

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**INFLUENCIA DE LA CORROSIÓN SOBRE LOS
CONDUCTORES DE ALUMINIO EN LAS LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN EN 33 kV**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

PEDRO LUIS VIZARRETA GARCÍA

**PROMOCIÓN
1985 - I**

**LIMA – PERÚ
2006**

**INFLUENCIA DE LA CORROSIÓN SOBRE LOS CONDUCTORES DE
ALUMINIO EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN 33 kV**

Dedico este trabajo a:

Mi esposa Nora, con amor.

Mi madre Flor de María, con agradecimiento eterno.

Mis hijos Luis Miguel, Sandro y Fabiola, con cariño.

Mis hermanos y sobrinos por su constante apoyo.

SUMARIO

En el presente trabajo se realiza un estudio sobre el comportamiento de los conductores de aluminio en las líneas de transmisión a nivel de 33 kV en la ciudad de Arequipa.

En primer lugar se realiza un análisis sobre las características del aluminio, así como su aplicación como conductor eléctrico. Luego analizamos los procesos de corrosión a los cuales se ve afectado como consecuencia de su uso como cable de energía.

Posteriormente hacemos una referencia a los exámenes, análisis y pruebas de laboratorio a los cuales se somete el conductor de aluminio para establecer sus propiedades eléctricas y mecánicas.

Finalmente tomamos dos casos prácticos realizados a cables de energía, en la ciudad de Arequipa:

- a) El sistema de transmisión de la ciudad de Arequipa a cargo de la Sociedad Eléctrica del Sur Oeste, SEAL, con una configuración física en anillo.
- b) La línea de transmisión que transporta la energía desde la central hidroeléctrica de Charcani I hasta las instalaciones de la fábrica de cemento Yura.

ÍNDICE

PRÓLOGO

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 Introducción	4
1.2 Aluminio	5
1.2.1 Importancia	5
1.2.2 Producción	6
1.2.3 Propiedades	15
1.2.4 Las aleaciones ligeras	18
1.2.5 Metalurgia	22
1.2.6 Fabricación de conductores	29
1.3 Corrosión	31
1.3.1 Tipos de procesos de corrosión	32
1.3.2 Corrosión acuosa	34
1.4 Corrosión en el aluminio	58
1.4.1 Reacciones en el material desenergizado	60
1.4.2 Reacciones en el material energizado	62
1.4.3 Principales mecanismos de corrosión	65

CAPÍTULO II

EXAMENES Y PRUEBAS DE LABORATORIO

2.1	Introducción	72
2.2	Exámenes metalográficos	73
2.3	Pruebas mecánicas	84
2.3.1	Pruebas de esfuerzo de tracción	84
2.3.1	Pruebas de dureza	91
2.4	Pruebas eléctricas	99
2.4.1	Puente de Thomson	100

CAPÍTULO III

CASOS PRÁCTICOS

3.1	Introducción	105
3.2	Evaluación de conductores del sistema en 33 kV, ciudad de Arequipa	106
3.2.1	Generalidades	106
3.2.2	Características básicas del sistema en 33 kV	106
3.2.3	Consideraciones previas	107
3.2.4	Trabajos efectuados	108
3.2.5	Resultados de las pruebas	110
3.2.6	Observaciones	110
3.2.7	Conclusiones	119
3.3	Evaluación de conductores en la línea de transmisión Chilina-Yura S.A.	120
3.3.1	Antecedentes	120
3.3.2	Situación actual	122
3.3.3	Consideraciones previas	122

3.3.4 Trabajos efectuados	123
3.3.5 Resultados de las pruebas	124
3.3.6 Observaciones	125
3.3.7 Conclusiones	130
CONCLUSIONES	132
ANEXOS	134
Anexo A. Informes de las pruebas de laboratorio del conductor del sistema en 33 kV, ciudad de Arequipa.	135
Anexo B. Informes de las pruebas de laboratorio del conductor de la línea de transmisión Chilina-Yura S.A.	163
Anexo C. Características eléctricas y mecánicas del conductor ACSR.	186
BIBLIOGRAFÍA	193

PRÓLOGO

Los conductores eléctricos desempeñan un papel muy importante en una línea aérea de transmisión. Representan aproximadamente el 30 % del costo de la línea y en nuestro país se emplean los conductores de aleación de aluminio en vez de los conductores de cobre.

En los primeros años estos conductores tuvieron procedencia extranjera, usándose diversos tipos de aleación de aluminio tales como Aldrey de Suiza, Almelec de Francia, Arvidal de Canadá, etc., hasta que en los años 70 se inició la fabricación nacional con materia prima importada en forma de alambrón, con no muy buenos resultados. Actualmente estos conductores se importan de Venezuela, siendo uno de los fabricantes la firma Conal.

La corrosión es la destrucción más o menos rápida de los materiales metálicos sometidos a la acción de un medio que puede ser químico o electroquímico.

La corrosión química proviene de la reacción química del metal y el medio ambiente. Por ejemplo, entre el oxígeno y el aluminio.

La corrosión electroquímica corresponde a los procesos en los que existe una corriente eléctrica, resultante de un desplazamiento de electrones de una parte del metal a otra.

El aluminio y sus aleaciones que no tienen cobre, prácticamente no se alteran expuestas a una atmósfera normal. Sin embargo el ataque de las aleaciones de aluminio se produce rápidamente en presencia de humedad, cuando se encuentran en contacto de metales pesados, tales como cobre, latón, estaño, plomo, níquel, cromo, etc.

En la atmósfera costera el aluminio se empaña y puede presentar incluso pequeñas picaduras. Sin embargo si el material es elegido cuidadosamente y su espesor es suficiente para que los efectos de la capa superficial corroída sean despreciables, las características mecánicas no evolucionan prácticamente.

En la práctica, por lo tanto, el aluminio se comporta como un metal mucho más noble de que es en realidad, debido a una presencia de una película de alúmina sobre su superficie. Sin embargo, si por una razón cualquiera la capa de óxido llega a ser deteriorada, por ejemplo mecánicamente, sin que pueda reconstruirse, se pueden observar corrosiones importantes.

El presente trabajo pretende hacer un estudio de la influencia de la corrosión en la ciudad de Arequipa en conductores de aleación de aluminio a nivel de 33 kV, para lo cual se van a exponer dos casos prácticos realizados en empresas distintas.

El informe consta de tres capítulos, en el capítulo I se describen los fundamentos teóricos relativos al aluminio desde su elaboración hasta la fabricación de conductores. Asimismo ofrecemos una visión general del fenómeno de la corrosión y específicamente la corrosión en los conductores de aluminio.

En el capítulo II hacemos una referencia acerca de los exámenes y pruebas de laboratorio a la que son sometidos los metales para la comprobación de sus características físicas, mecánicas y eléctricas.

En el capítulo III exponemos los casos prácticos de verificación del estado de los conductores de aleación de aluminio a las empresas SEAL y Cementos Yura de Arequipa.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Introducción

En este capítulo trataremos de exponer los fundamentos teóricos que dan origen a la fabricación del cable de aluminio usado en las líneas de transmisión así como estudiar los procesos de deterioro por efecto de la corrosión atmosférica.

El aluminio y sus aleaciones son de los metales más resistentes a la corrosión atmosférica entre los empleados para líneas de transmisión. Son ciento de veces más resistentes que el acero, varias veces más que el zinc e igual o mejor que el cobre en la mayoría de las atmósferas.

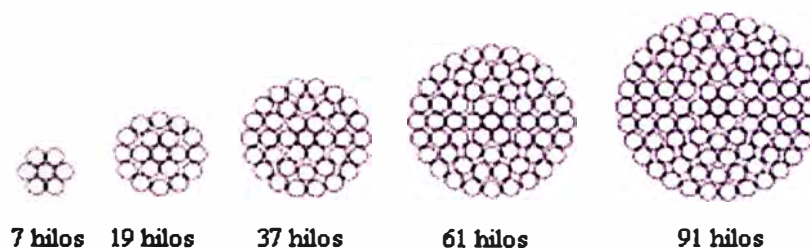


Figura 1.1 Conductor de aleación de aluminio AAAC

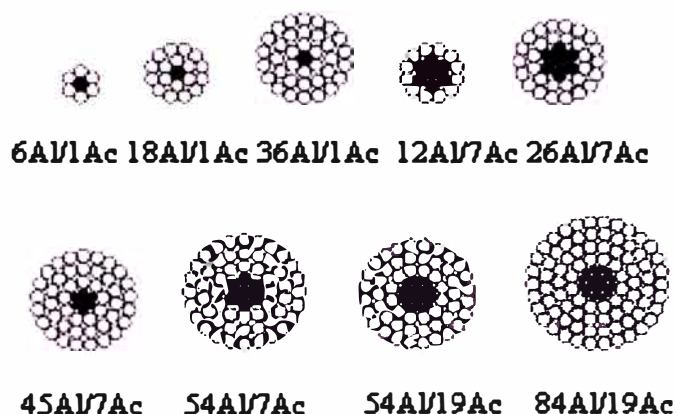


Figura 1.2 Conductor de aleación de aluminio con alma de acero ACSR

1.2. Aluminio

1.2.1. Importancia

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y constituye el 7,3 % de su masa. En su forma natural, sólo existe en una combinación estable con otros materiales (particularmente en sales y óxidos) y no fue sino hasta 1 808 cuando fue descubierto. A partir de entonces, demandó muchos años de investigación y ensayos el poder aislar el aluminio puro del mineral en su estado original, para poder hacer viable su producción, comercialización y procesamiento.

De esta manera, el aluminio sólo se produjo para ser comercializado durante el último siglo y medio y es todavía un material muy joven. La humanidad ha utilizado cobre, plomo y estaño por miles de años; sin embargo en la actualidad se produce más aluminio que la suma del resto de la producción de los otros metales no ferrosos. La producción de aluminio primario durante el año 2 003 fue de 28 millones de toneladas y se prevé crezca a tasas superiores al 5 % durante los próximos años.

El aluminio es un material sustentable. Dados los actuales niveles de producción, las reservas conocidas de bauxita, de las cuales se obtiene el mineral de aluminio,

durarán por cientos de años. Más del 55 % de la producción mundial de aluminio se realiza utilizando energía hidroeléctrica renovable.

El aluminio es ideal para esas aplicaciones por su elevada conductividad eléctrica, bajo peso y buena resistencia a la corrosión.

Casi todos los sistemas de iluminación, motores, aplicaciones y sistemas energéticos dependen de una vasta red de cables de aluminio. Alrededor del mundo la mayor parte de la energía en alta tensión es transportada y distribuida por cables de aluminio. El aluminio reemplazó al cobre en la transmisión de alta tensión después de 1945 y aún hoy es el medio más económico para transportar energía.

El peso del aluminio es un tercio del peso del cobre y un kilogramo de aluminio puede transportar el doble de energía que un kilo de cobre. Las líneas de transmisión de aluminio son por lo tanto más livianas y requieren estructuras de soporte más livianas también.

Los cables de transmisión pueden ser de un único alambre de aluminio, de varios de ellos entrelazados, o de un alambre de aleación de aluminio de alta resistencia recubierto con alambres de aluminio de alta conductividad eléctrica.

1.2.2. Producción

El mineral del cual se extrae el Aluminio, comúnmente llamado **bauxita**, es abundante y se encuentra principalmente en áreas tropicales y subtropicales: África, Antillas, América del Sur y Australia. Hay también algunas minas de bauxita en Europa. La bauxita se refina para obtener óxido de aluminio (alúmina) y luego a través de un proceso electrolítico ser reducida a aluminio metálico.

Se requieren de dos a tres toneladas de bauxita para producir una tonelada de alúmina. Se necesitan aproximadamente dos toneladas de alúmina para producir una tonelada de aluminio.

a) Bauxita

Hay numerosos depósitos de bauxita, principalmente en las regiones tropicales y subtropicales, así como también en Europa. La bauxita es generalmente extraída por un sistema de minería a cielo abierto, aproximadamente a unos 4-6 metros de profundidad de la tierra.

b) Alúmina

La alúmina es un material de color blanco tiza de consistencia similar a la arena fina. La industria emplea el proceso Bayer para producir alúmina a partir de la bauxita. La alúmina es vital para la producción de aluminio (se requieren aproximadamente dos toneladas de alúmina para producir una tonelada de aluminio).

En el proceso Bayer, la bauxita es lavada, pulverizada y disuelta en soda cáustica (hidróxido de Sodio) a alta presión y temperatura; el líquido resultante contiene una solución de aluminio de sodio y residuos de bauxita que contienen hierro, silicio, y titanio. Estos residuos se van depositando gradualmente en el fondo del tanque y luego son removidos. Se los conoce comúnmente como "barro rojo".

La industria del aluminio primario utiliza la alúmina fundamentalmente como materia prima básica para la producción del aluminio. Además, la alúmina se utiliza de manera complementaria para:

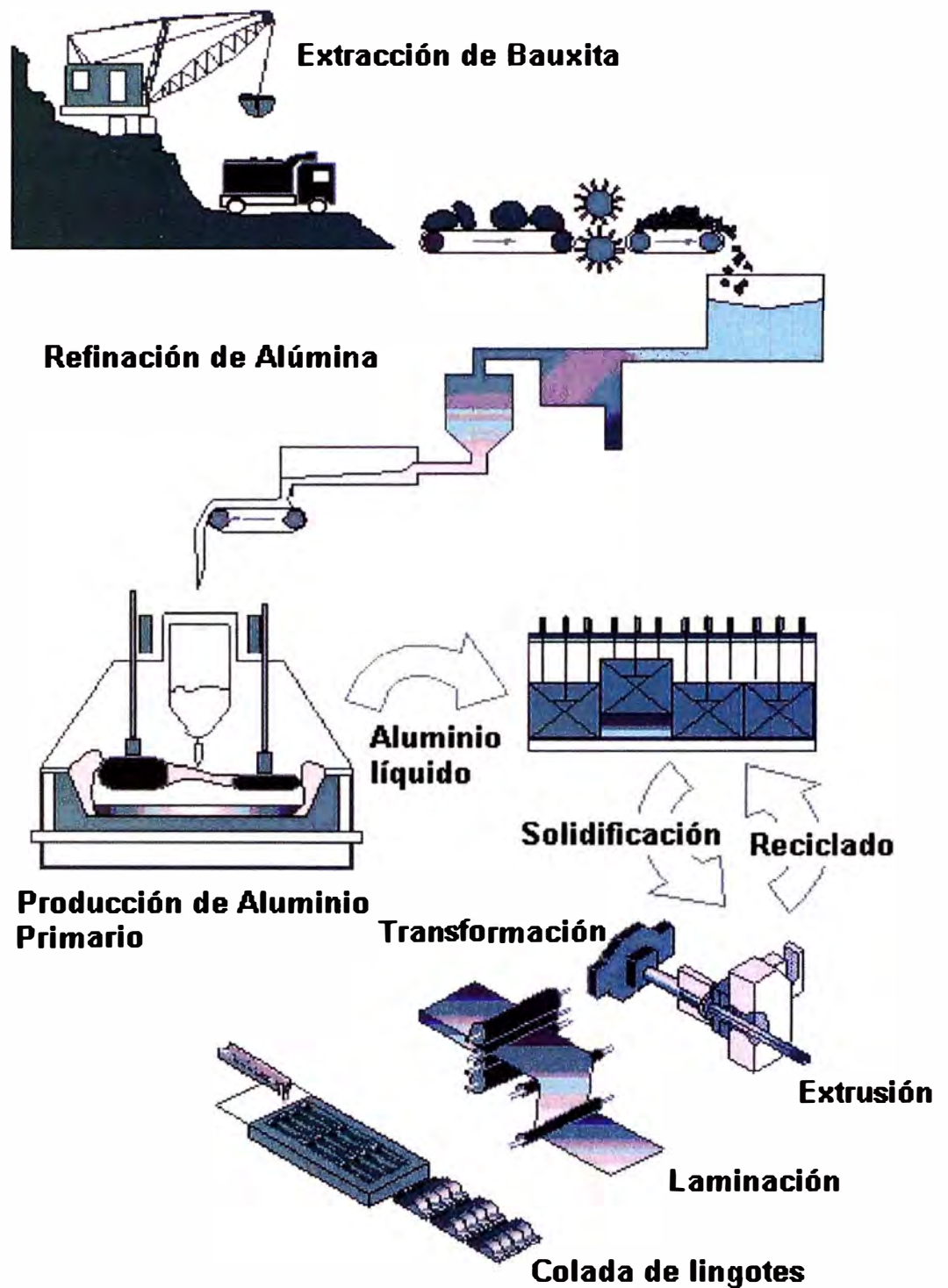


Figura 1.3 Producción del aluminio.

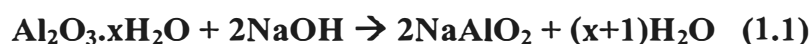
1. Aislante térmico para la parte superior de las cubas electrolíticas.
2. Revestimiento de protección para evitar la oxidación de los ánodos de carbón.
3. Absorción de las emisiones provenientes de las cubas.

La solución de aluminio de sodio clarificada es bombeada dentro de un enorme tanque llamado precipitador. Se añaden finas partículas de alúmina con el fin de inducir la precipitación de partículas de alúmina puras, una vez que el líquido se enfría. Las partículas se depositan en el fondo del tanque, se remueven y luego son sometidas a 1 100 °C en un horno o calcinador, a fin de eliminar el agua que contienen, producto de la cristalización. El resultado es un polvo blanco, alúmina pura. La soda cáustica es devuelta al comienzo del proceso y usada nuevamente.

El proceso para obtener alúmina pura de la bauxita ha cambiado muy poco desde finales del siglo XIX. El Proceso Bayer puede ser considerado en tres etapas:

b1) Extracción

El hidrato de alúmina es selectivamente removido de los otros óxidos (insolubles) disolviéndolo en una solución de hidróxido de sodio (soda cáustica):



El proceso es mucho más eficiente cuando el mineral es reducido a un tamaño de partícula mucho más pequeño que antes de la reacción. Esto se logra a través de la molienda del mineral pre-lavado. Este es entonces enviado a un asilador de alta presión.

Las condiciones dentro del digestor (concentración, temperatura y presión) varían según las propiedades de la bauxita utilizada. Aunque las temperaturas más altas son

teóricamente favorables, éstas producen varias desventajas incluyendo problemas de corrosión y la posibilidad de que se encuentren otros óxidos (además de la alúmina) disueltos en el líquido cáustico.

Las plantas modernas operan entre unos 200 y 240 °C y pueden implicar presiones de aproximadamente 30 atm.

Después de la extracción, el líquido (conteniendo Al_2O_3 disuelto) debe ser separado del residuo de bauxita insoluble, purificado tanto como sea posible y filtrado, antes de ser depositado en el precipitador.

El barro es espesado y lavado de modo que la soda cáustica pueda ser removida y reciclada.

b2) Precipitación

El trihidrato de alúmina cristalino, denominado “hidrato”, es precipitado a partir del licor del digestor:



Este es básicamente lo opuesto del proceso de extracción, salvo que aquí la naturaleza del producto puede ser controlada por diferentes condiciones de la planta.

Los cristales de hidrato son entonces clasificados en fracciones por tamaño e introducidos dentro de un horno de rotativo o un lecho fluidificado para su calcinación.

b3) Calcinación

El hidrato se calcina para extraer el agua y formar alúmina para el proceso de producción del aluminio.



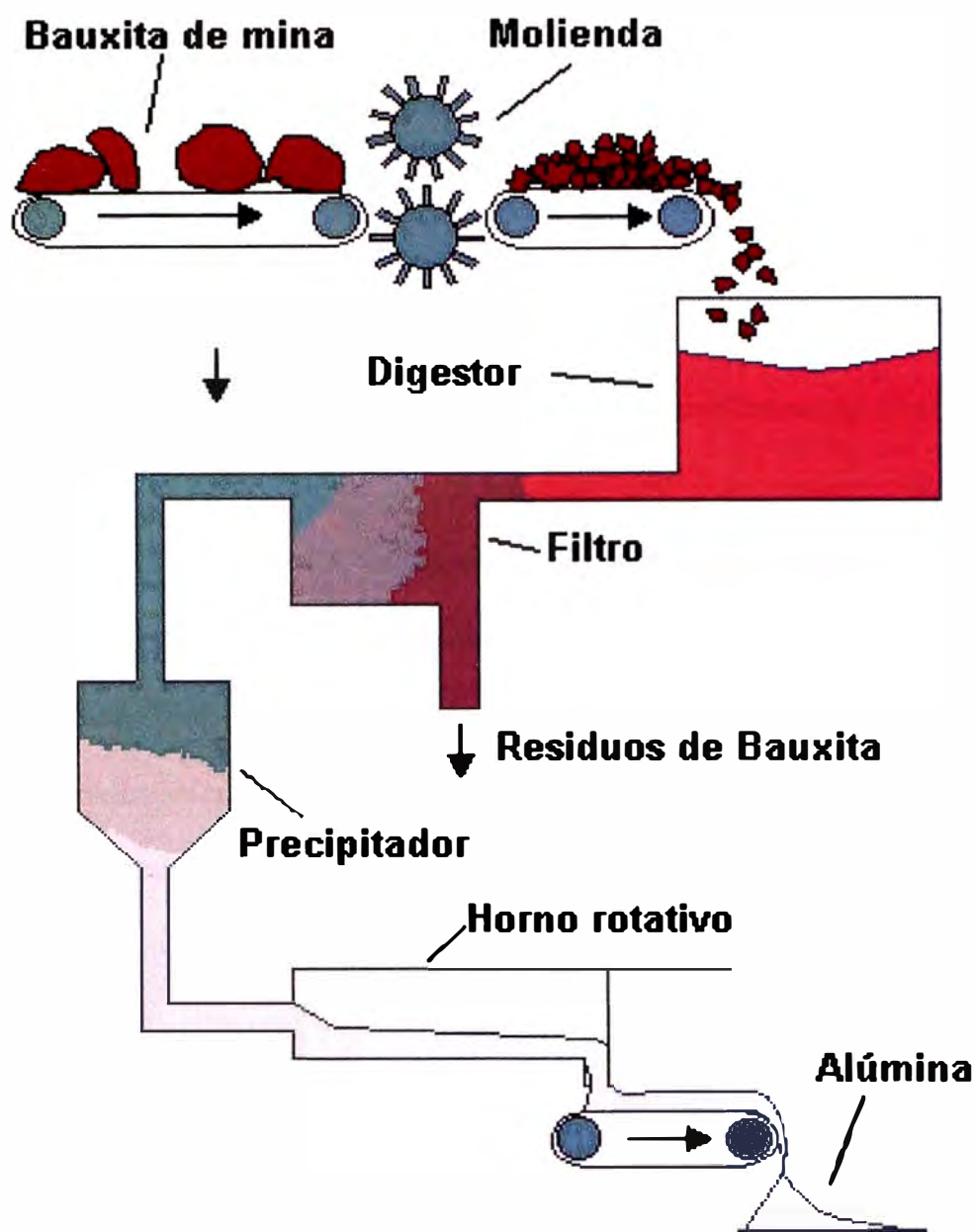


Figura 1.4 Producción de Alúmina.

b4) Electrólisis

El proceso industrial de obtención de aluminio, denominado proceso **Hall-Heroult**, consiste en la **electrólisis de alúmina** (óxido de Aluminio) disuelta en una mezcla de sales fundidas o baño electrolítico. Esta mezcla se mantiene permanentemente en estado líquido a una temperatura de 960 °C.

El reactor donde se desarrolla el proceso, usualmente conocido como celda o cuba de electrólisis, es un recipiente de aproximadamente y dependiendo de la tecnología de producción utilizada, 4,5 m de ancho por 8,5 m de largo por 1,5 m de altura, conformado por carbón y material refractario, soportados externamente por una rígida estructura de acero. En dicho reactor pueden distinguirse desde arriba hacia abajo cuatro elementos constitutivos bien diferenciados: ánodos de carbón (polo positivo); mezcla de sales fundidas; aluminio líquido y cátodos de carbón (polo negativo). En este sistema la corriente eléctrica continua circula desde el ánodo hacia el cátodo. Al atravesar el baño electrolítico la corriente produce la descomposición de la alúmina disuelta en aluminio metálico y oxígeno. El aluminio metálico obtenido se deposita en el fondo de la cuba, mientras que el oxígeno generado consume el carbón de los ánodos produciendo dióxido de carbono.

La alúmina es reducida al aluminio en celdas electrolíticas llamadas cubas, las cuales son organizadas en series.

Las series de cubas

Las cubas son organizadas en series dentro de la planta de producción de aluminio. Las series de cubas más modernas, tienden a tener las cubas colocadas “lado a lado” y la mayoría de las tareas de mantenimiento se llevan a cabo usando puentes grúas

multiuso, (algunas tareas deben realizarse regularmente), como por ejemplo el cambio de los ánodos, la remoción del producto terminado etc.

La cuba

Una cuba consta de dos partes principales:

1. Un bloque de carbono el cuál se ha obtenido a partir de una mezcla de coque y brea. Este bloque actúa como ánodo (o electrodo positivo).
2. El cátodo (o electrodo negativo) que comprende un cajón de acero rectangular asentado sobre hormigón, que contiene un crisol carbonoso sobre el cual descansa el aluminio líquido.

Entre el ánodo y el cátodo hay un espacio donde se encuentra el electrolito. Este se encuentra en estado líquido a 960 °C. Se le agrega la alúmina refinada que se disuelve entonces en el electrolito fundido.

El electrolito

El electrolito usado es la criolita, que es el mejor solvente para la alúmina. Para mejorar la performance de las cubas, se agregan otros componentes como el fluoruro de aluminio y el fluoruro de calcio (utilizados para bajar el punto de solidificación del electrolito).

El ánodo

El carbón o coque calcinado, utilizado para producir los ánodos que se consumen durante la electrólisis, es un subproducto de la refinación del petróleo.

Los ánodos de carbono utilizados en el proceso Hall Héroult, se consumen durante la electrólisis. Los ánodos precocidos se forman separadamente, usando partículas de coque aglutinadas con brea y cocinadas en un horno. Una vez que estos ánodos se consumen hasta una cierta altura deben ser cambiados.

El cátodo

El cátodo consiste en un armazón de grafito incrustado en barras de acero para realizar la conexión eléctrica. Durante el proceso el aluminio líquido funciona como cátodo.

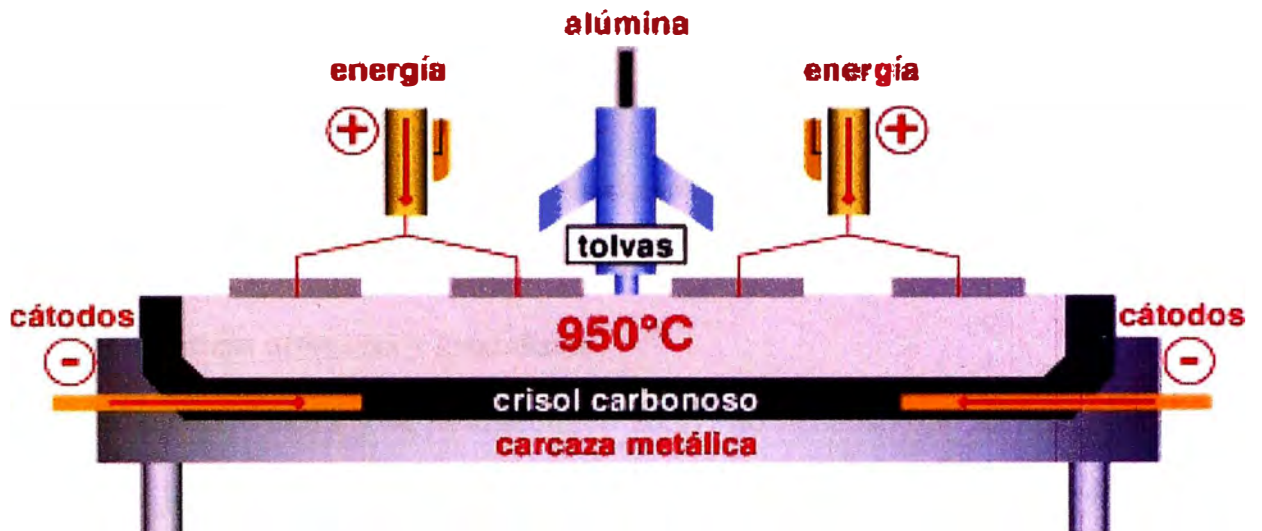


Figura 1.5 Cuba electrolítica

Una vez obtenido el metal es extraído por succión y transportado en grandes recipientes hasta la sala de fundición. Parte de él es volcado en camiones térmicamente protegidos para su entrega en estado líquido. Otra parte es vertida en grandes hornos en los cuales se realiza una homogenización de la composición química y temperatura del aluminio proveniente de las distintas cubas electrolíticas.

1.2.3. Propiedades

El aluminio es un metal blanco ligeramente azulado, inodoro e insípido, cuyas principales propiedades físicas, relativas a conductores eléctricos, son las siguientes:



Figura 1.6 Aluminio

a) Características atómicas y cristalinas

Su número atómico es 13 y su peso atómico 26,97; no tiene isótopo natural, aunque puede tener isótopos artificiales radioactivos, sus electrones toman la disposición orbital K2, L8, M3.

El aluminio cristaliza en el Sistema Cúbico con fases centradas, con una constante reticular de 0,404 9 nm y un radio atómico de 0,142 8 nm; su volumen atómico es de $10 \text{ cm}^3/\text{átomo-gramo}$.

b) Masa volumétrica

Ya que las impurezas son más densas que el propio aluminio, su masa volumétrica aumenta cuando la pureza disminuye, independientemente de la variación con la temperatura; así para una muestra refinada de 99,99% de pureza, la masa volumétrica a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es de $2,699 \text{ g/cm}^3$, y cuando se trata de purezas corrientemente logradas de 99,50 % (con 0,5 % de hierro y silicio), el índice resulta de $2,705 \text{ g/cm}^3$.

c) Comportamiento térmico

La temperatura de fusión a la presión atmosférica es de aproximadamente 633 °C, para el aluminio de purea normal, mientras que la temperatura de ebullición resulta de difícil determinación y se sitúa en el rango de los 1800 y 2500 °C. El coeficiente de dilatación del metal puro y de la mayoría de sus aleaciones es elevado, para 20 °C se sitúa en el orden de $22,4 \times 10^{-6}$, de esa manera la longitud final (L) de un objeto calentado a una temperatura (t) °C, está relacionada a su longitud inicial (L_0) a 0 °C, por la siguiente expresión:

$$L = L_0 \left[1 + (23,22t + 0,00467t^2 + 0,0000078t^3) 10^{-6} \right] \quad (1.4)$$

La capacidad térmica de masa, varía según la temperatura, y es la más elevada entre los metales comunes, debido a su pequeña masa volumétrica; del mismo modo, su conductibilidad térmica es elevada, clasificándose después del oro, la plata y el cobre; esta propiedad varía también con la temperatura, por ejemplo:

Tabla 1.1 Capacidad y conductibilidad térmica

Temperatura del aluminio (°C)	Capacidad térmica de masa (J/kg.°C)	Conductibilidad térmica (W/cm.°C)
- 123	707	----
-166	----	2,503
0	930	2,101
100	971	2,189
500	1 105	2,089
600	----	----
660	1 143	1,507

d) Características eléctricas y magnéticas

Es buen conductor eléctrico y se ubica inmediatamente después del cobre entre los demás metales; el aluminio recocido de alta pureza presenta una resistividad a 20 °C, de 2,63 $\mu\Omega\text{-cm}$ (Conductividad 65,45 % IACS), mientras que el aluminio comercial recocido de 99,7 % de pureza, presenta una resistividad de 2,72 $\mu\Omega\text{-cm}$ (Conductividad 63,5% IACS); asimismo, toda impureza o aleación aumenta la resistividad, lo mismo ocurre cuando el metal es trabajado, en este caso puede aumentar hasta 2,78 $\mu\Omega\text{-cm}$; mientras que en función de la temperatura sigue la ecuación:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + 0,004(t - 20)] \quad (1.5)$$

Su potencial estático de equilibrio respecto del electrodo normal de hidrógeno es muy electronegativo -1,67 voltios; y finalmente tiene un comportamiento débilmente paramagnético con una susceptibilidad de $0,75 \times 10^{-12}$

e) Propiedades mecánicas

Dependen de la pureza del metal, del modo de elaboración de su estado estructural y de la temperatura; al respecto se pueden consignar algunas órdenes de magnitud más usuales para una temperatura de 20 °C.

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del aluminio

Propiedad mecánica	Aluminio recocido	Aluminio duro
Carga de ruptura (MPa)	90	175
Límite de proporcionalidad (MPa)	40	150
Elongación a la ruptura (%)	40	7
Dureza Brinnell (HB)	20	----

f) Propiedades químicas y electrolíticas

La principal y única reacción del aluminio, es su oxidación bajo cualquier condición del medio, según la ecuación:



En el aire, el aluminio se recubre instantáneamente de una capa delgada de alúmina transparente (0,01 μm), que es continua y estanca, sirviendo de barrera protectora al metal subyacente, contra el ataque de la mayoría de sustancias químicas, a excepción de fuertes ácidos (soluciones de $\text{pH} \leq 3$) y bases (soluciones de $\text{pH} \geq 9$), o ciertas sales próximas a la neutralidad en el momento de su descomposición, que tienen una acción violenta y pueden originar la corrosión química uniforme, cuantificable en función del tiempo; por ejemplo, un consumo de 0,27 $\text{mg/cm}^2/\text{año}$ corresponderá a una disminución de 1 μm ; o también un ataque irregular suscitado por las heterogeneidades del metal o del medio, que se traducen en picaduras cuya penetración es mayor en caso de existir irregularidades superficiales.

El aluminio por ser muy electronegativo, será protegido por el magnesio, el zinc y el cadmio; en cambio será corroído por el hierro, el plomo, el cobre y los metales preciosos.

1.2.4. Las aleaciones ligeras

El aluminio es un metal de fase simple cuya estructura cristalina puede variarse por solución sólida agregándosele otros componentes o fases adicionales con el objeto de mejorar sus propiedades para su utilización como conductor eléctrico, sin alterar el patrón básico de cristal; para lo cual, se recurre a aleaciones de tipo sustitución con metales apropiados cuyas estructuras son similares y casi de igual radio atómico;

desafortunadamente esta exigencia limita el número de aleantes para no introducir al mismo tiempo, influencias desfavorables sobre las demás propiedades físicas, químicas o tecnológicas del aluminio puro, ello se puede mostrar cualitativamente en la tabla 1.3, del que se desprende que las aleaciones Al-Si-Mg presentan condiciones óptimas para la fabricación de conductores eléctricos bajo diferentes denominaciones.

Tabla 1.3 Índices de caracterización de las influencias y dificultades que tienen las aleaciones de aluminio

Aptitudes tecnológicas	Al	Al-Si	Al-Mg	Al-Mn	Al-Si-Mg
Resistencia mecánica	1	2	2	2	3
Trabajo y maquinado	1	1	2	2	3
Aptitud a soldaduras	4	3	4	4	3
Maleabilidad en frío	4	-	3	3	2
Maleabilidad en caliente	4	2	1	3	4
Resistencia corrosión normal	4	4	4	4	4
Resistencia corrosión marina	4	3	4	3	3
Facilidad de vaciado	1	4	1	1	4
Anodización de protección	4	4	4	4	4
Anodización de decoración	4	1	3	3	4

- (1) Presenta influencias y dificultades serias.
- (2) Presenta pocas influencias y dificultades.
- (3) Casi no presenta influencias ni dificultades.
- (4) No presenta influencias ni dificultades.

Por ejemplo, en los EE.UU. de Norteamérica se les conoce con los códigos AA, AA 6201, AA 6063, etc., en Suiza y Alemania, Canadá y en Francia toman los nombres de Aldrey, Arvidal y Almelec. Esto se puede apreciar en la tabla N°4

Tabla 1.4 Composición química de aleaciones de aluminio para conductores eléctricos

Denominación	AA	Arvidal	AA	Almelec			Aldrey
	5005		6201	AGSL-76	AGSL-66	AGSL-55	
Cobre, máx. %	0,2	0,05	0,1	0,03	0,03	0,03	0,1
Hierro, máx. %	0,7	0,4	0,5	0,35	0,3	0,3	0,35
Silicio, %	0,4 máx.	0,3-0,65	0,5-0,9	0,46-0,62	0,40-0,61	0,4-0,54	0,2-0,6
Manganeso, máx. %	0,2	-	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
Magnesio, %	0,6-1,1	0,45-0,75	0,6-0,8	0,47-0,79	0,46-0,6	0,39-0,55	0,45-0,9
Cromo, máx. %	0,1	-	0,03	0,02	0,02	0,02	0,1
Zinc, máx. %	0,25	-	0,1	0,05	0,05	0,05	0,1
Otro elemento, %	0,15	0,1	0,1	-	-	-	0,15
Aluminio	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante

No obstante, en todos los casos se podrán distinguir básicamente dos grupos de componentes en las aleaciones ligeras:

a) Componentes de aleación necesaria

Silicio: Que favorece la fluidez del vaciado y ayuda a mejorar la conductividad luego del tratamiento térmico.

Magnesio: Asegura el mejoramiento de las propiedades mecánicas después del tratamiento térmico.

b) Componentes de impureza de la aleación

Zinc: Contribuye a la disminución de la conductividad luego del tratamiento de maduración artificial.

Cromo: Aumenta la temperatura de recristalización y controla el crecimiento del grano, su acción está ligada al contenido de manganeso.

Manganeso: Asociado al cromo, disminuye la fragilidad y la predisposición a la figuración en caliente, predispone el metal para el trabajo de soldadura, pero aumenta la resistividad eléctrica.

Hierro: Mejora las características mecánicas en caliente y la resistencia a la fluencia, pero disminuye la resistencia química, la aptitud a la anodización y la conductividad eléctrica.

Cobre: Al igual que el zinc, propicia la buena conductibilidad, sin embargo predispone a la corrosión por picaduras.

Cabe remarcar que los metales mencionados actúan simultáneamente en las características de la aleación y dan como resultado nuevos indicadores de acción conjunta que permiten calificar y jerarquizar sus posibles utilidades, así el Al-Si-Mg-Fe, se muestra como material óptimo para conductores eléctricos.

Tabla 1.5 Propiedades de los conductores fabricados con hebras de aleación
de aluminio

Denominación	AA	Arvidal	AA	Almelec			Aldrey
Características	5005		6201	AGSL- 76	AGSL- 66	AGSL- 55	
Conductividad, % IACS, min.	53,5	53,5	52,5	53,0	53,0	53,0	53,0
Peso específico, g/cm ³	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Coef. dilatación lineal por °C	23×10 ⁻⁶	23×10 ⁻⁶	23×10 ⁻⁶	23×10 ⁻⁶	23×10 ⁻⁶	23×10 ⁻⁶	23×10 ⁻⁶
Carga de rotura, kg/mm ² (*)	2,9-26,7	31,0	31,0-32,4	28,0-40,0			31,5
Norma de hilos aplicable	ASTM- 396	Alcan C- 7,5	ASTM- 398	NF C34-125			SEV 0201

(*) Valores dependientes de la trefiladota y diámetro del alambón

1.2.5. Metalurgia del aluminio

Es muy importante sintetizar ciertos aspectos estructurales del aluminio para comprender los procesos que originan las características del metal a lo largo de la elaboración de los conductores eléctricos.

a) Estructura cristalina

El aluminio puro cristaliza en el sistema cúbico de fases centradas, aglutinando los cubos en una misma dirección hasta formar un grano; mientras que el aluminio aleado cristaliza con un arreglo que conlleva fallas tipo hueco, tipo dislocaciones, tipo linealidad interna y tipo superficial en las interfases del grano.

Los átomos extraños se presentan en la matriz según los esquemas correspondientes al tratamiento sufrido por el metal, pueden ser dispersados de manera aleatoria u homogénea en lugar de los átomos de aluminio, se dice entonces que existe solución sólida. Al interior de cada grano, los átomos extraños se reparten según diferentes arreglos, en otros casos se reúnen en las zonas coherentes de descomposición de las interfases; los componentes intermetálicos como el Al_2Cu , Mg_2Si ó Zn_2Mg se formarán luego de tratamientos de endurecimiento estructural.

b) Estructura de vaciado

La cristalización del aluminio y sus aleaciones se hace por fenómenos de segregación menor, es decir si se enfría lentamente desde $660\text{ }^\circ\text{C}$, una mezcla líquida de dos o más componentes, aparecerá un cristal de aluminio puro, que va dejando la solución residual más cargada; según aumenta la solidificación, la composición del sólido describe la curva “Solidus” hacia abajo, igualmente el líquido residual, sigue la curva “Liquidus”, hasta que en un momento dado la operación llega al punto Eutéctico E, donde sólido y líquido tienen la misma composición hasta el final de la solidificación; no obstante, el exceso de material adicional se solidificará en los límites del grano, aparte el resultado del proceso, en el que el centro del grano resulta más puro que en su periferia y presenta caracteres de anisotropía.

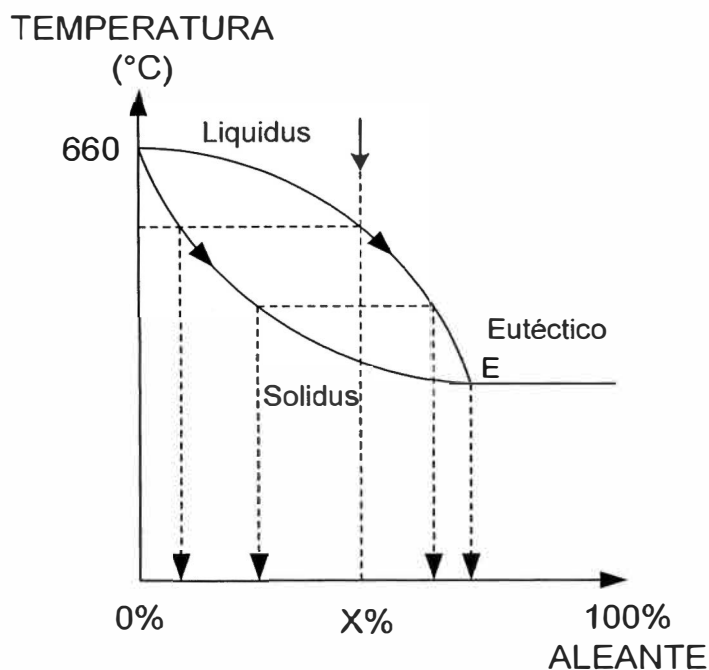


Figura 1.7 Estructura de vaciado

c) Homogenización

El metal es calentado a la más alta temperatura por debajo del límite de fusión, aproximadamente a 500 °C o más durante algunas horas, a fin de que los átomos extraños, por agitación térmica adquieran una movilidad que les permita su reubicación en la lagunas de la red, difundiéndose en la matriz y repartiéndose en forma aleatoria pero regular, dando como resultado una buena composición isotrópica del metal.

Este proceso, que limita o suprime la segregación menor, reduce la presencia de elementos en límite de grano a tanto menos como lo que existe en el centro del grano, mejorando las características mecánicas, la aptitud a la deformación y la predisposición a la anodización.

d) Endurecimiento por adición

Los átomos de los aleantes o de las impurezas en el aluminio, pueden estar en solución sólida de sustitución, localizados regularmente dentro de la red; dado que estos átomos son más pequeños (cobre) o más grandes (magnesio) que el átomo de aluminio, ocasionan perturbaciones en la red, que le hacen perder aptitudes de deslizamiento y deformación.

En caso que el elemento extraño no se halle en solución sólida, estará bajo la forma de precipitados y también ocasionará idénticas perturbaciones lo cual quiere decir que la resistencia mecánica del metal crecerá proporcionalmente al número e importancia de dichas perturbaciones; de allí que para evitar el comportamiento inadecuado del material, sólo es posible las aleaciones ligeras.

e) Endurecimiento por acritud

El aluminio y sus aleaciones, alcanzan estados de endurecimiento por acritud, debido a la deformación plástica en frío; mediante este proceso que se explica por el bloqueo de los planos de deslizamiento, a consecuencia de la multiplicación de dislocaciones moleculares engendradas en el grano, las características mecánicas se refuerzan cada vez más en función del grado de deformación aplicado, de modo que puedan lograrse diferentes niveles de endurecimiento a partir del metal recocido que es el más blando, hasta llegar al metal duro.

