

**ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**“CONTROL METALURGICO  
DEL ALUMINIO PARA  
TUBOS COLAPSIBLES”**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la Obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

**Angel Eduardo Celleri Silva**

**Guayaquil - Ecuador**

**1986**



## AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a la E.S.P.O.L., al Ing. Ignacio Wiesner F. e Ing. Homero Ortiz A., director de tesis.

A la Fábrica FADESA, en especial al departamento de Fundición por su ayuda espontánea para la realización de este trabajo.

A todas aquellas personas que de alguna manera me brindaron su apoyo y colaboración.



## DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis padres por su constante apoyo y abnegación durante toda mi carrera estudiantil.

A mis hermanas, a mi familia y en especial a mis abuelitos.

*Eduardo Orces*

ING. EDUARDO ORCES P.  
DECANO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERIA MECANICA

*Homero Ortiz*

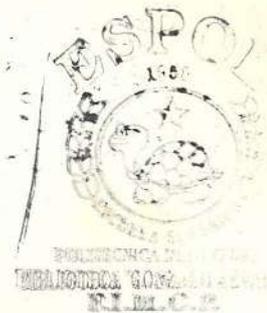
ING. HOMERO ORTIZ A.  
DIRECTOR DE TESIS

*Alberto Torres*

ING. ALBERTO TORRES V.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

*Ignacio Wiesner*

ING. IGNACIO WIESNER F.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



---

ANGEL EDUARDO CELLERI S.

## R E S U M E N

En el presente trabajo se propone un método de control de propiedades para un aluminio de alta pureza (99.7 % min) empleado en nuestro medio para la fabricación de tubos colapsibles.

Entre los puntos mas importantes de la investigación se tienen: 1) Análisis químico del metal base, de las cargas fundidas y del producto terminado, con el propósito de verificar la pureza del metal virgen importado y cuantificar el arrastre de impurezas del proceso. 2) Análisis de las propiedades mecánicas del metal base y producto terminado en estado de laminado y recocido; y 3) Determinación de la influencia de los parámetros de recocido sobre las propiedades físico-estructurales del producto terminado, tales como dureza y tamaño de grano o grado de recristalización del material.

Los resultados obtenidos de los análisis químicos efectuados, manifiestan que tanto el metal base como

aquellas muestras de material tomadas en el transcurso del proceso y producto terminado, cumplen satisfactoriamente con las normas de pureza admitidas.

Respecto de las propiedades mecánicas del producto terminado se encuentra que, en estado de laminado y recocido, los valores de carga de rotura, alargamiento y dureza están dentro de las cifras corrientemente admitidas para el aluminio refinado en productos laminados comerciales.

Finalmente, los tratamientos térmicos de recocido efectuados manifiestan que cuando se varían los parámetros de recocido, las propiedades físico-estructurales del producto terminado también lo hacen; existiendo una mayor tendencia a la recristalización y un menor grado de dureza del material cuando para cualquiera de las temperaturas ensayadas los tiempos de permanencia en el horno se incrementan. Así mismo, de pruebas de extrusión realizadas en planta se determina un criterio de aceptación para los lotes de discos recocidos, basado en la dureza de los mismos previo al proceso de extrusión.

## INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN	.....VI
INDICE GENERAL	.....VIII
INDICE DE FIGURAS	.....XI
INDICE DE TABLAS	.....XIII
ABREVIATURAS	.....XIV
INTRODUCCION	.....XVI
CAPITULO I	
PROCESO DE PRODUCCION	..... 18
1.1. Generalidades	.....18
1.2. Diagrama de Bloque	.....21
1.3. Normas de Control del Material	.....23
1.3.1. Composición Química	.....23
1.3.2. Propiedades Mecánicas	.....24
CAPITULO II	
ESTUDIO DEL PROCESO	.....25
2.1. Fusión	.....25
2.2. Colado	.....33
2.3. Tratamiento Termomecánico	.....38
2.3.1. Laminación	.....38

2.3.2. Troquelado	.....	42
2.3.3. Tratamiento Térmico	.....	47
2.3.4. Desbarbado	.....	59
2.4. Control en el Curso de Fabricación	.....	60

### CAPITULO III

TRABAJO EXPERIMENTAL	.....	64
3.1. Metal Base	.....	65
3.1.1. Análisis Químico	.....	65
3.1.2. Propiedades Mecánicas	.....	69
3.2. Proceso	.....	73
3.2.1. Análisis Químico del Metal Fundido	.....	73
3.2.2. Calidad de Superficie y Estructura del Lingote Colado	.....	75
3.2.3. Medición de Espesores y Estructura de Laminación	.....	80
3.3. Producto Terminado	.....	81
3.3.1. Análisis Químico	.....	81
3.3.2. Propiedades Fisico- Estructurales	.....	85
3.3.3. Propiedades Mecánicas	.....	102
3.3.4. Pruebas de Extrusión	.....	105

CAPITULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS .....107

CONCLUSIONES .....115

BIBLIOGRAFIA .....116





## INDICE DE FIGURAS

N.	Titulo	Pag
1	Proceso de Producción de Tubos Colapsibles.....	22
2	Horno de Reverbero utilizado en la Fusión del Aluminio.....	28
3	Disposición de los Hornos de Fusión.....	32
4	Moldeador de Tipo Horizontal utilizado en el Colado de Placas o Lingotes.....	36
5	Esquema de la Instalación del Tren de Laminación.....	43
6	Laminador Dúo empleado en el Proceso.....	44
7	Prensa de Corte utilizada en el Proceso.....	46
8	Diagrama de Crecimiento de Grano en el Recocido.....	56
9	Esquema de un Horno Fijo de Recocido.....	58
10	Desbarbador empleado en el Proceso (Tambor Rotativo).....	61
11	Espectroscópio de Absorción Atómica .....	68
12	Probeta de Sección Redonda para Ensayos de Tensión.....	71

13	Máquina para Ensayos de Tensión.....	72
14	Estructura del Lingote Colado en Molde Abierto.....	79
15	Control de Medición del Espesor de Laminación...	82
16	Estructura de una Placa de Aluminio de Segunda Laminación.....	83
17	Máquina para Ensayos de Dureza Brinell.....	88
18	Máquina para Cortar Metales.....	94
19	Mesa de Pulido Mecánico.....	95
20	Equipo de Pulido Electrolítico.....	96
21	Microscopio Metalográfico.....	97
22	Pruebas de Recocido a 450 C.....	99
23	Pruebas de Recocido a 500 C.....	100
24	Pruebas de Recocido a 550 C.....	101
25	Probeta de Sección Rectangular para Ensayos de Tensión.....	103
26	Resultados de Pruebas de Extrusión en Planta...	106
27	Extrusión de Tubos en la Zona 1.....	113
28	Extrusión de Tubos en la Zona 2.....	114

## INDICE DE TABLAS

N.	Titulo	Pag
1	Propiedades Mecánicas del Aluminio de Título 99.7 % .....	24
2	Consumo Teórico de las boquillas Atomizadoras .....	31
3	Composición Química de la Muestra 1 .....	69
4	Propiedades Mecánicas del Metal Base .....	70
5	Composición Química de las Muestras 2 y 3 ....	74
6	Electrolitos para el Pulido de Probetas Metalográficas .....	77
7	Reactivos de Ataque para el Aluminio y sus Aleaciones .....	78
8	Composición Química de las Muestras 4 y 5 ....	85
9	Valores de dureza para diferentes condiciones de Recocido.....	90
10	Propiedades Mecánicas del Producto Terminado .....	104

## ABREVIATURAS

Al	= aluminio
Amp	= amperios
ASTM	= sociedad americana para ensayos y materiales
A7	= aluminio 99.7 % de pureza
A%	= porcentaje de alargamiento
BHN	= numero de dureza Brinell
C	= grados centígrados
Ca	= calcio
cc	= centímetros cúbicos
Cd	= cadmio
cm	= centímetros
Cr	= cromo
Cu	= cobre
E	= límite elástico
EA	= enfriamiento en el aire
EH	= enfriamiento en el horno
F	= límite de fluencia
Fe	= hierro
g	= gramos
gph	= galones por hora
HCl	= ácido clorhídrico
Hf	= ácido fluorhídrico
hp	= caballos de fuerza
hr	= horas

H	= hidrógeno
H <sub>2</sub> O	= agua (destilada)
Kg	= kilogramos
lt	= litros
M	= muestra
m	= metros
Mg	= magnesio
Ni	= níquel
min	= mínimo
ml	= mililitros
mm	= milímetros
Mn	= manganeso
Pb	= plomo
pulg	= pulgadas
R	= resistencia de la rotura
s	= segundos
Ti	= titanio
Ton	= toneladas
Tr	= temperatura de recocido
tr	= tiempo de recocido
V	= voltios
Zn	= Zinc
%	= porcentaje
≥	= mayor o igual que
≤	= menor o igual que

## INTRODUCCION

Es bien conocida la importancia que tiene el control que se realiza en el curso de fabricación de un producto para mantener su calidad. En el caso particular de la elaboración de los discos de aluminio para la extrusión de tubos colapsibles, el control más importante que permite este objetivo es el "control metalúrgico", puesto que el material empleado debe cumplir con normas estrictas de pureza y propiedades mecánicas durante todo el proceso.

El presente estudio pretende proveer a la industria local del aluminio, de un sistema de control de proceso elemental y sencillo, tanto en el proceso de fabricación como sobre el producto terminado.

Con tal propósito, es necesario tomar muestras de las diferentes fases del proceso y a partir de éstas elaborar probetas que más tarde serán analizadas.

Los métodos de control, procedimientos y equipo utilizado para los análisis químicos y de propiedades

mecánicas y físico-estructurales, se encuentran detallados y explicados convenientemente en los capítulos correspondientes.

# C A P I T U L O I

## PROCESO DE PRODUCCION

### 1.1. GENERALIDADES

Entre los requisitos que deben presentar los discos de aluminio, debemos mencionar en primer término el de la naturaleza y calidad del metal de origen.

En efecto, a la hora de pensar sobre las propiedades que debe reunir el metal, se podría citar en forma destacada la necesidad de un valor crítico de fluencia lo mas alto posible, para que durante la operación de impacto, el metal pueda fluir a través del estrecho espacio entre el punzón y la matriz, nunca superior a décimas de milímetro, sin provocar distorsiones en cuanto a ruptura o agrietamiento del metal, sobre calentamientos locales y heterogéneos, índices de rozamiento superiores a los previstos, soldaduras por fusión local, erosión prematura del utilaje,

rayaduras, fisuración de los envases, rugosidades o asperezas, adherencias, diferencias en el espesor final entre envases o incluso en cada uno según distintas zonas, etc.

Para centrar objetivos que eviten toda esta serie de inconvenientes graves, se selecciona en primer lugar un metal base de altísima pureza y homogeneidad, con un control muy severo en cuanto a límite de impurezas, sean solubles o insolubles.

X El título mínimo de metal aluminio puro que se selecciona es de 99.7 % .

Esto quiere decir en otros términos, que la suma de impurezas de toda índole, nunca podrá sobrepasar del 0.3 % .

Pero además, como el hierro y el silicio son elementos que siempre acompañan al aluminio en cantidades bastante superior al resto de impurezas, para estas últimas, algunas altamente nocivas a efectos de apresividad y dureza residual, no podrán sobrepasar de centésimas o



milésimas por ciento.

Del mismo modo, siendo la reactividad del aluminio muy alta con respecto a su combinación con el oxígeno del aire, máxima en estado de fusión para formar óxidos de aluminio con alto poder abrasivo por frotamiento, se debe evitar al máximo esta unión.

De aquí que prácticamente es imprescindible que el metal base proceda directamente de "cubas de electrólisis", seleccionando aquellas de pureza más alta garantizada y con técnicas posteriores de depuración, lavado, desoxidación y protección a la oxidación, así como otros tratamientos que se complementen antes de proceder a su solidificación, entre los que destacan la eliminación de sodio por su efecto negativo sobre la plasticidad en caliente y el contenido de hidrógeno limitado a valores mínimos si se quiere evitar daños irreparables por porosidad del metal.

