

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA , MINERA Y**  
**METALURGICA**



**ESTUDIO DE CORROSION EN CABLES DE ALEACION DE**  
**ALUMINIO - LIGA Al - Mg - Si PARA LINEAS DE ALTA TENSION**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO METALURGISTA**

**PEDRO GONZALO CALDERON RODRIGUEZ**

**PROMOCION - 79 - 11**

**LIMA - PERU - 1990**

D E D I C A T O R I A

PARA MI AMADA ESPOSA CARLA, POR BRINDARME  
LA FELICIDAD PLENA QUE ENGRANDECE MI ESPI  
RITU PARA SUPERAR LAS ADVERSIDADES DE LA  
VIDA.

ASIMISMO, A MIS QUERIDOS PADRES, QUE CON  
SUS ESFUERZOS HICIERON POSIBLE CULMINAR  
CON EXITO MI CARRERA PROFESIONAL E IR SIEM  
PRE ADELANTE.

A G R A D E C I M I E N T O

A MIS RECORDADOS AMIGOS DE LA COMPAÑIA CONDUCTORES ELECTRICOS PERUANOS, CEPER; EN ESPECIAL A LOS INGENIEROS: JOSE ORTIZ Y PETER BARCLAY, POR HABERME DADO SU CONFIANZA EN LA EJECUCION DE LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO DE ALUMINIO DE LA EMPRESA.

ASIMISMO, QUIERO AGRADECER AL ING. LUIS NARVAEZ DE ELECTROPERU POR SUS DATOS SOBRE COSTOS DE CONDUCTORES DE COBRE Y ALUMINIO.

DE OTRO LADO, HAGO EXTENSIVO MI AGRADECIMIENTO AL DEPARTAMENTO DE METALURGIA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, MI CONSIDERACION AL INGENIERO JULIO UZA, CON QUIEN TUVE LA OPORTUNIDAD DE DISCUTIR LA PRESENTE TESIS.

FINALMENTE, MI ETERNO AGRADECIMIENTO A MI QUERIDA HERMANA RITA, POR EL TRABAJO MECANOGRAFICO DE ESTE TRABAJO.

R E S U M E N

El presente trabajo de tesis trata de una serie de pruebas de tratamiento térmico de resolubilización de la aleación Al-Mg-Si y estudio metalográfico de muestras de líneas conductoras de alta tensión de este tipo de aleación.

El estudio fué realizado en la Compañía Conductores Eléctricos Peruanos "CEPER" en coordinación con el ITINTEC.

Se realizaron pruebas de trefilación soldadura, tratamientos térmicos para hallar los parámetros óptimos de trabajo. El estudio metalográfico de las muestras proporcionadas por Electrolima de líneas que habían fallado en el uso, evidencian una corrosión por pitting o por puntos; y el análisis del polvo exterior reportó aniones corrosivos cloro y sulfatos que son muy dañinos para el aluminio, pudiendo evidenciar una contaminación industrial.

En las recomendaciones se menciona el uso de grasas protectoras. El ambiente de la costa de Lima es muy severa, por tal motivo debe tenerse cuidado la selección del conductor.

Este trabajo también dá información de procesos de fabricación de alambres, estadísticas de producciones y una evaluación económica general de comparación de dos conductores eléctricamente equivalentes de cobre y aluminio, mostrando la mayor economía en el uso de aleación de aluminio.

I N D I C E

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
INDICE	IV
CAPITULO N° 1 - GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 EXPOSICION DE MOTIVOS	2
1.3 RECOMENDACIONES DEL TEMA	3
CAPITULO N°2 - MATERIA PRIMA	7
2.1 MINERALES DE BAUXITA	7
2.1.1 EXPLOTACION DE BAUXITA	
2.1.2 LA BAUXITA EN EL MUNDO	
2.1.3 DESARROLLO DE LA PRODUCCION	
2.1.4 EL IMPACTO DE LA OPEC Y LA FORMACION DE LA IBA	
2.2 LA FABRICACION DE LA ALUMINA	11
2.2.1 PROCEDIMIENTO BAYER	
2.2.2 NUEVOS PROCEDIMIENTOS PROCESO H <sup>+</sup> DE LA ALUMINUM PECHINEY	
2.2.3 LOS GRANDES PRODUCTORES MUNDIALES	
2.3 ELECTROMETALURGIA DEL ALUMINIO	15
2.3.1 TEORIA DE LA ELECTROLISIS	
2.3.2 PROCESO HALL-HEROULT	
2.3.3 LA REFINACION DEL ALUMINIO	
2.3.4 PRODUCTORES DE ALUMINIO	

2.4	APLICACIONES Y PRODUCTOS DE ALUMINIO	20
2.4.1	APLICACIONES EN LA AERONAUTICA	
2.4.2	APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ	
2.4.3	APLICACIONES EN LOS FERROCARRILES	
2.4.4	APLICACIONES EN LA MARINA	
2.4.5	APLICACIONES EN ELECTRICIDAD	
2.4.6	APLICACIONES EN LA CONSTRUCCION	
2.4.7	APLICACIONES EN PROCESOS QUIMICOS	
2.4.8	APLICACIONES MISCELANEAS	
CAPITULO N° 3 - FABRICACION DE ALAMBRON DE ALEACION		
	DE ALUMINIO	36
3.1	PROCESO DE FABRICACION	36
3.1.1	PRENSA SEMICONTINUA DE TOCHOS REDONDOS	
3.1.2	LAMINACION DE TOCHOS CUADRADOS	
3.1.3	FUNDICION, SOLDIFICACION Y LAMINACION CONTINUA	
3.2	SISTEMA PROPERZI PARA LA ALEACION Al-Mg-Si	37
3.2.1	DESCRIPCION DEL EQUIPO	
3.2.2	FUSION	
3.2.3	ENFRIAMIENTO EN LA RUEDA DE VACIADO	
3.2.4	LAMINACION	
3.2.5	DEFINICION DE PARAMETROS	
3.3	TRATAMIENTOS TERMICOS DE ALAMBRON ALEACION Al-Mg-Si	40
3.3.1	TRATAMIENTO DE SOLUBILIZACION	
3.3.2	TRATAMIENTO DE TEMPLADO (QUENCHING)	
3.3.3	TRATAMIENTO DE ESTUFA	

3.4	CONTROL DE PROPIEDADES FISICAS Y ELECTRICAS	42
3.4.1	PROPIEDADES MECANICAS	
3.4.2	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	
3.4.3	CONTROL DE ESTRUCTURA METALOGRAFICA	
CAPITULO N° 4 - PRODUCCION DE ALAMBRES Y CUERDAS DE ALUMINIO		46
4.1	PROCESOS DE FABRICACION	46
4.1.1	LAMINACION DE TOCHOS	
4.1.2	EXTRUSION SEMICONTINUA DE TOCHOS	
4.1.3	LAMINACION CONTINUA DE LINGOTES	
4.2	CARACTERISTICAS DE LOS ALAMBRES TREFILADOS	47
4.2.1	CARACTERISTICAS MECANICAS	
4.2.2	CARACTERISTICAS ELECTRICAS	
4.3	DESCRIPCION DE PRUEBAS DE SOLUBILIZACION, TREFILACION Y ENVEJECIMIENTO DE LA ALEACION Al-Mg-Si	48
4.3.1	SOLUBILIZACION	
	A. TRATAMIENTO	
	B. TEMPLADO DE AGUA	
	C.. RESULTADOS OBTENIDOS	
4.3.2	TREFILACION	
4.4	SOLDADURA DE ALAMBRES	52
4.4.1	SOLDADURA EN FRIO (COLD PRESSURE WELDING)	
4.4.2	SOLDADURA DE TOPE ELECTRICO (ELECTRIC BUTT WELDING)	
4.5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES EN LA FABRICACION DE ALAMBRES	55
4.5.1	CONCLUSIONES	
4.5.2	RECOMENDACIONES	

CAPITULO N° 5 - ESTUDIO DE LA RESOLUBILIZACION Y SOLDADURA DE ALAMBRONES DE ALUMINIO-MAGNESIO-SILICIO	61
5.1 ENVEJECIMIENTO DE LOS ALAMBRONES	
5.2 SISTEMA Al-Mg-Si	62
5.3 TRATAMIENTO DE RESOLUBILIZACION DE ALAMBRONES ENVEJECIDOS	64
5.3.1 CONTROL DE PROPIEDADES MECANICAS Y ELECTRICAS	
5.3.2 TRATAMIENTO TERMICO DE RESOLUBILIZACION	
5.4 EFECTOS DE TEMPERATURA Y TIEMPOS DE SOLUBILIZACION	66
5.4.1 TRATAMIENTOS TERMICOS EFECTUADOS EN LA UNI	
A. TRATAMIENTO	
B. RESULTADOS OBTENIDOS	
5.4.2 TRATAMIENTOS TERMICOS EFECTUADOS EN CEPER	
A. PROCEDIMIENTO	
B. TRATAMIENTOS TERMICOS PARA EL CALCULO DE LA TEMPERATURA OPTIMA	
C. TRATAMIENTOS TERMICOS PARA HALLAR TIEMPO OPTIMO	
D. RESULTADOS OBTENIDOS	
5.5 SOLDADURA DE ALAMBRONES	70
5.5.1 CONDICIONES INICIALES	
5.5.2 PROCEDIMIENTO PARA LA SOLDADURA DE LOS ALAMBRONES	
5.5.3 CONDICIONES PARA EL ESTUDIO DE LA SOLDADURA	
5.5.4 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	
CAPITULO N° 6 - ESTUDIO DE CORROSION DE CABLES DE ALEACION DE ALUMINIO EN EL PAIS.	91
6.1 PROBLEMAS ENCONTRADOS EN EL PAIS	
6.2 ANALISIS METALOGRAFICO DE LA CORROSION DE LAS MUESTRAS	92
6.2.1 MATERIAL Y EQUIPO	

## VIII

6.2.2	ANALISIS QUIMICO DEL POLVO	
6.2.3	RESULTADOS DE LOS ANALISIS METALOGRAFICOS	
6.3	RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	95
CAPITULO N° 7 - CONCLUSIONES		118
7.1	ASPECTO TECNICO	118
7.1.1	MATERIA PRIMA	
7.1.2	SOLDADURA DE ALAMBRONES	
7.1.3	TREFILACION	
7.1.4	TRATAMIENTOS TERMICOS	
7.1.5	CABLEADO	
7.1.6	AMBIENTES DE USO	
7.2	ASPECTO ECONOMICO	122
CAPITULO N° 8 - BIBLIOGRAFIA		128
CAPITULO N° 9 - ANEXOS		130

## CAPITULO N° 1 - GENERALIDADES

La presente tesis titulada "ESTUDIO DE CORROSION EN CABLES DE ALEACION DE ALUMINIO - LIGA Al-Mg-Si PARA LINEAS DE ALTA TENSION", resume las actividades realizadas dentro de un proyecto de investigación efectuado en la firma Conductores Eléctricos Peruanos - CEPER, en coordinación con el Instituto de Investigación Industrial y de Normas Técnicas ITINTEC. Respetando las informaciones reservadas de las empresas que han participado en el trabajo, brinda sus resultados a quienes les puedan ser de suma utilidad en situaciones similares, especialmente tratándose de una nueva aleación de aluminio, magnesio, silicio (AAAC), que ofrece ventajas en la resistencia mecánica.

### 1.1 Antecedentes.-

En la década del setenta, en vista de la prohibición de importaciones de productos terminados por parte del gobierno militar, para poder dar oportunidad de trabajo a las empresas nacionales, se autorizó la importación de materia prima en forma de alambre de 9.5 mm de diámetro a las compañías Ceper e Indeco para fabricar cuerdas de aleación de aluminio (AAAC), para abastecer la demanda nacional del programa de Electrificación.

Al cabo de un corto tiempo de uso, Electrolima reportó que las cuerdas de aleación de aluminio de líneas aéreas de alta tensión ubicadas en la zona de la costa, presentaban fallas como rotura de la cuerda, alambre y fusión por corto circuito.

Este problema se consideró propio del país, debido a que no se habían reportado iguales situaciones en otros países, en donde el tiempo de vida del conductor de aleación de aluminio duró varios años.

Ante este problema, Electrolima como usuario perjudicado en su economía decidió el envío de conductores fallados a Suecia, a la Universidad de Uppsala al Programa de Ciencia de los Materiales, pero en cuyos resultados no ayudaban a buscar una solución al problema.

Se recurrió al Itintec y empresas fabricantes, teniendo como resultado que existe una escasa Literatura sobre el tipo de aleación y problemas similares, dado que era una nueva aleación.

## 1.2 Exposición de Motivos.-

Ante el problema planteado que se hacía más perjudicial para el usuario y para el mismo país en pérdidas de divisas en vista que la materia prima tenía procedencia extranjera.

Surgió así la necesidad de afrontarlo para lo cual se formó un proyecto titulado:

" PROBLEMAS EN LA TRANSFORMACION DE EMPLEO DE LOS CONDUCTORES DE ALEACION DE ALUMINIO ".

En donde los objetivos buscaban resolver los problemas en la fabricación y el estudio de la corrosión de muestras proporcionadas por Electrolima de varias zonas en donde se habían reportado fallas en su uso.

Así, por acuerdo de Ceper e Itintec, se montó dicho proyecto, financiándose con renta de Ceper, adquiriéndose de esta manera materia prima importada de tres procedencias, equipos y materiales adecuados para la ejecución de las actividades programadas en el Proyecto en mención.

El estudio del proyecto abarcó tres áreas:

- Pruebas de tratamiento térmico para hallar temperatura y tiempo óptimo de resolubilización.

Transformación a alambres, soldadura, atmósferas de uso.

Estudio metalográfico de las muestras corroídas.

Este trabajo se orienta a brindar una metodología de estudio y resume los resultados obtenidos enfocando el aspecto metalográfico del tema. No intenta describir todo el trabajo realizado en el proyecto dado la naturaleza de reserva propia en las empresas participantes.

Los proyectos de investigación Tecnológica Industrial con financiación de la renta neta de las empresas, son muy importantes porque permite que se perfeccione el personal técnico en el área de investigación, implementación de equipos y contribuir con tecnología propia en nuestro país. Además, el Itintec se vería fortalecido de estas experiencias ya que como fiscalizador de los proyectos vigila la ejecución de todas las actividades propuestas.

Así, se podrían ayudar a otras empresas mediante la ayuda técnica eficiente canalizadas a través del Itintec.

### 1.3 Recomendaciones del Tema.-

Para brindar una mayor información sobre aluminio se ha considerado dedicar varios capítulos para describir los procesos a que tiene que ser sometido la materia prima como mineral de aluminio hasta la fabricación de alambres. Así tenemos:

El capítulo 2 proporciona información de productores de bauxita, alumina y aluminio en el mundo. Se describe las etapas que se siguen para obtener aluminio puro. Estos procesos no son empleados en el país por carecer del mineral de bauxita y mucho menos de una empresa que se dedique a la obtención del aluminio, metal que es importado en su totalidad.

En la parte final se describe los diferentes usos del aluminio en las diversas industrias.

El Capítulo 3, da información de la forma como se producen la aleación de aluminio, a partir de aluminio puro aleado con magnesio y silicio, hasta la fabricación de alambón, que es la materia prima para la producción de alambres. Es interesante el empleo de este tipo de aleación dado que a pérdida de un poco de su conductividad eléctrica, debido a los aleantes magnesio y silicio, se obtiene una resistencia mecánica similar a la del acero, a pesar de tener la tercera parte de su densidad.

El Capítulo 4, describe el proceso de transformación de alambón hasta alambres, soldadura de los mismos y tratamientos térmicos a que se somete. Mayor experiencia se ha obtenido por la ejecución del proyecto en este campo, complementando así a la vasta experiencia que se tiene en la producción de alambres de cobre.

El Capítulo 5, detalla los estudios de tratamientos térmicos para hallar el punto óptimo de resolubilización de la aleación de aluminio. Estas series de pruebas se efectuaron para retardar el fenómeno de envejecimiento natural en la cual los aleantes forman precipitados de  $Mg_2Si$  que hace la estructura más dura y menos elástica al transcurso del tiempo. El tratamiento de resolubilización contrarresta este fenómeno brindando las mismas condiciones de fabricación, aunque no impide el fenómeno aludido prosiga, dado que es propio de este tipo de aleación. Asimismo, se realizaron pruebas de soldadura de alambres envejecidos que comprueba la baja elasticidad que poseen y que durante el trefilado a diámetros menores presenten muchas roturas durante el proceso.

El Capítulo 6, trata de los análisis metalográficos efectuados a todas las muestras proporcionadas de líneas que habían fallado en uso. Se muestra una serie de fotografías, donde se observa la intensa corrosión que sufrieron y la severidad del ambiente en donde fueron empleadas.

El Capítulo 7, resume las conclusiones y resultados de los capítulos anteriores, en las que se menciona la posibilidad de contaminación industrial ( quema de caña de azúcar ), que evidencian análisis de aniones sulfatos. Como prevención se recomienda el uso de grasas neutras de alto punto de goteo, para evitar su descomposición a la temperatura del ambiente y del calor generado por el paso de energía de alta tensión por el conductor.

Asimismo, se evidencia la importancia de trabajar con aleación de aluminio que tengan la característica de recién fabricados o en su defecto que no excedan de 4 meses de elaboración, para facilitar la transformación a alambres y tratamientos térmicos posteriores que proporcionará al alambre las características de la Norma ASTM necesaria.

Se deja abierto el tema para un proyecto que trate de la sustitución de las líneas aéreas de aleación de aluminio por líneas aéreas de cobre metal, que abunda en nuestro país y el que soportaría mejor la corrosión del ambiente. Teniendo que profundizar en materia económica, que es un factor limitante para su uso. La presente tesis resume la comparación de dos líneas de alta tensión eléctricamente equivalentes ( 60 KV ) de cobre y aluminio, siendo este último que muestra una mayor ventaja económica en lo que respecta al montaje.

Este proyecto podría ser realizado por tres empresas: Ceper o Indeco, como fabricantes, Electrolima o Electroperú como usuarios y el Itintec

como fiscalizador, Dicho proyecto se financiaría con rentas netas de estas empresas y podría ser la solución el empleo del cobre en la electrificación en el país, aunque el costo social sea alto, ayudaría a evitar la fuga de divisas y menor dependencia del extranjero.

## CAPITULO N° 2 - MATERIAS PRIMAS:

En este capítulo se describirá la transformación de aluminio a partir de su materia prima bauxita. La demanda ha crecido casi a 8% anual en las dos décadas pasadas. Aunque la proporción de incremento se espera que disminuya a menos del 5% a fines del presente siglo. Nuevas fuentes de bauxita habrán que desarrollarse, nuevas refineras de aluminio y fundiciones de aluminio tendrán que ser construídas para satisfacer esta demanda.

**2.1 Minerales de Bauxita:** El aluminio es el elemento mayor expandido dentro de la naturaleza después del oxígeno y el silicio. Más expandido que los otros metales: fierro, cobre, estaño, metales preciosos, etc.

Representa cerca del 7% de la corteza terrestre.

Los minerales oxidados de aluminio son llamados bauxitas, sus composiciones químicas son variables. En la tabla 2.1 se resumen ejemplos de elementos contenidos dentro de las bauxitas de diferentes orígenes actualmente explotadas y la producción de bauxita mundial.

Las bauxitas de menor contenido de silicio son utilizadas para la industria de aluminio, que representa el 95% de consumo mundial.

Las bauxitas de mayor contenido de silicio y por cierto muy escasos de encontrar, se utilizan en industrias diversas, tales como refractarios, abrasivos, cementos, industrias químicas, etc.

La alúmina hidratada se presenta en la naturaleza bajo tres formas mineralógicas: Gibbsita, Boehmita, Diáspora.

Las bauxitas de edad reciente de los países de humedad tropical son principalmente gibbsitas.

Los países más antiguos donde ha ocurrido una evolución muy inten

sa se encuentran boehmitas.

Las bauxitas diásporas son las menos expandidas y son una proporción variable de la boehmita.

Para obtener una libra de aluminio se debe tratar 2 libras de alúmina.

La cantidad necesaria de bauxita para obtener dos libras de alúmina varía de 4 a 7 libras, en función de la calidad de la materia prima, tal como se aprecia en el esquema 2.1.

2.1.1 Explotación de la Bauxita.- La explotación de la bauxita está limitada por las condiciones logísticas del yacimiento. Los costos de transporte terrestre y marítimo de la bauxita al puerto y a la fábrica, influyen en el precio global y aumenta el costo de mina. Este costo es proporcional a la distancia y cantidad producida.

Un rol importante juega la calidad: bauxitas de 30 a 35% deben ser tratadas para conseguir condiciones favorables que le permitan alcanzar por lo menos 50% de alúmina y que puedan ser transportadas a largas distancias.

2.1.2 La bauxita en el mundo.- Las formaciones bauxíticas existen en todos los continentes. Los yacimientos más viejos, encontrados en Siberia datan de la era primitiva y los encontrados en Europa datan de la era secundaria, están formadas en la superficie del suelo y están sometidas a transformaciones geológicas, tectónicas y epigenéticas.

En la tabla 2.2 se resumen las reservas mundiales de bauxita.

La necesidad de la industria mundial de aluminio, aceleró la prospección minera y el descubrimiento de nuevos yacimientos Brasil, Jamaica, Guinea Continental, yacimientos en Australia, etc.

Durante la época de las guerras mundiales con el desarrollo de Estados Unidos en aluminio, el consumo creció enormemente. La producción europea de bauxita sin considerar Rusia representaba casi el 60% de la producción mundial el año 1935 a 1938. En la actualidad se encuentra cerca del 15% mundial.

Europa antes de la guerra, era exportador, ahora se ha convertido en un gran importador.

2.1.3 Desarrollo de la Producción.- Se debe a cuatro factores el aumento de la producción de bauxita.

- a) Concentración de los yacimientos.- Las reservas de Jamaica son del mismo orden de las reservas de Europa Occidental. Esta fuerte concentración se observa también en: Guinea, Camerún, Australia. Resulta de gran facilidad la explotación, ya que los yacimientos son superficiales y susceptibles a explotación con máquinas de fuerte productividad.
- b) Calidad del mineral.- La mayor parte de los minerales bauxíticos son de calidad superior a minerales actualmente explotados en Europa. Además son de menores contenidos de silicio y generalmente de más alúmina.
- c) Incidencia del problema de medio ambiente.- Son zonas de pocos habitantes, no comparables a problemas encontrados en

Europa donde se tiende a disminuir la producción minera.

d) **Desarrollos de medios de transporte Intercontinentales.-**

Los transportes en trenes para minerales han hecho grandes progresos. Los transportes marítimos han progresado más con siderablemente. Antes de la guerra mundial se transportaban 10,000 toneladas, ahora las mayores capacidades son de 250,000 toneladas, transportados por vía marítima.

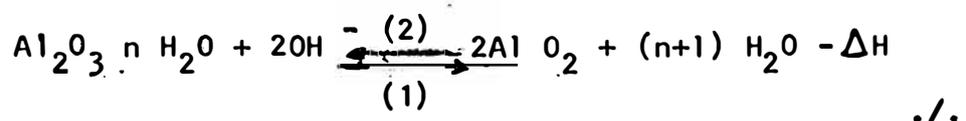
- 2.1.4 El impacto de la OPEC y la Formación de la IBA.- The International Bauxite Association (IBA) se estableció en un congreso en Conakry, Guínea en Marzo 1974. Siete naciones productoras de bauxita fueron los miembros originales: Australia, Guínea, Jamaica, Sierra Leona, Surinan y Yugoslavia. La República Dominicana, Ghana, Haití e Indonesia, luego se unieron para formar un total de 11 naciones, las cuales juntas producen aproximadamente las tres cuartas partes del total de bauxita del mundo. Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC) en 1973 de un precio de \$ 1.8 el barril, lo incrementó a \$ 2.59 en 1972, dobló a 5.11 en Octubre 1973 y doblando otra vez en Diciembre a \$ 11.65, un incremento de seis veces. Jamaica experimentó una baja de sus reservas monetarias para solo un mes de importaciones, ya que de un consumo de petróleo equivalente a \$ 55 millones en 1972 se elevó a \$ 165 millones en 1974. La mayoría de los países pertenecientes al IBA, tuvieron que renegociar sus producciones de bauxitas con las industrias productoras de aluminio.

2.2 La fabricación de la Alúmina.- La materia prima de la producción de aluminio por electrólisis es la alúmina (óxido de aluminio). La primera preparación industrial de aluminio fué realizada por Sainte-Claire Deville, por el año 1858, utilizó un carbonato por vía seca.

Este procedimiento consistió en un ataque a 1000 - 1100°C de la bauxita mezclada con carbonato de sodio, seguida de una separación de los insolubles y la recuperación del líquido. La precipitación de la alúmina se realizó por acción del gas carbónico sobre el aluminato líquido. Las concentraciones de los líquidos de ataque permitían ser reutilizados y la recuperación del carbonato de sodio. El inconveniente que presenta este procedimiento es el consumir mucha energía calorífica.

La experiencia del método anterior, sirvió como base para el método que se utiliza universalmente que es "El procedimiento Bayer" para tratamiento de bauxitas.

2.2.1 El procedimiento Bayer.- La disolución de la bauxita por la soda cáustica con separación de insolubles, hidrólisis de los líquidos saturados para precipitar el trihidrato de alúmina. La alúmina presente en la bauxita está bajo la forma monohidratada (Boehmita o diáspora), o de un trihidrato. Es atacada por una solución de aluminato de sodio. La soda libre contenida en el licor, disuelve la alúmina según la reacción del equilibrio siguiente:



Para permitir el desarrollo del ataque según el sentido (1) se debe concentrar el licor en soda y calor. Desde el inicio del ataque, la suspensión es diluída. Por filtración y lavado se separa una solución concentrada de aluminato sódico de los lodos rojos, siguiendo a continuación un enfriamiento. La dilución y el enfriamiento del líquido origina la precipitación de la alúmina según el sentido (2) de la reacción anterior.

La solución de aluminato diluído es ayudada con alúmina procedente de una operación anterior. Estos gérmenes constituye centros de precipitación de la alúmina durante la hidrólisis.

La alúmina precipitada es filtrada y lavada obteniéndose soluciones de soda diluída que son retornadas. La alúmina purificada es calcinada a 1200°C para ser utilizada en la electrólisis. Los datos técnicos de lo necesario para la producción de alúmina, así como del resultado de análisis se resumen en la tabla 2.3 y el esquema 2.2

#### 2.2.2 Nuevos Procedimientos.- Proceso H<sup>+</sup> de la Aluminum Pechiney :

Hasta la fecha a excepciones particulares, se extrae el aluminio solamente de la bauxita, mineral que presenta sobre las rocas aluminíferas la ventaja de contener el aluminio bajo la forma de alúmina más o menos hidratada, pero en estado libre, es decir notablemente combinada con la sílice, entonces es justificable una disolución selectiva por soda cáustica según el Procedimiento Bayer.

Las fuentes de bauxita no son inagotables. A medida que su consumo se acrecienta, siguiendo una progresión geométrica, son los yacimientos más ricos y los mejores ubicados los que agotan en prioridad. En consecuencia la alúmina Bayer tiende a progresivamente volverse más y más costosa. Llega así el momento donde el tratamiento de rocas aluminíferas comunes revelan ser económicas como la bauxita, sobretodo si estas rocas pueden ser encontradas en la proximidad de grandes centros de consumo de metal. Para atacar al mineral de aluminio la compañía Aluminum Pechiney ha escogido el ácido sulfúrico en razón a dos ventajas importantes: por su precio relativamente bajo, y por su débil volatilidad que permite operar cómodamente fuertes concentraciones y a alta temperatura. Su inconveniente es que las condiciones de cristalización del sulfato de alúmina solamente permite una purificación mediocre del sulfato y por consiguiente de la alúmina resultante.

Para superar el problema se ha seguido el artificio de cambiar de ácido en el curso del proceso, a un cierto estado se pasa de un medio sulfúrico a un medio clorhídrico, consiguiendo así excelentes características de cristalizaciones de cloruro de aluminio. De suerte tal que la alúmina obtenida es de alta pureza, muy superior a aquella obtenida por el proceso Bayer. No solamente la calidad química

es irreprochable, sino también las condiciones físicas son ventajosas. Este proceso llamado "H<sup>+</sup>", permite mejor que el proceso Bayer de controlar la granulometría y por consiguiente de obtener una alúmina donde el comportamiento en las cubas de electrólisis es de todo punto de vista excelentes. El proceso H<sup>+</sup> vá hacia el futuro desde 1974, presentando un interés económico que será reforzado rápidamente con el ritmo de desarrollo del aluminio, dentro de poco nuevas plantas de alúmina serán alimentadas de bauxita en condiciones menos favorables en cuanto a costo y calidad.

Por el contrario, el procedimiento desarrollado se acomoda a los más variados minerales.

La producción de aluminio podrá proseguir buen tiempo su crecimiento sin que estas materias primas se rarifiquen de maneras sensible. Cuando las pruebas concluyan el procedimiento será puesto en marcha en fábricas a escala plenamente industrial y ganará una buena posición competitiva que será mejorado por el transcurso de los años.

La fabricación de la alúmina exige de grandes inversiones que asegure el mantenimiento de las fábricas existentes aunque sean muy antiguas. Se excluye por regla general que el nuevo proceso no compromete la sobrevivencia de las plantas Bayer actualmente en explotación, debido al gran capital que está involucrado.

./.

2.2.3 Los grandes productores mundiales.- La producción de casi el 90% de alúmina es realizada por diez sociedades. Los países productores de alúmina tienen comprometida su producción con estas sociedades. En la tabla 2.4 se resumen la producción de alúmina mundial y la relación de las sociedades productoras.

2.3 Electrometalurgia del aluminio.- La fabricación del aluminio por electrólisis fué establecido por Heroult en 1886. El procedimiento consiste en descomponer la alúmina disuelta en un baño de criolita fundida, por la corriente eléctrica que llega al baño por medio de electrodos de contacto con la cuba de carbón aglomerado sumergidos en el baño.

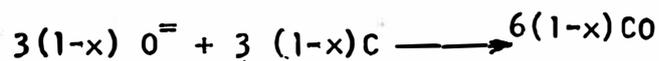
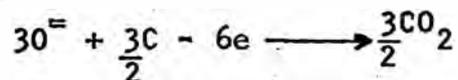
La combustión produce la descomposición de la alúmina empleando una corriente de pequeña tensión. El oxígeno se dirige al ánodo y arde con el mismo, el aluminio se deposita en el fondo. El ánodo se reemplaza después de la combustión. La corriente eléctrica produce el calor suficiente para mantener la alúmina en fusión.

2.3.1 Teoría de la Electrólisis.- La temperatura de fusión de la alúmina (2040°C) es muy elevada para que la electrólisis de la alumina fundida sea relizable industrialmente y sea necesario de utilizar un fundente la criolita  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , que se encuentra al estado natural en Groenlandia ó es fabricado en parte industrialmente a partir del espato fluor. Los productos de criolita permiten efectuar la electrólisis

de la alúmina a una temperatura un poco inferior a los 1000°C.

Si despreciamos la acción del solvente en la naturaleza de los iones en la solución, el mecanismo de electrólisis realizado con un ánodo consumible de carbono y un cátodo en aluminio líquido puede ser representado en forma muy esquemática por las ecuaciones siguientes:

Reacción en el ánodo:



Reacción en el cátodo:



Electrolito



Debe entenderse que este esquema asume que el oxígeno producido combustiona en el ánodo formando simultáneamente CO y CO<sub>2</sub> en proporciones variables y el aluminio es reducido en el cátodo.

Partiendo de la ley de Faraday, una corriente de un ampere debe producir un depósito de 0.336 gr de aluminio en una hora. Sin embargo, la experiencia muestra que este valor teórico solo alcanza un rendimiento real del formulado por Faraday en el orden del 90%.

Después de trabajos realizados se ha encontrado las dos causas principales que son:

./.

- La reducción de la alúmina por  $\text{CO}_2$  formado en el ánodo según la reacción:



- La existencia de un ión de valor inferior que podría ser  $\text{Al}^+$  que sucesivamente se oxida en el ánodo y se reduce en el cátodo con la correspondiente pérdida de corriente.

### 2.3.2. Proceso Hall Heroult.-

El aluminio primario es producido por electrólisis de aluminio en un baño de criolita natural o sintética ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), la cual sirve como un electrolito y un solvente de la alúmina. Las celdas de reducción son de volúmenes de 20 a 70  $\text{m}^3$ , revestidas de carbón, y conectadas en serie de 100 a 240 celdas formando una fila. De 300 a 1400 kilos de aluminio se producen por día en cada celda. El recubrimiento de carbón que sirve de cátodo usualmente debe ser cambiado cada 3 a 4 años. La criolita y el fluoruro de aluminio son agregados al electrolito para mantener la proporción deseada de sodio y aluminio. El ánodo de carbón, el cual es consumido durante la operación es reemplazado por el método continuo Soderberg. La resistencia del baño es suficiente para mantener un óptimo alrededor de los 950 - 980°C. A esta temperatura los rangos del baño son de 3 a 10% en alúmina.

./.

Cada 1 ó 2 días el aluminio fundido es removido del fondo de la celda por un sifoneado a vacío, Las celdas utilizan corriente directa de 65,000 a 150,000 amperios, la mayoría de las plantas usan de 80,000 a 100,000 amperios por celda. La densidad de corriente anódica varía de 600 a 800 amperios/pie cuadrado.

La caída de voltaje de celda es 4.5 a 5.0 voltios, y de fila 1000 voltios.

La eficiencia de corriente varía de 85 a 90%. Las pérdidas son principalmente causadas por vaporización, físicas, reoxidación de aluminio.

2.3.3 La refinación del aluminio.- El aluminio ordinario obtenido de cubas electrolíticas, tienen un promedio de 99.7%, las impurezas principalmente son el fierro y el silicio. Con precauciones muy particulares se fabrican a veces una pureza de 99.9%. Un procedimiento de refinación electrolítica por vía ígnea, se llevó a cabo en Francia en 1932, obteniéndose un aluminio de más de 99.99%, llamándose aluminio refinado, que tiene propiedades particulares de uso muy importantes. En Francia, Aluminum Pechiney utiliza un baño formado por halógenos de metales alcalinos o alcalinos térreos en estado fundido preparados a partir de aluminio electrolítico, sobre el cátodo se recogerá el metal purificado. En la celda electrolítica del esquema 2.3 constituida por una masa refractaria con solera de carbono, los tres líqui

dos (aluminio que hay que purificar, baño de sal y al  
uminio purificado) se superponen por diferencia de densi  
dad. Para lograr esto el aluminio a purificar se le a  
ña de cobre o silicio, lo que aumenta su densidad a  
proxima  
damente hasta 3 a unos 950°C, las composiciones u  
tiliza  
das son Al/Si: 88/12 ó Al/Cu: 67/133.