A nivel macroscópico, los granos del material fundido son relativamente grandes y no tienen orientación; pero por ejemplo durante el trefilado en frío, esos granos se dislocan y rompen en cristales más pequeños, orientados en la dirección de la deformación; lo cual crea básicamente un metal anisotrópico con una mayor carga de

ruptura, con libertad de elongación disminuida, con aumento de resistividad eléctrica y decrecimiento de la resistencia a la corrosión.

f) Endurecimiento estructural

Algunos elementos de adición en el aluminio, bajo ciertas condiciones, dan compuestos intermetálicos, principalmente Al_2Cu , Mg_2Si , Zn_2Mg ; el endurecimiento estructural se basa en la diferencia de solubilidad en estado sólido, de los aleantes del aluminio, entre la temperatura ambiente y la temperatura de puesta en solución.

El proceso consiste en lograr a temperaturas crecientes, la disolución total del aleante, del cual inicialmente sólo una pequeña parte está disuelta a la temperatura ambiente y otra cantidad mayor no; de modo que bajo enfriamiento lento, dicho elemento pueda salir de la solución sólida en forma de precipitado compuesto intermetálico (fase de equilibrio), que tiene tiempo para engrosar por coalescencia, sin producir mucho endurecimiento, ya que las dislocaciones pueden bordearles.

Con un enfriamiento brusco hasta la temperatura ambiente, la solución sólida quedaría sobresaturada del aleante, debiendo regresar progresivamente al estado de equilibrio de la solución inicial, ya sea a temperatura ambiente (maduración) o mediante un pequeño calentamiento por debajo de $200\text{ }^\circ\text{C}$ (revenido), formándose precipitados en gran cantidad de zonas de descomposición interior, que propician el endurecimiento.

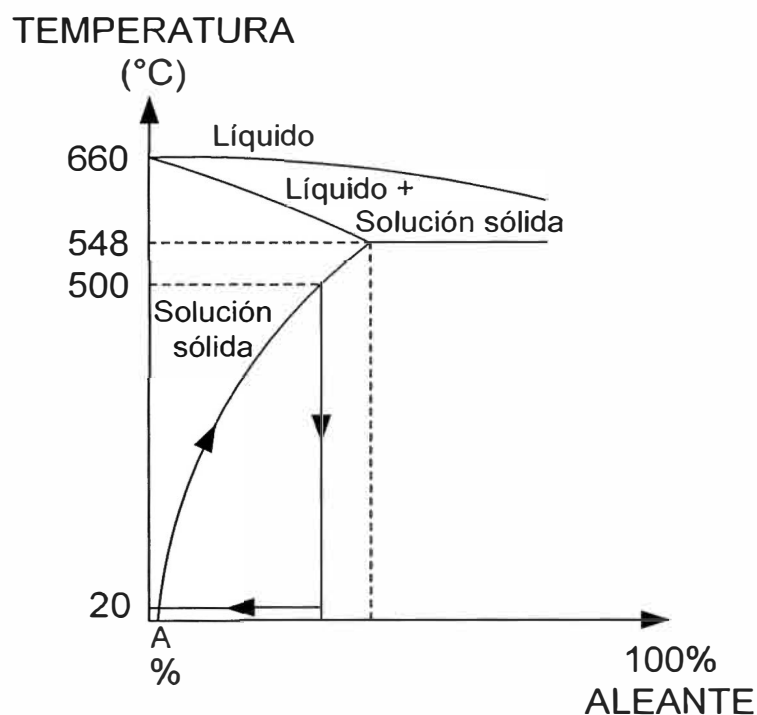


Figura 1.8 Endurecimiento estructural

g) Tratamientos de suavizado

Al ser calentado muy por debajo de la temperatura de fusión, el aluminio endurecido por acritud, es objeto de una agitación atómica que suprime las tensiones internas y conlleva nuevos arreglos estructurales cristalinos (recocido). Bajo la temperatura de recristalización, próxima a los 250 °C, los átomos se reagrupan según nuevas direcciones, para formar nuevos cristales de orientación cualquiera, luego se suman otros átomos, hasta que los nuevos granos se juntan para dar la estructura micrográfica de cristalización primaria; si el tratamiento se mejora en temperatura o tiempo, se llega a estructuras secundarias de grano grueso en que las condiciones mecánicas del metal, muestran su estado más maleable.

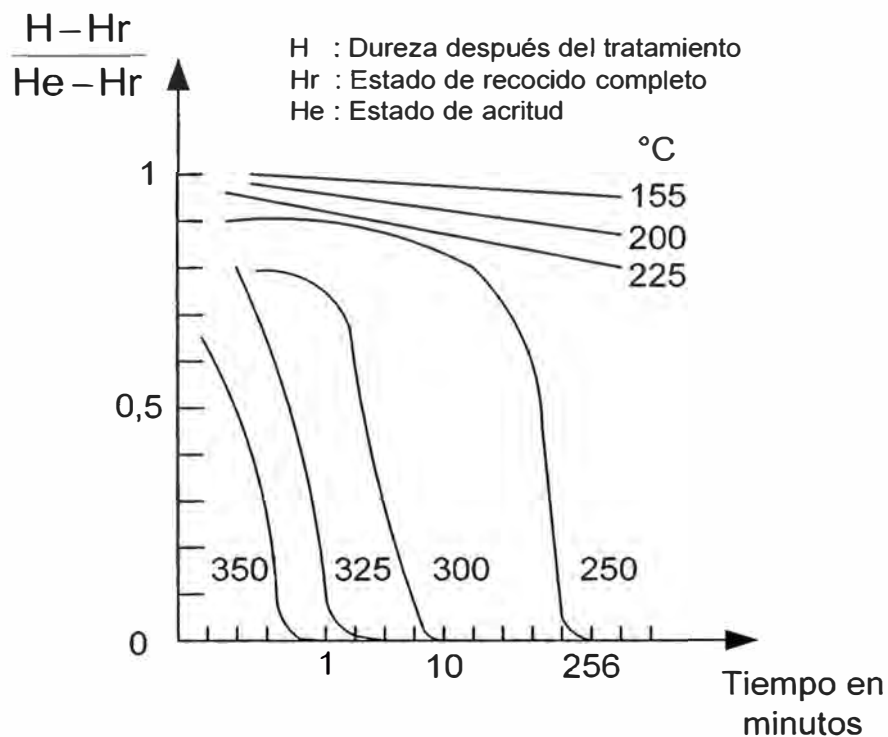


Figura 1.9 Características típicas del tratamiento de suavizado

Cuando se interrumpe el recocido, se logran sólo estados parcialmente cristalizados, asimismo cuando las temperaturas utilizadas son bajas, el tiempo de cristalización se hace más prolongado, la estructura micrográfica no sufre modificaciones, no hay formación de nuevos cristales, pero las características mecánicas evolucionan, es lo que se llama el tratamiento de restauración que a nivel atómico representan reorganización de las dislocaciones engendradas por acritud.

1.2.6. Fabricación de conductores

Es el resultado de diversos procesos de transformación, operaciones metalúrgicas y mecánicas destinadas a asegurar las propiedades de utilización y los requerimientos físico-estructurales que pueden ser verificados mediante pruebas de laboratorio.

Se tienen dos aspectos principales, el moldeo de piezas y la transformación plástica, que conducen a semiproductos obtenidos por extrusión, estirado y trefilado; generalmente los tochos de fundición, después de las operaciones auxiliares de acabado, despuntado, escalpado, descortezado y recocido, se someten a extrusión para obtener palanquillas cuadrangulares que se enrollan con el nombre de **alambrón** o **alambre de devaste**; a este producto también se llega por colada continua, lo que asegura bobinas de gran peso sin soldaduras y con secciones más regulares.

El alambrón normalmente en estado de acritud y con el grano deformado, es recocido a 560 °C para regenerar el tamaño de grano y eliminar tensiones internas, disminuyendo al mismo tiempo la dureza y la resistencia a la tracción con aumento de la propiedad de deformación plástica; luego de lo cual se procede al templeado y consecutivamente a una maduración a 110 °C, antes del estirado y trefilado que están destinados a reducir las secciones obligando al material a alargarse bajo la fuerza de tracción que origina en la hebra una componente de compresión llegando a secciones menores que las de estricción.

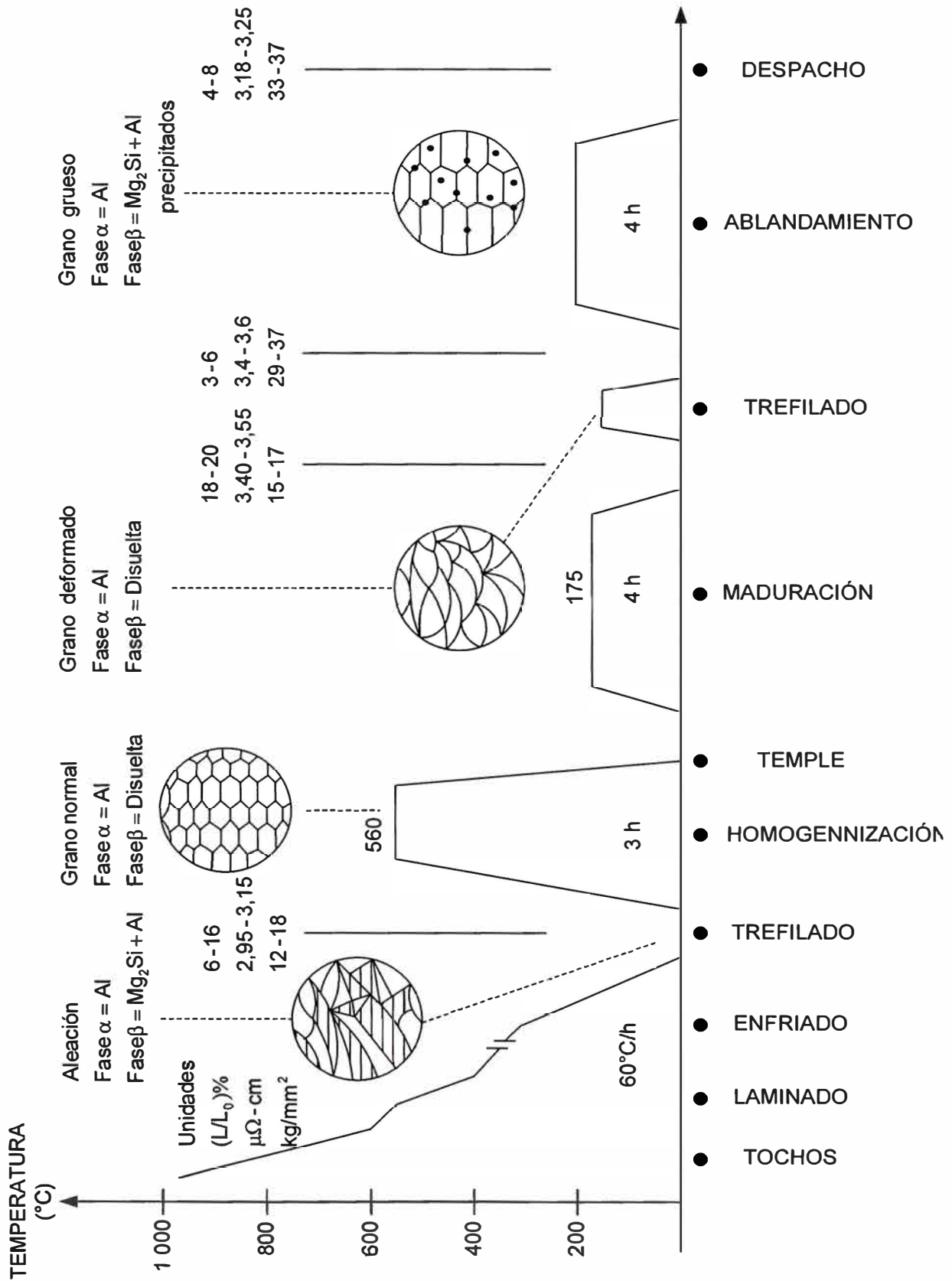


Figura 1.10 Esquema simplificado del proceso de fabricación de conductores de aluminio y sus aleaciones ligeras

Finalmente se procede a un tratamiento de revenido hasta 170 °C con lo cual se liberan tensiones remanentes y se obtiene la precipitación uniforme de la fase de **siliciuro de magnesio** que mejora las propiedades mecánicas.

1.3. Corrosión

Los metales se encuentran en la naturaleza, en general, formando compuestos (óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos, etc.) con otros elementos. Sólo los metales llamados “nobles” aparecen naturalmente en estado puro. A los metales restantes, para usarlos en su forma elemental, es necesario someterlos a un proceso de reducción, lo que requiere comunicarles una cierta energía. Así pues, el metal tenderá a perder este suplemento de energía para recobrar su estado termodinámicamente más estable. El proceso por el cual el metal vuelve a su estado natural y que corresponde a una “oxidación” se conoce como **corrosión** y representa la conversión paulatina del metal en sus formas combinadas.

La corrosión de los metales no nobles es un hecho cotidiano y de tal manera asumida por el ser humano que pasa desapercibido o es aceptado como algo tan irremediable como nuestro envejecimiento, al que se asemeja en cuanto a que es también una oxidación paulatina.

Sin embargo, en el caso de la corrosión metálica es posible, si no evitarla siempre, sí hacerla más lenta y conseguir que la vida útil de los metales se alargue. Este control de la corrosión ha nacido tanto por el esfuerzo y curiosidad de los investigadores que la estudian, como por la necesidad de evitar las grandes pérdidas económicas que lleva aparejadas o por el enorme ahorro económico que supone que no se produzca.

1.3.1. Tipos de procesos de corrosión

Los mecanismos por los que puede transcurrir el proceso de corrosión son básicamente dos:

- A través de una oxidación directa, llamada también **corrosión seca**.
- Mediante la intervención de una solución acuosa que genera la aparición sobre el metal de zonas con diferente comportamiento, conocida como **corrosión húmeda**.

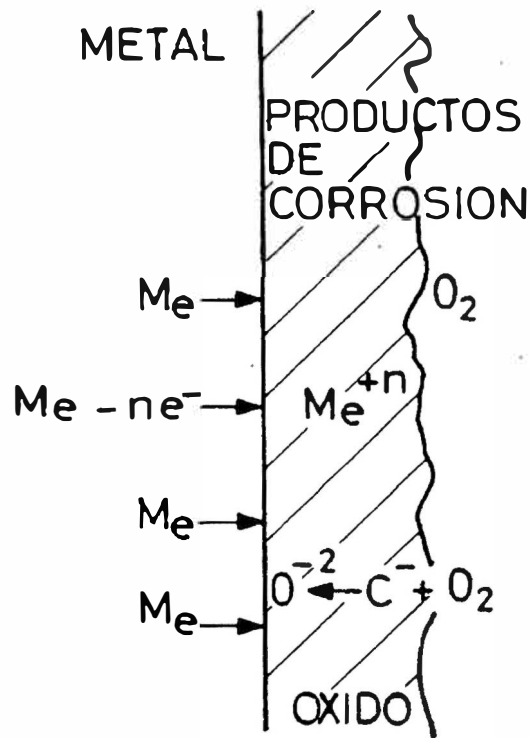


Figura 1.11 Oxidación directa de un metal, corrosión seca

El primero de los mecanismos implica un proceso de reacción puramente químico y supone una oxidación (pérdida de electrones por parte del metal) de toda la superficie por igual. Esta situación ocurre cuando los metales trabajan a elevadas temperaturas, en las que no es posible la existencia de agua en estado líquido. Es característico de

este mecanismo que los productos de corrosión queden adheridos a la superficie incluso formando una barrera física que se opone al progreso del ataque posterior.

El segundo de los mecanismos es el que ocurre en la mayoría de los casos de corrosión que se detectan ya que el agua en estado líquido está casi omnipresente en todos los medios naturales o sintéticos que nos rodean (suelos, atmósfera, ríos, mar, ácidos, bases, etc.).

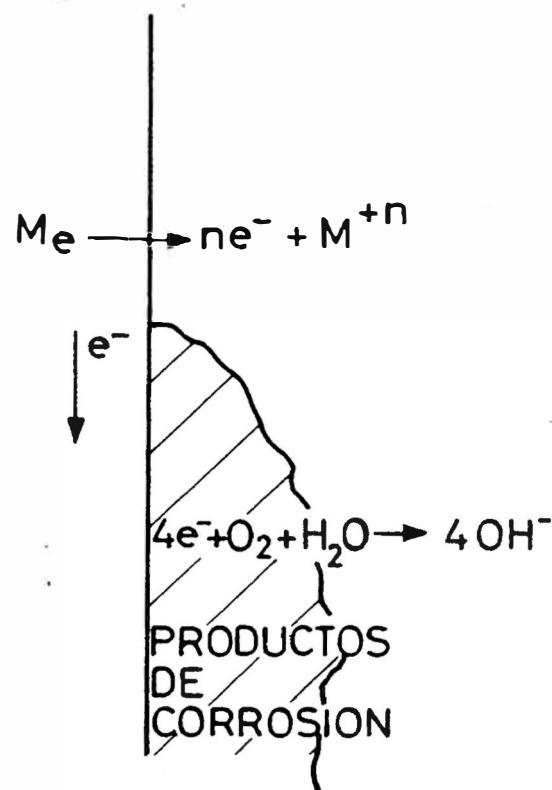


Figura 1.12 Corrosión electroquímica de un metal, corrosión húmeda

En este caso el proceso transcurre mediante un mecanismo electroquímico, lo que significa que se generan unas zonas en las que el metal se disuelve (zonas anódicas) y otras en las que permanece inalterado (catódicas). Se forma así una “pila”, que para que funcione ininterrumpidamente exige que el contacto eléctrico entre ánodo y cátodo se mantenga y se cierre el circuito a través del mismo electrolito mediante la circulación de iones.

En cuanto a los productos de corrosión, éstos se distribuyen heterogéneamente por la superficie y pueden no tener ningún carácter protector.

La corrosión acuosa es muchísima más frecuente que la oxidación directa

1.3.2. Corrosión acuosa

a) Consideraciones generales

A este tipo de corrosión se le denomina también “electroquímica” porque implica unas reacciones químicas en las que los reaccionantes intercambian electrones, que viajan de unas regiones del metal a otras. Así funcionan las pilas “secas” que alimentan los aparatos electrónicos. Como se muestra en la **Figura 1.13**, estas pilas pueden estar constituidas por un electrodo central de carbón y un recipiente o carcasa de cinc, que está relleno por una solución de NH_4Cl .

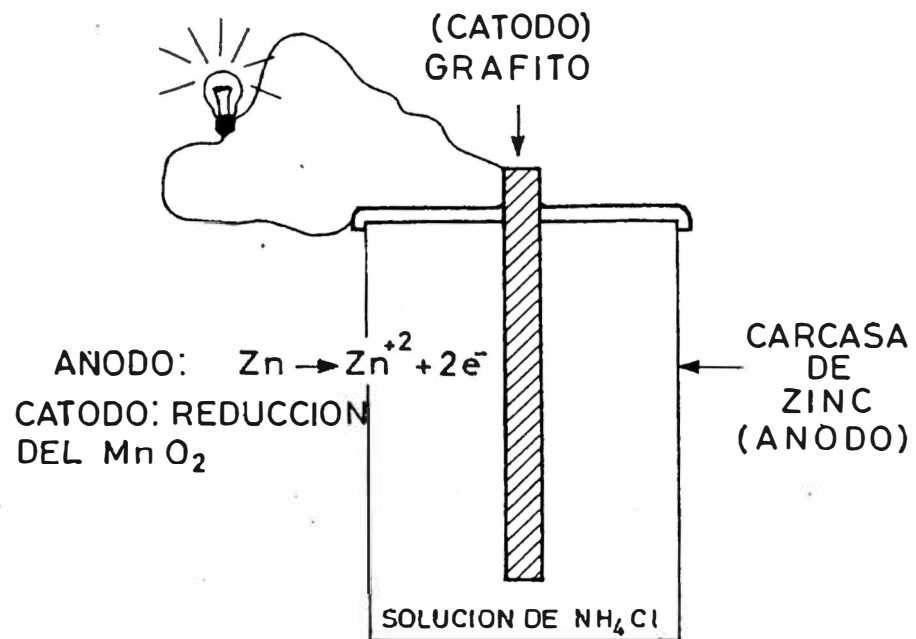


Figura 1.13 Esquema de funcionamiento de una pila “seca”

Como es conocido, una lámpara conectada entre los bornes de ambos electrodos se enciende, indicando un movimiento de electrones que se genera por las reacciones químicas que se dan en ambos electrodos. El cinc de la carcasa se oxida (ánodo) dando iones cinc y sobre el electrodo de carbón (cátodo) se produce la reacción de reducción.

Se atribuye a Faraday (1 834 – 1 840) el establecimiento de una relación cuantitativa entre corriente eléctrica y reacción química. Según esta ley, el paso de 96 493 Coulombs (un Faraday) provocan una disolución o depósito de un equivalente gramo de sustancia:

$$\frac{I \times t}{96\,493} = \text{número de equivalentes} - \text{gramo} \quad (1.7)$$

En la que “I” es la intensidad de corriente en amperios y “t” el tiempo en segundos. Esta ley permite el cálculo preciso de la cantidad de metal (en peso) que se corroe en función de la intensidad de corrosión que se mide mediante determinadas técnicas. Tendría que transcurrir casi un siglo para que el estudio de la corrosión sufriera un impulso trascendente. Fue en 1 926 cuando el profesor Evans publicó el resultado de sus investigaciones con gotas salinas depositadas sobre placas de hierro recién lijadas, Evans observó que al depositar estas gotas, conteniendo NaCl, ferrocianuro potásico y fenolftaleina, sobre el acero, se producían primero unas manchas rosas y otras azules, **Figura 1.14a**, repartidas de forma aleatoria, para evolucionar hasta la formación de unos anillos, azul el interior y rosa el exterior, **Figura 1.14b**, a la vez que se empezaba a observar la típica herrumbre de color pardo.

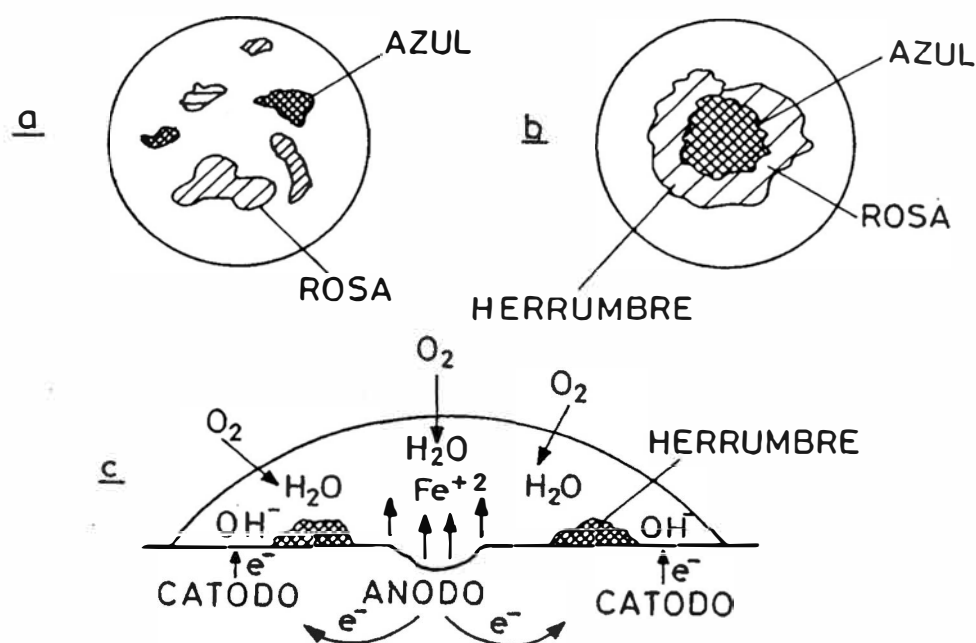
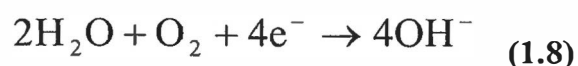


Figura 1.14 Ensayo de la gota de Evans

- Comienzo de la formación de zonas anódicas (coloreadas de azul debido al ferrocianuro potásico).
- Etapas posteriores del ensayo de Evans; se origina un ánodo central (azul) y un cátodo en forma de corona circular (rosa).
- Corte transversal ideal del ensayo de la gota con las reacciones básicas que se producen en las zonas anódica y catódica.

La explicación que Evans le dio a este fenómeno se esquematiza en la **Figura 1.14c** y es como sigue: estable de color azul (por lo que las zonas anódicas se tiñen de azul) y, en cambio, en el cátodo se produce la reducción del oxígeno disuelto en el agua con formación de iones OH^- , según la reacción:



Que, en presencia de fenolftaleína, terminan produciendo la aparición de un color rosa debido a la alcalinización del medio.

Años más tarde, Evans y Hoar demostraron el paso de corriente entre las zonas anódicas y catódicas, recorriendo al corte de una placa de hierro precorroída (que se había sumergido parcial y verticalmente en una solución salina), siguiendo el borde delimitado por los productos de corrosión e intercalando un amperímetro entre ambas zonas, tal y como se indica la **Figura 1.15**. Con este experimento también comprobaron el cumplimiento de la ley de Faraday a la que antes se ha hecho referencia; la intensidad de corriente que medían entre ánodo y cátodo por el tiempo de flujo guardaba correspondencia con una cantidad de equivalentes-gramo de hierro determinada, que se habían transformado en óxido.

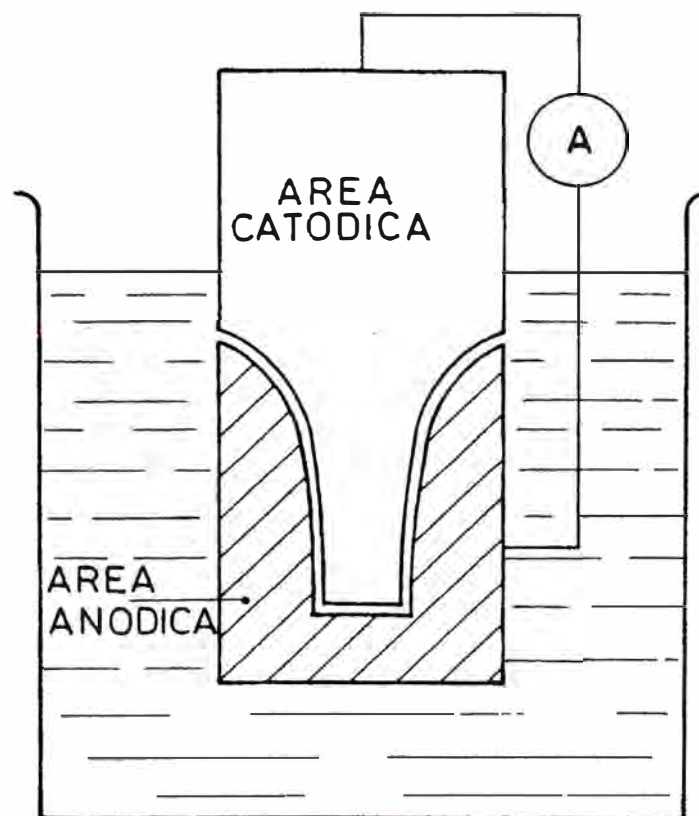
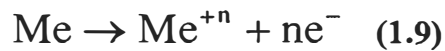


Figura 1.15 Ensayo de Evans y Hoar

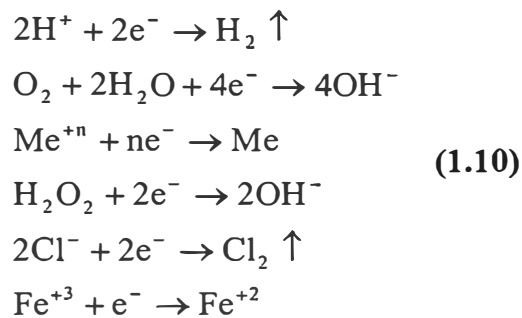
b) Reacciones anódicas y catódicas

La corrosión acuosa es el resultado del acoplamiento de dos reacciones (oxidación y reducción) con intercambio de electrones sobre la superficie del metal, de tal forma que en las zonas donde se produce la oxidación (ánodo) el metal se disuelve, liberando electrones, que emigran a través del metal hasta la otra región (cátodo), en la que reaccionan con alguna sustancia del medio para reducirla.

La reducción anódica es siempre la oxidación del metal:



Pero la reacción catódica puede ser cualquier proceso de reducción, como por ejemplo:



Sin embargo, las reacciones catódicas más frecuentes son las dos primeras. La descarga de hidrogeniones es la reacción catódica que se produce preferentemente en medios ácidos o en medios desaireados y la reducción del oxígeno disuelto en el agua, para producir OH^{-} , es la reacción fundamental en medios neutros y básicos.

En la **Figura 1.16** se esquematiza el comportamiento de la “pila de corrosión” en ambos tipos de medios.

Durante el proceso de funcionamiento de la corrosión acuosa se producen unos cambios paulatinos de la composición del electrolito en las inmediaciones de las zonas anódicas y catódicas, como consecuencia de las reacciones aludidas y la

aparición de productos de corrosión, lo que provoca modificaciones en la velocidad de reacción, que en los casos más favorables puede dar lugar a una detención del proceso.

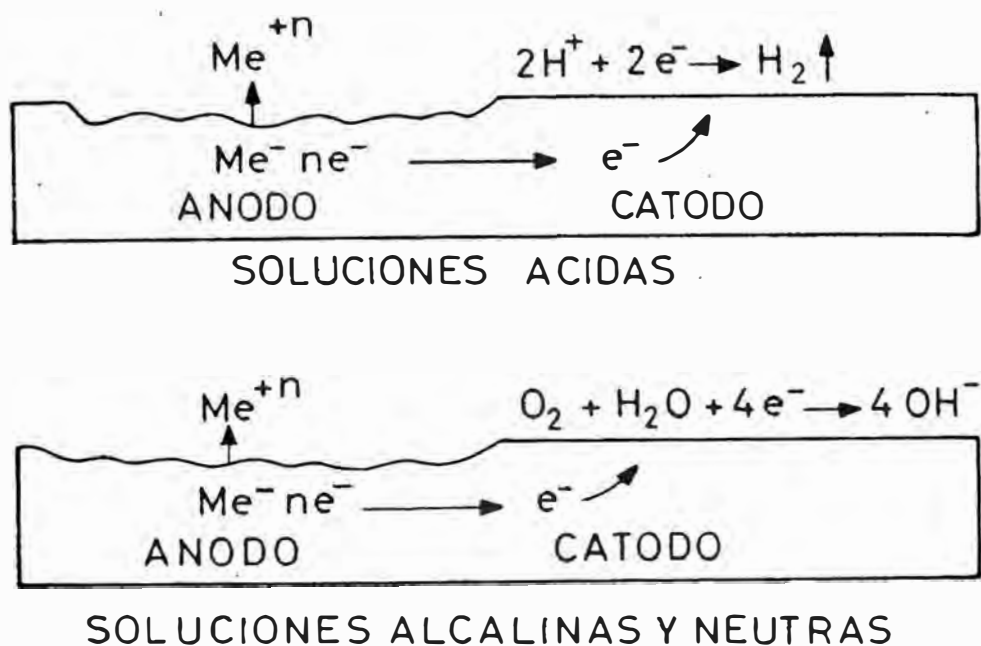


Figura 1.16 Ilustración esquemática del funcionamiento de una pila de corrosión en medio ácido y en medio neutro o alcalino

c) Potenciales electroquímicos

Una reacción química se origina espontáneamente cuando su energía libre de Gibbs (G) disminuye en valor absoluto $\Delta G = -RT \ln K$, donde K es la constante de los gases y T la temperatura absoluta. En el caso de una reacción redox, como la que se contempla en un proceso de corrosión metálica, esta ecuación puede expresarse de la forma:

$$\Delta G = -nE_0F \quad (1.11)$$

Donde n es el número de electrones intercambiados, E_0 es el potencial electroquímico de equilibrio y F es el Faraday. El potencial E_0 representa la fuerza


electromotriz generadora de la reacción correspondiente, que debe ser menor que cero, para que ésta se de en forma espontánea.

El potencial electroquímico de un metal guarda relación con la carga eléctrica que éste alcanza como resultado del equilibrio entre la tendencia de sus átomos a ionizarse, pasando a la disolución, y la de los iones metálicos formados en reducirse, pasando nuevamente a la forma metálica. Este potencial se mide en voltios y se considera negativo cuando la tendencia a oxidarse es mayor (reacción de disolución espontánea) y positiva al contrario.

La serie electroquímica de los metales, que se reproduce parcialmente en la **Tabla 1.6**, los ordena por su mayor o menor tendencia a oxidarse. Puede observarse que se ha adjudicado un potencial 0,0 al semielemento $2H^+$ (conocido como electrodo de hidrógeno), ya que resulta imposible medir el potencial electroquímico de un metal en valor absoluto. Por lo tanto, se ha tomado un cero arbitrario y todos los demás potenciales se miden con respecto a esta referencia.

El electrodo de hidrógeno está constituido por una lámina de platino recubierta de negro de platino e introducida en una solución ácida de actividad la unidad, por la que se burbujea hidrógeno a la presión de una atmósfera.

Tabla 1.6 Potenciales electroquímicos

Potenciales normales de electrodo		
Activo  Noble	$\text{Ca}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2,76 V
	$\text{Mg}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2,34 V
	$\text{Al}^{+3} + 3\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,67 V
	$\text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,76 V
	$\text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,44 V
	$\text{Pb}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,13 V
	$2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_2$	0,00 V
	$\text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,34 V
	$\text{Ag}^{+} + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0,80 V
	$\text{Hg}^{+2} + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Hg}$	+0,85 V
	$\text{Au}^{+3} + 3\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Au}$	+1,50 V

d) Ecuación de Nernst

La serie representada en la tabla contiene los llamados “potenciales normales de electrodo” en los que se considera que los iones metálicos en solución tienen una actividad igual a la unidad a 25 °C. . Pero esta situación no es la habitual. Cuando la actividad es diferente a la unidad, el potencial electroquímico puede ser calculado a través de la ecuación de Nernst:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln a_{\text{Me}^{+n}} \quad (1.12)$$

Donde E es el potencial del metal cuando la actividad de los iones es $a_{M^{c+}}$, E_0 es el potencial normal del metal, $F = 96\,493$ coulombios y n es la valencia de los iones del metal. Así, por ejemplo, en una solución que contenga iones Fe^{+2} de actividad igual a 10^{-3} moles/l, el hierro cuyo potencial normal de electrodo es $-0,44$ V tendrá una tensión de equilibrio de:

$$E = -0,44 + \frac{0,059}{2}(-3) = -0,527 \text{ V}$$

La ecuación de Nernst se aplica igualmente a una reacción redox, tomando entonces la forma de:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{especie oxidada}}}{a_{\text{especie reducida}}} \quad (1.13)$$

En el caso de la corrosión metálica, lo corriente, en sus comienzos, es que la solución este exenta de los iones metálicos y luego, a medida que avanza el proceso, que aumente su concentración con el tiempo, por lo que raramente coinciden los potenciales calculados con los reales, en los que además, intervienen: la posibilidad de reacciones secundarias, la temperatura y la precipitación de productos de corrosión.

e) Electrodo de referencia

En la práctica, los potenciales de un metal no se miden con respecto al de hidrógeno por la dificultad operatoria que entraña su manejo. Se recurre para ello a una serie de electrodos cuyo potencial permanece fijo al estar basados en reacciones reversibles. Son numerosos los electrodos de referencia utilizados en la práctica, ya que se intenta adaptarlos a las diferentes necesidades experimentales. Los electrodos de

referencia más comunes son el de calomelanos (basado en la reacción $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}$), el de Cu/CuSO_4 y el de Ag/AgCl .

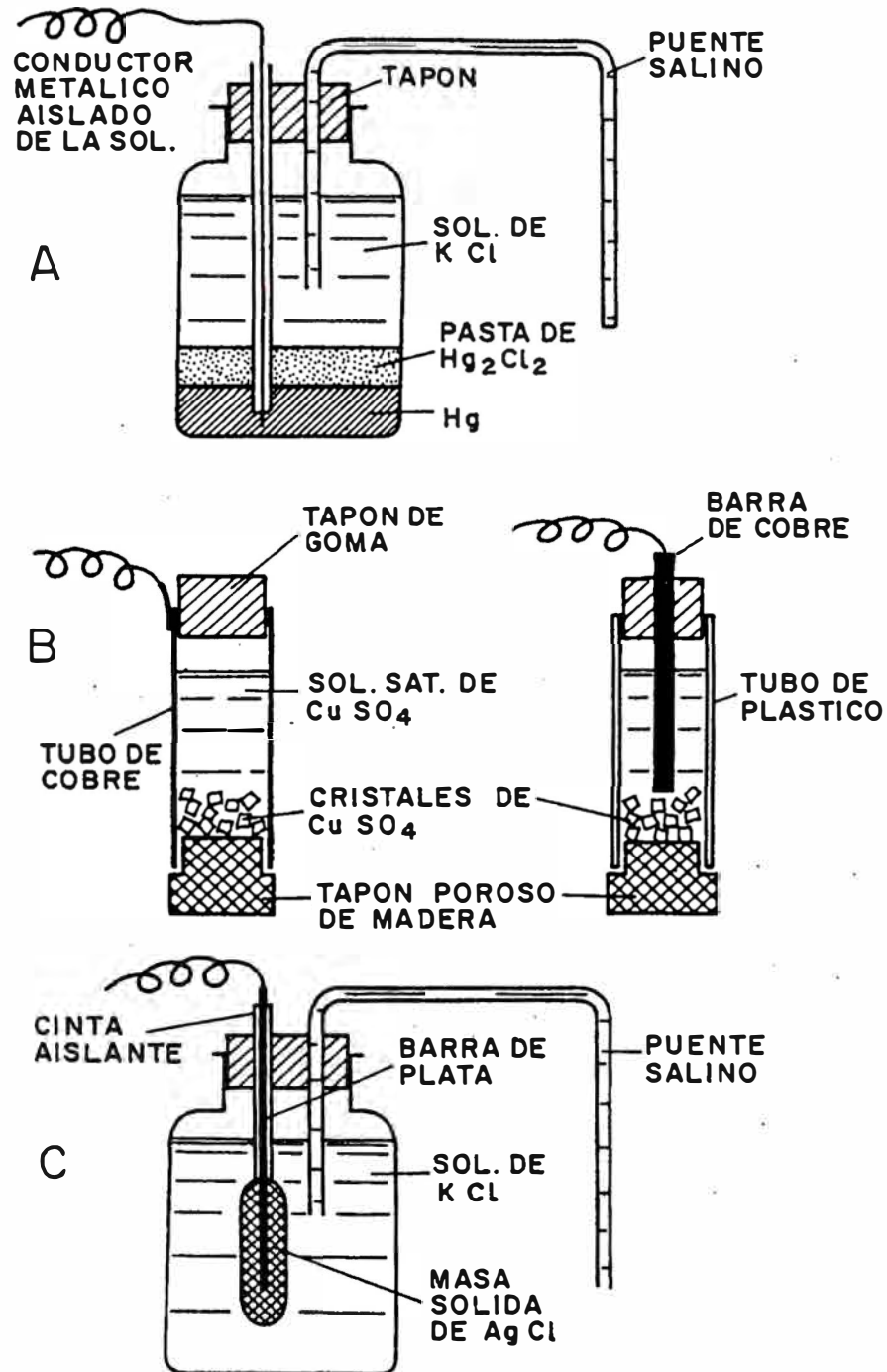


Figura 1.17 Electrodos de referencia: a) de calomelanos b) de cobre/sulfato de cobre y de plata c) de plata/cloruro de plata

Los potenciales de estos electrodos a 25 °C, con respecto al hidrógeno, son:

Hg/Hg₂Cl₂/KCl (saturado)..... +0,241 V

Cu/CuSO₄..... +0,316 V

Ag/AgCl (agua de mar)..... +0,250 V

f) Diagramas de Pourbaix

Al tener lugar la corrosión en medio acuoso, los iones del medio intervienen directa o indirectamente en el proceso de corrosión, por lo que la reacción de corrosión es función del pH del medio. Como el potencial que alcanza el metal depende de todas las reacciones que se producen sobre su superficie, se puede establecer una relación entre potencial y pH. Fue Pourbaix el que ordenó y calculó estos datos teniendo en cuenta las constantes de equilibrio de óxidos e hidróxidos y publicó unos diagramas que proporcionan información sobre las especies termodinámicamente estables en función del potencial del electrodo y del pH.

El diagrama está dividido en tres zonas: corrosión, pasividad e inmunidad. Esta última indica la región de pH/potenciales en los que la reacción de oxidación es termodinámicamente desfavorable y, por tanto, la corrosión es imposible. La región de pasividad indica la relación de pH/potenciales en la que los productos de corrosión formados se depositan sobre el metal, impidiendo el ulterior progreso de la corrosión. Muchos metales exhiben este comportamiento (se pasivan) en medios naturales, lo que hace económicamente rentable su uso sin ninguna otra protección adicional. Tal es el caso del acero inoxidable, el aluminio y el cinc en la atmósfera.

Finalmente aunque los diagramas de Pourbaix son una excelente ayuda para interpretar las posibles reacciones de corrosión, solo contienen datos termodinámicos, por lo que no se pueden hacer predicciones ciegas a partir de ellos.

Solo la consideración conjunta de datos cinéticos sobre la evolución de una determinada reacción a lo largo del tiempo puede permitir hacer predicciones con mayor seguridad.

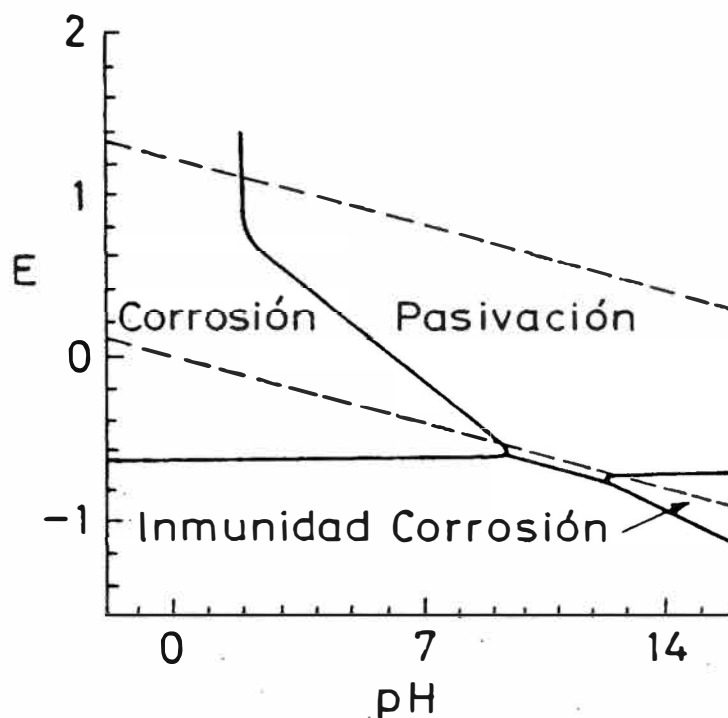


Figura 1.18 Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25 °C

g) Morfología de la corrosión

La localización de las zonas anódicas y catódicas sobre la superficie de un metal puede ser muy variada, dando lugar a que el material se corra de formas muy diversas.

Cuando el ataque interesa a toda la superficie por igual (las zonas anódicas y catódicas son de nivel submicroscópico y cambian de localización con el tiempo) se dice que la corrosión es **generalizada** (homogénea y heterogénea). En cambio, cuando el ataque se concentra en unas áreas determinadas, se le llama corrosión

localizada, que puede ser por **picaduras** (cuando afecta a unos pocos puntos, dando lugar a una relación de áreas anódicas/áreas catódicas muy pequeña, lo que intensifica el ataque en profundidad), o puede ser simplemente localizada, porque atañe a determinadas áreas de la superficie.

En general, la morfología de la corrosión guarda relación con las heterogeneidades de la superficie metálica o del medio. Estas heterogeneidades son el asiento primero de unas diferencias de potencial, que provocan la formación de la pila de corrosión. Así, por ejemplo, el borde del grano metálico suele ser más reactivo que su interior, por lo que este actúa de cátodo, dando lugar a una disolución preferente del borde anódico, conocida como corrosión selectiva en bordes de grano. También zonas del metal sometidas a deformaciones plásticas o que presentan ciertas segregaciones son más activas que el resto de la superficie metálica.