La refusión de recortes, chatarras e incluso lingotes de aluminio que por distintas

circunstancias hayan estado sometidas a la acción de la intemperie, significando esto que la película de óxido pueda llegar a alcanzar espesores diez veces o más superiores a un metal de electrólisis colado con las debidas precauciones, es un riesgo difícil de evitar, con lo que el metal base llevará en suspensión una serie de óxidos y gas difícilmente eliminables en el grado necesario (1).

#### 1.2. DIAGRAMA DE BLOQUE

Los diversos pasos que se siguen en la fabricación de tubos colapsibles se muestran a continuación en diagrama de la figura 1.

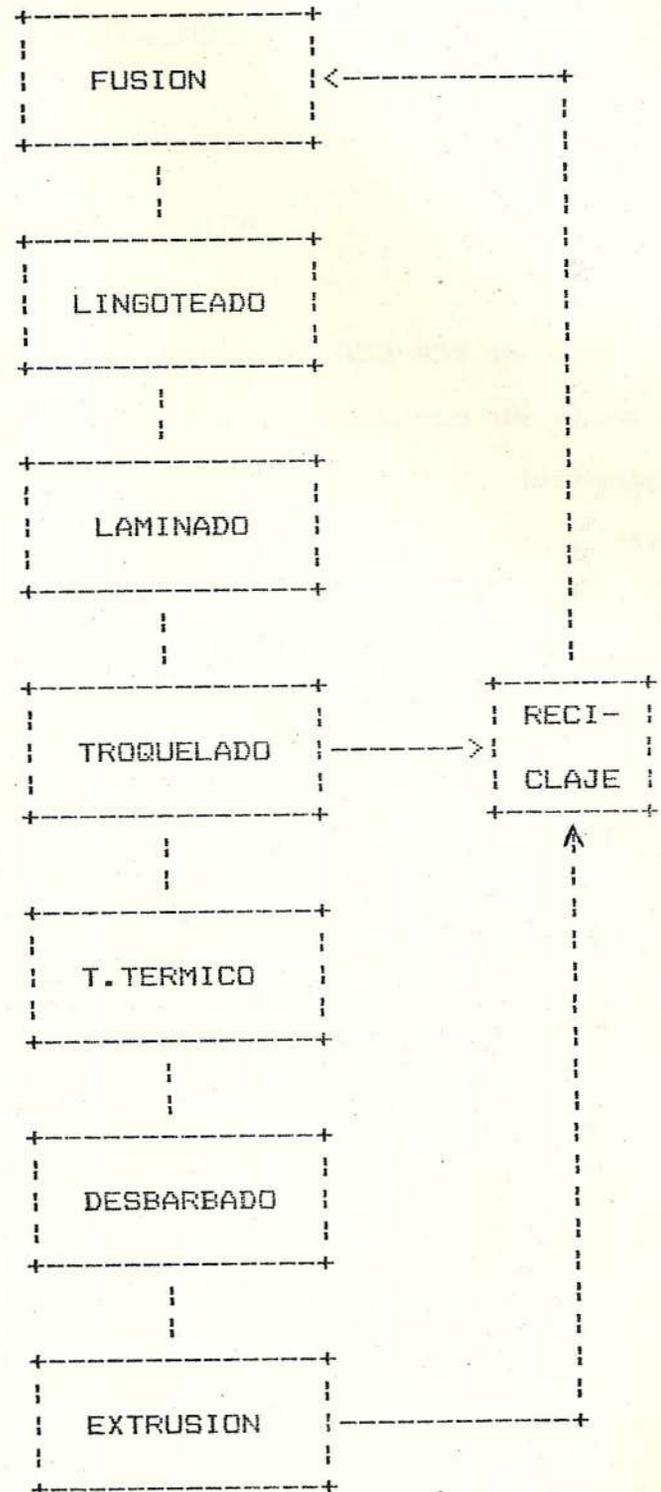


FIG 1. Proceso de producción de tubos colapsibles.

### 1.3. NORMAS DE CONTROL DEL MATERIAL

#### X 1.3.1. COMPOSICION QUIMICA

La Norma Francesa NF A50 451 de cobertura mundial entre los productores de aluminio, señala para el título 99.7 %, designación 1070 A (A7), la siguiente composición química (2).

Fe	≤	0.25 %
Si	≤	0.20 %
Cu	≤	0.03 %
Mn	≤	0.03 %
Mg	≤	0.03 %
Zn	≤	0.07 %
Ti	≤	0.03 %
Otros	≤	0.03 % c/u; y su suma inferior de 0.15 %
Al	≥	99.70 % min

### 1.3.2. PROPIEDADES MECANICAS

De la misma manera, las Normas Francesas señalan para este aluminio las siguientes propiedades mecánicas (3).

ESTADO	Resistencia Rotura (Kg/mm)	Alargamiento %	Dureza BHN
Laminado y recocido	9 max	35	15
Semiduro	10.5	7	30
Duro	13	5	40

TABLA 1 Propiedades Mecánicas del aluminio de título 99.7 %

## C A P I T U L O   I I

### ESTUDIO DEL PROCESO

#### 2.1. FUSION

El tipo y la disposición de los hornos de fusión constituyen factores particularmente importantes en lo que concierne a la calidad y el costo de fabricación de los semiproductores fundidos, destinados a la transformación.

Entre los principales hornos usados en la fusión del aluminio están:

a) Hornos de Crisol.- Estos hornos varían considerablemente en tamaño y capacidad, desde los hornos de laboratorio que funden unos cuantos kilogramos del metal a las unidades industriales hasta de una tonelada. Los crisoles mas pequeños se calientan generalmente en hornos estacionarios colocados en fosos, de los cuales se extraen para vaciar, mientras que los crisoles mayores

generalmente se construyen en una cámara de horno inclinable, basculando la unidad completa para vaciar la carga.

b) Hornos de Reverbero.- Son también muy diversos en tamaño y capacidad, fluctuando esta última para las unidades más pequeñas entre 50 Kg y 5 Ton, y las mayores a más de 30 Ton .

Son en su mayoría de forma rectangular. Su cubierta exterior se construye de vigas y planchas de acero, recubiertas con ladrillo refractario de buena calidad.

Estos hornos pueden ser calentados por combustible o por resistencias eléctricas; siendo en los primeros la convección y en los últimos la radiación debida al efecto Joule, las formas de transferencia de la energía calorífica para lograr la fusión del metal.

El rendimiento térmico de los hornos calentados por combustible no sobrepasa del 25 % , mientras que para los eléctricos de resistencias va del 50 % al 70 % ; sin embargo los primeros resultan relativamente más económicos que los otros debido

a que el precio de los combustibles que utilizan son más baratos que la energía eléctrica.

La mayor parte de los hornos de este tipo empleados en la industria son basculantes.

c) Hornos de Inducción.- Estos hornos pueden ser del tipo de alta o baja frecuencia. Ambos tipos ofrecen el método más limpio químicamente para fundir metales, ya que no puede haber contaminación de una fuente externa. Sus capacidades varían entre unos cuantos kilogramos y varias toneladas. La eficiencia térmica es alta, debido a que el calor se genera dentro de la misma carga.

El principal inconveniente que presentan estos hornos radica en que sus costos de instalación y mantenimiento son muy elevados (4).

En el proceso que se estudia, el horno utilizado para fundir el metal es un horno de reverbero de tipo basculante alrededor de un eje que pasa a través del pico vertedor, tal como se muestra en a figura 2 .

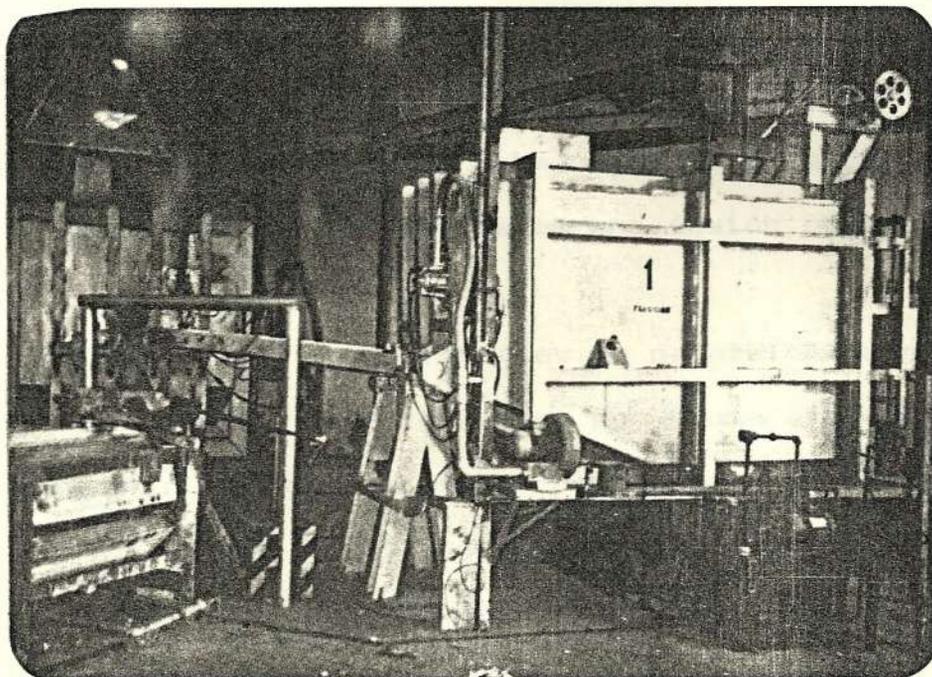


FIG 2. Horno de reverbero utilizado  
en la fusión del alumninio.

La capacidad de carga de este horno es de 1600 Kg aproximadamente, la cual se introduce generalmente en forma de lingotes virgenes y esqueletos de láminas troqueladas. En ocasiones, un porcentaje mínimo de la carga corresponde a bultos bien compactados de material extruido, que por alguna falla ha sido desechado y son aprovechados nuevamente en una fusión posterior.

Este horno cuya forma es de paralelepípedo, está construido exteriormente por vigas y planchas de acero e interiormente recubierto por un colchón refractario cuyo espesor total alcanza 250 mm pulgadas aproximadamente.

Las dimensiones del hogar son las siguientes:

Ancho : 1080 mm

Largo : 2200 mm (con una inclinación de 20° del medio hacia adelante)

Alto : 1200 mm

Consta además de una compuerta de carga y otra de tiro localizadas en una de las paredes más pequeñas y el techo del horno respectivamente.

Este horno utiliza kerosene como combustible, puesto que existe mayor facilidad para conseguirlo en el mercado y su costo es relativamente inferior a los otros.

Utiliza un sólo quemador localizado en una de las paredes más pequeñas del horno, un poco más arriba y hacia la derecha del vertedor con una inclinación de  $6.8^{\circ}$  con la horizontal para evitar el contacto directo de la llama con el metal.

La cantidad de combustible utilizada por este horno puede estimarse fácilmente si se conocen el número de boquilla y la presión de combustible empleada, recurriendo a los datos de la tabla 2 .

Con el motivo de incrementar la capacidad de fusión y la continuidad de producción, así como también brindar un mantenimiento adecuado, en la actualidad se ha puesto en funcionamiento otro horno del mismo tipo y características que el descrito anteriormente y dispuesto junto a éste, tal como se muestra en la figura 3 .

No. BOQUILLA (gph)	P R E S I D N ( Kg/cm <sup>2</sup> )						
	7	8	9	10	11	12	13
	CONSUMO (lt/hr)						
3,0	11,3	12,1	12,8	13,5	14,2	14,8	15,4
4,0	15,1	16,2	17,1	18,0	18,9	19,8	20,6
4,5	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,2
5,0	18,9	20,2	21,4	22,6	23,7	24,7	25,7
5,5	20,8	22,2	23,6	24,9	26,1	27,2	28,3
6,0	22,7	24,3	25,7	27,1	28,4	29,7	30,9
6,5	24,6	26,3	27,9	29,4	30,8	32,2	33,5
7,0	26,5	28,3	30,0	31,6	33,2	34,6	36,1
8,0	30,3	32,4	34,3	36,2	38,0	39,6	41,2
9,0	34,0	36,4	38,6	40,6	42,6	44,5	46,4
10,0	37,8	40,4	42,8	45,2	47,4	49,5	51,5

TABLA 2 Consumo Teórico de las boquillas  
atomizadoras



POLITECNICA DEL LUGO  
BIBLIOTECA  
R.I.V.L.C.R.