- El electrolito está formado por una mezcla de fluoruros de aluminio de sodio y de bario cuya densidad es de 2.7 a 950°C. A esta temperatura la densidad del aluminio es de 2.3 de forma que las tres capas se separan. Las cubas funcionan a unos 950°C bajo una intensidad de 10,000 a  
m  
perios y 7 voltios. Esta operación<sup>f</sup> suministra las c  
a  
racterísticas ideales de operación:

Metal	Metal Corriente %	Metal Purísimo %
Al	99.5	99.998
Fe	0.28	0.0002
Si	0.28	0.0009
Cu	0.006	0.0003

Para producir una pureza más elevada esta electrólisis se puede repetir y el aluminio alcanza entonces una r  
i  
queza de 99.995%. Es este el aluminio que se toma como p  
a  
rtida para la fusión por zonas.

El rendimiento Faraday es del 99% en el cátodo. El consu  
mo para producir una tonelada de aluminio refinado en p  
r  
medio es: 16,000 kWh en continuo

1,030 Kg de aluminio

8 Kg de cobre

./.

65 Kg baño

7 Kg de grafito

2.3.4 Productores de Aluminio.- Los cuatro principales productores de aluminio en el mundo son:

- Aluminum Company of America ALCOA
- Aluminum Company of Canada ALCAN
- Reynolds Metals Company (USA)
- Pechiney Ugine Kuhlmann (Francia)

En la tabla 2.5 se resumen la producción mundial de aluminio primario.

2.4 Aplicaciones y Productos del Aluminio.- el aluminio y sus aleaciones son esenciales en la industria moderna. En cualquier campo de producción juega un rol muy importante.

El gran número de manufacturas simples o complejas fabricadas, aprovechan las propiedades físicas y mecánicas tales como ser liviana, de fácil trabajo, metal atractivo, etc. La tendencia no es solo de fabricar nuevos productos, sino la adaptación del aluminio en lugar de productos ferrosos..

Los nuevos avances en el desarrollo de aleaciones livianas, han incrementado su uso y así puede ser empleado con muchas ventajas. Así ha logrado ganar el primer lugar entre los metales no ferrosos, en volumen de producción, gracias a su peso liviano, resistencia, maleable, superior conductividad térmica, reflectividad y resistencia a la corrosión, de excelente trabajo, características de acabado superiores y de apariencia placentera. Sus

propiedades no magnéticas y no tóxicas han extendido su uso. El mayor uso de aluminio en la Industria eléctrica, ya que presenta muchas ventajas en lugar que el cobre para transmisión de líneas aéreas de alta tensión. En los capítulos, se tratará sobre su uso particular.

**2.4.1 Aplicaciones en la Aeronáutica:** Se emplea en muchas áreas de la aeronáutica como aviones, misiles y la industria del espacio. Todos los motores y hélices, accesorios y recipientes de gasolina.

La gran resistencia a la corrosión y su peso liviano hacen del aluminio el material ideal para esta industria. Para atmósferas de aguas saladas, se usan aleaciones alclad o recubrimientos anodizados, incrementándose su resistencia a la corrosión.

La fabricación requiere de una alta calidad tecnológica, ya que el mínimo defecto conduce a fracturas y poder originar accidentes fatales.

**2.4.2 Aplicaciones en la Industria Automotriz:** En el inicio de la era de los carros a motor, el aluminio era el material adecuado, pero con el desarrollo de la industria automotriz se optó por las aleaciones más baratas de hierro. No obstante la industria del aluminio optimizó sus costos de producción y amplió sus usos en esta área, recobrando así su importancia. Se resume a continuación su importancia en las diferentes áreas de la industria automotriz:

./.

- Automóviles: En pistones de aluminio, por su peso liviano y buena conductividad térmica. Además en muchos accesorios y algunos motores.

- Omnibus: Para minimizar pesos muertos, las láminas de aluminio se emplean para fabricar componentes de armazón.

Trailer: Para maximizar el transporte pesado aprovechando de su peso liviano a reemplazado a los materiales ferrosos por su reducción en costo.

Fabricación: En unión de piezas por remaches que resisten la corrosión.

- Pintura y Anodizado: Uniones de aluminio y fierro deben ser protegidas de corrosión galvánica con pinturas previas al ensamblamiento. En el pintado se usa el cromato de zinc y el recubrimiento anódico para partes externas e internas para protección y decoración.

2.4.3 Aplicaciones en los Ferrocarriles: Para disminuir el consumo de energía y el costo de flete, carros de pasajeros etc. Hoy en día todas las cabinas de ferrocarriles de pasajeros son de aluminio,

La construcción de los tanques de almacenamiento de líquidos son también de aluminio por su bajo peso y por su resistencia a la corrosión.

2.4.4 Aplicaciones en la Marina: Al inicio las aleaciones de aluminio producidas eran de pobre resistencia a la corrosión,

conforme se perfeccionó la fabricación y aleaciones más óptimas se recobra así un rol importante en esta industria, utilizándose en estructuras principales, así como de las secundarias como ventanas, cabinas, plataforma, etc.

Para prevenir la corrosión galvánica se protege catódicamente para evitar el efecto de metales diferentes entre el aluminio y el acero. Las superficies pintadas con cromato de zinc protegen del agua de mar. En la fabricación del uso de remaches se ha generalizado. Estados Unidos es el líder en la fabricación de todo tipo de naves.

- 2.4.5 Aplicaciones en Electricidad: Su mayor uso es en esta industria donde el gran porcentaje se destina a fabricación de líneas conductoras de alta tensión desnuda, con recubrimiento plástico, aleación de aluminio, o con alma de acero.
- Aluminio Puro: Su alta conductividad eléctrica y peso liviano permite el transporte de la alta tensión en torres que sostienen las cuerdas desnudas de aluminio.
  - Aleación de Aluminio: Los fuertes vientos someten a las cuerdas a tensiones que el aluminio puro no resiste, necesitándose una mayor resistencia de tracción, así aleándose con magnesio y silicio se fabrican la aleación de aluminio que a costo de una leve pérdida en la conductividad eléctrica se consigue la resistencia mecánica deseada que resuelve el problema de tensión en los apoyos. Estas lí

neas se han generalizado en casi todos los países, espe  
cíficamente en zonas costeras y tienen duración por lar  
gos años.

Aluminio con alma de acero: Son ideales para el transport  
te en terrenos discontinuos con ascensos y descensos de  
cerros, donde los vientos son más fuertes. Presenta en  
ciertos casos corrosión galvánica pero con el uso de grasa  
se evita este contacto aluminio-acero.

- Aluminio con recubrimiento plástico: Se utiliza en reem  
plazo de líneas desnudas, para distribución de energía.  
Su empleo en general en países donde abunda aluminio.

**2.4.6 Aplicaciones en la Construcción**: Está siendo utilizado en  
estructuras estáticas, tales como: edificios, puentes, to  
rres, etc. La fabricación de estructuras de aluminio son  
adecuadas ya que el módulo de elasticidad es la tercera part  
te que la del acero. Existe así un ahorro sustancial en pes  
o por ser más ligero y la resistencia a la corrosión hace  
su mantenimiento más adecuado.

En los edificios se generaliza en las zonas donde está ex  
puesta a la interperie, tales como ventanas, techos, etc. Su  
buena apariencia la hace decorativa.

En los puentes son muy convenientes, en especial aquellos  
que se pliegan para el paso de barcos, su peso liviano es  
un factor determinante.

./.

**2.4.7 Aplicaciones en Procesos Químicos:** Su elección en esta industria es por su costo muy bajo (gran resistencia a la corrusión). En el petróleo es usado en las tapas de los tanques de almacenamiento, como pintura y en la línea de tubos para transporte de productos de petróleo. En los cauchos se emplea por su alta resistencia a la corrosión en su proceso de fabricación y no ser un material adhesivo con los diferentes cauchos. En los explosivos, el ser un metal que no produce chispas tiene importancia en atmósferas explosivas y encuentra empleo en la manufactura de los mismos. Reactivos generales tales como ácido sulfúrico, sulfuros, sulfatos se procesan y almacenan en presencia de aluminio durante su producción.

**2.4.8 Aplicaciones Misceláneas:** Las otras aplicaciones se deben a ser de bajo costo, buena apariencia, muy dúctil y fabricación de diversos productos:

- Equipos de transporte de materiales
- Polvos y pastas
- Equipos de textiles  
Industria del papel e imprenta
- Empaquetamiento de comida
- Reflectores
- Utensilios de cocina
- Maquinaria de minería de carbón
- Herramientas portátiles
- Tubos de irrigación portátiles

Como conclusión se observa que el uso del aluminio es generalizado en todas las ramas de la industria. Es así que el

aluminio ha ganado el primer lugar en la producción, consumo y disponibilidad del metal en todo el mundo. En el esquema 2.4 se aprecia las diferentes formas de fabricación de los productos de aluminios.

TABLA 2.1

## RESUMEN DE BAUXITAS ACTUALMENTE EXPLOTADAS

PAIS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Si O <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> O %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %
JAMAICA	45 - 50	1 - 4	22 - 26	15 - 20
GUINEA	50 - 60	1 - 4	25 - 30	5 - 10
FRANCIA	50 - 55	4 - 10	11 - 13	24 - 28
AUSTRALIA	50 - 58	4 - 6	20 - 25	5 - 15

## PRODUCCION MUNDIAL DE BAUXITA

( miles de toneladas )

Country	1960	1970	1979 <sup>p</sup>	1980 <sup>a</sup>
<b>IBA member countries:</b>				
Australia	70	9,093	27,583	27,584
Dominican Republic	689	1,033	524	605
Ghana	228	339	214	225
Guinea	1,189	2,559	13,700	13,760
Guyana	2,511	4,015	2,312	2,348
Haiti	272	611	584	452
Indonesia	395	1,191	1,052	1,224
Jamaica	5,837	11,633	11,505	12,261
Sierra Leone	—	426	583	590
Suriname	3,455	5,174	5,010	4,696
Yugoslavia	1,025	2,033	3,012	3,138
Total IBA countries	15,671	38,107	66,079	66,903
<b>Other countries:</b>				
Brazil	121	484	2,388	3,970
France	2,068	2,956	1,969	1,665
Greece	884	2,207	2,915	2,950
Hungary	1,189	1,959	2,976	3,020
India	383	1,317	1,934	1,740
Malaysia	459	1,103	387	920
United States	2,030	2,049	1,821	1,559
U.S.S.R. <sup>2</sup>	3,556	4,134	4,600	4,600
Others	1,088	1,058	2,607	2,606
Total other countries	11,778	17,265	21,597	23,030
Grand total	27,449	55,372	87,676	89,933
Percent IBA countries	57	69	75	74

<sup>a</sup> Estimated. <sup>p</sup> Preliminary. — indicates 0 or negligible tonnage in the year shown.

<sup>1</sup> Table includes data available through July 1, 1981.

<sup>2</sup> In addition to the bauxite reported in the body of the table, the U.S.S.R. also produces alunite ore and nepheline syenite concentrates as sources of aluminum.

TABLE 2.2 RESERVAS MUNDIALES DE BAUXITA POR PAISES

Country	Number of deposits evaluated	Demonstrated in situ material <sup>1</sup>		Identified in situ material <sup>2</sup>	
		Thousand tons	Percent of total	Thousand tons	Percent of total
<b>Caribbean:</b>					
Dominican Rep.....	1	15 600	0.08	45,000	0.14
Haiti.....	1	14,000	.07	14,000	.04
Jamaica.....	15	2,000,000	9.90	2,000,000	6.27
Total.....	17	2,029,600	10.05	2,059,400	6.45
United States.....	3	38,000	.19	40,000	.13
<b>South and Central America:</b>					
Brazil.....	7	2,270,300	11.22	4,070,000	12.75
Colombia.....	—	—	—	83,000	.26
Costa Rica.....	1	78,500	.39	150,000	.47
French Guiana.....	1	42,000	.21	170,000	.53
Guyana.....	11	519,000	2.56	1,016,000	3.18
Suriname.....	4	577,900	2.86	600,000	1.89
Venezuela.....	1	236,000	1.16	500,000	1.57
Total.....	25	3,723,700	18.40	6,589,000	20.65
<b>Africa:</b>					
Cameroon.....	1	800,000	3.95	1,500,000	4.70
Ghana.....	3	558,100	2.76	780,000	2.44
Guinea.....	6	5,625,000	27.80	8,200,000	25.69
Malawi.....	1	28,800	.14	70,000	.22
Mali.....	—	—	—	880,000	2.76
Sierra Leone.....	2	161,400	.80	161,400	.51
South Africa.....	—	—	—	20,000	.06
Total.....	13	7,173,300	35.45	11,611,400	36.38
<b>Europe:</b>					
France.....	6	43,800	.22	43,800	.14
Greece.....	4	600,000	2.96	700,000	2.19
Turkey.....	1	16,800	.08	30,000	.09
Total.....	11	660,600	3.26	773,800	2.42
<b>Asia:</b>					
India.....	8	1,181,000	5.83	1,900,000	5.95
Indonesia.....	2	805,000	3.98	805,000	2.52
Malaysia.....	—	—	—	15,000	.05
Philippines.....	—	—	—	60,000	.19
Total.....	10	1,986,000	9.81	2,780,000	8.71
<b>Oceania:</b>					
Australia.....	10	4,574,700	22.60	8,000,000	25.07
Solomon Islands.....	2	50,300	—	60,000	.19
Total.....	12	4,625,000	22.85	8,060,000	25.26
Grand total.....	91	20,236,200	100.00	31,913,200	100.00

— Indicates 0 or negligible tonnage in the year shown.

<sup>1</sup> Excludes Yugoslavia. Demonstrated tonnage is from the 91 mines and deposits evaluated for this study.

<sup>2</sup> Identified resources are measured plus indicated plus inferred resources. The identified tonnages are country totals, not just from the deposits evaluated.

Note — Resource figures, by country, have been rounded to the nearest hundred thousand.

TABLA 2.3CONSUMOS ESPECIFICOS DE TRATAMIENTO DE BAUXITADATOS TECNICOS

	Bauxita	2.5 - 2.7
<u>MATERIA</u>	Soda	0.1 - 0.13
<u>PRIMA</u>	Agua	7 8
TM / TM Al O 2 3	Combustible (vapor)	0.2
	Combustible (calcin.)	0.12
	Vapor Térmico	1,600 - 1,700
<u>ENERGIA</u>	Energía Eléctrica KWH	100
	Mano de Obra Total H-H/TM	0.8 - 1.0

ANALISIS QUIMICO DE ALUMINA PRODUCIDA ( ppm )

<u>ELEMENTO</u>	<u>RANGO</u>
Si	50 90
Fe	100 - 170
V	5
F	5
Ti	15 - 18
Na	3,700 - 4,000
Ca	200 - 300

TABLA 2.4

PRODUCCION MUNDIAL DE ALUMINA

(miles de toneladas)

Country	1970	1979 <sup>a</sup>	1980 <sup>a</sup>
<b>IBA member countries:</b>			
Australia.....	2,138	7,415	7,247 <sup>1</sup>
Guinea.....	610	660	708
Guyana.....	305	154	219
Jamaica.....	1,689	2,074	2,478
Suriname.....	998	1,325	1,316
Yugoslavia.....	125	838	870
<b>Total IBA countries.....</b>	<b>5,865</b>	<b>12,467</b>	<b>13,010</b>
<b>Other countries:</b>			
United States.....	6,485	6,450	6,810
U.S.S.R.....	1,814	2,600	2,700
Japan.....	1,285	1,545	1,950
Germany, Federal Republic of.....	758	1,352	1,400
France.....	1,130	1,075	1,173
Canada.....	1,105	824	1,138
Italy.....	314	854	900
Hungary.....	441	788	800
China.....	254	750	750
Brazil.....	119	449	540
India.....	327	493	500
Romania.....	210	500	500
Greece.....	312	496	490
Turkey.....	—	140	140
Czechoslovakia.....	73	100	100
United Kingdom.....	107	88	90
Taiwan.....	42	58	65
Spain.....	—	—	58
German Democratic Republic.....	54	41	41
<b>Grand total.....</b>	<b>20,695</b>	<b>31,067</b>	<b>32,983</b>
<b>Percent IBA.....</b>	<b>28.3</b>	<b>40</b>	<b>39.4</b>

<sup>a</sup> Estimated. <sup>b</sup> Preliminary. — indicates 0 or negligible tonnage in the year shown.

<sup>1</sup> Table includes data available through July 1, 1961.

SOCIEDADES PRODUCTORAS

- ALCOA
- ALCAN
- Reynolds
- Kaiser
- Aluminium Pechiney
- Olin
- Alusuisse
- Vaw
- Harvey
- Comalco

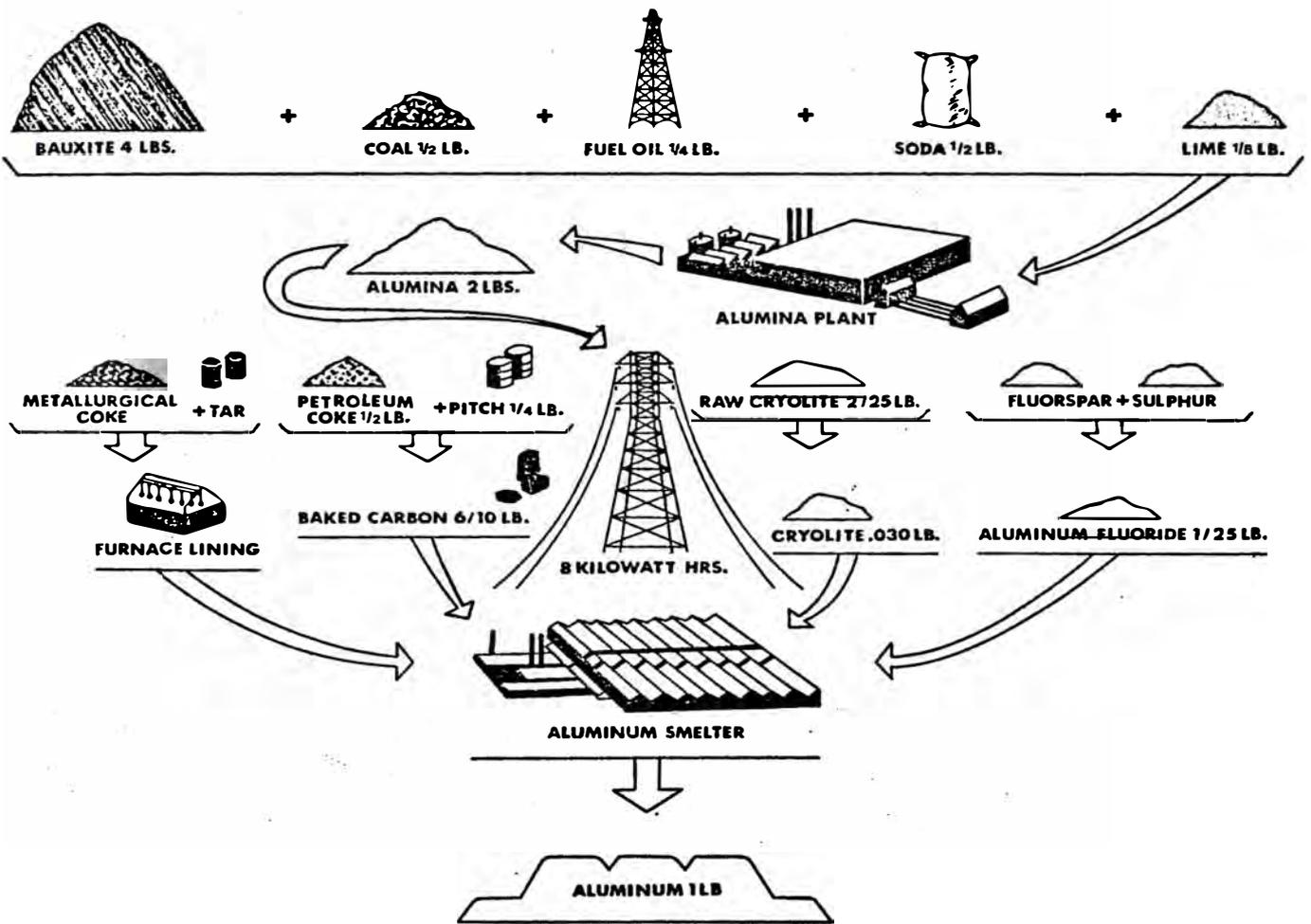
TABLA 2.5 PRODUCCION MUNDIAL DE ALUMINIO PRIMARIO

( miles de toneladas )

Country	1960	1970	1980*
<b>Market economy countries:</b>			
United States	1,823	3,607	4,654
Japan	133	733	1,092
Canada	691	973	1,068
Germany, Federal Republic of	169	309	731
Norway	165	530	652
France	238	381	432
Spain	24	115	387
United Kingdom	29	40	375
Venezuela	—	23	313
Australia	12	204	304
Italy	64	146	271
Netherlands	—	75	259
Brazil	18	44	256
India	18	161	185
Yugoslavia	25	48	185
Ghana	—	113	170
New Zealand	—	—	156
Greece	—	87	145
Bahrain	—	—	126
Egypt	—	—	120
Argentina	—	—	119
Austria	68	90	94
Switzerland	40	92	86
South Africa	—	—	83
Sweden	16	66	82
Iceland	—	38	74
Taiwan	8	27	64
Suriname	—	55	50
Mexico	—	34	44
Cameroon	44	53	40
Turkey	—	—	31
Dubai	—	—	25
Republic of Korea	—	15	21
Iran	—	—	10
Market economy country total	3,610	8,059	12,704
<b>Central economy countries:</b>			
U.S.S.R.	676	1,100	1,788
China	80	127	363
Romania	—	102	241
Poland	26	99	91
Hungary	50	66	74
German Democratic Republic	40	59	65
Czechoslovakia	40	31	38
North Korea	—	—	10
Central economy country total	912	1,584	2,670
Grand total	4,522	9,643	15,374

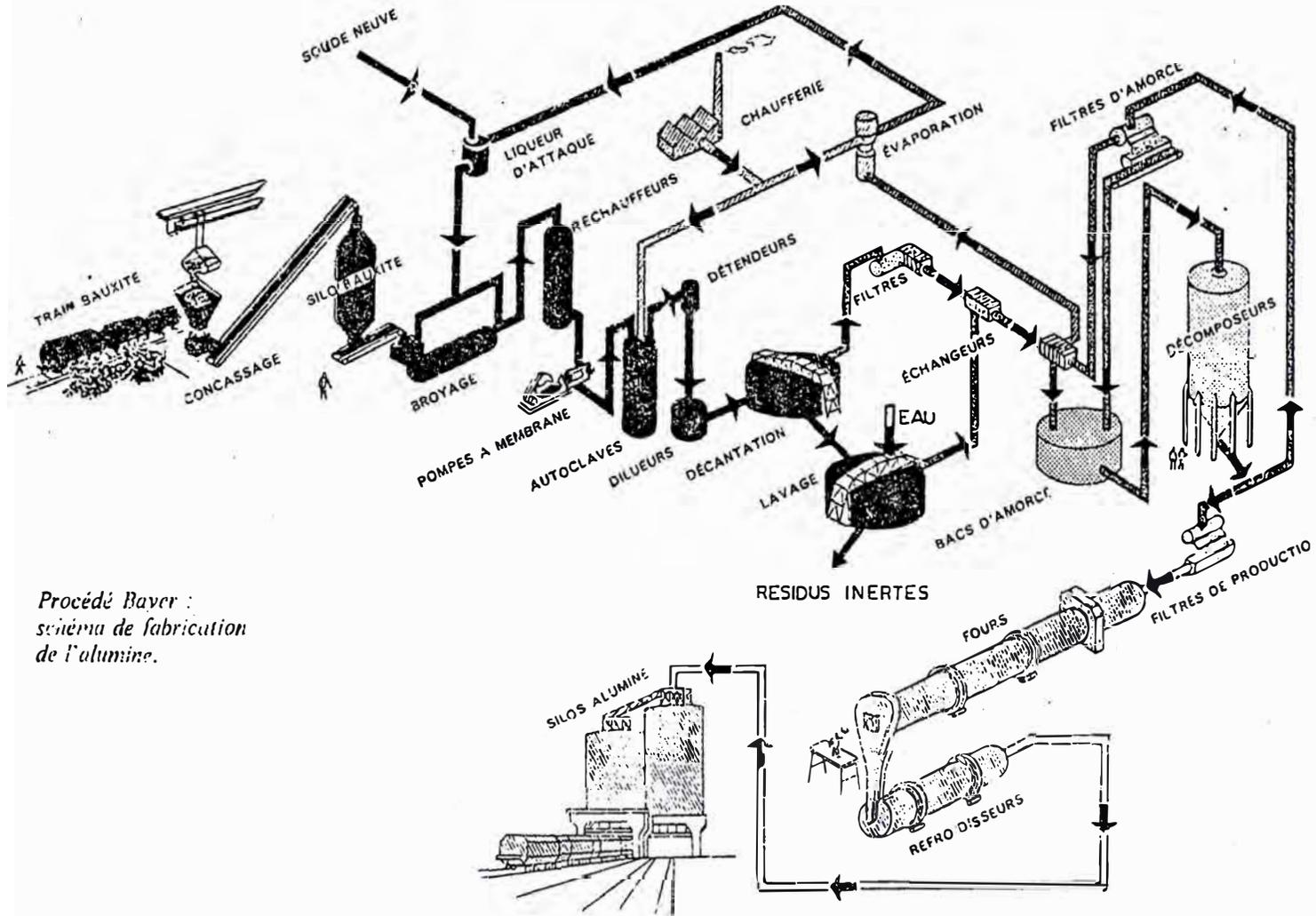
\* Estimated. — indicates 0 or negligible tonnage in the year shown.  
<sup>1</sup> Table includes data available through May 25, 1981.

ESQUEMA 2.1 PRODUCCION DE ALUMINIO A PARTIR DE BAUXITA



ESQUEMA 2.2

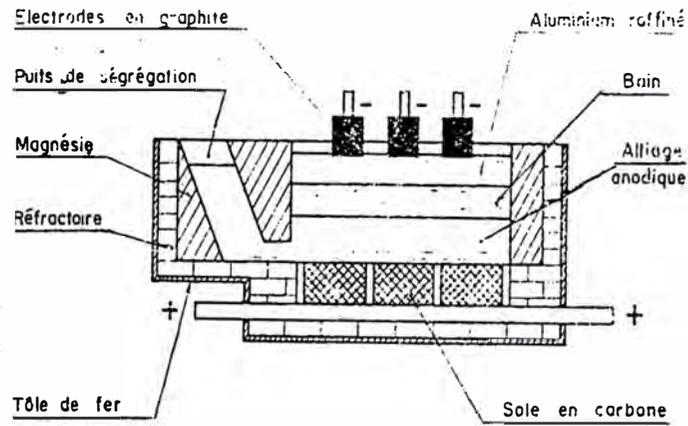
PROCEDIMIENTO BAYER DE FABRICACION DE ALUMINA



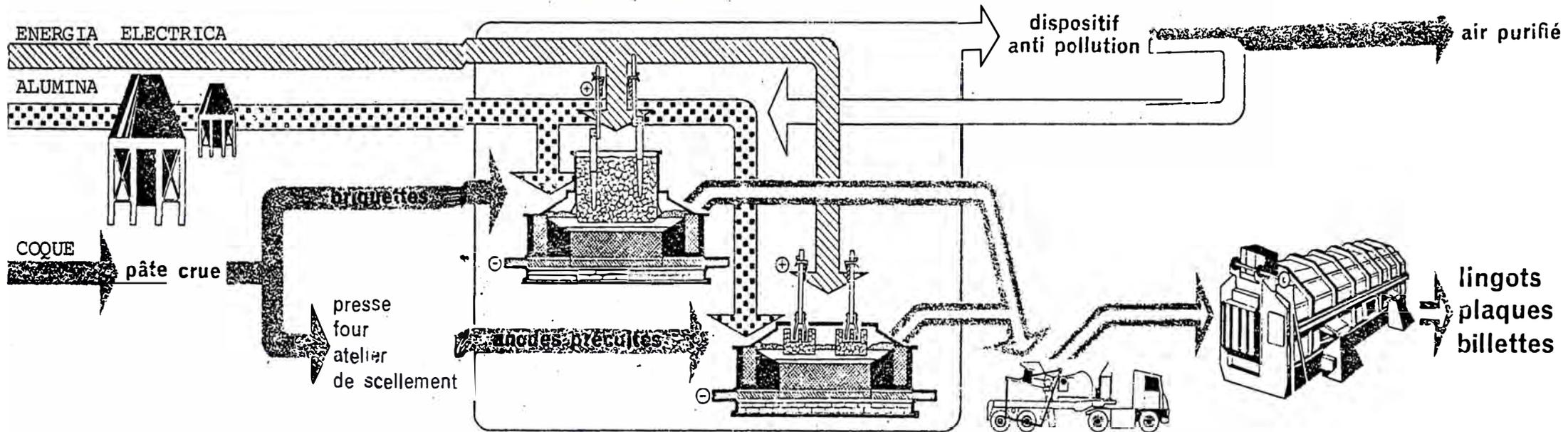
Procédé Bayer :  
système de fabrication  
de l'alumine.

ESQUEMA 2.3

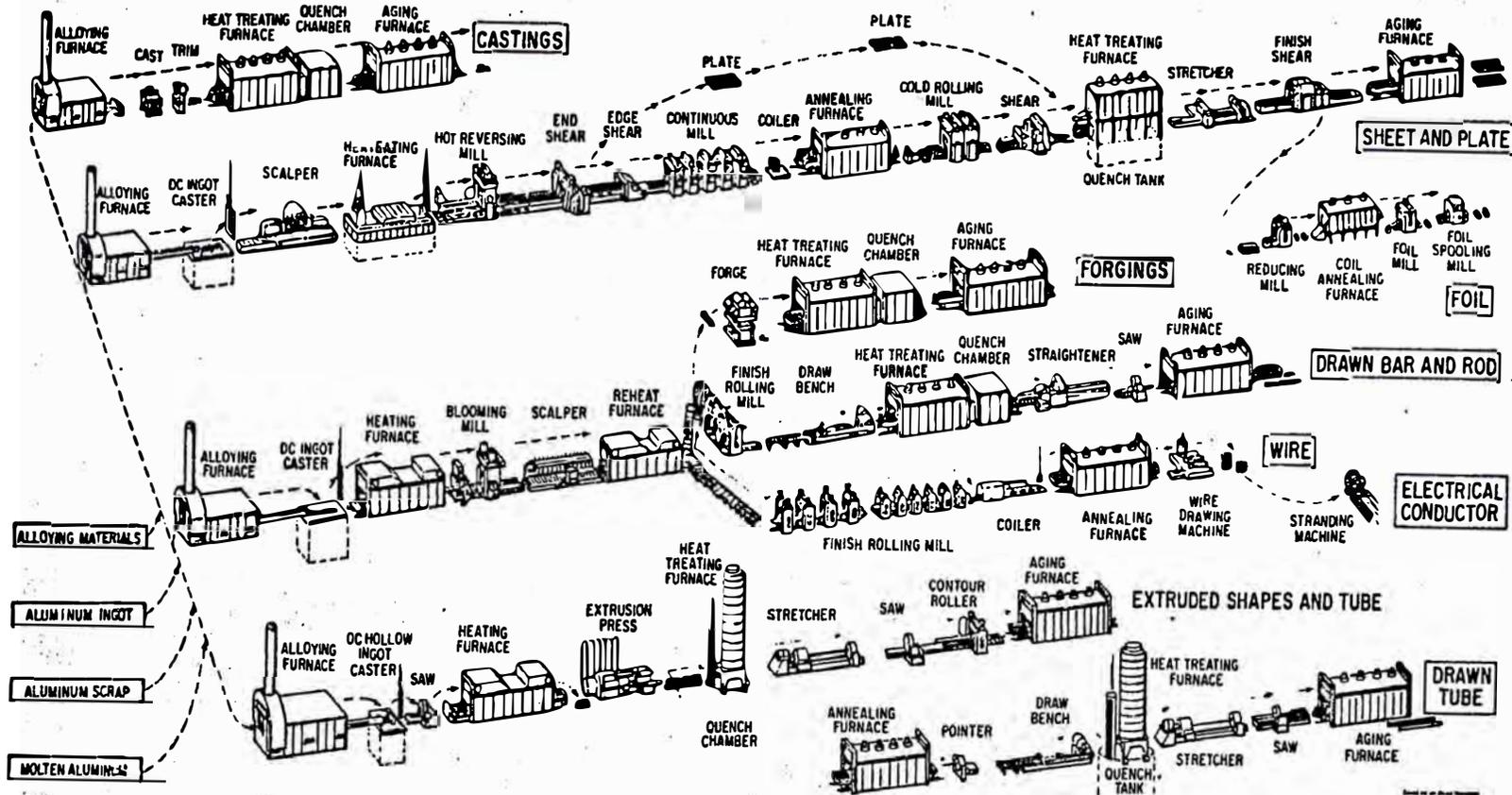
CUBA DE REFINACION ELECTROLITICA



FABRICACION ELECTROLITICA DEL ALUMINIO



ESQUEMA 2.4 FORMAS DE FABRICACION DE ALUMINIO



### CAPITULO N°3 - FABRICACION DE ALAMBRO DE ALEACION DE ALUMINIO.-

La producción de alambros no ferrosos de colada continua y rolado, tuvo su origen en la Segunda Guerra Mundial, cuando en Milán- Italia; Ilario Properzi tuvo éxito en el desarrollo de equipos para convertir plomo fundido en alambro en aproximadamente dos minutos.

