulir, limado, lijado, fresado u otros métodos de remoción de material, siempre y cuando no se elimine la deformación estructural que se conserva por debajo del área visible de la pieza.

4.2 Pruebas experimentales: reactivación de marcas en aleaciones ferrosas.

Con estas pruebas se recabará información de los parámetros a medir, básicamente se aplicará el método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión completo, en diversas piezas de diferentes aleaciones y se medirán los parámetros ya mencionados.

Se realizarán las pruebas experimentales primeramente en las aleaciones ferrosas, esto no tiene relación con ninguno de los parámetros a medir, simplemente por conveniencia de la identificación del grupo metálico, ya que la determinación de aleaciones con base de hierro se detectan con la primera de las pruebas, la de magnetismo. Los reactivos que se utilizarán para aleaciones ferrosas se describen en la siguiente tabla:

Tabla XIII. Reactivos para aleaciones ferrosas

Reactivo 1	Ácido nítrico al 25% en agua destilada o desmineralizada.
Reactivo 2	135 gramos de cloruro cúprico en 150 mililitros de agua y 180 mililitros de ácido clorhídrico.
Reactivo 3	20 gramos de sulfuro cuprico, 100 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada o desmineralizada.
Reactivo 4	5 gramos de cloruro cuprico, 60 mililitros de agua destilada o desmineralizada, 30 mililitros de hidróxido de amonio y 60 mililitros de ácido clorhídrico.

4.2.1 Aceros de baja aleación.

Para el caso del acero de baja aleación se utilizan piezas de acero muy similares al acero 1045 y algunas de hierro, en este caso en específico, son partes de armas de fuego a las cuales les borraron el número de registro que le había sido troquelado al momento de su fabricación. Se aplicó el método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión, para recuperar el número de registro o serie que realmente estaba compuesto por letras y números.

El resumen de la aplicación del método a cada una de las piezas es el siguiente: A cada una de las piezas a trabajar, se le pulió el área donde se encontraba el número de registro o serie, y se limpió con acetona, luego se aplicó el reactivo 1, seguido de la aplicación del reactivo 2, de la tabla XIII, posterior a la aplicación de los reactivos se procedió a neutralizar y limpiar el área de aplicación. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos.

Tabla XIV. Resultados de la aplicación de los reactivos 1 y 2, en un acero de baja aleación

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 20
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, seguido del reactivo 2, durante un minuto cada reactivo, esta acción se repitió cuatro veces.
Grupo metálico versus reactivos	Altamente compatible
Aumento de tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, durante un minuto y el reactivo 2, durante cinco minutos, los resultados fueron excelentes, bastó con dos aplicaciones para lograr observar los números borrados previamente. En un análisis, en el cual no se lograban visualizar claramente todos los caracteres del número de registro del arma, se tomo la decisión de aplicar durante un minuto el reactivo 1, y durante una hora el reactivo 2. Al cumplirse el tiempo se trato con sumo cuidado el área trabajada debido a que presentaba una cantidad grande de herrumbre, pero el objetivo que era lograr visualizar el número de registro completo del arma, se cumplió.

En quince de las veinte piezas sometidas al método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión, dieron resultados positivos, es decir, se logró recuperar el número de registro de las armas de fuego. En las cinco piezas con resultados negativos, se encontró que tenían la característica de exceso de esmerilamiento o remoción de material, por lo cual el método no funcionó, ya que el principio del mismo es detectar las diferencias en la estructura, básicamente no había nada que detectar.

Se realizaron pruebas con otras piezas de acero de baja aleación, utilizándose los reactivos 1 y 3, de la tabla XIII, y los resultados son:

Tabla XV. Resultados de la aplicación de los reactivos 1 y 3, en un acero de baja aleación

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 15
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, seguido del reactivo 3, durante un minuto cada reactivo, esta acción se repitió cuatro veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, la reacción del reactivo 3, no es tan severa como el reactivo 2, por lo que deja visualizar de una mejor manera los caracteres que conformaban el número de registro del arma.
Aumento de tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, durante un minuto y el reactivo 3, durante cinco minutos, se repitió tres veces esta acción para lograr visualizar claramente los caracteres que conformaban el número de registro del arma. En uno de los análisis, no se lograban visualizar los caracteres al término de la tercera aplicación del reactivo 3, por lo que se aplicó el mismo por una hora, la visualización de todos los caracteres se logró, y la pieza no sufrió corrosión severa como cuando se aplicó el reactivo 2.

Para terminar con los aceros de baja aleación, se realizaron pruebas con otras piezas del acero anteriormente mencionado, pero para éstas se utilizaron los reactivos 1 y 4, de la tabla XIII. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos:

Tabla XVI. Resultados de la aplicación de los reactivos 1 y 4, en un acero de baja aleación

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 10
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, seguido del reactivo 4, durante un minuto cada reactivo, esta acción se repitió cuatro veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible. Se observó que en aceros pavoneados, el reactivo 4, no fue lo suficiente fuerte o no reaccionó como para lograr observar los caracteres borrados, sin embargo en los aceros sin pavoneado o en piezas de hierro o aceros de muy baja aleación, sí se logró observar los caracteres que habían sido borrados, por lo que este reactivo solo funciona en acero de muy baja aleación o hierro.
Aumento de tiempo de aplicación	Por lo observado, se tomó la decisión de aumentar el tiempo de aplicación del reactivo 1, durante un minuto y el reactivo 4, durante quince minutos, se repitió tres veces esta acción, obteniéndose los mismos resultados, es decir, que solo es funcional en acero de muy baja aleación y hierro.