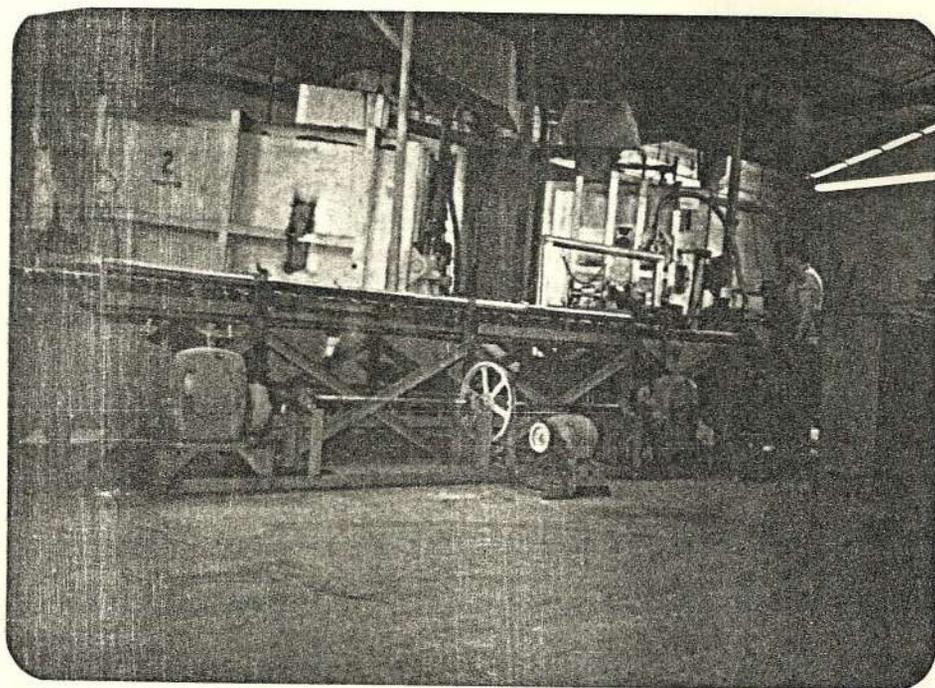


FIG 3 Disposición de los hornos  
de fusión

Entre los principales controles con que cuentan estos hornos podemos mencionar: El detector de llama, medidor de temperatura por termocupla, manómetros, etc.

## 2.2. COLADO

Los semiproductos de fundición destinados a la transformación se presentan generalmente en forma de PLACAS de sección rectangular y de TOCHOS de sección cuadrada o redonda.

Algunos metales y aleaciones no ferrosos, se vacían en moldes de hierro fundido abierto para producir planchas que más tarde se laminarán. El vaciado abierto de este tipo es particularmente adecuado para metales puros o aleaciones que tienen un rango de solidificación corta y, consecuentemente, tienden a formar rechupe si se vacían en un molde vertical. Además es más barato producir un molde abierto horizontal y es más rápido de operar.

También son utilizados, el tipo vertical de moldes de hierro fundido, efectuando el vaciado

desde arriba a la cavidad del lingote a través de una especie de embudo llamado "boquilla". Su función es no solamente dirigir el chorro del metal verticalmente al molde, de manera que no salpique los costados verticales, sino también, regular la rapidez con que entra el metal al molde, de manera que la solidificación prácticamente tenga el mismo régimen que la entrada del metal al molde. El metal fundido puede así llenar el rechupe que tiende a formarse y este proceso de alimentación limita los efectos del mismo. En todos los tipos de lingoteras de hierro fundido, el volumen de hierro es generalmente más del doble del espacio del lingote, para obtener un enfriamiento uniformemente rápido y consecuentemente, un grano uniformemente fino en el lingote resultante.

La principal desventaja de emplear hierro fundido como material de lingotera, es la tendencia que tiene a rajarse durante el servicio. El proceso repetido de calentamiento y enfriamiento, causa la formación de grietas en la superficie del molde, debido a la baja ductilidad del hierro. Al final, estas grietas se abren al ocurrir el

crecimiento grafitico y, en consecuencia, debe descartarse el molde.

Para obviar este inconveniente se emplean lingoteras cuyas paredes están constituidas por paneles metálicos desmontables, de cobre o acero, refrigeradas por circulación de agua, con las que se logran velocidades de refrigeración regulares y elevadas. La superficie de cobre o acero no se deteriora como la hierro fundido, de manera que se puede esperar un producto con una buena superficie.

Sin embargo, estas últimas también presentan grandes inconvenientes de orden técnico y económico debido a su pequeña producción unitaria y, velocidad de enfriamiento limitada por la capa de aire, mala conductora del calor, que se forma al principio de la contracción del metal y que lo aísla de las paredes de la lingotera (5).

En el proceso que se estudia, el moldeador es de tipo horizontal de orugas, tal como se muestra en la figura 4. La longitud del circuito es de 16 m aproximadamente; sobre éste van empernadas

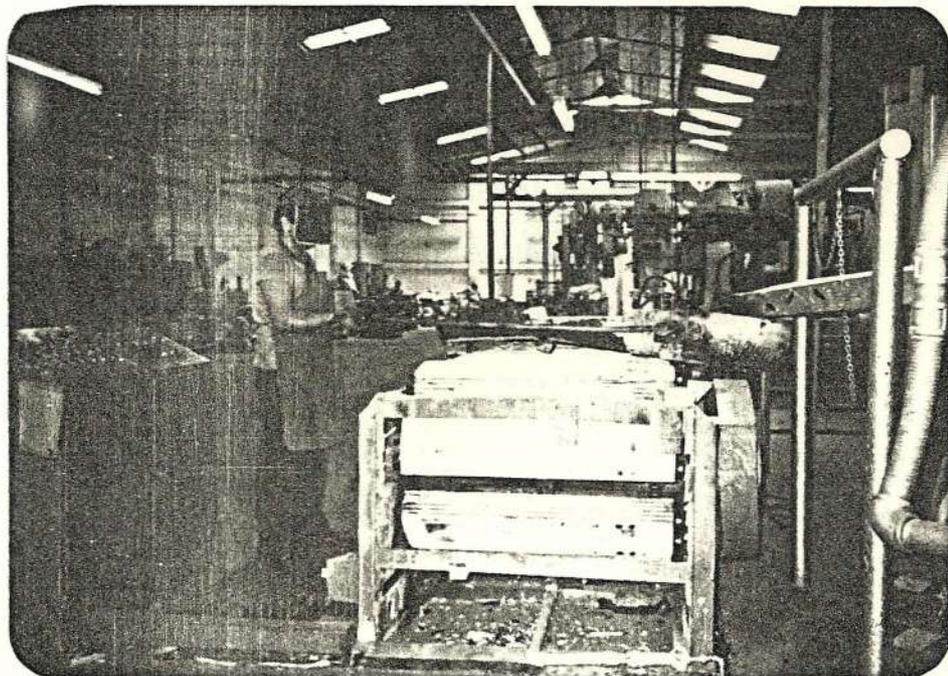


FIG 4 Moldeador de tipo horizontal  
utilizado en el colado de  
placas o lingotes.

52 lingoteras abiertas de hierro fundido de forma rectangular con aletas de refrigeración. Un motor de 3 hp conectado a dos cajas reductoras transmite el movimiento al sistema por medio de ejes, piñones y cadenas.

Para evitar el choque térmico entre el metal y las lingoteras, este moldeador consta de un dispositivo de precalentamiento de las lingoteras con gas propano. Además éstas se recubren con pinturas refractarias que aíslan al lingote de posibles contaminaciones y permite su fácil desprendimiento, por gravedad, sobre la banda de descarga. Este proceso de lingoteado, como se indicó anteriormente, es muy bueno cuando se trata de metales puros.

Como una desventaja de este sistema de lingoteado podemos citar la presencia del pequeño rechupe que se forma en la cara superior del lingote, lo cual constituye un inconveniente que hay que controlar por los efectos que podría traer durante la laminación.

Por otro lado, tal vez la ventaja más importante

de este sistema es que permite aprovechar la temperatura que poseen los lingotes recientemente solidificados para realizar su laminación "en caliente" con las consecuentes ventajas que ello significa.

## 2.3. TRATAMIENTO TERMOMECANICO

### 2.3.1. LAMINACION

En el sentido estricto, el término "laminación en caliente", debería aplicarse únicamente a la laminación de una placa con una temperatura tal que la recristalización se produjese de manera continua durante el proceso de laminación, de tal forma que, al final de la operación, el material quedase completamente recocido.

En la práctica, en el caso del aluminio y sus aleaciones, la laminación en caliente se efectúa hasta un espesor en que la temperatura del metal es inferior a la



temperatura de recristalización del mismo (6).

Además de la producción de perfiles útiles el objeto del laminado es obtener una estructura metalúrgicamente satisfactoria de material acabado. Durante el laminado, tiene lugar una redistribución considerable de impurezas y los efectos de segregación que hubiesen estado presentes en el lingote original, se reducen. Al mismo tiempo, se elimina el centrado residual y se tiene como resultado un producto más homogéneo por la acción mezcladora del laminado. Además siempre existe una reducción considerable de tamaño de grano del material acabado, comparado con el lingote original.

El laminado en caliente casi siempre se usa en el formado inicial o rompimiento de los lingotes vaciados, ya que a temperaturas elevadas la maleabilidad es generalmente alta, permitiendo la deformación de los metales con relativa

facilidad.

El laminado en frío, en cambio, se aplica solamente a metales de aleaciones muy maleables. Sin embargo, con frecuencia se usa como proceso de acabado para obtener dureza, resistencia o un buen acabado de superficie. Durante el laminado en frío, los cristales se distorsionan de la forma original de vaciado al ocurrir el deslizamiento mecánico convirtiéndose en endurecidos por trabajo, durante el proceso. La capacidad de trabajo en frío posterior, debe ser entonces restaurada con un proceso de recocido, de manera que dé un tamaño de grano conmensurado con las propiedades mecánicas óptimas (7).

En el proceso que se estudia, la laminación se realiza sobre las placas recientemente solidificadas utilizando dos laminadores dúo colocados en serie. Los cilindros de estos laminadores son de acero forjado endurecidos superficialmente por un proceso de cementación.

Un primer laminador desbastador conduce la placa o lingote desde un espesor de 25 mm a 36 mm hasta  $11 \pm 0,1$  mm aproximadamente.

Al final de la mesa de salida de este primer laminador, un segundo laminador toma los desbastes de salida del primer laminador y los conduce hasta un espesor final de  $4.8 \pm 0.05$  mm .

La temperatura a la que se realiza el primer paso de laminación es de unos  $375^{\circ}\text{C}$ , pasando el lingote de una longitud inicial de 900 mm a 2150 mm aproximadamente; mientras que, a la entrada del segundo laminador la placa ingresa a unos  $335^{\circ}\text{C}$  , alcanzando luego de este paso una longitud final de 4600 mm aproximadamente.

Por un circuito cerrado de irrigación e incidiendo directamente sobre los cilindros laminadores, un determinado flujo de fluido refrigerante es utilizado como medio de enfriamiento de este

proceso.

En las figuras 5 y 6, se muestran un esquema de la instalación y uno de los laminadores dúos empleados en el proceso respectivamente.

### 2.3.2. TROQUELADO

El procedimiento de troquelado a prensa es interesante para las grandes cadencias de corte, lo cual permite alcanzar de 15 a 120 cortes por minuto según las dimensiones de los productos cortados.