Un caso típico de heterogeneidad debida al electrolito es la llamada aireación diferencial, que supone la existencia de mayor concentración de oxígeno en unas zonas que en otras. En estos casos la zona más aireada actuará de cátodo, corroyéndose las zonas menos aireadas. También diferencias de concentración o de temperatura motivan diferentes potenciales y pueden desencadenar un proceso de corrosión.

Finalmente, es de destacar el caso de que se pongan en contacto dos metales en un mismo electrolito, conocido como corrosión galvánica. El metal más activo actuará de ánodo y protegerá el más noble, estableciéndose así el fundamento de lo que se conoce como protección catódica.

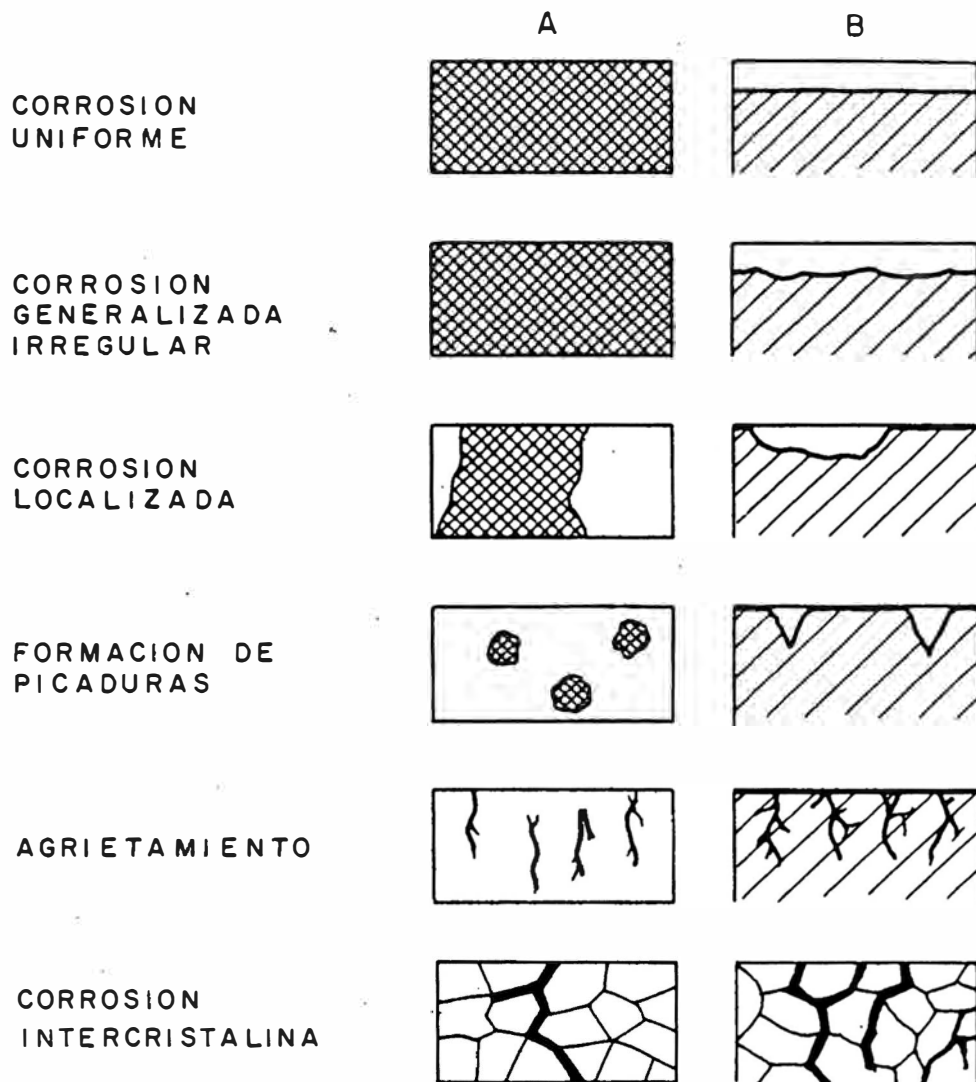


Figura 1.19 Formas que puede adoptar la corrosión en función del área corroída.

h) Consideraciones cinéticas

Resulta muy importante el conocimiento de la velocidad del proceso, ya que si una reacción de corrosión se desencadena, pero progresa muy lentamente, a efectos de la vida útil del metal, este no presentará corrosión significativa.

Debido a la formación de productos de corrosión y a los cambios químicos en las cercanías de ánodos y cátodos, el proceso total evoluciona con el tiempo y la velocidad de corrosión varía, hasta llegar a un valor constante en los casos en que se

alcanza un equilibrio en el proceso total. La velocidad de corrosión depende de la fuerza impulsora de la reacción (diferencia de potencial entre el ánodo y cátodo), de la resistencia óhmica del circuito y de la evolución que sufran con el tiempo los procesos anódicos y catódicos.

i) Fenómenos de polarización

La **Figura 1.20** sirve para ilustrar la influencia de todos estos parámetros en la velocidad de corrosión. Dicha figura muestra el caso cuando se ponen en contacto dos metales diferentes (Fe y Zn) sumergidos en una disolución de NaCl. Mediante un voltímetro y un amperímetro se mide la evolución de sus potenciales de electrodo y de la intensidad galvánica. Al conectar los dos metales se cumple que:

$$I_{\text{galv}} = \frac{E_c - E_a}{R_{\text{oh}}} \quad (1.14)$$

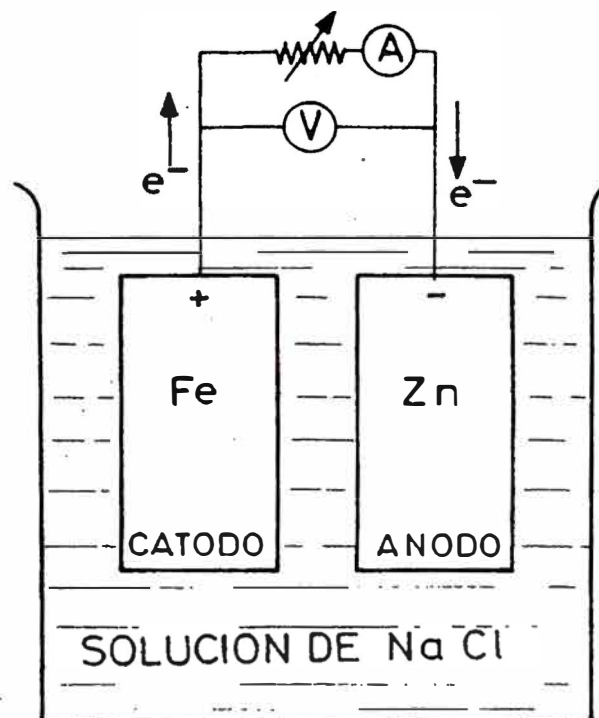


Figura 1.20 Ejemplo de par galvánico o de pila formada por metales distintos puestos en contacto.

Siendo E_c y E_a los potenciales catódico y anódico, respectivamente. El valor de R_{oh} es la suma de la resistencia del electrolito más la del circuito eléctrico de medida. Como por lo general esta última es despreciable frente a la primera, solo se considerará a efectos prácticos la R_{oh} del electrolito.

Desde el primer momento de la conexión, los potenciales catódico y anódico evolucionan hacia una aproximación de sus valores. Se conoce como **polarización** la diferencia de potencial entre el potencial en circuito abierto (potencial en condiciones de equilibrio) de cada semielemento de la pila y el potencial después de la conexión.

Es decir:

$$\begin{aligned}\eta_a &= E_{corr} - E_a \\ \eta_c &= E_c - E_{corr}\end{aligned}\quad (1.15)$$

Donde η_a y η_c son las polarizaciones o sobrepotenciales anódico y catódico, respectivamente, y E_{corr} es el potencial de corrosión o potencial mixto, que se alcanza cuando se llega a una situación de equilibrio en la que los potenciales ya no evolucionan más.

Aunque el ejemplo se ha descrito a partir de un par galvánico, su fundamento se aplica igualmente cuando las zonas anódicas y catódicas se distribuyen sobre un mismo metal, y se genera la formación de pilas de corrosión. La intensidad de corrosión dependerá de los factores antes mencionados: fuerza impulsora ($E_c - E_a$), R_{oh} del electrolito y polarización.

j) Curvas de polarización

La polarización puede producirse espontáneamente, porque la reacción implicada está termodinámicamente favorecida, o bien puede provocarse mediante la aplicación de una corriente externa como indica la **Figura 1.21**. En este caso, se conoce como

curva de polarización al registro de la variación de la intensidad o del potencial cuando se aplica un potencial o intensidad creciente al electrodo.

El trazado de estas curvas de polarización es una práctica habitual y muy útil en los estudios de corrosión, ya que de su forma y valores numéricos puede extraerse mucha información sobre los procesos de corrosión. Según el signo de la corriente que se aplique, las curvas pueden ser anódicas (en dirección de los potenciales nobles) o catódicas (en dirección de los potenciales más activos). La convención de signos en el valor de los potenciales es el que se muestra en la **Figura 1.22**.

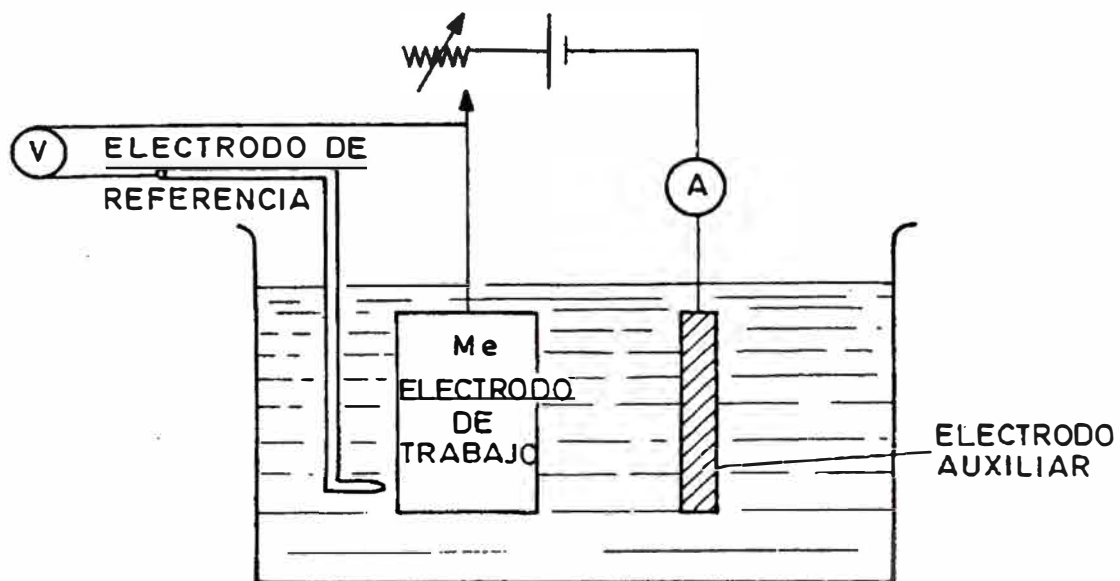


Figura 1.21 Esquema de montaje de medida para la realización de una curva de polarización.

La disposición del circuito se presenta en la **Figura 1.21**. Mediante un reóstato variable se aplica una corriente al metal objeto de estudio (electrodo de trabajo) con la ayuda de un electrodo auxiliar. Las variaciones de potencial que el paso de la

corriente produce en el electrodo de trabajo se miden mediante un electrodo de referencia situado en las cercanías de su superficie.

Si se aplica una corriente constante, la curva E-tiempo que se obtiene se denomina galvanostática, y si la intensidad se hace variar con el tiempo, entonces la curva i-E se llama galvanocinética.

Solo a partir de los años 60 fue posible diseñar un circuito eléctrico capaz de aplicar una tensión constante, que fuese independiente de la resistencia óhmica de la célula de medida y de los cambios introducidos en el electrodo de trabajo por la aplicación de dicha tensión. Los aparatos capaces de ello se conocen como **potenciostatos** y las curvas que se pueden trazar con ellos se denominan potencioestáticas o potenciodinámicas.

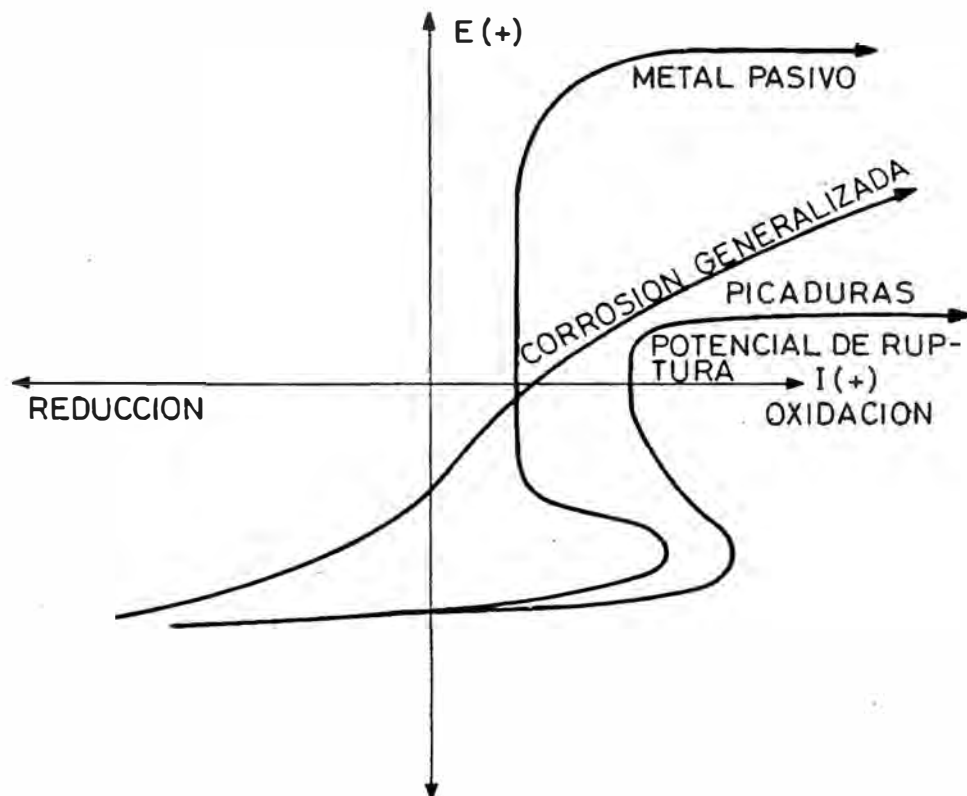


Figura 1.22 Curvas de polarización

En la **Figura 1.22** se muestran algunos ejemplos de curvas de polarización de:

- Metales que sufren corrosión generalizada.
- Metales que se pasivan.
- Metales que sufren corrosión por picaduras.

Estas curvas i - E aportan una información valiosa y siguen siendo de uso habitual en los estudios de corrosión.

k) Tipos de polarización

En el trazado de las curvas de polarización influyen tres tipos de parámetros básicos, que controlan tanto la forma de las curvas como la magnitud de las variaciones de potencial con la intensidad, o viceversa. Estos tipos de polarización pueden darse individual o simultáneamente.

Polarización de activación. Está ligada a la energía de activación del proceso anódico y catódico. Es decir, es función de la mayor o menor facilidad para el paso de los iones metálicos a su forma iónica y para el proceso de reducción de hidrogeniones, oxígeno, etc. Está asociada al paso más lento en la transferencia de carga. Para corrientes elevadas, y en ausencia de otros tipos de polarización, la polarización medida es directamente proporcional al logaritmo de la densidad de corriente, i :

$$\eta = a + b \log i \quad (1.16)$$

Donde a y b son constantes. Esta ecuación es conocida como ley de Tafel. Los valores de a y b pueden ser obtenidos experimentalmente en determinados casos cuasi-ideales. El parámetro a está relacionado con la corriente de intercambio i_0 , que es la corriente de equilibrio entre el metal y el electrolito en la semireacción

considerada y da una idea de su reversibilidad. El parámetro b da información sobre el mecanismo de la reacción.

Polarización de concentración. Representa la variación en el potencial de un electrodo a consecuencia de los cambios de concentración en la inmediata vecindad de su superficie y motivados por el flujo de corriente, que altera la composición del electrolito. Disminuye con una fuerte agitación u otras medidas que ayuden a uniformar la solución. El movimiento de los iones o especies hacia o desde un electrodo procede por uno o más de los siguientes mecanismos: difusión, migración y convección. La difusión y migración son procesos lentos; por el contrario, la convección natural o forzada es más efectiva. En un electrolito estacionario la difusión y migración son los únicos procesos posibles. Nos aproximamos a este caso dentro de la delgada capa de líquido contigua a la superficie metálica (capa de difusión) y cuyo espesor no sobrepasa los 0,2-0,4 mm. Más allá de ella, en el seno del electrolito, adquiere importancia el transporte por convección y agitación. La velocidad de difusión en la capa estacionaria suele determinar la velocidad de llegada o alejamiento de las especies reaccionantes y de los productos de reacción.

Una elevada velocidad de reacción electroquímica impone cambios sustanciales de concentración cerca del electrodo. La variación del potencial así originada se deduce de la ecuación de Nernst. Un aumento de concentración, debido a la disolución anódica del metal, ennoblece al electrodo (aumenta el potencial), mientras que la precipitación catódica de iones metálicos, al disminuir la concentración de éstos junto al electrodo, suscita el efecto contrario.

Polarización de resistencia. Se origina en cualquier caída óhmica (IR) en la inmediata vecindad del electrodo. Puede estar causada por la formación de películas

o precipitados sobre la superficie metálica, que se opongan en cierta medida al paso de la corriente. Muchos electrodos se recubren de películas delgadas de relativamente elevada resistencia, por ejemplo, película de óxido. En casos extremos, de formación de películas dieléctricas de óxido, esta polarización puede elevarse a varios centenares de voltios. También la capa de solución en la inmediata vecindad del electrodo puede representar una considerable resistencia al flujo de corriente. La polarización óhmica se incrementa linealmente con la densidad de corriente.

1) Diagramas de Evans

Se debe a Evans la introducción del método gráfico para el análisis de la relación entre la velocidad del método gráfico para el análisis de la relación entre la velocidad de corrosión y polarización de los electrodos (ánodo y cátodo). El método es simple y permite tener una clara visión del efecto de factores diversos en el funcionamiento de la pila de corrosión y en la corriente de corrosión, de la que dependen los daños producidos.

Las regiones anódica y catódica de una pila de corrosión pueden estar perfectamente definidas y delimitadas, como el caso ideal de una pila bimetálica, formada por la unión de dos metales de muy diferente actividad, en la que un metal actúe exclusivamente de ánodo y el otro de cátodo.

Más comúnmente la pieza o estructura metálica está constituida por un conjunto de áreas anódicas o catódicas, distribuidas sobre toda la superficie del metal. Aun en este caso es factible imaginar el proceso de corrosión como debido al funcionamiento de una única pila, cuyos dos electrodos están caracterizados por una región anódica, con un potencial efectivo E_a , equivalente a la acción conjunta de los diferentes

ánodos locales y una región catódica, con un potencial E_0 , equivalente a la acción conjunta de los diferentes cátodos locales.

Por consiguiente, tanto en un caso como en el otro está justificado hablar de la superposición gráfica de dos curvas de polarización (anódica de disolución metálica y catódica de reducción) para los dos electrodos que caracterizan la pila de corrosión. Supongamos que sobre una misma gráfica se representan las variaciones de potencial de ambos electrodos en función de la intensidad de corriente. En tal caso, si el eje de ordenadas se refiere a los valores crecientes de potencial, la curva catódica tendrá un trazado descendente (pendiente negativa) y la curva anódica, ascendente (pendiente positiva).

Es de hacer notar que la representación de las dos curvas sobre un mismo diagrama es solo posible si se llevan en abscisas los valores de la intensidad de corriente, en lugar de la densidad de corriente, ya que la intensidad de corriente sobre el ánodo debe ser igual a la intensidad de corriente sobre el cátodo.

En una pieza metálica que se corroe, el ánodo y el cátodo sufren polarización hasta que la diferencia de sus potenciales dividida por la corriente de corrosión se haga igual a la resistencia total del circuito.

El punto de intersección de las dos curvas de polarización señala la máxima intensidad que puede pasar por la pila de corrosión cuando el flujo de corriente conduce a la igualación de los potenciales anódico y catódico.

Puesto que: $I_{\text{corr}} = \frac{E'_c - E'_a}{R}$; si $R \rightarrow 0$, $E'_c - E'_a \rightarrow 0$, y, en el límite,

$$E'_c = E'_a = E_{\text{corr}}.$$

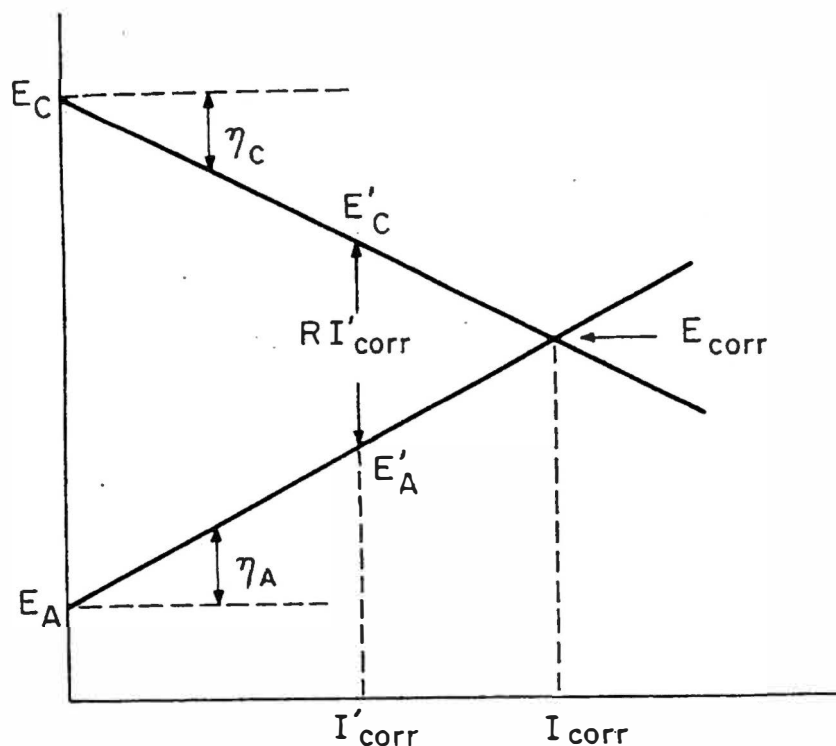


Figura 1.23 Diagrama potencial/corriente para una pila de corrosión, en el que se hace la simplificación de reemplazar las curvas de polarización por líneas rectas.

Nos acercamos a esta situación con los electrolitos de elevada conductividad (por ejemplo, agua de mar) o cuando las regiones anódicas y catódicas están muy próximas (si estas son minúsculas y numerosas). A menudo, se comete solo un pequeño error admitiendo que $R = 0$. Entonces la corriente de corrosión y el potencial de corrosión estarán dados por la intersección de las curvas de polarización de uno y otro electrodo.

Otras veces no puede despreciarse el valor de R . La caída óhmica debida al flujo de corriente exige necesariamente una intensidad de corrosión inferior a la determinada por el punto de intersección de las curvas de polarización; si $R \neq 0$, $E'_c - E'_a = RI'_{\text{corr}}$, de donde $I'_{\text{corr}} < I_{\text{corr}}$ (**Figura 1.23**).

La máxima intensidad de corrosión, definida por el diagrama de Evans, depende del trazado particular de las curvas de polarización para la disolución metálica y reacción catódica. Estos diagramas E-I permiten explicar, por ejemplo, que dos sistemas con distintos potenciales electroquímicos iniciales (en circuito abierto) puedan dar una misma velocidad de corrosión (**Fig. 1.24a**) o que al sistema con una mayor diferencia inicial de potencial le corresponda una menor velocidad de corrosión (**Fig. 1.24b**).

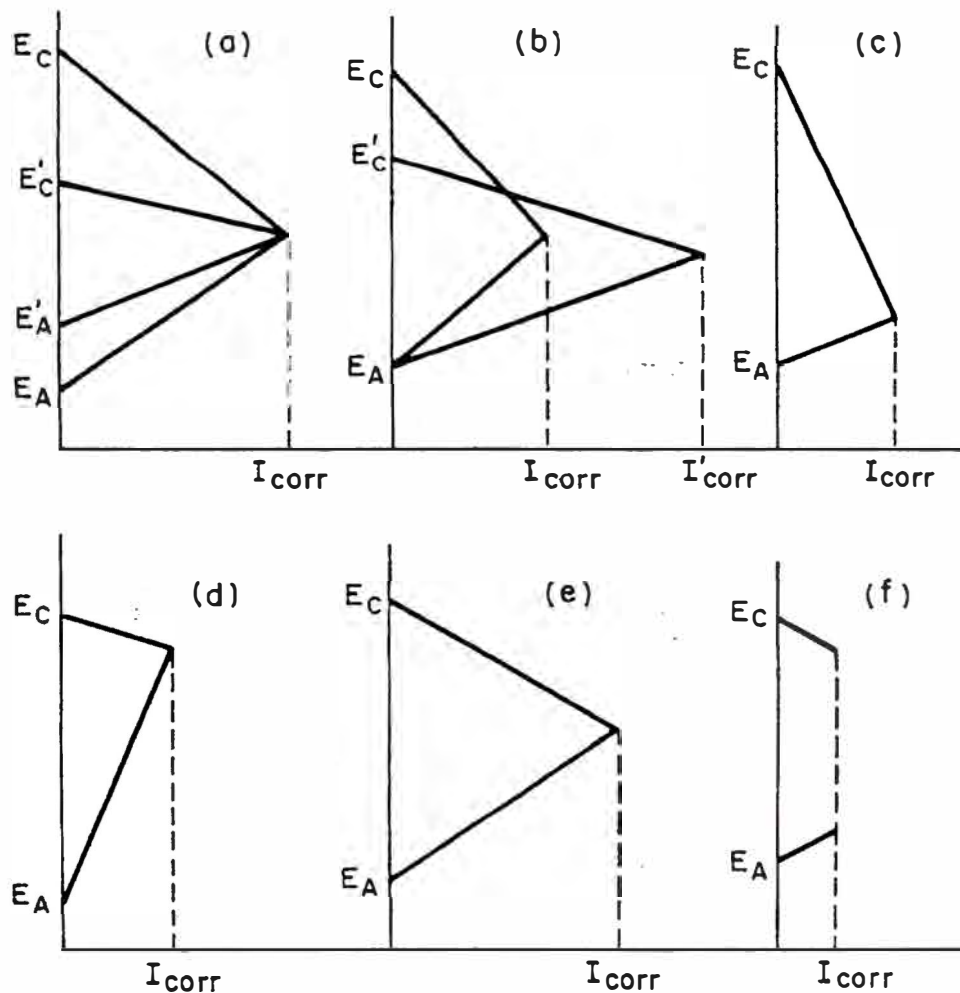


Figura 1.24 Diagramas de Evans mostrando la vinculación entre intensidades de corrosión y polarizaciones anódica y catódica.

En la **Figura 1.24c** es evidente que la magnitud de la corriente de corrosión I_{corr} , es decir la abscisa del punto de intersección de las dos curvas, depende de la inclinación de la curva de polarización catódica; la corriente de corrosión está determinada por la reacción catódica. Se dice que el proceso de corrosión se halla bajo control catódico.

En la **Figura 1.24d** sucede todo lo contrario. La reacción anódica de disolución del metal impone prácticamente la corriente de corrosión; se habla entonces de un control anódico.

Es posible encontrarse con situaciones en las que existe un control mixto; cuando la corriente de corrosión viene fijada tanto por la reacción anódica como por la catódica, como resultado de que las pendientes de ambas curvas de polarización son poco pronunciadas. (**Fig. 1.24e**)

El efecto de una fuerte caída IR entre la región anódica y la región catódica (fuente de electrones) queda representado en el diagrama de Evans por un valor de la corriente de corrosión muy por debajo del valor máximo y por una notoria desigualdad entre los potenciales finales de las áreas anódica y catódica. En este caso de control de resistencia, representado en la **Figura 1.24f**, el trazado de las curvas de polarización apenas influye en la corriente de corrosión, que está determinada casi exclusivamente por la magnitud de la resistencia óhmica.

1.4. Corrosión en el aluminio

El aluminio es uno de los metales más utilizados por su excelente resistencia a la intemperie. A diferencia de lo que ocurre con el acero dulce, cinc o cobre, en que la corrosión motiva una pérdida general de espesor del material, la corrosión del aluminio suele ser de tipo localizado, con formación de múltiples picaduras

repartidas por toda la superficie metálica, que dejan entre sí amplias áreas de metal intacto.

Tendiendo en cuenta que a temperatura ambiente la oxidación seca del aluminio es detenida por la capa de alúmina natural, se infiere que el mecanismo de corrosión es básicamente de carácter electroquímico, dependiente de los potenciales presentes bajo los cuales se cumplen algunas reacciones químicas, conformándose dos semiceldas, entre las cuales habrá un movimiento electrónico de emisión desde la región anódica (oxidación y deterioro del metal) y de captación en la región catódica (reducción o neutralización iónica), a través de las zonas del metal que no reaccionan.

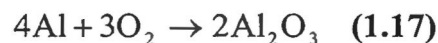
La capa de alúmina Al_2O_3 , no solo tiene un espesor variable, sino que también está conformada por un estrato de interfase con el metal, que no es poroso y que actúa como barrera, y por otro lado presenta otro estrato más grueso y permeable hacia el medio exterior; ambos podrían ser objeto de fallas, debido a la acción del viento, que produce vibraciones o transporta abrasivos, o también debido a los gradientes térmicos que dan lugar a procesos de agrietamiento por contracción y dilatación.

Estando los conductores y sus accesorios, expuestos a la intemperie, la contaminación natural depositada en la superficie contendrá elementos ácidos, bases o sales que al disolverse con el agua de la humedad ambiental condensada dará una solución conteniendo iones de carga positiva y negativa con concentraciones dependientes del pH, cuya movilidad será dependiente de la pila de corriente eléctrica que circule a través de la solución; mediante el cual, los iones con carga positiva (cationes), se moverán hacia el cátodo, y los iones de carga negativa (aniones), se dirigirán hacia el ánodo, dando lugar al proceso de corrosión

atmosférica, que puede explicarse para los dos estados del conductor, es decir desenergizado y energizado.

1.4.1. Reacciones en el material desenergizado

- La formación de alúmina permeable exteriormente se ciñe a la siguiente ecuación:

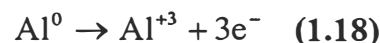


- La capa de humedad sobre el conductor, tendrá un pH que determina el contenido de cargas eléctricas.

Iones positivos H^+

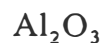
Iones negativos OH^-

- La aparición de grietas, despostillados o fisuras en el estrato duro de la alúmina, da lugar a la oxidación directa del aluminio de la siguiente forma:



- Lo cual quiere decir que pasan cationes Al^{+3} a la solución debido a la pérdida de tres electrones, pudiendo dar lugar a cualquiera de las reacciones:

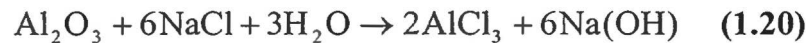
- a) Reacción con el oxígeno del medio ambiente y estabilización consecutiva con la formación de una capa de óxido de aluminio (alúmina protectora)



- b) Hidrolización de los cationes Al^{+3} con el vapor de agua presente, asegurando la presencia de $\text{Al}(\text{OH})_3$, en un medio débilmente ácido, que solo permite parte de su disolución como aluminato AlO_2^- , debido al carácter anfótero del aluminio.



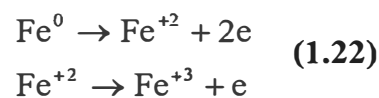
- De otro lado, el vapor salino de ClNa marino concentrado por la contaminación (arcilla hidratada), que puede intercambiar cationes alcalinos por hidrógenos, aumentando localmente la acidez del medio corrosivo, destruye la capa de alúmina según la reacción:



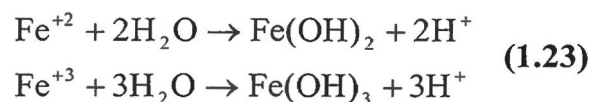
- Una vez destruida la capa de óxido de aluminio con formación de cloruro de aluminio Cl_3Al , se inicia la hidrólisis de éste, según la ecuación:



- La neutralización subsecuente del Na(OH) con el HCl , según este mecanismo, da estabilidad al Al(OH)_3 quedando en el material de corrosión como $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; la cinética de las reacciones anteriores es activada por la temperatura del medio ambiente.
- Teniendo en cuenta que la aleación contiene hierro, la destrucción de la matriz de aluminio, hace posible la oxidación del hierro según las reacciones:



- Por hidrólisis posterior se tendrá también:



- Estos compuestos quedan en el material de corrosión como:

Óxido ferroso hidratado: $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (color amarillo)

Óxido férrico hidratado: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (color rojo)

- Similarmente, la destrucción de la fase de siliciuro de magnesio Mg_2Si , formará a su vez:

Óxido de magnesio hidratado: $MgO \cdot nH_2O$

Sílice hidratada: $SiO_2 \cdot nH_2O$

- Las reacciones establecidas corroboran la conformidad del polvo de corrosión analizado, en la siguiente forma:

Óxidos de aluminio hidratados.

Óxidos de magnesio hidratados.

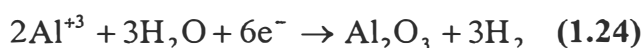
Óxidos ferrosos y férricos hidratados.

Sílice hidratada.

Sales alcalinas (NaCl).

1.4.2. Reacciones en el material energizado

- La capa de alúmina de espesor variable y permeable exteriormente, que cubre la superficie del conductor tiene la siguiente composición: Al_2O_3
- La humedad ambiental condensada que cubre la superficie del conductor contiene iones positivos y negativos que en presencia de la alternancia positiva que imprime una dirección anódica; se comportan en la siguiente forma (**Figura 1.25**)
 - a) La capa de alúmina se verá liberada de los iones H^+ que son sacados o apartados del óxido.
 - b) En la grieta, los iones Al^{+3} pasan del metal a la solución y se combinan con el agua para corroerse y presentarse como un hidróxido, liberando hidrógeno.



- El aumento de espesor de la alúmina y la migración de iones es lento, los electrones se apartan de la capa de alúmina; en la solución, los portadores negativos iones OH^- , se agrupan en la superficie de la capa de alúmina, para mantener el balance de cargas; en esa forma el semiciclo anódico involucra los siguientes efectos:
 - a) Corrosión en las grietas de la alúmina, sacando iones Al^{3+} al interior de la solución.
 - b) Conformación de una capa de iones OH^- sobre la capa remanente de alúmina, ocasionando aumento del pH hacia el lado alcalino.

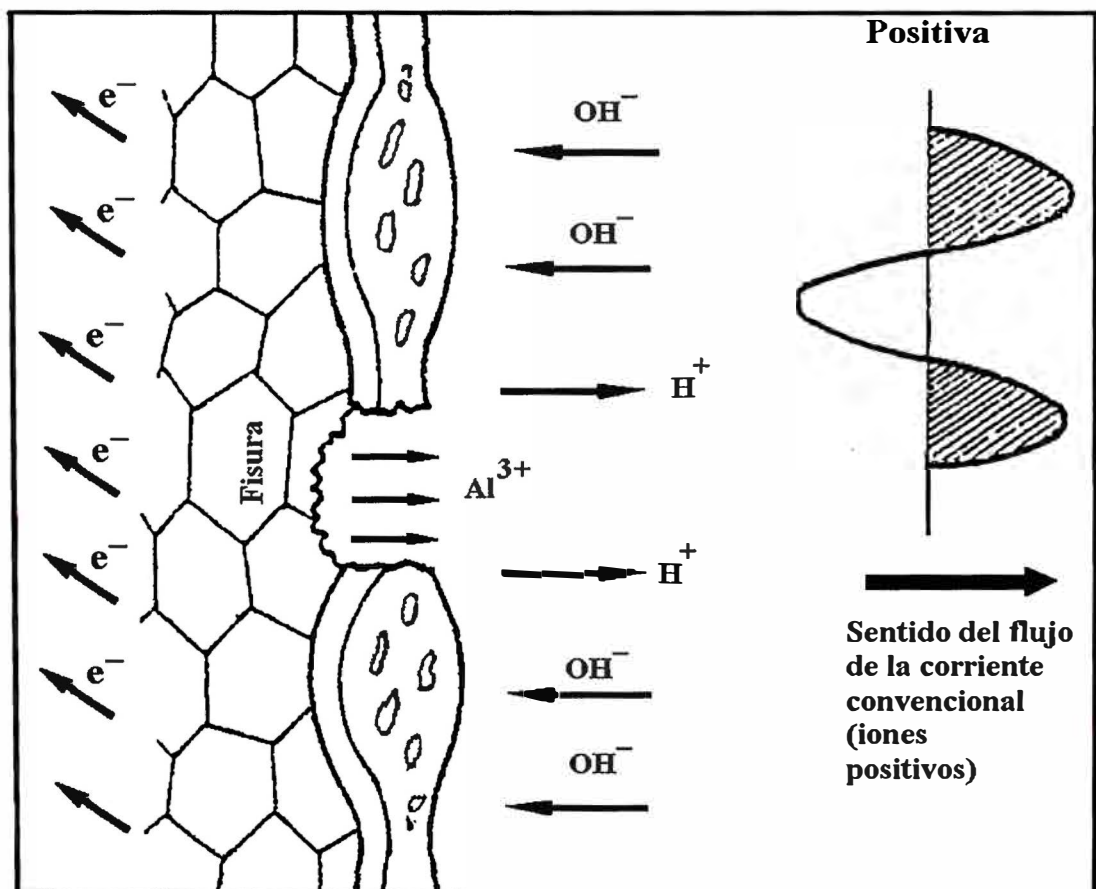


Figura 1.25 Superficie de un conductor de aluminio con la capa de alúmina afectada por una fisura donde se produce el fenómeno de corrosión bajo la alternancia positiva (dirección anódica)

- Una vez que se produce el cambio de la alternancia hacia la polaridad negativa, que imprime el semiciclo catódico, ocurren los siguientes fenómenos: (Figura 1.26)
 - a) Los iones H^+ son dirigidos hacia la capa de alúmina.
 - b) Los iones OH^- son sacados de la capa de alúmina.
- Ya que la capa de alúmina equivale a un semiconductor del tipo “n”, estará en condiciones de suministrar electrones a los iones H^+ , liberándose el hidrógeno neutro en la siguiente forma:

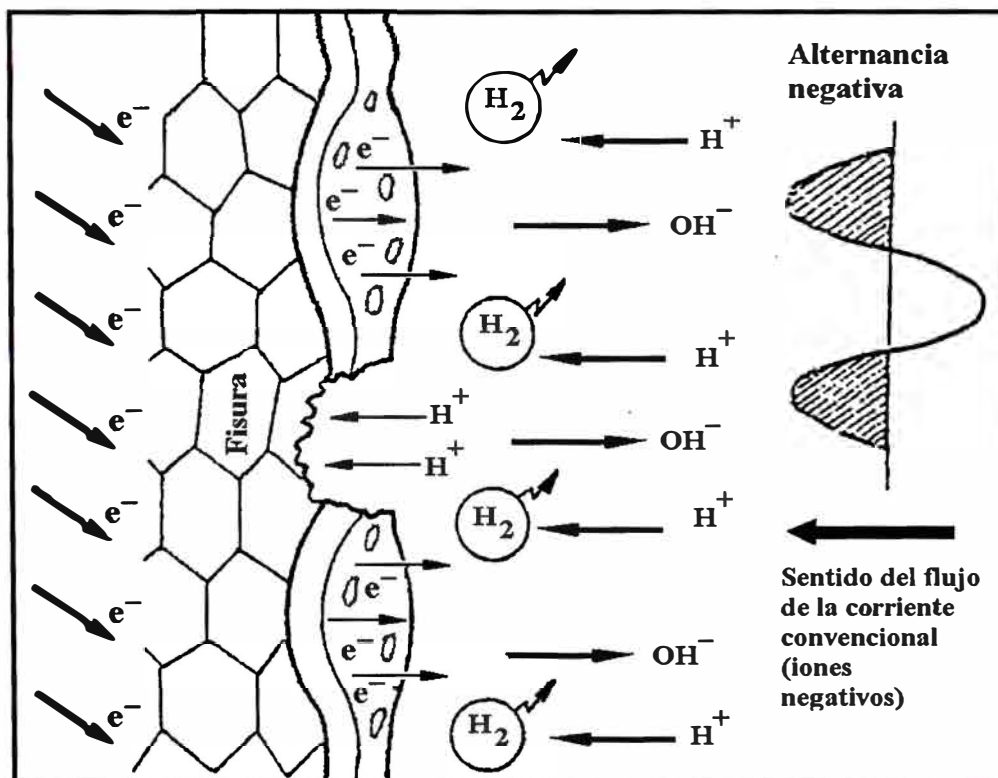


Figura 1.26 Superficie de un conductor de aluminio con la capa de alúmina fisurada donde se reduce el hidrógeno y prevalece el pH alcalino que extiende la falla durante la alternancia negativa (dirección catódica)

- A consecuencia de lo anterior, el electrolito quedará desprovisto de iones H^+ en las proximidades de la interface con la capa de alúmina, ocasionando una vez más, mayor concentración de iones OH^- , con el adicional aumento del pH hacia el lado alcalino.
- En resumen, ambos ciclos de corriente alterna producen un medio alcalino en las proximidades de la superficie del aluminio; el efecto del OH^- concentrado se traduce en la disolución de la capa de barrera de alúmina, extendiéndose las fallas por donde se produce la corrosión por migración de los iones Al^{+3} .



- Los procesos consecutivos, que conducen a la conformación del polvo de corrosión que normalmente se presenta en las partes afectadas, siguen la cinética ya presentada en el caso anterior.

1.4.3. Principales mecanismos de corrosión

A lo largo de los exámenes y análisis efectuados en muestras de diferentes procedencias sobre el litoral peruano, se han podido establecer más de doce tipos de mecanismos de corrosión. Solo mencionaremos los más importantes sin profundizar en los aspectos de cinética ni morfología de los procesos.

a) Corrosión por cuplas galvánicas

La corrosión galvánica por acoplamiento de metales de diferente potencial electroquímico de disolución, en presencia de una solución conductora, se hace posible a partir del contenido de impurezas como el fierro, cobre, plomo y otros metales pesados en el seno de la fase de aluminio que es menos noble.

El fenómeno es más notorio, cuando se empalman conductores de cobre y aluminio (o aleación de aluminio), como es el caso de las conexiones clandestinas en las redes de distribución aérea; o también se puede presentar en el acoplamiento de piezas del mismo metal (grapa-conductor), cuando la grapa resulta ser más noble por haber recibido tratamiento de endurecimiento, o cuando el conductor es usado y se le empalma con una grapa nueva que respecto del anterior resulta ser menos noble.

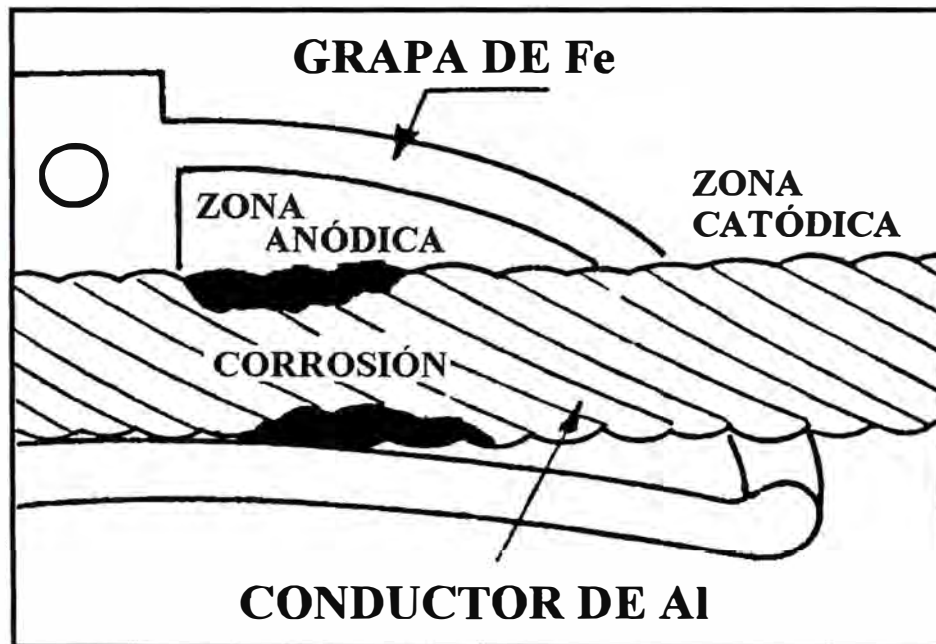


Figura 1.27 Corrosión por cuplas galvánicas

b) Corrosión por picadura

El electrolito depositado en las fallas de superficie de las hebras, presenta según la profundidad, diferentes concentraciones de oxígeno disuelto, engendrando áreas anódicas y catódicas, y por ende el funcionamiento de pilas de aireación diferencial donde la reacción catódica de reducción del oxígeno tiende a ocurrir en las partes

bajas, menos positivas o deficitarias en oxígeno por estar menos aireadas; de esa manera el electrolito correspondiente puede resultar muy ácido favoreciendo la continuación del ataque con patrones cavernosos de penetración arboriforme.