Southwire, una compañía americana, perfeccionó los sistemas Properzi de aluminio que se instalaron en los años cincuenta y sesenta. Así en 1969, se desarrolló el primer sistema de alambro de aluminio continuo Southwire (Southwire Continuous Rod SCR) en asociación con Morgan Construction Company.

La producción de alambros de aleación de aluminio resultó del estudio intensivo por encontrar un material más adecuado a zonas donde el aluminio puro no rinde una buena performance. Esta aleación lleva varios nombres según el país, tales como Aldrey de Suiza, Almelec de Francia, Arvidal de Canadá, etc.

#### 3.1 PROCESOS DE FABRICACION:

La fabricación de alambro se hace industrialmente siguiendo tres métodos:

- Prensa semicontinua de tochos redondos.
- Laminación de tochos cuadrados.

Fundición, solidificación y laminado continuo.

Se describirá a continuación cada uno de ellos:

**3.1.1 Prensa Semicontinua de tochos redondos.-** Los alambros prensados a partir de tochos redondos de peso unitario de algunas decenas o a más de algunas centenas de kilos. Es un

./.

proceso caro pero dá un producto de muy buena calidad, sobretudo desde el punto de vista de estado de superficie.

El alambrón prensado puede ser continuo o discontinuo. En el primer caso puede ser normal (longitudinal), o ser ortogonal. Los tochos son introducidos uno tras otro, lo que supone una perfecta adherencia de las caras en contacto.

**3.1.2 Laminación de tochos cuadrados.**- El laminado de tochos cuadrados es un proceso con pérdida de velocidad, ya que es más caro que el colado y laminado continuo en inversión y en producción. No es posible fabricar directamente carretes de alambrón de pesos elevados y el proceso no presenta ventajas notables sobre el plano de la calidad.

**3.1.3 Fundición, Solidificación y Laminación Continua.**- La idea base de este proceso es derivado de la laminación de tochos cuadrados. En vez de colar tochos en una planta y trasladar a otra para calentarlo y laminarlo, se ha buscado suprimir las operaciones intermedias laminando un tocho madre todavía caliente colado en continuo. En el trabajo en continuo se necesita de controles más aproximados de los parámetros involucrados, tales como: velocidad de solidificación, temperatura, velocidad de vaciado; una vez fijados todos ellos y estableciéndose un control sobre la productividad y homogeneidad se obtiene aleaciones superiores a la de otros procesos. Tal es el caso de la aleación Al-Mg-Si.

## **3.2 SISTEMA PROPERZI PARA LA ALEACION Al-Mg-Si.**

Como ya se mencionó antes, el pionero de los procesos continuos de laminación de alambres fue Ilario Properzi. La mayor cantidad de compañías utilizan maquinaria Properzi, ya sea para producir alambres de cobre o aluminio, de allí el nombre bien merecido de: "Alambres Continuos Properzi".

Se describirá a continuación el equipo y procesos que se realizan para la producción de alambres de aluminio - Magnesio - Silicio.

**3.2.1 Descripción del equipo.-** El sistema Properzi está constituido de:

- Un horno de fusión.
- Dos hornos de espera.
- Un dispositivo de vaciado y solidificación, compuesto de un molde de cobre y un anillo de acero que son envueltos por una cinta de acero.
- Un laminador compuesto por 11 cabezas

**3.2.2 Fusión.-** La carga está constituida básicamente de aluminio EC 99.6%. Después de fundido el material es transferido a un horno de espera, donde se realiza la adición de los metales constituyentes de la aleación. Primeramente hay la necesidad de preparar una aleación madre de Al-Si al 10%, para facilitar la adición del silicio y pueda disolverse en el aluminio líquido. Se calcula la cantidad de liga madre para obtener contenidos de silicio en torno al 0.5%. La colocación de la liga madre no exige cuidados especiales, pero para la colocación del magnesio se exigen se tomen ciertas precauciones, tales como:

./.

- Colocar las barras de magnesio Inmersas en el baño con auxilio de tenazas para evitar las pérdidas por oxidación.
  - Agitación constante del baño para evitar heterogeneidades.
- Después de la fusión completa de los elementos de la aleación se hace el escorificado del baño, el cual se mantiene a 740°C.

3.2.3 Enfriamiento en la rueda de vaciado.- Después de la fusión y preparación de la aleación Al-Mg-Si ya escorificada, el metal líquido es introducido en el molde de cobre que gira a velocidad constante con enfriamiento forzado por chorros de agua. Existen sectores circulares en la rueda de vaciado donde cada uno recibe agua de enfriamiento independientemente de los adyacentes, cuidando así las posibilidades de constitución de zonas densas. Después de la solidificación el material es retirado en forma continua a aproximadamente 180° en relación a la entrada del metal líquido. Cada tipo de material presenta un esquema característico de enfriamiento, por tanto, para la fabricación de la aleación Al-Mg-Si hay la necesidad de realizar mayores pruebas.

3.2.4 Laminador .- Está constituido por 11 cabezas. Existe además tres cilindros dispuestos a 180°. Se realizan los siguientes controles:

- Velocidad del laminador.
- Puntos de seguridad para evitar descentramiento.
- Circuito de emulsión controlando presión, flujo, temperatura y concentración del líquido lubricante.

A la salida del laminador, se encuentra la máquina de enrollamiento con una cortadora automática, para la obtención de alambres de pesos diferentes tales como 1, 1.5 y hasta 2 toneladas.

3.2.5 Definición de parámetros . Para encontrar los parámetros óptimos deben de realizarse varias pruebas. El control de análisis químicos de los elementos aleantes es muy importante para no perjudicar las propiedades eléctricas y mecánicas (Mg y Si entre 0.5 - 0.7%).

El control de las temperaturas deben ser muy estricta, tanto del horno como del laminador. La disminución de temperatura en el laminador se efectúa con las líneas de agua de refrigeración.

### 3.3 TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ALAMBRE LIGA Al-Mg-Si.-

Una vez producido el alambre continuo Properzi de aleación Al-Mg-Si, se debe mejorar sus propiedades físicas y eléctricas. Por tal motivo se realizan los siguientes tratamientos térmicos que se detallan a continuación:

3.3.1 Tratamiento de Solubilización.- Un alambre bruto laminado presenta una estructura fibrada debido al laminado. En esta estructura bruta, los elementos de la aleación Magnesio y Silicio, se precipitan bajo la forma del constituyente  $Mg_2Si$ . El tratamiento a  $540^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$  asegura la puesta en solución

el Magnesio y Silicio.

Se nota sobre el plano estrictamente metalúrgico, el tiempo de puesta en solución muy corto del orden de algunos minutos a temperaturas inferiores a 530°C son suficientes para obtener las características finales buscadas. Si por el contrario, la puesta en solución es efectuada por debajo de 520°C se observa que no importa la duración, siempre que se realice a baja temperatura. La pareja: Resistencia-Conductividad, serán pobres. Observaremos igualmente que el tratamiento de puesta en solución proporciona la recristalización del alambión.

3.3.2 . Tratamiento de Templado (Quenching).- Consiste en realizar un enfriamiento brusco con agua, el aluminio solubilizado en el paso anterior, con el objeto de conservar a la temperatura ambiente el estado metaestable de solución sólida de los aleantes en la matriz de aluminio. Este tratamiento origina un aumento importante de la resistividad eléctrica y mejores propiedades mecánicas.

3.3.3 Tratamiento de Estufa .- Después de la puesta en solución y templado las aleaciones de Al-Mg-Si sufren un fenómeno de envejecimiento, que es el primer estado de la precipitación estructural (formación de zonas Guinler-Preston) y que se traduce en una evolución muy sensible de las características mecánicas (endurecimiento) y en forma ligera la resistividad eléctrica, esta evolución se efectúa esencialmente

dentro de los primeros seis días.

Industrialmente se realiza inmediatamente después del templado un tratamiento de estufa a 100°C, así de poder secar las bobinas templadas.

Este proceso realiza igualmente un envejecimiento acelerado del alambroón y así solo se registra un incremento de 1: a 1.5 Kg/mm<sup>2</sup> en la carga de ruptura en un periodo de almacenamiento de 6 meses. Esto evidencia la factibilidad de este proceso.

### 3.4 CONTROL DE PROPIEDADES FISICAS Y ELECTRICAS.-

El alambroón de aluminio-magnesio-silicio debe cumplir con la norma ASTM B 398-76 Aluminum-Alloy 6201-T81 wire for electrical purposes. A continuación se explican las variaciones de las propiedades dentro de la norma.

3.4.1 Propiedades Mecánicas.- Después del control de los parámetros involucrados, las características obtenidas del alambroón producido por proceso continuo, pueden ser modificadas en función de la composición química de la liga. En la figura 3.1 se aprecia la influencia de los elementos aleantes en el límite de la resistencia mecánica después del tratamiento de solubilizado.

3.4.2 Conductividad Eléctrica.- La conductividad eléctrica de la liga presenta valores inferiores al aluminio EC en virtud de los elementos de la aleación. La figura 3.2 presenta la influencia de algunos elementos en la conductividad eléctrica en relación al aluminio puro (99.99%).

Por tanto, para la aleación Al-Mg-Si, se sabe que la conductividad eléctrica está en torno al 53% IACS.

La conductividad también es influenciada por otros factores tales como:

- Condiciones de solidificación.
- Tratamientos térmicos.
- Endurecimiento en frío.

3.4.3 Control de la Estructura Metalográfica.- Se necesita realizar un tratamiento de afinamiento de grano en la aleación de aluminio-magnesio-silicio para presentar las ventajas siguientes:

- a) Aumento de velocidad de solidificación.
- b) Reducción de esfuerzos internos debidos a la acción del refinador que reduce las tensiones internas y produce mayor cantidad de granos equiaxiales en relación a la estructura columnar.
- c) Reducción de la segregación; en la formación de aleaciones de producción, la tendencia de grandes dendritas y consecuente concentración de impurezas o de los mismos elementos de la aleación. La acción de los refinadores disminuye sensiblemente la formación de grandes dendritas. La estructura del aluminio sólido depende de la velocidad de nucleación de los cristales. El número y tamaño de los cristales dependerá de varios factores e inclusive la composición química del metal, del proceso de fundición y de las variables durante la solidificación.

Los cristales formados pueden ser equiaxiales o columnares. Los equiaxiales son macroscópicos. La ocurrencia de ambos tipos en el mismo metal evidencia que no ha sido utilizado refinador de grano.

La velocidad de formación del cristal es determinado por la velocidad de enfriamiento y por la composición química de la aleación. Generalmente se agregan al metal elementos de transición, tales como: titanio, niobio, zirconio, etc. que causan nucleación de las aleaciones de aluminio.

Esta nucleación ocurre cuando de la reacción de cristales primarios con núcleos de la propia aleación están también como compuestos intermetálicos que aceleran la nucleación utilizando el nucleante TIBAL (5% Titanio y 1.1 Boro).

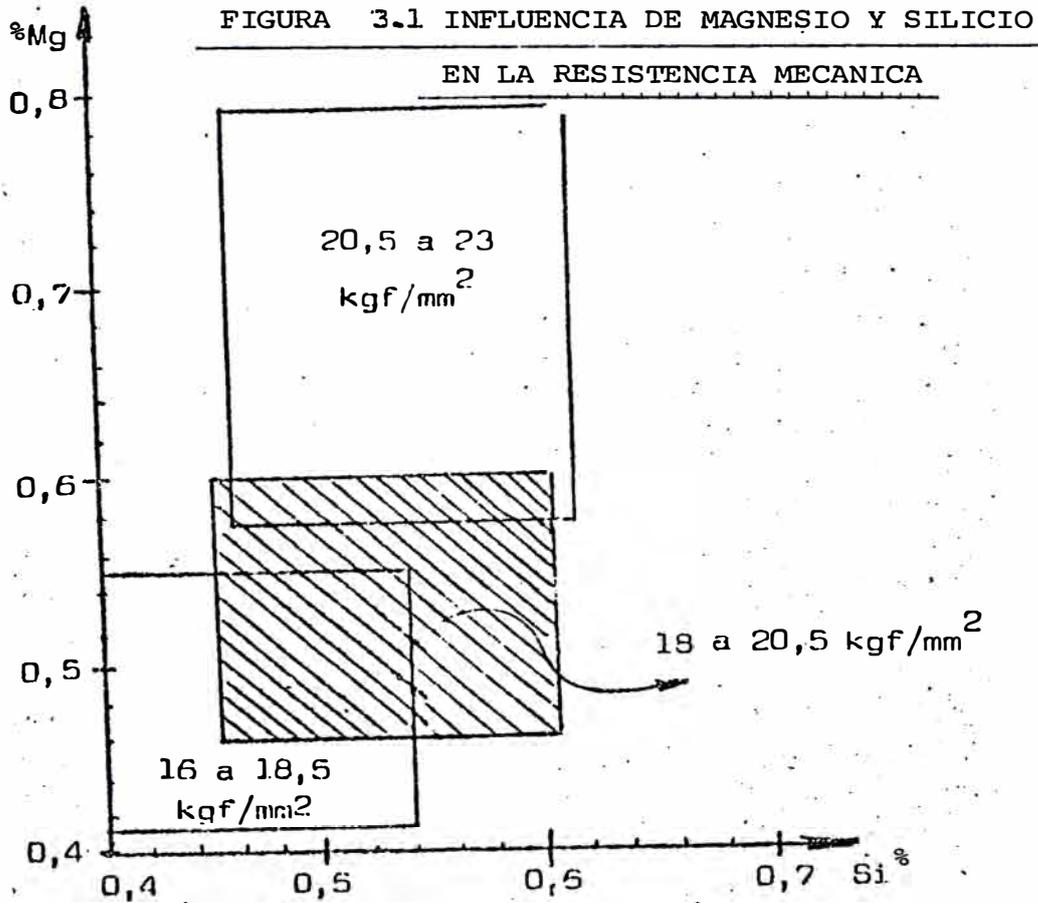
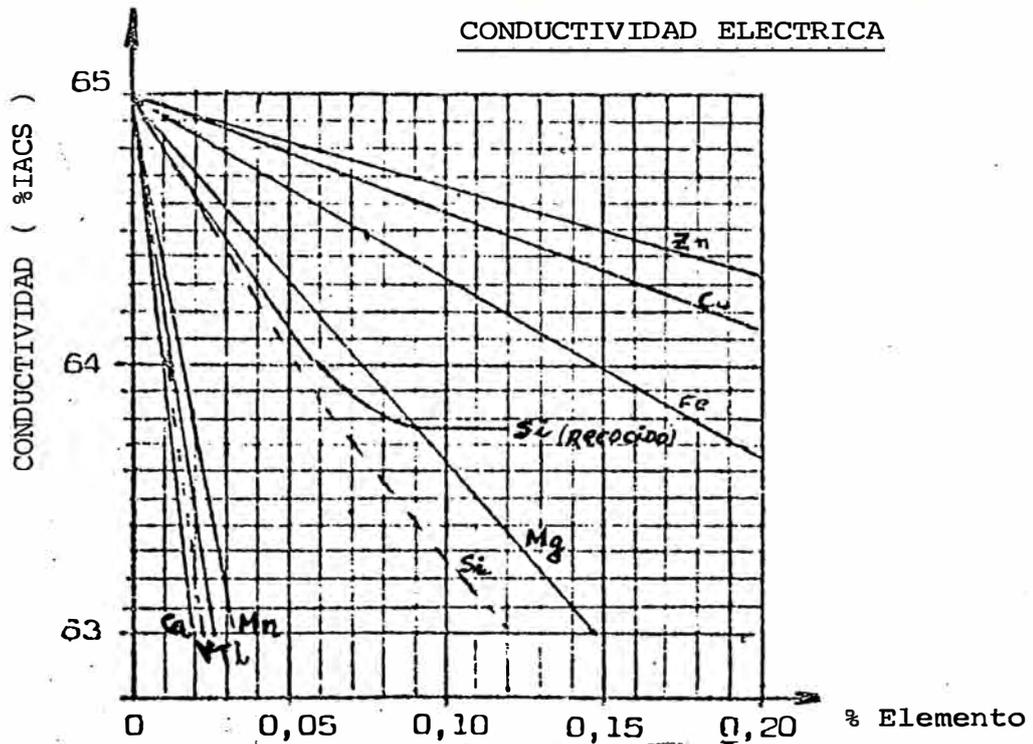


FIGURA 3.2 INFLUENCIA DE ELEMENTOS EN  
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA



## CAPITULO N° 4 - PRODUCCION DE ALAMBRES Y CUERDAS DE ALUMINIO.-

Las aleaciones de Al-Mg-Si con Magnesio y Silicio de aproximadamente 0.9%, han sido usadas desde hace un buen tiempo como conductores eléctricos, especialmente en la forma de cables aéreos. En comúnmente conocida como Almelec AGS/L, 6201 o Aldrey, posee una alta resistencia a la tracción y una razonable conductividad eléctrica; factores que generalmente son antagonicos.

La simple adición de Magnesio y Silicio aumenta la resistencia mecánica pero baja la conductividad eléctrica. Luego de definirse el compromiso entre la resistencia mecánica y conductividad eléctrica deseada, a través de los tratamientos térmicos combinados de solubilización, templado, deformación en frío (plástica) y envejecimiento artificial se alcanzan los valores que estén dentro de lo deseado.

### 4.1 PROCESOS DE FABRICACION:

Existen 3 procesos básicos normalmente usados para la obtención de alambres terminados.

4.1.1 Laminación de Tochos.- Este proceso consiste en laminar tochos cuadrados o tochos en una prensa. Deformar para una dimensión aproximadamente 3 veces mayor que el diámetro final, seguido de un tratamiento de solubilización, trefilación hasta el diámetro final y envejecido artificialmente.

4.1.2 Extrusión Semicontinua de Tochos.- Este proceso consiste en extruir tochos en una prensa semicontinua con enfriamiento en agua a la salida de la prensa, siguiendo con una trefilación hasta el diámetro final y envejecerlo artificialmente. Con un enfriamiento brusco a la salida de la prensa, se consigue eliminar

el tratamiento de solubilización.

**4.1.3 Laminación Continua de Lingotes.**- Este proceso consiste en una fundición y laminación continua de lingotes en una máquina tipo PROPERZI, seguido de un tratamiento de solubilización en un horno con enfriamiento rápido en agua, secado (a veces), trefilación hasta el diámetro final y envejecimiento artificial. En el proceso de laminación continua, la materia prima que posteriormente sirve de alimentación para la obtención de alambres generalmente de 9.5 mm de diámetro y acondicionado en forma de rollos de diámetro externo de un metro y con un peso de 1 a 1.5 toneladas. Esos alambres así acondicionados requieren un tratamiento de solubilización por lo menos de 8 a 10 horas a una temperatura de cerca de los 530°C. Una vez solubilizado el rollo de alambres debe inmediatamente ser enfriado bruscamente a fin de mantener los elementos de la aleación en solución sólida supersaturada.

Después de este tratamiento el material es trefilado hasta el diámetro final deseado, de preferencia en trefiladoras sin desalaminado y envejecimiento artificialmente. El tratamiento de envejecimiento consiste en calentar el material entre 160 a 170°C por un período de 4 a 7 horas, debiéndose hacer el control de temperatura bastante preciso.

Al final de estos tratamientos, se obtendrá los alambres dentro de la norma requerida.

#### **4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ALAMBRES TREFILADOS:**

Las características mecánicas y eléctricas que el conductor debe

poseer conforme lo especifica la norma ASTM B 398:

#### 4.2.1 Características Mecánicas.-

Diámetro mm	R.T. Kg/mm <sup>2</sup> Individual(2)	mínimo (1) promedio (3)
1.5 a 3.4	32.3	33.7
3.41 a 4.8	30.9	32.3

(1) Para efecto de límite de Resistencia de Tracción, con siderarse el área en mm<sup>2</sup> correspondiente al diámetro medido.

(2) Es el valor mínimo de cualquier muestra representativa de un lote debe presentar.

(3) Se considera el valor medio, a la media aritmética de los valores individuales de todas las muestras.

Enrollamiento: Los alambres no deben presentar fracturas o rajaduras cuando son sometidos al ensaye de enrollamiento. Pe queñas marcas superficiales no constituyen causas de rechazo.

#### 4.2.2 Características Eléctricas.-

La resistividad volumétrica del alambre de aleación Al-Mg-Si no deben exceder el valor de  $3.28 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  ( $0.0328 \Omega \cdot mm^2/m$ ) a 20°C equivale a una conductividad mínima de 52.5% IACS. La re sistividad de las muestras deben ser realizadas en alambres aca bados y limpios. El coeficiente de variación a 20°C es igual a 0.00347/°C.

#### 4.3 DESCRIPCION DE PRUEBAS DE SOLUBILIZACION, TREFILACION Y ENVEJECIMIENTO DE LA ALEACION AL-Mg-SI.-

A continuación se describe una serie de pruebas preliminares a fin de

que se pueden controlar los diversos parámetros involucrados en la producción de alambres de aleación Al-Mg-Si.

4.3.1 Solubilización: Se realiza a través de las siguientes etapas:

A. Tratamiento:

Se efectúa en un horno con seis quemadores que utilizan petróleo diesel. Está dividida en 13 zonas de comando independiente. El horno de forma rectangular posee 3 quemadores por zona, el control de la llama es automático, regulándose la entrada de aire y petróleo manteniendo la llama mínima que debe compensar las pérdidas térmicas:

La homogenización de la temperatura es efectuada por 3 ventiladores de alta potencia, una por zona.

El control de la temperatura es efectuada por tres termocúplulas (una por zona) colocadas en la pared superior del horno. Los quemadores están dotados de llama piloto a gas, ignición eléctrica y control de la llama.

Una proporción aire/combustible es regulado manualmente una vez que el quemador permanece constante durante la regulación de la llama.

Los quemadores operan automáticamente de acuerdo con la demanda por medio de un motor que es comandado por un controlador de temperatura en la zona respectiva del horno, que a su vez recibe la señal de la termocúplula colocada en la pared superior en la zona respectiva del horno.

Existen en el horno 6 termocúplulas registradoras, tres están colocadas en la pared superior y tres controlando la pared lateral del horno. Las termocúplulas de la pared superior indican

temperaturas mucho mayores que la temperatura del horno. Los termopares colocados en la pared lateral dan mediciones precisas.

Se observa que el tratamiento de solubilización requiere de un control de la temperatura, durante las pruebas efectuadas se observó:

Regulándose los termopares de las tres zonas a 500°C,

la temperatura de la carga varía entre 520 a 550°C.

Para un mismo rollo, la temperatura en la parte inferior es mayor que en la parte superior cerca de 10 a 20°C, especialmente en el inicio del enfriamiento. El tratamiento se efectúa entre 520 a 550°C fijándose un tiempo a temperatura constante de 8 a 10 horas.

B. Templado de Agua.- Los rollos son secados del horno y empujados por un elevador que lo descende hasta el pozo de agua efectuándose el templado. La velocidad del elevador, por tanto da la eficiencia del templado y se limita al sistema hidráulico que lo controla.

No se puede efectuar una nueva descarga del horno seguidamente, debido que este procedimiento causa los inconvenientes siguientes:

- El horno queda mucho tiempo con las puertas abiertas perdiendo mucho calor y por lo tanto se pierde temperatura en los últimos rollos.
- El agua de la poza de enfriamiento se calienta y se pierde el medio de refrigeración.

Se opta por sacar uno o máximo dos rollos, se espera cerca de 40 minutos para la nueva descarga.

C. Resultados Obtenidos.- En la primera prueba ocurrió la licuación del material. Esta fase se caracteriza por la fusión en los contornos de grano del material. El material licuado no puede ser recuperado y su superficie queda con un aspecto característico, apareciendo bolas conforme la foto 4.1. La licuación ocurre en algún punto de la carga donde hubo un exceso de temperatura, llegando al punto eutéctico del sistema pseudo binario Al-Mg<sub>2</sub>Si que es a 595°C.

En las demás pruebas se obtuvieron buenos resultados.

En la tabla 4.1 se anota los resultados obtenidos.

4.3.2 Trefilación.- La trefilación se efectúa en una máquina trefiladora a diámetros 2.15, 2.85, 3.02 mm.

Esta máquina sin deslizamiento es la más conveniente para la trefilación de la aleación Al-Mg-Si por las siguientes razones:

- Menores reducciones por paso.
- Acumulación de los dados siendo versátil para la disposición de las dimensiones de las hileras.
- Sin deslizamiento (enfriamiento menor).
- Mayor diámetro de las poleas y por tanto menores los esfuerzos en el hilo trefilado.

./.

Una solución más simple es fijar la temperatura de las zonas altas y bajas muy próximas a la temperatura de trabajo y operando al horno en automático; pudiendo de esta forma en corto tiempo alcanzar la temperatura de trabajo, y evitando que se prolongue demasiado.

Las temperaturas de trabajo se fijan entre 160 a 170°C y con tiempos de 3, 4 y 5 horas de tratamiento a temperatura constante.

El tiempo de calentamiento para llegar a la temperatura de trabajo varía entre 4 a 5 horas.

El mayor problema verificado en el envejecimiento es que dependiendo de la composición química del material no siempre el máximo de la resistencia mecánica conseguido en el envejecimiento, coincide con una conductividad mínima (52.5 % IACS) requerida por la norma. En este caso se tiene que aumentar el tiempo de envejecimiento que va en perjuicio de la resistencia mecánica del material (sobre envejecimiento).

Resultados obtenidos: Procediendo de la forma descrita, se efectuó un envejecimiento de alambres de diámetros de 2.15, 2.85 y 3.02 mm, obteniéndose buenos resultados. El valor máximo de R.T. obtenido como valor medio se resume en la tabla 4.3

**4.4 Soldadura de Alambres.**- Durante la trefilación ocurre por lo general roturas de los hilos fabricados. Es necesario efectuar la soldadura en este punto y se realiza por cualquiera de estas formas:

**4.4.1 Soldadura en Frío:** (Cold Pressure Welding): Consiste en que los dos extremos del alambre son unidos por presión de las 2 pun

tas en las mordazas de una máquina de presión manual. Al efectuar la presión de un extremo con otro, se produce la interpenetración del material. No se aplica calor externo. La resistencia máxima de un alambre soldado por este proceso presenta un valor comparable al hilo normal sin soldadura.

Un método alternativo consiste en recocer el hilo soldado en una cierta distancia de pocos centímetros en cada lado de la soldadura. Con este tratamiento aumenta la ductilidad y el alargamiento del material pero la resistencia de tracción del alambre en la región de la soldadura queda significativamente reducida.

#### 4.4.2 Soldadura de tope eléctrico (Electric Butt Welding)

En este proceso, la máquina tiene mordazas que cogen los dos extremos del alambre y en un contacto cara a cara se aplica la tensión eléctrica entre las mordazas causando una acumulación de corriente provocando así la fusión local. Finalmente se logra unir los extremos presentando las mismas propiedades mecánicas que por el proceso de soldadura en frío con recocido posterior.

Se debe tener presente que por el proceso de soldadura eléctrica ocurre un recocido y que los valores obtenidos son muy dispersos.

En la tabla 4.4 se resumen los valores de la resistencia mecánica como comparación entre los procesos de soldado.

**4.3.3 Envejecimiento.**- El envejecimiento se realiza en un horno que tenga la ventaja de poder controlar la corriente eléctrica en zonas bajas y altas, controlándolas independientemente en forma manual por medio de un potenciómetro colocado en un panel de control.

Al igual que el templado el mayor problema se encuentra en el control de la temperatura. Se fija mayor temperatura en las zonas bajas y menor en las zonas altas, ya que las bobinas colocadas, en la parte superior del horno, siempre presentan una temperatura más elevada que en la parte inferior durante el calentamiento.

Otro hecho es que durante el calentamiento dentro del horno, por mucho tiempo las espiras externas de las bobinas puedan exceder la temperatura deseada mientras que el material al centro de la bobina presenta una temperatura bastante inferior. Con un calentamiento extremadamente lento se logra que la temperatura se homogenice y sea similar en todos los puntos de la carga.

El control de la temperatura se realiza por 4 termocuplas (una en cada altura) debe tenerse mucho cuidado cuando la temperatura de la carga esté próxima a la temperatura de trabajo, no debe haber entre las zonas altas y bajas del horno más de 10°C de la temperatura de trabajo, debido a que la inercia térmica hace que la temperatura deseada se exceda especialmente en las bobinas de las partes superiores.

#### 4.5 Conclusiones y Recomendaciones en la Fabricación de Alambres.-

De las pruebas realizadas se obtienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

4.5.1 Conclusiones: Las mayores dificultades que se encuentran en el proceso de trefilación son:

- a. Control de temperatura del horno de solubilización del alambrón.
- b. Soldadura de alambrones.
- c. Roturas en la trefilación.
- d. Control de la temperatura de enjecimiento.

4.5.2 Recomendaciones: Basado en las pruebas realizadas:

- a. Solubilización.- Efectuando a rollos de 1 tonelada de 9.52mm de diámetro. Los parámetros de operación se fijan en: Temperatura del tratamiento: 510°C mínima, 550°C máxima; Tiempo del Tratamiento: 8 horas a temperatura constante; Cantidad de rollos: máxima 6 rollos; Tiempo de espera para templado: 30 minutos para cada rollo.
- b. Templado: Luego de retirado el rollo para el templado debe accionarse lo más rápido el elevador para impedir el enfriamiento en el horno.
- c. Trefilación: Una vez solubilizado debe almacenarse 48 horas antes de trefilarse para que el agua entre las espiras queden extraídas para evitar dificultades en la trefilación. La reducción en los dos primeros pasos deben ser los menores posibles para evitar problemas de rotura.

- d. Soldadura: Ejecutar una soldadura eléctrica dependerá de la práctica en esta etapa para obtener los mejores resultados.
- e. Envejecimiento: Efectuarse en un horno que permita la facilidad en el control de la temperatura. El valor óptimo de trabajo se obtiene a  $160 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y un tiempo de 3 a 5 horas dependiendo del diámetro del hilo final.
- f. Almacenamiento después de solubilizado: Para no enfrentarse con problemas de literatura técnica recomienda un plazo límite de almacenamiento de 15 a 60 días. Para seguridad debe adoptarse un menor período para evitar problemas en la fabricación de alambres.
- g. Control del material después de solubilizado: Después del solubilizado se efectuarán controles de resistencia de tracción y conductividad eléctrica para verificar la eficiencia del tratamiento y corregirse si se diera el caso y para caracterizar el material en caso sea trefilado en otro lugar.
- h. Operación por lote: Para evitar que eventuales variaciones en la composición química del material entre lote y lote y que éstas influyan en las características finales, es interesante y muy práctico trabajar la solubilización de los alambres que pertenezcan a la misma colada del horno, (horno de espera).

La trefilación es la etapa más difícil de producción debido a la ocurrencia de roturas y dificultades al efectuar la soldadura.

El principal problema encontrado fué la rotura por empastamiento en la primera hilera conforme a la foto 4.2.

Este problema ocurre principalmente debido a los siguientes factores:

- a. El material de alimentación se encuentra húmedo debido al templado de solubilización.
- b. Polvo acumulado en la superficie del alambrón (factor externo).
- c. Material de alimentación licuado (Temperatura muy alta de solubilización).
- d. Acumulación de espiras en la parte inferior de las poleas de trefilación subiendo después abruptamente de un cierto número de espiras acumuladas por causa de un choque entre ellas, provocando daños en la superficie del alambre (aparición de escamas) llegando así a la rotura.
- e. Enredamiento de espiras pudiendo causar una rotura del hilo. Los resultados de resistencia mecánica de tracción y conductividad eléctrica van a depender del diámetro final, composición química del material y la eficiencia del tratamiento de solubilización. De cualquier forma se registra en la tabla 4.2 los resultados obtenidos dentro de los valores mínimos especificados por la norma.

./.

TABLA 4.1

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SOLUBILIZACION

<u>R O L L O</u>	E S T A D O			
	LAMINADO Ø 9.5 mm		SOLUBILIZADO Ø 9.5 mm	
	RT (Kg/mm <sup>2</sup> )	CE (%IACS)	RT (Kg/mm <sup>2</sup> )	CE (%IACS)
1	19.3	54.6	15.7	51.0
2	18.8	54.3	18.5	50.3
3	16.6	56.0	17.8	51.0
4	18.5	54.9	18.2	50.8
5	15.1	57.0	17.0	50.8
6	14.8	57.3	17.9	51.7
7	15.8	56.8	16.8	51.2

TABLA 4.2

RESULTADOS DE LOS ALAMBRES TREFILADOS

DESPUES DEL TREFILADO

RESISTENCIA DE TRACCION  
(Kg/mm<sup>2</sup>)

31.5 - 36.5

CONDUCTIVIDAD  
(%IACS)

49.5 - 51.5

./.

TABLA 4.3

VALOR	R.T. (KG / mm <sup>2</sup> )	ALARGAMIENTO % sobre 250mm	CONDUCTIVIDAD % IACS
MAXIMO	35.2	7.2	55.6
MEDIO	33.8	6.2	52.8
ESPECIFICADO	32.5	3.0	min 52.5

TABLA 4.4

COMPARACION DE LA RESISTENCIA MECANICA ENTRE LA  
SOLDADURA EN FRIO Y SOLDADURA DE TOPE ELECTRICO

ENSAYO RT ALAMBRES Al-Mg-Si Ø = 3.45 mm	Kg/mm <sup>2</sup>
SOLDADURA EN FRIO	32.6
SOLDADURA EN FRIO CON RECOCIMIENTO	20.4
SOLDADURA DE TOPE ELECTRICO VARIA ENTRE	13.3 a 20.4
HILO ENVEJECIDO SIN SOLDAR	36.4

NOTA: OBSERVAR QUE LA SOLDADURA EN FRIO CON RECOCIDO POSTERIOR DISMINUYE EL VALOR RT PERO ES MAS EXACTO QUE LA SOLDADURA DE TOPE ELECTRICO.

./.