El reactivo 4, realmente no es un reactivo malo o inútil, por el contrario, en aceros donde los reactivos 2 y 3, corroen violentamente, nos da una herramienta muy buena para lograr observar los caracteres. Por lo tanto, si durante alguna aplicación del reactivo 2, la pieza de trabajo se pasiva por la acción de la solución, lo recomendable es utilizar el reactivo 3, y si vuelve a pasivarse, lo mejor será utilizar el reactivo 4 y trabajar con él hasta lograr observar los caracteres.

4.2.2 Aceros inoxidables.

Para realizar estos análisis se utilizan piezas de acero inoxidable ferrítico, la mayoría muy similares al acero inoxidable 430, estas también son partes de armas de fuego a las cuales les borraron el número de registro que le había sido troquelado al momento de su fabricación. Posteriormente se aplicó el método para recuperar el número de registro o serie, que realmente estaba compuesto por letras y números. Los resultados se describen en la siguiente tabla.

Tabla XVII. Resultados de la aplicación de los reactivos 1 y 2, en aceros inoxidables ferríticos

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 10
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, seguido del reactivo 2, durante un minuto cada reactivo, esta acción se repitió seis veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible. En el acero inoxidable por sus características se debe aplicar un mayor número de veces para lograr observar los caracteres.
Aumento de tiempo de aplicación	Se aumentó el tiempo de aplicación, del reactivo 1 y 2, a cinco minutos cada uno, por aplicación, sin embargo el reactivo 1, que es ácido nítrico al 25%, formó una capa de herrumbre sobre la pieza, el color de esta capa es azul con tono gris. Lo interesante que se saca de esta práctica es que no se debe aplicar el reactivo a base de ácido nítrico por más de dos minutos.
Cambio de las características del acero inoxidable.	Se logró ensayar con dos piezas de acero inoxidable, con 17% Cr y 7% de Ni, y los resultados al aplicarse el reactivo 1, fueron sorprendentes, ya que no fue necesario aplicar el reactivo 2, con la aplicación del primero se inició la visualización de los caracteres, por lo que se siguió con la aplicación del mismo reactivo, lográndose visualizar todos los caracteres.

4.2.3 Fundiciones de hierro blanco.

Para trabajar este tipo de aleaciones con tratamiento térmico especial, previo al troquelado de los caracteres, se utilizaron correderas de algunas armas de fuego, las cuales están fabricadas de fundición de hierro blanco, debido a su uso, ya que las mismas deben ser resistentes a la abrasión, por la alta velocidad a la que trabajan, al mismo tiempo deben ser resistentes al calor ya que en algunas ocasiones están expuestas a altas temperaturas.

Tabla XVIII. Resultados de la aplicación de los reactivos 1, 2, 3 y 4 en fundiciones

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 05
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, seguido del reactivo 2, durante un minuto cada reactivo, esta acción se repitió cuatro veces. Lo mismo se hizo para el reactivo 3 y 4.
Grupo metálico versus reactivos	El reactivo 2, es compatible, los reactivos 3 y 4, se utilizarán, únicamente si al utilizar el reactivo 2, existe una reacción abrupta que conlleve a la pasividad.
Aumento de tiempo de aplicación	Por lo observado, se tomó la decisión de aumentar el tiempo de aplicación del reactivo 1, durante un minuto y el reactivo 2, durante quince minutos, se repitió tres veces esta acción, esto no es recomendable debido a que existe pasividad conforme aumenta el tiempo de exposición del reactivo, de tal modo que a cierto tiempo deja de actuar, lo recomendable por lo observado es que debe dejarse como máximo cinco minutos y luego, limpiar el área y aplicar nuevamente el mismo reactivo si se desea continuar.

4.3 Pruebas experimentales: reactivación de marcas en Aleaciones no ferrosas:

Para continuar con las pruebas, ahora se realizarán con metales no ferrosos, existe una gran variedad en la industria de estos, sin embargo se pueden agrupar en aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel y zinc.

4.3.1 Aluminio y sus aleaciones.

El aluminio al igual que el hierro, es uno de los metales más utilizados para producir aleaciones, el aluminio es utilizado especialmente por su bajo peso. Este se utiliza en muchos casos en estado puro y cuando se le agregan aleantes, la mayoría de veces estos no sobrepasan del 10% en peso. Los reactivos que se utilizarán para aluminio y sus aleaciones se describen en la siguiente tabla:

Tabla XIX. Reactivos para aluminio y sus aleaciones

Reactivo 5	10 mililitros de ácido nítrico y 90 mililitros de etanol.
Reactivo 6	25 gramos de cloruro férrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 7	25 gramos de cloruro férrico, 25 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 8	20 gramos de sulfuro de cobre, 100 mililitros de ácido clorhídrico
Reactivo 9	10 mililitros de hidróxido de sodio y 100 mililitros de agua destilada.

En este caso se utilizan piezas de aluminio, las mismas son partes de armas de fuego a las cuales les borraron el número de registro que les había sido troquelado en la fabricación.