Este ataque se hace posible debido a las imperfecciones de fabricación que denotan una falta de control de los parámetros de trefilado y los accesorios de reducción y estricción. Normalmente se hallan ranuras profundas, grietas penetrantes, fisuras transversales y pliegues longitudinales, los cuales pueden ser fácilmente constatables en visión macro de 25 aumentos, después de desagregar los sólidos por lavado simple con agua, y la capa de alúmina con un baño en hidróxido de sodio al 0,104 normal, equivalente a la salinidad ambiental costera. Otros defectos hallados en las hebras de los conductores corresponden a los daños sufridos debido a un manipuleo incorrecto durante el tendido.

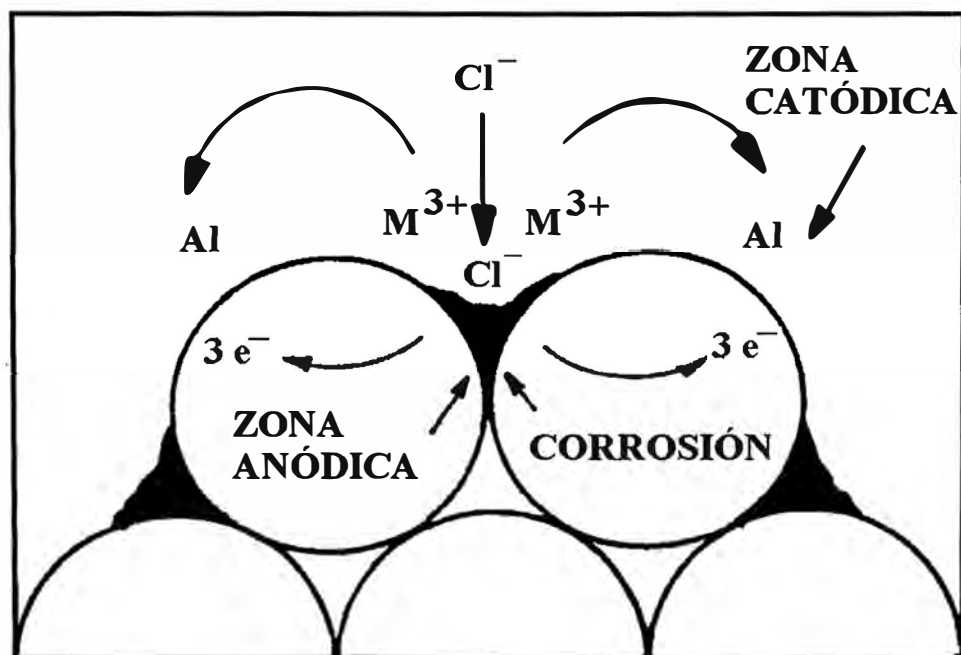


Figura 1.28 Corrosión por picadura

c) Corrosión bajo tensión mecánica

El conductor eléctrico está normalmente sometido a una tensión mecánica de tendido muy inferior al límite elástico EDS (every day stress), la cual es asignada por diseño. Dicha sollicitación, acompañada de los ciclos vibratorios que genera el viento, y de la alternancia de contracciones y dilataciones debidos a los gradientes térmicos cotidianos, crea un proceso combinado mecánico–electroquímico de corrosión, que depende de las aptitudes de repasivación de las fallas por figuración, que aparecen luego de la formación de grietas primarias a partir de los defectos transversales secuela del trefilado, que normalmente inician las picaduras, en cuyo interior las concentraciones de los esfuerzos resultan anormalmente elevados por la existencia de diversas heterogeneidades estructurales o superficies del conductor.

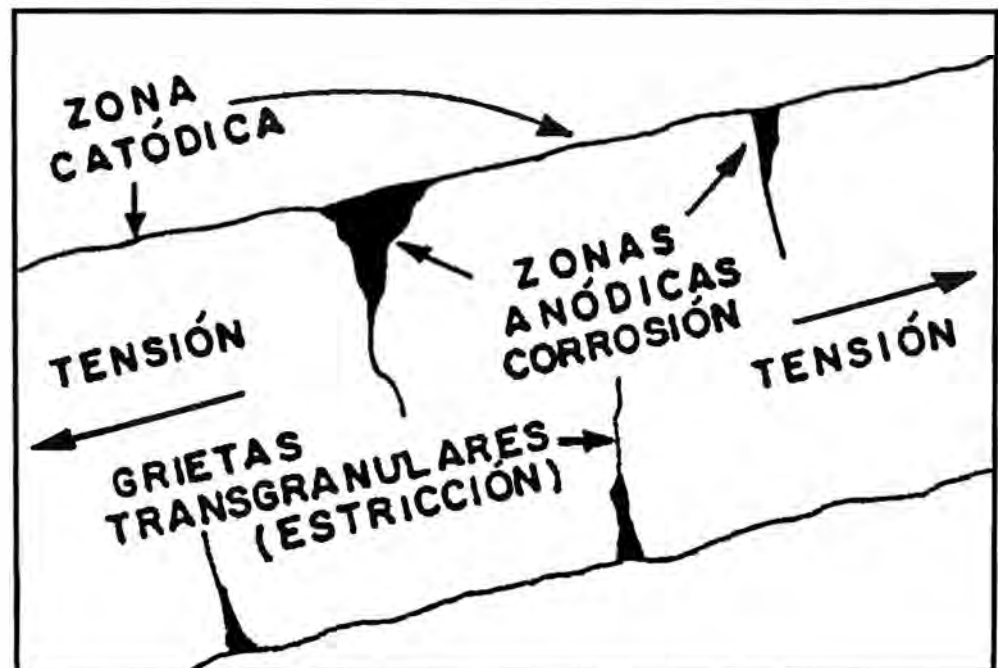


Figura 1.29 Corrosión bajo tensión mecánica

Las grietas de corrosión bajo tensión, también se pueden iniciar en las dislocaciones estructurales de la red cristalina, las cuales moviéndose a través de los planos de deslizamiento, afloran a la superficie durante la deformación elástica.

d) Corrosión por celdas de concentración

Ocurre en las imperfecciones superficiales, dentro de dichas hendiduras el metal se disuelve por acidificación o alcalinización, pasando a la solución, mientras que fuera de las hendiduras, ocurre lo mismo pero en forma mas acelerada, dando lugar al desequilibrio químico entre el metal y el electrolito, lo cual ocasiona un flujo de corriente de corrosión.

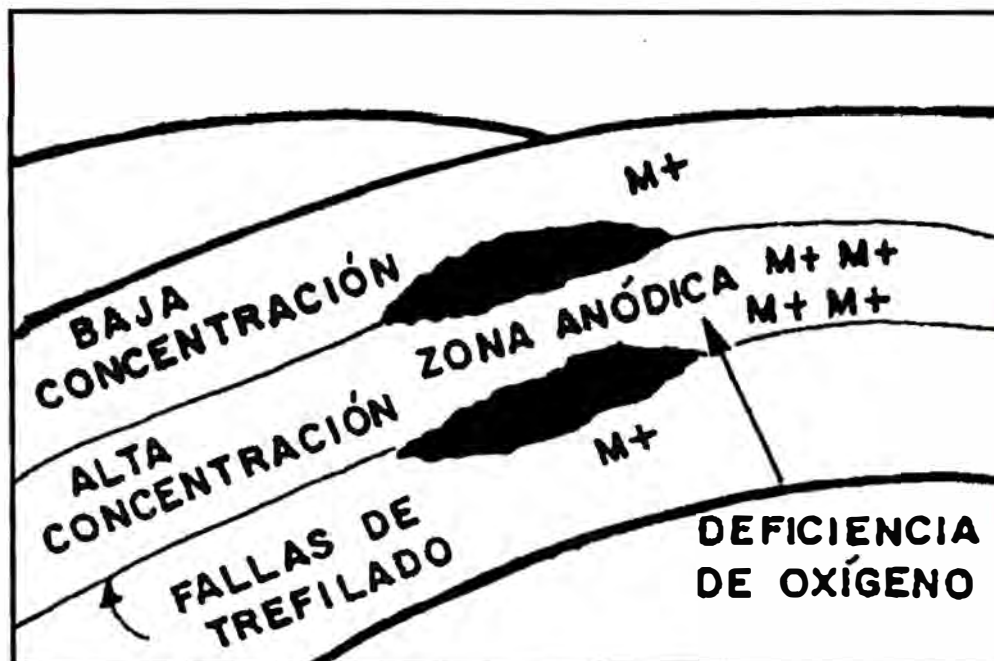


Figura 1.30 Corrosión por celdas de concentración

e) Corrosión intergranular

El tratamiento térmico puede afectar la velocidad de corrosión, porque altera la microestructura del metal; en una sola fase, la velocidad de corrosión de la aleación de aluminio para conductores eléctricos es baja, pero aumenta considerablemente con la precipitación de la segunda fase; de ese modo, la máxima velocidad de corrosión será alcanzada después de haber logrado la máxima dureza.

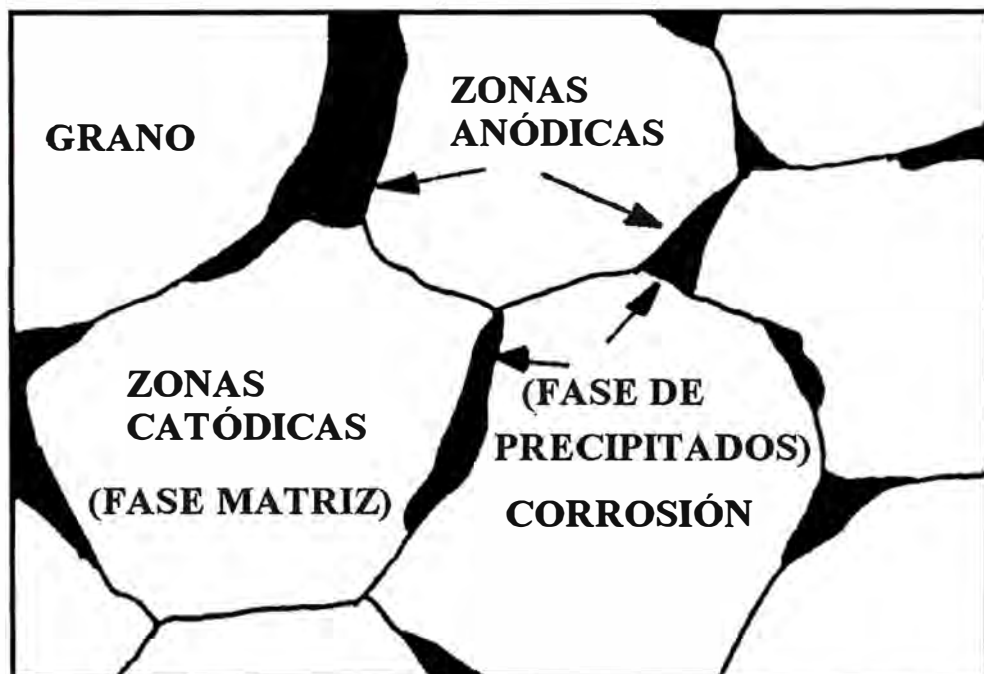


Figura 1.31 Corrosión intergranular

La corrosión intergranular se debe principalmente a un tratamiento no exitoso de endurecimiento por envejecimiento artificial, el cual deriva en sobre-envejecimiento, que se caracteriza por mostrar una estructura con precipitados intermetálicos en límite de grano, que sin embargo mantiene las características mecánicas esperadas; no obstante que el proceso de envejecimiento lento continua a la temperatura ambiente, aumentando los precipitados de límite de grano que empujan el proceso

corrosivo hacia el exterior a la vez que el endurecimiento se acrecienta dando un carácter quebradizo a las hebras.

Este tipo de corrosión es totalmente imputable al proceso de fabricación; puede darse el caso que un lote de conductores que jamás haya salido del almacén, se vea afectado al cabo de algunos años al punto de no ser económica su instalación por no asegurar ni una duración aceptable de 10 años.

f) Corrosión biológica

Es un proceso metabólico provocado por algunos tipos de algas u hongos, o por microorganismos unicelulares tipo bacterias, que ubicándose en la superficie de los conductores, descomponen activamente las materias orgánicas y minerales provenientes de la contaminación atrapada en las fallas, fisuras, ranuras e interfases de las hebras, produciendo enzimas, amoniaco y compuestos de azufre y dióxido de carbono que modifican el pH local y corroen.

CAPÍTULO II

EXÁMENES Y PRUEBAS DE LABORATORIO

2.1. Introducción

La caracterización de los conductores de aluminio requiere de una sofisticada infraestructura de laboratorio y del concurso de personal especializado en la metalurgia del aluminio. En nuestro país, pese a existir fábricas de conductores, no se desarrolla propiamente la tecnología de fabricación, tratamiento ni transformación de dicho metal, sin embargo existen algunas instituciones donde se pueden encargar exámenes metalográficos y pruebas mecánicas del conductor de aluminio. Para pruebas de mayor envergadura se tiene que recurrir a un laboratorio en el extranjero. Dentro de ese contexto, la responsabilidad de la ingeniería nacional radica en el cabal desempeño de las siguientes tareas:

- En la etapa de diseño de la infraestructura; la más adecuada especificación de conductores y accesorios.
- En la etapa de fabricación de los conductores; la más estrecha supervisión en las líneas de producción.
- En la etapa de suministro y tendido; la más próxima supervisión del manipuleo durante el tendido y las instalaciones.

- En el seguimiento del material en servicio; velando porque se cumplan periódicas campañas de muestreo y pruebas.

Es importante remarcar que por razones de necesidad técnica, economía de las inversiones y tiempo de ejecución del trabajo de seguimiento del mantenimiento, las pruebas necesarias deberán especificarse con precisión a fin de los laboratorios puedan evacuar y mostrar sus resultados fríos, los cuales serán ordenados, procesados, interpretados y sintetizados por el responsable de dicha infraestructura, de modo que esté en condiciones de optar por la aplicación de paliativos, o en los casos más desfavorables, especificar el nuevo material, programando los plazos de sustitución ordenada, con el mínimo compromiso de la discontinuidad del suministro eléctrico.

2.2. Exámenes metalográficos

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y las aleaciones. La forma mas sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características microscópicas. Este examen se denomina **macrográfico** y de ellos se extraen datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material, es decir poder determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc., comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, partes soldadas, etc.

Los exámenes macroscópicos se realizan generalmente sin preparación especial, pero a veces es necesaria una cuidadosa preparación de la superficie para poner de manifiesto las características macroscópicas. En macroscopía, se utilizan criterios

para el tipo de corte a realizar (transversal o longitudinal) para extraer la muestra dependiendo el estudio a realizar, por ejemplo:

Corte transversal: Naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones, procesos de fabricación de caños, y otros.

Corte longitudinal: Proceso de fabricación de piezas, tipo y calidad de la soldadura y otros.

El examen **micrográfico**, es una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso.

Como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas (dependiendo de los constituyentes metalográficos presentes en la estructura).

Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que no solo son útiles a los investigadores sino también a los ingenieros. El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general.

La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales. Esto se logra con la determinación del tamaño del grano el cual tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. Son como los ladrillos de un edificio. Y así como un bloque de barro secado al sol es un

adobe, y cocido al horno es un ladrillo de superior calidad, también los granos, según su tamaño y proceso de su formación, dan al metal características muy distintas.

Los granos son de forma irregular, y su tamaño, que oscila entre 0,02 y 0,2 mm., depende del proceso de fabricación del metal y de los procesos térmicos a que se haya sometido el metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano.

En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento.

La clasificación del tamaño de grano más empleada es la del A.S.T.M. Se realiza contando con un microscopio de 100 aumentos el número de granos por pulgada cuadrada de superficie de la probeta. O aún mejor, comparando las imágenes con las muestras estándar publicadas por la A.S.T.M. (American Society for Testing Materials).

La clasificación de la A.S.T.M. establece ocho tamaños de grano, cada uno de los cuales es de doble superficie que la anterior, siendo el más pequeño el tamaño 8, y el mayor, el 1. El número 1 corresponde a un grano por pulgada cuadrada; el número 2, a dos granos; el número 3, a cuatro granos, etc.

En general:

$$\text{número de granos por pulgada cuadrada} = 2^{n-1} \quad (2.1)$$

Donde “n” es el número del tamaño de grano. En la **figura 2.1** se detallan las características de esta clasificación.

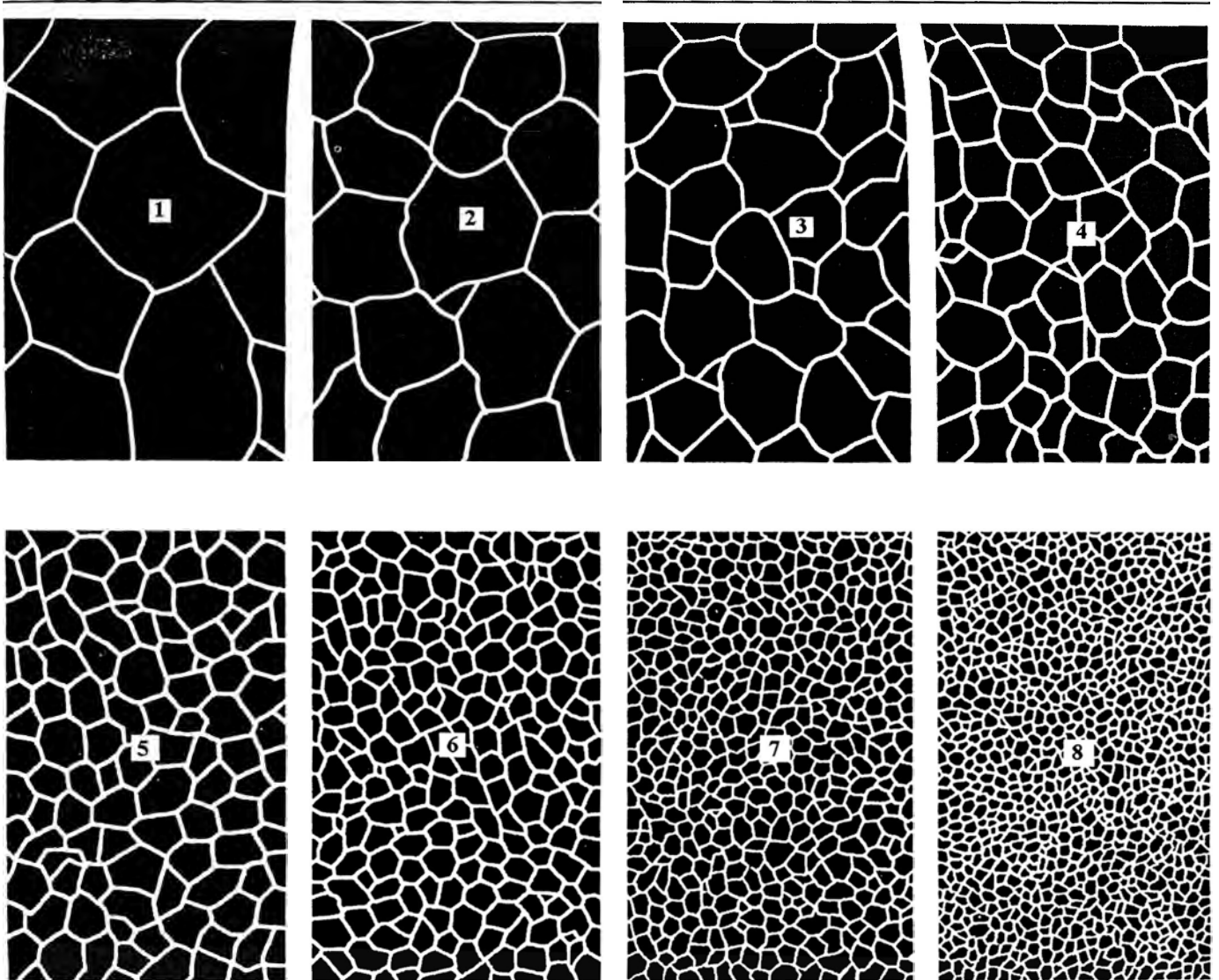


Figura 2.1 Clasificación A.S.T.M. del tamaño de grano de un metal

Cuanto mayor es el grano de que está compuesto un metal, peores son sus propiedades mecánicas. Esto es debido a que los metales de interés técnico, y tal como se utilizan en la industria, contienen siempre cierta cantidad de impurezas insolubles, formadas por óxidos, sulfuros, silicatos, etc. Estas impurezas, que son bastante frágiles se concentran formando verdaderas capas que envuelven a los granos y los separan unos de otros. Para una misma proporción de impurezas a repartir, resultan capas más delgadas cuantos más pequeños son estos.

Para un estudio de la estructura microscópica se necesita una preparación aún más cuidadosa de la superficie de una probeta, debidamente preparada para este objeto. No obstante el procedimiento de preparación de la superficie es básicamente el mismo para ambos ensayos metalográficos.

Los cuatro pasos básicos que se requieren para preparar la superficie para su observación son: Corte transversal, montaje, desbaste, pulido, ataque.

Los pasos a seguir en el procedimiento de preparación es el mismo para todos los materiales difiriendo solo las herramientas de corte y el grado de finura de los papeles de esmeril, según la dureza del material. El reactivo de ataque a utilizar depende del tipo de aleación.

a) Corte transversal

Por lo general, se deben cortar varios trozos pequeños del material a examinar. La ubicación de las muestras y la forma en que se corten afectarán los resultados y su interpretación. Dependiendo del tipo de pieza a examinar es la zona donde se efectuará la muestra. No existe una regla fija que determine el lugar a elegir. Los criterios varían. Por ejemplo: si se estudian perfiles o barras laminadas, deben extraerse probetas de sus extremos y parte media.

Si el material a examinar es blando el corte se realizará con una sierra a mano y de diente grande. Los materiales duros deben cortarse con discos abrasivos muy delgados de carbundum a altas velocidades y gran refrigeración. Los metales frágiles, pueden romperse con golpe de martillo para extraer la probeta.

b) Montaje

Si la muestra que va a examinarse es lo suficientemente grande como para que pueda sujetarse bien con la mano, no es necesario montarla. Siempre que se pueda se eligen

probetas de 20 x 20 mm y alturas de 15 mm. No obstante la mayoría de las veces la muestra es demasiado pequeña como para que pueda sostenerse de esta forma (por ejemplo un tramo de varilla, alambre, lámina), mientras se esmerila o pule. El montaje puede efectuarse de varias maneras. Con sujetadores tipo tenazas. La muestra puede también encerrarse en una resina epóxica de dos compuestos, que se solidifican después de que se mezclan y vacían; asimismo pueden usarse resinas termoplásticas transparentes. Al emplear esta técnica, la muestra se coloca en el molde con plástico en polvo, luego se aplica presión y calor, hasta que el plástico se suaviza y densifica. El enfriamiento se logra a presión, hasta que el plástico se endurece, y por último se saca del molde el objeto ya montado.

Otra forma es un montaje de molde típico donde la superficie de la muestra que va a examinarse se coloca cara abajo sobre la placa de base y el cilindro se desliza sobre la muestra y la placa. Luego se llena el cilindro con baquelita, hasta la mitad o 2/3 de su volumen. Puesto que la baquelita se compacta, pero la muestra no cambia de tamaño, es necesario llenar a mayor altura cuando la muestra es pequeña, que cuando es grande, a fin de tener un montaje con las dimensiones. Después, el embolo se inserta en el cilindro y alrededor del ensamblaje se coloca un calentador o elemento térmico. Luego, ambos se colocan entre las planchas de una prensa y se inserta un termómetro a través de un soporte, por la parte superior hasta el cilindro. La presión se efectúa mientras se continúa el calentamiento. A aproximadamente 140 °F (60°C), la baquelita en polvo se suaviza y entonces se reduce la presión. Esta debe mantenerse alrededor de 35 lb/plg² hasta que la temperatura llegue a 148 °C (300°F). En este punto, el plástico se habrá endurecido, y entonces puede eliminarse la

presión; luego puede extraerse la muestra ya montada. Cuando este lo suficientemente fría como para poder manejarse, se puede iniciar el esmerilado.

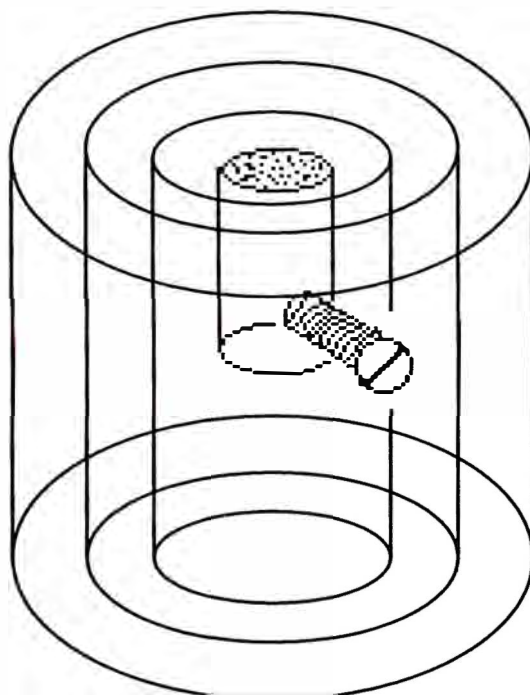


Figura 2.2 Montaje con sujetadores tipo tenaza

c) Desbaste y pulido

Desbaste grueso: Este se logra mejor en un esmeril húmedo de banco o en una acabadora de superficies de bandas húmedas, usando bandas de granos **120, 140, 160**. El objetivo del esmerilado es obtener una superficie plana, libre de toda huella de marcas de herramientas, y en la que todas las marcas del esmerilado sigan la misma dirección. Se puede esmerilar en seco a condición de no producir cambios estructurales por el calentamiento de la muestra. También se deben evitar presiones excesivas que calienten o distorsionen la superficie a observar. Luego, la muestra se lava y se seca antes de pasar a la próxima etapa de esmerilado.

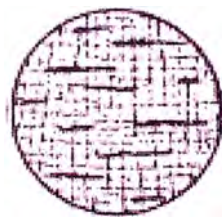
Desbaste fino: Este proceso se efectúa utilizando granos cada vez mas finos de lija metalográfica para esmerilar. Se utilizan papeles de grano **320 en adelante**. La lija se sostiene sobre una superficie plana y dura, que puede ser acero o vidrio, y la muestra se pasa sobre el papel de lija SIN seguir un movimiento rotatorio. Cuando se termina de esmerilar con un papel de lija, las marcas deben estar todas en la misma dirección, como se indica en la **figura 2.2**. Antes de proseguir con la siguiente lija mas fina, deben lavarse la muestra como las manos del operario.

Ahora la muestra debe desplazarse en forma tal que las rayas hechas por las distintas lijas formen ángulos rectos con las del inmediatamente anterior. Así, puede verse con claridad si se han eliminado las rayas más gruesas que se hicieron en la operación anterior. Ver **figura 2.3**

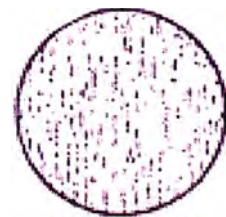
El desbaste se da por terminado cuando se obtiene una cara perfectamente plana, con rayas muy finas en toda la superficie, producidas en un solo sentido, por el papel de esmeril de mayor finura. Cuando mas blando es el material, mayor es la finura del grano del papel de esmeril utilizado en último término.



a) Esmerilado
con lija N°1
(240)



b) Esmerilado
con lija N°1-0
(320)



c) Esmerilado
con lija N°1-0
terminado

Figura 2.3 Desbaste

Pulido: Se procede a hacer el pulido solo después de lavar con sumo cuidado tanto las manos como la muestra, a fin de evitar cualquier contaminación de la rueda de pulido. Este procedimiento se basa en el uso de una rueda cubierta con una tela, cargada con una suspensión de alúmina. Al principio, la muestra se sostiene en una posición sobre la rueda, sin hacerla girar, hasta que se hayan eliminado la mayoría de las rayas anteriores. Luego puede hacerse girar con lentitud en sentido contrario al de rotación de la rueda, hasta que solo puedan verse las marcas de alúmina. La rotación de la muestra reduce a un mínimo el peligro de formación de ranuras.

La muestra se hace girar con lentitud en sentido contrario al de giro de la rueda tendiendo a obtener una superficie especular. Si los pasos descritos se realizan debidamente, este pulido no debe requerir más de dos minutos. Los resultados del pulido pueden mejorarse si esta última etapa de pulido se realiza sobre la rueda girando a baja velocidad.

El electropulido es adecuado para el acabado de gran número de muestras idénticas, puesto que requieren ajustes y control cuidadoso. Por otro lado alguno de los mejores electrolitos constituye un peligro de explosión.

d) Ataque

Este permite poner en evidencia la estructura del metal o aleación. Existen diversos métodos de ataque pero el más utilizado es el ataque químico. El ataque químico puede hacerse sumergiendo la muestra con cara pulida hacia arriba en un reactivo adecuado, o pasar sobre la cara pulida un algodón embebido en dicho reactivo. Luego se lava la probeta con agua, se enjuaga con alcohol o éter y se seca en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá mas oscuro al

microscopio, y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

Por otro lado, en los metales con un solo constituyente metalográfico, los límites de grano están sujetos a ataques selectivos, puesto que representan zonas de imperfección cristalina e impurezas que aceleran el ataque local. Además los granos con orientaciones distintas son atacados con diferente intensidad, dado que esta diferencia en la orientación provoca velocidades de ataque diferentes. Observar **figura 2.4**. (Se observa como varía el aspecto superficial de cada uno de los granos.)

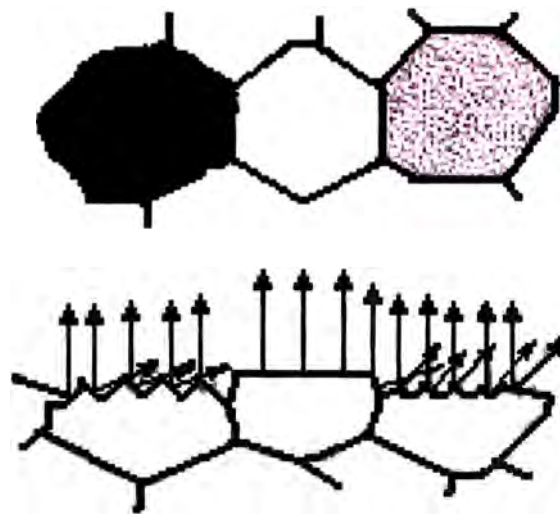


Figura 2.4 Ataque químico

Se debe evitar el sobreataque, dado que la superficie se puede manchar y tapar la estructura o producirse manchas de corrosión.

Un reactivo común utilizado para atacar hierros y aceros al carbono en general es el nital, que consiste en 5% de ácido nítrico concentrado en alcohol etílico (en 100cm³ de alcohol etílico 95% agregar 5 cm³ de NO₃H concentrado). Para el aluminio y sus

aleaciones se usa el ácido hidrofúrico con una concentración de 5 ml por 95 ml de

Otro método de ataque muy utilizado en aleaciones no ferrosas y que actualmente se está introduciendo en el campo de las ferrosas es el **ataque electrolítico**. Se hace generalmente a continuación del pulido electrolítico pero con un voltaje mucho menor. La diferencia con el pulido es que en el pulido la disolución anódica es indiferenciada y ahora es selectiva. Para tener una idea de las magnitudes de tensión y densidades de corriente manejadas:

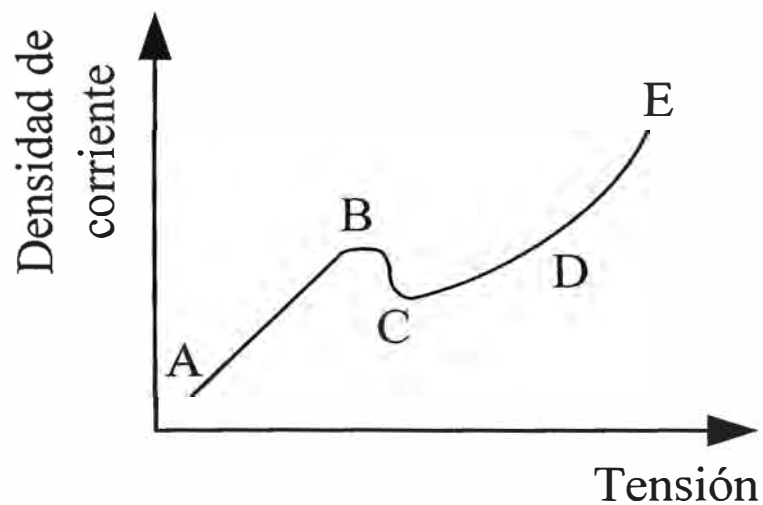


Figura 2.5 Ataque electrolítico, AB: zona de ataque, CD: zona de pulido satisfactorio, DE: zona de desprendimiento de gases y ataque irregular

Examen microscópico:

La muestra se coloca en la placa de un microscopio metalúrgico, de modo que la superficie sea perpendicular al ojo óptico. Puede observarse con ampliaciones

diferentes, y elegir la adecuada. Si se examina con un aumento de 500x deben aparecer claramente los constituyentes de la muestra. Puede quizás tomarse una imagen de la microestructura.



Figura 2.6 Microscopio metalúrgico

2.3. Pruebas mecánicas

Estas pruebas tienen la finalidad de verificar los parámetros del conductor, preconizados por el fabricante; en general son las pruebas que en forma inicial permiten evidenciar anomalías. Entre las más importantes se tienen: Pruebas de esfuerzo de tracción, pruebas de dureza y pruebas de torsión.

2.3.1. Pruebas de esfuerzo de tracción

El ensayo de tracción en ingeniería es ampliamente utilizado, pues suministra información sobre la resistencia de los materiales utilizados en el diseño y también para verificación de especificaciones de aceptación.

Estos ensayos son simulativos pues tratan de reproducir las condiciones reales de trabajo.

La curva de esfuerzo deformación nominal se obtiene a partir de las medidas de carga y alargamiento. El valor del esfuerzo que soporta el material se define como:

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (2.2)$$

(Donde P es la fuerza aplicada y A_0 es el ancho de la probeta)

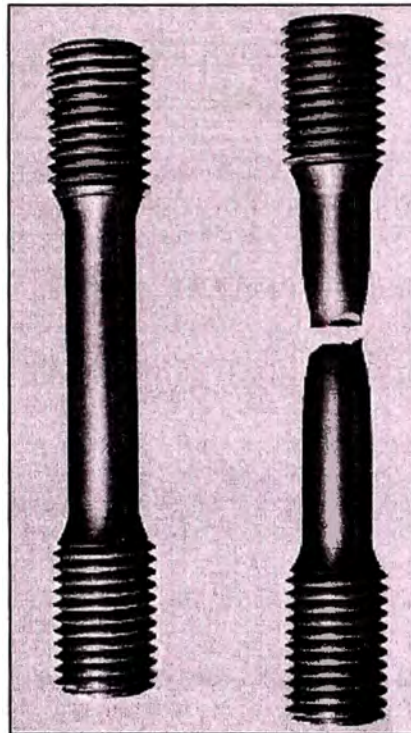


Figura 2.7 Probetas de ensayo para la prueba de tracción

El alargamiento es la variación de la longitud $D_L = L_F - L_0$ y la deformación nominal se define como $E = D_L / L_0$ entonces:

$$E = L_F - L_0 / L_0 \quad (2.3)$$

Todos los materiales metálicos tienen una combinación de comportamiento elástico y plástico en mayor o menor proporción.

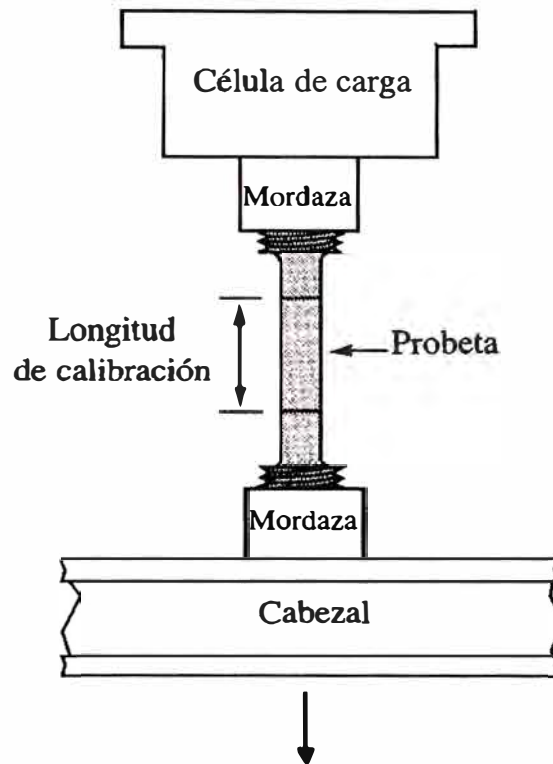


Figura 2.8 Ensayo de tracción

Elasticidad: es la propiedad de un material en virtud de la cual las deformaciones causadas por la aplicación de una fuerza desaparecen cuando cesa la acción de la fuerza.

"Un cuerpo completamente elástico se concibe como uno de los que recobra completamente su forma y dimensiones originales al retirarse la carga". ej: caso de un resorte o hule al cual le aplicamos una fuerza.

Plasticidad: es aquella propiedad que permite al material soportar una deformación permanente sin fracturarse.

Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de aplicación de la fuerza. En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargará en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular. Aunque el

esfuerzo y la deformación ocurren simultáneamente en el ensayo, los dos conceptos son completamente distintos.

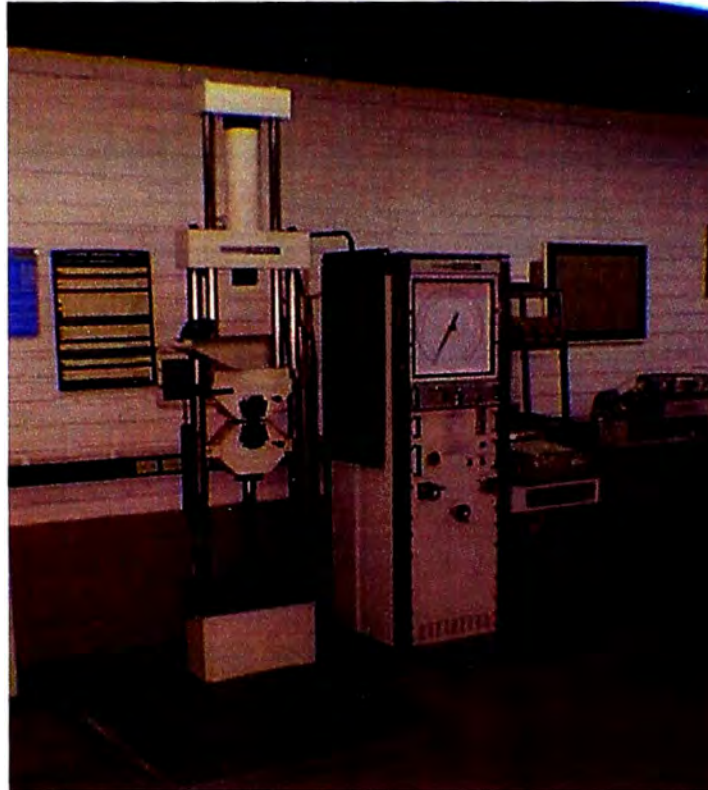


Figura 2.9 Máquina universal para la prueba de tracción

Si a todos los valores de la carga aplicados progresivamente los dividimos por el área inicial de la probeta A_0 , obtenemos los diferentes valores del esfuerzo convencional o nominal aplicados y si a todos los valores de D_L observados y medidos los dividimos por la longitud inicial de prueba L_0 , obtenemos los diferentes valores de deformación convencional nominal del ensayo. Estos valores se pueden representar en un sistema de ejes ortogonales obteniendo el diagrama S vs E.

El valor del esfuerzo (F / A_0) esta dado en newton/m², lb/pulg², (psi) o en kgf/mm² y la deformación que es adimensional puede estar dada en %, pulg/pulg, cm/cm o mm/mm.

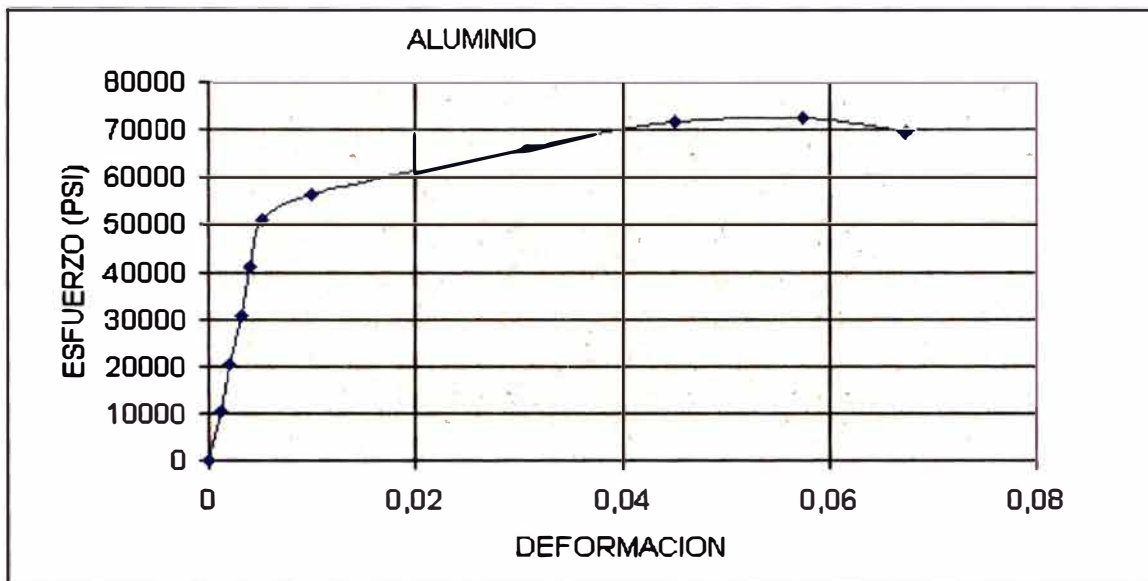


Figura 2.10 Diagrama esfuerzo - deformación

La primera región que encontramos (elástica) en la mayoría de materiales metálicos y algunos cerámicos presenta una variación o dependencia lineal que nos indica que dentro de un rango de valores existe una proporcionalidad directa entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida dada por la pendiente de la curva en esta zona (línea recta) según la ley de Hooke o $S = kE$, k : constante de hooke.

El valor del módulo es una medida de la rigidez del material, entre mayor pendiente tenga la curva mas rígido será el material. Para el caso del acero E vale 20×10^{10} new/m² o 30×10^6 psi. Otros valores característicos del ensayo en esta región elástica, son el límite proporcional y el límite elástico. El valor del límite proporcional es el valor del mayor esfuerzo, para el cual existe proporcionalidad directa entre el esfuerzo y la deformación.

El valor del límite elástico es el mayor valor del esfuerzo hasta el cual el material mantiene un comportamiento elástico.

En la segunda región de la curva (plástica) aparecen los siguientes valores característicos: **esfuerzo de fluencia o cedencia**, el **esfuerzo máximo último** o resistencia a la tracción y el **esfuerzo de fractura o rotura**.