FOTO 4.1 EFECTO DE LA LICUACION EN  
~2X LA SUPERFICIE DEL MATERIAL

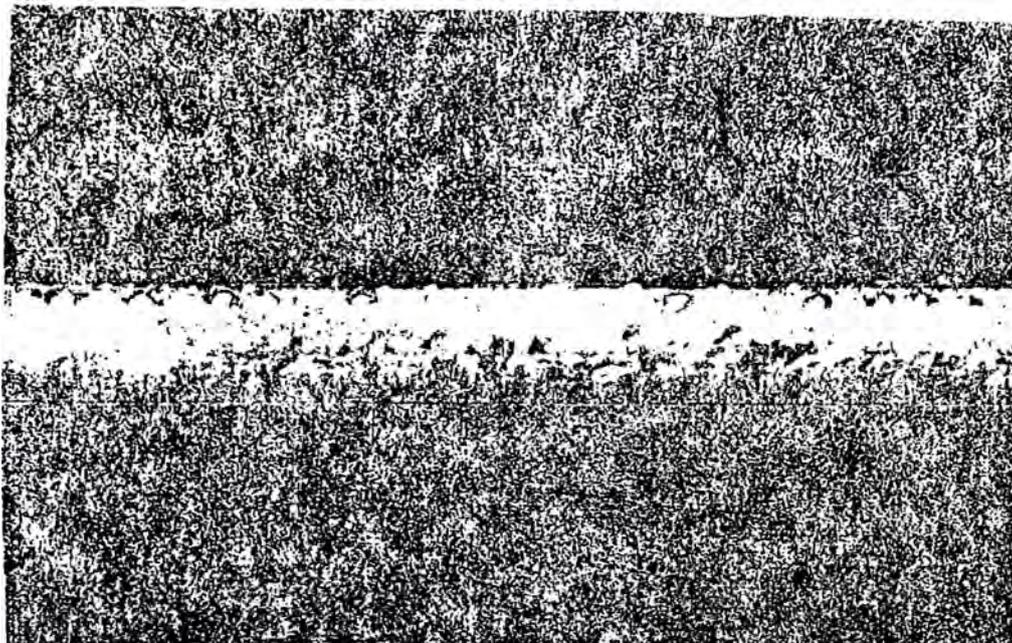
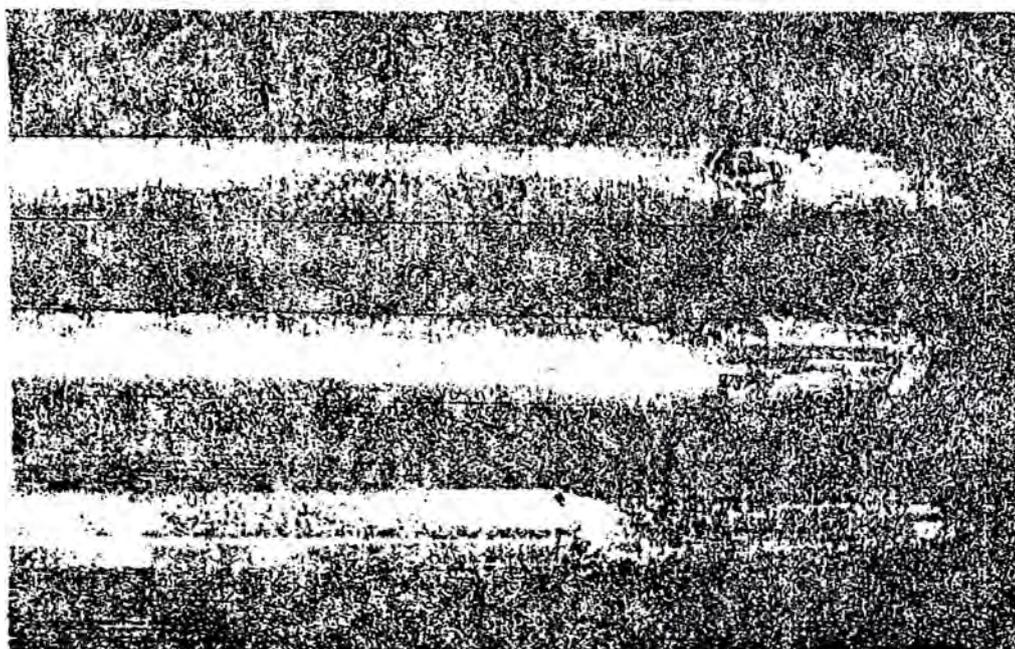


FOTO 4.2 ROTURA DEL ALAMBRON POR  
~2X EMPASTAMIENTO 1<sup>a</sup> HILERA



## CAPITULO N° 5 - ESTUDIO DE LA RESOLUBILIZACION Y SOLDADURA DE ALAMBRONES DE ALUMINIO-MAGNESIO-SILICIO

En el presente capítulo se detallan las pruebas realizadas por la compañía CÉPER (Conductores Eléctricos Peruanos), ante el problema de investigar las causas de fallas de líneas aéreas de aleación de aluminio desde el alambión hasta el producto final.

La implementación del proyecto sobre aluminio, capacitó a la empresa poder obtener un gran avance al respecto, para la fabricación de líneas aéreas de aleación de aluminio con los resultados obtenidos; asegurando así un producto de excelente calidad.

**5.1 Envejecimiento de los alambiones:** El alambión de aleación de aluminio sufre un endurecimiento por precipitación de los compuestos aleantes Magnesio y Silicio bajo la forma  $Mg_2Si$ , este fenómeno se le llama "envejecimiento natural".

La mayoría de los productores de aluminio se encuentran a gran distancia (Canadá, Francia, USA, etc.). Existe entonces una demora en el arribo de la materia prima para la fabricación de cuerdas de aleación Al-Mg-Si para líneas de alta tensión. A veces el tiempo de arribo de la materia prima excede los 6 meses, sufriendo el alambión el fenómeno de envejecimiento natural. Las pruebas de resistencia mecánica de tracción, elongación a la ruptura y conductividad se alejan de las normas de fabricación, imposibilitando una buena trefilación hasta el producto final.

Una característica fundamental de estas aleaciones que puede ser

resolubilizada térmicamente, donde los valores de norma de fabricación se obtienen, sometiendo al alambroón a las condiciones similares de la fabricación.

El proceso de resolubilización es por lo tanto muy importante, porque retardaría el fenómeno de envejecimiento natural y brindar valores de ensayo de tracción, elongación y conductividad más favorables para su trefilación.

Los posibles problemas que se presentan con alambrones muy duros y de baja elasticidad son los siguientes:

- a. Rotura en los puntos de soldadura de los alambrones.
- b. Agrietamiento de la superficie.
- c. Sobre-envejecimiento por trefilación.
- d. Alambres frágiles por esfuerzos internos retenidos en la matriz, etc.

La tabla 5.1 resume los ensayos realizados a los alambrones recepcionados para las pruebas en el transcurso del tiempo.

La foto 5.1 muestra la presencia de los precipitados de  $Mg_2Si$  en el alambroón, tal como se recibe.

El diagrama 5.1 describe el efecto del envejecimiento y el mecanismo durante la trefilación.

**5.2 Sistema Al-Mg-Si:** El aluminio aleado con el magnesio y silicio, forman una de las mejores aleaciones tratables térmicamente. No existiendo compuestos intermetálicos ternarios en el sistema, se puede considerar un diagrama pseudo binario Al- $Mg_2Si$ . El compuesto  $Mg_2Si$

con 36%Si y 64% Mg funde a 1102°C y aparece como fase intermetálica distinta a las estructuras de las aleaciones ternarias.

Es así que se puede considerar el diagrama 5.2 Al-Mg<sub>2</sub>Si como binario.

La aleación eutéctica siendo binaria se forma aproximadamente con: 8.25% Mg 4.75% Si (12% Mg<sub>2</sub>Si) y solidifica a 595°C.

El límite de solubilidad sólida de la aleación pseudo-binaria Al-Mg<sub>2</sub>Si, es según la tabla 5.2, la proporción de Mg/Si es 1.73. La solubilidad sólida del Mg<sub>2</sub>Si en aluminio es levemente reducida por la presencia del silicio en exceso, pero un exceso de Magnesio reduce tremendamente la solubilidad sólida.

La aleación Al-Mg-Si bajo la norma USA 6201 ASTM B 398 admite contenidos de Magnesio que varíen entre 0.6 a 0.9% y para el silicio entre 0.5 a 0.9%, resultando Mg<sub>2</sub>Si del 0.94 al 1.43% como base de magnesio.

Así la aleación siempre debe caer en el campo de la solución sólida como la solidificación no ocurre en condiciones de equilibrio y debido al intervalo de solidificación relativamente grande, debe esperarse que ocurran zonas de eutécticos interdendríticos, en donde las partículas de Mg<sub>2</sub>Si deben ser nucleadas en el enfriamiento al estado sólido, debido a la disminución del límite de solubilidad.

El calentamiento a 560°C, sí cae en el campo donde el Mg<sub>2</sub>Si está en solución sólida en forma sustitucional en el aluminio. El enfriamiento rápido en agua a partir de esta temperatura, produce una solución super saturada de Magnesio y Silicio en  $\alpha$ , pero persiste la tendencia de formación de zonas más ricas en soluto porque la atracción entre Mg y Si es alta.

Cuando se realiza el envejecimiento del material en torno a  $170^{\circ}\text{C}$ , los átomos del soluto migran en dirección a las dislocaciones para formar zonas ricas en soluto y nuevamente precipitan  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Entonces, el endurecimiento es por precipitación y comienza como una formación de zonas Guinier-Preston (G.P.) esféricas a lo largo de la dirección (100), asume luego una forma de agujas, las cuales crecen formando bastones y eventualmente placas de  $\text{Mg}_2\text{Si}$  que es un precipitado estable.

La dureza máxima es alcanzada justamente antes de la formación de las placas. La temperatura de  $230^{\circ}\text{C}$  es la temperatura crítica donde no se forman las zonas GP, siendo muy importante la temperatura del tratamiento de envejecimiento.

### 5.3 Tratamientos de Resolubilización de alambrones envejecidos:

Para el estudio de resolubilización se dispone de 4 diferentes aleaciones Al-Mg-Si:

AGS/L 55 Pechiney Francia

AGS/L 66 Pechiney Francia

6201 Southwire USA

6201 Venezuela

A continuación se detalla la serie de pruebas que se realizaron con estas muestras:

5.3.1 Control de propiedades mecánicas y eléctricas: Las tablas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 se resumen las condiciones mecánicas y eléctricas de cada muestra. Se aprecia que los resultados

son diferentes a los valores prescritos por las normas. Por tal motivo es muy importante este estudio de resolubilización para encontrar la temperatura y tiempo óptimos de resolubilización.

**5.3.2 Tratamiento Térmico de Resolubilización.**- La aleación Al-Mg-Si 6201 y AGS/L son equivalentes según las normas americanas y francesas. La serie de aleaciones se caracterizan por ser tratables térmicamente, pudiéndose así efectuar el proceso de resolubilización.

Del diagrama 5.2 se observa las fases que presenta esta aleación que son:  $\alpha + Mg_2Si$ , que es la resultante del proceso de envejecimiento natural al transcurrir el tiempo, produciendo según los resultados de las tablas 5.3 al 5.6 valores mayores de resistencia máxima de tracción, menor elongación y menor conductividad.

Desde el punto de vista de trefilación se obtendrán problemas de rotura por su baja elongación (ver diagrama 5.1).

El tratamiento de resolubilización es justamente aquel, donde se traten los alambres a temperaturas alrededor de  $530^{\circ}C$ , logrando obtener la fase  $\alpha$  (fase de solución sólida de Mg y Si en el aluminio); que se caracteriza por su homogeneidad, de menor carga de tracción y alta elongación. Observaremos que esta temperatura es elevada, entonces se procede a un tratamiento de enfriamiento violento (Quenching) para que la fase  $\alpha$  se mantenga a temperatura ambiente.

El enfriamiento se hace en agua fría, donde el tiempo en tre la salida del alambión al tanque de agua fría no debe ser mayor de 15 segundos. Luego se procede a secarlo en estufa a 110°C aproximadamente, a fin de asegurar que la hume dad no afecte al lubricante de trefilación y el de aligerar el proceso de envejecimiento, ya que por el diagrama 5.3 ob servaremos el aumento de la carga de rotura con el transcurso del tiempo. Por este motivo, los fabricantes franceses recomiendan trefilar lo más pronto posible el alambión para un proceso sin dificultades.

#### 5.4 Efectos de Temperatura y tiempo de solubilización.-

Se realizaron dos series de tratamiento de resolubilización de los alambiones. La primera serie sirvió de sondeo y fue realizada en el laboratorio N° 9 del Departamento de Metalurgia de la Universidad Nacional de Ingeniería U.N.I.; y la segunda serie se realizó en el laboratorio de Control de Calidad de CEPER.

5.4.1 Tratamientos Térmicos efectuados en la U.N.I.; Se realizaron tres tratamientos, para verificar el comportamiento del alambión con respecto al tiempo y la temperatura.

A. Tratamiento: Se sometieron muestras de 35 cms. de longitud en un horno de tratamiento térmico por un cierto tiempo, se sacan las muestras del horno y se enfrían inmediata mente en una bandeja de agua fría. Finalmente se llevan a un horno de secado a 120°C. Los ensayos de tracción se realizaron en CEPER.

Las dos primeras pruebas se sometieron juntas las aleaciones 6201 Americana y Venezolana, por espacios de 30 y 60 minutos respectivamente. Los resultados de estos tratamientos se resumen en la tabla 5.7 y 5.8.

El tercer tratamiento se sometió solo la aleación 6201 americana por espacio de tres horas. Los resultados de este tratamiento se resume en la tabla 5.9.

**B. Resultados Obtenidos:** Los tres tratamientos efectuados en la U.N.I. sirvieron para asegurar lo siguiente:

- a) El tratamiento de resolubilizado tuvo lugar en forma exitosa para la aleación 6201 Americana en las tres pruebas efectuadas a 550°C.
- b) El tratamiento de resolubilizado de la aleación 6201 venezolana no siguió el mismo comportamiento, apreciándose un deterioro en las propiedades mecánicas y aspecto superficial. Deduciéndose que la temperatura de 550°C para esta aleación no es la apropiada. La observación metalográfica de esta aleación muestra un aumento de precipitados y formación de eutécticos que aumentan resistencia mecánica haciéndola muy difícil de trefilar. La elongación del 20% como mínimo tampoco se obtuvo.
- c) Para posteriores tratamientos se preferirá dejar las muestras 24 horas para poder efectuar los ensayos de tracción.
- d) Se preferirá tratar aleación por aleación, para no dete

riorar aquella aleación que tenga otra temperatura óptima de resolubilización. Tal es el caso de los dos primeros tratamientos.

#### 5.4.2 Tratamientos Térmicos efectuados en CEPER:

Para tener las facilidades de un mejor estudio de resolubilización, CEPER ordenó la reparación de un horno de tratamiento térmico a una compañía particular. Se realizó un programa de tratamientos térmicos con los objetivos siguientes:

- a) Hallar la temperatura de formación de eutécticos.
- b) Hallar la temperatura óptima de resolubilización.
- c) Hallar el tiempo óptimo de resolubilización

A. Procedimiento: Para las dos series de tratamientos térmicos, se sigue el procedimiento similar al efectuado en la UNI.

Se enciende el horno hasta alcanzar la temperatura deseada para el tratamiento, introducir las muestras y esperar a que se homogenice la temperatura, para iniciar la medición del tiempo de tratamiento. Concluido este tiempo, se extraen las muestras y se enfrían en una bandeja de agua fría, removiendo para un enfriamiento homogéneo. Seguidamente se lleva a una estufa por una hora a 110°C para el secado respectivo.

Concluido esta etapa se extraen las muestras y se guardan para que los tratamientos de resistencia de tracción y elongación se efectúen al día siguiente.

./.

B. Tratamientos térmicos para el cálculo de temperatura

Óptima: Este estudio se efectuó por espacio de una hora cada tratamiento y variando la temperatura en un rango de 500, 520, 540, 560, 580 y 600, para identificar el efecto que tiene la temperatura en los cuatro alambros en estudio.

Estos tratamientos se efectuaron aleación por aleación según el procedimiento descrito anteriormente. Los resultados de los tratamientos se resumen en la tabla 5.10.

C. Tratamientos térmicos para hallar el tiempo óptimo: Es

tos tratamientos se efectuaron a las temperaturas óptimas para cada aleación encontradas en (B). La aleación AGS/L 55 Francia fué seleccionada para estas pruebas, cuyo procedimiento es el mismo que las otras pruebas anteriores. Así se sometió a 540°C por espacio de 1, 2, 4 y 6 horas de duración. Los resultados se resumen en la tabla 5.11.

Se observa en este cuadro que a mayor tiempo de tratamiento las propiedades mecánicas disminuyen. Se realizaron los otros tratamientos térmicos para las otras aleaciones a la temperatura óptima propia de cada una de ellas por espacio de 1 y 2 horas. Los resultados se resumen en la tabla 5.12.

D. Resultados Obtenidos:

./.

- a) De las tablas 5.11 y 5.12 se observa que el tiempo óptimo de resolubilización para todas las aleaciones es de 2 horas a la temperatura óptima correspondiente para cada aleación.
- b) El aumento del tiempo de tratamiento tiende a disminuir la carga de tracción y la elongación.
- c) De las pruebas de temperatura y tiempo óptimo de resolubilización, se concluye finalmente que los valores ideales son:
  - Aleación AGS/L 55 y AGS/L 66; 540°C y 2 horas
  - Aleación 6201 USA; 540 - 550°C y 2 horas
  - Aleación 6201 Venezolana; 530°C y 2 horas
- d) Es factible realizar la resolubilización de los alambres envejecidos, requiriéndose tener solo la infraestructura necesaria y llevar a nivel industrial los resultados obtenidos en el laboratorio.

## 5.5 Soldadura de Alambres.-

Se ha seleccionado la aleación AGS/L 55 como estudio para las pruebas de soldadura de alambres de aleación de aluminio.

5.5.1 Condiciones Iniciales: La comparación de las propiedades mecánicas del alambres envejecido para las pruebas con los requerimientos de la norma se detallan en la tabla 5.13. Observaremos que el alambres no cumple con los datos requeridos. A pesar de ello se realizaron los ensayos de sol

dadura de estos alambrones envejecidos.

#### 5.5.2 Procedimiento para la soldadura de los alambrones:

Se seleccionaron muestras de 40 cms., en cantidad suficiente, se cortan en dos tramos de 20 cms. cada uno; se colocan en las mordazas de la máquina de soldar uniendo los dos extremos. Se regulan los parámetros de estudio, que son presión entre mordazas y selector del voltaje (cantidad de calor). Se acciona el mecanismo de calentamiento por paso de corriente, produciéndose así la soldadura de los dos extremos. Concluida esta etapa se elimina la rebaba por medio de un alicate de corte y una lima. Finalmente se llevan las muestras al ensayo de tracción y al cálculo de la elongación.

#### 5.5.3 Condiciones para el estudio de la soldadura: Se han tomado las siguientes variables para el estudio:

Presión entre mordazas: 40, 50, 60, 70 psi (lb/pulg<sup>2</sup>)

Posición del selector del voltaje: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Los resultados de ensayos de tracción están resumidos en la tabla 5.14.

#### 5.5.4 Interpretación de los resultados:

- a) El valor máximo de resistencia de tracción fué de 1192.513 Kgs. Existe una diferencia de 340 Kgs. con respecto al alambroñ sin soldar. Se deduce que en el soldado el calentamiento provoca la solubilización de los precipitados de Mg<sub>2</sub>Si en la zona de soldado y así cuando se efectúa el ensayo de

./.

- tracción, los esfuerzos se concentran en la zona de la soldadura.
- b) Se observa también que las roturas ocurren no en el punto de soldadura sino en su vecindad.
  - c) De la tabla 5.14 se deduce que en las condiciones iniciales como se encuentra los alambres, las presiones de 50 y 60 psi entre mordazas y selector de voltaje 9, son los puntos más óptimos.
  - d) Las muestras soldadas al cabo de algunos días sufren envejecimiento natural.
  - e) Se probó el efecto de calentamiento de la soldadura sin llegar a soldar. La tabla 5.15 muestra los resultados obtenidos. Se concluye que el calentamiento mejora la elongación y disminuye la carga de tracción.
  - f) El calentamiento que sufre el alambre en las mordazas tiene a debilitarla, ya que las roturas ocurren en esa zona.

T A B L A 5.1

PROPIEDADES ELECTRICAS Y MECANICAS DE LOS ALAMBRONES

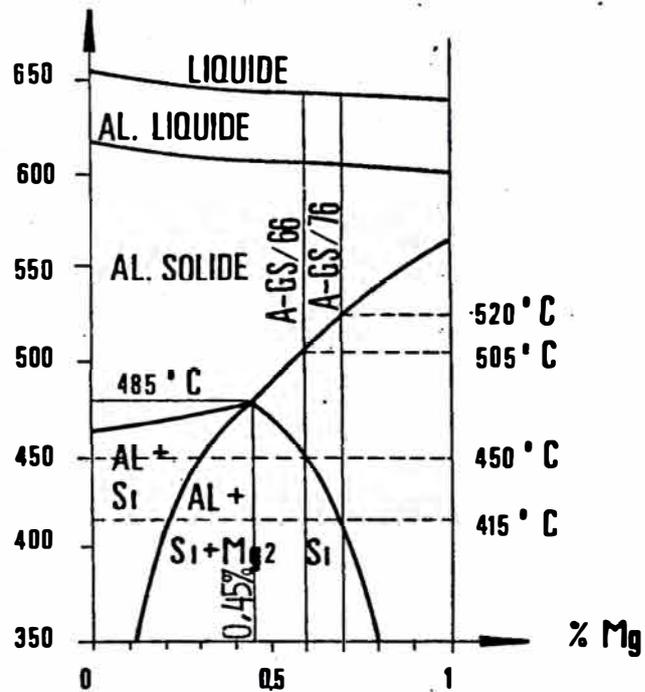
TIEMPO	ALEACION	CARGA TOTAL KGS	CARGA UNITARIA KG/mm <sup>2</sup>	ELONGACION %	RESISTIVIDAD $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{Km}}$	CONDUCTIVIDAD % IACS
ASI RECIBIDO	AGS/L 55	1519.11	21.43	16.33	33.57	51.34
	AGS/L 66	1610.47	22.72	15.10	34.00	50.60
	6201 USA	1533.09	20.61	15.61	34.01	49.47
	6201 VEN	1215.59	17.60	16.26	33.52	52.72
4 MESES	AGS/L 55	1555.71	21.95	18.26	33.74	51.10
	AGS/L 66	1624.69	22.92	15.55	33.96	50.76
	6201 USA	1585.92	21.32	15.43	33.28	51.80
	6201 VEN	1280.20	18.55	16.33	33.57	51.34
6 MESES	AGS/L 55	1615.64	22.79	17.60	33.54	51.40
	AGS/L 66	1691.15	23.86	16.80	34.17	50.45
	6201 USA	1623.13	21.81	16.00	33.30	51.76
	6201 VEN	1324.48	19.19	17.00	33.66	51.21
VALORES DE NORMA	AGS/L 55	1134 a 1346	18 a 19	20	32.83	52.5
	AGS/L 66	1276 a 1488	18 a 21	20	32.83	52.5
	6201 USA	****	****	20	32.83	52.5
	6201 VEN	****	****	20	32.83	52.5

NOTA: Observaremos que los valores de carga unitaria y elongación no están en normas. Esto trae consigo muchas dificultades en el trefilado. (Esto no quiere decir que no se puede trefilar, más bien, al efectuarse se producirán muchas roturas).

TABLA 5.2 LIMITE DE SOLUBILIDAD SOLIDA DEL  
DIAGRAMA DE FASE Al-Mg<sub>2</sub>Si

CONSTITUYENTE	LIMITE DE SOLUBILIDAD (% EN PESO)			
	595°C	550°C	500°C	400°C
Mg	1.17	0.94	0.68	0.32
Si	0.68	0.54	0.40	0.19
Mg <sub>2</sub> Si	1.85	1.48	1.08	0.51

DIAGRAMA 5.2 DIAGRAMA SEUDO-BINARIO Al-Mg<sub>2</sub>Si



COUPE Al-Mg-Si (A Si = 0,6 %)

TABLA 5.3

CONTROL DE PROPIEDADES MECANICAS Y  
ELECTRICAS DE LA ALEACION AGS/L 55

N°	CARGA TOTAL KILOS	CARGA UNITARIA KG/MM <sup>2</sup>	ELONGACION %
1	1530.61	21.59	FM
2	1548.98	21.85	FM
3	1538.77	21.71	19.2
4	1551.02	21.88	16.4
5	1571.43	22.17	18.4
6	1591.83	22.46	FM
7	1530.61	21.59	18.8
8	1571.43	22.17	19.2
9	1561.22	22.02	17.6
10	1561.22	22.02	FM
PROM.	1551.71	21.95	18.26
NORMA	1134 a 1346	16 a 19	≥20
N°	RESISTENCIA OHMICA 20°C $\Omega / \text{Km}$	RESISTIVIDAD $\frac{\Omega}{\text{Km}} \text{ mm}^2$	CONDUCTIVIDAD % IACS
1	0.482158	34.17	50.45
2	0.4717192	33.43	51.57
3	0.4741912	33.61	51.29
PROM.	0.476019	33.74	51.1
NORMA		≤32.83	≥52.5

FM: ROTURA FUERA DE MARCAS

TABLA 5.4

CONTROL DE PROPIEDADES MECANICAS Y ELECTRICAS  
DE LA ALEACION AGS/L 66

N°	CARGA TOTAL KILOS	CARGA UNITARIA Kg/mm <sup>2</sup>	ELONGACION %
1	1608.16	22.68	14.4
2	1648.98	23.26	16.4
3	1551.02	21.88	15.2
4	1655.10	23.35	15.6
5	1675.51	23.64	FM
6	1571.43	22.17	FM
7	1653.06	23.32	14.8
8	1636.78	23.09	16.4
9	1614.28	22.77	15.2
10	1632.65	23.03	16.4
PROM.	1624.69	22.92	15.55
NORMA	1276 a 1488	18 a 21	≥ 20
N°	RESISTIVIDAD OHMICA $\Omega$ / Km	RESISTIVIDAD $\frac{\Omega}{\text{Km}}$ mm <sup>2</sup>	CONDUCTIVIDAD % IACS
1	0.4804839	34.05	50.63
2	0.4735903	33.56	51.37
3	0.4833398	34.25	50.33
PROM.	0.47138	33.96	50.76
NORMA		≤ 32.83	≥ 52.5

FM: ROTURA FUERA DE MARCAS

TABLA 5.5

CONTROL DE LAS PROPIEDADES MECANICAS Y  
ELECTRICAS DE LA ALEACION 6201 USA

Nº	CARGA TOTAL KILOS	CARGA UNITARIA KG/mm <sup>2</sup>	ELONGACION %
1	1579.59	21.23	16.0
2	1591.84	21.26	15.6
3	1602.04	21.53	15.2
4	1579.59	21.23	16.0
5	1591.84	21.40	14.0
6	1591.84	21.40	FM
7	1585.71	21.31	FM
8	1581.63	21.26	15.2
9	1571.43	21.12	16.0
10	1583.67	21.29	FM
PROM.	1585.92	21.32	15.43

Nº	RESISTENCIA OHMICA $\Omega / \text{Km}$	RESISTIVIDAD $\frac{\Omega}{\text{Km}} \text{ mm}^2$	CONDUCTIVIDAD % IACS
1	0.447392	33.28	51.79
2	0.446869	33.24	51.85
3	0.447695	33.30	51.76
PROM. NORMA	0.447320	33.28 32.83	51.80 52.50

FM: ROTURA FUERA DE MARCAS

TABLA 5.6

CONTROL DE LAS PROPIEDADES MECANICAS Y ELECTRICAS  
DE LA ALEACION 6201 VENEZUELA

Nº	CARGA TOTAL KILOS	CARGA UNITARIA Kg/mm <sup>2</sup>	ELONGACION %
1	12 93.87	18.75	17.2
2	1248.98	18.10	FM
3	1271.43	18.42	FM
4	1244.89	18.04	14.4
5	1275.51	18.48	FM
6	1300.00	18.84	14.4
7	1285.71	18.63	15.6
8	1316.32	19.07	17.6
9	1306.12	18.93	FM
10	1259.18	18.25	18.8
PROM	1280.20	18.55	16.33

Nº	RESISTENCIA OHMICA $\Omega$ / Km	RESISTIVIDAD $\frac{\Omega}{\text{Km}}$ mm <sup>2</sup>	CONDUCTIVIDAD % IACS
1	0.48590	33.52	51.43
2	0.488559	33.71	51.14
3	0.4854079	33.49	51.48
PROM	0.4866225	33.57	51.34
NORMA		32.83	52.5

FM: FUERA DE MARCAS

TABLA 5.7

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESOLUBILIZACION  
DE 30 MINUTOS, EFECTUADO EN LA UNI

ALEACION	6201 USA		6201 VENEZUELA	
	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES
CARGA TOTAL Kgs	1512	1196	1210	1414
CARGA UNIT. Kg/mm <sup>2</sup>	20.36	16.1	17.54	20.49
ELONGACION %	16.14	23.2	16.33	18.00
AREA mm <sup>2</sup>	74.25			69.00
DIAMETRO mm	9.72			9.37

NOTA: Estos valores son el promedio de 2 ensayos y se efectuaron aproximadamente a 2 horas del tratamiento

TABLA 5.8

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESOLUBILIZACION  
DE UNA HORA EFECTUADO EN LA UNI

ALEACION	6201 USA		6201 VENEZUELA	
	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES
CARGA TOTAL Kgs	1512	1325	1210	1406.7
CARGA UNIT. Kg/mm <sup>2</sup>	20.36	17.84	17.54	20.38
ELONGACION %	16.14	23.2	16.33	17.80
AREA mm <sup>2</sup>	74.25			69.00
DIAMETRO mm	9.72			9.37

NOTA: Estos valores son el promedio de 3 ensayos y se efectuaron 3 horas después del tratamiento.

TABLA 5.9

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RESOLUBILIZACION DE  
TRES HORAS EFECTUADA EN LA U. N. I.

---

ALEACION	6201: USA	
	<u>ANTES</u>	<u>DESPUES</u>
CARGA TOTAL KGS	1512	1386.15
CARGA UNITARIA KG/mm <sup>2</sup>	20.31	18.63
ELONGACION %	16.14	22.8
CONDUCTIVIDAD % IACS	51.6	55.08
RESISTIVIDAD $\frac{\Omega}{\text{Km}}$ mm <sup>2</sup>	33.41	31.29
AREA mm <sup>2</sup>		74.25
DIAMETRO mm		9.72

NOTA: Estos ensayos se efectuaron 2 horas después del  
tratamiento y son el promedio de tres ensayos.

TABLA 5.10

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA TEMPERATURA OPTIMA DE RESOLUBILIZACION

FECHA DEL TRATAMIENTO	ABRIL 21	ABRIL 27	ABRIL 28	ABRIL 29	ABRIL 29	ABRIL 28	
FECHA DEL ENSAYO	ABRIL 21	ABRIL 28	ABRIL 29	ABRIL 30	ABRIL 30	ABRIL 29	
TEMPERATURA	500°C	520°C	540°C	560°C	580°C	600°C	
ALEACION							
AGS/L 55	Kgs	891.15	1061.22	1071.43	1085.03	1109.25	969.38
	Kg/mm <sup>2</sup>	12.57	14.97	15.11	15.31	15.93	13.67
	%	FM	19.46	20	18.4	20.1	FM
AGS/L 66	Kgs	946.91	1119.05	1348.97	1238.09	1272.1	1244.89
	Kg/mm <sup>2</sup>	13.36	15.78	19.03	17.47	17.94	17.56
	%	FM	FM	19.00	20.4	18.0	FM
6201 USA	Kgs	971.83	1234.69	1246.6	1344.89	1374.14	1285.71
	Kg/mm <sup>2</sup>	13.06	16.59	16.75	18.07	18.47	17.28
	%	FM	FM	FM	21.2	21.2	22.08
6201 VEN.	Kgs	918.18	1078.23	1197.27	1435.37	1459.18	1408.16
	Kg/mm <sup>2</sup>	13.31	15.63	17.35	20.8	21.14	20.41
	%	21.2	FM	FM	FM	20.8	FM

TABLA 5.11

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CALCULO DE TIEMPO  
OPTIMO DE RESOLUBILIZACION

<u>TIEMPO</u> (HORAS)	<u>ALEACION AGS/L 55</u>				
	INICIO	1	2	4	6
CARGA TOTAL KGS	1555.71	1071.43	1153.00	1044.08	1072.78
CARGA UNIT Kg/mm <sup>2</sup>	21.95	15.11	16.26	14.73	15.135
ELONGACION %	18.26	20.00	21.00	18.8	16.60
AREA mm <sup>2</sup>	70.88				
DIAMETRO mm	9.55				

TABLA 5.12

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CALCULO DE TIEMPO  
OPTIMO DE RESOLUBILIZACION

ALEACION		AGS/L 66	6201 USA	6201 VENEZ.
TEMP. TRATAM.		540°C	545-550°C	530°C
TIEMPO DESCRIPCION				
HORAS				
Inicio	CARGA TOTAL Kgs	1632.64	1585.92	1280.2
	CARGA UNIT Kg/mm <sup>2</sup>	22.92	21.32	18.55
	ELONGACION %	15.55	15.43	16.30
1	CARGA TOTAL Kgs	1348.97	1246.6	1197.27
	CARGA UNIT. Kg/mm <sup>2</sup>	19.03	16.73	17.35
	ELONGACION %	19.0	19.0	19.5
2	CARGA TOTAL Kgs	1346.93	1370.74	1156.46
	CARGA UNIT. Kg/mm <sup>2</sup>	19.00	18.42	16.76
	ELONGACION %	20.0	21.0	20.0

TABLA 5.13

COMPARACION DEL ALAMBRO DE ALEACION DE ALUMINIO  
CON LA NORMA PARA LOS ENSAYOS DE SOLDADURA

<u>PROPIEDAD</u>	<u>AGS/L 55</u>	<u>NORMA</u>
CARGA TOTAL Kgs	1532	1134 a 1346
CARGA UNITARIA Kg/mm <sup>2</sup>	21.6	16 a 19
ELONGACION %	16.92	20 mínimo
AREA mm <sup>2</sup>	70.88	
DIAMETRO mm	9.5	

TABLA 5.14

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SOLDADURA DE ALAMBRONES  
ENVEJECIDOS (SOLDADURAS SIMPLES)

PRESION ENTRE MORDAZAS Psi 40		50		60		70	
SELECTOR DE VOLTAJE	RT	RT	%	RT	%	RT	%
5	-	-	-	647.895	0.59	1175.505	5.71
6	542.850	1168.350	5.91	1158.160	5.51	1117.345	3.93
7	1068.365	1177.547	5.64	1183.158	6.06	1137.750	4.92
8	1091.835	1183.670	5.64	1188.430	5.77	1107.480	3.93
9	1446.933	1177.666	5.77	1192.513	5.77	1119.385	3.74
10	1075.507	1199.960	6.50	1161.220	5.91	1138.770	4.92
11	1089.113	918.360	1.38	1115.637	3.80	1098.633	3.93

NOTA: El selector de voltaje es un valor que la máquina de soldar posee, con la cual se regula la cantidad de calor para el soldado.