En la siguiente tabla se dan los resultados del trabajo sobre 20 piezas de aluminio, sin embargo es el resultado solamente de la aplicación del reactivo 5, las piezas en las que no se recuperó nada con este reactivo, posteriormente se les aplicó otro reactivo, lo que significa que el procedimiento con las piezas que no reaccionaron no finaliza ahí.

Esto con el fin de evaluar si el reactivo 5, podía utilizarse solo, sin el apoyo de otros reactivos, lo que se pretende con esto es dejar este reactivo, como principal, es decir, trabajar con él un determinado tiempo y si no ocurre mayor cosa entonces aplicar un segundo reactivo, para complementarlo, donde activo 5, pasaría a ser un complementario o auxiliar, como se utiliza cuando se trabaja acero.

Tabla XX. Resultados de la aplicación del reactivo 5 en aluminio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 20
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 5, durante tres minutos, cinco veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, fueron 5 piezas o sea el 25%, las piezas en las que se lograron observar los caracteres, las piezas compatibles eran de armas de la misma marca, por lo que se trato de investigar la composición química de las mismas y por parte de la fábrica, se informó que era aluminio con 4.5% de cobre aproximadamente. Por lo que el metal tiene dos fases, siendo más débil a la corrosión.

En las piezas que no tuvo éxito el reactivo 5, se aplicó un reactivo más y los resultados son los siguientes:

Tabla XXI. Resultados de la aplicación del reactivo 6 en aluminio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 20
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 5, seguido del reactivo 6, durante tres minutos cada uno, este proceso se repitió cinco veces. De las 20 piezas analizadas, 15 provenían del análisis anterior con el reactivo 5, únicamente.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, fueron 10 piezas o sea el 50% en las que se lograron observar los caracteres. No hubo diferencia entre las piezas previamente analizadas y las piezas analizadas por primera vez, por lo que realizar el análisis previo con el reactivo 5, no interfiere en el presente. Las piezas que no reaccionaron, mostraron alta resistencia a la corrosión y así que se investigó y se logró determinar que contenían un bajo porcentaje de cromo, alrededor de 0.2 a 0.5%.

En las piezas que no funciono el reactivo 6, se les aplico el reactivo 7, este último se diferencia del 6, debido a que contiene ácido clorhídrico, el cual es un ácido corrosivo, y entre sus propiedades tiene que es reductor, es decir, cede electrones, mientras que el reactivo 6, solamente contiene cloruro férrico, no así, ácido clorhídrico, de tal modo que el reactivo 7, es fuertemente reductor. Sin embargo como se mencionó anteriormente el ácido clorhídrico tiene la característica que al contacto con el aluminio tiene una reacción efervescente, lo cual dificulta la visualización de los caracteres.

Por tal motivo se utilizará acetona para desplazar el reactivo 7, ya que según la experiencia obtenida con los análisis con aceros, la acetona solo remueve los óxidos muy superficiales, de tal forma que después de aplicar el reactivo 7, si se ve que la pieza empieza a pasivarse inmediatamente debe agitarse el reactivo sobre la pieza, si continúa esta situación, se debe aplicar acetona para que desplace al reactivo y cese la corrosión. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XXII. Resultados de la aplicación del reactivo 7 en aluminio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 10
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, después de haber tenido éxito con el reactivo 6, se aplicó alternamente con el reactivo 5, durante tres minutos, este proceso se repitió cinco veces.
Grupo metálico versus reactivos	Altamente compatible, fueron 5 piezas o sea el 50% en las que se lograron observar los caracteres, y esto es gracias a que el reactivo 7, contiene ácido clorhídrico. Pero no todas las piezas reaccionaron, 5 de ellas mostraron aún más alta resistencia a la corrosión y así que se investigó y se logró determinar que contenían como mínimo 5% zinc, 0.6 magnesio y 0.5 cromo, el cromo aumenta considerablemente la resistencia a la corrosión, por tal motivo en 5 de las 10 piezas objeto de análisis no se lograron visualizar los caracteres.
Observaciones	Se analizaron cinco piezas por aparte sin ser sometidas a pruebas previas con otros reactivos, en ellas se utilizó alternamente el reactivo 5 y el reactivo 7, y se obtuvo una alta compatibilidad, todas las piezas reaccionaron.

Se aplicó el reactivo 8 en conjunto con el reactivo 5, en piezas de aluminio que eran partes de armas de fuego.

Tabla XXIII. Resultados de la aplicación del reactivo 8 en aluminio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 8, después de haber aplicado el reactivo 5, durante tres minutos, este proceso se repitió cinco veces. Las piezas no provenían de análisis previos.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, las 5 piezas o sea el 100% reaccionaron con éxito. Se debe recalcar que se utilizaron piezas con composición química que contenían como mínimo 5% zinc, 0.6 magnesio y 0.5 cromo. Además se aplicó el reactivo 8, alternadamente con el 5, a una pieza de acero con contenido como mínimo, de 5% de cobre y los resultados fueron desastrosos, debido a que el área trabajada se pasivó, y al limpiar con acetona, se levantaban capas de herrumbre, lo que hizo que el área se gastara y no se lograra observar ningún carácter. Lo anterior pone de manifiesto que el analista debe conocer la magnitud de la reacción, por lo que en un área aparte del que se va a trabajar se deberán probar los reactivos, depositando una o dos gotas y verificar si es muy fuerte para la aleación a trabajar.
Observaciones	Se analizaron las 5 piezas que provenían de análisis previos y no se logró visualizar ningún carácter, y era de esperarse, ya que la aplicación previa de varios reactivos, eliminó parte del trabajo en frío que estaba por debajo del fondo visible, ya que para aplicar un nuevo reactivo es necesario, limpiar el área, incluso con lija 500, para eliminar algunos residuos de herrumbre.