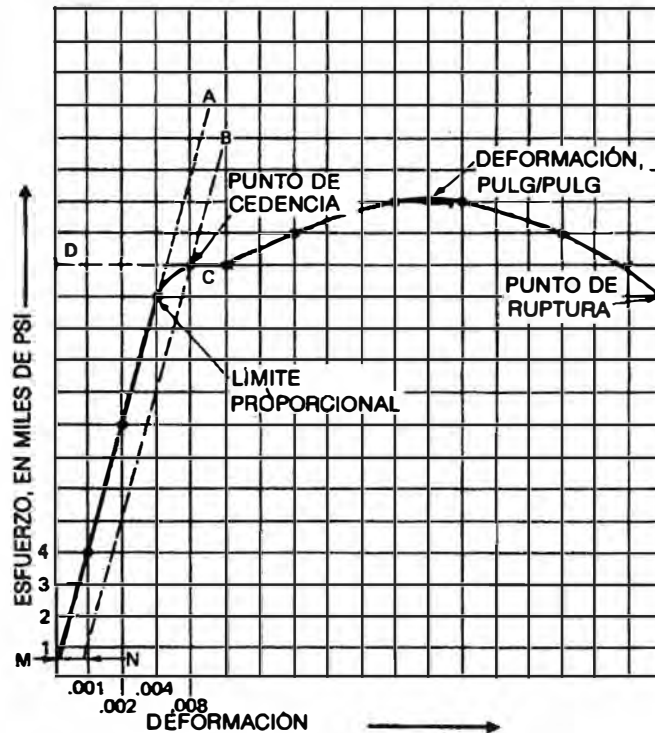


Figura 2.11 Curva típica de deformaciones de un metal

Se denomina **esfuerzo de fluencia** al menor valor del esfuerzo para el cual se produce una deformación permanente o deformación plástica. Se llama fluencia convencional al valor del esfuerzo para una deformación permanente del 0,2%. El valor del **esfuerzo máximo** o último (resistencia a la tracción) es el mayor valor del esfuerzo en una curva S vs E convencional o al valor del esfuerzo para el punto de máxima carga en el ensayo; este valor de esfuerzo, junto con el de fluencia o límite elástico, se encuentran tabulados para la mayoría de los materiales.

El **esfuerzo de fractura** es el valor al cual se reproduce la fractura de la probeta, y cuyo valor no tiene gran importancia, pues una vez se supere el máximo valor, la probeta fallará, irremediablemente, a menores valores de esfuerzo.

$$S_U = S_{MÁX} = (P_{MÁX} / A_0) \quad (2.4)$$

$$S_0 = (P_E / A_0) \quad (2.5)$$

Los valores de resistencia a la tracción y límite elástico son parámetros de resistencia mecánica.

La pendiente de la zona inicial (lineal) de la curva S vs E es el módulo de elasticidad o módulo de Young. A mayor módulo, es menor la deformación elástica resultante de la aplicación de un esfuerzo dado. Este valor está determinado por las fuerzas de enlace entre los átomos, siendo por ello una propiedad mecánica casi que inmodificable. Puede ser ligeramente afectada por los elementos de aleación, tratamientos térmicos y por el trabajo en frío (conformación en frío). El incremento en la temperatura de trabajo puede disminuir éste valor.

Tabla 2.1 Valores típicos de módulo de elasticidad

Módulo de elasticidad(psi×10⁻⁶)					
Material	Temp. ambiente	400 °F	800 °F	1 000 °F	1 200 °F
Aceros al carbono	30,0	27,0	22,5	19,5	18,0
Aceros inoxidable	28,0	25,5	23,0	22,5	21,0
Aleaciones de titanio	16,5	14,0	10,7	10,1	
Aleaciones de aluminio	10,5	9,5	7,8		

2.3.2. Pruebas de dureza

La dureza es el resultado de una combinación de diversas propiedades de un material y no se puede considerar propiedad básica. Por tanto los números de dureza obtenidos con las pruebas, dependen de muchas de las propiedades del material y de las condiciones en que se efectúa la prueba. Ninguna de las pruebas de dureza conocidas en la actualidad, puede separar la dureza de un material de otras propiedades tales como la elasticidad, ductilidad, fragilidad o tenacidad.

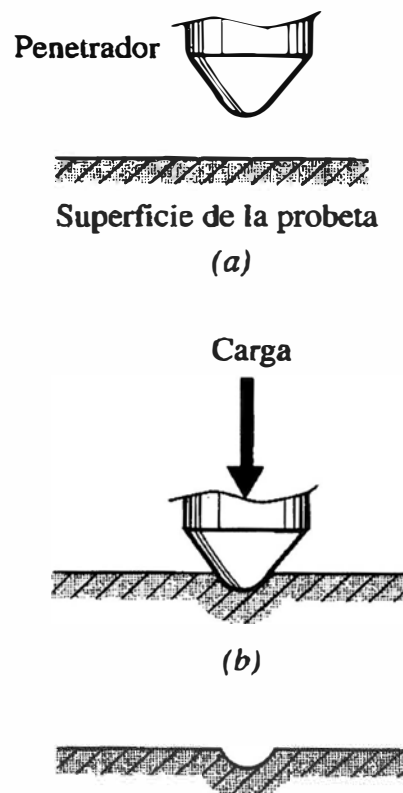


Figura 2.12 Ensayo de dureza

Debido a la incapacidad para separar la dureza de un material de sus otras propiedades físicas y a la necesidad de establecer algún medio para medir la resistencia del material en ciertas condiciones, se han creado varias pruebas de dureza. Algunas de las pruebas de dureza (como Brinell y Rockwell) miden la resistencia de los materiales a la penetración y otras (la prueba del escleroscopio) miden la energía de rebote o elasticidad.

Para medir la resistencia de los materiales a la penetración (deformación permanente) las pruebas Brinell, Rockwell, Vickers y de microdureza son las de uso más común. El principio básico de estas pruebas, es que se hace entrar a presión un penetrador de tamaño conocido en la superficie de la muestra, con una carga predeterminada. El tamaño de la penetración se determina al medir el diámetro o la profundidad; para obtener el número de dureza se divide la carga entre el área de penetración.

Las pruebas de dureza por rebote, como las de del escleroscopio se basan en la cantidad de energía absorbida por el material a prueba cuando se deja caer un martillo de peso conocido contra la superficie, desde una altura predeterminada. Los número de dureza en esta prueba se basan en la altura de de rebote del martillo.

a) Prueba de dureza Brinell

En esta prueba, una bola de acero endurecido de unos 10 mm de diámetro se hace penetrar con un mecanismo hidráulico y una carga de 3 000 kg sobre la superficie de la muestra. Hay otras dos cargas estándar: 1 500 kg y 500 kg para materiales más blandos; a veces se utiliza una bola de 5 mm para materiales delgados.

Los números de dureza Brinell dependen de la carga aplicada, el tiempo de aplicación de la carga y el tamaño del penetrador. Los números de dureza van del 16

al 600 para la bola o balín de 10 mm y las cargas estándar de 3 000, 1 500 y 500 kg; cuanto menor sea el número, más blando es el material.

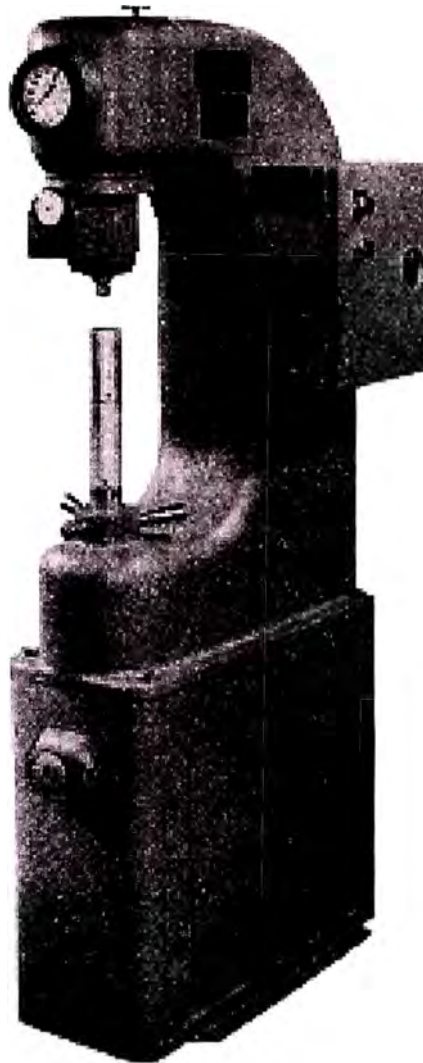


Figura 2.13 Probador de dureza Brinell

b) Prueba de dureza Rockwell

Es quizá la de uso más extenso en casi todo el mundo. Estas pruebas se efectúan con máquinas de accionamiento manual o automático.

Las máquinas Rockwell para dureza tienen 15 escalas diferentes. Se utilizan dos tipos de penetradores: el penetrador esferocónico de diamante (Brale) con un ángulo

de 120° y cuatro penetradores con balines de acero de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulgada de diámetro; la bola de 1/16 pulgada de diámetro es de uso más común.

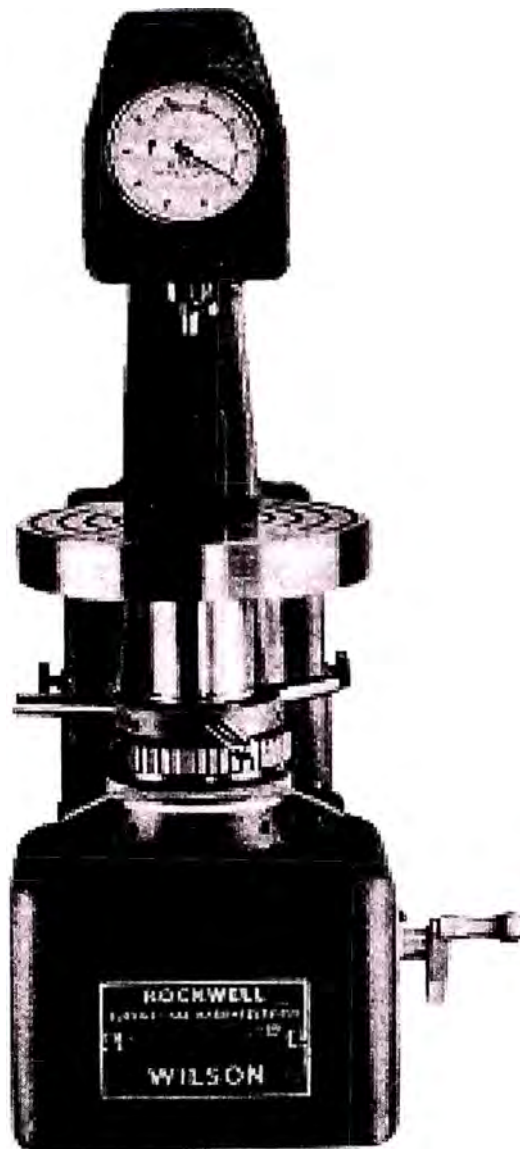


Figura 2.11 Probador de dureza Rockwell

Una de las ventajas de las pruebas Rockwell es que se puede medir una amplia gama de durezas con el uso de diferentes cargas, escalas y penetradores. Además, se tiene lectura directa de la dureza en el cuadrante, lo cual elimina los posibles errores en la

medición, pero requiere procedimientos correctos para la prueba y calibración constante. El empleo de la carga menor permite buen contacto del penetrador con la muestra, lo cual elimina errores en la lectura ocasionados por imperfecciones de la superficie.

Tabla 2.2 Escalas de dureza Rockwell

Escala	Carga mayor	Penetradores empleados	Materiales típicos probados
A	80	Diamante - Brale	Materiales muy duros, como acero delgado, cementado, etc.
B	100	Bola de 1/16"	Cobre, aluminio y aleaciones, aceros suaves, hierro maleable.
C	150	Diamante - Brale	Aceros de mediana dureza, hierro fundido, acero cementado profundo.
D	100	Diamante - Brale	Acero delgado, acero con cementado mediano y hierro maleable
E	100	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aluminio, aleaciones de magnesio.
F	60	Bola de 1/6"	Aleaciones de cobre y bronce recocido
G	150	Bola de 1/16"	Hierros maleables, aleaciones de cobre-níquel-zinc y cuproníquel.
H	60	Bola de 1/8"	Aluminio, zinc, plomo.
K	150	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio
L	60	Bola de 1/4"	Plásticos, metales suaves como plomo.
M	100	Bola de 1/4"	Plásticos, metales suaves como plomo.
P	150	Bola de 1/4"	Plásticos, metales suaves como plomo.
R	60	Bola de 1/2"	Plásticos, metales suaves como plomo.
S	100	Bola de 1/2"	Plásticos, metales suaves como plomo.
V	150	Bola de 1/2"	Plásticos, metales suaves como plomo.

Al hacer una prueba de dureza, se recomienda tomar y promediar por lo menos tres lecturas, para mayor exactitud en los resultados. Antes de hacer la prueba, se verifica la máquina probadora con los bloques testigos que se surten con la máquina o con materiales de dureza conocida.

c) Prueba de dureza Vickers

Esta prueba es de penetración. Se hace entrar un penetrador piramidal cuadrado, con una carga predeterminada en la superficie de la muestra. Se hace la medición óptica de la impresión con un microscopio; los números de dureza se obtienen al dividir la carga entre el área de la penetración.

Al contrario de otras pruebas de penetración, la prueba Vickers permite mediciones exactas de la dureza para piezas pequeñas y grandes. La carga se puede variar desde 1 gramo hasta 120 kg. La carga se aplica durante 15 segundos y se libera en forma automática. Debido al tamaño pequeño de las impresiones, al uso de penetradores de diamante y de cargas variables, la prueba Vickers se puede utilizar para materiales duros y blandos. Es sensible y se considera como prueba de superficies.

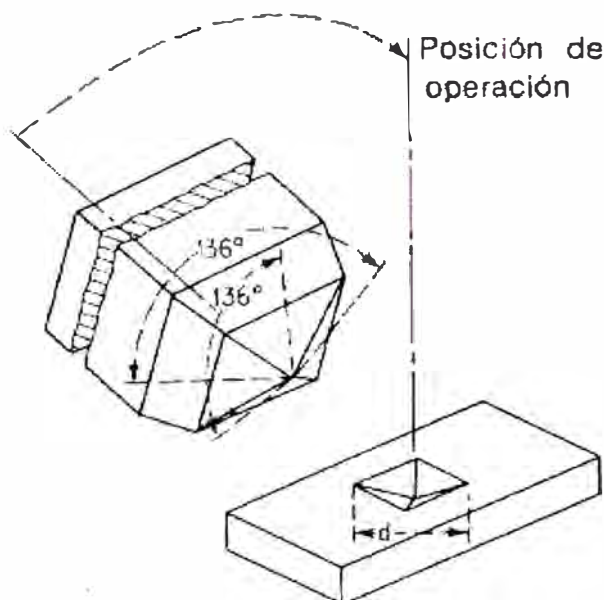


Figura 2.14 Marcador piramidal de diamante Vickers

d) Pruebas de microdureza

Las pruebas de microdureza básicas son de penetración y los números de dureza se determinan por medio de la división de la carga aplicada entre el área de impresión. Se utiliza un penetrador piramidal de diamante (Knoop) con un ángulo incluso de 136° . Se hace la medición óptica de la diagonal larga de la impresión con un microscopio.

Puede utilizarse para probar materiales muy delgados, como revestimientos, películas y hojas metálicas y para probar los granos o constituyentes individuales en los materiales metálicos.

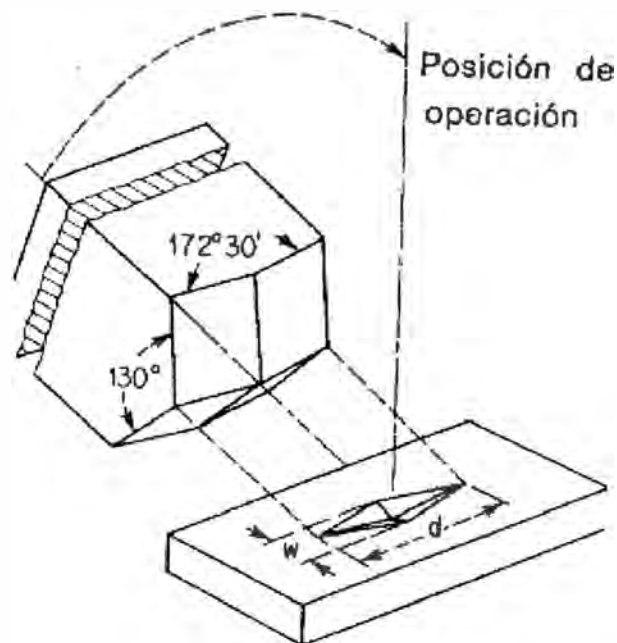


Figura 2.15 Marcador piramidal Knoop de diamante indentado

e) Prueba de dureza por rebote

En la prueba de dureza por rebote (Shore) se deja caer una carga (martillo) desde una altura predeterminada contra la superficie de la muestra, para formar una impresión pequeña. Cuando el martillo choca en la superficie muestra, rebota solo una parte de su altura original, porque la muestra ha absorbido cierta cantidad de energía para formar la impresión pequeña. La propiedad medida es la resistencia elástica a la penetración. Por tanto, la dureza del material probado es proporcional a la distancia que rebota el martillo; cuanto más alto sea el rebote de éste, tanto mayor será la dureza del material.

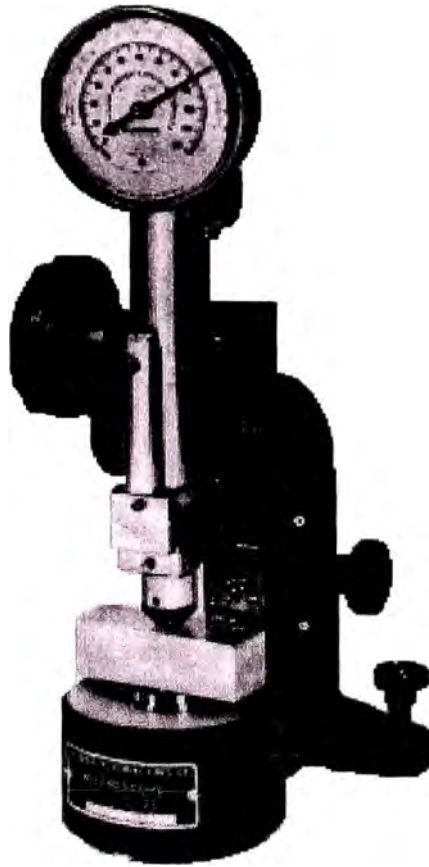




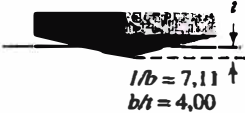
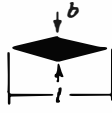






Figura 2.16 Escleroscopio para mediciones de dureza

Tabla 2.3 Resumen de pruebas de dureza

Ensayo	Penetrador	Forma de la indentación		Carga	Expresión para el índice de dureza	
		Vista lateral	Vista superior			
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o de carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$	
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = 1,72P/d_1^2$	
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$KHN = 14,2P/l^2$	
Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> A } Cono de diamante C } D } B } Esfera de acero de 1/6 de pulgada de diámetro F } G } E } Esfera de acero de 1/8 de pulgada de diámetro H } 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 150 kg 100 kg 100 kg 60 kg 150 kg 100 kg 60 kg 	<ul style="list-style-type: none"> $R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ $R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ $R_E =$ $R_H =$ 	<ul style="list-style-type: none"> 100 - 500r 130 - 500r

2.4. Pruebas eléctricas

La finalidad de estas pruebas es medir la resistencia eléctrica del conductor. El método más sencillo y rápido consiste en la utilización de un **óhmetro** analógico o digital, pero cuando se trata de resistencias pequeñas hay otros procedimientos que nos pueden brindar resultados más exactos.

Los puentes de medida de resistencias, también llamados métodos de cero, se utilizan fundamentalmente en la realización de medidas de precisión en laboratorios.

Se basan en la comparación de la resistencia a medir con otras resistencias patrones regulables, siendo esta comparación válida cuando el puente de medida se encuentra

en una situación determinada, denominada de **equilibrio**, y que se detecta con la ayuda de un indicador de corriente nula en un lugar determinado del puente. Por este motivo, la exactitud de la medida no depende de la clase del aparato de medida, sino que depende de su **sensibilidad**. Otra característica importante de los puentes de medida es que los resultados no dependen del valor de la tensión de alimentación.

Los puentes más utilizados son: el puente de Wheatstone, el puente de hilo y el puente de Thomson. De los tres indicados, nos ocuparemos del puente Thomson, dado que se utiliza en la medición de resistencias pequeñas.

2.4.1 Puente de Thomson

Cuando se miden resistencias de **pequeño valor** (inferiores a 1Ω), la resistencia de los conductores y de las conexiones de estos a los aparatos, puede introducir grandes errores en los resultados.

El puente de **Thomson**, también denominado puente **doble de Kelvin**, evita esos errores, siempre que la resistencia a medir disponga de cuatro bornes, dos de intensidad y dos de tensión de forma similar a los shunts que se utilizan en medida de intensidades.

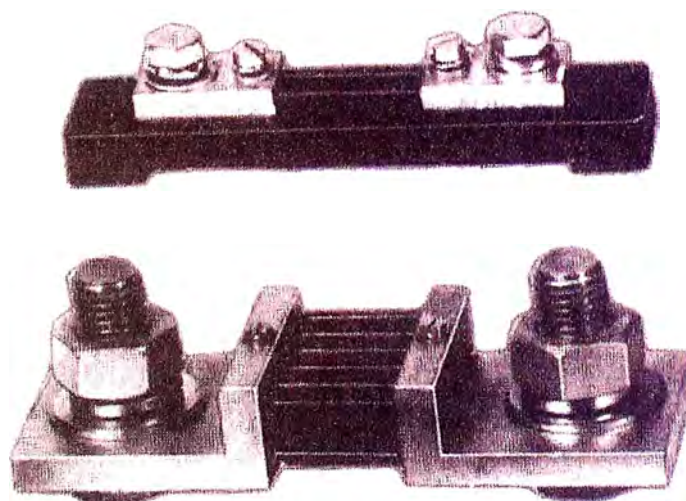


Figura 2.17 Resistencias de cuatro terminales

Para medir una resistencia de este tipo, se hace circular una intensidad relativamente grande, utilizando los bornes de intensidad de la misma, y al mismo tiempo se mide la caída de tensión que se produce entre los bornes de tensión.

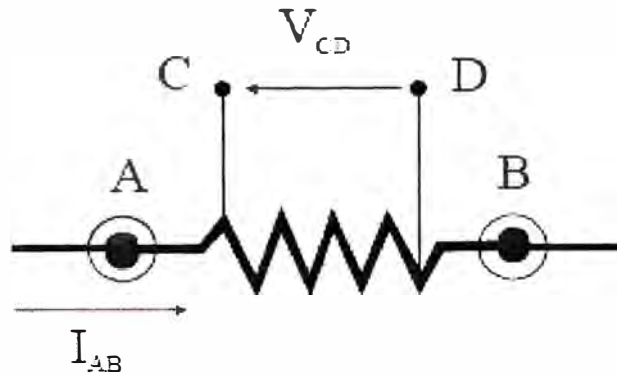


Figura 2.18 Resistencia de cuatro terminales

En el puente de Thomson la fuente de tensión U , suministra una intensidad de alto valor (desde algunos amperios hasta cientos de amperios), que circula a través de la resistencia desconocida R_x y de la resistencia patrón R_p , de valor conocido y parecido al de R_x . Los demás elementos del circuito están para evaluar la caída de tensión en R_x , mediante la comparación con la caída de tensión en la resistencia R_p . La corriente de elevada intensidad suministrada por la fuente de tensión U , pasa por la resistencia R_x , por la resistencia de la barra de cortocircuito R_b , por la resistencia R_p y entra a la fuente de tensión de nuevo.

Regulando los cursores de las resistencias regulable R_1 - R_2 y R_3 - R_4 , se consigue que el galvanómetro no acuse paso de corriente. En ese instante el puente está en equilibrio y la diferencia de potencial entre los puntos A y B es cero. Entonces se cumple que:

$$\begin{aligned} U_{CA} &= U_{CD} + U_{DB} \\ U_{AE} &= U_{BF} + U_{FE} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Sustituyendo las tensiones de las dos ecuaciones anteriores por el producto resistencia por intensidad respectivo, tenemos:

$$\begin{aligned} I_3 \cdot R_1 &= I \cdot R_x + I_4 \cdot R_3 \\ I_3 \cdot R_2 &= I_4 \cdot R_4 + I \cdot R_p \end{aligned}$$

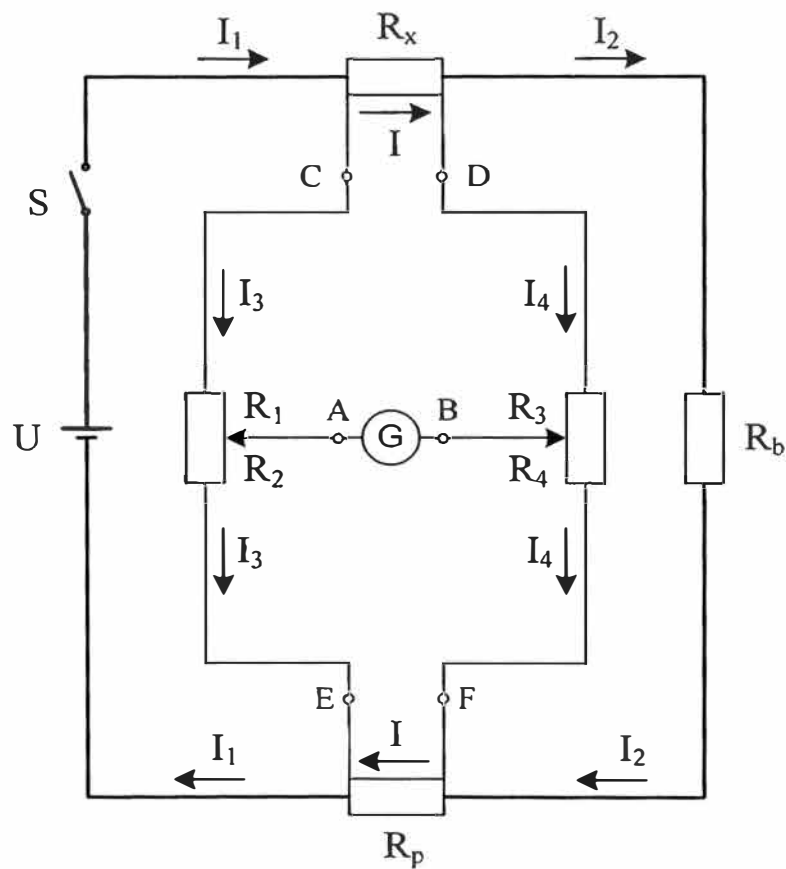


Figura 2.19 Circuito del puente de Thomson

Dividiendo entre sí las dos ecuaciones, obtenemos:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{I \cdot R_x + I_4 \cdot R_3}{I_4 \cdot R_4 + I \cdot R_p}$$

Una tercera ecuación se obtiene de la malla formada por las resistencias R_3 - R_4 y la barra de cortocircuito R_b .

$$I_4 \cdot (R_3 + R_4) = (I - I_4) \cdot R_b$$

De la que, despejando, se obtiene:

$$\frac{I}{I_4} = \frac{R_3 + R_4 + R_b}{R_b}$$

Dividiendo el numerador y el denominador, del segundo miembro de la ecuación por I_4 , y sustituyendo los cocientes I/I_4 por su valor obtenido, tenemos:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{R_3 + R_4 + R_b}{R_b} \cdot R_x + R_3}{\frac{R_3 + R_4 + R_b}{R_b} \cdot R_p + R_4}$$

Despejando R_x , tenemos:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_p + \frac{R_b \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R_b} \cdot \left[\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right] \quad (2.7)$$



Figura 2.20 Puente de Thomson

Si se consigue que R_b sea cero o que $R_1/R_2 = R_3/R_4$, el segundo término del lado derecho de la igualdad desaparecerá y nos quedará la expresión:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_p \quad (2.8)$$

que coincide con la ecuación obtenida en el puente Wheastone.

En la práctica, es muy difícil conseguir que el cociente R_1/R_2 sea igual a R_3/R_4 , por tanto, se recurre a hacer que $R_b = 0$ y para ello se utiliza una barra muy gruesa de cobre que se denomina **barra de cortocircuito**.

El alcance de un puente de Thomson suele estar entre $10^{-6}\Omega$ y 1Ω .

CAPÍTULO III

CASOS PRÁCTICOS

3.1. Introducción

Los conductores de las líneas de transmisión, a lo largo de los años de operación no solo están expuestos a las continuas variaciones de carga, sino también a los cambios climatológicos, lo que trae como consecuencia modificaciones de sus características tanto mecánicas como eléctricas. De todos los fenómenos externos, que pueden ocasionar una degradación de las características originales de un cable a lo largo de su operación, aún en condiciones nominales, la más perjudicial es la corrosión la cual degrada rápidamente sus características técnicas.

En este capítulo vamos a mostrar dos casos relacionados al estado de los conductores de aluminio en el departamento de Arequipa:

- Línea de transmisión del sistema en 33 kV, ciudad de Arequipa.
- Línea de transmisión Chilina – Yura, 33 kV.

3.2. Evaluación de conductores del sistema en 33 kV, ciudad de Arequipa

3.2.1. Generalidades

Sociedad Eléctrica del Sur Oeste, SEAL, empresa concesionaria del sistema de distribución y comercialización de energía eléctrica en la ciudad de Arequipa, cuenta con un sistema de transmisión en el nivel de 33 kV con una configuración física en anillo. Los tramos de línea que conforman dicho sistema son:

- Línea S.E. Parque industrial – S.E. Chilina.
- Línea S.E. Parque industrial – S.E. Socabaya.
- Línea S.E. Jesús – S.E. Chilina.
- Línea S.E. Jesús – S.E. Socabaya.

3.2.2. Características básicas del sistema en 33 kV

El sistema en 33 kV, tiene las siguientes características básicas:

a) Línea S.E. Parque industrial – S.E. Chilina.

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| ○ Tipo de conductor | Aleación de aluminio |
| ○ Calibre AWG | 4/0 |
| ○ Número de circuitos | 2 |
| ○ Soportes | Torres de acero |
| ○ Longitud | 8,38 km |

b) Línea S.E. Parque industrial – S.E. Socabaya.

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| ○ Tipo de conductor | Aleación de aluminio |
| ○ Calibre AWG | 250 MCM |
| ○ Número de circuitos | 2 |
| ○ Soportes | Postes tubulares |
| ○ Longitud | 8,17 km |

c) Línea S.E. Jesús – S.E. Chilina.

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| ○ Tipo de conductor | Aleación de aluminio |
| ○ Calibre AWG | 4/0 |
| ○ Número de circuitos | 2 |
| ○ Soportes | Torres de acero |
| ○ Longitud | 9,77 km |

d) Línea S.E. Jesús – S.E. Socabaya.

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| ○ Tipo de conductor | Aleación de aluminio |
| ○ Calibre AWG | 4/0 |
| ○ Número de circuitos | 2 |
| ○ Soportes | Torres de acero |
| ○ Longitud | 8,37 km |

3.2.3. Consideraciones previas

- Los conductores de las líneas son de aleación de aluminio, cableados compuesto de 19 hilos, distribuidos en tres capas concéntricas de 12, 6 y 1 hilos, exterior, intermedio y alma respectivamente. Las características mecánicas y eléctricas originales se muestran en la tabla 3.1.
- Los aspectos básicos en el dimensionamiento de una línea de transmisión son la determinación de las solicitaciones mecánicas, eléctricas y térmicas. De todas ellas la primera y más importante es la definición del nivel de seguridad mecánica, que está determinada por la agresividad de los factores meteorológicos. Esta seguridad mecánica, exige el conocimiento de las resistencias admisibles del conductor, con aplicación de diversos coeficientes de seguridad con respecto a la resistencia de rotura.

Para conocer los actuales niveles de seguridad mecánica de los conductores de la línea, es necesario determinar la actual resistencia mecánica de dichos conductores.

- Desde el punto de vista mecánico los conductores apoyados entre soportes consecutivos están sujetos a la acción de su propio peso y a las sobrecargas producidas por la acción de los factores meteorológicos (viento y otros). En esta situación el punto más desfavorable desde el punto de vista mecánico, aún para vanos nivelados, es el punto de amarre, es decir el punto donde se apoya el cable mediante la grapa y los aisladores. En este punto ocurren los mayores esfuerzos ya que además de soportar el peso natural del conductor y sobrecargas (viento y otros), debe considerarse los esfuerzos adicionales producto de las vibraciones y el “galloping”.
- Tomando como base estas consideraciones previas, solo será posible conocerla efectuando un análisis de muestras del conductor. Para ello se han extraído cuatro muestras.

3.2.4. Trabajos efectuados

a) Se han extraído cuatro tramos de conductor de aproximadamente 20 m de longitud cada uno.

b) Las muestras han sido extraídas de los siguientes lugares:

- Tramo S.E. Parque industrial – S.E. Chilina.
- Tramo S.E. Parque industrial – S.E. Socabaya.
- Tramo S.E. Jesús – S.E. Chilina.
- Tramo S.E. Jesús – S.E. Socabaya.

c) Destino de las muestras:

- Arequipa: Se entregó al laboratorio de materiales de la Universidad Nacional de San Agustín, cuatro muestras de conductor correspondientes a los tramos:
 - Tramo S.E. Parque industrial – S.E. Chilina.
 - Tramo S.E. Parque industrial – S.E. Socabaya.
 - Tramo S.E. Jesús – S.E. Chilina.
 - Tramo S.E. Jesús – S.E. Socabaya.
- Lima: Se entregó al laboratorio de procesos de manufactura, ensayos mecánicos y metrología de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, muestras de los siguientes tramos:
 - Tramo S.E. Jesús – S.E. Chilina.
 - Tramo S.E. Jesús – S.E. Socabaya.

d) Trabajos solicitados:

- Universidad Nacional de San Agustín: Se le solicitó efectuar a las cuatro muestras entregadas las siguientes pruebas:
 - Prueba de tracción – elongación.
 - Prueba metalográfica.
- Universidad Nacional de Ingeniería:
 - Prueba de tracción – elongación.
 - Prueba metalográfica.
 - Prueba de resistencia eléctrica.

3.2.5. Resultado de las pruebas

a) La Universidad Nacional de San Agustín hizo entrega de los siguientes informes:

- Informe de análisis metalográfico.
- Informe de ensayo de tracción.
- Total de ensayos efectuados: 8 pruebas.

En el **anexo A**, se adjunta el informe de análisis metalográfico.

En el **anexo A**, se adjunta el informe del ensayo de tracción – elongación.

b) La Universidad Nacional de Ingeniería hizo entrega de los siguientes informes.

- Informe de análisis metalográfico.
- Informe de ensayo de tracción.
- Informe de resistencia eléctrica continua.
- Total de ensayos efectuados: 8 pruebas.

3.2.6. Observaciones

a) Se han efectuado las pruebas de tracción – elongación, metalográficas y de resistencia eléctrica, con las cuales es posible determinar el actual estado del conductor desde el punto de vista mecánico y eléctrico.

b) Se presentan las siguientes tablas:

- **Tabla 3.1:** Se muestran las características originales de cables similares a los analizados. Esta información se ha tomado del catálogo de cables de CONAL, conocida fábrica de cables. Estos datos han servido de referencia para los resultados de las muestras.

- **Tabla 3.2:** Resultado del ensayo tracción – elongación efectuada en la U.N.S.A., donde se puede observar la carga máxima que podría soportar los conductores en la actualidad.
- **Tabla 3.3:** Resultados del ensayo de tracción – elongación efectuada en la U.N.I., donde se observa la carga máxima que pueden soportar los conductores actualmente.
- **Tabla 3.4:** Resultado del ensayo de resistencia eléctrica efectuada en los laboratorios de la U.N.I.
- **Tabla 3.5:** Análisis comparativo de los resultados de las pruebas efectuadas con los datos originales del cable.

Dimensiones físicas.

Carga de rotura.

Resistencia eléctrica.

- **Tabla 3.6a y 3.6b:** Resultados de los análisis metalográficos efectuados en las dos universidades.

Tabla 3.1 Características originales de los conductores

Ítem	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya	S.E. Jesús – S.E. Socabaya	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
1.0	Calibre AWG	4/0	250 MCM	250 MCM	250 MCM
2.0	Número de hilos	19	19	19	19
3.0	Diámetro del hilo (mm)	2,68	2,91	2,91	2,91
4.0	Diámetro del cable (mm)	13,4	14,57	14,57	14,57
5.0	Sección (mm ²)	107	127	127	127
6.0	Peso (kg/m)	296	349	349	349
7.0	Carga de rotura (kg)	3 315	3 966	3 966	3 966
8.0	Resistencia en cc, 20°C, Ω/km	0,3050	0,2644	0,2644	0,2644
9.0	Resistencia en ca, 20°C, Ω/km	0,3108	0,2696	0,2696	0,2696
10.0	Material	Aleación de aluminio	Aleación de aluminio	Aleación de aluminio	Aleación de aluminio

Tabla 3.2 Ensayo de tracción – elongación (Universidad Nacional de San Agustín)

Item	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya	S.E. Jesús – S.E. Socabaya	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
1.0	Calibre AWG	4/0	250 MCM	250 MCM	250 MCM
2.0	Número de hilos	19	19	19	19
3.0	Diámetro del hilo (mm)	2,7	2,9	2,9	2,9
4.0	Carga máxima por hilo (kg)	209	203	222	216
5.0	Esfuerzo máximo por hilo (kg/mm ²)	36,7	30,7	33,6	32,7
6.0	Carga de fluencia por hilo (kg)	153	162	168	181
7.0	Esfuerzo de fluencia por hilo (kg/mm ²)	26,7	24,6	25,5	27,4
8.0	Alargamiento por hilo (mm/20 cm)	14,5	14,8	14,9	14,6
9.0	Carga máxima total (kg)	3 971	3 857	4 218	4 104
10.0	Esfuerzo máximo total (kg/mm ²)	697,3	583,3	638,4	621,3

Tabla 3.3 Ensayo de tracción – elongación (Universidad Nacional de Ingeniería)

Item	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
1.0	Calibre AWG	4/0	250 MCM
2.0	Número de hilos	19	19
3.0	Diámetro del hilo (mm)	2,66	2,91
4.0	Fuerza máxima de rotura por hilo (kg)	210	225
5.0	Esfuerzo máximo de rotura por hilo (kg/mm ²)	36,68	33,83
6.0	Longitud inicial (mm)	100	100
7.0	Longitud final (mm)	112	113
8.0	Elongación (%)	12,0	13
9.0	Carga máxima total (kg)	3 990	4 275
10.0	Esfuerzo máximo total (kg)	696,92	642,77

Tabla 3.4 Ensayo de resistencia eléctrica continua (Universidad Nacional de Ingeniería)

Item	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
1.0	Calibre AWG	4/0	250 MCM
2.0	Número de hilos	19	19
3.0	Longitud (mm)	100	100
4.0	Diámetro del hilo (mm)	2,65	2,89
5.0	Resistencia eléctrica continua en 1 hilo ($m\Omega/m$)	7,5	5,5
6.0	Resistencia eléctrica continua en 19 hilos (Ω/km)	0,3947	0,2894

Tabla 3.5 Análisis comparativo

Item	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya	S.E. Jesús – S.E. Socabaya	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
1.0	Calibre AWG	4/0	250 MCM	250 MCM	250 MCM
2.0	Número de hilos	19	19	19	19
3.0	Diámetro del hilo de catálogo (mm)	2,68	2,91	2,91	2,91
3.1	Según U.N.S.A.	2,70	2,90	2,90	2,90
3.2	Según U.N.I.	2,66	2,91		
4.0	Carga de rotura de catálogo (kg)	3 315	3 966	3 966	3 966
4.1	Según U.N.S.A.	3 971	3 857	4 218	4 104
4.2	Según U.N.I.	3 990	4 275		
5.0	Resistencia en cc, 20°C de catálogo (Ω /km)	0,3050	0,2644	0,2644	0,2644
5.1	Según U.N.I.	0,3947	0,2894		
	Incremento porcentual de la resistencia (%)	29,41	9,46		

Tabla 3.6a Resultado de los análisis metalográficos

Item	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
1.0	Universidad Nacional de Ingeniería	<ol style="list-style-type: none">1. Las muestras corresponden a una aleación de aluminio.2. El tamaño del grano es ultrafino, es decir que el material esta en buenas condiciones.3. No se han encontrado huellas de corrosión	

Tabla 3.6b Resultado de los análisis metalográficos

Item	Característica	S.E. Jesús – S.E. Chilina	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya	S.E. Jesús – S.E. Socabaya	S.E. P. Industrial S.E. Socabaya
2.0	Universidad Nacional San Agustín	Alambre central: Picaduras del orden de los centésimos de milímetro (0,018)	Alambre central: Picaduras del orden de los centésimos de milímetro (0,001)	Alambre central: Picaduras del orden de los centésimos de milímetro (0,001) Corrosión con profundidad de 0,03 mm.	Alambre central: Picaduras ocasionales de 0,01 mm. No presenta corrosión.
		Alambre medio: Picaduras del orden de los centésimos de milímetro (0,03)	Alambre medio: Picaduras del orden de los centésimos de milímetro (0,05)	Alambre medio: Picaduras del orden de los centésimos de milímetro (0,001) Corrosión con profundidad de 0,06 mm.	Alambre medio: Picaduras por corrosión ocasionales de 0,01 mm de profundidad
		Alambre externo: Grieta del orden de las décimas de milímetro (0,1). Corrosión con profundidad del orden de los centésimos de milímetro (0,08)	Alambre externo: Picaduras frecuentes del orden de los centésimos de milímetro (0,05)	Alambre externo: Corrosión con profundidad de 0,08 mm y corrosión diseminada de 0,15 mm.	Alambre externo: Picaduras del orden de 0,07 mm de profundidad.

3.2.7. Conclusiones

a) Las pruebas de tracción – elongación, en ambos laboratorios, dan valores que están por encima de los valores de carga máxima señalados en los catálogos, para todas las muestras. Esto nos lleva a la conclusión de los conductores están en buenas condiciones mecánicas.

b) Las pruebas metalográficas, dan señales de picaduras por corrosión del orden de las centésimas de milímetro en el caso de la U.N.S.A. y en el caso de la U.N.I., nos señalan que el grano encontrado es ultrafino (grano adecuado). Por ello podemos concluir que la conformación interna del cable no ha sufrido degradación apreciable, por lo que se puede afirmar que el cable internamente está en buenas condiciones.

c) Las pruebas de resistencia eléctrica nos indican una variación porcentual diferente para cada cable:

- El cable de la línea S.E. Jesús – S.E. Chilina ha incrementado su resistencia en un 29% lo cual significa un aumento de las pérdidas de transmisión.
- El cable de S.E. Parque Industrial – S.E. Chilina ha incrementado su resistencia en un 9%.

3.3. Evaluación de conductores en la línea de transmisión Chilina – Yura S.A.

3.3.1. Antecedentes

Yura S.A., cuenta en la actualidad con una línea de transmisión en 33 kV, la cual transporta hacia las instalaciones de la fábrica de cemento energía proveniente de la Central Hidroeléctrica de Charcani I. Esta línea ha sido construida en 1965 y sus características básicas son las siguientes:

- Nivel de tensión 33 kV
- Número de circuitos 2
- Soportes Torres de acero
- Tipo de conductor ACSR (Mink)
- Calibre 73,55 mm²
- Potencia total de transmisión 8 MW
- Factor de potencia 0,8
- Longitud
 - C.T. Chilina – Charcani I 7,14 km
 - C.H. Charcani – Yura S.A. 20,92 km
- Cable de guarda
 - Material Acero
 - Calibre 35 mm²

En la revisión efectuada a la literatura técnica actual, no se ha encontrado datos técnicos del conductor con código Mink, por lo que para análisis posteriores vamos a asumir como datos similares los siguientes:

3.3.2. Situación actual

En el caso de la línea de transmisión Yura S.A. la situación actual del conductor está determinada por las siguientes consideraciones:

- a) Tiempo de operación del conductor: Se estima en aproximadamente 30 años.
- b) Régimen de carga: De acuerdo a los datos de diseño (8 MW en total) y la carga del último periodo, se concluye que la línea está trabajando fuera de su valor nominal.
- c) Régimen de carga futuro: Yura S.A. tiene previsto incrementar su carga hasta valores de 18,42 MW
- d) Mantenimientos preventivos: Yura S.A. ha efectuado labores de mantenimiento preventivo en la línea de transmisión cada dos años. En la zona cercana a la planta de cemento se ha cambiado aisladores, ferretería y conductor, esto se ha efectuado en setiembre de 1 999.