RT: Resistencia de tracción en kilos.

% : Elongación a la rotura sobre 250 mm de longitud de marcas.

TABLA 5.15

RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE SOLDADURAS DE ALAMBRONES  
RESOLUBILIZADOS ALEACION 6201 USA (550°C - 3 HORAS)

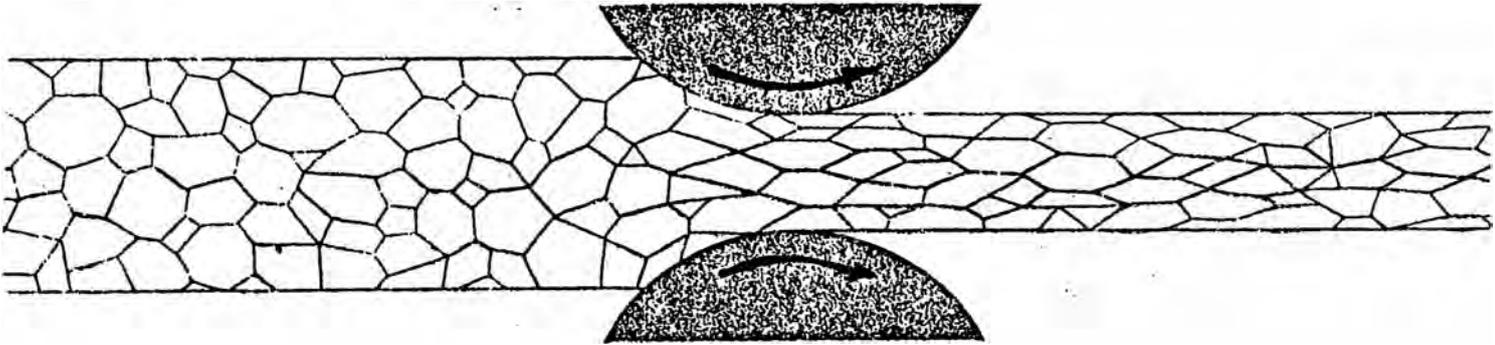
PRESION PSI (Lb/pulg <sup>2</sup> )	VOLTAJE 9		VOLTAJE 10	
	CARGA TOTAL	ELONG	CARGA TOTAL	ELONG
	Kgs	%	Kgs	%
50	1210.2	8.0	1224.5	8.4
	1214.3	8.4	1253.0	10.0
	<u>1281.6</u>	<u>9.6</u>	<u>1244.9</u>	<u>9.6</u>
	1235.36	8.6	1240.8	9.3

NOTA: Todos estos resultados son de soldaduras simples.

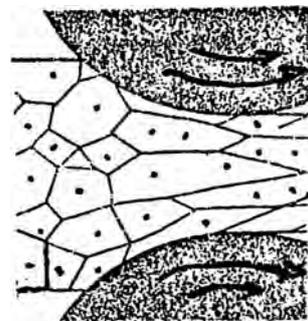
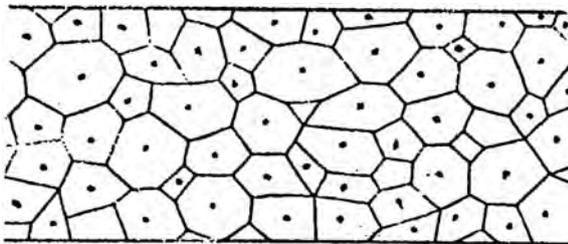
PRESION PSI (Lb/pulg <sup>2</sup> )	VOLTAJE 11		VOLTAJE 11	
	CARGA TOTAL	ELONG	CARGA TOTAL	ELONG
	Kgs	%	Kgs	%
	SOLDADURA SIMPLE		SOLDADURA DOBLE	
50	1285.7	13.6	1255.0	10
	1244.9	8.8	1255.0	10
	1091.8	6.0	1230.6	10

DIAGRAMA 5.1

MECANISMO DE LA TREFILACION



EFFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO NATURAL



Presencia de Precipitados de  $Mg_2Si$  que endurecen la matriz y se requiere un mayor esfuerzo.

DIAGRAMA 5.2 Al - Mg<sub>2</sub>Si DIAGRAMA PSEUDO BINARIO

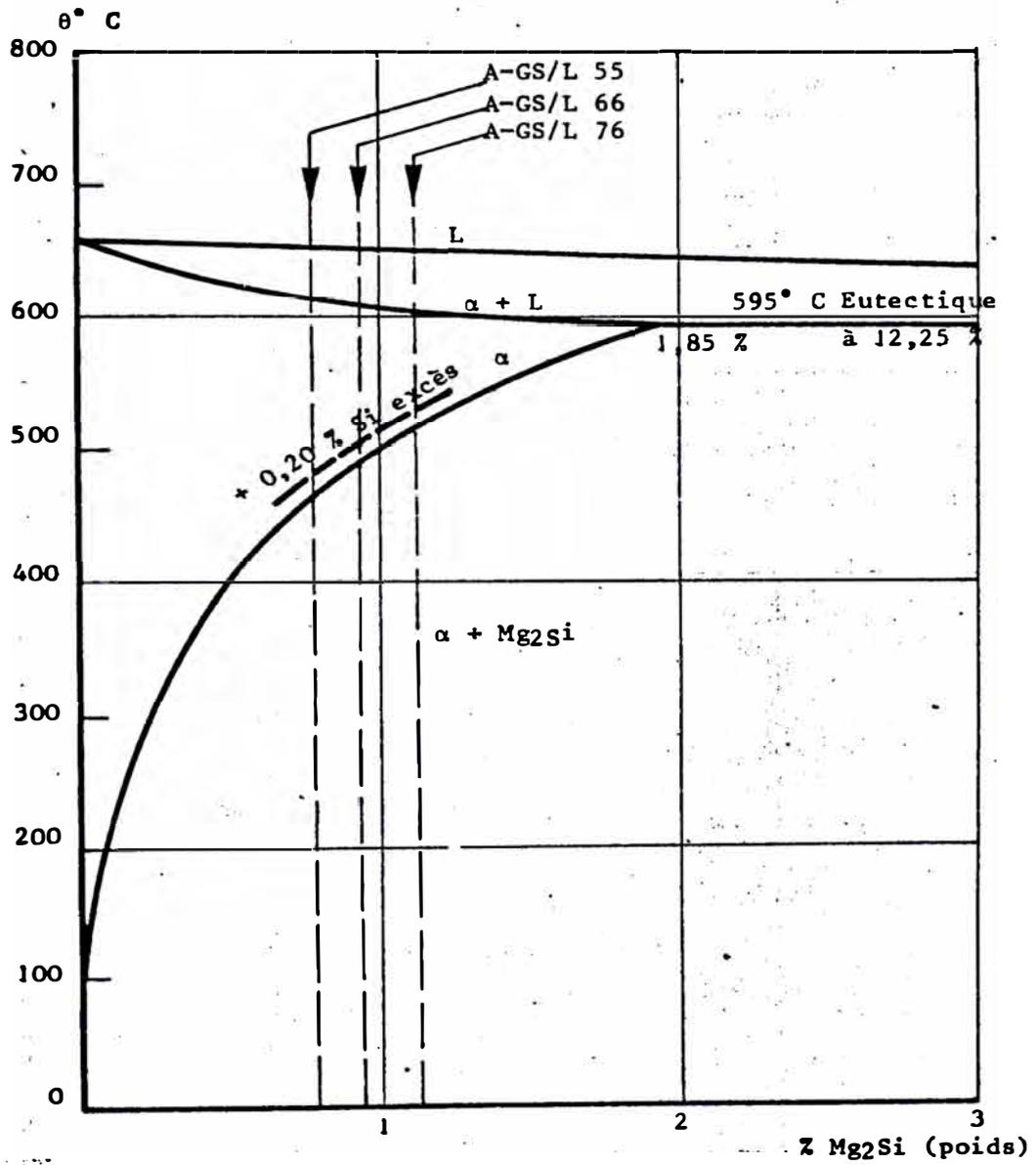
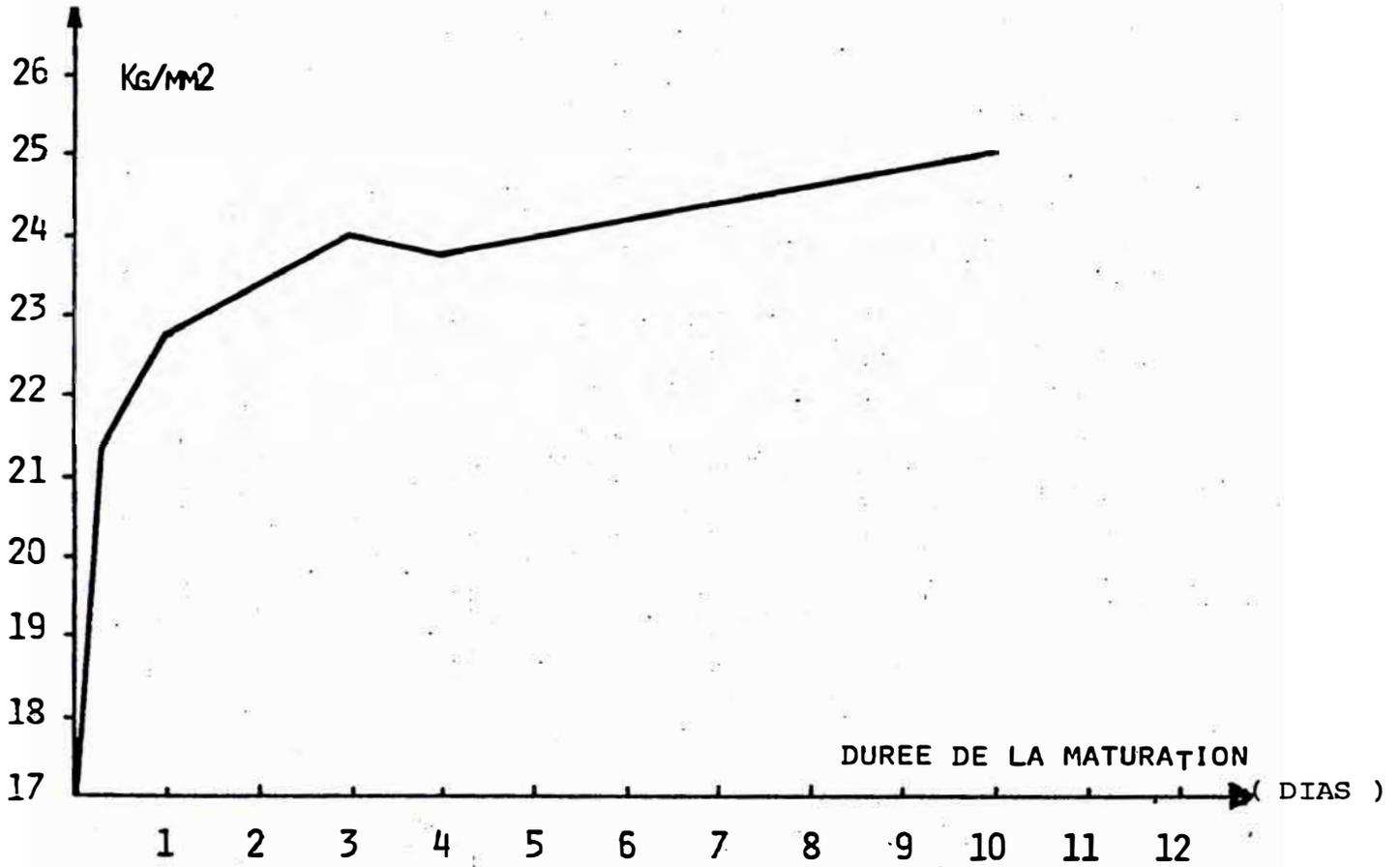
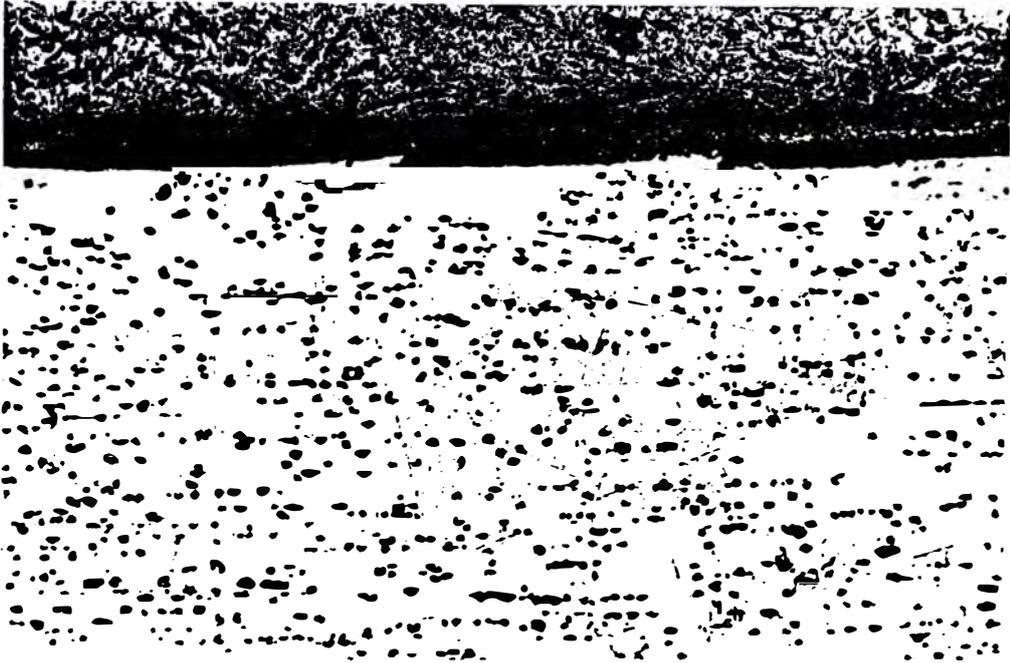


DIAGRAMA 5.3 ENDURECIMIENTO ESTRUCTURAL SEGUN  
EL TIEMPO ( ENVEJECIMIENTO )



## FOTOS 5.1



Muestra: Southwire, sección longitudinal. Presencia  
120 X de precipitados de Mg<sub>2</sub>Si (puntos oscuros )



Muestra: Southwire, sección transversal. Alambrón  
120 X envejecido naturalmente. Id. anterior.

## CAPITULO N° 6 - ESTUDIO DE CORROSION DE CABLES DE ALEACION DE ALUMINIO EN EL PAIS .-

Los problemas encontrados en líneas aéreas desnudas de alta tensión de aleación de aluminio (AAAC), motivaron a la empresa CEPER (Conductores Eléctricos Peruanos S.A.), a efectuar un estudio al respecto. El proyecto de investigación Tecnológica se llevó a cabo en coordinación con el ITINTEC. La empresa ELECTROLIMA proporcionó muestras de líneas que habían sufrido fallas en el uso.

El presente estudio detalla los resultados obtenidos en CEPER. También se presenta los resultados efectuados en la Universidad de Uppsala-Suecia, sobre algunas muestras enviadas por ELECTROLIMA para un estudio con un microscopio de barrido de electrones SEM.

Los análisis metalográficos realizados muestran un gran deterioro del material empleado, en evidencia la severidad del medio ambiente, donde se ha empleado. Se presume existan problemas de contaminación industrial.

### 6.1 PROBLEMAS ENCONTRADOS EN EL PAIS.-

El costo de los conductores en una línea aérea de transmisión es al rededor del 25 al 30% del costo total de una línea. Ante la búsqueda de encontrar mayores economías, durante la década del 60 se generalizó el empleo de conductores de aluminio-magnesio-silicio (AAAC), en lugar de los tradicionales conductores de cobre.

Electrolima posee en el área de concesión de Lima 2800 toneladas de este conductos AAAC instalados. Durante los primeros años se instala

ron conductores de procedencia extranjera tales como Almelec de Francia, Arvidal de Canadá, Aldrey de Suiza, etc. Durante la década del 70, ante la decisión del gobierno de prohibir las importaciones, aplicando impuestos que aumentaban el costo del conductor, se inició así, la fabricación de conductores de aleación de aluminio en el país, a partir de materia prima importada en forma de alambrón.

En el corto tiempo de uso de este conductor, no ha sido del todo satisfactorio, ya sea por algunos problemas localizados de contaminación salina, corrosión provocada por humos y productos provenientes de la quema de caña de azúcar o deficiencias en el propio material o durante el proceso de trefilación.

La relación de muestras enviadas por ELECTROLIMA para el estudio correspondiente son:

1. Lurín - San Bartolo - Fase media Poste 121
2. Poste N° 120 L620 Fase media.
3. L.T. Cahua Paramonga 138 KV.
4. Línea 60KV 125 mm<sup>2</sup> Cabina 1393, Cabina 1384 Huachipa.
5. Lurín - San Bartolo L619 Fase media Poste 129 - 130
6. L 619 Lurín - San Bartolo Fase media Poste 130 - 131
7. L 619 Lurín - San Bartolo Fase media 131 - 132.
8. L 619 Lurín San Bartolo Fase media Poste 132 - 133
9. 605 606 Cerro Cahulde T78.
10. 607 - 608 Cerro La Milla (Independencia)

## 6.2 ANÁLISIS METALOGRAFICO DE LA CORROSION DE LAS MUESTRAS.-

Las muestras recién recibidas para estudio metalográfico presentaron

un aspecto superficial de corrosión severa, zonas de haberse fundido el conductor, polvo de la capa externa y fragilidad de los hilos. Electrolima no proporcionó a que tipo de material pertenece cada muestra. Los análisis efectuados en CEPER fueron corroborados por el trabajo efectuado por la Universidad de Uppsala-Suecia.

6.2.1 Material y Equipo utilizado.- Para la ejecución de estos análisis se dispone de los siguientes equipos:

- a. Prensa para en montaje de briquetas con resina fenólica.
- b. Pulidora automática con material abrasivo para la preparación de probetas tales como:
  - Serie de lijas 180, 240, 320, 400.
  - Pastade diamante 1 y 6 micras,
  - Alúmina en suspensión 0,05, 0.3 y 1 micras.
  - Oxido de magnesio y óxido de cerio.
- c. Microscopio metalográfico de luz reflejada.
- d. Cámara fotográfica instalada en el microscopio.
- e. Fotómetro automático para cálculo de tiempo de exposición para la toma de microfotografías.

Se desarrollaron técnicas especiales para el pulido de metales suaves como es el caso del aluminio. Debido a que las muestras a estudiar son cuerdas formadas por un hilo central y 1, 2 ó 3 capas de hilos concéntricos; se tuvo que tener cuidado en la preparación de la biqueta, para poder tener las muestras del hilo central, la primera, segunda y tercera capa, tanto de las

secciones longitudinales como transversales de todas ellas en la misma bríqueteta.

6.2.2 Análisis Químico del polvo .- Durante la preparación de

las muestras se observó la presencia de polvo, el cual fué enviado a Pirelli Brasil para un análisis químico de cationes y aniones, reportándose lo siguiente:

Cationes: aluminio, sodio, calcio, magnesio, silicio, fierro.

Aniones: Sulfatos y cloruro.

El contenido de aluminio fué determinado como 97.8%.

El polvo enviado corresponde a una muestra de la zona Lurín-San Bartolo. La presencia de cloruro, sodio y calcio, es evidencia clara de ataque por la niebla salina en la zona marina; los sulfatos pueden indicar además de un cierto grado de polución Industrial.

6.2.3 Resultados de los análisis metalográficos.- De todos los

análisis metalográficos realizados, se concluye que los cables han sufrido corrosión por Pitting o por puntos, debido a la evidencia clara de ataque por niebla salina de la zona marina, así lo demuestra la presencia de cloro, sodio y calcio. No se observa que haya evidencia de fallas en la fabricación del material.

El acabado superficial deficiente origina cavidades, las cuales a su vez sirven como depósitos de pilas electroquímicas de corrosión que sumado a la presencia de polvos, humedad, sales marinas, etc. se forma así un excelente medio de

corrosión. El contacto entre hilos es el punto más débil, ya que la rotura de la capa pasivadora (película de  $Al_2O_3$ ) agudiza la corrosión por puntos.

La práctica del trabajo de las líneas aéreas desarrolla  $80^{\circ}C$  de temperatura, los eventuales cortes de tensión origina contracción de los hilos produciéndose roce entre los hilos, rompiéndose así la capa pasivadora.

Al final de este capítulo, las fotografías de algunas muestras analizadas en el microscopio, comprobando lo concluído en el análisis metalográfico.

### 6.3 RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.-

La principal causa de corrosión encontrada ha sido la alta contaminación salina en la cercanía del mar, manifestándose roturas de hilos e incluso del conductor en secciones de hasta  $125\text{ mm}^2$ .

Esto no quiere decir que esta aleación no sea la apropiada, ya que hay igualmente líneas ubicadas a similar distancia del mar y que no presentan problemas de esta naturaleza, así como en zonas del resto del país y del extranjero.

El grado de ataque de una atmósfera determinada depende de la predominancia de la dirección de los vientos, humedad relativa y muchas otras causas más, las cuales pueden ser distintas en comportamiento de una línea ubicada a similar distancia.

Se ha reportado un caso de corrosión por humos, de grado grave en una línea de 138 KV sobre plantaciones de caña de azúcar, la cual al cabo de 10 años de instalada requirió un cambio del conductor

en 15 Kms. El aspecto exterior del conductor era poroso con polvillo blanco y sus hilos quebradizos, rompiéndose fácilmente con una simple torcedura. La quema de cosechas de caña de azúcar genera el desprendimiento de humos que van directamente a atacar la capa externa de la línea aérea.

De ambos casos presentados, se recomienda adoptar las siguientes medidas:

- 1) Determinar el grado de contaminación de cada zona particular, mediante muestras apropiadas y utilizando métodos desarrollados para tal efecto y que básicamente consisten en la medición de la pérdida de peso de la unidad patrón expuestos al medio ambiente durante un cierto periodo de tiempo. Así se podrá estimar la severidad del medio ambiente en la zona costera y el mejor empleo de materiales que pueden ser cuerdas con hilos de diámetros mayores.
- 2) Aplicación de grasas neutras especiales, químicamente estables con alto punto de goteo, tanto de la capa externa como interna del conductor. Esto debería generalizarse a lo largo de la línea costera. Desde el año de 1978, Electrolima, ha adoptado esta práctica para todas las líneas construídas desde ese año. Se debe anotar que las normas inglesas y francesas recomiendan el empleo de grasa en los hilos de las capas internas incluso de las externas, salvo indicación contraria del usuario.
- 3) Teniendo en cuenta el superior comportamiento del cobre ante atmósferas salinas, a veces puede ser conveniente su utilización,



RESULTADOS DEL ANALISIS METALOGRAFICO DE MUESTRAS

PROPORCIONADAS POR ELECTROLIMA

FOTOS 6.1 a 6.4 ASPECTO EXTERIOR DE MUESTRAS DE CABLES CORROIDOS DE LA ZONA COSTERA LURIN SAN BARTOLO. EVIDENCIA UN SEVERO ATAQUE DE CORROSION CON FRAGILIDAD DE HILOS Y ZONAS DE HABERSE FUNDIDO EL MATERIAL. EL ASPECTO SUPERFICIAL PRESENTA UN POLVO BLANCO QUE AL SER ANALIZADO REPORTO ANIONES CORROSIVOS SULFATOS Y CLORUROS EVIDENCIANDO UNA POSIBLE CONTAMINACION INDUSTRIAL.

FOTOS 6.5 a 6.16 DIFERENTES ZONAS DEL CONDUCTOR. HILO CENTRAL, CAPA 1 INTERIOR y CAPA 2 EXTERIOR. ZONAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES TANTO DE LOS BORDES COMO DEL CENTRO. MUESTRA LA SEVERIDAD DEL AMBIENTE COSTERO DE ESA ZONA. LA CORROSION ES MAYOR EN LA CAPA 2 EXTERIOR CON DESTRUCCION DE LA CAPA PASIVADORA DE PROTECCION (  $Al_2O_3$  ). SE OBSERVA QUE LA CORROSION AVANZA HASTA EL HILO CENTRAL. NO HAY EVIDENCIA DE FALLAS EN LA FABRICACION DEBIDO A QUE LA PRESENCIA DE PRECIPITADOS DE  $Mg_2Si$  ES HOMOGENEA EN TODA LA MATRIZ Y NO HAY PREFERENCIA SU EXISTENCIA EN LOS BORDES DE GRANOS QUE PUEDEN JUSTIFICAR UNA CORROSION INTERGRANULAR. LA CORROSION ES POR PUNTOS O PICADO Y AVANZA HACIA EL CENTRO DEL ALAMBRE.

FOTOS 6.17 a 6.22 LINEA DE ALTA TENSION CAHUA PARAMONGA  
138 KV. CORROSION INDUSTRIAL TAL VEZ PRO  
DUCIDO POR HUMOS CORROSIVOS, SE OBSERVA  
EL ATAQUE DE CORROSION POR PUNTOS CON DES  
TRUCCION DE LA CAPA PROTECTORA EN TODAS  
SUS CAPAS. UN TANTO MENOR EN EL HILO CEN  
TRAL.

FOTOS 6.23 a 6.28 HUACHIPA LINEA 60 KV - 125 mm DE SECCION.  
LA ZONA INDUSTRIAL CERCANA A LIMA CON PRE  
SENCIA DE VARIAS LADRILLERAS GENERA HUMOS  
CORROSIVOS EXPLICANDOSE ASI QUE EL ANALI-  
SIS QUIMICO DEL POLVO SUPERFICIAL EVIDEN-  
CIA UNA POSIBLE CONTAMINACION INDUSTRIAL.  
LA CORROSION POR PUNTOS SE EVIDENCIA EN  
LAS ZONAS DIVERSAS Y EN CAPAS INTERIORES  
Y EXTERIORES. LA FOTO A 1,200 X, MUESTRA  
QUE NO HAY FALLAS EN LA FABRICACION.

FOTOS 6.29 a 6.32 CERRO CAHUIDE SE APRECIA UNA SEVERA CORRO  
SION EN LAS DIFERENTES ZONAS CON AVANCE HAS  
TA EL CENTRO DE LA MATRIZ.

FOTOS 6.33 a 6.34 CERRO LA MULLA INDEPENDENCIA. LA CORRO-  
SION AVANZA DESDE EL EXTREMO FOR FALTA DE  
LA CAPA PASIVADORA. SIMILARES A LAS FOTOS  
ANTERIORES.

ELECTROLIMA NO PROPORCIONO EL TIPO DE ALEACION QUE SE EMPLEO, TAMPOCO  
LA FECHA EXACTA DE SU INSTALACION.

EL RESULTADO GENERAL DE FOTAS LAS FOTOS QUE SE PRESENTAN EVIDENCIAN

UNA SEVERA CONTAMINACION INDUSTRIAL DE USO. LA ZONA DE LIMA ES CONSIDERADA COMO MUY SEVERA POR SU AMBIENTE MUY HUMEDO Y FUERTE CONCENTRACION DE INDUSTRIAS.

ASPECTO EXTERIOR DE MUESTRA DE LURIN - SAN BARTOLO



FOTO 6.1 LURIN SAN BARTOLO FASE MEDIA POSTE 121

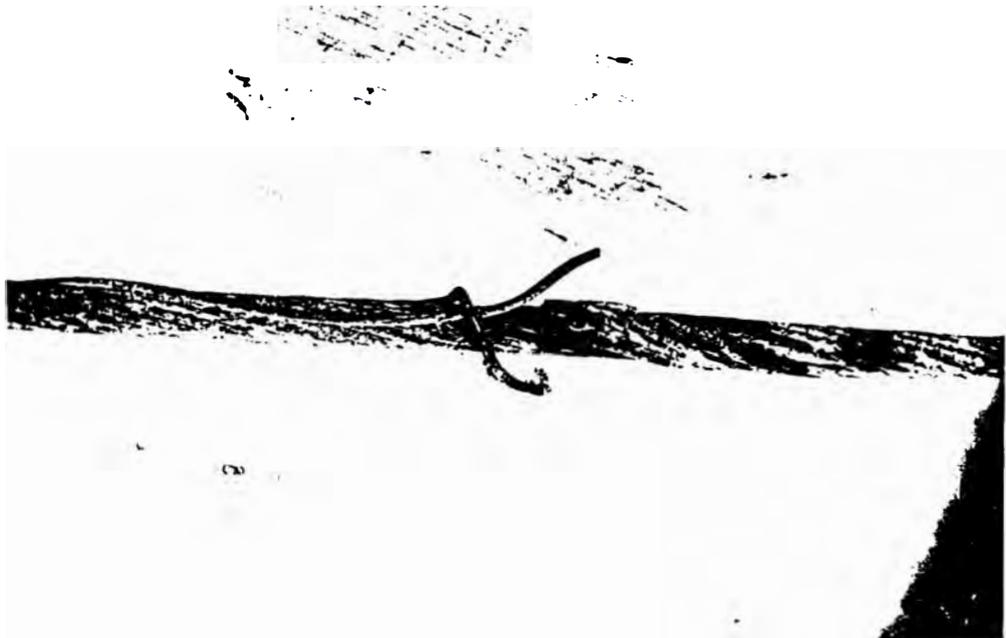


FOTO 6.2 LURIN SAN BARTOLO FASE MEDIA POSTE 129

ASPECTO EXTERIOR DE LINEAS CON FALLAS LURIN SAN BARTOLO

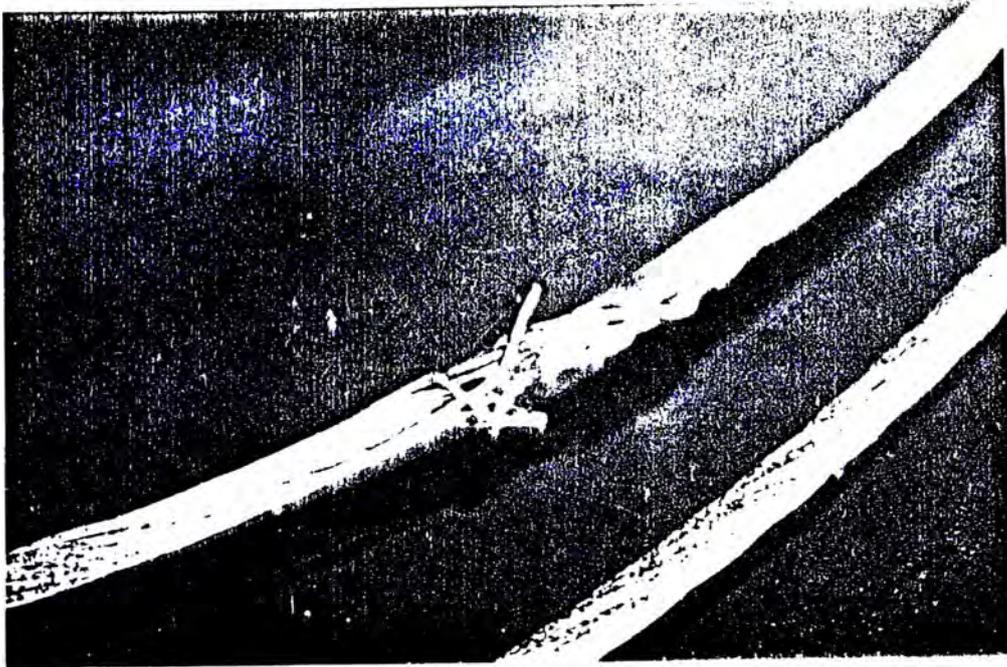


FOTO 6.3 FALLA PRODUCIENDO FUSION DEL CONDUCTOR  
LURIN SAN BARTOLO FASE MEDIA POSTE 130



FOTO 6.4 FRAGILIDAD DE HILOS AL SER DOBLADOS  
LURIN SAN BARTOLO POSTE 131 - 132

LURIN - SAN BARTOLO POSTE 129-130



FOTO 6.5 SECCION TRANSVERSAL, HILO CENTRAL

120 X      CORROSION EN EL BORDE

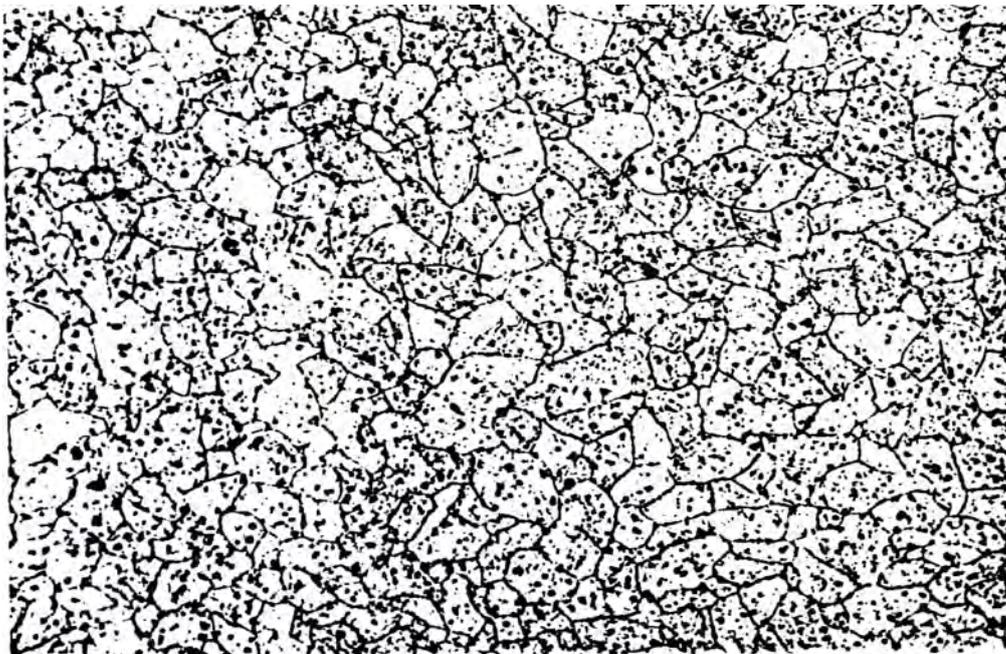


FOTO 6.6 SECCION TRANSVERSAL, HILO CENTRAL

240 X      PRESENCIA DE PRECIPITADOS OSCUROS  $Mg_2Si$

LURIN    SAN BARTOLO    POSTE    129    130

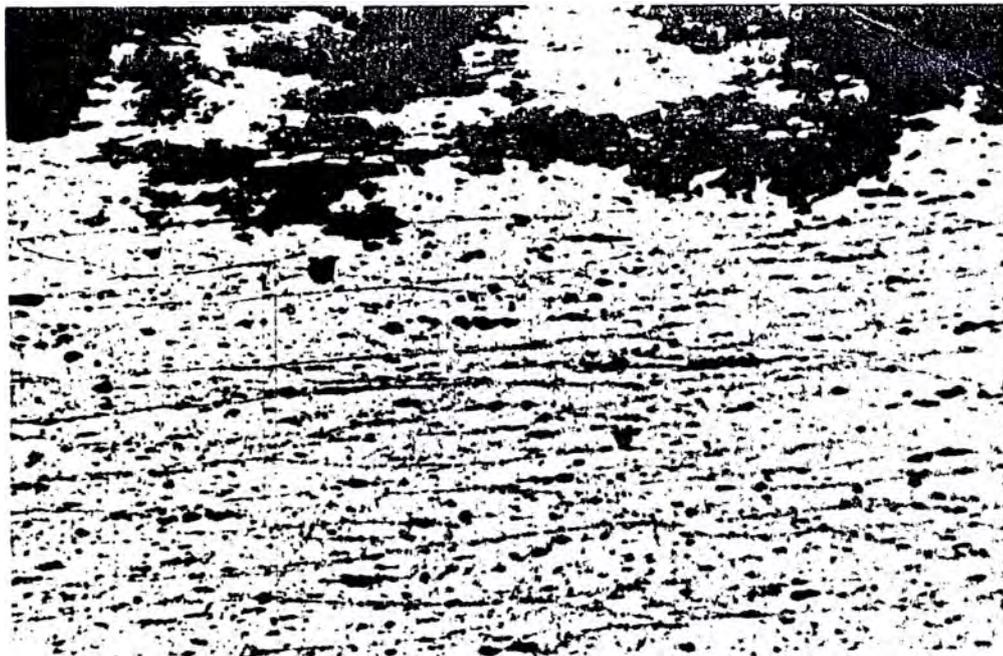


FOTO 6.7 SECCION LONGITUDINAL, HILO CENTRAL  
240 X INTENSA PLAYA DE CORROSION EN BORDE



FOTO 6.8 SECCION LONGITUDINAL, HILO CENTRAL  
240 X ALARGAMIENTO DE GRANOS PRODUCTO DEL  
TREFILADO CON PRESENCIA DE  $Mg_2Si$