Por último para las aleaciones de aluminio se puede utilizar una base fuerte como reactivo, y esta es el reactivo 9, el cual contiene hidróxido de sodio.

Tabla XXIV. Resultados de la aplicación del reactivo 9 en aluminio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 9, durante tres minutos, este proceso se repitió cinco veces. Las piezas no provenían de análisis previos.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, 3 piezas reaccionaron con éxito. Se debe recalcar que se utilizaron piezas con composición química que contenían como mínimo 5% zinc, 0.6 magnesio y 0.5 cromo. La pieza se pasiva demasiado rápida, lo que ayuda a visualizar los caracteres, es que después de 30 segundos de aplicar el reactivo 9, se debe eliminar con acetona, para detener la corrosión.
Observaciones	Se analizaron las 3 piezas con diferentes aleantes, y los resultados fueron los mismos, la pasivación era rápida, pero se utilizó acetona para eliminar el reactivo 9, lográndose con esto observarse los caracteres, lo que nos deja como experiencia que este reactivo se debe utilizar con cuidado en el sentido de no dejar pasivar la pieza, lo que conlleva para el analista estar atento y al momento de observar que la pieza comienza a pasivarse, inmediatamente eliminar el reactivo con acetona.

Un problema que se observó con todos los reactivos excepto el 5, fue que siempre al aplicarlos, la reacción era efervescente, y esto dificulta la visibilidad al momento de la aplicación, debiéndose eliminar el reactivo para verificar si algún carácter o caracteres era visible.

4.3.2 Cobre y sus aleaciones.

El cobre al igual que los dos metales anteriores (hierro y aluminio) y sus aleaciones, tiene muchos usos en la industria, por ejemplo materiales eléctricos, válvulas, partes para bombas y engranajes, entre otros.

La conductividad eléctrica del cobre es muy parecida a la conductividad eléctrica del aluminio, un claro ejemplo es que el aluminio es utilizado para transportar energía eléctrica entre grandes distancias y el cobre para distribuciones en instalaciones eléctricas de edificios y domicilios, y un motivo importante para esto es que el cobre es más dúctil y maleable.

De tal forma que las características de conductividad eléctrica son muy similares. Pero la corrosión tiene como base la electronegatividad y en esto el cobre es catódico y el aluminio es anódico, sin embargo se pueden utilizar para el cobre y sus aleaciones, los mismos reactivos que se utilizan para el aluminio, ya que estos contienen agentes oxidantes como el ácido nítrico y agentes reductores como el ácido clorhídrico, los reactivos se enumeran en la tabla XIX, el reactivo que no se utilizara para este caso es el 8, debido a que entre sus componentes tiene sulfuro de cobre, por lo que no reaccionará a la hora de aplicarlo.

Tabla XXV. Reactivos para aluminio y sus aplicaciones utilizados también para cobre y sus aleaciones

Reactivo 5	10 mililitros de ácido nítrico y 90 mililitros de etanol.
Reactivo 6	25 gramos de cloruro férrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 7	25 gramos de cloruro férrico, 25 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 9	10 mililitros de hidróxido de sodio y 100 mililitros de agua destilada.

4.3.2.1 Latón

Dos de las aleaciones más utilizadas del cobre son el bronce y el latón, iniciaremos trabajando primeramente con el latón, para esto utilizamos casquillos de armas de fuego, estos traen troquelado en su base generalmente la marca, el calibre u otras especificaciones del fabricante, el material del que están construidos, generalmente es una aleación de 65% de cobre y 35% de zinc, con una variación de $\pm 5\%$ de estas cantidades, esto dependiendo del fabricante.

Para esta practica se tomarán 5 casquillos, la ventaja que se tiene es que se esmerilará la base del mismo para eliminar la parte visible del trabajo en frío, es decir, las marca que viene troqueladas, esto nos permitirá eliminar exactamente la cantidad deseada de material y estar seguros que en esa área existe deformación cristalina.

Tabla XXVI. Resultados de la aplicación del reactivo 5 en latón

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 5, durante tres minutos, cinco veces.
Grupo metálico versus reactivos	No compatible. No se observó ningún carácter. La pieza no mostró corrosión severa pero no se logró el objetivo que es visualizar los caracteres.

Se continuaron las pruebas y para esto se aplicó el reactivo 6, en forma alterna con el reactivo 5. El por qué de la aplicación de este ultimo reactivo es debido a que el mismo es un agente oxidante:

Tabla XXVII. Resultados de la aplicación del reactivo 6 en latón

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 6, después de haber aplicado el reactivo 5, durante tres minutos, este proceso se repitió cinco veces.
Grupo metálico versus reactivos	Utilizable, se observaron algunos fragmentos de caracteres, pero no se definieron los mismos.

En la prueba anterior el reactivo 6, es básicamente cloruro férrico, no contiene un agente reductor por lo cual no reacciona con el latón, hay que tomar en cuenta que el latón es utilizado por su fuerte resistencia a la corrosión.