Según las durezas y las dimensiones de los productos troquelados, la potencia de las prensas utilizadas varía de 10 a 250 toneladas. Los productos a troquelar pueden estar en bobinas para los espesores inferiores a 3 mm, o en placas para todos los espesores (8).

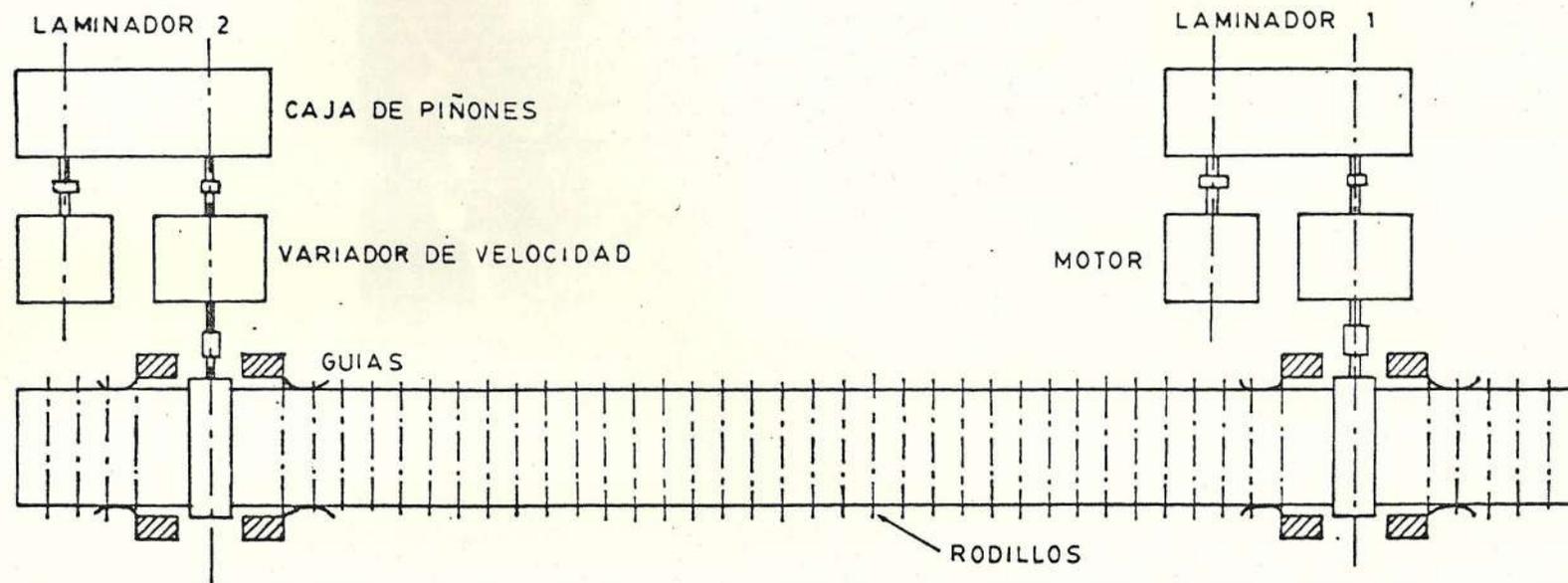


FIG. 5 ESQUEMA DE LA INSTALACION DEL TREN DE LAMINACION

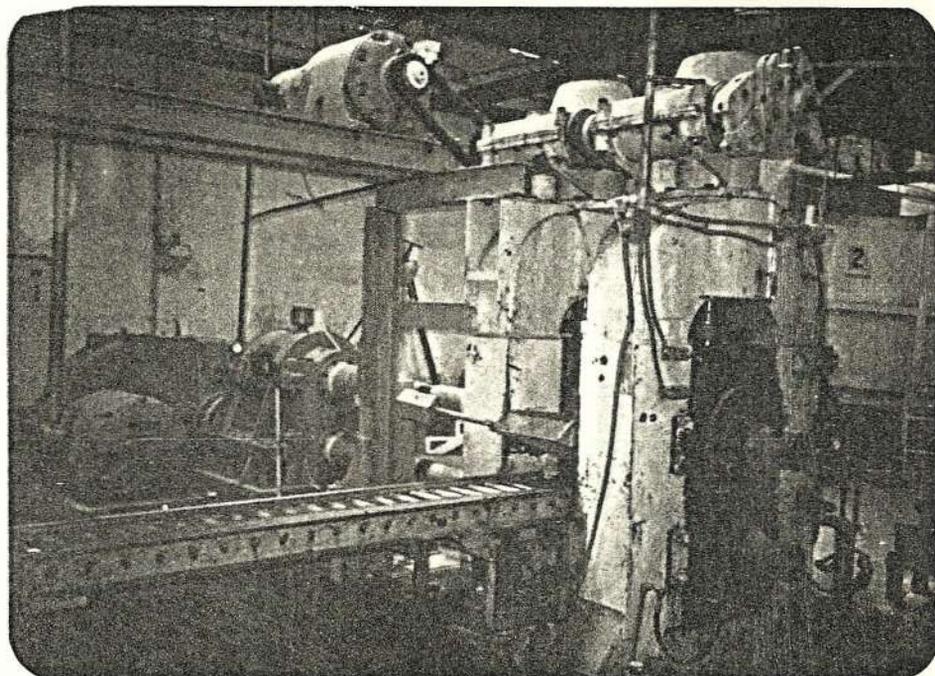


FIG 6 Laminador dúo empleado  
en el proceso.

En el proceso que se estudia, las prensas utilizadas para el corte son del tipo de bastidor con una potencia de 100 a 120 Ton aproximadamente.

Según el diámetro de los discos a cortar, los troqueles empleados tienen de 3 a 9 punzones, alcanzando frecuencias de corte de 100 a 120 golpes por minuto.

Para facilitar el corte del producto se emplea como lubricante una mezcla de kerosene con aceite; el mismo que deberá ser eliminado completamente en el proceso de recocido posterior.

En la figura 7 se muestra una de las prensas utilizadas en este proceso para el corte de los discos.

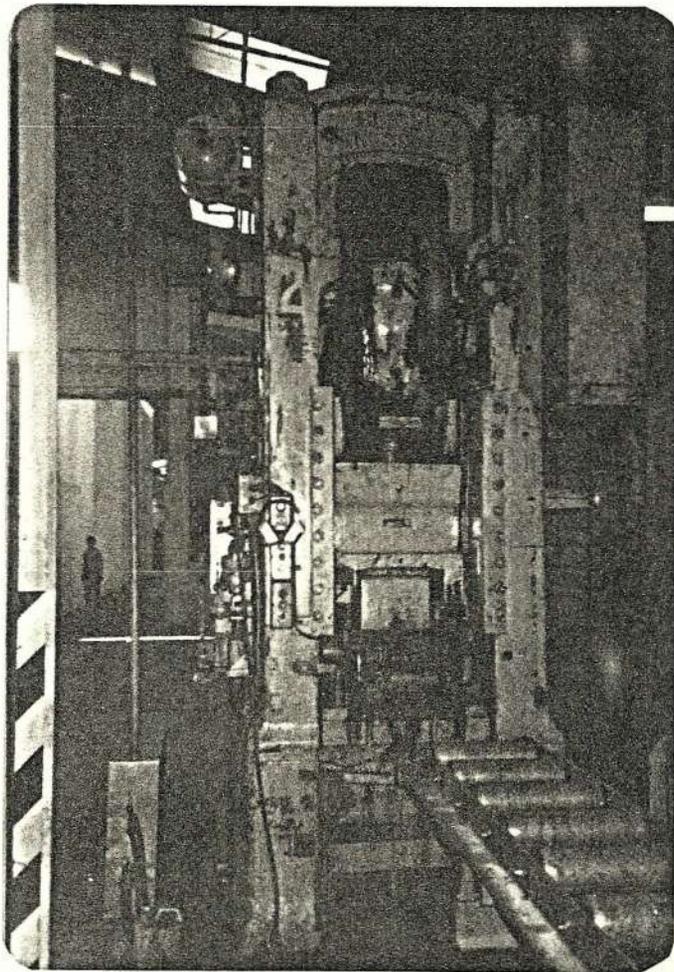


FIG 7 Prensa de corte utilizada  
en el proceso.

### 2.3.3. TRATAMIENTO TERMICO

#### RECOCIDO

Recocer completamente un metal significa que, mediante un calentamiento durante cierto tiempo y a una temperatura definida, se le confiere la plasticidad máxima, disminuyendo su límite elástico lo más posible, de manera que se obtenga la mejor capacidad de deformación. Este estado corresponde a una recristalización completa y el tratamiento se aplica, ya en el curso de la fabricación (recocido intermedio), ya al fin de la fabricación (recocido final); generalmente, el recocido completo se efectúa sobre un metal con acritud, al que se le quiere devolver completamente sus posibilidades de deformación.

Se pueden obtener también recocidos parciales antes de que se produzca una clara recristalización, fijando esta

última en un cierto grado o nivel, elegido en función de diferentes características particulares de la máxima plasticidad.

Observando simplemente las variaciones que se producen en las características mecánicas, a partir de un estado de acritud en función de la permanencia a temperatura ordinaria y la elevación de la temperatura, se pueden comprobar las cinco fases siguientes:

Distensión espontánea.- A partir del fin de la deformación en frío, cuando la acritud ha sido suficientemente importante, un metal recién laminado, estirado o trefilado, ve que los valores del límite elástico y de las carga de rotura disminuyen espontáneamente a temperatura ordinaria (1 a 15 días, según los metales). Si no se eleva la temperatura de manera notable, los valores de estas características llegan a ser prácticamente definitivos y, salvo en casos particulares, como en la

recristalización espontánea del aluminio refinado, la evolución se debe a una mejora del reparto de tensiones, sin que se pueda observar el menor cambio estructural.

A veces, un simple descanso de varias horas permite dar una nueva deformación o realizar un mecanizado sobre un metal que ha llegado al límite de sus posibilidades plásticas.

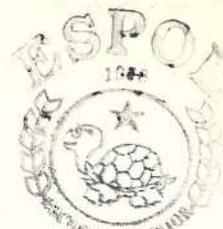
Recuperación o restauración. - Por encima de los 20 °C la distensión es tanto más importante a medida que la temperatura se eleva; las macrotensiones, desaparecen sin que la estructura sufra modificación. E, R y E/R disminuyen al mismo tiempo que el porcentaje de alargamiento (A%) aumenta. Se conserva sensiblemente el motivo de orientación del estado con acritud, porque el perfeccionamiento no se produce más que a nivel de los subgranos agrupados. El ablandamiento es, por tanto, más completo a medida que se eleva la temperatura o que

la duración del tratamiento se prolongue a una temperatura determinada. A partir de una cierta temperatura, el ablandamiento parcial, muy rápido durante los primeros segundos, continúa lentamente a esta temperatura.

En esta segunda etapa, se comprueba una tendencia de los subgranos del estado con acritud a crecer ligeramente a medida que la temperatura y el tiempo aumentan.

Recristalización primaria.- Por encima de un cierto valor de la acritud y de una cierta temperatura, llamada temperatura de recristalización, hay una visible aparición de nuevos cristales con orientaciones a veces muy diferentes de las que motiva la acritud y que se desarrollan a través de ellos.

Si el recocido se prolonga o si la temperatura se eleva, estos granos, pequeños en su aparición, crecen rápidamente hasta llegar al contacto de



otros granos modificados paralelamente; después, algunos granos tienen tendencia a crecer lentamente en detrimento de sus vecinos. A esta etapa de evolución en el recocido se le denomina recristalización primaria.

Recristalización secundaria.- Cuando, para acritudes elevadas (laminado, trefilado) la temperatura supera ciertos límites, se produce la aparición de una nueva recristalización caracterizada por el crecimiento exagerado de algunos granos, crecimiento que invade el origen de la recristalización primaria y se traduce finalmente en una hipertrofia granular generalizada y confusa. Esta nueva etapa en la recristalización es la recristalización secundaria. Este fenómeno se produce fácilmente en el caso del aluminio de pureza corriente, y es muy raro en sus aleaciones.