3.3.3. Consideraciones previas

- El conductor de la línea es del tipo ACSR, el cual es un cable compuesto de 6 hilos y 1 hilo de alma de acero. Este cable combina la buena conductividad y bajo peso del aluminio con la alta resistencia mecánica del acero. Por ello los análisis deben ser efectuados a los dos componentes del cable.
- Los aspectos básicos en el dimensionamiento de una línea de transmisión son la determinación de las solicitaciones mecánicas, eléctricas y térmicas. De todas ellas la primera y más importante es la definición del nivel de seguridad mecánica, que está determinada por la agresividad de los factores meteorológicos. Esta seguridad mecánica, exige el conocimiento de las

resistencias admisibles del conductor, con aplicación de diversos coeficientes de seguridad con respecto a la resistencia de rotura.

Para conocer los actuales niveles de seguridad mecánica de los componentes de la línea, es necesario conocer la resistencia mecánica real de los elementos de la línea (conductor, ferretería, soportes y aisladores).

- El conductor apoyado entre dos soportes consecutivos está sujeto a la acción de su propio peso y las sobrecargas producidas por acción de los factores meteorológicos (viento y otros). En esta situación el punto más desfavorable desde el punto de vista mecánico, aún para vanos nivelados, es el punto de amarre, es decir el punto donde se apoya el cable mediante la grapa y los aisladores. En este punto ocurren los mayores esfuerzos.
- Tomando como base estas consideraciones previas solo será posible conocerla efectuando un análisis de muestras del cable. Para ello se han extraído dos muestras.

3.3.4. Trabajos efectuados

a) Para minimizar los cortes y puntos de empalme, se definió como lugares de extracción de las muestras los vanos comprendidos entre una torre de anclaje y una de suspensión. Vano T59 – T60 y vano T79 – T80.

b) Se extrajeron dos muestras de cable de aproximadamente 20 m, cada uno de los cuales fueron convenientemente marcados; de la planta Yura S.A., se obtuvo una muestra de 2 m de conductor no usado.

c) Destino de las muestras:

- Se entregó al Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de San Agustín tres muestras, dos correspondientes al conductor usado y una tercera del cable no usado.
- Se entregó al Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú una muestra del cable usado (vano T59 – T60).
- Trabajos solicitados a la Universidad Nacional de San Agustín:
 - Prueba de tracción – elongación.
 - Prueba metalográfica.
- Trabajos solicitados a la Universidad Católica del Perú:
 - Análisis metalográfico.
 - Análisis de dureza.
 - Ensayo de tracción.
 - Verificación de dimensiones.

3.3.5. Resultado de las pruebas

a) La Universidad Nacional de San Agustín hizo entrega de los siguientes informes:

- Informe de análisis metalográfico.
- Informe de ensayo de tracción.
- Total de ensayos efectuados: 6 pruebas.

b) La Universidad Católica del Perú hizo entrega de los siguientes informes:

- Informe del ensayo de tracción.
- Informe de inspección dimensional.
- Informe de análisis metalográfico.

- Informe de Dureza.
- Total de ensayos efectuados: 2 pruebas.

Todas estas pruebas han sido efectuadas tanto al aluminio como al acero.

3.3.6. Observaciones

- a) Se presenta las tablas 3.7 y 3.8, donde se muestra los resultados de las pruebas de tracción efectuadas al conductor ACSR, tanto en su componente de aluminio como de acero.
- b) Si comparamos los valores del esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia obtenidos en las pruebas individuales del aluminio efectuadas en los laboratorios de la U.N.S.A. y Católica del Perú, con los valores promedio observamos que las desviaciones son mínimas, por lo que podemos señalar homogeneidad en los resultados de ambos laboratorios,
- c) Si observamos los valores de esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia obtenidos en las pruebas individuales del acero efectuadas en los laboratorios de la U.N.S.A. y Católica del Perú, vemos que los valores obtenidos en los laboratorios de la Católica difieren en más del 20% y 30% respectivamente con respecto a las efectuadas en la U.N.S.A. Por esta razón, para estimar el promedio no se tomaron en consideración estos valores.
- d) En la tabla 3.9 se muestra los resultados de las pruebas de metalografía efectuadas al conductor ACSR, tanto a su componente de aluminio como de acero.
- e) De acuerdo a los resultados de la tabla 3.9 podemos afirmar que los resultados dados por la U.N.S.A. son más explicativos que los de la Católica; pero de lo expuesto en ambos se observa que no se ha encontrado niveles de corrosión y daños estructurales que comprometen las propiedades mecánicas del conductor.

f) Las dimensiones básicas del conductor (diámetro, sección), tanto del aluminio como del acero, no han sufrido mayores modificaciones.

g) Uno de los parámetros más importantes del conductor es el tiro de rotura (carga máxima). Según los datos originales se tiene:

- Carga máxima 2 216 kg.

Según las pruebas de laboratorio se tiene:

- Carga máxima 2 406 kg.
- Carga de fluencia 1 818 kg.

De lo que se observa que sus propiedades se mantienen.

Tabla 3.7 Resultados de la prueba de tracción del cable de Aluminio

	Cable de Aluminio				Promedio
	U.N.S.A., Arequipa			Católica, Lima	
Característica	Conductor nuevo	Conductor T59-T60	Conductor T79-T80	Conductor T59-T60	
Espesor promedio (mm)	3,70	3,64	3,64	3,66	3,66
Sección promedio (mm ²)	10,70	10,40	10,40	10,50	10,50
Carga máxima (kg)	185,00	190,00	180,00	180,00	183,75
Carga de fluencia (kg)	150,00	140,00	160,00	170,00	155,00
Alargamiento (mm/20cm)	4,50	*	3,00	4,80	4,10
Esfuerzo máximo (kg/mm ²)	17,20	18,30	17,30	17,14	17,49
Esfuerzo de fluencia (kg/mm ²)	14,00	13,50	15,40	16,19	14,77

* Fuera de la distancia sujeta a medición

Tabla 3.8 Resultados de la prueba de tracción del cable de Acero

Característica	Cable de Acero				Promedio
	U.N.S.A., Arequipa			Católica, Lima	
	Conductor nuevo	Conductor T59-T60	Conductor T79-T80	Conductor T59-T60	
Espesor promedio (mm)	3,70	3,64	3,64	3,66	3,66
Sección promedio (mm ²)	10,75	10,40	10,40	10,50	10,51
Carga máxima (kg)	1 200,00	1 250,00	1 290,00	1 500,00	1 246,67 (*)
Carga de fluencia (kg)	1 000,00	1 000,00	950,00	1 300,00	983,33 (*)
Alargamiento (mm/20cm)	1,10	0,90	0,80	12,80	0,93 (*)
Esfuerzo máximo (kg/mm ²)	111,60	116,30	124,00	143,00	117,30 (*)
Esfuerzo de fluencia (kg/mm ²)	93,00	93,00	91,30	123,80	92,43 (*)

(*) Solo se ha tomado en consideración los valores obtenidos en la U.N.S.A.

Tabla 3.9 Resultados comparativos de las pruebas de metalografía

Conductor	U.N.S.A., Arequipa	Católica, Lima
Cable de aluminio	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta ligera corrosión superficial. • No presenta microfisuras • Pérdida de masa menor al 1%. • No se han modificado sus propiedades mecánicas. • De mantenerse las exigencias mecánicas actuales no presenta muestra de ser susceptible de fallas. 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta signos de corrosión. • Su estructura interna se encuentra deformada.
Cable de acero	<ul style="list-style-type: none"> • No se han detectado signos de deterioro en el conductor. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se han detectado signos de deterioro en el conductor.

3.3.7. Conclusiones

a) El conductor ACSR, tanto en sus componentes de aluminio como del acero, mantiene vigentes sus propiedades mecánicas y no se espera fallas de mantenerse las tensiones y esfuerzos actuales.

b) Se ha simulado el comportamiento mecánico del conductor para condiciones climáticas exigentes, obteniéndose una operación mecánica con un factor de seguridad de 2,7, lo cual es ampliamente aceptado en líneas de transmisión. El factor de seguridad obtenido es con referencia al esfuerzo de fluencia obtenido en el laboratorio.

c) Dado que el incremento de carga, trae como consecuencia un incremento de temperatura, esto implica un aumento de la longitud del conductor, lo cual aumenta la flecha. Estas nuevas condiciones geométricas, pueden comprometer las distancias de aislamiento de conductores, entre conductores y torre y entre conductores y tierra.

d) De acuerdo a la máxima demanda prevista, el comportamiento eléctrico de la línea es el siguiente:

Año	Demanda (MW)	Caída de tensión (%)	Pérdida de potencia (%)
1 999	13,55	9,40	8,50
2 000	11,44	7,94	7,20
2 001	14,78	10,26	9,40
2 002	14,78	10,26	9,40
2 003	14,78	10,26	9,40
2 004	18,42	12,99	11,84

Estos valores de caída de tensión y pérdidas de potencia superan los estándares aceptados normalmente en operación de líneas de transmisión, los cuales son:

- Caída de tensión: <5%
- Pérdida de potencia <3%

Todo esto trae como consecuencia una operación insuficiente de la línea con pérdidas del orden de los US \$ 450 000,00 anuales a partir del año 2 001.

CONCLUSIONES

1. La atmósfera de la zona industrial de Arequipa es propicia para el buen funcionamiento de los conductores de aleación de aluminio dado que la influencia de la corrosión es mínima y no afecta su periodo de vida, a pesar que la antigüedad de estos es mayor a 20 años.
2. Las pruebas metalográficas de los cables analizados, en ambos casos, nos dan señales de picaduras por corrosión mínimas. En consecuencia el cable internamente está en buenas condiciones.
3. Las pruebas de tracción – elongación, en ambos casos, nos brindan valores que están por encima de los valores de carga máxima señalados en los catálogos, para todas las muestras. Esto nos lleva a la conclusión de que el desempeño electromecánico de los conductores aéreos de las líneas de transmisión en 33 kV es excelente.

4. En caso que la carga se incremente, esto trae como consecuencia un aumento de la temperatura de operación del cable y por ende un aumento en las pérdidas y en la caída de tensión. Esto puede ser motivo de un posible cambio de conductores dadas las condiciones actuales.

5. La tecnología de previsión y lucha contra la corrosión, ha alcanzado un alto grado de desarrollo en el mundo, sin embargo, en nuestro medio hay cierta escasez de profesionales que detentan dicha especialidad, se den a conocer y la ejerzan a plenitud. Por tal motivo es muy importante darle el impulso que merece para beneficio de nuestro país.

ANEXOS

ANEXO A

**INFORMES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO DEL CONDUCTOR
DEL SISTEMA EN 33 kV, CIUDAD DE AREQUIPA**

- **UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN**
- **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN

- **ANÁLISIS METALOGRÁFICO**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE INGENIERIA METALURGICA Y MATERIALES

Laboratorio de Corrosión

INFORME DE ANÁLISIS METALOGRAFICO

SOLICITANTE: CORPORACIÓN ELECTROMECAÁNICA en Ingeniería y Construcción S.A.C.

REALIZADO POR: Ing. Héctor Vargas Cárdenas, Ms.Sc.
Responsable del Laboratorio de Corrosión y Protección.
Responsable del Laboratorio de Ensayo de Materiales

OPERADOR: Ing. Carlos Cárdenas Cárdenas
Laboratorio de Metalografía

SERVICIO SOLICITADO: Análisis Metalográfico de cuatro cables de Aluminio

FECHA: 25 de Marzo del 2003.



ANALISIS METALOGRAFICO

Numero de Muestras: 4

Tipo de muestras-: Cables de Aluminio

Codificación:

- Muestra No 1: (Cable Jesus Chilina)
- Muestra No 2: (Cable Challapampa – Pque. Industrial)
- Muestra No 3: (Cable Socabaya – Jesús)
- Muestra No 4: (Cable Pque. Industrial – Socabaya)

Solicitante.CORPORACIÓN ELECTROMECHANICA en Ingeniería y Construcción S.A.C.

COMENTARIOS INICIALES

Las Cuatro muestras corresponden a cables usados como conductores y están constituidos de alambres de aluminio.

Para realizar el análisis metalográfico se tomaron muestras de cada cable observándose el tipo de material, posibles fallas en el material, grado de corrosión e inspección por otro tipo de irregularidades. Las muestras se prepararon mediante el sistema de pulido manual, según el caso fueron atacadas con solución de HF.

INSPECCION VISUAL

Cada cable se encuentra constituido por 19 alambres, 12 de los cuales forman la cubierta externa, 6 rodean un núcleo central constituido por un alambre.

El cable 1 tiene los alambres de menor diámetro (2.7 mm en promedio), mientras que los otros tres cables tienen un diámetro promedio de 2.9 mm.

Por lo general los alambres de la cubierta externa presentan la mayor corrosión, en relación a los de las zonas media y central. Este depósito está constituido por polvo atmosférico y producto de corrosión. El alambre central muestra por su parte al Microscopio estereográfico pequeñas marcas en la forma de picaduras o grietas que probablemente fueron defectos de manufactura.

INSPECCION AL MICROSCOPIO METALOGRAFICO

El análisis metalográfico muestra en términos generales una matriz de aluminio con precipitaciones de segunda fase probablemente residuos de un recocido de solución incompleta. El análisis de defectos superficiales se realizó mediante microfotografías de aumento x800

Muestra No. 1

Alambre Central: Picadura de ancho corto x 0.018 mm de profundidad (0.7% del diámetro exterior (de) Foto 1

Alambre Medio: Picadura de ancho amplio x 0.030 mm de profundidad 1.1% de). Foto 2

Alambre Extremo:

- o Grieta (fue detectada en una de los alambres) que no es frecuente, con una longitud (corre diagonalmente) de 0.115 mm y una profundidad de 0.10 mm (3.7% de) Foto 3
- o Zonas de corrosión interna diseminadas por el interior de la superficie con una profundidad de 0.08 mm (3% de). Foto 4

Muestra No.2 :

- Alambre Central: Picaduras superficiales muy ocasionales con una profundidad de 0.01 mm (0.3% de) Foto 5
- Alambre Medio : Picaduras superficiales frecuentes con una profundidad de 0.04 mm (1.4 % de) y diseminada con profundidad de 0.05 mm (1.7% de) Foto 6
- Alambre Externo: Picaduras muy frecuentes (continuas) cuya profundidad promedio es 0.05 mm (1.7% de) y en forma diseminada se presenta con profundidades promedio de 0.10 mm (3.4%) Foto 7 y 8

Muestra No.3 :

- Alambre Central: Picaduras superficiales con profundidad de 0.01 mm (0.34% de). Corrosión diseminada por el interior con una profundidad promedio de 0.03 mm (1 % de). Foto 9
- Alambre Medio : Picaduras superficiales con profundidad de 0.01 mm (0.3% de), y corrosión diseminada por el interior con profundidad de 0.06 mm (2% de). Foto 10
- Alambre Externo: Corrosión en forma de picadura cuya profundidad es de 0.08 mm (2.7% de). Corrosión diseminada por el interior con una profundidad de 0.15 mm (5.2% de) que probablemente sea corrosión que se encuentra comunicada con el desprendimiento granular. Fotos 11, 12 y 13

Muestra No. 4 :


- Alambre Central: Casi no presenta Corrosión. Ocasionalmente se encuentran picaduras con profundidad de 0.01 mm (0.3% de) Foto 14
- Alambre Medio : Presenta ligera corrosión superficial cuya profundidad es de 0.02 mm (0.7% de) Foto 15
- Alambre Externo: Picaduras frecuentes cuya profundidad promedio es de 0.07 mm (2.4% de). Foto 16

Conclusiones

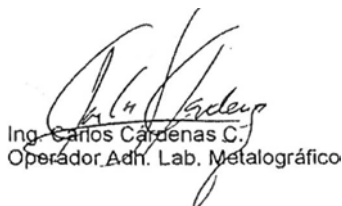
- La corrosión mas intensa se produce en los alambres externos del cable y esta va disminuyendo en dirección al alambre central.
- El cable menos corroído es el de la muestra 4, probablemente por la grasa que tiene entre los alambres.
- El cable que presenta mayor incidencia de corrosión en sus alambres es el de la muestra 3
- En el Cable de la muestra 1, alambres externos, se ha notado presencia de algunos fisuramientos
- La morfología de la corrosión es intergranular cuya incidencia sobre la superficie exterior en el alambre tiene la forma de micropicaduras, estas muy probablemente se diseminan por el interior formando cavernas. Para confirmar esto último, sería recomendable efectuar una inspección con ayuda del Microscopio Electrónico de la UNSA, en la que se podría confirmar esta modalidad de corrosión por el relieve de la textura de la probeta y por el análisis que podría realizarse sobre esta zona con ayuda del analizador incorporado en este equipo

Recomendaciones

- Si el cable No. 1 se encuentra en actual servicio, debería de investigarse la historia de su uso, pues por las características de la microfisura podría pensarse que se trata de una Corrosión del tipo por Tensión (Ocasionada por esfuerzos de operación altos y medios ambientes hostiles) , que se caracteriza por el crecimiento de la fisura hasta el colapso del alambre; sin embargo, el ensayo de Tensión revela que el alambre externo de este cable, tiene una buena ductilidad



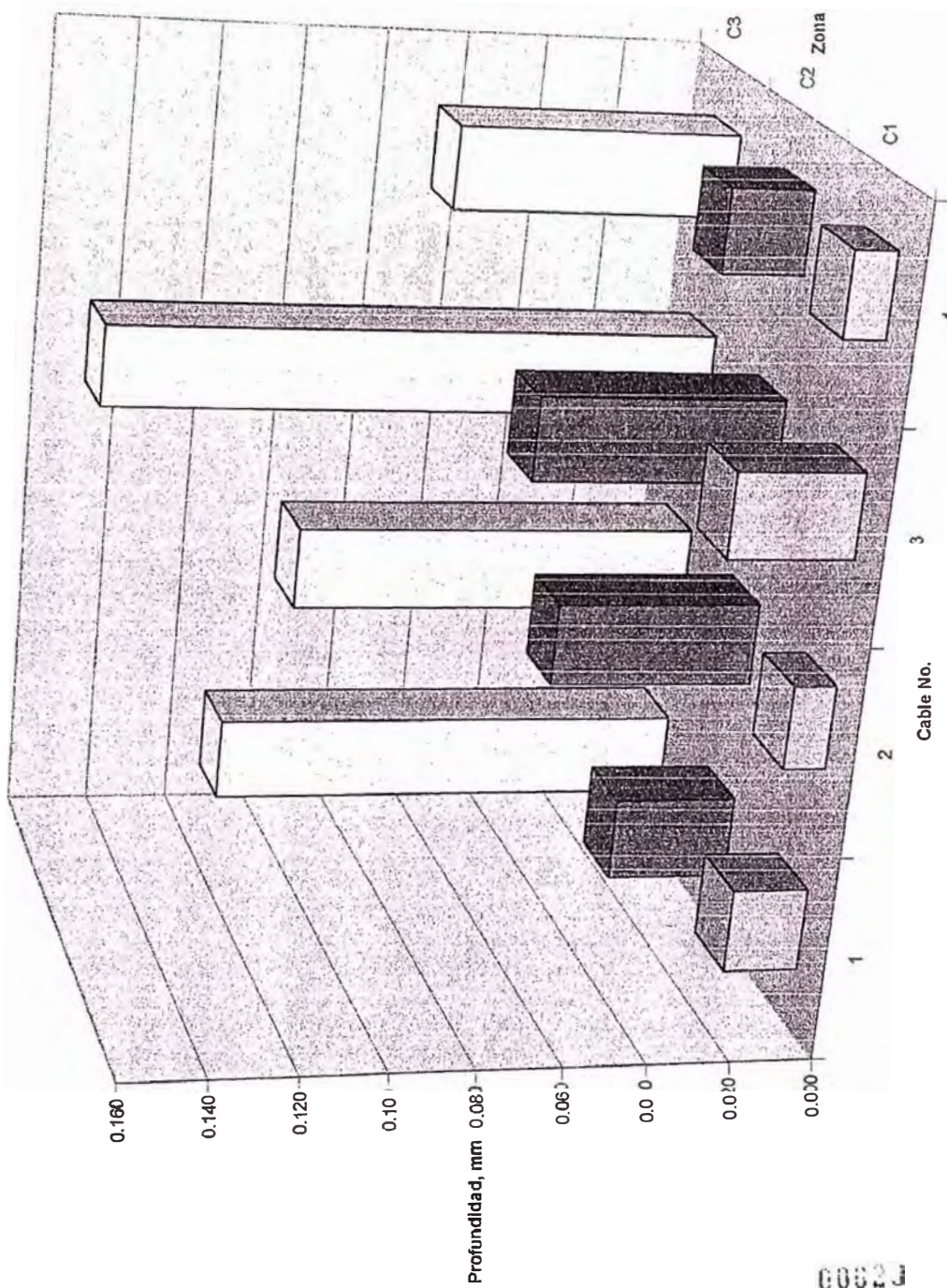
Ing. MsSc Héctor Vargas C
Jefe. Lab. Corrosión