Tabla XXVIII. Resultados de la aplicación del reactivo 7 en latón

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, se aplicó alternadamente con el reactivo 5, durante tres minutos, este proceso se repitió cinco veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, se visualizaron todos los caracteres que se encontraban en la base del casquillo con la primera aplicación del reactivo 7, el resto de aplicaciones sirvió solamente para terminar de fijar, para lograrse una mejor visualización.

Ahora se cambia a un reactivo que al ser aplicado con el aluminio demostró ser fuerte de modo que tiende a pasivar la pieza, este es el 9.

Tabla XXIX. Resultados de la aplicación del reactivo 9 en latón

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 9, durante tres minutos, este proceso se repitió cinco veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, se visualizaron todos los caracteres que se encontraban en la base del casquillo en las dos primeras aplicaciones, en este caso no se pasiva la pieza, ocurre una corrosión normal.

4.3.2.2 Bronce

El segundo de los metales que tiene como base el cobre, que se someterá a la prueba es el bronce, para esto se utilizaran piezas de bronce C83600, el cual tiene una composición química de 85 Cu, 5 Sn, 5 Zn, 5 Pb, y que en el mercado local es denominado bronce fosforado.

Los reactivos que se utilizarán para esta prueba son los mismos que se utilizaron para el latón, debido a que lo que cambia solamente son los aleantes y la base continúa siendo cobre.

Tabla XXX. Resultados de la aplicación del reactivo 5 en bronce

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 5, durante tres minutos, tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, la pieza sufre corrosión pero no es del tipo deseada.

Tabla XXXI. Resultados de la aplicación del reactivo 6 en bronce

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 6, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, la corrosión fue demasiado leve.

Tabla XXXI. Resultados de la aplicación del reactivo 7 en bronce

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, se visualizaron todos los caracteres que se encontraban en la base del casquillo desde la primera aplicación del reactivo.

Tabla XXXIII. Resultados de la aplicación del reactivo 9 en bronce

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 9, durante tres minutos, este proceso se repitió tres.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable, la corrosión fue demasiado leve, casi inexistente.

El reactivo 9, a pesar que con el aluminio reacciona violentamente y con el latón funcionó bien, en las piezas de bronce no surgió efecto.

4.3.2.3 Cobre

Ahora por último se trabaja el cobre, que en la mayoría de veces es utilizado para conducción eléctrica, para piezas arquitectónicas y otras piezas como parrillas, entre otros.

Para este caso también se utilizarán los reactivos para aluminio, que se utilizaron para latón y bronce, haciendo la salvedad de que el reactivo 8, no se volverá a utilizar en esta ocasión.

Tabla XXXIV. Resultados de la aplicación del reactivo 5 en cobre

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 5, durante tres minutos, tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, sin embargo la pieza sufre corrosión.

Tabla XXXV. Resultados de la aplicación del reactivo 6 en cobre

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 6, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, las características de la corrosión fueron muy similares cuando se aplicó el reactivo 5.

Tabla XXXVI. Resultados de la aplicación del reactivo 7 en cobre

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, se visualizaron todos los caracteres.

Tabla XXXVII. Resultados de la aplicación del reactivo 9 en cobre

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 5
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 9, durante tres minutos, este proceso se repitió tres.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable, las piezas no mostraron corrosión.

4.3.3 Aleaciones de magnesio.

Las aleaciones de magnesio compiten en la industria con las aleaciones de aluminio, esto debido a que el magnesio pesa un tercio menos que el aluminio, ahora como ya se mencionó una característica en contra es que el magnesio se corroe más rápido que el aluminio, y esto era de esperarse ya que en la tabla I, del capítulo 1, se ve claramente que el aluminio tiene un potencial estándar de Oxidación-Reducción de -1.662, mientras que el magnesio tiene -2.363.

Las aleaciones de magnesio rara vez se trabajan en frío debido a que no poseen buena ductilidad, de tal forma que la mayoría de piezas se forman en caliente, como lo demuestra la tabla IX, en la cual la única aleación trabajada en frío es la HK31A, esta tiene como aleantes elementos de tierras raras y es para usos a altas temperaturas. Para los fines del presente trabajo fue imposible encontrar piezas de magnesio que fueran trabajadas en frío. Se trató de realizar troqueles en una pieza de magnesio (aro para neumático de automóvil) y este se fisuró, por lo que no se continuó con la práctica.

Una marca de arma de fuego, utiliza un bastidor o cajón de mecanismos de magnesio, y este trae troquelado el número de registro del arma, por lo que se trabajaron las pruebas sobre ésta, utilizándose los reactivos utilizados para aluminio que se describen en la siguiente tabla:

Tabla XXXVIII. Reactivos para aluminio y sus aleaciones y utilizado para aleaciones de magnesio

Reactivo 5	10 mililitros de ácido nítrico y 90 mililitros de etanol.
Reactivo 6	25 gramos de cloruro férrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 7	25 gramos de cloruro férrico, 25 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 8	20 gramos de sulfuro de cobre, 100 mililitros de ácido clorhídrico
Reactivo 9	10 mililitros de hidróxido de sodio y 100 mililitros de agua destilada.

Los resultados obtenidos en las pruebas se presentan en las siguientes tablas.

Tabla XXXIX. Resultados de la aplicación del reactivo 5 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 5, durante tres minutos, tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, presenta corrosión pero no se observan, al menos fragmentos de los caracteres.