Quemado.- Por encima de las temperaturas de recristalización indicadas para cada

metal o aleación, se llega a las zonas de quemado, lo que puede entrañar la destrucción total de sus propiedades. Si el grado de calentamiento es suficientemente pequeño, es posible a veces, "recuperar" las propiedades por una nueva deformación en frío del metal, cuando su capacidad de deformación no ha disminuido sensiblemente (9)

#### RECOCIDO DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

La temperatura de recristalización del aluminio puro desciende al aumentar la cantidad de trabajo en frío previo. Aumenta con la presencia de impurezas y con los constituyentes de aleación presentes, en el caso de las aleaciones. Sin embargo, para que la recristalización pueda proceder con rapidez, es necesario que se exceda la temperatura de recristalización. En consecuencia, aun cuando esta temperatura para el aluminio comercialmente puro se encuentra sólo en al región de 150 °C , en la práctica

industrial se usan comúnmente temperaturas entre 340 °C y 420 °C , para recocer el aluminio y sus aleaciones, trabajadas en frío. Para volatilizar el aceite del proceso de la superficie, son necesarias con frecuencia temperaturas aun más altas.

Para asegurar la formación de la estructura deseada de grano fino en el material sujeto a recocido, es necesario un control preciso de aquellos factores que determinan el crecimiento de un grano grande. El crecimiento del grano se ve auxiliado por el uso de altas temperaturas y largos periodos de tratamiento; por tanto deben mantenerse al mínimo tanto la temperatura como el tiempo de tratamiento, con tal que se logre la penetración completa del calor a toda la carga del horno.

La rapidez de calentamiento a través de la temperatura de recristalización debe ser tan rápida como sea posible, ya que también esto conduce a la producción de un

grano fino. Un ritmo lento de calentamiento en esta región, tiende a inhibir la formación de núcleos y en consecuencia producir granos grandes. Por esto, los controles del horno deben ajustarse a una temperatura más alta de la que debe alcanzar la carga para producir un calentamiento rápido en las etapas iniciales (10).

La influencia de los factores de fabricación es fundamental sobre la dimensión del grano; son factores muy importantes el porcentaje de acritud, el tamaño de grano anterior a ésta, la temperatura de recocido; pero la manera como se producen las deformaciones, el procedimiento de recocido, etc., tienen también una importancia a veces muy notable.

En ausencia de elementos retardadores o inhibidores parciales del crecimiento de grano, la relación que existe entre el tamaño de grano, la acritud y la

temperatura de recocido, se puede presentar mediante un diagrama cuya superficie característica tiene la forma general de la figura 8 y comprende:

- una zona de crecimiento de grano para débiles acritudes (acritudes críticas);
- una zona de recristalización fina para acritudes medias, o zona de recristalización primaria;
- una zona de recristalización de grandes cristales, llamada zona de recristalización secundaria, que corresponde a las acritudes y temperaturas de recocido elevadas (11).

En el proceso que se estudia, el tratamiento de recocido se lleva a cabo en dos hornos eléctricos de forma paralelepípeda; cinco de sus paredes son fijas y una móvil que se desplaza verticalmente haciendo las veces de compuerta de carga y descarga.

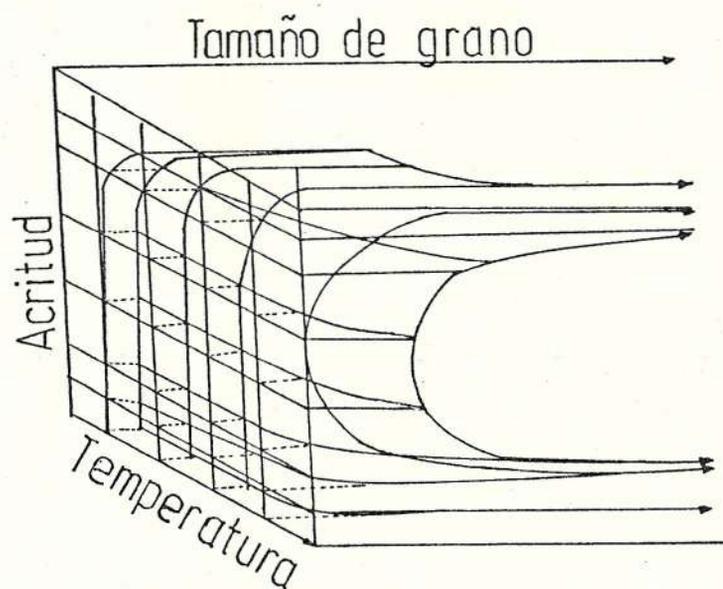


FIG 8 Diagrama de crecimiento  
de grano en el recocido

La carga a recocer es depositada en canastillas de acero y éstas a su vez en un armazón más grande construido también en ángulos y vigas de acero que es el que se introduce dentro del horno. Mientras en el horno más pequeño la carga se introduce con la ayuda de un montacarga, el más grande está acondicionado de un sistema de carga con rieles de soporte, tal como se muestra en la figura 9 .

El control de la temperatura en estos hornos se efectúa por medio de pirómetros, los cuales a más de medir la temperatura en distintos puntos del horno, mantienen la temperatura de recocido seleccionada.

La producción estimada de estos hornos trabajando en conjunto es de 1300 Kg a 1500 Kg por cada 8 horas de funcionamiento. Este lapso incluye, por supuesto, además del tiempo necesario para que se produzca la recristalización, el necesario para que toda la carga alcance dicha temperatura (temperatura de

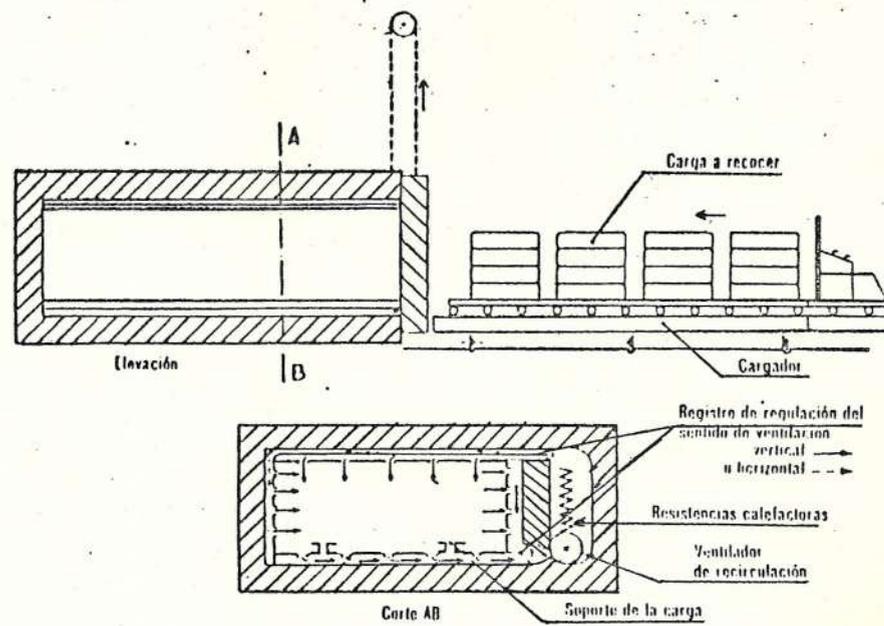


FIG 9 Esquema de un horno fijo  
de recocido

recristalización del material).

Las propiedades que deberán alcanzarse al final del tratamiento de recocido sobre el aluminio de calidad A-7 (99.7 % de pureza) empleado en la producción de los discos en mención son las siguientes:

- Dureza: entre 17 y 20 BHN
- Tamaño de grano: menor a 100 micras

#### 2.3.4. DESBARBADO

El desbarbado en tambor rotativo de los discos de aluminio, es el proceso posterior al recocido mediante el cual se consigue el arranque de virutas o pelusilla provenientes de defectos en el corte a prensa.

Otro de los objetivos, tal vez el más importante del desbarbado, es el proporcionar una superficie rugosa a los discos, facilitando de esta manera el



POLITECNICA DE  
MEXICO  
BIBLIOTECA

depósito del lubricante (generalmente en polvo) aplicado antes de la extrusión uniformemente sobre sus caras.

En el proceso que se estudia, el desbarbado se efectúa en tres tambores rotativos con una capacidad de carga de 65 Kg de discos cada uno; la velocidad a la que giran estos tambores es de 280 vueltas por minuto, llevandose a cabo la operación completa en un tiempo de 10 minutos.

En la figura 10 se muestra uno de los desbarbadores utilizados en este proceso.

#### 2.4. CONTROL EN EL CURSO DE FABRICACION

En el transcurso de este capítulo se han expuesto los diversos procesos que se llevan a cabo en la fabricación de los discos de aluminio para extrusión.

Todos estos, al igual que cualquier proceso metalúrgico se llevan a cabo bajo un control de

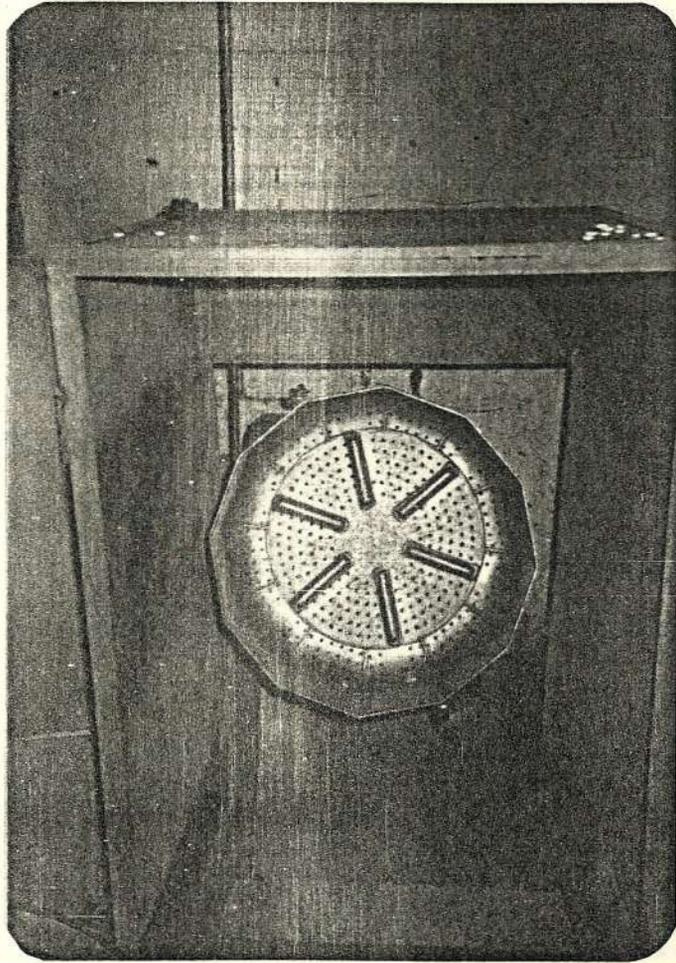


FIG 10 Desbarbador empleado en el  
proceso (tambor rotativo)

calidad, el mismo que se efectúa en los diversos pasos de la fabricación.

Así, en la fusión se debe controlar la composición química del baño fundido y el contenido de gas mediante el empleo de métodos de depuración y extracción de hidrógeno ( $H_2$ ) que puede ser la causa de numerosos defectos metalúrgicos (en particular porosidades y sopladuras) y debe mantenerse por esta razón, dentro del valor más pequeño posible.

Durante el colado se inspecciona por lo menos visualmente la calidad de superficie del lingote antes de ser laminado y la estructura de los mismos mediante análisis metalográfico.

Durante el laminado se controla el espesor de las placas después de la laminación y por metalografía se verifica el grado de deformación de la estructura.

Finalmente, sobre cada lote de producto terminado se controla nuevamente la composición química del metal y se verifica si éste cumple con las

características físicas, estructurales y mecánicas establecidas por las normas. En esta parte el proceso de recocido que se efectúe juega un papel muy importante.

El capítulo siguiente trata justamente de poner en práctica todo lo sugerido en esta sección, haciendo uso de los equipos más idóneos de que se dispone en el laboratorio.