Ing. Carlos Cárdenas C.
Operador Adm. Lab. Metalográfico

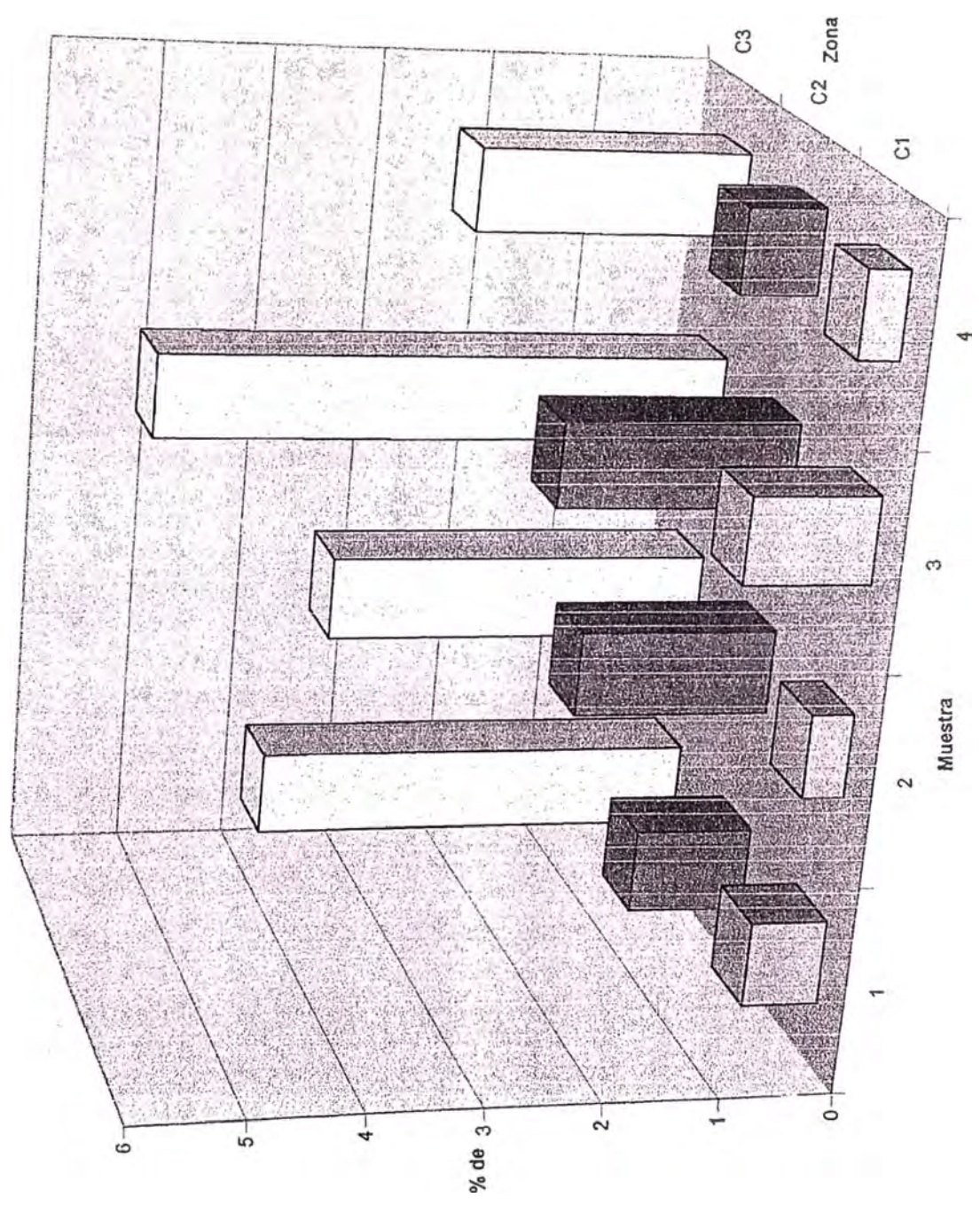
60019

Profundidad de Corrosión, mm



F2903

Profundidad Corrosión, % de



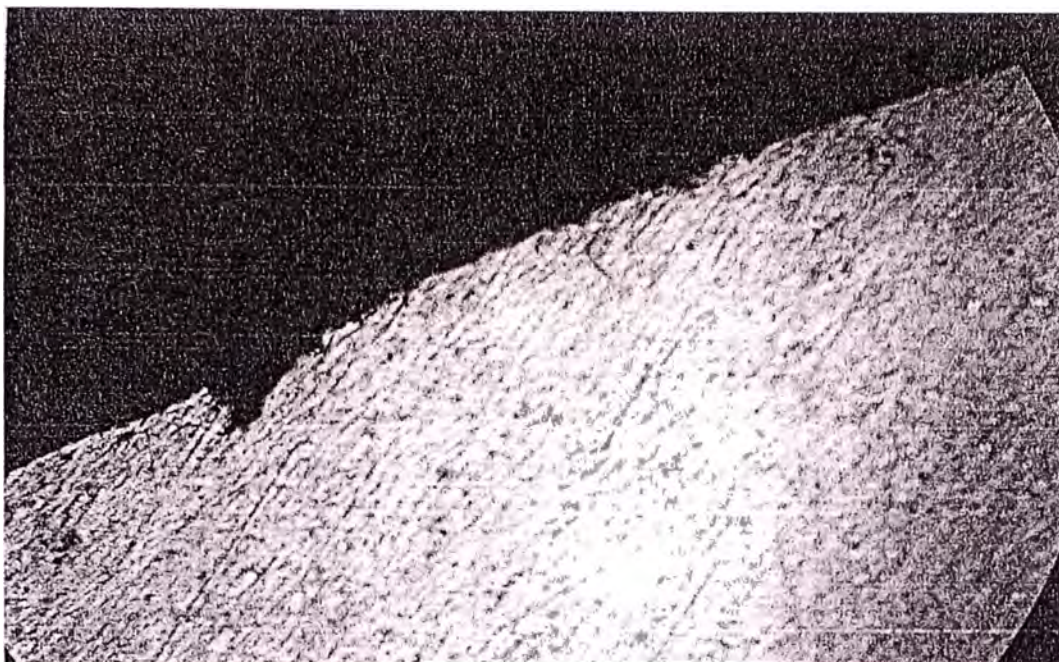


Foto 1

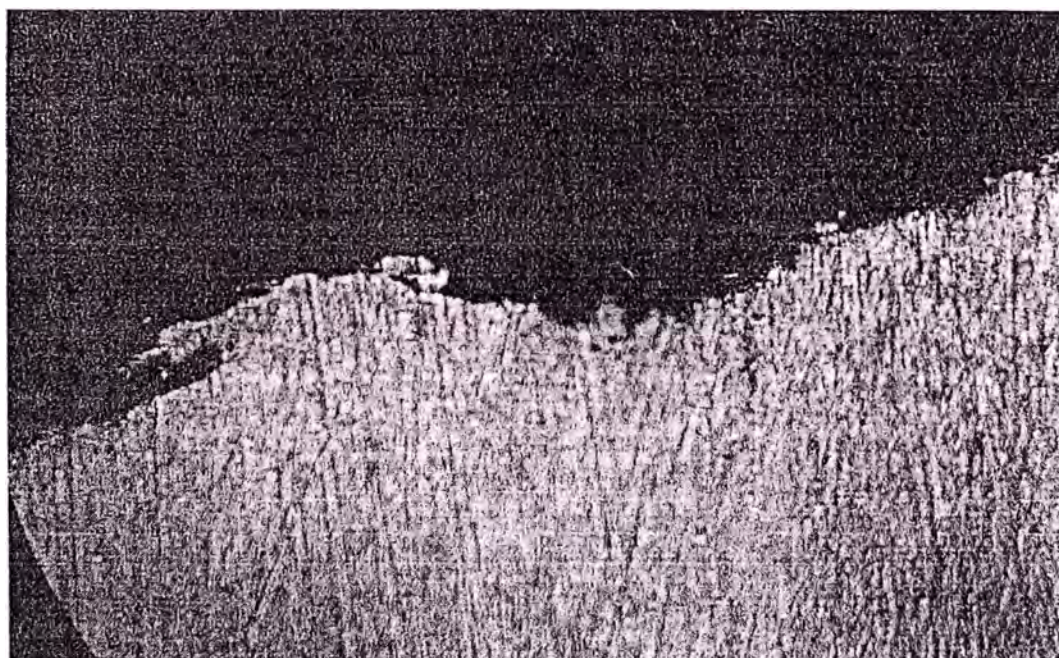


Foto 2

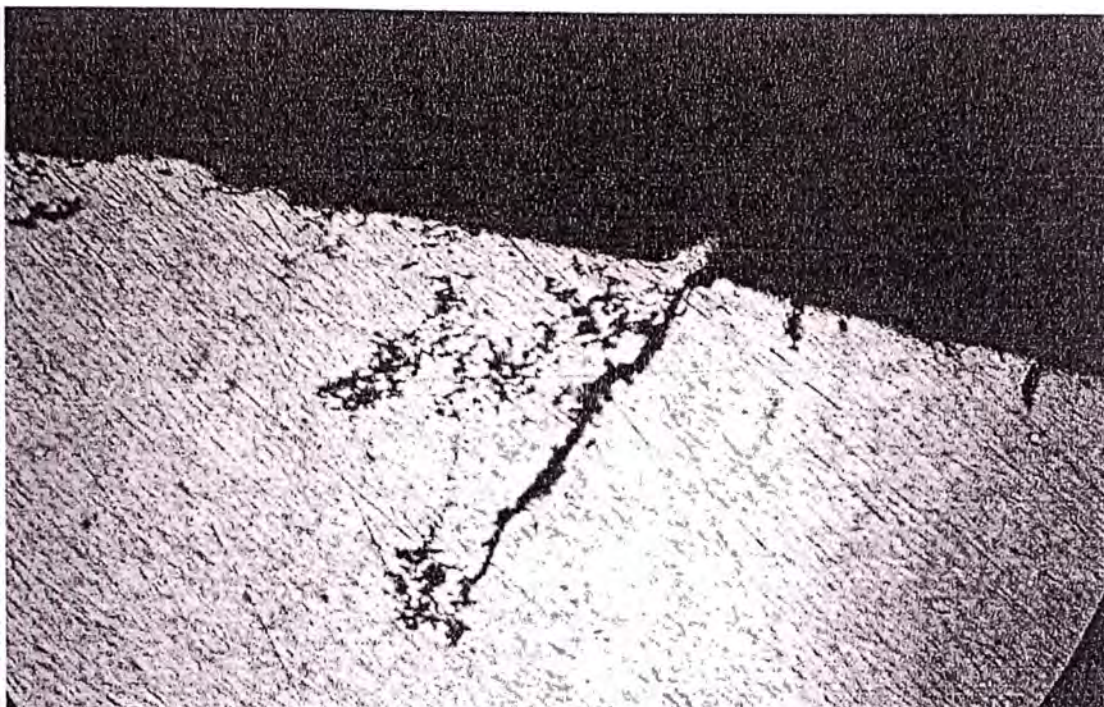


Foto 3

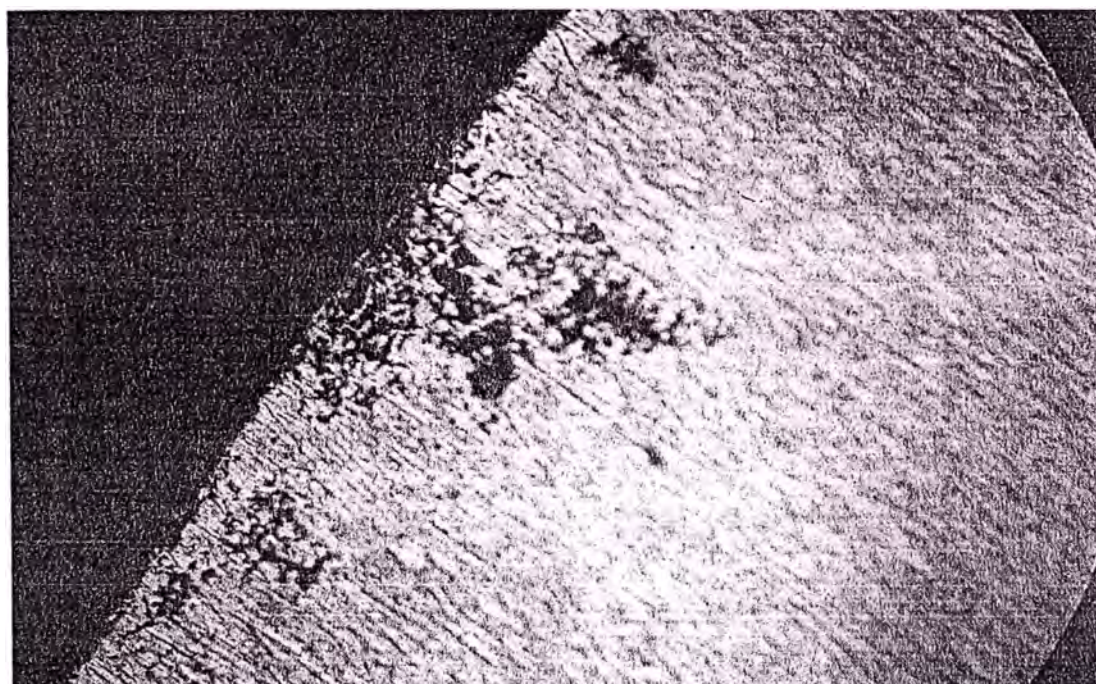


Foto 4

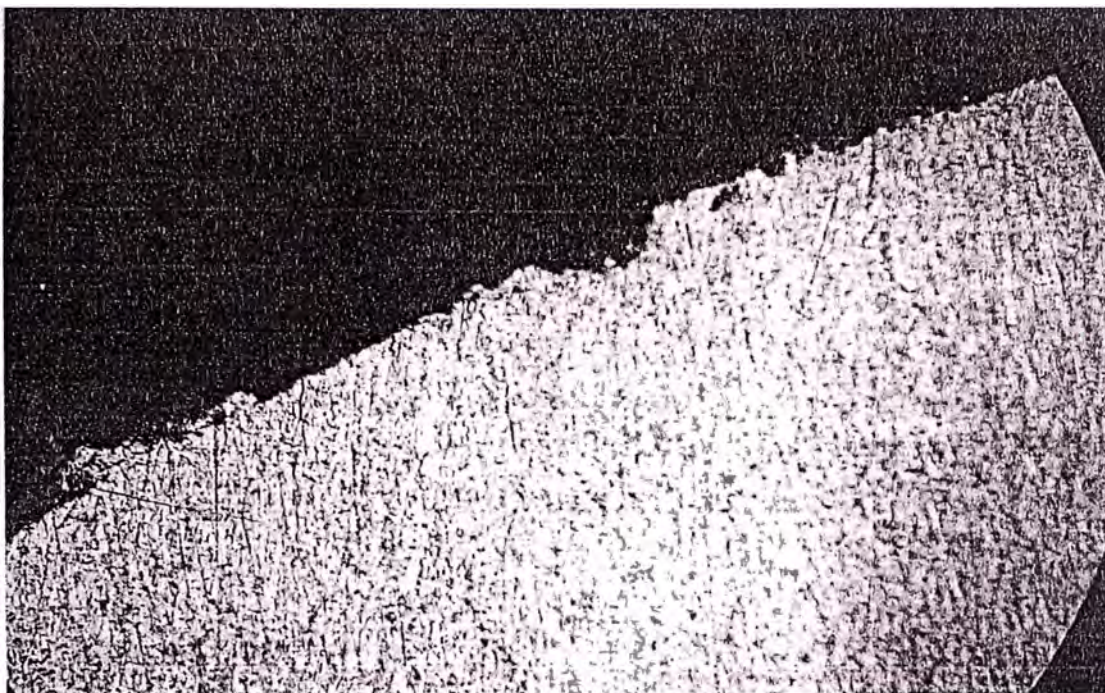


Foto 5



Foto 6

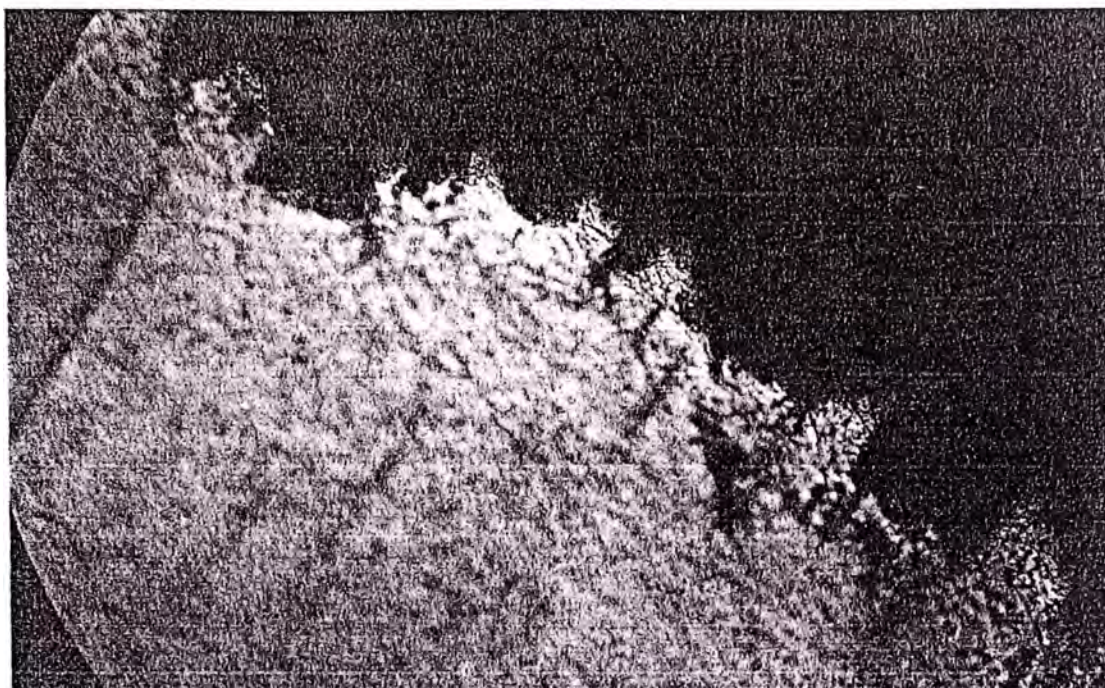


Foto 7

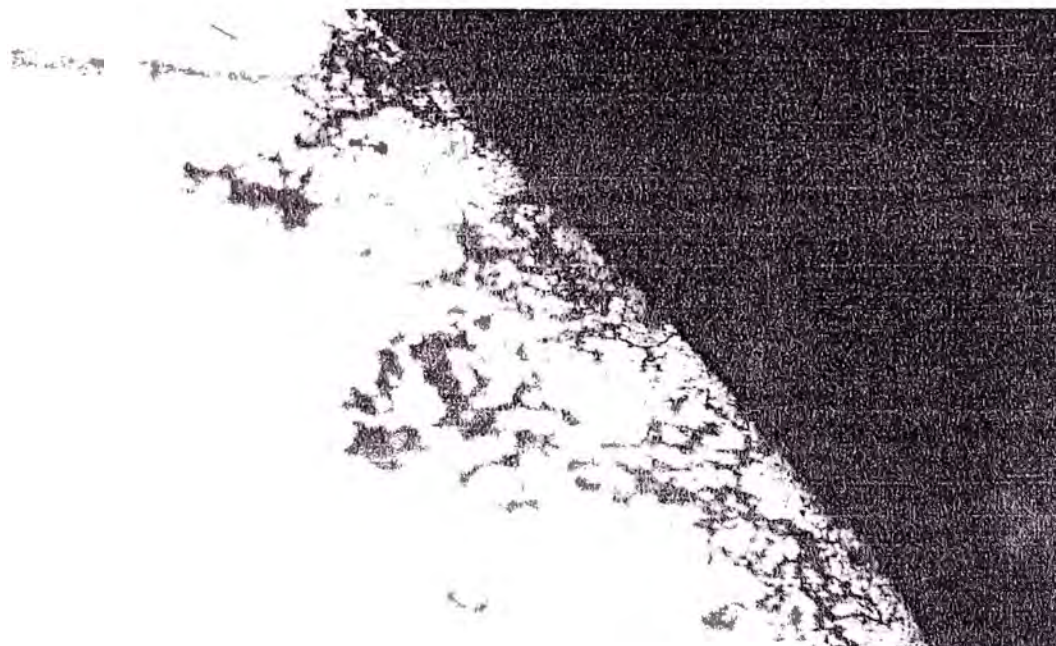


Foto 8

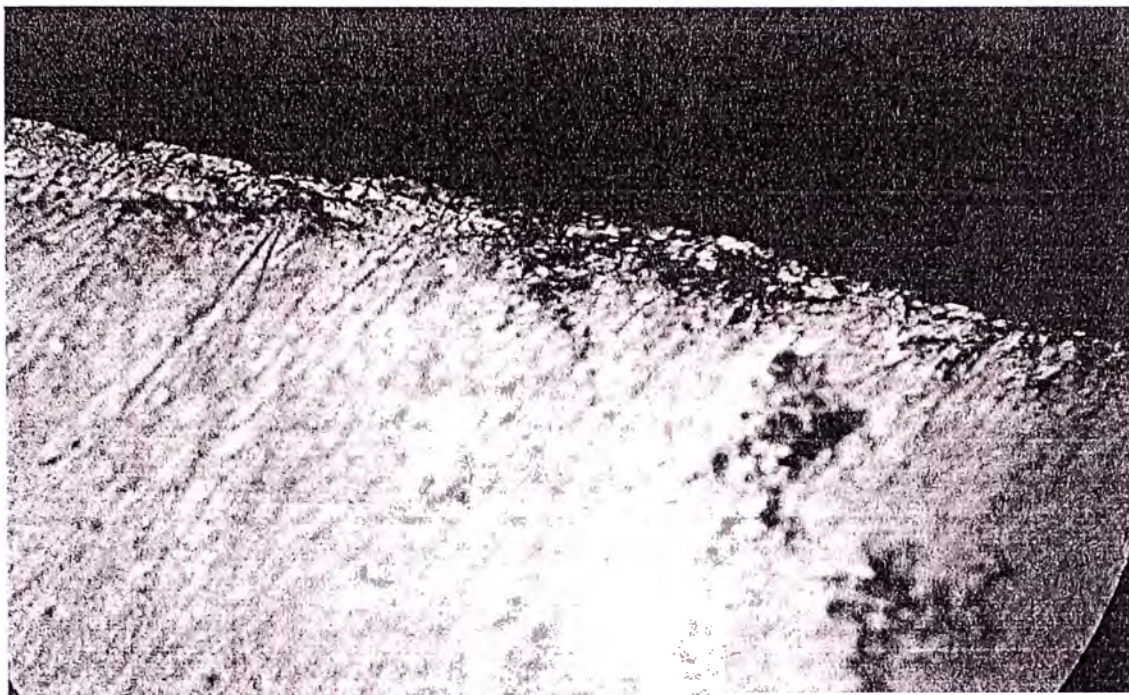


Foto 9

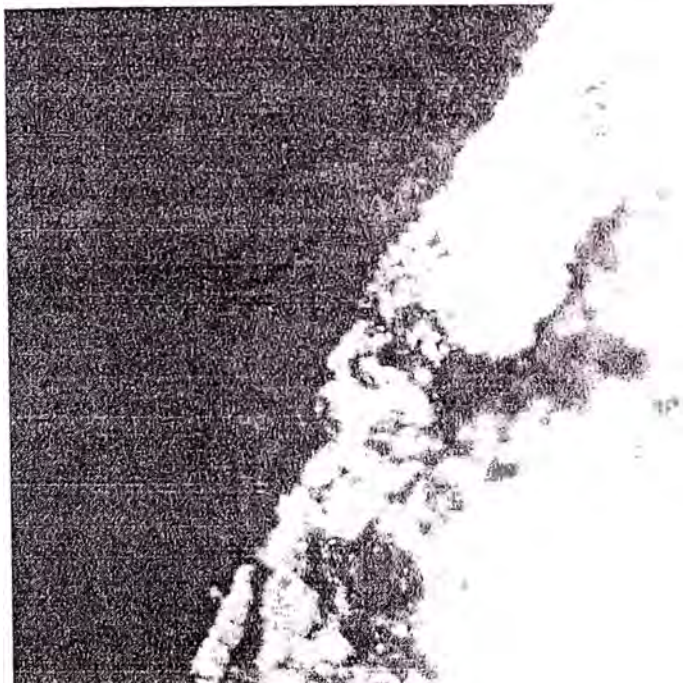


Foto 10

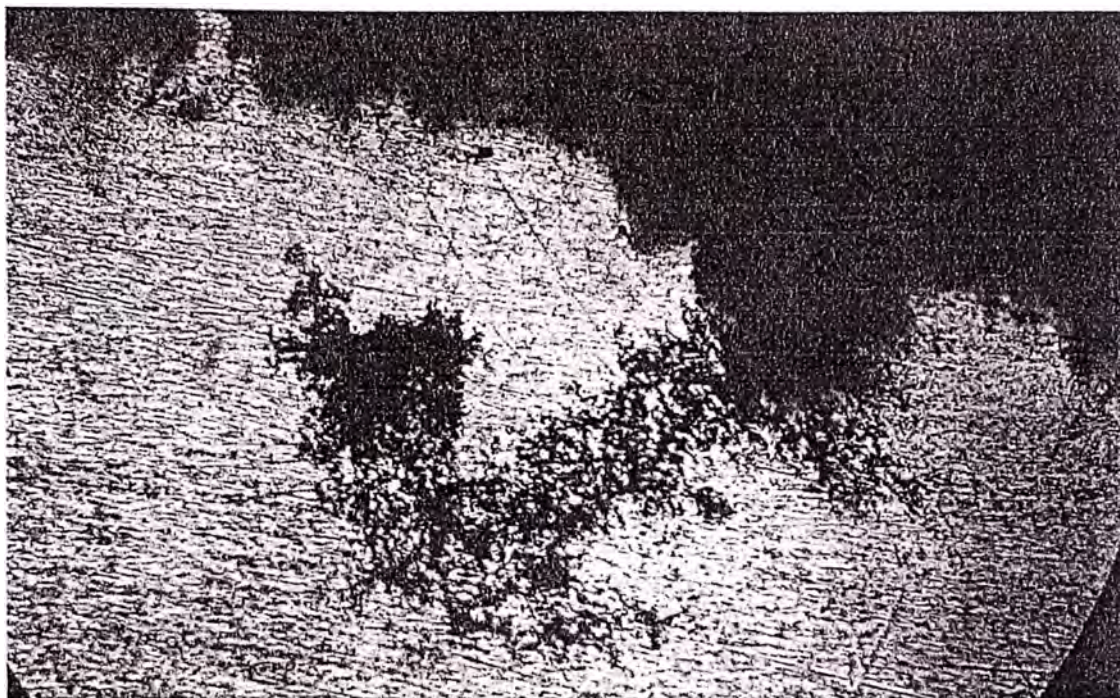


Foto 11



Foto 12



Foto 13



Foto 14

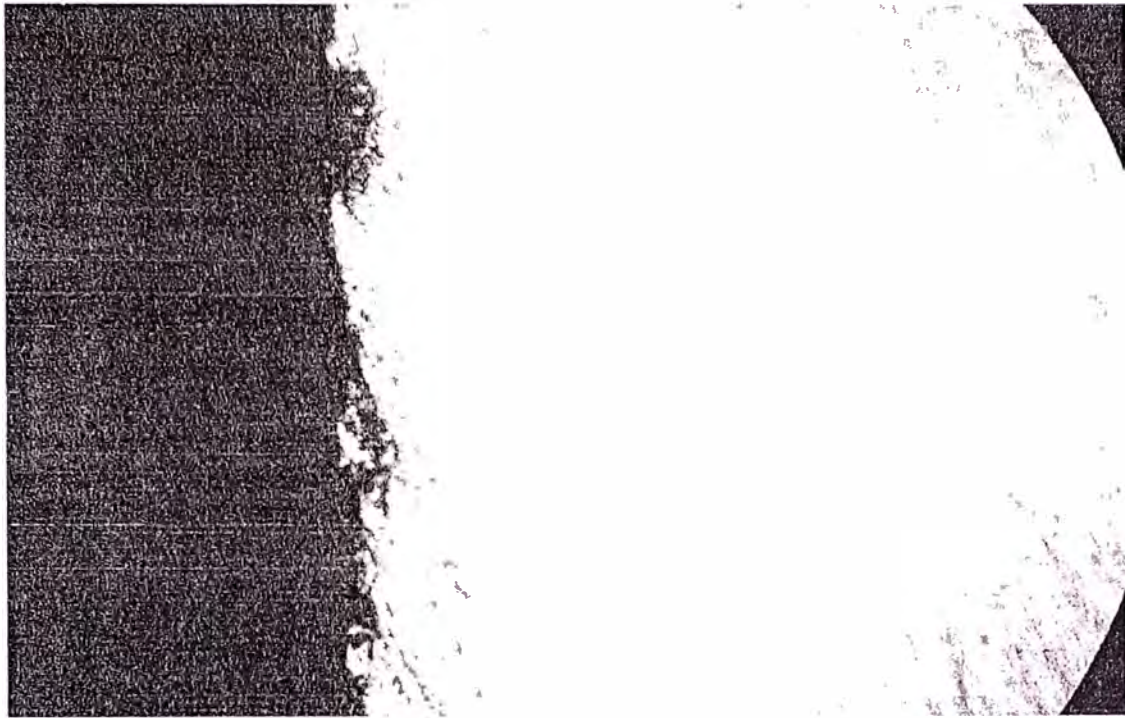


Foto 15

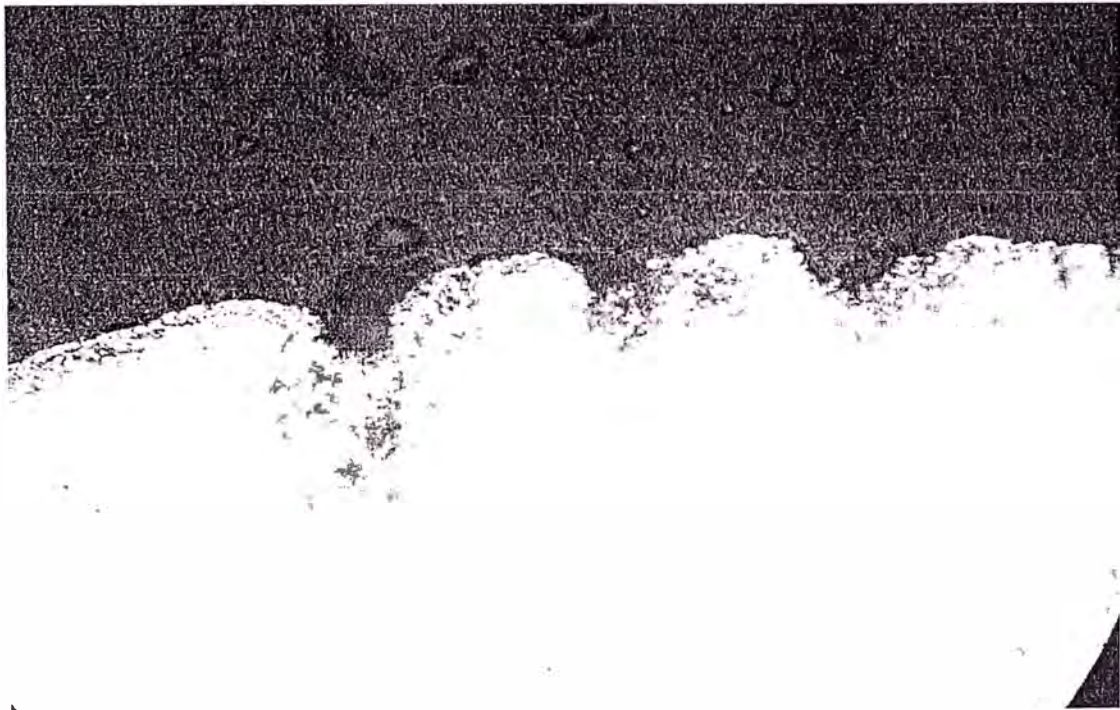


Foto 16

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN

- **ENSAYO DE TRACCIÓN – ELONGACIÓN**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA

FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS

Ing. Química, Ing. Metalúrgica, Ing. Materiales, Ing. Ind. Alimentarias

AREQUIPA : PERU

LABORATORIO DE ENSAYOS MECANICOS
ENSAYO DE TRACCIÓN

SOLICITADO POR : CORPORACIÓN ELECTROMECAÁNICA en Ingeniería y Construcción S.A.C.
Att. Ing. Harry Carrasco Zúñiga

REALIZADO POR : Ing. Hector Vargas Cardenas , Ms. Sc

MUESTRA : 4 Cables Conductores de líneas de transmisión , rotulados y proporcionados por el solicitante . (cada cable consta de 12 alambres externos ,6 en la parte intermedia y 1 central .todos del mismo diámetro)

IDENTIFICACIÓN : ninguna

FECHA : 20 de Marzo del 2003-03-20

MAQUINA : Dinamómetro de 2.5 TM Meresí Hatarok

PRACTICA OPERATIVA :

Los alambres de cada conductor fueron destrenzados y limpiados de polvo. Se les determino el diámetro promedio y fueron cortados en longitud apropiada para el ensayo. La distancia sujeta a medición fue considerada igual a 20 cm. Luego fueron ensayados en la maquina de tracción a la capacidad máxima de 500 Kilogramos.

LABORATORIO DE ENSAYOS MECANICOS
REPORTE DE RESULTADOS

Material	Cable Socabaya - Jesús			Cable Pque Industrial - Socabaya		
	Zona # 1	Zona # 2	Zona # 3	Zona # 1	Zona # 2	Zona # 3
Alambre de Aluminio						
Espesor Promedio, mm	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Carga Máxima, Kgrs	256	239	222	214	224	203
Carga de Fluencia, Kgrs	233	173	168	173	178	162
Alargamiento, mm/20cm	14.8	14.7	14.9	14.8	14.8	14.8
Esfuerzo Máximo, Kg/mm ²	38.8	36.2	33.6	32.4	33.9	30.7
Esfuerzo de Fluencia, Kg/mm ²	35.3	26.2	25.5	26.2	27.0	24.6

Zona # 1 : Alambre del cable de la zona central

Zona # 2 : Alambre del cable del collar intermedio

Zona # 3 : Alambre del cable del collar externo

Nota: los Alambres del collar externo Zonan depósito atmosférico (suciedad o corrosión)

El cable Pque Industrial - Socabaya, presenta entre los Alambres central y externo sustancia grasosa

Ing. Hector Vargas Cardenas
Jefe del Laboratorio de Ensayo de Materiales
DAIM - FIP - UNSA

0003



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA

FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS

Ing. Química, Ing. Metalúrgica, Ing. Materiales, Ing. Ind. Alimentarias
AREQUIPA - PERU

LABORATORIO DE ENSAYOS MECANICOS
ENSAYO DE TRACCIÓN

SOLICITADO POR : CORPORACIÓN ELECTROMECAÁNICA en Ingeniería y Construcción S.A.C.
Att. Ing. Harry Carrasco Zúñiga

REALIZADO POR : Ing. Hector Vargas Cardenas , Ms. Sc
Ing. Daisy Gonzalez Diaz

MUESTRA : 4 Cables Conductores de líneas de transmisión , rotulados y proporcionados por el solicitante . (cada cable consta de 12 alambres externos ,6 en la parte intermedia y 1 central .todos del mismo diámetro.)

IDENTIFICACIÓN : ninguna

FECHA : 20 de Marzo del 2003-03-20

MAQUINA : Dinamómetro de 2.5 TM Meresí Hatarok

PRACTICA OPERATIVA :

Los alambres de cada conductor fueron destrenzados y limpiados de polvo. Se les determino el diámetro promedio y fueron cortados en longitud apropiada para el ensayo. La distancia sujeta a medición fue considerada igual a 20 cm. Luego fueron ensayados en la maquina de tracción a la capacidad máxima de 500 Kilogramos.

CORPORACIÓN ELECTROMECAÁNICA
en Ingeniería y Construcción S.A.C.
Ing. Hector Carrasco Zúñiga
Gerente General

LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS
REPORTE DE RESULTADOS

Material	Cable Jesús - Chilina			Cable Challapampa - Pque. Industr.		
	Zona # 1	Zona # 2	Zona # 3	Zona # 1	Zona # 2	Zona # 3
Alambre de Aluminio						
Espesor Promedio, mm	2.7	2.7	2.7	2.9	2.9	2.9
Carga Máxima, Kgrs	210	209	209	216	231	216
Carga de Fluencia, Kgrs	167	158	153	181	186	186
Alargamiento, mm/20cm	14.7	15	14.5	14.6	14.6	14.6
Esfuerzo Máximo, Kg/mm ²	36.7	36.5	36.5	32.7	35.0	32.7
Esfuerzo de Fluencia, Kg/mm ²	29.2	27.6	26.7	27.4	28.1	28.1

Zona # 1 : Alambre del cable de la zona central

Zona # 2 : Alambre del cable del collar intermedio

Zona # 3 : Alambre del cable del collar externo

Nota: los Alambres del collar externo Zonan depósito atmosférico (suciedad o corrosión)

Ing. Hector Vargas Cardenas
Jefe del Laboratorio de Ensayo de Materiales
DAIM - FIP - UNSA

00033

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

- **ENSAYO DE TRACCIÓN – ELONGACIÓN**
 - **ANÁLISIS METALOGRAFICO**
- **PRUEBA DE RESISTENCIA ELÉCTRICA**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
 LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA
LABORATORIO N° 4

INFORME TECNICO
 Lb4-080-2003

**ENSAYOS DE TRACCIÓN-ELONGACION Y ANALISIS
 METALOGRAFICO EN CONDUCTORES DE ALUMINIO**

SOLICITANTE : **CELICON INGENIEROS S.A.C.**

REFERENCIA : Orden de Laboratorio N° 092373

FECHA : Lima, 26 de Febrero del 2003

1. ANTECEDENTES

Se recibieron dos (02) muestras de Conductores de Aluminio de 19 hilos, para realizarles ensayos de tracción-elongación y análisis metalográfico en Cable de la Línea Chilina - Jesús y Cable de la Línea Socobaya - Parque Industrial.

2. DE LAS MUESTRAS

Se identificaron como:

- CELICON-250203-I
- CELICON-250203-II

3. EQUIPOS UTILIZADOS

- Máquina Universal de ensayos, marca AMSLER de 5 000 Kg. de Capacidad.
- Vernier digital, marca MITUTOYO, aproximación 0,01mm.
- Microscopio Metalográfico
- Reactivo ataque: Kleler

4. CONDICIONES DE ENSAYO

Medio ambiente





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA

LABORATORIO N° 4

Lb4-080-2003

5. RESULTADOS

5.1 Ensayos de Tracción-Elongación:

MUESTRA	HILO	DIAMETRO (mm)	LONGITUD INICIAL (mm)	LONGITUD FINAL (mm)	ELONGACION (%)	FUERZA MAXIMA DE ROTURA (kg)	ESFUERZO MAXIMO DE ROTURA (kg/mm ²)
CELICON-250203-I CHILINA -JESUS	Primera CAPA	2,71	100	107,0	7,0	218	37,79
	Segunda CAPA	2,66	100	112,0	12,0	228	41,03
	Capa Central	2,70	100	112,0	12,0	210	36,68
CELICON-250203-II SOCABAYA - PARQUE INDUSTRIAL	Primera Capa	2,86	100	108,5	8,5	237	36,89
	Segunda Capa	2,91	100	110,4	10,4	225	33,83
	Capa Central	2,88	100	113,0	13,0	234	35,92

5.2 Análisis Metalográfico:

Para revelar la microestructura se utilizó el reactivo Keller que es una solución de ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido nítrico y agua destilada.

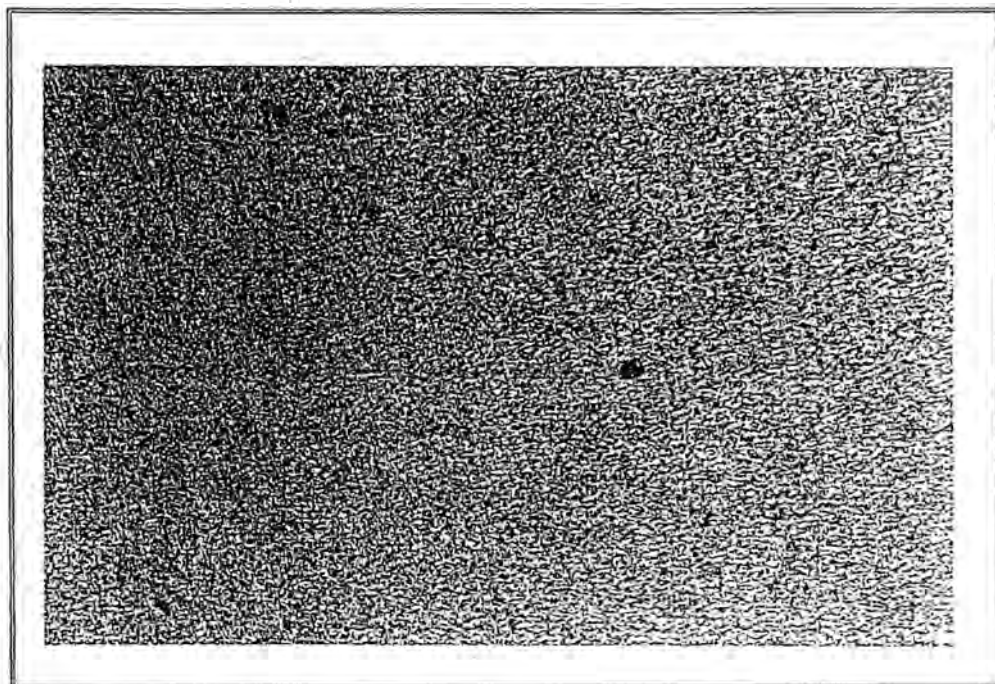
A continuación se muestran las microestructuras:





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA
LABORATORIO N° 4

Lb4-080-2003



Muestra Socabaya, con ataque a 200 X, se observa la fase α (alfa) ultrafina y una inclusión no metálica.



Pág. 3 de 7

60037

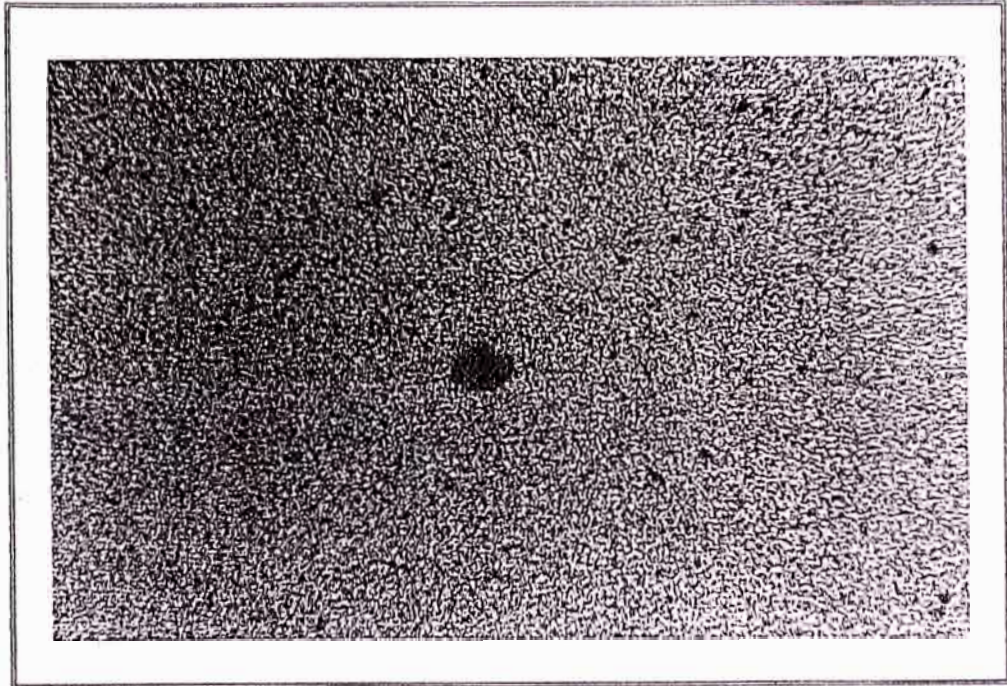


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA

LABORATORIO N° 4

Lb4-080-2003



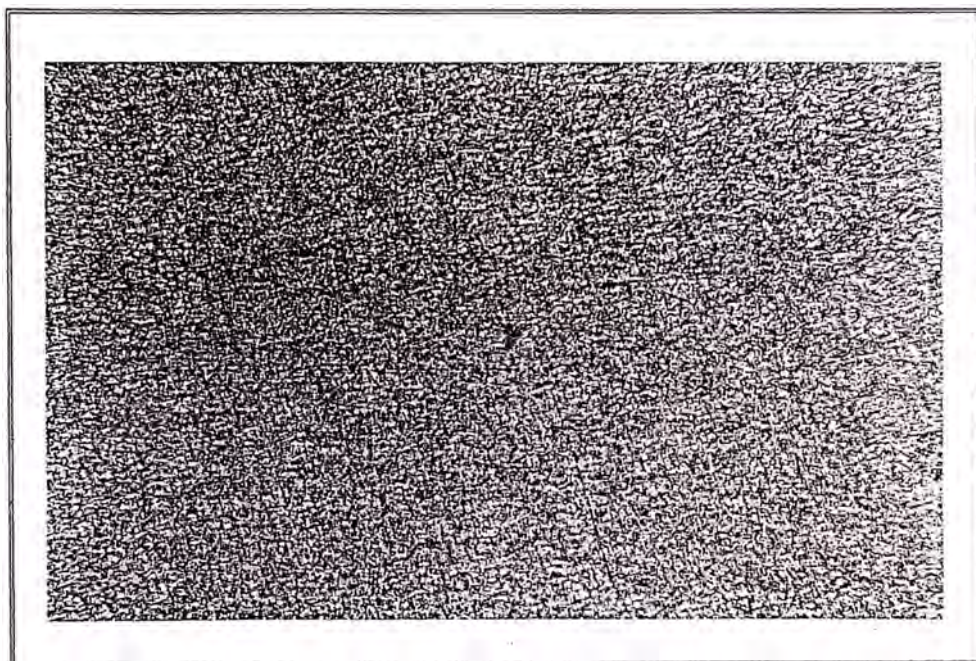
Muestra Socabaya, con ataque a 500 X, se observa la fase α (alfa) ultrafina.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA
LABORATORIO N° 4

Lb4-080-2003



Muestra Chilina, con ataque a 200 X, se observa la fase α (alfa) ultrafina.



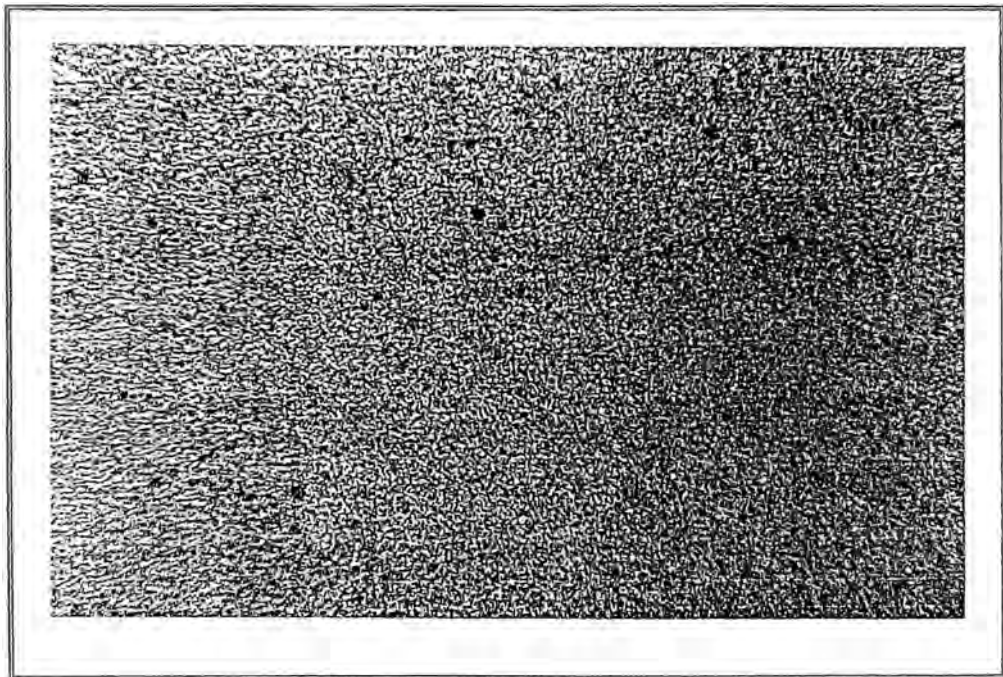
Pág. 5 de 7

00059



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA
LABORATORIO N° 4

Lb4-080-2003



Muestra Chilina, con ataque a 500 X, se observa la fase α (alfa) ultrafina.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA
LABORATORIO N° 4

Lb4-080-2003

6. CONCLUSIONES:

- Las dos muestras corresponden a una aleación de aluminio microaleado.
- El tamaño de grano es ultrafino.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
JEFATURA

ING. ENRIQUE SARMIENTO S.
Jefe del Laboratorio N° 4



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA

LABORATORIO N° 4

**PRUEBA DE RESISTENCIA ELECTRICA CONTINUA EN
CONDUCTOR DE ALEACION DE ALUMINIO**

CABLE CHILINA - JESUS

MUESTRA	:	Conductor de aleación de aluminio (Hilo extraído de la primera capa)
LONGITUD	:	100 mm
DIAMETRO	:	2,67 mm
RESISTENCIA ELECTRICA (CONTINUA)	:	7,5 mΩ
CONDICIONES DE ENSAYO	:	25 °C

MUESTRA	LONGITUD (mm)	DIAMETRO (mm)	RESISTENCIA ELECTRICA EN 1 HILO mΩ/m	RESISTENCIA ELECTRICA EN 19 HILOS (Ω/Km)
CHILINA - JESUS	100	2,65	7,5	0,3947

CABLE SOCABAYA - PARQUE INDUSTRIAL

MUESTRA	:	Conductor de aleación de aluminio (Hilo extraído de la primera capa)
LONGITUD	:	100 mm.
DIAMETRO	:	2,89 mm.
RESISTENCIA ELECTRICA (CONTINUA)	:	5,5 mΩ
CONDICIONES DE ENSAYO	:	25 °C

MUESTRA	LONGITUD (mm)	DIAMETRO (mm)	RESISTENCIA ELECTRICA EN 1 HILO mΩ/m	RESISTENCIA ELECTRICA EN 19 HILOS (Ω/Km)
SOCABAYA - PARQUE INDUSTRIAL	100	2,89	5,5	0,2894

EQUIPO UTILIZADO : Puente Thompson de $1 \times 10^6 \Omega - 100 \Omega$

OBSERVACIONES:

De acuerdo a las mediciones tomadas con la referencia original enviada por el cliente, las variaciones con las tomadas en el Laboratorio en el caso de CHILINA - JESUS es del 8% mayor y en el caso de SOCABAYA - PARQUE INDUSTRIAL es del 2.5% mayor.



ANEXO B

**INFORMES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO DEL CONDUCTOR
DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CHILINA – YURA S.A.**

- **UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN**
- **UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN

- **ANÁLISIS METALOGRAFICO**
- **ENSAYO DE TRACCIÓN – ELONGACIÓN**

Universidad Nacional San Agustín de Arequipa
Facultad de Ingeniería de Procesos

Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales

Laboratorio de Microscopía

INFORME DE ANÁLISIS METALOGRAFICO

SOLICITANTE :

REALIZADO POR: Ing. Ms. Sc. Alberto Polar Rosas
Responsable del Laboratorio de
Metalografía

SERVICIO SOLICITADO: Análisis Metalográfico de
Tres cables de Al con núcleo
de acero.

FECHA: 12 de Agosto de 2000

ANÁLISIS METALOGRAFICO

Número de Muestras: 3

Tipo de muestra: Cables de Aluminio con núcleo de acero

Codificación: Muestra No 1: Nueva

Muestra No 2: 50-60

Muestra No 3: 70 – 90

Solicitante.-

COMENTARIOS INICIALES

Las tres muestras corresponden a cables usados como conductores y están constituidos de alambres de aluminio con un núcleo de acero.

Para realizar el análisis metalográfico se tomaron 4 probetas al azar de cada cable observándose el tipo de material, posibles fallas en el material, grado de corrosión e inspección por otro tipo de irregularidades. Se prepararon las muestras mediante el sistema de pulido manual y fueron atacadas con solución de NaOH y pasivadas con solución de HNO₃

ANÁLISIS METALOGRAFICO

El análisis metalográfico nos muestra una matriz de aluminio con precipitaciones de segunda fase probablemente residuos de un recocido de solución incompleto (Microfotografía 1)

La muestra No 1 (Nueva) presentan los alambres de aluminio con una superficie ligeramente corroída, en los que la penetración de la corrosión es de 0.05 mm como máximo (Microfotografía 2). Existe presencia de corrosión intergranular en forma aislada (Microfotografía 3), con una penetración de 0.01 mm. En uno de los alambres de esta muestra se encontraron pequeños defectos de atrapamiento de inclusiones que corresponden a la fabricación del alambre. No presenta ningún tipo de fisuras ni microgrietas.

El cable No2 (50-60) presenta las mismas características generales que el anterior. Los alambres también son de aluminio con pequeñas islas de segunda fase. Dos de las cuatro muestras de este cable presentan corrosión superficial en mayor extensión de la superficie que el cable denominado "Nuevo" (Microfotografía 4), con trazas de corrosión intergranular (CI) con penetración promedio de 0.015 mm. aunque en ningún caso la corrosión penetra más de 0.05 mm. No presenta ningún tipo de fisuras ni microgrietas.

El cable No 3 (70-90) tiene la misma estructura matricial que los otros dos. Se puede observar también ligera corrosión superficial (Microfotografía 5), siendo la penetración máxima de esta de 0.06 mm. A semejanza de los alambres anteriores, también

presenta trazas de corrosión intergranular incipiente. Tampoco presenta ningún tipo de fisuras o microfisuras en su masa.

No se analizó el núcleo de acero por no encontrar signos de deterioro en él.

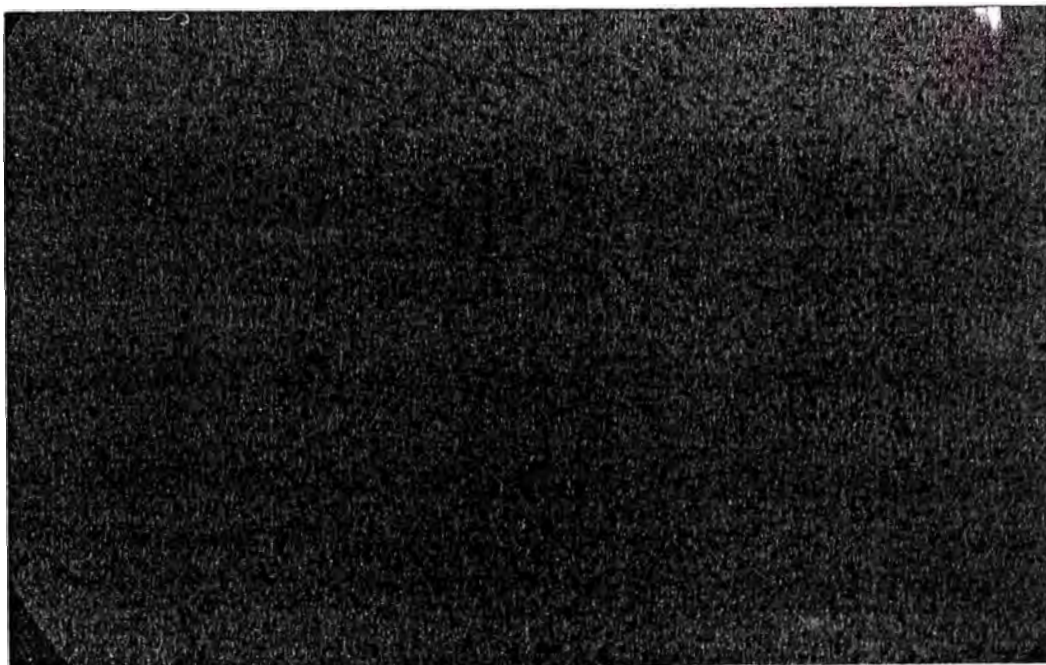
CONCLUSION

Si bien los cables No 2 (50-60) y No 3 (70-90) presentan ligera corrosión superficial, los signos de corrosión intergranular no son severos considerando el diámetro total del alambre. Asimismo tampoco presentan microfisuras, por lo que considerando además que la pérdida de masa es en todos los casos menor al 1%, lo observado indica que estos alambres no deben verse afectados en gran medida en sus propiedades mecánicas totales. En general no presentan muestra de ser susceptibles a fallas de mantenerse las tensiones en el rango normal para este tipo de cables.

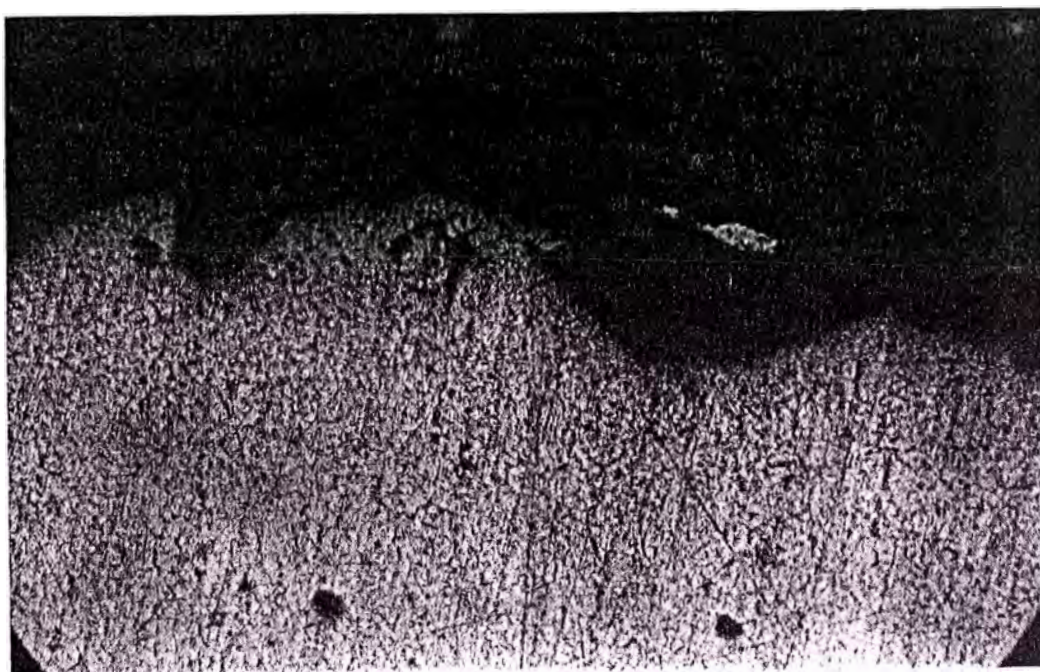
El cable denominado Nuevo presenta las mismas características de los otros cables aunque su deterioro por corrosión es menor, por lo que tampoco muestra susceptibilidad de falla si se trabaja en el rango normal de esfuerzos recomendado para este tipo de cable.



Ing. Ms. Sc. Alberto Polar Rosas
Jefe de Laboratorio de Metalografía



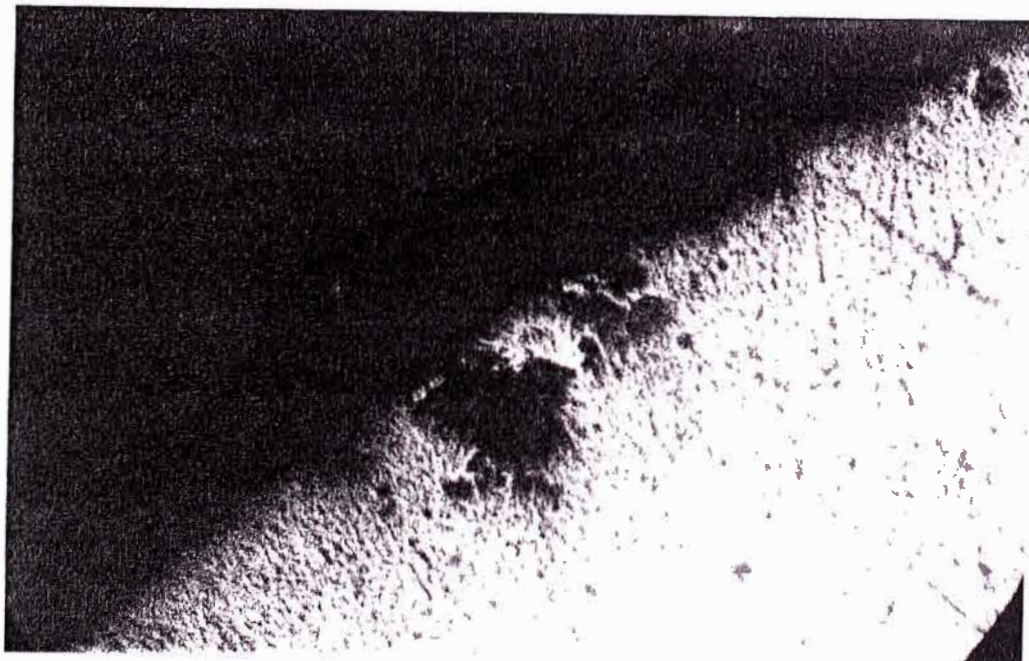
Microfotografía 1.- Estructura típica del material analizado 400X



Microfotografía 2.- Alambre de cable "Nuevo". Corrosión superficial incipiente 800X



Microfotografía 3.- Corrosión intergranular penetrante. Tamaño 0.012 mm. 800X



Microfotografía 4.- Alambre de cable "50-60". Corrosión superficial e indicios de corrosión intergranular incipiente. 800X



Microfotografía 5 a.- Alambre de cable "70-90". Corrosión superficial e indicios de corrosión intergranular incipiente. 800X



Universidad Nacional de San Agustín
 UNIDAD DE PRODUCCION Y SERVICIOS DE
 INGENIERIA METALURGICA Y MATERIALES
 Dpto. Ing. Metalúrgica y Materiales
 Teléfono 289902 - Av. Venezuela 423

LABORATORIO DE ENSAYOS MECANICOS
 ENSAYO DE TRACCION

SOLICITADO POR: CORPORACION ELECTROMECHANICA en Ingeniería y Construcción S.A.C.
 Referencia: Carta de 07/08/2000
 Att. Ing. Harry Carrasco Zúñiga

REALIZADO POR: Ing. Héctor Vargas Cárdenas, Ms. Sc.

MUESTRA: 3 Cables Conductores de Línea de Transmisión, proporcionados por el solicitante. (Cada cable consta de 5 alambres de Aluminio y una Alma de Acero)

Identificación: Ninguna
 Fabricante: Ninguna

FECHA: 12 de Agosto del 2000

MAQUINA: Dinamómetro de 10 y 2.5 TM Meresi Hatarok

PRACTICA OPERATIVA:

Los conductores fueron destrenzados, limpiándoles el polvo. Se les determinó el diámetro promedio y fueron cortados en la longitud apropiada para el ensayo. La distancia sujeta a medición fué considerada igual a 20 cm. A continuación fueron ensayados en la máquina de Tracción.