Tabla XL. Resultados de la aplicación del reactivo 6 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 6, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, la pieza presentó corrosión leve.

Tabla XLI. Resultados de la aplicación del reactivo 7 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable, no se logró visualizar ningún carácter, sin embargo la corrosión que presenta es similar al que presentan las piezas de aluminio.

Tabla XLII. Resultados de la aplicación del reactivo 9 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 9, durante tres minutos, este proceso se repitió tres.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable, no presenta corrosión.

Las piezas utilizadas efectivamente eran de aleaciones de magnesio, sin embargo, al consultar a la fábrica, esta informó que los números de serie de estas armas de fuego, son troqueladas en caliente, luego se le realiza un tratamiento térmico para que obtenga la resistencia adecuada, lo que anula las pruebas realizadas, por tal motivo no se logró determinar realmente, si los reactivos aplicados a dichas piezas son no utilizables.

4.3.4 Níquel.

El níquel es especialmente utilizado por su alta resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas, de tal forma que conseguir piezas de metal de níquel es bastante difícil sin embargo, algunas máquinas las traen, pero en forma aleada.

Para la presente práctica se utilizarán algunos reactivos ya utilizados anteriormente con otros metales tanto ferrosos como no ferrosos, los reactivos que tienen composición química similar, es decir, solo cambian los porcentajes de de los componentes, se utilizará el más fuerte, esto es debido a las características de resistencia a la corrosión que presenta este metal en particular.

Tabla XLIII. Reactivos utilizados en aleaciones de magnesio

Reactivo 1	Ácido nítrico al 25% en agua destilada o desmineralizada.
Reactivo 2	135 gramos de cloruro cúprico en 150 mililitros de agua y 180 mililitros de ácido clorhídrico.
Reactivo 7	25 gramos de cloruro férrico, 25 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada.
Reactivo 8	20 gramos de sulfuro de cobre, 100 mililitros de ácido clorhídrico

Debido a lo difícil que es conseguir piezas de aleaciones de níquel, para la presente práctica se utilizó una pieza de Monel 400 y una de Inconel 600.

Tabla XLIV. Resultados de la aplicación del reactivo 1 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplico el reactivo 1, durante tres minutos, tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable. No se observó ningún carácter, la pieza presenta corrosión.

Tabla XLV. Resultados de la aplicación del reactivo 2 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 2, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, únicamente con la pieza de Inconel 600, en la cual se observaron los caracteres.

Tabla XLVI. Resultados de la aplicación del reactivo 7 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, únicamente con la pieza de Monel 400, en esta se observaron los caracteres.

Tabla XLVII. Resultados de la aplicación del reactivo 9 en aleaciones de magnesio

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 3
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 7, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	No utilizable, la pieza sufre corrosión muy leve y no se visualizan los caracteres.

4.3.5 Zinc

El zinc al igual que el níquel es utilizado por su característica de resistencia a la corrosión, es utilizado aleado con aluminio. Este material tiene la característica de que tiene un bajo punto de fusión, por lo que no es utilizado en piezas que sean expuestas al calor.

Para este caso se utilizarán piezas de zinc con 4% de aluminio. En la tabla L, se enumeran los reactivos a utilizar.

Tabla XLVIII. Reactivos para aleaciones que contengan zinc

Reactivo 1	Ácido nítrico al 25% en agua destilada o desmineralizada.
Reactivo 10	20 gramos de ácido crómico y 1.5 gramos de sulfato de sodio con 100 mililitros agua destilada

Tabla XLIX. Resultados de la aplicación del reactivo 1 en aleaciones de Zinc

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 1, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, se visualizaron los caracteres.

Tabla L. Resultados de la aplicación del reactivo 10 en aleaciones de Zinc

Parámetro	Cantidad de piezas analizadas: 2
Tiempo de aplicación	Se aplicó el reactivo 10, durante tres minutos, este proceso se repitió tres veces.
Grupo metálico versus reactivos	Compatible, se visualizaron los caracteres. Se definieron mejor los caracteres, que con la aplicación del reactivo 2.

4.4 Resultados y observaciones

Todos los reactivos utilizados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla LI. Total de reactivos utilizados

Reactivo	Resultados
1	Ácido nítrico al 25% en agua destilada o desmineralizada.
2	135 gramos de cloruro cúprico en 150 mililitros de agua y 180 mililitros de ácido clorhídrico.
3	20 gramos de sulfuro cúprico, 100 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada o desmineralizada.
4	5 gramos de cloruro cúprico, 60 mililitros de agua destilada o desmineralizada, 30 mililitros de hidróxido de amonio y 60 mililitros de ácido clorhídrico.
5	10 mililitros de ácido nítrico y 90 mililitros de etanol.
6	25 gramos de cloruro férrico y 100 mililitros de agua destilada.
7	25 gramos de cloruro férrico, 25 mililitros de ácido clorhídrico y 100 mililitros de agua destilada.
8	20 gramos de sulfuro de cobre, 100 mililitros de ácido clorhídrico
9	10 mililitros de hidróxido de sodio y 100 mililitros de agua destilada.
10	20 gramos de ácido crómico y 1.5 gramos de sulfato de sodio con 100 mililitros agua destilada

En la siguiente tabla se presentan resumidos los resultados de cada uno de los reactivos y algunas observaciones.