## C A P I T U L O   I I I

### TRABAJO EXPERIMENTAL

El propósito de este capítulo es el de establecer un método de control de proceso destinado a la fabricación de discos de extrusión.

Los métodos, procedimientos o normas de control consideradas en los análisis se presentan, -para facilidad del usuario- conservando la misma secuencia de fabricación.

Además, al final de cada procedimiento de análisis descrito, se presentan los resultados de la aplicación de estos métodos sobre varias muestras extraídas del proceso real de fabricación, los mismos que serán discutidos posteriormente al final de este trabajo.

La preparación de probetas, análisis y evaluación de propiedades, se efectuaron en su totalidad en equipos de laboratorio; en tal virtud, los resultados obtenidos

podrían no ser directamente aplicados, sino mas bien servir de guía en la práctica.

### 3.1. METAL\_BASE

El primer paso en el control metalúrgico del aluminio consiste en verificar si el metal importado ( aluminio virgen ) cumple con las normas de calidad exigidas. Para determinar las propiedades del metal base, se realizaron los siguientes análisis:

#### 3.1.1. ANALISIS\_QUIMICO

Existen diversos métodos para determinar la composición química del aluminio, tales como el Fluorométrico, Fotométrico, Gravimétrico, Absorción Atómica, Colorimétrico, etc., los mismos que son descritos con detalle por las Normas ASTM, designación E-34. Sin embargo, por ser uno de los más modernos y exáctos, se ha seleccionado el de Absorción Atómica, el mismo que permite obtener con precisión

porcentajes muy bajos (trazas) de impurezas tales como las que se espera encontrar presentes en un aluminio de alta calidad como lo es el 1070.

El procedimiento seguido para la determinación del análisis químico mediante este método es el siguiente:

- 1) Se pesa la muestra (1 g exacto) en forma de virutas limpias, sin restos de grasa obtenidas utilizando la cuchilla de una máquina herramienta o broca.
- 2) En un vaso pequeño se diluye la muestra en una solución de HCl + H<sub>2</sub>O (20 ml + 20 ml) de cada uno y para acelerar la dilución se coloca el vaso sobre una hornilla eléctrica a baja temperatura.
- 3) Una vez que las virutas se han disuelto completamente y la solución es lo suficientemente cristalina, se la filtra y se recoge ésta en un matrás.

- 4) Adicionando agua destilada, se lleva la solución hasta un volumen de 100 ml exactamente.
- 5) Utilizando la lámpara y longitud de onda adecuada para cada elemento a analizar, se realiza la calibración del espectrómetro de absorción atómica utilizando los estándares preparados, y;
- 6) Finalmente, se lee la absorptividad de los estándares y de las muestras y se calcula su presencia en porcentaje.

El equipo utilizado para la determinación de la composición química por este método fué el siguiente:

- vasos
- matraces
- embudos
- papel filtro
- hornilla eléctrica
- balanza digital de precisión
- espectróscopio de absorción atómica

(fig 11)



FIG 11 Espectroscopio de absorción  
Atómica

Los resultados del análisis de la composición química de la muestra 1 correspondiente al metal base se muestran en la tabla 3 .

ELEMENTO	MUESTRA 1
Si	0.011 %
Fe	0.077 %
Cu	0.0018 %
Zn	0.004 %
Mg	0.0024 %
Mn	0.00096 %
Ca	0.0082 %
Otros	0.01 %
Al	99.88 %

TABLA 3 Composición química de  
la Muestra 1

### 3.1.2. PROPIEDADES MECANICAS

Para la evaluación de las propiedades mecánicas del aluminio se emplea la norma

ASTM, designación E-8 para ensayos de tensión de materiales metálicos, la misma que sugiere una probeta de sección redonda tal como se muestra en la figura 12 .

Los resultados obtenidos de los ensayos de las propiedades mecánicas del metal base se muestran en la tabla 4 .

Probeta No.	Resistencia Tracción (Kg/mm <sup>2</sup> )	Resistencia Rotura (Kg/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento %	Dureza (BHN)
1	5.06	2.40	49.04	18.2
2	5.10	3.13	41.72	18.2
3	4.41	1.65	48.76	18.2

TABLA 4 Propiedades Mecánicas del metal base

Así mismo, el equipo utilizado para los ensayos de tensión del metal base fue el siguiente:

- regla graduada, calibrador
- máquina para ensayos de tensión (figura 13).

ASTM  
Ensayos de tensión para  
Materiales metálicos  
E8

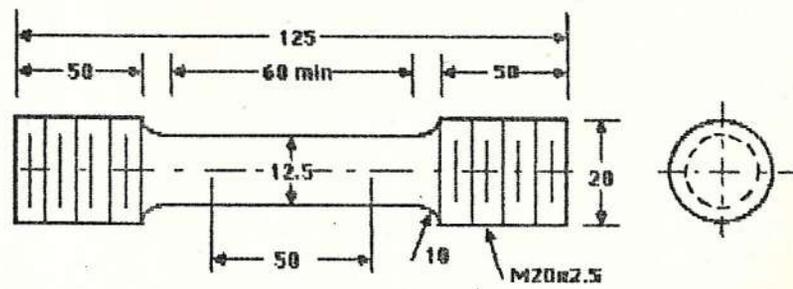


FIG 12 Probeta de sección redonda  
para ensayos de tensión

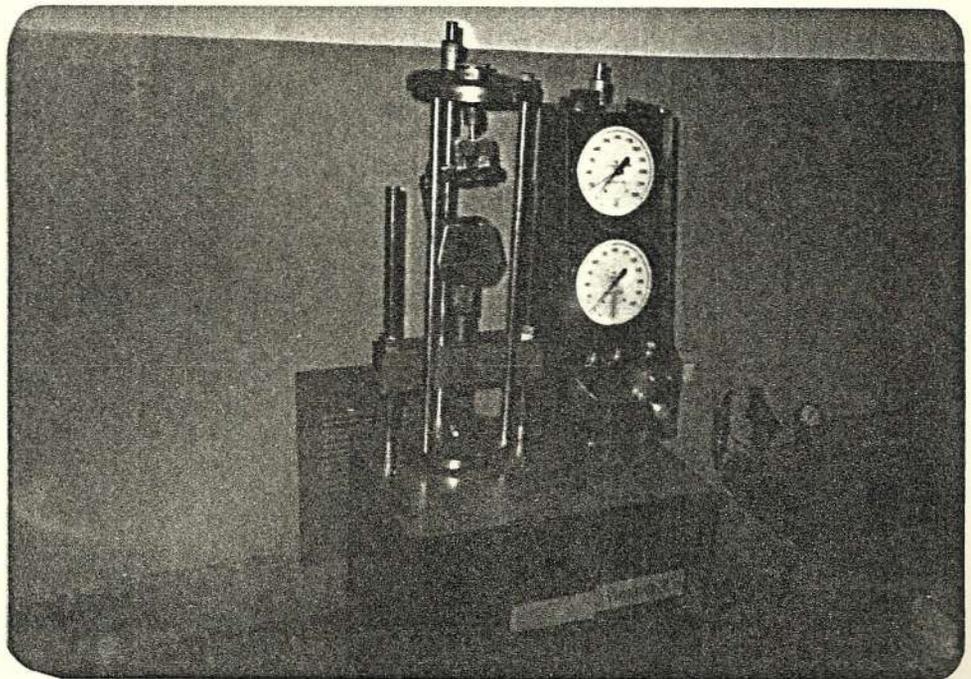


FIG 13 Máquina para ensayos  
de Tensión.

### 3.2. PROCESO

#### 3.2.1. ANALISIS QUIMICO DEL METAL FUNDIDO

En la práctica general de fusión de este proceso particular existen diversidad de cargas destinadas a la fusión, pudiendo ir éstas desde la fusión de 100 % lingotes virgenes, hasta 100 % producto reciclado o una combinación de ambos; siendo esta última la más comúnmente utilizada por los fundidores.

Para nuestros propósitos se analizarán justamente las condiciones extremas; la primera, de metal fundido correspondiente a una carga de 100 % aluminio virgen y la segunda, cuya constitución proviene en su totalidad de material procesado anteriormente en forma de esqueletos de láminas.

El proceso de preparación de las muestras y el método de análisis utilizado es el

mismo que se detalló en la sección 3.1.1.

Los resultados de los análisis químicos de las muestras 2 y 3 tomadas del baño de metal fundido se muestran en la tabla 5.

ELEMENTO	MUESTRA 2	MUESTRA 3
Si	0.009 %	0.0009 %
Fe	0.100 %	0.127 %
Cu	0.0016 %	0.0029 %
Zn	0.011 %	0.005 %
Mg	0.0036 %	0.024 %
Mn	0.001 %	0.001 %
Ca	0.013 %	0.007 %
Otros	0.013 %	0.014 %
Al	99.85 %	99.80 %

TABLA 5 Composición química  
de las muestras 2 y 3



### 3.2.2. CALIDAD DE SUPERFICIE Y ESTRUCTURA DEL LINGOTE COLADO

En el proceso de colado en lingoteras abiertas horizontales, la manera más sencilla de controlar la calidad de superficie del lingote es mediante el control visual, el mismo que debe ser capaz de asegurar la ausencia de grietas superficiales, natas, sopladuras, rechupes, etc. y desechar aquellos lingotes que presenten dichas fallas.

Por otra parte, para revelar la estructura metalográfica del lingote colado, es necesaria la inspección de la sección transversal de un lingote, tomada preferentemente de la parte central de éste y someter dicha muestra a cualesquiera de los métodos de preparación de probetas metalográficas ya conocidos.

Puesto que el aluminio es un metal "suave", que se raya fácilmente y en consecuencia muy difícil de preparar por

medios mecánicos de pulido, se ha escogido un método más sofisticado e idóneo tal como el pulido electrolítico, del cual se hablará más tarde en la sección 3.3.2.b, explicando su proceso más detalladamente.

Una vez pulida la probeta, se la ataca con un reactivo químico que permita evidenciar la estructura del metal, el cual, al igual que el electrolito de pulido debe seleccionarse previamente.

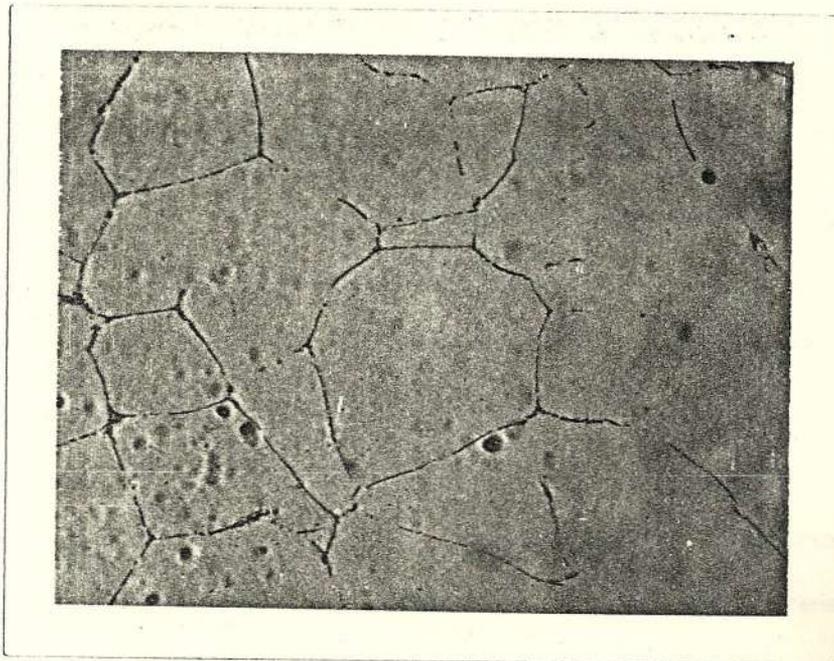
Con tal propósito, a continuación se presentan las tablas mediante las cuales es posible seleccionar el electrolito de pulido y de ataque para el aluminio y sus aleaciones: tablas 6 y 7.