LURIN - SAN BARTOLO POSTE 129 - 130 FASE MEDIA

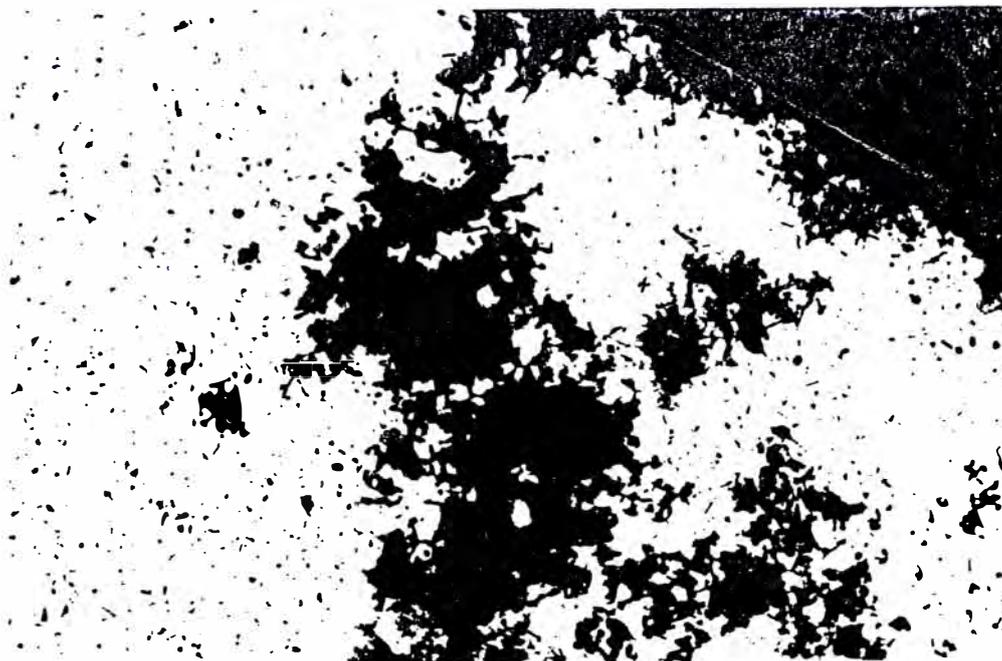


FOTO 6.9 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 1 INTERIOR

240 X BORDE CON PENETRACION DE CORROSION



FOTO 6.10 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 1 INTERIOR

240 X ZONA CENTRAL. PRESENCIA DE PRECIPITADOS

NO MUESTRA FALLAS EN LAS TRANSFORMACION

LURIN SAN BARTOLO POSTE 129 130 FASE MEDIA

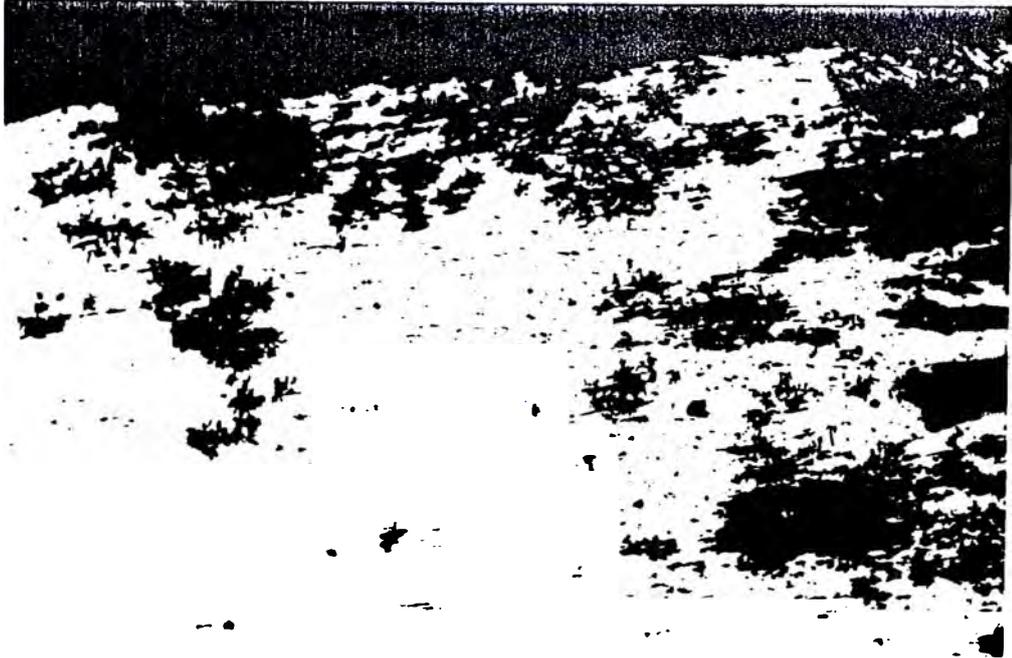


FOTO 6. 11 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 1 INTERIOR

240 X CORROSION SEVERA DESDE EL BORDE



FOTO 6. 12 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 1 INTERIOR

240 X ALARGAMIENTO DE GRANOS, PRECIPITADOS  
SIGUEN EL SENTIDO DE LA TREFILACION

LURIN - SAN BARTOLO POSTE 129 -130 FASE MEDIA

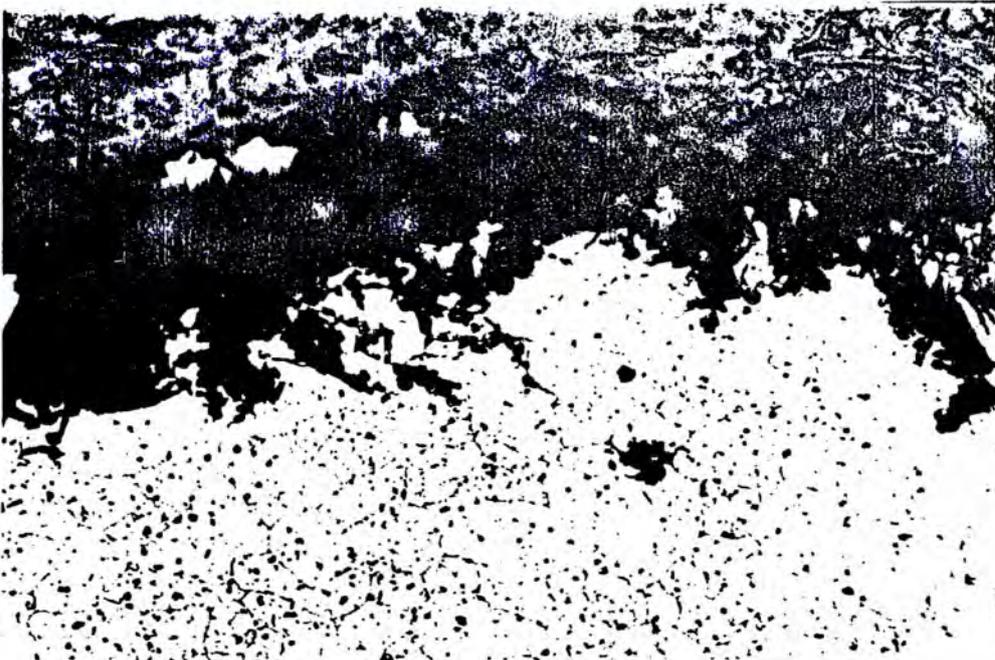


FOTO 6.13 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 2 EXTERIOR  
240 X INTENSA CORROSION DESTRUYE CAPA  
PASIVADORA DE PROTECCION

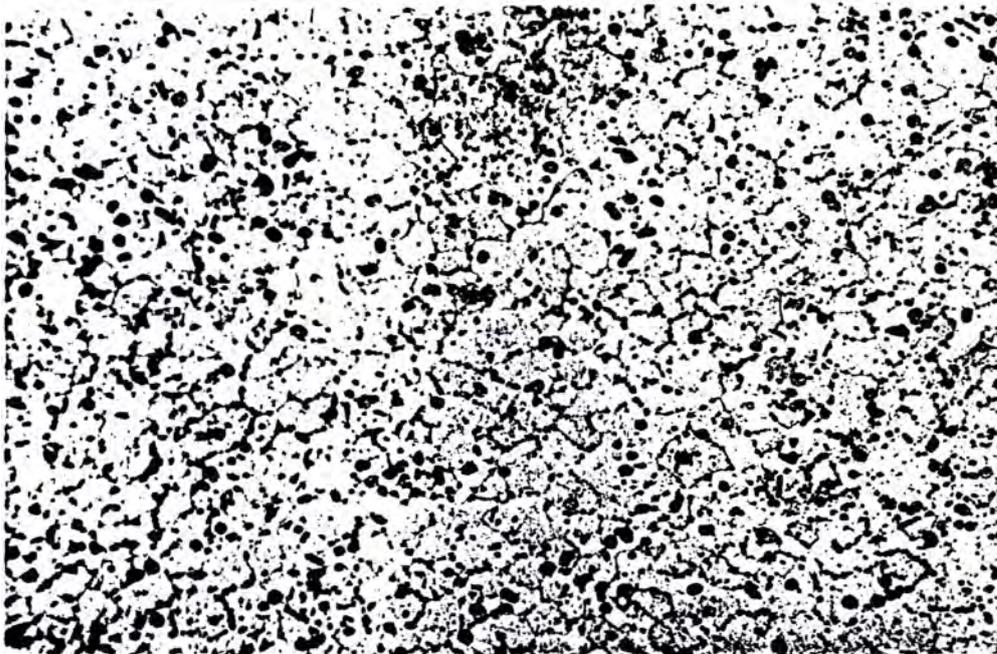


FOTO 6.14 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 2 EXTERIOR  
240 X ESTRUCTURA PRESENTA HOMOGENEIDAD DE  
PRECIPITADOS EN LA PARTE CENTRAL

LURIN SAN BARTOLO POSTE 129 130 FASE MEDIA



FOTO 6.15 SECCION LONGITUDINAL , CAEA 2 EXTERIOR

1200 X EXTENSA PLAYA DE CORROSION EN BORDE

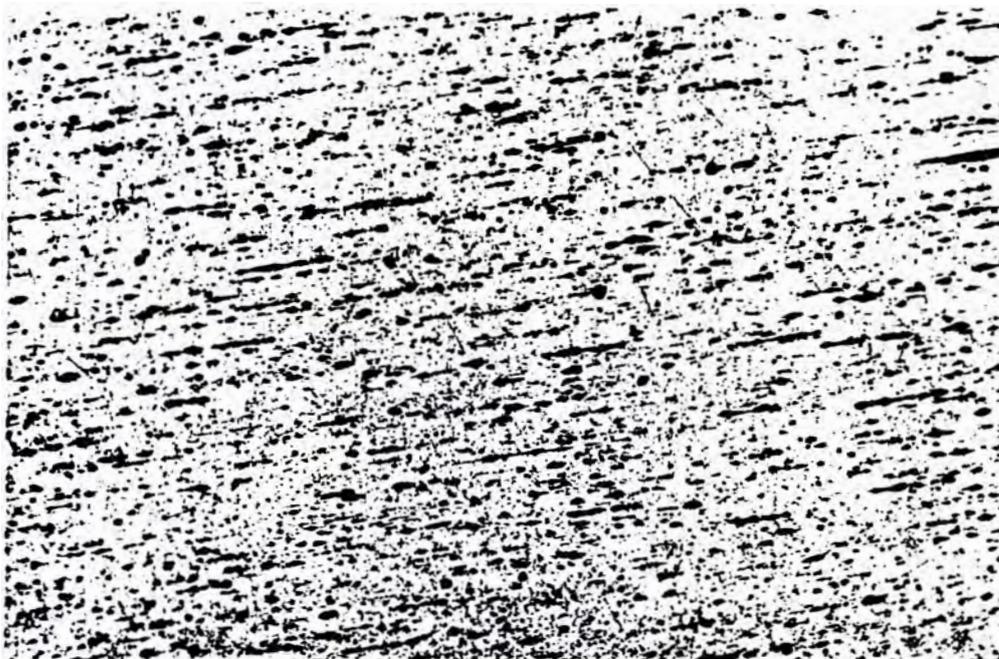


FOTO 6.16 SECCION LONGITUDINAL , CAPA 2 EXTERIOR

240 X ZONA CENTRAL MUESTRA ALARGAMIENTO DE  
PRECIPITADOS POR TREFILACION

CAHUA - PARAMONGA LINEA ALTA TENSION 138 KV



FOTO 6.17 SECCION TRANSVERSAL , HILO CENTRAL

240 X      INICIO DE CORROSION EN BORDE POR  
DESAPARICION DE CAPA PASIVADORA

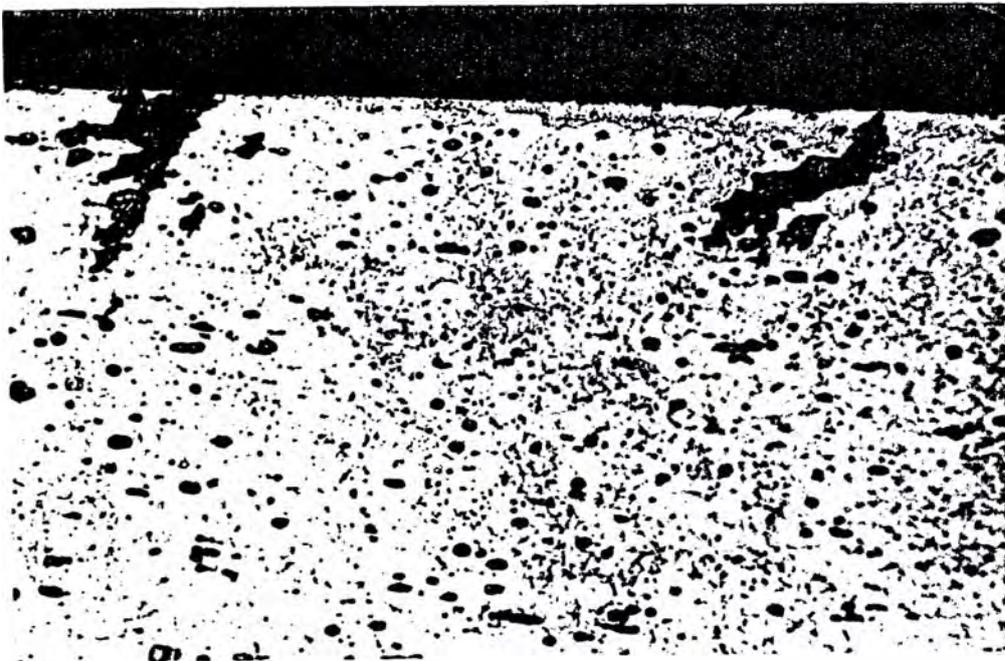


FOTO 6.18 SECCION LONGITUDINAL , HILO CENTRAL

240 X      CORROSION PENETRA FORMA PUNTUAL

CAHUA PARAMONGA LINEA DE ALTA TENSION 138 KV

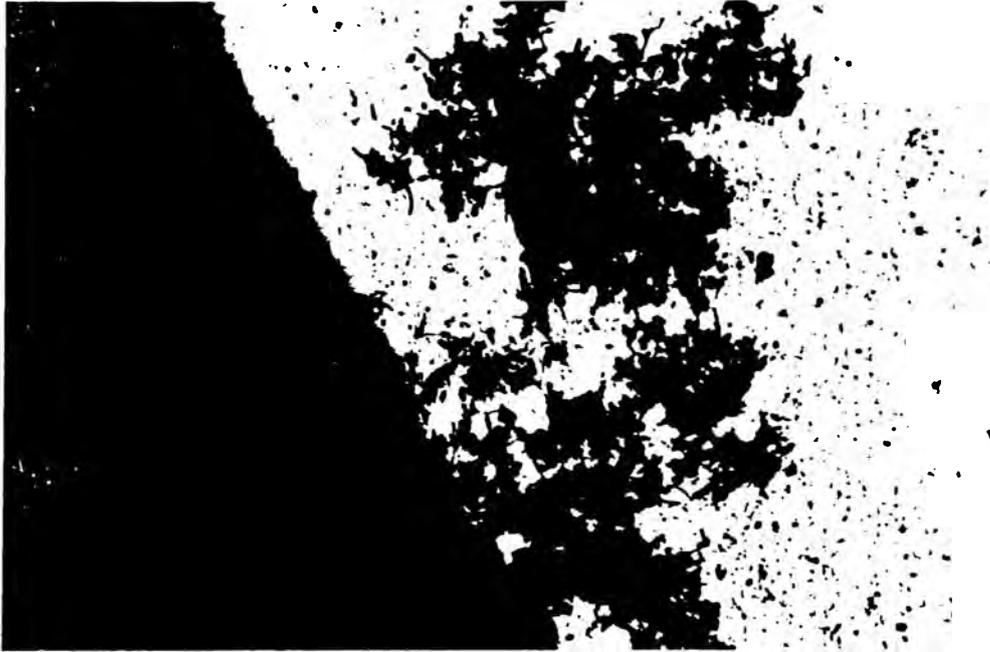


FOTO 6.19 SECCION TRANSVERSAL CAPA 1, INTERIOR  
240 X PENETRACION DE LA CORROSION POR EL  
BORDE Y AMPLIANDOSE HACIA EL CENTRO

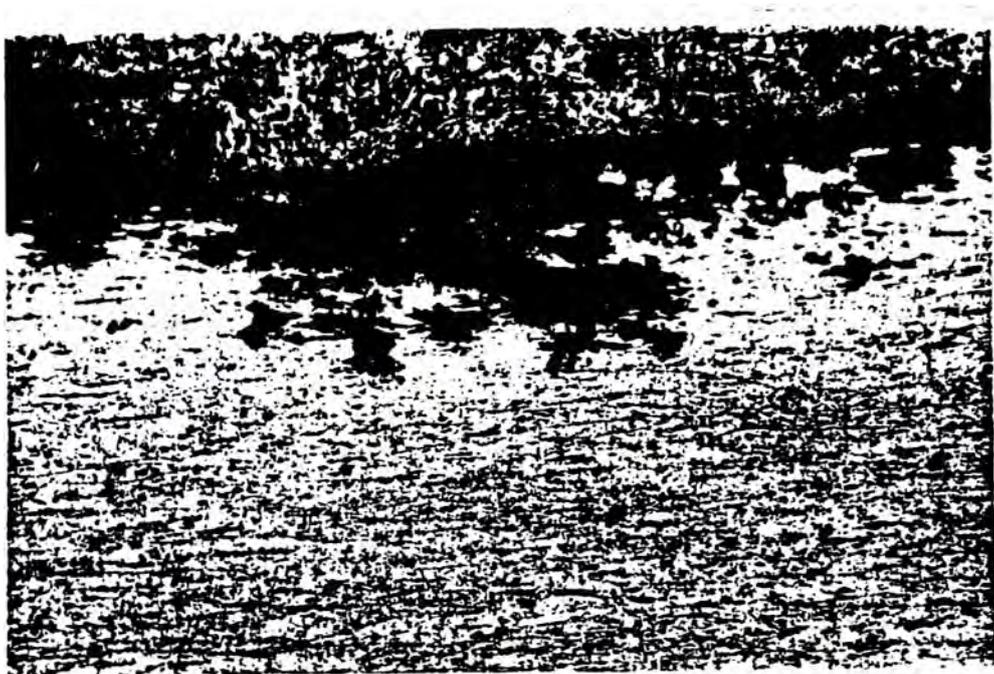


FOTO 6.20 SECCION LONGITUDINAL CAPA 1, INTERIOR  
LA CORROSION PENETRA HACIA EL CENTRO

CAHUA - PARAMONGA LINEA ALTA TENSION 138 KV

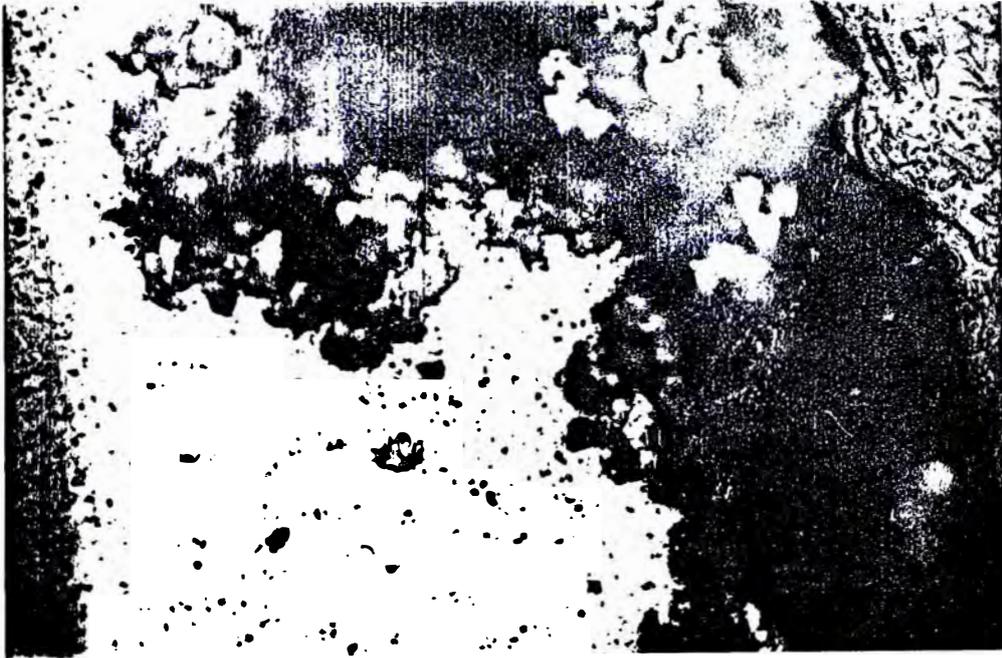


FOTO 6.21 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 2, EXTERIOR  
240 X INTENSA CORROSION EN BORDE, EXPUESTO  
AL MEDIO EXTERIOR

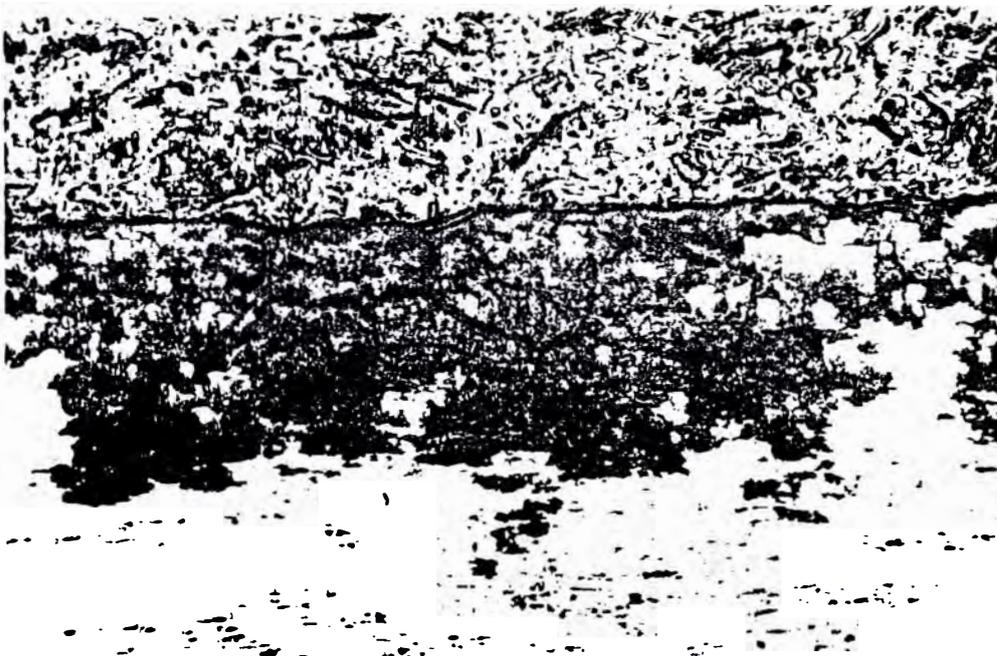


FOTO 6.22 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 2, EXTERIOR  
240 X DESTRUCCION PELICULA PROTECTORA POR  
ACCION DEL MEDIO AMBIENTE INDUSTRIAL

HUACHIPA LINEA 60 KV 125 mm<sup>2</sup> CABINAS 1393 1384

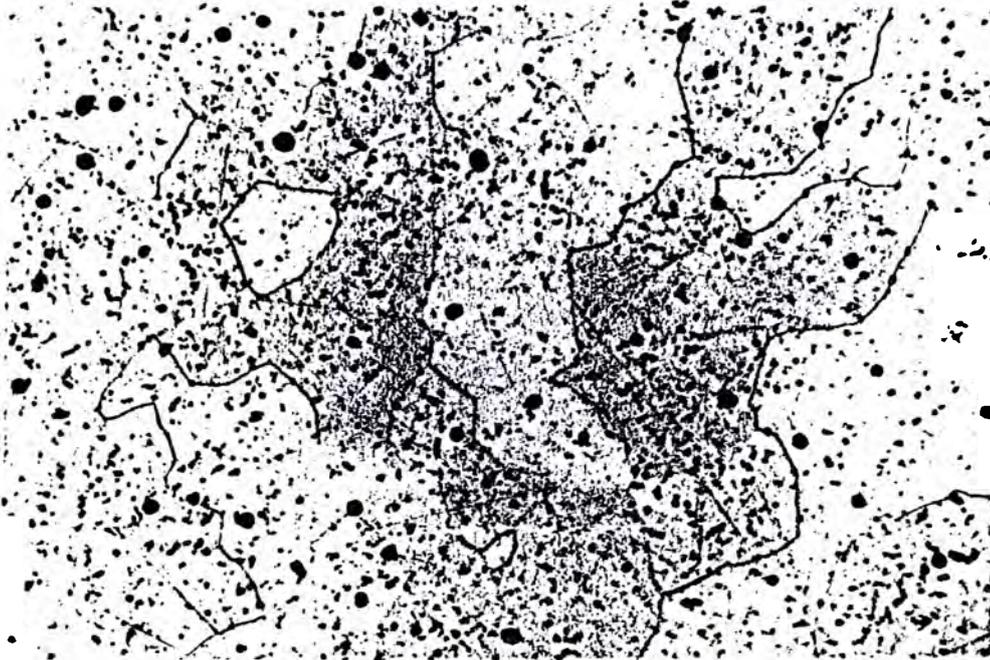


FOTO 6.23 SECCION TRANSVERSAL, HILO CENTRAL,  
1200 X PRECIPITACION HOMOGENEA DE Mg<sub>2</sub>Si  
NO HAY EVIDENCIA DE FALLA DE FABRICACION

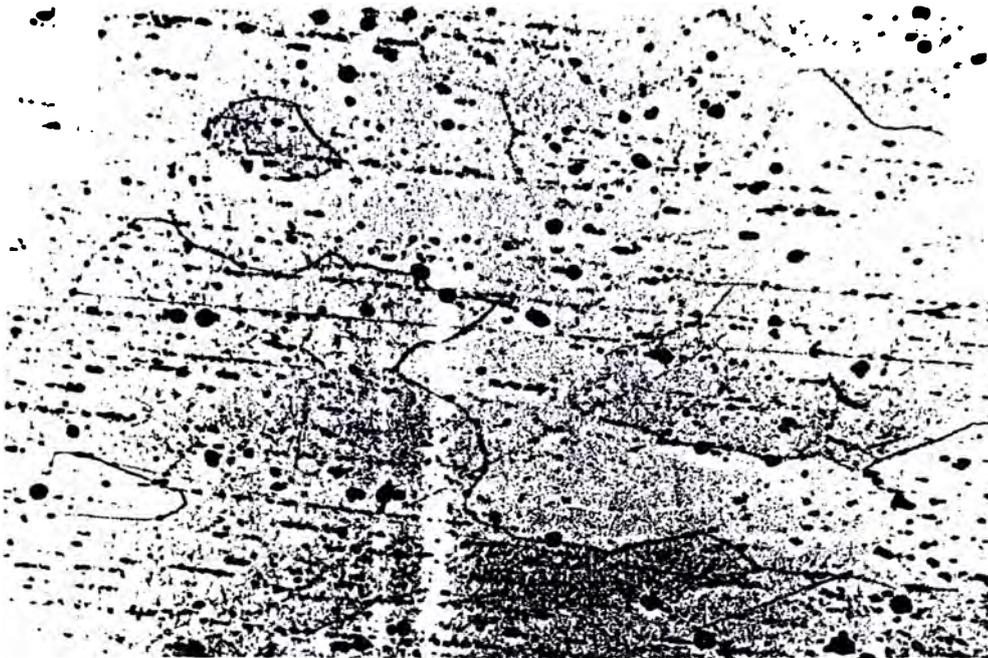


FOTO 6.24 SECCION LONGITUDINAL, HILO CENTRAL,  
1200 X IDEM ANTERIOR, PUNTOS OSCUROS DE Mg<sub>2</sub>Si

HUACHIPA LINEA 60 KV 125 mm<sup>2</sup> CABINAS 1393 1384

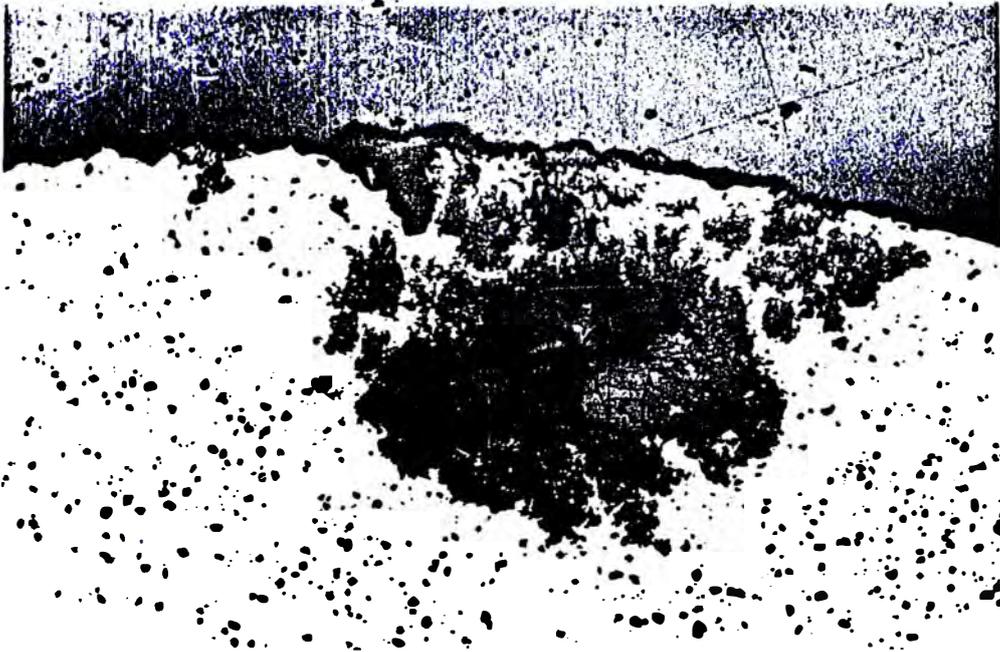


FOTO 6.25 SECCION TRANSVERSAL, HILO CENTRAL, BORDE  
250 X CORROSION AVANZA DESDE SUPERFICIE HACIA  
EL CENTRO

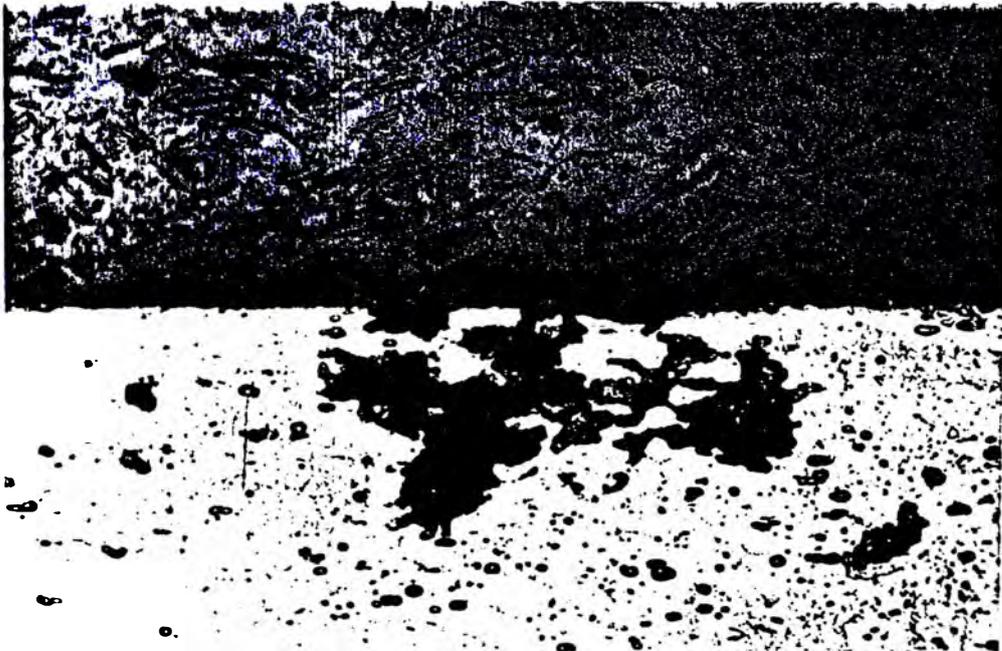


FOTO 6.26 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 1, INTERIOR  
120 X CORROSION PUNTUAL DEBIDO A GASES IN  
DUSTRIALES ( LADRILLERAS )