Tabla LII. Resultados en la aplicación de cada uno de los reactivos

Reactivo	Resultados	Observaciones
1	<p>Altamente compatible con piezas de acero de baja aleación, aceros inoxidable y fundiciones, como reactivo secundario.</p> <p>En aceros inoxidable con alto contenido de cromo y níquel, este reactivo se utiliza como reactivo primario.</p> <p>También se utiliza en piezas de zinc, como reactivo primario.</p>	<p>Se le llama secundario debido a que este es el que prepara la pieza, tiene que ser aplicado alternamente con otro reactivo que permitirá visualizar los caracteres.</p> <p>El reactivo primario no necesita de otro reactivo, es solo prepara y permite visualizar los caracteres.</p> <p>Recomendable que las aplicaciones sean como máximo cinco minutos.</p>
2	<p>Altamente compatible con piezas de acero de baja aleación, aceros inoxidable y fundiciones de hierro blanco, como reactivo primario.</p> <p>Además es compatible con aleaciones de níquel como el Inconel.</p>	<p>Debe tenerse el cuidado de no aplicarse durante largos períodos de tiempo, ya que formará demasiada herrumbre.</p> <p>En fundiciones es recomendable que las aplicaciones sean como máximo cinco minutos.</p>
3	<p>Compatible con aceros de baja aleación y fundiciones de hierro blanco, es recomendable su utilización en piezas en las que el reactivo 2, reacciona violentamente, corriendo el riesgo de pasivar la pieza.</p>	<p>Puede dejarse durante largos períodos de tiempo para lograr visualizarse los caracteres, sin correr riesgo de que la pieza se pasive.</p>
4	<p>Compatible en aceros de baja aleación y fundiciones de hierro blanco. La velocidad de la corrosión es bastante bajo por lo que con este reactivo no se corre el riesgo de pasivar la pieza.</p>	<p>Es recomendable aplicarse durante diez o quince minutos, para lograr observar los caracteres.</p>

Continuación de la Tabla LII. Resultados en la aplicación de cada uno de los reactivos

Reactivo	Resultados	Observaciones
5	Compatible como reactivo primario con aleaciones de aluminio que contengan cobre, magnesio, zinc o silicio en un porcentaje de entre 3 y 7% , no necesariamente deben estar presentes los cuatro aleantes, basta con uno de ellos en el rango de porcentaje mencionado. Un aleante en estos porcentajes hace que se formen dos fases, haciendo al material más débil ante la corrosión.	No existe problema de que la pieza se pasive, se debe intentar con este reactivo como mínimo seis aplicaciones, de tres minutos cada uno. Se puede utilizar el reactivo 5, como sustituto del reactivo 1, la diferencia es que el 5, tiene entre sus componentes etanol, lo cual hace que el metal sobre el que se este aplique sea más soluble.
6	Compatible, como reactivo primario con aluminio y aleaciones de aluminio con 3 a 7% de aleantes como cobre, magnesio, zinc o silicio.	No existe riesgo de que la pieza se pasive. La corrosión que produce es de lenta, por lo que se debe aplicar repetidas veces durante tres minutos.
7	Altamente compatible, como reactivo primario con todas las aleaciones de aluminio, excepto las que contienen cromo. Compatible con cobre, latón y bronce. Además es compatible con aleaciones de Níquel como el Monel.	Para mejorar la visualización de los caracteres se debe desplazar el reactivo 7, con acetona.
8	Compatible únicamente con aleaciones de aluminio que contengan cromo, como aleante, ya que si se aplica a otras aleaciones la corrosión producida es severa y la pieza se pasiva.	La razón por la que en las aleaciones de aluminio con cromo, este reactivo funciona y no provoca que la pieza se pasive, es que el cromo aumenta la resistencia a la corrosión de la aleación.

Continuación de la Tabla LII. Resultados en la aplicación de cada uno de los reactivos

Reactivo	Resultados	Observaciones
9	Compatible con las piezas de aluminio resistente a la corrosión, como las que contienen cromo. Se puede intentar con las aleaciones de aluminio que tengan una sola fase, ya que estas presentan mayor resistencia a la corrosión. Compatible con latón.	Para lograr visualizar los caracteres se debe desplazar el reactivo 9, con acetona. El reactivo 9 no es un electrolito, por el contrario es una base fuerte, de tal forma que para neutralizar la pieza, se debe eliminar con acetona y agua. En el latón ocurre una corrosión no violenta, no se corre el riesgo de que la pieza se pasive.
10	Compatible con aleaciones de zinc	Este reactivo funciona mejor que el 1.

CONCLUSIONES

1. El método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión es aplicable a todas las piezas metálicas, siempre y cuando se conozca el grupo metálico o aleación del que está fabricada y que la misma haya sido trabajada en frío.
2. Las áreas trabajadas en frío se corroen con mayor velocidad, y esto es debido a que la estructura cristalina sufre deformaciones llamadas dislocaciones, que conducen a una unión deficiente, por lo cual el metal puede ser corroído diferencialmente, lo que proporciona un fenómeno visual para determinar si ha sido trabajado en frío y el área o la forma del área afectada, es decir, las siluetas.
3. Un método sencillo que permite la identificación del grupo metálico del que está fabricada la pieza, consta de tres pruebas: la de magnetismo, la de efervescencia y la de manchado, en ese orden.
4. En las aleaciones ferrosas, se debe aplicar en todos los casos, primeramente el reactivo 1, el cual es ácido nítrico al 25%, debido a que en los casos, donde la eliminación de los caracteres es muy superficial, bastará con la aplicación de este reactivo para poder visualizar los caracteres, evitando la utilización de otros reactivos, minimizando de esta forma el desgaste por corrosión de la pieza.