En la figura 14 se muestra la estructura obtenida mediante pulido electrolítico y ataque manual de una probeta extraída de un lingote colado.

Reactivo de ataque	Composición	Observaciones	Utilización
Num. 1. Acido fluorhídrico.....	HF (conc.).....0,5cc H <sub>2</sub> O.....99,5cc	Atacar 15 seg con un algodón blando impregnado.	Uso microscopico general.
Num. 2. Hidróxido sodico.....	A. NaOH.....1g H <sub>2</sub> O.....99cc B. NaOH.....10g H <sub>2</sub> O.....90cc	Atacar 10 seg con algodón impregnado. Inmersión de 5 seg a 170 C; lavar en agua fría.	Uso microscopico general. Puede emplearse tanto para el macro como para el microataque.
Num. 3. Acido sulfúrico.....	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (conc.).....20cc H <sub>2</sub> O.....80cc	Inmersión por 30 seg a 170 C; templar en agua fría.	Diferencia aluminio-cobre-hierro-manganeso de aluminio-hierro-manganeso o aluminio-cobre-manganeso
Num. 3A. Acido sulfúrico.....	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (conc.).....10cc H <sub>2</sub> O.....90cc	Inmersión a 60-70 C.	Fe Al.
Num. 4. Acido nítrico.....	HNO <sub>3</sub> (conc.).....25cc H <sub>2</sub> O.....75cc	Inmersión por 40 seg a 170 C; templar en agua fría.	Diferencia el alfa aluminio-hierro-silicio del Fe Al; microscopico
Num. 5. Reactivo Keller.....	HF (conc.).....1,0cc HCl (conc.).....1,5cc HNO <sub>3</sub> (conc.).....2,5cc H <sub>2</sub> O.....95,0cc	Inmersión por 10-20 seg; lavar en una corriente de agua caliente.	Microestructura de aleaciones tipo duraluminio 17 ST y alclad.
Num. 6. Reactivo Keller concentrado.....	HF (conc.).....10cc HCl (conc.).....15cc HNO <sub>3</sub> (conc.).....25cc H <sub>2</sub> O.....50cc	Se usa concentrado para el macroataque y diluido con agua en la proporción 9 a 1 para el microataque. Se conserva concentrado en frasco de cera.	Excelente reactivo para macro y microataque de aleaciones que contienen cobre.

TABLA 7

Reactivos de ataque para el aluminio y sus aleaciones



HF 5%

X 100

FIG 14 Estructura del lingote colado en molde abierto

### 3.2.3. MEDICION DE ESPESORES Y ESTRUCTURA

#### LAMINACION

Además del aspecto superficial de las placas de laminación, otro parámetro importante que hay que controlar es su espesor. La dimensión del espesor a la salida de cada laminador depende de la distancia a la que se calibran los cilindros laminadores; sin embargo, ésta por algún motivo podría variar y por consiguiente introducir un error en el espesor de laminación que en la mayoría de casos resulta incorregible.

En la práctica común del proceso que se estudia, el control del espesor de las placas de primera y segunda laminación se llevan a cabo mediante el uso de micrómetros. La frecuencia en el control de las mediciones está bajo la responsabilidad del productor,

teniendo mayor cuidado en el control de las placas de segunda laminación, puesto que este espesor será el mismo que el del producto terminado, esto es, los discos de extrusión.

En las figuras 15 y 16 que se exponen a continuación, se da un ejemplo de la forma como se lleva a cabo el control del espesor de una placa de segunda laminación y su estructura correspondiente respectivamente.

### 3.3. PRODUCTO TERMINADO

#### 3.3.1. ANALISIS QUIMICO

Una vez terminado el ciclo de fabricación y alcanzado el producto final que son los discos de aluminio, es necesario analizar nuevamente la composición química del metal, la cual podría haber sido afectada

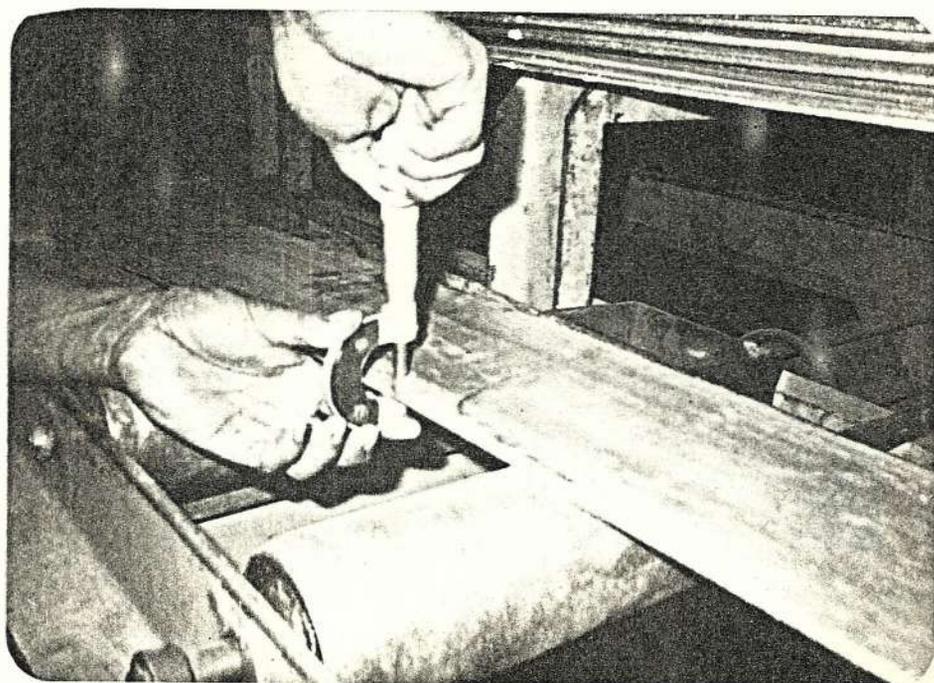
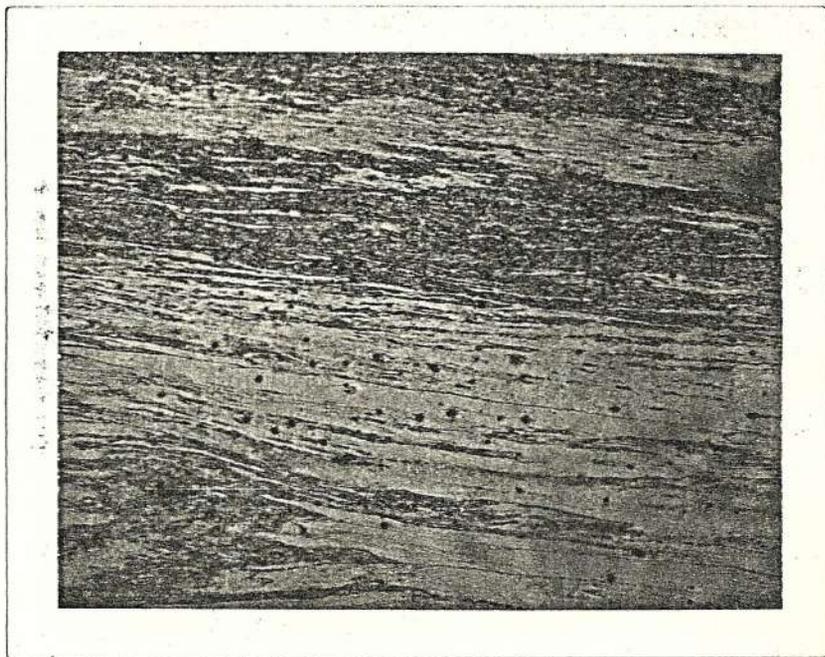


FIG 15 Control de medición del  
espesor de laminación.



HF 5 %

X100

FIG 16 Estructura de una placa  
de aluminio de segunda  
laminación.

durante los procesos intermedios de fabricación tales como la contaminación que pueden introducir los cilindros laminadores, el fluido de refrigeración, o tal vez el lubricante utilizado para facilitar el corte de los discos, etc. .

Con tal finalidad se tomaron dos muestras de material, extraídas de dos lotes de discos de diferentes cargas de fusión, con el propósito de establecer mediante análisis químicos la confiabilidad del proceso en lo que se refiere a la introducción de impurezas nocivas que resten las propiedades que deben cumplir los discos de aluminio para mantener su calidad.

Los resultados de los análisis químicos de las muestras 4 y 5 obtenidas por absorción atómica, correspondientes a los dos lotes de discos analizados fueron los siguientes.

ELEMENTO	MUESTRA 4	MUESTRA 5
Si	0.045 %	0.045 %
Fe	0.116 %	0.130 %
Cu	0.0018 %	0.0029 %
Zn	0.0087 %	0.005 %
Mg	0.0065 %	0.020 %
Mn	0.00065 %	0.001 %
Ca	0.012 %	0.015 %
Otros	0.019 %	0.014 %
Al	99.79 %	99.76 %

TABLA 8 Composición química de  
las muestras 4 y 5

### 3.3.2. PROPIEDADES FISICO-ESTRUCTURALES

En la sección 2.3.3. mencionamos algunas de las principales características que deben reunir los discos de aluminio antes del proceso de extrusión, tales como su dureza y tamaño de grano.

Tales propiedades son el resultado, como se mencionó anteriormente, de los diversos factores de fabricación y en especial del tratamiento térmico de recocido que finalmente se efectúa, el mismo que fija las características deseadas sobre el producto terminado.

Para estudiar las influencias del recocido sobre la dureza y tamaño de grano de los discos, se efectuaron en hornos de laboratorio diversos ensayos variando las temperaturas de recocido, así como los tiempos de permanencia en el horno; después de los cuales se realizaron los respectivos ensayos de dureza y metalográfico, los cuales se detallan a continuación:

a) Ensayo de dureza. - Para los propósitos de este estudio se aplica el ensayo de dureza Brinell (BHN) sobre el disco troquelado antes del desbarbado en tambor rotativo, utilizando bola de 5 mm de diámetro; carga de 62.5 Kg y tiempo de 15 s .

Una vez realizado el ensayo, se mide el diámetro de la huella mediante un lente graduado que expresa sus medidas directamente en milímetros; y finalmente con este valor se pasa a una tabla donde se encuentra la dureza Brinell equivalente al diámetro de la huella en el disco.

También se pueden determinar los valores de dureza Brinell, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Brinell (BHN)} = \frac{P}{(\pi D/2) (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi D t}$$

Donde: P es la carga aplicada (Kg)  
 D es el diámetro de la bola (mm)  
 d es el diámetro de la indentación (mm).  
 t es la profundidad de la impresión (mm).

El equipo utilizado para la medición de la dureza Brinell fué el siguiente :

- Durómetro Brinell (figura 17).
- Lente graduado de 20 aumentos.