LABORATORIO DE ENSAYOS MECANICOS
 REPORTE DE RESULTADOS

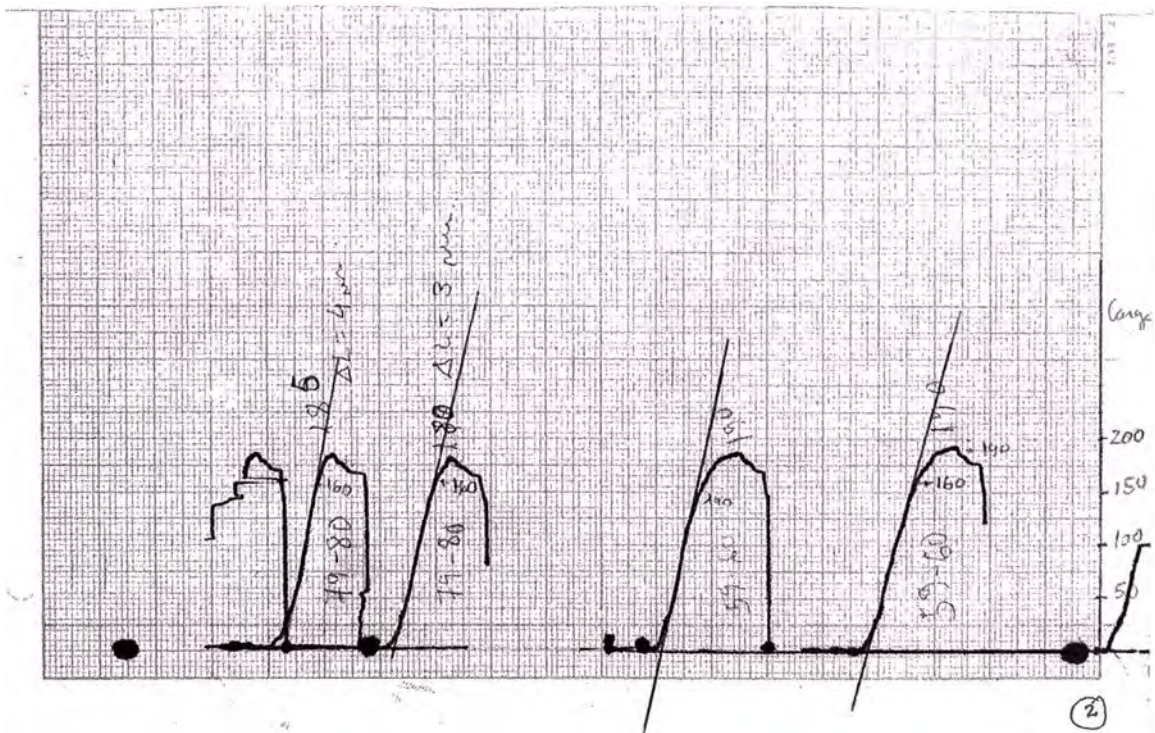
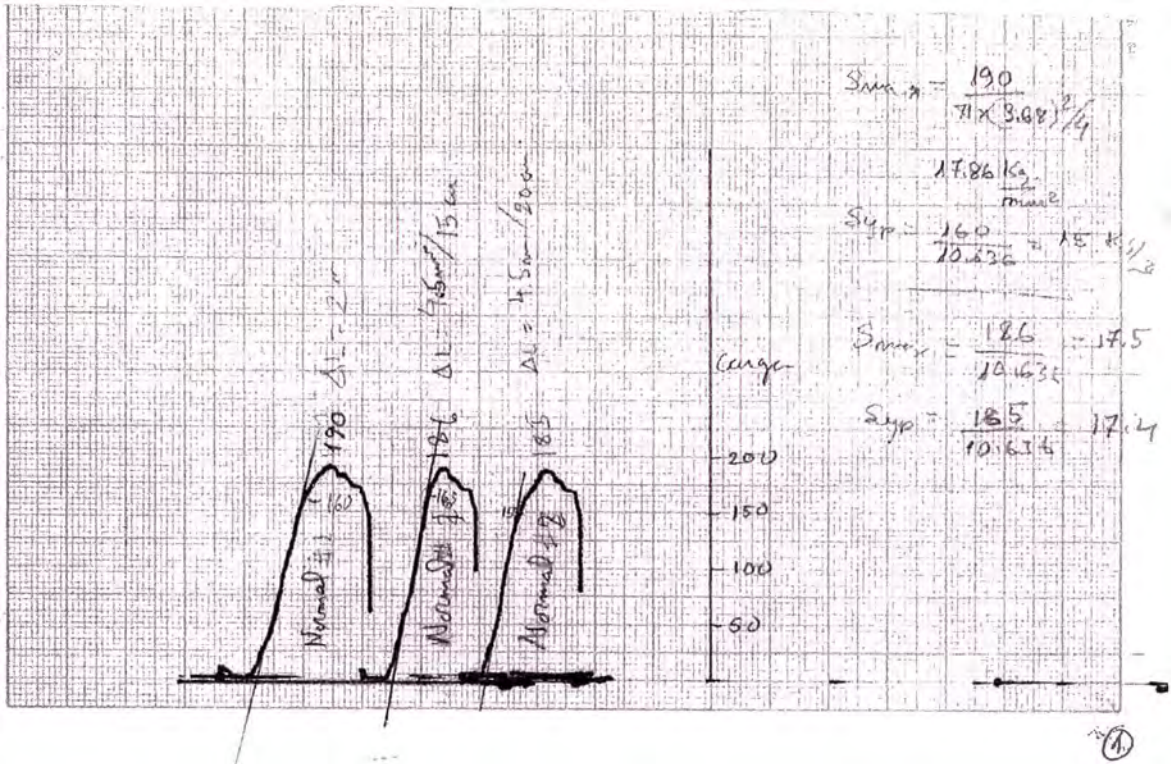
Material	59-60		79-80		Normal	
	Probeta # 1	Probeta # 2	Probeta # 1	Probeta # 2	Probeta # 1	Probeta # 2
Alambre de Aluminio						
Espesor Promedio, mm	3.64	3.64	3.64	3.64	3.7	3.7
Carga Máxima, Kgrs	190	190	185	180	190	185
Carga de Fluencia, Kgrs	140	160	160	160	160	150
Alargamiento, mm/20cm	*	*	4	3	4.5	4.5
Esfuerzo Máximo, Kg/mm ²	18.3	18.3	17.8	17.3	17.7	17.2
Esfuerzo de Fluencia, Kg/mm ²	13.5	15.4	15.4	15.4	14.9	14.0
Alma de Acero						
Espesor Promedio, mm		3.7		3.64		3.7
Carga Máxima, Kgrs		1250		1290		1200
Carga de Fluencia, Kgrs		1000		950		1000
Alargamiento, mm/20cm		0.9		0.8		1.1
Esfuerzo Máximo, Kg/mm ²		116.3		124.0		111.6
Esfuerzo de Fluencia, Kg/mm ²		93.0		91.3		93.0

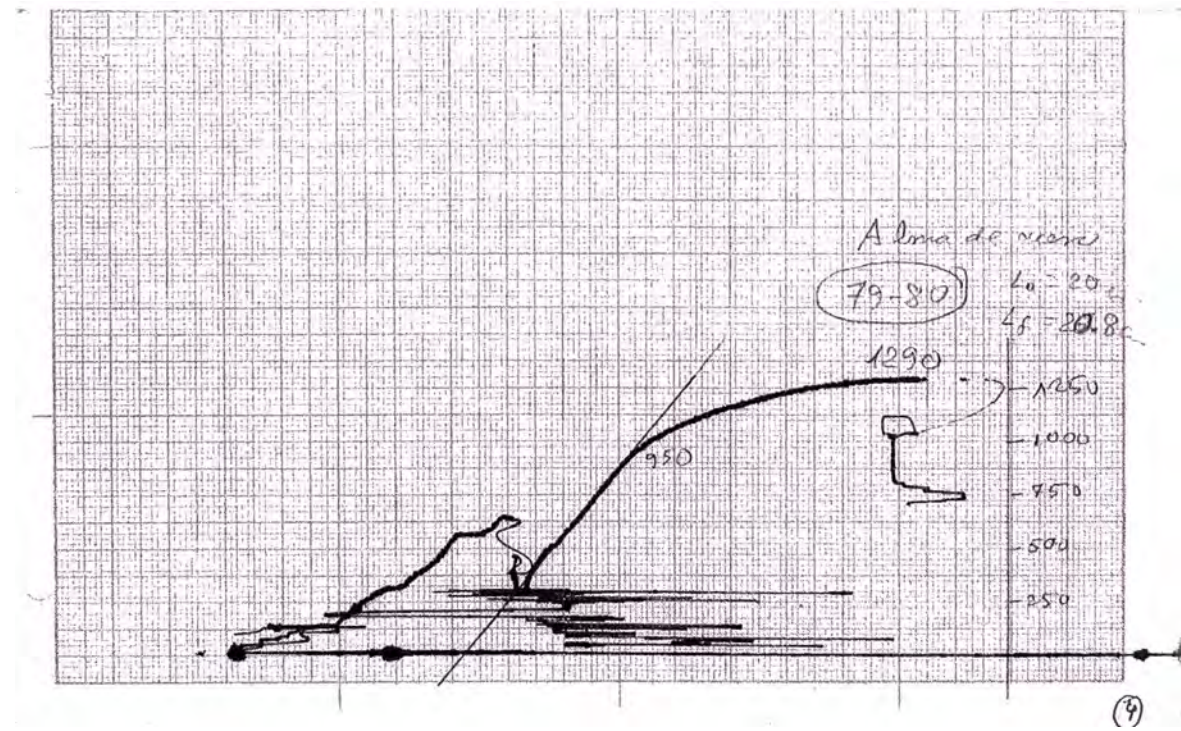
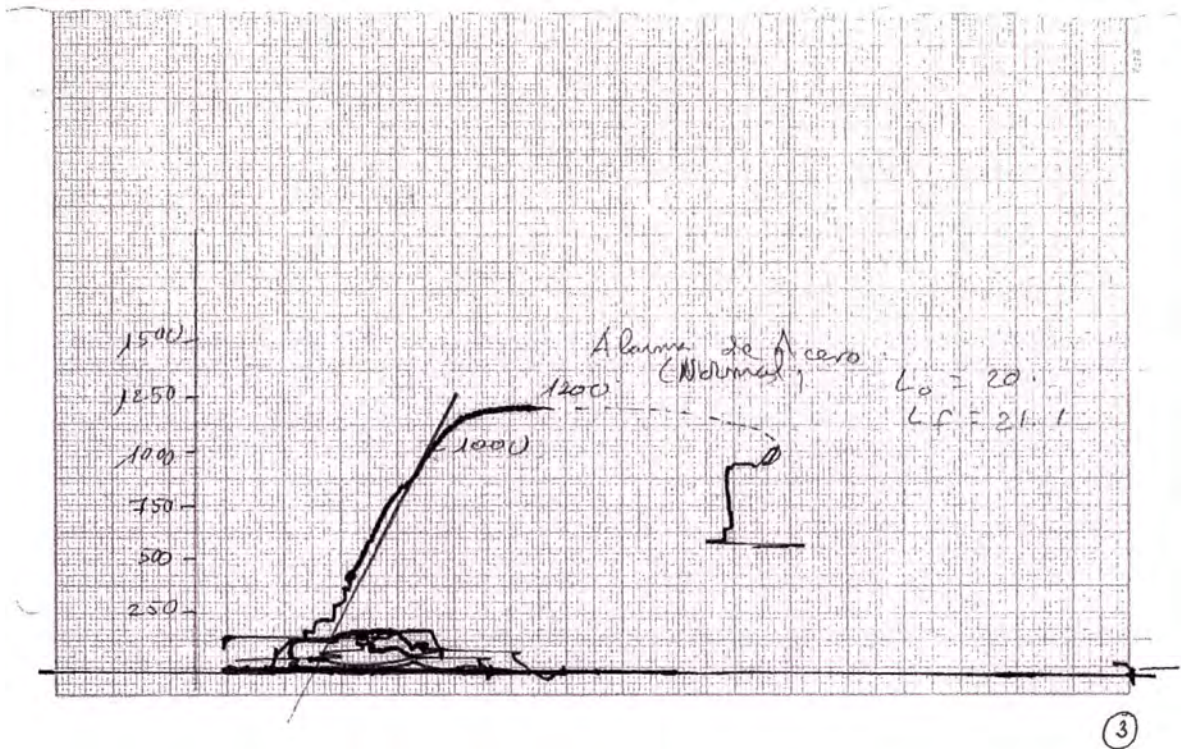
* Fuera de la distancia sujeta a medición

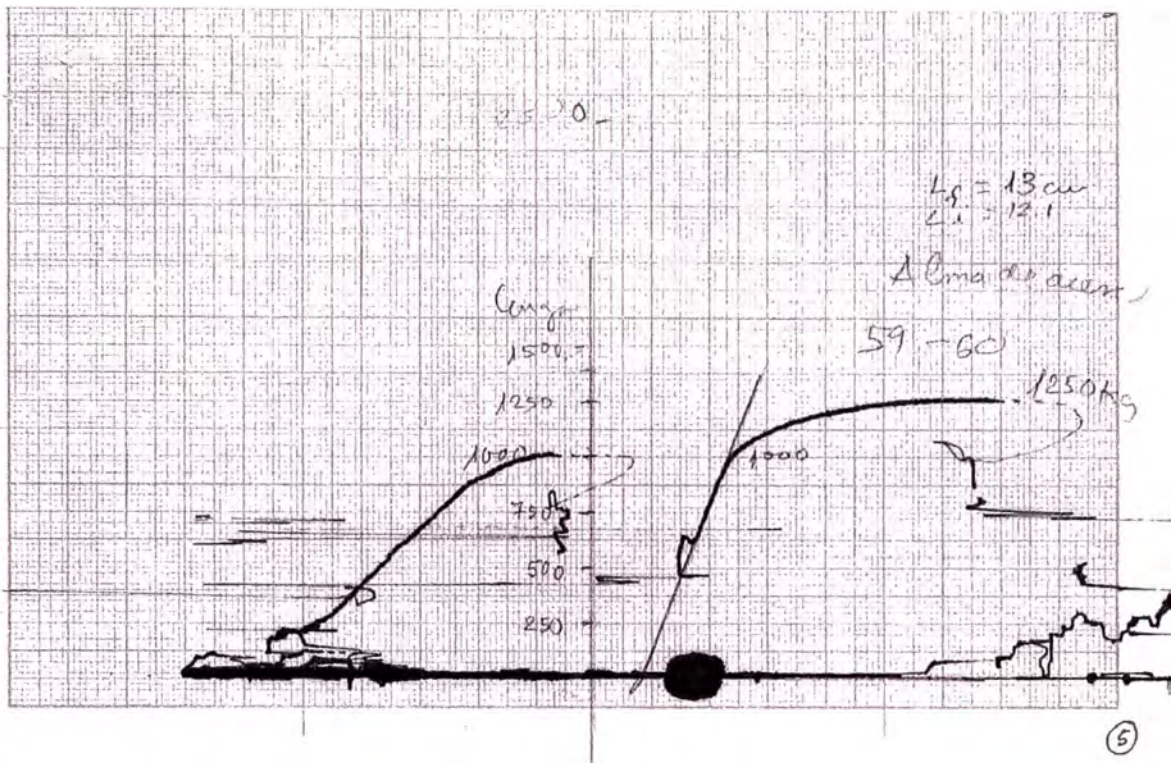
Nota.- Todos los cables muestran signos de corrosión externa muy leve, sobre todo en el contacto entre alambre y alambre
 El alma de acero en todos los casos conserva su color característico (Conserva el recubrimiento galvanizado)

Observaciones: Se adjuntan diagramas: Carga-Alargamiento.

Ing. Héctor Vargas Cárdenas Ms Sc
 Jefe del Laboratorio
 de Ensayo de Materiales DAIM - UNSA









PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES

MAT-AGO-446 / 2000

INFORME TÉCNICO ENSAYO DE TRACCIÓN

SOLICITADO POR : CELICOM INGENIEROS

REALIZADO POR : ING.FRANCO CALDERÓN A.

MUESTRA : CABLE ACSR

FECHA : 2000.08.10

RESULTADOS

MUESTRA		1	2
SECCIÓN TRANSVERSAL	DIÁMETRO (mm.)	3.66	3.66
	ÁREA (mm ²)	10.5	10.5
CARGAS (Kg)	FLUENCIA	1300.0	170.0
	MÁXIMA	1500.0	180.0
TENSIONES (kg/mm ²)	FLUENCIA	123.8	17.1
	MÁXIMA	143.0	250.0
LONGITUD ENTRE MARCAS (mm.)		250	250
ALARGAMIENTO ENTRE MARCAS (mm.)		16.0	6.0
ALARGAMIENTO (%)		6.40	2.4

Fecha de ejecución: 2000.08.10

OBSERVACIONES

- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante
- Norma de referencia ASTM E8M
- Muestra N°1:Hilo de Acero
- Muestra N°2:Hilo de Aluminio

Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales

UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

- **ENSAYO DE TRACCIÓN – ELONGACIÓN**
 - **ANÁLISIS METALOGRÁFICO**



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES

MAT-AGO-446/2000

INFORME TECNICO INSPECCIÓN DIMENSIONAL

SOLICITADO POR : CELICOM INGENIEROS

REALIZADO POR : ING.FRANCO CALDERÓN A.

MUESTRA : CABLE ACSR

FECHA : 2000.06.06

RESULTADOS:

MUESTRA	Medida nominal	Medida real
DIAMETRO EXTERIOR(mm)	10.98	10.90
SECCION DEL ALUMINIO(mm ²)	63.04	63.09
SECCION DEL ACERO(mm ²)	10.52	10.50
SECCION TOTAL(mm ²)	73.55	73.59
PESO(Kg/Km)	255	261
NUMERO DE HILOS DE ACERO	1	1
NUMERO DE HILOS DE ALUMINIO	6	6
CABLE DE ALUMINIO(dia.mm)	3.66	3.66
CABLE DE ACERO(dia.mm)	3.66	3.66

Fecha de Ejecución: 2000.08.10

Prohibida la reproducción parcial o total de este Informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales

2 de 8

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Sección Ingeniería Mecánica

Ms. Ing. Roberto Lazarte Gómez CIP 30988
Jefe del laboratorio de Materiales



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES
MAT-AGO-446 / 2000

INFORME TÉCNICO ANÁLISIS METALOGRAFÍCO

SOLICITADO POR : CELICOM INGENIEROS
REALIZADO POR : ING. SOCRATES CUTIPA CASTELO.
MUESTRA : CABLE ACSR - ACERO
FECHA : 2000-08-15

1.- FOTOMICROGRAFÍA:

- a) Sección : Transversal
b) Aumentos : 1000 X
c) Reactivo Químico : Nital al 3%

2.- OBSERVACIÓN METALOGRAFICA:

- a) Microconstituyentes:
Matriz : Perlita laminar fina
Otras : Ferrita reticular en trazas.
Carburo globular fino escaso.
- b) Tamaño de grano : De 8 a 9 .
Según ASTM E112
- c) Inclusiones : Tipo Sulfuros, serie fina N° 3.
Según ASTM E 45

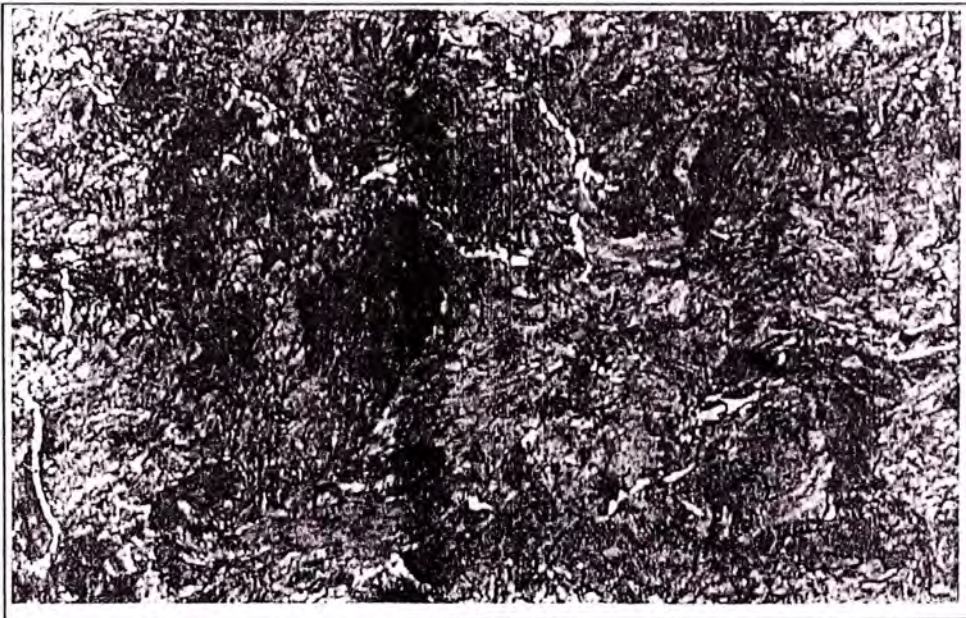
3.- INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA:

Fotomicrografia N° 1 : Corresponde al hilo central de Acero
Material: Acero de medio carbono, estado conformado en frío
Detalle: Acero trefilado.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES
MAT-AGO-446 / 2000

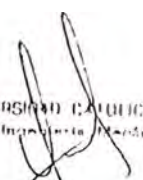
FOTOMICROGRAFÍA No 1.



AUMENTO: 1000x

4 de 8

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Sección Ingeniería de Materiales


Ma. Ing. Roberto Lazarte, Ingeniero C.I.P. Perú
Jefe del Laboratorio de Materiales



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES

MAT-AGO-446 / 2000

INFORME TÉCNICO ENSAYO DE DUREZA

SOLICITADO POR : CELICOM INGENIEROS

REALIZADO POR : ING.SOCRATES CUTIPA CASTELO

MUESTRA : CABLE ACSR - ACERO

TIPO DE ENSAYO : VICKERS

FECHA : 2000.08.10

RESULTADOS

MUESTRA	MEDICIONES			DUREZA HV
	D ₁	D ₂	D _{PROM}	
1	210	210	210	420

Fecha de Ensayo : 2000.08.10

OBSERVACIONES

- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante
- Norma de ensayo ASTM E-92
- Carga : 10 kg. - Objetivo: 2/3"

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales

5 de 8

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Sección Ingeniería Mecánica

Ma. Ing. Roberto Lozarte Tamayo C.I.P. 32483
Jefe del Laboratorio de Materiales



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES
MAT-AGO-446 / 2000

INFORME TÉCNICO ANÁLISIS METALOGRAFICO

SOLICITADO POR : CELICOM INGENIEROS
REALIZADO POR : ING. SOCRATES CUTIPA CASTELO.
MUESTRA : CABLE ACSR - ALUMINIO
FECHA : 2000-08-16

1.- FOTOMICROGRAFÍA:

a) Sección : Transversal
b) Aumentos : 1000 X
c) Reactivo Químico : Acido fluorhídrico 9.0 ml
Acido clorhídrico 1.5 ml
Resto agua destilada.

2.- OBSERVACIÓN METALOGRAFICA:

a) Microconstituyentes:
Matriz : Solución sólida α (Aluminio).
Otras : Compuestos de forma globular dentro de la matriz.

3.- INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA:

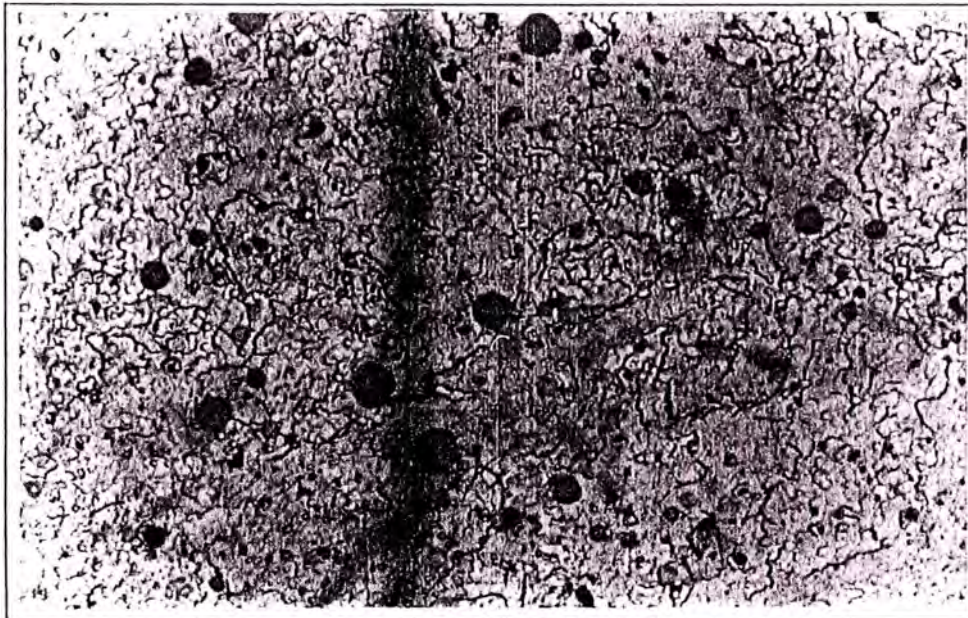
Fotomicrografia N° 1: Corresponde a hilos de aluminio
Material: Aleación de aluminio, conformado en frío.
Detalle: Estructura severamente deformada



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES

MAT-AGO-446 / 2000

FOTOMICROGRAFÍA Nº 1.



AUMENTOS 1000X

7 de 8

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Sección Ingeniería Mecánica

Mr. Ing. Roberto Lázaro Gómez S.P. EBINI
Jefe del Laboratorio de Materiales



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
SECCION INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE MATERIALES

MAT-AGO-446 / 2000

INFORME TÉCNICO ENSAYO DE DUREZA

SOLICITADO POR : CELICOM INGENIEROS

REALIZADO POR : ING. SOCRATES CUTIPA CASTELO

MUESTRA : CABLE ACSR - ALUMINIO

TIPO DE ENSAYO : VICKERS

FECHA : 2000.08.10

RESULTADOS

MUESTRA	MEDICIONES			DUREZA HV
	D ₁	D ₂	D _{PROM}	
1	431	437	434	49.2

Fecha de Ensayo : 2000.08.10

OBSERVACIONES

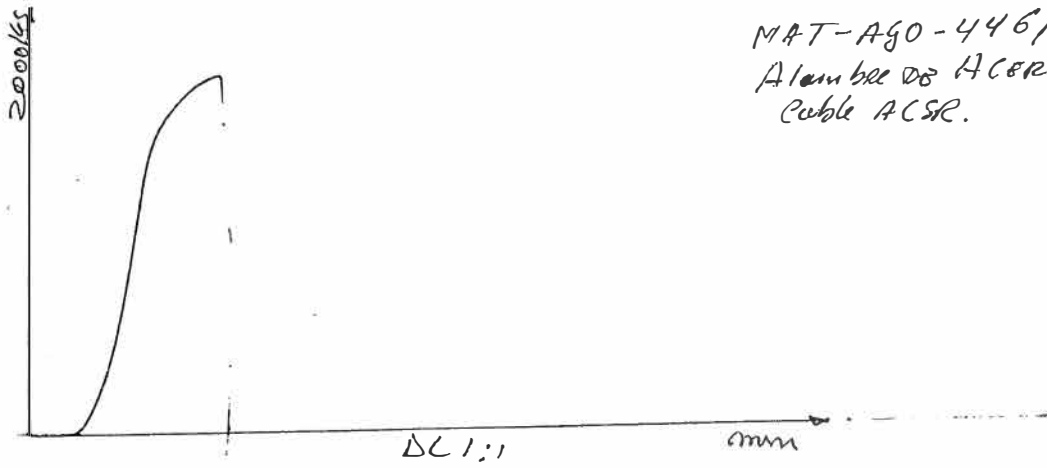
- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante
- Norma de ensayo ASTM E-92
- Carga : 5 kg. - Objetivo: 2/3"

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales

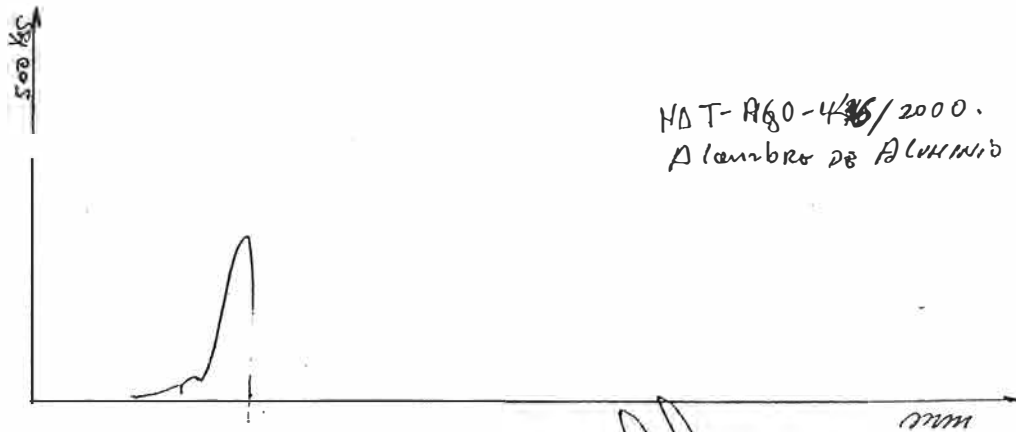
8 de 8

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Sección Ingeniería Mecánica

Ma. Ing. Roberto Lazo de Camino 211 3084
Jefe del Laboratorio de Materiales



MAT-AGO-446/2000
 Alambre de ACERO.
 Cable ACSR.



MAT-AGO-446/2000.
 Alambre de ALUMINIO

MUNICIPIAL UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 Dirección Ingeniería Estructural

M. Ing. Roberto I. de Sarmiento C.I.P. 33459
 Jefe del Laboratorio de Materiales

ANEXO C

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS DE CONDUCTORES

ACSR

TABLA Nº 3.1

CABLES DE ALUMINIO REFORZADO CON ACERO (ACSR)

CARACTERISTICAS FISICAS Y MECANICAS

Código	Calibre AWG o MCM	Sección (mm ²)		Cableado		Diámetro exterior (mm)		Peso Total (Kg/Km)	Carga de rotura (Kg)
		Aluminio	Total	Aluminio	Acero	Cable completo	Núcleo de acero		
*Wren	8	8,37	9,81	6x1,33	1x1,33	3,99	1,33	33,8	340
Turkey	6	13,30	15,48	6x1,68	1x1,68	5,03	1,68	53,7	540
Swan	4	21,15	24,71	6x2,12	1x2,12	6,35	2,12	85,4	846
Swanate	4	21,15	26,52	7x1,96	1x2,61	8,53	2,61	99,7	1.067
Sparrow	2	33,62	39,23	6x2,67	1x2,67	8,03	2,67	136	1.289
Sparate	2	33,62	42,13	7x2,47	1x3,30	8,26	3,30	159	1.650
Robln	1	42,41	49,48	6x3,00	1x3,00	9,02	3,00	171	1.612
Raven	1/0	53,51	62,39	6x3,37	1x3,37	10,11	3,37	216	1.987
Ouall	2/0	67,44	78,65	6x3,78	1x3,78	11,35	3,78	273	2.401
Pigeon	3/0	85,02	99,23	6x4,25	1x4,25	12,75	4,25	344	3.006
Penguin	4/0	107,6	125,6	6x4,77	1x4,77	14,30	4,77	433	3.787
*Owl	266,8	135	153	6x5,36	7x1,79	16,09	5,37	507	4.330
Waxwing	266,8	135	143	18x3,09	1x3,09	15,47	3,09	431	3.117
Partrldge	266,8	135	157	26x2,57	7x2,00	16,31	5,98	547	5.113
Ostrich	300	152	177	26x2,73	7x2,12	17,27	6,36	614	5.755
*Piper	300	152	188	30x2,54	7x2,54	17,78	7,62	697	7.000
Merlin	336,4	171	188	18x3,47	5x1,37	17,37	3,47	544	3.931
Linnet	336,4	171	198	26x2,89	7x2,25	18,31	6,74	689	6.730
Orlolo	336,4	171	210	30x2,69	7x2,69	18,82	8,07	784	7.865
Chickadee	397,5	201	213	18x3,77	1x3,77	18,87	3,77	642	4.499
Ibis	397,5	201	234	26x3,14	7x2,44	19,89	7,32	814	7.488
Lark	397,5	201	248	30x2,92	7x2,92	20,47	8,77	927	9.202
Pelican	477	242	255	18x4,14	1x4,14	20,68	4,14	771	5.347
Flicker	477	242	273	24x3,58	7x2,39	21,49	7,16	914	7.790
Hawk	477	242	281	26x3,44	7x2,67	21,79	8,03	977	8.880
Hen	477	242	298	30x3,20	7x3,20	22,43	9,61	1.112	10.783
*Heron	500	253	312	30x3,28	7x3,28	22,96	9,84	1.162	11.090
Osprey	556,5	282	298	18x4,47	1x4,47	22,33	4,47	899	6.233
Parakeet	556,5	282	319	24x3,87	7x2,58	23,22	7,73	1.067	8.999
Dove	556,5	282	328	26x3,72	7x2,89	23,55	8,66	1.140	10.019
Eagle	556,5	282	348	30x3,46	7x3,46	24,21	10,39	1.298	12.606
Peacock	605	307	346	24x4,03	7x2,69	24,21	8,03	1.161	9.771
Squab	605	307	357	26x3,87	7x3,01	24,54	9,04	1.240	11.018
Teal	605	307	376	30x3,61	19x2,16	25,25	10,82	1.398	13.567
*Duck	605	307	346	54x2,69	7x2,69	24,21	8,07	1.168	10.210
Kingbird	636	322	340	18x4,78	1x4,78	23,88	4,78	1.028	7.128
Rook	636	322	364	24x4,14	7x2,76	24,82	8,28	1.219	10.298
Grosbeak	636	322	375	26x3,97	7x3,09	25,15	9,27	1.302	11.427

* No especificados por normas ASTM

TABLA N° 3.2

CABLES DE ALUMINIO REFORZADOS CON ACERO (ACSR)

CABLES CON UNA CAPA DE ALUMINIO

CARACTERISTICAS ELECTRICAS **

Código	Calibre AWG & MCM	Cableado Al/Acero	R E S I S T E N C I A				Reactancia inductiva a un pie de separación 60 Hz			Reactancia capacitiva a un pie de separación 60 Hz (Megohm x Km)
			Corriente continua a 20°C (Ohms/Km)	Corriente alterna a 60 Hz			25°C (Ohms/Km)	50°C (Ohms/Km)	75°C (Ohms/Km)	
				25°C (Ohms/Km)	50°C (Ohms/Km)	75°C (Ohms/Km)				
*Wren	8	6/1	3,4017	3,4572	3,9378	4,868	0,4315	0,4938	0,5379	0,2489
Turkey	8	6/1	2,1135	2,1498	2,4487	2,6849	0,3953	0,4525	0,4810	0,2290
Swen	4	6/1	1,3278	1,3538	1,5649	1,7172	0,3754	0,4295	0,4493	0,2179
Swanata	4	7/1	1,3133	1,3387	1,5681	1,7383	0,3779	0,4413	0,4636	0,2168
Sparrow	2	6/1	0,8343	0,8527	1,0118	1,1081	0,3592	0,3990	0,4183	0,2066
Sparate	2	7/1	0,0251	0,8434	1,0162	1,1181	0,3599	0,4108	0,4245	0,2053
Robin	1	6/1	0,6621	0,6768	0,8111	0,8906	0,3505	0,3909	0,4009	0,2011
Raven	1/0	6/1	0,5243	0,5370	0,6538	0,7166	0,3418	0,3773	0,3860	0,1957
Quail	2/0	6/1	0,4160	0,4264	0,5301	0,5805	0,3331	0,3667	0,3735	0,1902
Pigeon	3/0	6/1	0,3304	0,3387	0,4288	0,4705	0,3232	0,3555	0,3599	0,1848
Penguin	4/0	6/1	0,2618	0,2697	0,3536	0,3835	0,3157	0,3449	0,3462	0,1791
Grouse	80	8/1	0,6798	0,6961	0,8726	0,9627	0,3543	0,4139	0,4208	0,1995
Petrel	101,8	12/7	0,5217	0,5289	0,6737	0,7837	0,3356	0,3866	0,4189	0,1886
Minorca	110,8	12/7	0,4792	0,4978	0,6364	0,7421	0,3325	0,3804	0,4127	0,1868
Leghorn	134,6	12/7	0,3947	0,4015	0,5252	0,6184	0,3263	0,3717	0,3984	0,1820
Guinea	159	12/7	0,3340	0,3400	0,4543	0,5376	0,3207	0,3630	0,3878	0,1780
Dotterel	176,9	12/7	0,3002	0,3064	0,4145	0,4916	0,3163	0,3567	0,3791	0,1753
Dorking	190,8	12/7	0,2782	0,2840	0,3884	0,4618	0,3132	0,3530	0,3735	0,1738
Brahma	203,2	16/19	0,2520	0,2561	0,3437	0,4295	0,3039	0,3424	0,3648	0,1678
Cochin	211,3	12/7	0,2513	0,2567	0,3574	0,4251	0,3095	0,3487	0,3667	0,1714
*Owl	266,8	6/7	0,2109	0,2436	0,2828	0,3045	0,3052	0,3288	0,3356	0,1736

No especificados por normas ASTM

Estos valores dependen de la densidad de corriente. Para más información consultar a CONAL

TABLA N° 3.5
CABLES DE ALUMINIO REFORZADOS CON ACERO
(ACSR) COMPACTADOS 6/1 *
CALIBRES NORMALES
CARACTERISTICAS FISICAS, MECANICAS Y ELECTRICAS

Código	Calibre AWG	Sección (mm ²)		Diámetro Exterior (mm)		Peso Total (Kg/Km)	Carga de rotura (Kg)	Resistencia a Corriente Cont. a 20°C (Ohms/Km)
		Aluminio	Total	Cable Completo	Núcleo de Acero			
Cod	8	8,37	9,81	3,68	1,33	33,8	340	3,423
Minnow	8	8,37	11,16	3,91	1,89	44,6	500	3,423
Sardine	8	8,37	12,84	4,19	2,38	57,6	685	3,423
Bass	6	13,30	15,48	4,62	1,68	53,7	530	2,154
Mullet	6	13,30	17,74	4,90	2,38	71,1	780	2,154
Herring	6	13,30	20,39	5,28	3,00	91,5	1.090	2,154
Pike	4	21,15	24,71	5,79	2,12	85,3	830	1,354
Pollock	4	21,15	28,26	6,17	3,00	113,0	1.230	1,354
Flounder	4	21,15	32,39	6,71	3,78	145,6	1.670	1,354
Carp	2	33,62	39,22	7,34	2,67	136	1.265	0,8507
Haddock	2	33,62	44,84	7,82	3,78	180	1.880	0,8507
Pickeral	2	33,62	51,48	8,41	4,77	231	2.625	0,8507
Shad	1	42,41	49,48	8,26	3,00	171	1.585	0,6754
Lamprey	1	42,41	56,58	8,79	4,25	226	2.355	0,6754
Sole	1/0	53,49	62,39	9,25	3,37	216	1.940	0,5351
Sculpin	1/0	53,49	71,35	9,86	4,77	285	2.950	0,5351
Hake	2/0	67,43	78,64	10,41	3,78	272	2.425	0,4245
Cusk	3/0	85,01	99,22	11,68	4,25	343	3.030	0,3367
Scup	4/0	107,2	125,10	13,11	4,77	433	3.820	0,2671

* Normas Canadienses

NOTA: Para las características eléctricas de estos cables a corriente alterna, consultar con CONAL

AUMENTO DE TEMPERATURA DE LOS TAMAÑOS NORMALES DE ACSR—DESNUDO

Velocidad del aire 0,61 metros por segundo a través del conductor

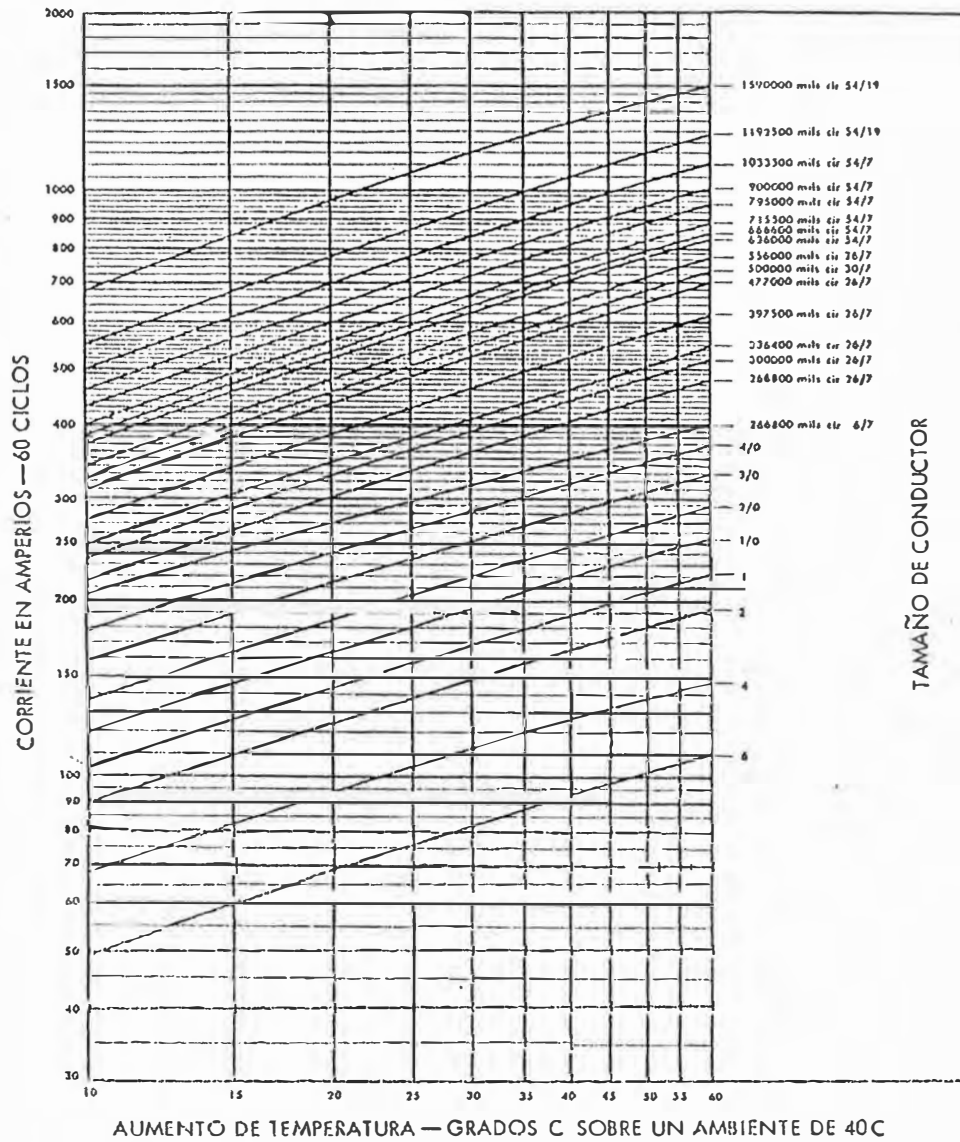


TABLA Nº 3.6

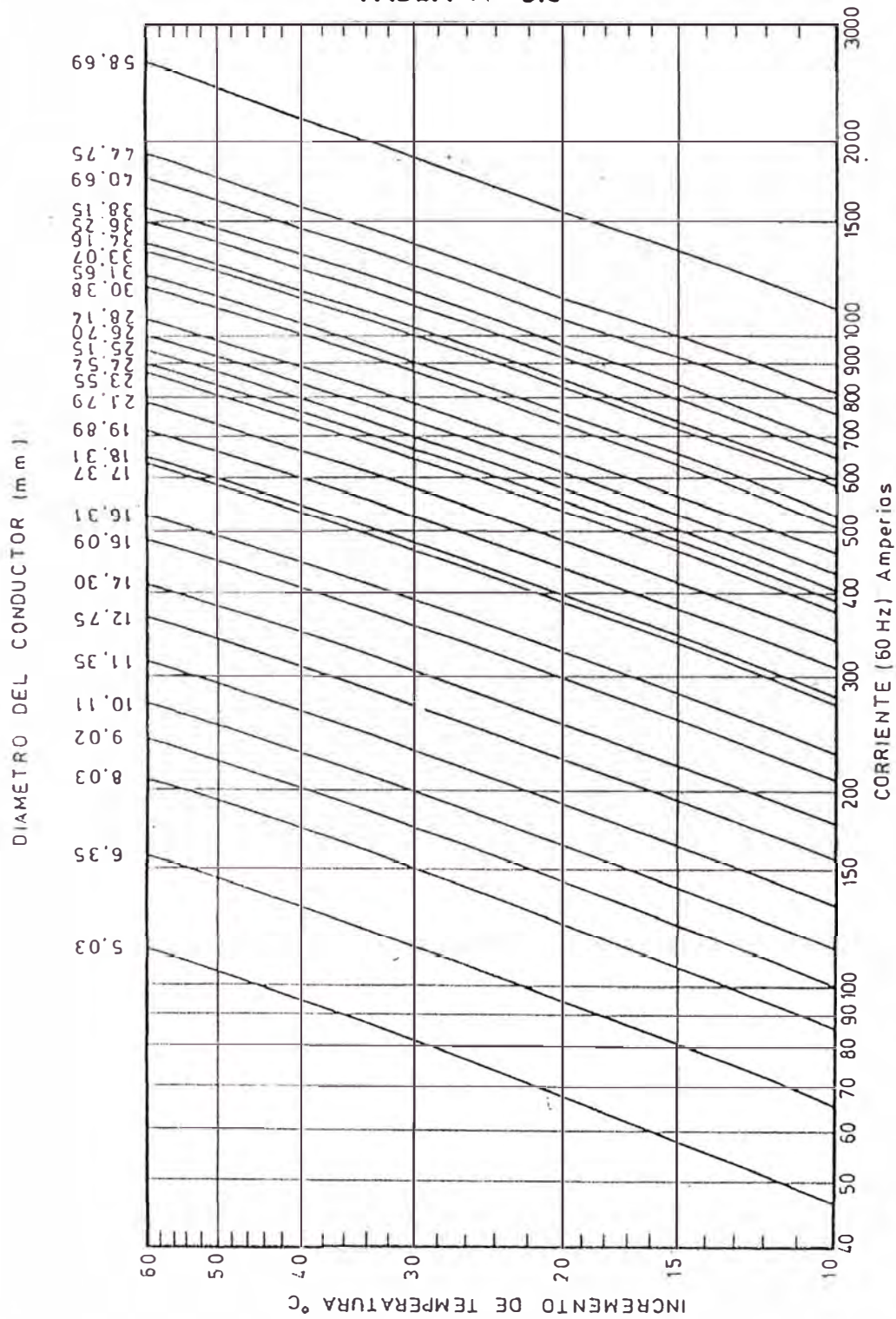


Gráfico para determinar la Capacidad de Corriente de los cables ACSR EC 61% de conductividad, al nivel del mar y sin sol Temperatura Ambiente 40°C, Emisividad (ε) 0,5 y Viento 2,19 Km/h.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ayaipoma, Duillo. Dianderas, Enrique. “Corrosión de conductores de aleación de aluminio en líneas aéreas. Conimera, Lima 1 979.
2. Galvele, José. “Corrosión”, Buenos Aires 1 979.
3. Lasheras Esteban, José María. “Materiales industriales”, Barcelona 1 981.
4. Yanque Montufar, Justo. “Corrosión de conductores eléctricos de aluminio y sus aleaciones ligeras”. Marzo, Lima 1 985.
5. Feliu Matas, Sebastián. Andrade Perdrix, Carmen. “Corrosión y protecciones metálicas”. Volumen 1, Madrid 1 991.
6. Corporación Electromecánica en Ingeniería y Construcción S.A.C. “Informe técnico estado actual del conductor de la línea de transmisión Chilina – Yura S.A.” (documento reservado), Arequipa 2 000.
7. Corporación Electromecánica en Ingeniería y Construcción S.A.C. “Evaluación de conductores del sistema en 33 kV, ciudad de Arequipa” (documento reservado), Arequipa 2 003.