5. Las piezas de aleaciones de magnesio, que conserven las características mecánicas de este, casi no se encuentran trabajadas en frío, por lo que no es factible utilizar el método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión, esto es debido a la poca ductilidad que posee el magnesio. Si se encontrara alguna pieza de aleación de magnesio trabajada en frío, con caracteres eliminados, es factible utilizar los mismos reactivos que se utilizan para aleaciones de aluminio.

6. Los productos de los reactivos y el metal de la pieza, en ocasiones dificultan la visibilidad de los caracteres; se debe utilizar acetona para remover los productos de la reacción, no corriéndose el riesgo de eliminar las siluetas visibles de los caracteres, ya que la acetona solamente remueve los óxidos superficiales.

RECOMENDACIONES

1. Cuando el área a trabajar posee ralladuras a consecuencia del proceso de eliminación de los caracteres, no se deben eliminar las ralladuras demasiado profundas, ya que con esto se está eliminando la deformación de la estructura que posee por debajo del fondo visible, lo que imposibilitaría que el método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión funcione.
2. En la utilización de los reactivos, se debe asegurar que no cause pasivación a la pieza, para esto se aplica en un área adjunta al área a trabajar una pequeña cantidad del reactivo que utilizaremos y se verifica si en la pieza se forma una capa gruesa y adherente de herrumbre, de ser así, se utilizará otro reactivo y se realizará la misma prueba hasta encontrar el reactivo adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Flin, Richard A. y Paul K. Trojan. Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones. McGraw-Hill, México, D.F. 3ª. Ed. Mayo 1994.
2. Redmore, Fred H. Fundamentos de Química. Editorial Prentice/Hall Internacional, Madrid España, 1981.
3. Avner, Sidney H. Introducción a la Metalurgia Física. McGraw-Hill, México, D.F. 2ª. Ed. Noviembre 1994.
4. Verhoeven, John D. Fundamentos de Metalurgia Física. Editorial Limusa, México, D.F. 1ª. Ed. 1994.
5. Desideri, Javier Eduardo. La Química Analítica en la Investigación del Delito. Editorial Policial, Buenos Aires Argentina, 1987.

ANEXO 1

Pasos del método de determinación de trabajo en frío mediante análisis de la corrosión.

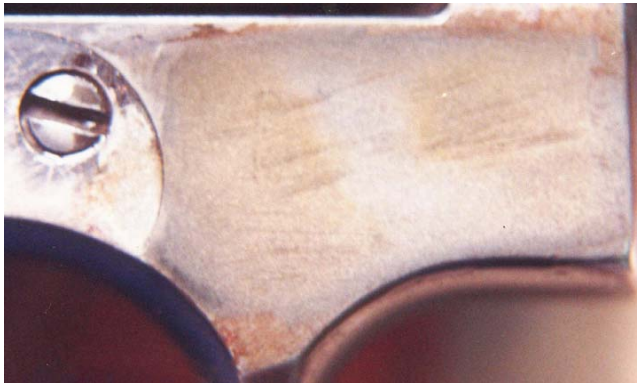


Imagen 1

Paso 1: Preparación de la pieza, se debe dejar la pieza similar a la superficie de un espejo, la imagen 1, muestra la pieza sin ser preparada y la imagen 2, como debe quedar la pieza.



Imagen 2

Paso 2: Aplicación del o los reactivos, de pulir el área a trabajar se debe eliminar cualquier sustancia que pueda causar interferencia y para eso aplicamos un solvente orgánico, luego con hisopos de algodón y base de madera se debe aplicar suavemente el primer reactivo, si existiera un segundo reactivo a aplicar, se procede de la misma forma que se aplicó el primero, en las imágenes 3 y 4, se muestra la forma de aplicación del primer y segundo reactivo, respectivamente.



Imagen 3



Imagen 4

Paso 3: Neutralización de la pieza, en esta etapa se les neutralizan a los reactivos que se utilizaron, a manera de evitar al máximo la continuación del proceso de corrosión.

Paso 4: Limpieza de la pieza, en este paso, lo más importante es eliminar y proteger a la pieza de la corrosión, en la imagen 5 se observa como debe quedar la pieza después de neutralizarla y limpiarla.

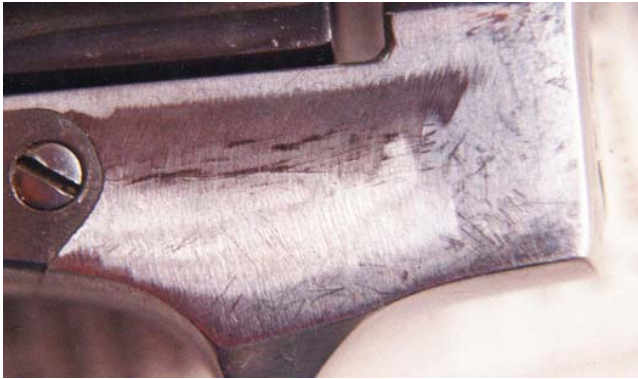


Imagen 5