HUACHIPA LINEA 60 KV 125 mm<sup>2</sup> CABINAS 1393 1384

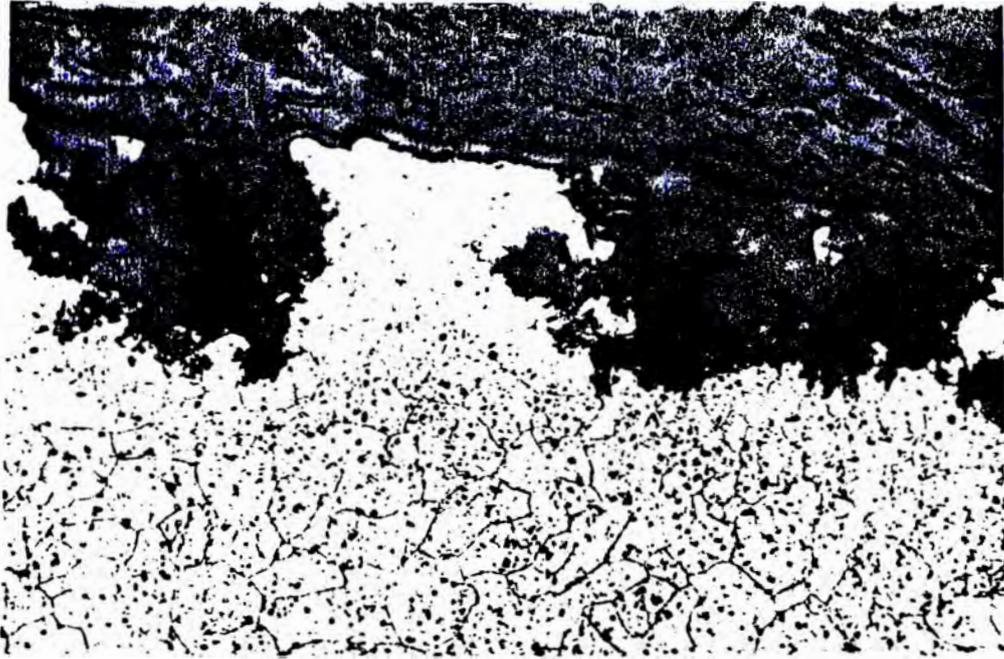


FOTO 6.27 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 2 EXTERIOR,  
240 X CORROSION PUNTUAL EN DOS ZONAS EVIDEN-  
CIA LA SEVERIDAD DEL AMBIENTE DE USO



FOTO 6.28 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 2 EXTERIOR  
240 X AMPLIACION DE LA CORROSION EN FORMA  
PUNTUAL DEBIDO A LA FALTA DE CAPA PROTECTORA

CERRO CAHUIDE T 78



FOTO 6.29 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 1 EXTERIOR  
120 X DESAPARICION DE LA CAPA PASIVADORA DE  
LA SUPERFICIE POR EFECTO DE CORROSION

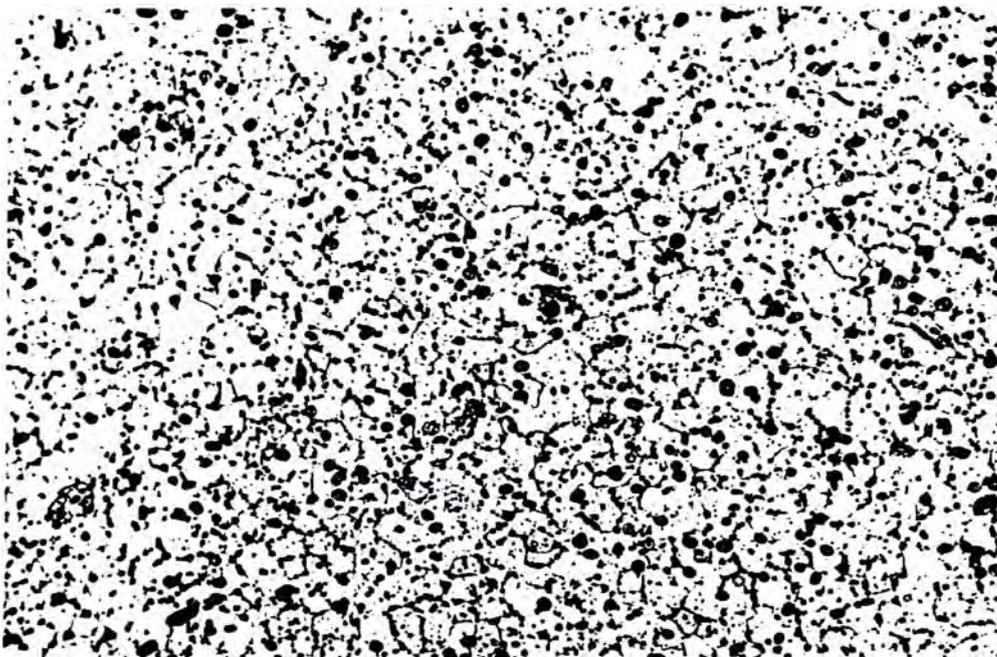


FOTO 6.30 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 1 EXTERIOR  
120 X OBSERVAR INICIOS DE CORROSION PUNTUAL  
POR BORDES DE GRANOS

CERRO CAHUIDE T 78

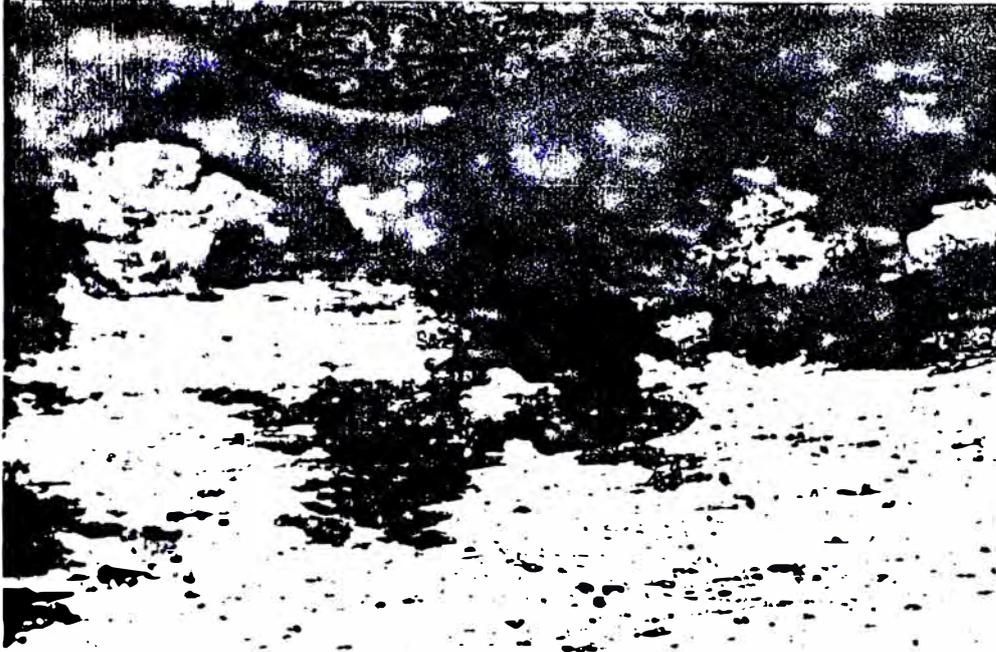


FOTO 6.31 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 2, EXTERIOR  
240 X AMPLIA PLAYA DE CORROSION AVANZANDO  
A TODA LA SUPERFICE



FOTO 6.32 SECCION LONGITUDINAL, CAPA 2 EXTERIOR  
240 X AMPLIACION DE LA CORROSION EN FORMA  
PUNTUAL PRODUCTO DEL PICADO

CERRO LA MILLA ( INDEPENDENCIA )

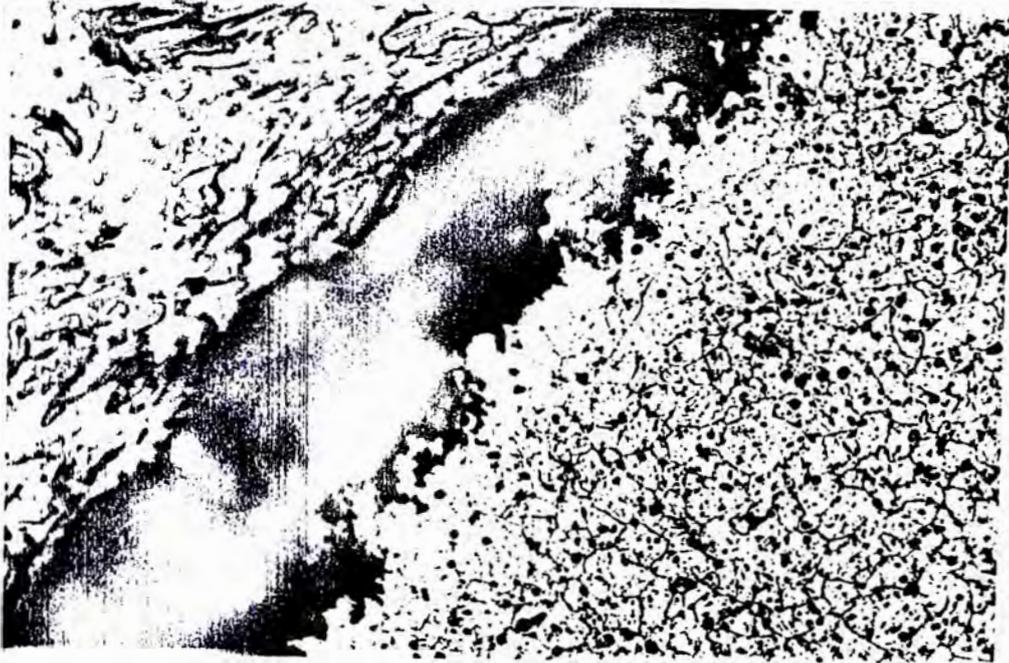


FOTO 6.33 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 2 EXTERIOR  
240 X DESTRUCCION DE LA CAPA PASIVADORA  
SUPERFICIAL POR LA CORROSION



FOTO 6.34 SECCION TRANSVERSAL, CAPA 2 EXTERIOR  
240 X INICIOS DE CORROSION PUNTUAL

## CAPITULO N° 7 - CONCLUSIONES.-

Las series de pruebas descritas y los análisis metalográficos efectuados a todas las muestras, han servido para resolver las causas de las fallas de las líneas aéreas de aleación de aluminio (AAAC) para alta tensión y resolver problemas en su transformación.

En los capítulos 5 y 6 se detallan los resultados obtenidos. La evaluación general de la comparación de costos de una línea de alta tensión de aleación de aluminio y cobre, demuestra que es más caro la instalación total de la línea en cobre. (conductor, obras civiles, transporte, montaje, torres, etc.)

### 7.1 ASPECTO TECNICO:

La aleación de aluminio-magnesio-silicio, es un material excelente para la transmisión de líneas aéreas de alta tensión, ya que a costo de una disminución en su conductividad (53.5% IACS), se obtienen mayores resistencias mecánicas comparables al acero por efecto de los elementos aleantes magnesio y silicio.

Cuando se encuentran en uso en zonas costeras o en líneas de transmisión, están sometidas a tensiones en los apoyos (torres), por efecto de su propio peso y a la acción de los vientos. Así se requiere que los conductores posean altas resistencias mecánicas y pueda resistir los fenómenos naturales.

Asimismo, debe resistir al medio ambiente, para ello debe poseer una buena resistencia a la corrosión y si son protegidas

con grasas neutras de alto punto de goteo se vee más favorecida la resistencia ante la corrosión.

En su fabricación a alambres, suele presentarse problemas, ya sea por una mala fabricación de la materia prima (foto 7.1) o por haber ocurrido el fenómeno de envejecimiento natural que lo hace más duro. Los ensayos realizados en el capítulo 5.3 tratan sobre el segundo motivo.

Las fotos anexadas del capítulo 6 sobre la corrosión de cables que han fallado en el uso, nos permite observar la severidad del medio ambiente de la costa para estos conductores.

A continuación se mencionan las conclusiones por etapas en la fabricación de alambres, así como de las recomendaciones que se deben tomar.

**7.1.1 Materia Prima:** Su fabricación según el proceso de colado en continuo es el más aconsejable, ya que es un material más homogéneo y ser de elevados pesos los carretes. Debe incidirse por parte del productor que se detalle la fecha que fué producida dicha materia prima, así como el tiempo exacto de arribo del material, para no exceder los 4 meses que son recomendables antes de su fabricación a alambres. Omitir este detalle, implicaría que el material se encuentre más endurecido y encontrarse con problemas en el soldado y de la trefilación. El material se le conoce como aleación de aluminio AAAC según norma ASTM B 398 - 76 Aluminum - Alloy 6201-T81 wire for electrical purposes.

./.

7.1.2 Soldadura de alambrones.- La variable que más influye es presión entre mordazas, no tanto la intensidad de calor. La soldadura de alambrones endurecidos no ofrece una elongación recomendable para la trefilación, por este motivo se debe tratar que los alambrones no hallan excedido de los 4 meses para su transformación. Debe tenerse en cuenta que se reducirá de 9.5 mm de diámetro hasta 2 a 3 mm según el caso.

7.1.3 Trefilación: Debe utilizarse máquinas sin deslizamiento ya que se adaptan más a las condiciones de trefilación de aluminio. El uso de lubricante es muy importante para mayores eficiencias de rendimiento de los dados.

La trefilación es la etapa más difícil ya que existen problemas de roturas ya sea por una mala soldadura o por fallas propias del material.

7.1.4 Tratamientos térmicos: La empresa productora de alambres debería poseer un horno de tratamiento térmico con un pozo de agua de enfriamiento para sí en caso que el material se encuentre envejecido se proceda a resolubilizarlo. Así por ejemplo de las 4 diferentes aleaciones empleadas para las pruebas se resume que:  
Aleaciones francesas AGS/L 55 y AGS/L 66; 540°C - 2 horas  
Aleaciones americanas 6201 Southwire; 540 - 550°C- 2 horas  
Aleaciones Venezolanas 6201; 530°C - 2 horas  
son las temperaturas y tiempos óptimos de resolubiliza -

ción. No es aconsejable la aleación venezolana por tener una temperatura muy definida ya que un pequeño exceso provoca la fusión de los eutécticos de la aleación y así el material se hace intrefilable.

El tratamiento posterior de envejecimiento artificial a temperaturas de 160 - 170°C son las recomendables para la mejor precipitación del compuesto  $Mg_2Si$  que hará que cuando se instalen la línea como cuerdas, posea una alta resistencia mecánica.

Existe así, una diferencia entre antes de la trefilación y después de ella, con respecto a su resistencia mecánica pero debe tenerse en cuenta lo siguiente: El material para la producción de alambres debe ser suave y de gran elongación para obtener una buena soldadura y reducción de área sin dificultades, pero para después de fabricado debe tener una gran resistencia mecánica que se logra por el envejecimiento artificial y permitirá una buena performance de uso que resistirá tensiones de apoyos, vientos, etc.

- 7.1.5 Cableado: Según el requerimiento puede tener un hilo central y una dos o tres capas exteriores, cual sea el caso debe protegerse todas ellas con grasas neutras de alto punto de goteo que permita que no se descomponga la grasa cuando se encuentre en uso. La resistencia de la corrosión se incrementa con su uso.

./.

7.1.6 Ambientes de uso; Antes de la construcción de líneas aéreas de alta tensión, sea la zona costera o zona rural, debe realizarse una serie de pruebas de corrosión para permitir evaluar el medio ambiente. Así también observar las industrias alrededor para ver su incidencias (quemada de caña de azúcar, ladrilleras, etc. que provocan humos corrosivos).

De esto, como medida de seguridad se puede dar un mayor diámetro de los alambres, esta medida ha probado ser efectiva en otros países. Según el análisis del polvo de los conductores de las pruebas se encontró la presencia de aniones sulfato y cloro que son muy corrosivos para el aluminio, evidenciando una posible contaminación industrial. El uso de grasas protectoras ayuda a combatir estos efectos.

## 7.2 ASPECTO ECONOMICO.-

El uso de conductores de cobre en lugar de aluminio es más costoso tal como se evidencia en las tablas 7.1 y 7.2 que es un aproximado general del costo proporcionado por ElectroPerú de dos materiales eléctricamente equivalentes en costo de US\$/Km de línea de aleación de aluminio y cobre para una transmisión de 60KV.

El margen de diferencia a tensiones de corriente mayores como 130KV sería mucho mayor el costo total de la instalación.

Al margen de esta evaluación general, debe tenerse en cuenta que el

material es de procedencia extranjera y por consiguiente una fuga de divisas, entonces resulta interesante la ejecución de un proyecto integral de tres empresas tales como:

- Conductores Eléctricos Peruanos CEPER o Industria del Cobre INDECO.  
Electrolima o Electroperú.
- Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas ITINTEC.

Estas empresas serían la triología de Fabricante-Consumidor-Su pervisor que juntas ejecuten un proyecto que evalúe el uso del cobre en líneas de alta tensión en lugar del aluminio y así evitar la fuga de divisas y dar más empleo y generar una tecnología propia.

Esta tesis no trata de justificar el aluminio como un material más superior al cobre sino de resolver los problemas de la transformación y uso de líneas cuando se fabricaron en el país en la década del 70, y dejar los parámetros óptimos si se tuviera que fabricar de nuevo. Con ello se garantizaría un mayor tiempo de vida del conductor y ahorro en su reemplazo tanto al usuario como al país.

TABLA 7.1

COMPARACION ECONOMICA DE UNA LINEA DE 60 KV  
EN COBRE Y EN ALEACION DE ALUMINIO AAAC

MATERIAL O CONDUCTOR	COBRE		ALUMINIO AAAC		DIFERENCIA	
AREA EQUIVALENTE mm <sup>2</sup>	85	177	152	278		
PESO KG / KM LINEA	767	1,612	436	780		
COSTO MATERIAL US \$ / KM	4,835	10,155	3,950	8,295	885	1,860
COSTO TOTAL DE LA						
LINEA US \$ / KM	19,341	40,622	15,800	33,180	3,541	7,442

NOTA : Son valores generales a Diciembre de 1,983 y calculados a partir del costo del material conductor ( 25 % del total ).

TABLA 7.2

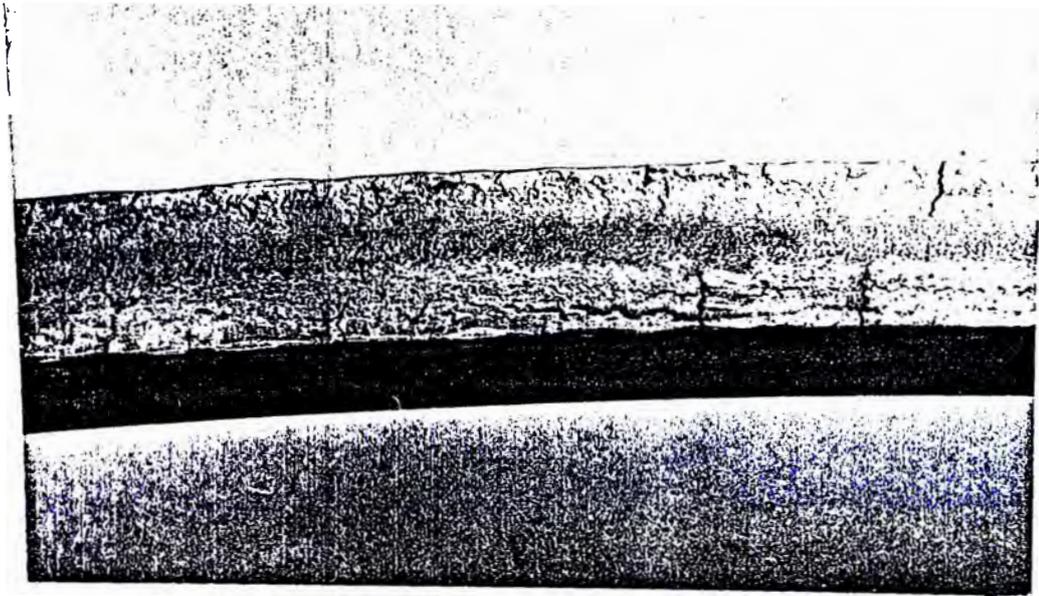
COSTO TOTAL DE UNA LINEA DE 60 KV DE  
ALEACION DE ALUMINIO AAAC

ZONA	COSTA		SIERRA	
TERNAS	1 T	2T	1 T	2 T
COSTO TOTAL DE LA				
LINEA US \$ / KM	29,627	47,403	48,412	77,459
SECCION mm <sup>2</sup>	152	152	278	278

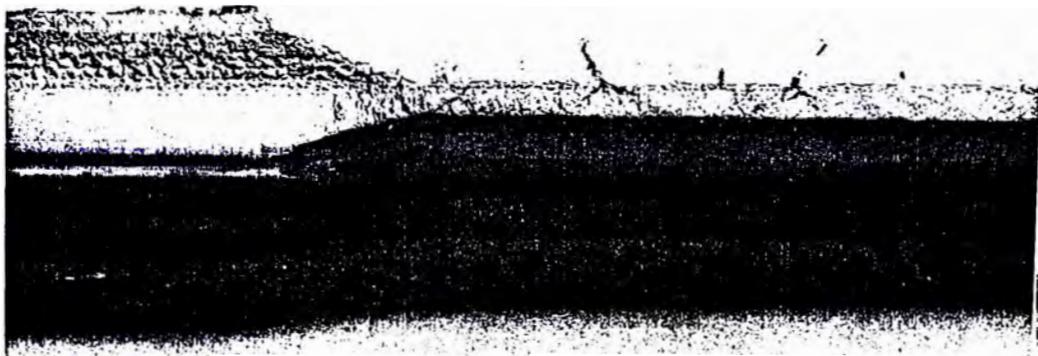
NOTA : Costos a Diciembre 1,983 según modalidad Llave en Mano, incluye Equipo Electromecánico, Montaje, Transporte Local y Obras Civiles.

FOTOS 7.1

FRACTURAS EN LA PARTE INFERIOR DE LAS BARRAS



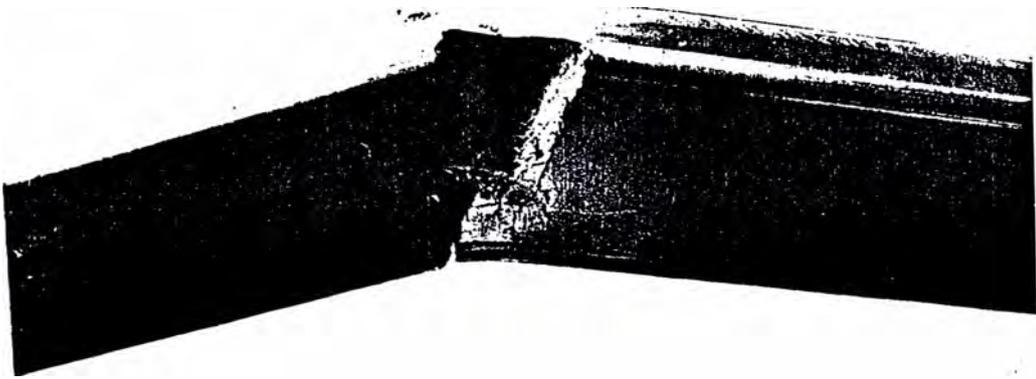
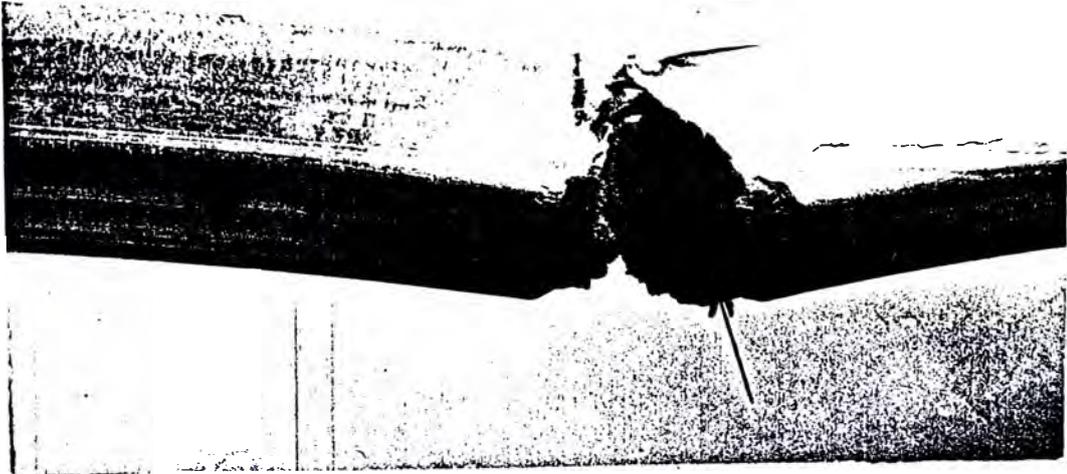
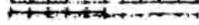
EVOLUCION DE LAS FRACTURAS DURANTE EL LAMINADO



FRACTURAS DE LAS BARRAS POR INCLUSIONES DURANTE

---

EL LAMINADO



CAPITULO N° 8

" B I B L I O G R A F I A "

BIBLIOGRAFIA

REVISTAS

1. LA BAUXITE por ALUMINIUM PECHINEY - REVUE DE L'ALUMINIUM N°426
2. L'ALUMINE por ALUMINIUM PECHINEY - REVUE DE L'ALUMINIUM N°427
3. L'ALUMINIUM por ALUMINIUM PECHINEY - REVUE DE L'ALUMINIUM N°429
4. ELECTRICITE DE FRANCE por ALUMINIUM PECHINEY - REVUE DE L'ALUMINIUM  
N°413 - 414
5. INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO EN LAS CARACTERISTICAS  
MICROFRACTOGRAFICAS DE UNA ALEACION Al-Mg-Si. RELACION CON  
EL COMPORTAMIENTO A CORROSION Y FATIGA.  
POR J.M.PINTADO Y J.M. BADIA - REVISTA DE METALURGIA CENIM  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES METALURGICAS SEPT.-OCT. 1982
6. SWEB FIGHTS OVERHEAD LINE CORROSION por E.J.NORTH - ELECTRICAL  
REVIEW N°1 JANUARY 1980
7. ALTERNATING CURRENT CORROSION OF ALUMINUM por WILLIAM H. FRENCH  
REYNOLDS METALS COMPANY - PAPER T 73 120-3 IEEE SEPTEMBER 1972.

LIBROS

8. METALLURGY FOR ENGINEERS por E.C.ROLLASON - THE ENGLISH LANGUAGE  
BOOK SOCIETY FOURTH EDITION.ENGLAND '73
9. CORROSION por JOSE GALVELE - DEPARTAMENTO DE MATERIALES DE LA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA- ARGENTINA'79
10. NONFERROUS WIRE HANDBOOK por THE WIRE ASSOCIATION INTERNATIONAL'77
11. PROPERTIES AND SELECTION METALS HANDBOOK EIGHTH EDITION VOL. 1  
por AMERICAN SOCIETY FOR METALS U.S.A.
11. METALLOGRAPHY,STRUCTURES AND PHASE DIAGRAM METALS HANDBOOK EGIHWH  
EDITION.por AMERICAN SOCIETY FOR METALS U.S.A.
12. CORROSION VOLUME 1 METAL/ENVIRONMENT REACTIONS por L.L. SHREIR  
NEWNES-BUTTERWORTHS SECOND EDITION
13. ATLAS OF MICROSTRUCTURES por MARCEL POURBAIX U.S.A.

CAPITULO Nº 9

A N E X O S

ANEXO 9.1

CUADRO DE REACTIVOS DE ATAQUE

MICRO ATAQUE

1. REACTIVO KELLER	CANTIDAD	TIEMPO	DESARROLLA
a) HF ( 40% )	2 ml.	8 a 15	BORDES DE GRANO
HCl ( Conc. )	3 ml.	minutos	
b) REACTIVO 1a)	20 ml.	5 a 10	BORDES DE GRANO
H <sub>2</sub> O Destilada	80 ml.	minutos	
2.- HF ( 40% )	1 ml	15	DELINEA PRECIPITADOS DE Mg <sub>2</sub> Si
H <sub>2</sub> O Destilada	200 ml.	minutos	
3. METANOL ( 95% )	25 ml.	10 a 60	ALEACION Al-Mg-Si
HCl ( Conc.)	25 ml.	minutos	DELINEA FIGURAS
HNO <sub>3</sub> ( Conc.)	25 ml.		
HF ( 40 % )	1 gota		

MACROSCOPICO

1. KELLER	CANTIDAD	SEGUN CRITERIO	TAMAÑO DE GRANO SOLDADURAS DIRECCION DE LAMINADO Y TREFILADO
H <sub>2</sub> O Destilada	20 ml.		
HCl	20 ml.		
HNO <sub>3</sub>	20 ml.		
HF ( 40 % )	5 ml.		

ANEXO 9.2

TREFILACION DE ALUMINIO EN PLANTA

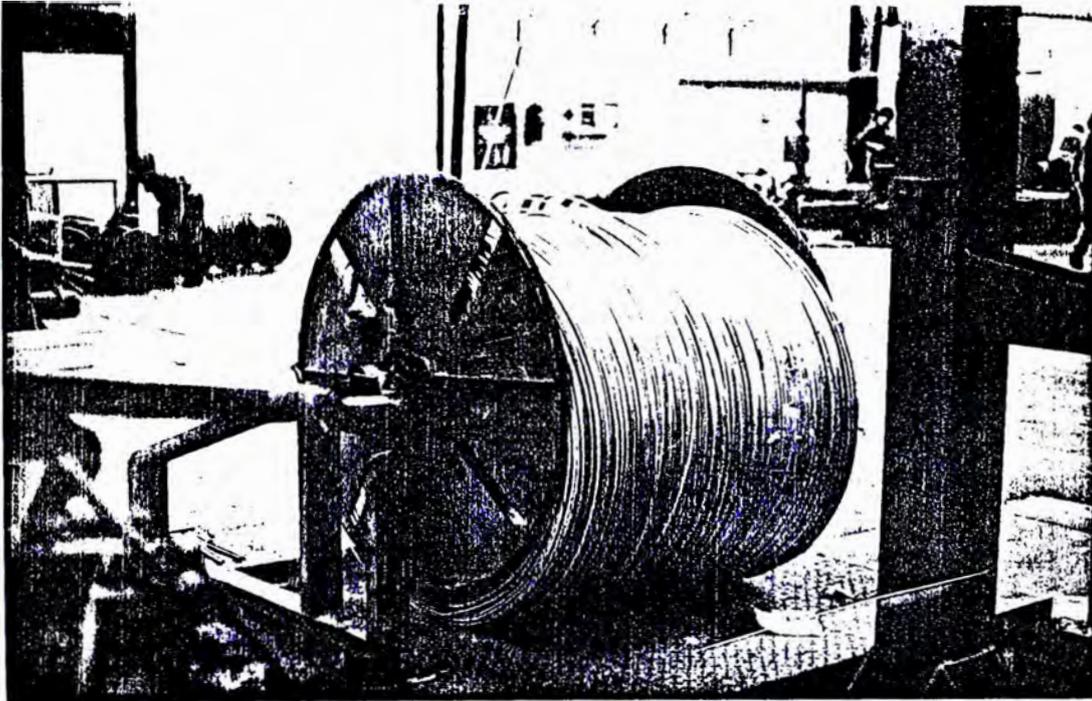


FOTO 9.1 ROLLO DE ALAMBRO DE ALEACION DE ALUMINIO PARA LA TREFILACION EN PLANTA CEPER

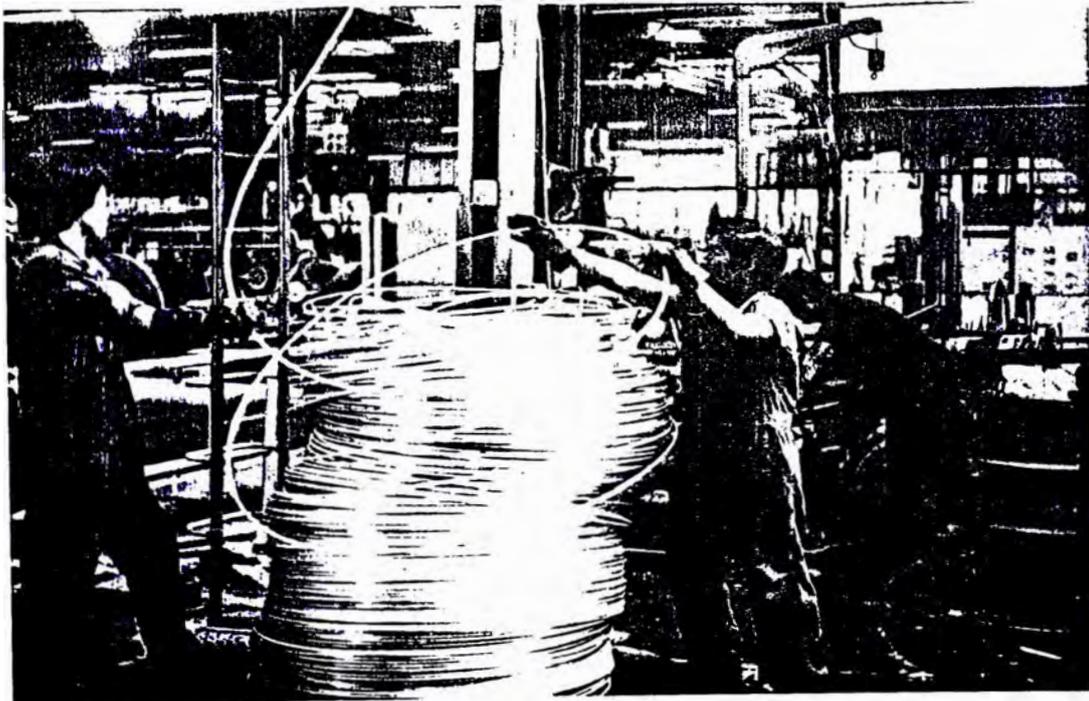


FOTO 9.2 PROBLEMAS EN EL DESENLAMAMIENTO DEL ALAMBRO DE ALUMINIO

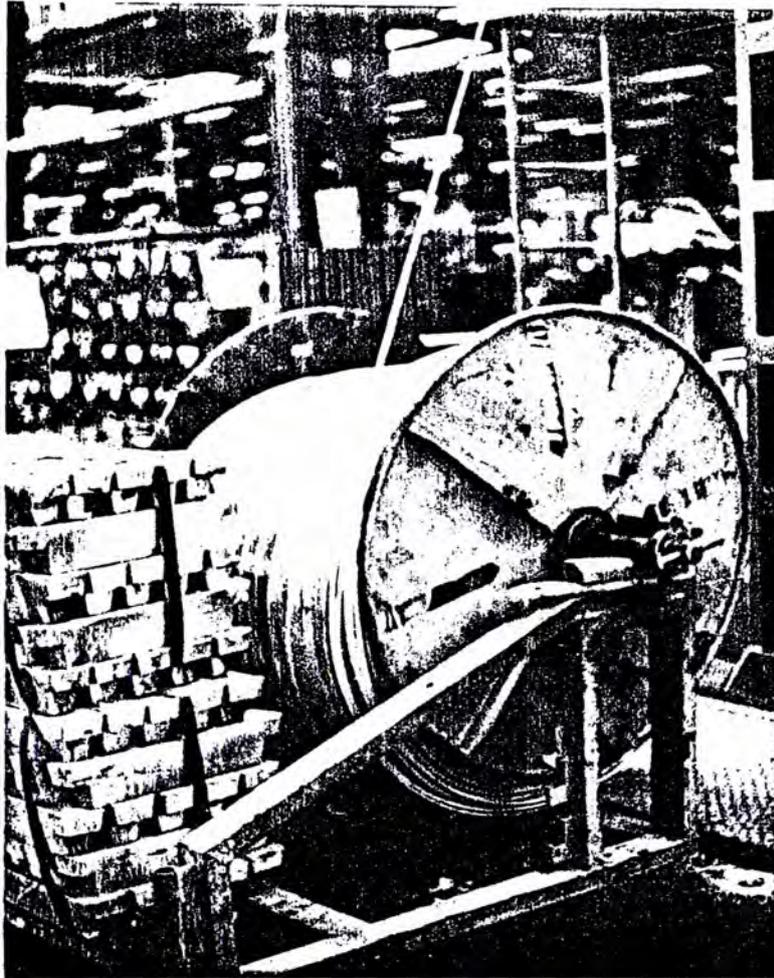


FOTO 9.3 DIFICULTADES DEL ROLLO  
EN EL PROCESO.

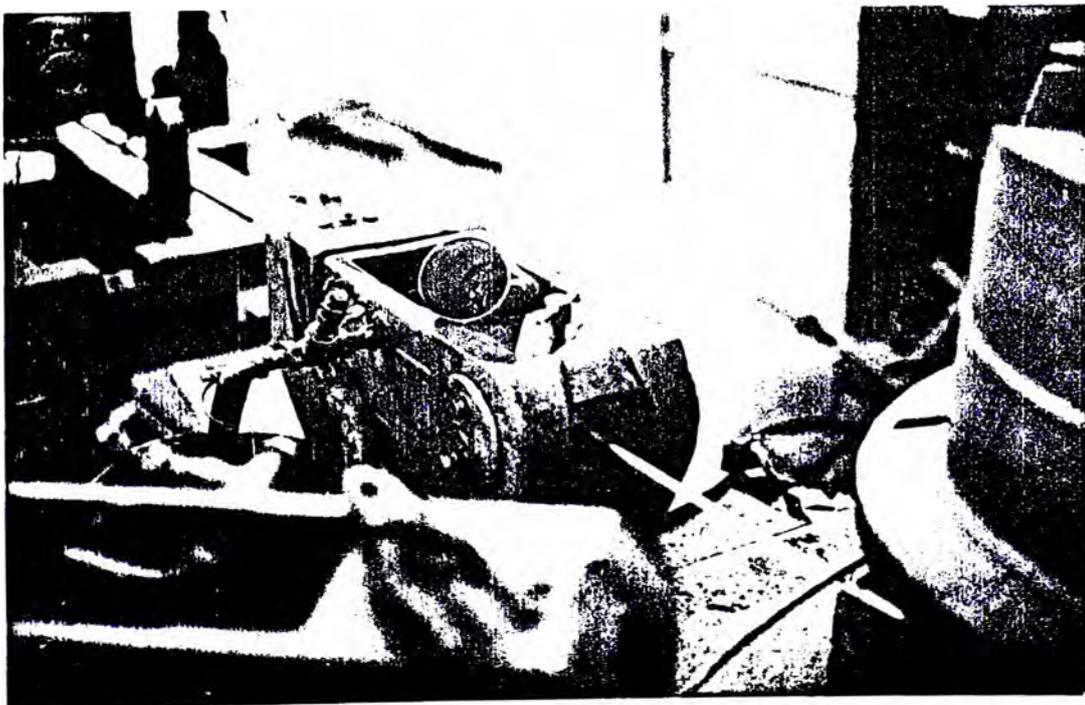


FOTO 9.4 MOMENTO DEL ESTIRADO EN  
UNA HILERA DEL ALAMBRON

ANEXO 9.3

CUADRO DE INDICE DE CORROSION PARA  
CONDUCTORES SEGUN AMBIENTES DE USO-ELECTROLIMA

Marine Corrosivity Index	Classification	Significance	General Remarks	Conductors (see Notes)	Line Hardware
0-2	Negligible	Average habitable	No precautions	Use any type of conductor.	Standard galvanized steel hardware is adequate when the galvanizing is 0.001 in. (0.025 mm) thick.
>2-5	Moderate	Seaside	Guard against galvanic attack	If ACSR, used greased cores.	
>5-10	Moderately severe	Seaside and exposed	Guard against galvanic attack and moisture in crevices	If ACSR, used greased cores. If all-aluminum construction, or ACSR/AW or ACSR/AZ, and if wire size is below 2.5 mm, use grease on inner wires.	Galvanized steel hardware with galvanized coating of 0.002 in. (0.05 mm) thick should be used.
10-20	Severe	Very exposed	Eliminate chance of galvanic attack and crevice attack from moisture in crevices.	Avoid small sizes of ACSR (6/1) and those with only one layer of aluminum wires. Use grease in all conductors. Use wire sizes above 2.5 mm.	Here aluminum or stainless steel hardware should be used, since galvanized steel hardware, even with a galvanized coating of 0.002 in. (0.05 mm) will have a limited life.
>20	Very severe	Wind-swept, sand-swept & very exposed	Same as above, but also allow for some pitting	Avoid using ACSR or ACSR/AZ. Use grease in all conductors. Use wire sizes above 3 mm.	



## Standard Specification for ALUMINUM-ALLOY 6201-T81 WIRE FOR ELECTRICAL PURPOSES<sup>1</sup>

This Standard is issued under the fixed designation B 398; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal.

### 1. Scope

1.1 This specification covers aluminum Alloy 6201-T81 (heat-treated, drawn, and aged) round wire for electrical purposes.<sup>2</sup>

NOTE—The values stated in U.S. customary units are to be regarded as the standard. The metric equivalents of U.S. customary units may be approximate.

### 2. Basis of Purchase

2.1 Orders for material under this specification shall include the following information:

- 2.1.1 Quantity of each size.
- 2.1.2 Wire size: diameter in inches or in millimeters (see 10.1).
- 2.1.3 When tension tests on wires containing joints shall be made (see 6.2 and 6.3).
- 2.1.4 Special jointing procedures, if permitted (see 12.2).
- 2.1.5 Package size (see 14.1).
- 2.1.6 Special package marking, if required.
- 2.1.7 Place of inspection (Section 15), and
- 2.1.8 Frequency of bending test (see 7.2).

### 3. Material and Manufacture

3.1 The aluminum alloy used shall be of such quality as to produce a wire that will comply with the requirements as to chemical composition, tensile and elongation properties, bending properties, and electrical resistivity prescribed in this specification.

### 4. Chemical Composition

4.1 The wire shall be made from aluminum Alloy 6201 as designated by the American National Standard Alloy Designation System for Wrought Aluminum (ANSI H35.1).<sup>3</sup> The material shall conform to the requirements as

to chemical composition prescribed in Table 1.

### 5. Sampling

5.1 Unless otherwise agreed upon between the manufacturer and the purchaser, samples for test shall be taken from 20 percent of the reels, coils, or spools to determine conformance with the requirements of Sections 6 and 8.

### 6. Tensile Properties

6.1 The heat-treated, cold-worked, and aged wire, when sampled in accordance with Section 5 of this specification and tested in accordance with ASTM Methods E 8, Tension Testing of Metallic Materials,<sup>4</sup> shall conform to the requirements as to tensile properties prescribed in Table 2 (Explanatory Note 1). The elongation of wire shall be determined as the permanent increase in length, due to the breaking of the wire in tension, measured between gage marks placed originally 10 in. (254 mm) apart upon the test specimen.

6.2 When requested by the purchaser, tension tests shall be made on specimens of heat-treated, cold-worked, and aged wire containing joints made in the wire after heat treatment and prior to final drawing. Such tests shall show not less than 90 percent of the min-

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee B-1 on Wires for Electrical Conductors.

Current edition approved May 30, 1972. Published September 1972. Originally published as B 398 - 63 T. Last previous edition B 398 - 71.

<sup>2</sup> For explanation of temper designation, see American National Standard for Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum (ANSI H35.1) Annual Book of ASTM Standards, Part 7.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Part 7.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Parts 6, 7, and 10.

imum strength specified in Table 2 for individual tests.

6.3 When requested by the purchaser, tension tests shall be made on specimens of heat-treated, cold-worked, and aged wire containing joints made in the finished wire or during the final drawing as permitted in 12.2. Such tests shall show the tensile strength to be not less than 42,000 psi (29.5 kgf/mm<sup>2</sup>) for cold pressure-welds and for electric-butt cold upset welds and not less than 15,000 psi (10.5 kgf/mm<sup>2</sup>) for electric butt welds. Electric butt welds in addition shall show an elongation in a 10-in. (254-mm) gage length of 6.0 percent minimum.

### 7. Bending Properties

7.1 The wire shall be free from brittleness as evidenced by its ability to be coiled or looped around its own diameter either with or without a mandrel. No fracture shall occur. Flight surface checks shall not constitute cause for rejection.

7.2 Any coil or reel may be tested in accordance with 7.1, but the frequency of production sampling and testing shall be by agreement between the manufacturer and the purchaser.

### 8. Resistivity

8.1 Electrical resistivity, determined on samples selected in accordance with Section 5 of this specification and tested in accordance with ASTM Method B 193, Test for Resistivity of Electrical Conductor Materials,<sup>5</sup> shall not exceed 19.754 Ω-cmil/ft at 20 C (68 F) (Explanatory Note 2 and Table 3).

### 9. Restests

9.1 If on testing a sample from any reel, coil, or spool of wire, the results do not conform to the requirements of Table 2 for individual tests, two additional samples shall be tested and the average of the three tests shall determine the acceptance or rejection of the reel, coil, or spool. If a test specimen contains a joint made either in the wire or rod after heat treatment and prior to final drawing, the results shall be discarded and a new specimen shall be tested. If, however, the specimen containing the joint fails to meet the requirements of 6.2 or 6.3 as applicable, further tests of joints shall be made and no further reels, coils, or spools containing joints shall be ac-

cepted until the tests show that the jointing practice has been corrected.

9.2 If, on testing a sample from any reel, coil, or spool of wire, the results do not conform to the requirements of Section 7, two additional samples shall be tested and the reel, coil, or spool shall be accepted if both samples conform to the requirements of Section 7.

### 10. Dimensions and Permissible Variations

10.1 The diameter of the wire shall be expressed in decimal fractions of an inch using four places of decimals or in millimeters using three places of decimals.

10.2 Ten percent, but not less than five coils or spools (or all if the lot is less than five) from any lot of wire shall be gaged at three places. If the material is in coil form, one gaging shall be taken near each end and one near the middle. If any of the selected coils or spools fails to conform to the requirements prescribed in 10.3, all coils or spools shall be gaged in the manner specified.

10.3 The coil, spool, or reel shall be rejected if the average of the measurements so made shall depart from the specified diameter by more than the following amounts:

Specified Diameter, in. (mm)	Permissible Variations of Mean Diameter from Specified Diameter, plus and minus	
	percent	
0.1875 to 0.1000 (2.353 to 2.540), incl	0.0016 in. (0.025 mm)	
Under 0.1000 to 0.0612 (2.540 to 1.554), incl	0.0016 in. (0.025 mm)	

### 11. Density

11.1 For the purpose of calculating weights, cross-sections, etc., the density of 6201 aluminum alloy shall be taken as 2.703 g/cm<sup>3</sup> (0.09765 lb/in.<sup>3</sup>) at 20 C (68 F).

### 12. Joints

12.1 Unless otherwise specified at the time of placing the order, wire shall be supplied in one continuous length of reel, coil, or spool. Joints may be made in the rod or wire after heat treatment and prior to final drawing by electric butt welding, by cold-pressure welding, or by electric-butt, cold-upset welding in accordance with good commercial practice. Unless otherwise specified, no joints shall be

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Parts 6 and 7.

made during final drawing or in the finished wire

12.2 If agreed upon between the manufacturer and the purchaser, joints may be made during final drawing or in the finished wire by cold-pressure welding, by electric-hutt, cold-upset welding, or by electric butt welding. Following welding, electric butt welds shall be annealed for a distance of at least 6 in. (150 mm) on each side of the weld. Not more than ten percent of the reels, coils, or spools shall contain such joints and no joint shall be closer than 50 ft (15 m) to another or to either end of the wire, and not more than two such joints shall be present in any reel, coil, or spool of the nominal specified weight.

13. Finish

13.1 The wire shall be free from all imperfections not consistent with good com-

mercial practice

14. Packaging and Shipping

14.1 Package sizes shall be agreed upon by the manufacturer and the purchaser in the pricing of individual orders.

14.2 The wire shall be protected against damage in ordinary handling and shipping.

15. Inspection

15.1 All tests and inspection shall be made at the place of manufacture unless otherwise especially agreed upon between the manufacturer and the purchaser at the time of purchase. The manufacturer shall afford the inspector representing the purchaser all reasonable facilities to satisfy him that the material is being furnished in accordance with this specification.

EXPLANATORY NOTES

NOTE 1—In general, the values for tensile strength are not greatly affected by variations in speed of testing, so that a considerable range of testing speed is permissible. Care, of course, must be exercised to prevent the speed of testing from exceeding the rate at which the load-indicating equipment functions satisfactorily.

NOTE 2—"Resistivity" is used in place of "conductivity." The value of 0.15328  $\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2$  at 20 C (66 F) is the international resistivity of annealed copper equal to 100 percent conductivity and constitutes the International Annealed Copper Standard

(IACS). This term means that a copper wire 1 m in length and weighing 1 g would have a resistance of 0.15328  $\Omega$ . This is equivalent to a resistivity value of 875.20  $\Omega \cdot \text{lb}/\text{mile}^2$ , which signifies the resistance of a copper wire 1 mile in length weighing 1 lb. It is also equivalent, for example, to 1.7241  $\mu\Omega/\text{cm}$  of length of a copper bar 1 cm<sup>2</sup> in cross-sectional area.

Relations which may be useful in connection with the values of resistivity prescribed in this and related specifications are shown in Table 3, each column containing equivalent expressions, at 20 C (66 F).

TABLE 1 Chemical Requirements

Element	Composition, percent
Copper, max	0.10
Iron, max	0.50
Silicon	0.50-0.9
Manganese, max	0.03
Magnesium	0.6-0.9
Zinc, max	0.10
Chromium, max	0.03
Boron, max	0.06
Other elements, each, max	0.03
Other elements, total, max	0.10
Aluminum	remainder

TABLE 2 Tensile Requirements

Diameter, in. (mm)	Tensile Strength, min				Elongation in 10 in. (254 mm) for individual tests, min, percent
	Average for a Lot		Individual Tests		
	psi	kgf/mm <sup>2</sup>	psi	kgf/mm <sup>2</sup>	
0.1878 to 0.1328 (3.353 to 3.356)	46 000	32.3	44 000	30.8	3.0
0.1327 to 0.0612 (3.355 to 1.554)	48 000	33.7	46 000	32.3	3.0

TABLE 3 Equivalent Resistivity Values

Material	Volume Conductivity at 20 C (68 F), percent (IACS)	Resistivity Constants at 20 C (68 F)					
		Volume				Weight	
		$\Omega \cdot \text{cmil}/\text{ft}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$\mu\Omega \cdot \text{in.}$	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	$\Omega \cdot \text{lb}/\text{mile}^2$	$\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2$
Copper	100	10.371	0.017241	0.67879	1.7241	875.20	0.15328
Aluminum	61.0	17.002	0.028264	1.1128	2.8264	436.24	0.076397
	53.5	19.385	0.032226	1.2687	3.2226	497.38	0.087106
	52.5	19.754	0.032839	1.2929	3.2839	506.85	0.088764

By publication of this standard no position is taken with respect to the validity of any patent rights in connection therewith, and the American Society for Testing and Materials does not undertake to insure anyone utilizing the standard against liability for infringement of any Letters Patent nor assume any such liability.



Designation: B 399 - 74 a

American National Standard C7.52  
American National Standards Institute

## Standard Specification for CONCENTRIC-LAY-STRANDED 6201-T81 ALUMINUM-ALLOY CONDUCTORS<sup>1</sup>

This Standard is issued under the fixed designation B 399; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval.

### 1. Scope

1.1 This specification covers concentric-lay-stranded conductors, made of round 6201-T81 aluminum alloy wires,<sup>2</sup> for general use for electrical purposes. These conductors shall be constructed with a central core surrounded by one or more layers of helically laid wires.

1.2 For the purpose of this specification, conductors are classified as follows (Explanatory Notes 1 and 2):

1.2.1 *Class AA*—For bare conductors usually used in overhead lines.

1.2.2 *Class A*—For conductors to be covered with suitable materials and usually used as weather-resistant (weatherproof) line wire or as tree wire.

NOTE 1—The values stated in U.S. customary units are to be regarded as the standard. The SI equivalents of U.S. customary units may be approximate.

### 2. Applicable Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

B 263, Determination of Cross-Sectional Area of Standard Conductors<sup>3</sup>

B 354, Definitions of Terms Relating to Uninsulated Metallic Electrical Conductors  
B 398, Specification for Aluminum-Alloy 6201-T81 For Electrical Purposes<sup>4</sup>

E 29, Recommended Practices for Indicating Which Places of Figures Are to Be Considered Significant in Specified Limiting Values<sup>5</sup>

2.2 *American National Standards Institute:*  
C42.100 Dictionary of Electrical and Electronics Terms.

H35.1 Alloy and Temper Designation System for Aluminum<sup>6</sup>

2.3 *National Bureau of Standards:*  
NBS Handbook 100.

### 3. Basis of Purchase

3.1 Orders for material under this specification shall include the following information:

3.1.1 Quantity for each size and class.

3.1.2 Conductor size: circular-mil area or EC grade equivalent size (Section 7 and Tables 2 or 3).

3.1.3 Class (see 2.2).

3.1.4 When physical tests shall be made (see 8.2 and 9.2).

3.1.5 Package size (see 13.1).

3.1.6 Special package marking, if required (Section 14).

3.1.7 Lagging, if required (see 13.2), and

3.1.8 Place of inspection (Section 15).

### 4. Requirements of Wires

4.1 The aluminum alloy wires used shall conform to all the requirements of Specification B 398.

### 5. Joints

5.1 In conductors composed of seven wires, only cold-pressure joints or electric-butt cold upset joints are permitted in the six outer finished wires; no joints are permitted in the

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee B-1 on Wires for Electrical Conductors. Current edition approved Jan. 26, 1974 and May 27, 1974. Published September 1974. Originally published as B 399-63 T. Last previous edition B 399-72.

<sup>2</sup> For explanation of temper designation, see American National Standard for Alloy and Temper Designation Systems for Wrought Aluminum (ANSI H35.1), which appears in the Annual Book of ASTM Standards, Part 1.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Part 7.  
<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Parts 10, 11, 12, 21, 30, and 41.

By publication of this standard no position is taken with respect to the validity of any patent rights in connection therewith, and the American Society for Testing and Materials does not undertake to insure anyone utilizing the standard against liability for infringement of any Letters Patent nor assume any such liability.



B 399

center wire. In other conductors, cold-pressure welds, electric-butt cold upset welds, or electric butt welds may be made in the finished wires composing conductors, but such joints shall not be closer than prescribed in Table 1. Following welding, electric butt welds shall be annealed for a distance of at least 6 in. (150 mm) on each side of the weld.

### 6. Lay

6.1 For Class AA conductors, the preferred lay of a layer of wires is 13.5 times the outside diameter of that layer, but shall be not less than 10 nor more than 16 times this diameter.

6.2 For Class A conductors, the lay of a layer of wires shall not be less than 8 nor more than 16 times the outside diameter of that layer, except that for conductors composed of 37 wires or more, this requirement shall apply only to the two outer layers. The lay of the layers, other than the two outer layers, shall be at the option of the manufacturer, unless otherwise agreed upon.

6.3 Other lays for special purposes shall be furnished by agreement between the manufacturer and the purchaser.

6.4 Unless otherwise specified by the purchaser, the outer layer of Class AA conductors shall be right hand lay and the outer layer of Class A conductors shall be left hand lay.

6.5 The direction of lay shall be reversed in successive layers, unless otherwise specified by the purchaser.

### 7. Construction

7.1 The cross-sectional areas and the numbers and diameters of wires in the concentric-lay-stranded conductors shall conform to the requirements prescribed in Tables 2 or 3 as applicable (Explanatory Notes 2 and 6).

7.2 Where compressed stranding is required in order that the conductor may be properly insulated, one or more layers of any stranded conductor consisting of 7 wires or more may be slightly compressed, thereby reducing the outside diameter of the conductor by not more than 3 percent, provided that the area of cross section after compressing is in accordance with Section 11.

NOTE 2—The user's attention is called to the claim that certain compressed strand constructions

may be subject to patent rights, for example: Patents 3,383,704 and 3,444,684.

### 8. Physical and Electrical Tests on Conductors

8.1 Tests for the physical and electrical properties of wires composing the conductors shall be made before, but not after, stranding unless otherwise agreed upon between the manufacturer and the purchaser as provided in 8.2. Such tests shall be made after the aging operation.

8.2 When requested by the purchaser at the time of placing the order, tension and elongation tests on wires before stranding may be waived and tests made on wires removed from the completed conductor. When so tested, the wires shall have minimum tensile strengths not less than 95 percent of the tensile strength prescribed for individual tests in Table 2 of Specification B 398 (Explanatory Note 3).

8.3 All wires composing the conductors shall be capable of meeting the bending properties stated in Specification B 398 after stranding. Routine production testing after stranding is not required.

### 9. Strength of Conductor

9.1 The rated strength of a completed conductor shall be taken as that percentage, indicated in Table 4, of the sum of the strengths of the 6201-T81 wires, calculated from their specified nominal wire diameter and the appropriate specified minimum average tensile strength given in Specification B 398.

9.2 Tests for demonstration of rated strength of the completed conductor are not required by this specification but may be made if agreed upon by the manufacturer and the purchaser at the time of placing an order. If tested, the breaking strength of the completed conductor shall be not less than the rated strength if failure occurs in the free length at least 1 in. (25 mm) beyond the end of either gripping device or shall be not less than 95 percent of the rated strength if failure occurs inside, or within 1 in. (25 mm) of the end of either gripping device (Explanatory Note 4).

9.3 Rated strength and breaking strength

NORMA TECNICA PARA CABLES CONCENTRICOS  
DE ALEACION DE ALUMINIO

ANEXO 9.5

values shall be rounded off to three significant figures, in the final value only, in accordance with the rounding-off method of Recommended Practice E 29.

**10. Density**

10.1 For the purpose of calculating weights, cross-sections, etc., the density of 6201 alloy shall be taken as 2.703 g/cm<sup>3</sup> (0.09765 lb/in.<sup>3</sup>) at 20 C (68 F).

**11. Weight and Electrical Resistance**

11.1 The weight and electrical resistance of a unit length of stranded conductor are a function of the length of lay. The approximate weight and electrical resistance may be determined using an increment of 2 percent. When greater accuracy is desired, the increment based on the specific lay of the conductor may be calculated (Explanatory Note 5).

**12. Variation in Area**

12.1 The cross-sectional area of the completed conductor shall be not less than 98 percent of the area specified. Unless otherwise specified by the purchaser, the manufacturer may have the option of determining the cross-sectional area by either of the following methods, except that in case of question regarding area compliance, the method described in 12.1.2 shall be used.

12.1.1 The cross-sectional area of a conductor may be determined by calculations from diameter measurements, expressed to four decimal places, of its component wires at any point when measured perpendicularly to their axes.

12.1.2 The cross-sectional area of a conductor may be determined by Method B 263. In applying that method, the increment in weight

resulting from stranding may be the applicable value specified in 11.1 or may be calculated from the measured component dimensions of the sample under test. In case of question regarding area compliance, the actual weight increment due to stranding shall be calculated.

**13. Packaging and Shipping**

13.1 Package sizes for conductors shall be agreed upon by the manufacturer and the purchaser in the placing of individual orders.

13.2 The conductors shall be protected against damage in ordinary handling and shipping. If heavy wood lagging is required, it shall be specified by the purchaser at the time of placing the order.

13.3 Only one length shall be included in any one package.

**14. Marking**

14.1 The net weight, length, size, and kind of conductor shall be marked on a tag attached to the end of the conductor inside of the package. The same information, together with the manufacturer's serial number (if any) and all shipping marks and other information required by the purchaser shall appear on the outside of each package.

**15. Inspection**

15.1 All tests and inspection shall be made at the place of manufacture unless otherwise especially agreed upon by the manufacturer and the purchaser at the time of purchase. The manufacturer shall afford the inspector representing the purchaser all reasonable facilities to satisfy him that the material is being furnished in accordance with this specification.

**EXPLANATORY NOTES**

NOTE 1—In this specification only concentric-lay-stranded conductor constructions are specifically designated. Requirements for other constructions such as aluminum conductors, steel-reinforced (ACSR) will be found in ASTM Specification B 232 for Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Steel-Reinforced (ACSR). Conductor constructions not included in this specification should be specifically agreed upon by the manufacturer and the purchaser when placing the order.

NOTE 2—For definitions of terms relating to

conductors, reference should be made to the Definitions and General Standards for Wires and Cables (IEEE Standard No. 30—1944) approved as American National Standard ANSI C3.1 by the American National Standards Institute.

NOTE 3—Wires unlad from conductors will have manifestly different physical properties from those of the wire when prepared for cable on account of the deformation brought about by laying and again straightening for test.

NOTE 4—Breaking-strength tests of completed

conductors require adequate means of gripping the ends of test specimens so that damage to the specimens will not result in failures below their actual strengths.

NOTE 5—The increment of weight or electrical resistance of a completed concentric-lay-stranded conductor (*k*) in percent is:

$$k = 100(m - 1)$$

where *m* is the lay factor, and is the ratio of the weight or electrical resistance of a unit length of stranded conductor to that of a solid conductor of the same cross-sectional area or of a stranded conductor with infinite length of lay, that is, all wires parallel to the conductor axis. The lay factor *m* for the completed stranded conductor is the "numerical average" of the lay factors for each of the individual wires in the conductor, including the straight core wire, if any (for which the lay factor is unity). The lay factor (*m<sub>w</sub>*) for any given wire in a concentric-lay-stranded conductor is:

$$m_{w(\text{hel})} = \sqrt{1 + (9.5596/n^2)}$$

where *n* = length of lay/diameter of helical path of the wire

The derivation of the above is given in *NBS Handbook 100* of the National Bureau of Standards.

NOTE 6—The electrical characteristics of any conductor in service are influenced by conductivity, physical size, power frequency, temperature coefficient of resistance, etc., and it is not likely that one type of conductor may be stated to be the exact equivalent of another type except on a closely defined basis. For example, a conductor made of high-strength aluminum alloy may be designed to be the equivalent of a conductor made of EC grade aluminum on the basis of d-c resistance at 20 C, but it will not be an exact equivalent in other ways. The constructions shown in Table 2 were designed to have physical diameter, the same as those of standard sizes and strandings of ACSR as shown, for which suitable accessories and fittings are readily available. The approximate EC grade equivalent sizes shown in Table 2 are those standard sizes of 26/7 and 6/1 ACSR having approximately the same d-c resistance at 20 C (68 F).

\* *NBS Handbook 100*, National Bureau of Standards, is for sale from the National Technical Information Service, Post Royal Rd., Springfield, Va. 22161.

TABLE 1 Minimum Distance Between Joints in the Completed Conductor

Number of Wires in Conductor	Distance Between Joints, min. ft (m)
7	50 (15) <sup>1</sup>
19	50 (15)
37	25 (7.5)

<sup>1</sup> Only cold-pressure welds and electric-butt cold spot welds are permitted in the six outer wires of conductors composed of seven wires; no welds are permitted in the center core wire.

NORMA TECNICA PARA CABLES CONCENTRICOS

DE ALEACION DE ALUMINIO



TABLE 2 Construction Requirements of Concentric-Lay-Stranded 6201 Aluminum Alloy Conductors Sized to Have Diameter Equal to ACSR, Class AA and Class A

Conductor Size cmil	Approximate EC Grade Size Having Equivalent Resistance		Size and Stranding of ACSR with Equal Diameter				Required Construction		
	cmil*	Awg	Size		Stranding	Number of Wires	Diameter of Wires, in.*	Class	
			cmil*	Awg					
923 300	795 000	...	795 000	...	26/7	37	0.1583	AA	
740 800	636 000	...	636 000	...	26/7	37	0.1415	AA	
652 400	556 500	...	556 500	...	26/7	19	0.1853	AA	
559 500	477 000	...	477 000	...	26/7	19	0.1716	AA	
465 400	397 500	...	397 500	...	26/7	19	0.1565	AA	
394 500	336 400	...	336 400	...	26/7	19	0.1441	AA, A	
312 300	266 800	...	266 800	...	26/7	19	0.1283	A	
246 900	211 600	0000	211 600	0000	6/1	7	0.1878	AA	
195 700	167 800	000	167 800	000	6/1	7	0.1672	AA, A	
155 400	133 100	00	133 100	00	6/1	7	0.1490	AA, A	
123 300	105 600	0	105 600	0	6/1	7	0.1327	AA, A	
77 470	66 360	2	66 360	2	6/1	7	0.1052	AA, A	
48 690	41 740	4	41 740	4	6/1	7	0.0834	A	
30 580	26 240	6	26 240	6	6/1	7	0.0661	A	

\* Conversion factors:  
1 cmil = 5.067 E-04 mm<sup>2</sup>  
1 in. = 25.4 mm.

TABLE 3 Construction Requirements of Concentric-Lay-Stranded 6201 Aluminum Alloy Conductors Sized by Standard Areas, Class AA and Class A

Conductor Size cmil*	Required Construction		
	Number of Wires	Diameter of Wires, in.	Class
1 000 000	37	0.1644	AA
900 000	37	0.1560	AA
800 000	37	0.1470	AA
750 000	37	0.1424	AA
700 000	37	0.1375	AA
650 000	37	0.1325	AA
600 000	37	0.1273	AA, A
550 000	37	0.1219	AA, A
500 000	19	0.1622	AA
450 000	19	0.1539	AA
400 000	19	0.1451	AA, A
350 000	19	0.1357	A
300 000	19	0.1257	A
250 000	19	0.1147	A
211 600	7	0.1739	AA, A
167 800	7	0.1548	AA, A
133 100	7	0.1379	AA, A
105 600	7	0.1228	AA, A
66 360	2	0.0974	AA, A
41 740	4	0.0772	A
26 240	6	0.0612	A

\* Conversion factors:  
1 cmil = 5.067 E-04 mm<sup>2</sup>  
1 in. = 25.4 mm.

TABLE 4 Rating Factors

Number of Wires in Conductor	Stranding		Rating Factor, percent
	Number of Layers		
7	1		96
19	2		93
37	3		91