Antes de recocer el lote de discos a ensayar, se tomaron valores de algunos de ellos escogidos al azar con el fin de

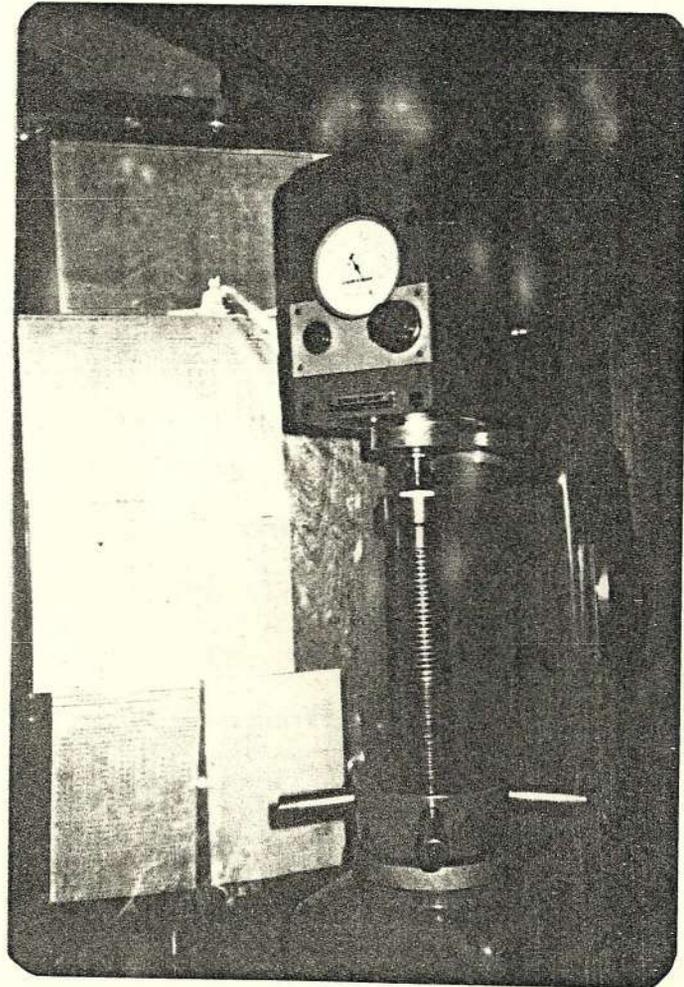
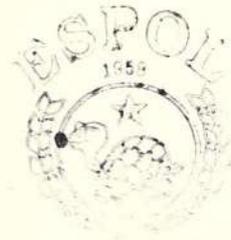


FIG 17 Máquina para ensayos  
de dureza Brinell

observar el efecto posterior del recocido; el valor de dureza promedio del lote sin recocer fué de 34.2 BHN.

De igual manera terminado el proceso de recocido de cada grupo de discos, se obtuvo su valor de dureza promedio para cada condición ensayada; los mismos que se presentan en la tabla 9. Las letras A y H representan el medio de enfriamiento utilizado luego de concluido el recocido, sea éste el aire o el mismo horno respectivamente.

Así mismo, Tr representa la temperatura a la que se realiza el recocido y está expresada en grados centígrados; mientras que tr es el tiempo de recocido o permanencia de la carga en el horno y está dado en horas.

b) Microestructura.- Para revelar la estructura metalográfica de los discos de aluminio se ha utilizado, como se mencionó anteriormente, el método de

tr (hr)	Tr (°C)			
	450	500	550	
MEDIO ENFR. DUREZA (B H N)				
0.5	EA	23.7	19.1	19.1
	EH	19.1	19.1	19.1
1.0	EA	19.6	19.1	19.6
	EH	19.1	19.1	18.2
2.0	EA	17.8	19.1	17.9
	EH	17.2	18.1	17.3
3.0	EA	17.5	19.5	19.1
	EH	19.1	18.1	17.8
4.0	EA	19.1	17.8	17.8
	EH	17.2	17.2	18.5

TABLA 9 Valores de Dureza para diferentes valores de recocido



pulido electrolítico; cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- 1.- Se corta transversalmente el disco (probeta) en dirección perpendicular al sentido de laminación mediante un disco de corte para metales no ferrosos.
- 2.- Si la probeta es demasiado pequeña y se prevé que causará dificultades en su manipulación, deberá montarse en resina .
- 3.- En un banco de pulido se prepara la probeta mecánicamente, pasando por lijas No. 200, 320, 500 y 600 respectivamente.
- 4.- De la tabla 6 de la sección 3.2.2 se selecciona el electrolito de pulido. Este debe ser depositado en el recipiente que para tal finalidad posee el banco de pulido electrolítico.

5.- Sobre la mesa de pulido se coloca la probeta que hace las veces de ánodo y se sujeta mediante una varilla de acero inoxidable que hace las veces de cátodo.

6.- Se selecciona de acuerdo al electrolito escogido y el área a pulir: El voltaje, amperaje y el tiempo de pulido estimados; los cuales realizando varios ensayos, se ajustan finalmente por tanteo.

El electrolito que recircula entre el ánodo y el reservorio, es el que cierra el circuito y actúa sobre la probeta; primeramente emparejando la superficie sobre la que golpea y posteriormente puliéndola hasta dejarla brillante y libre de rayaduras, y;

7.- Finalmente de la tabla 7 expuesta en la sección 3.2.2. se selecciona el electrolito de ataque el cual se



POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLO"  
F.I.M.C.P.

aplica sobre la superficie pulida, previamente seca, por un intervalo que varía de acuerdo al electrolito seleccionado.

Nota.- Si al observar en el microscopio la superficie atacada no se ha evidenciado suficientemente la microestructura, se puede realizar un nuevo ataque sobre la misma superficie durante un tiempo inferior al utilizado previamente para evitar que ésta se "queme", en cuyo caso se deberá repetir el proceso a partir del numeral 3.

En las figuras 18 a 21 se presenta el equipo empleado en la preparación de las probetas metalográficas.

El electrolito seleccionado para efectuar el pulido electrolítico de las probetas ensayadas fué el Num. 3; es decir:

- Alcohol metílico (absoluto), 2 partes
- Acido nítrico (concentrado), 1 parte

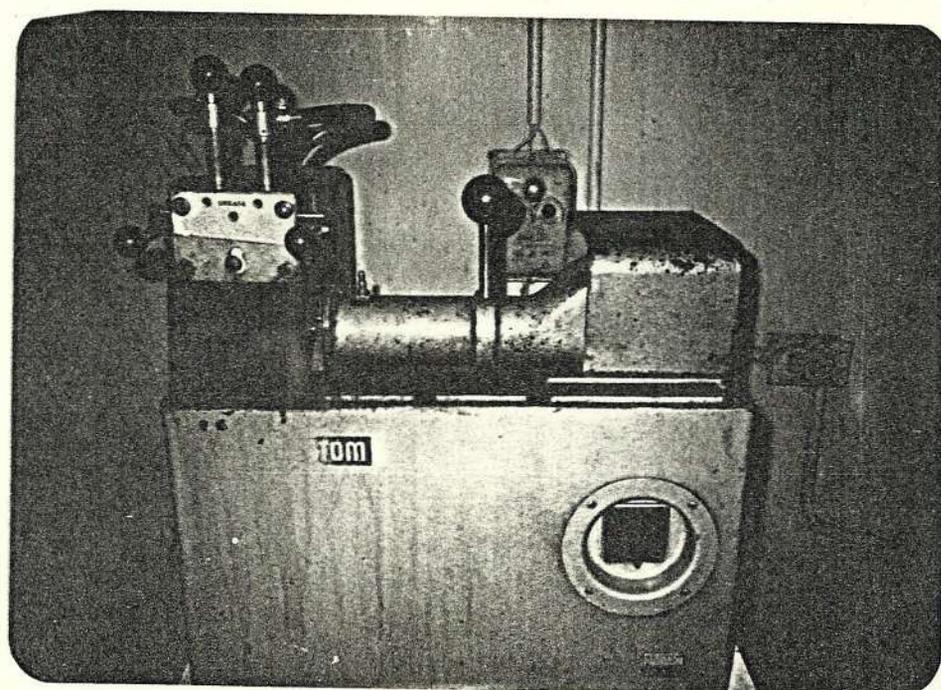


FIG 18 Máquina para cortar  
metales.

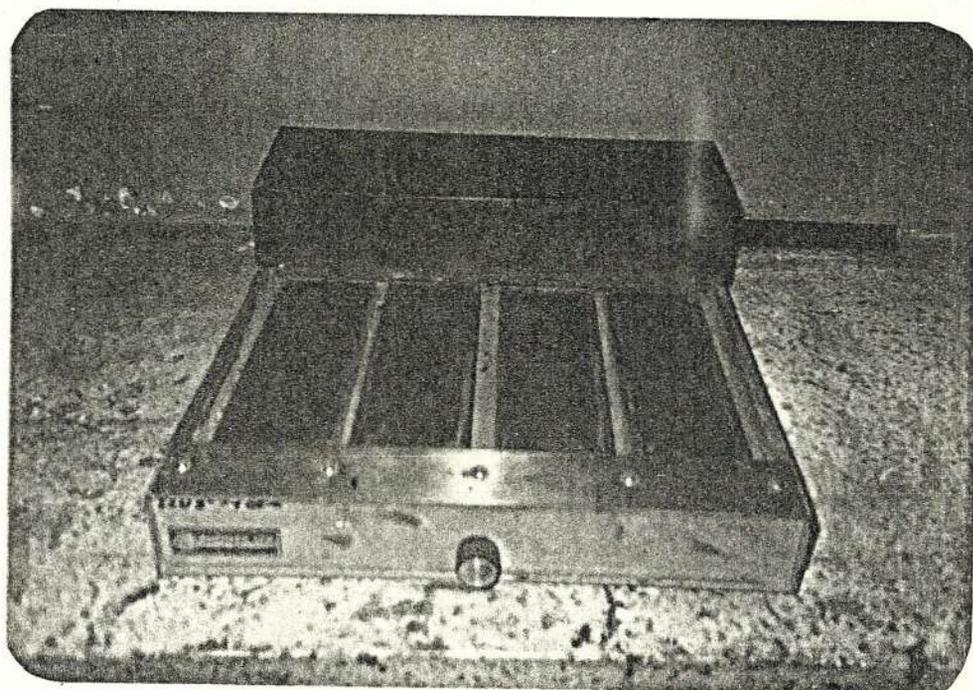


FIG 19 Mesa de pulido mecánico



FIG 20 Equipo de pulido  
electrolítico

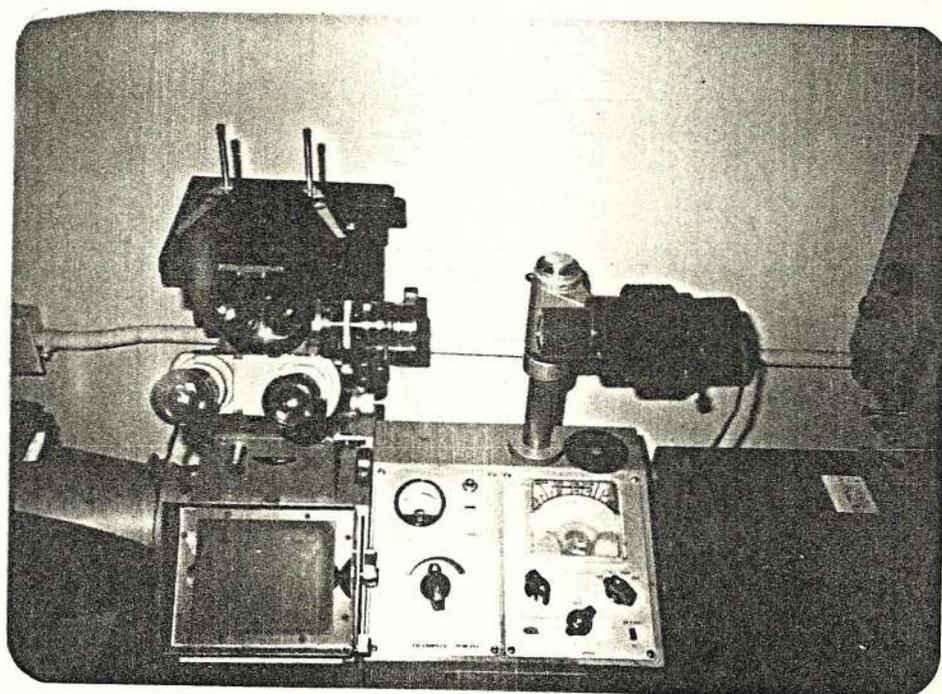


FIG 21 Microscopio Metalográfico

Los parámetros utilizados para el pulido electrolítico fueron los siguientes:

- Voltaje : 7 V
- Amperaje: 0.24 a 0.30 Amp
- Densidad de corriente : 0.042 Amp/mm<sup>2</sup>
- Tiempo de pulido : 90 s

Así mismo para el ataque manual, se seleccionó el electrolito Num. 1; esto es:

- Acido fluorhídrico(conc)..... 0.5 cc
- Agua destilada..... 99.5 cc

El tiempo de ataque fué de 15 segundos con algodón blando impregnado.

Los resultados de los tratamientos de recocido -efectuados en hornos de laboratorio- se muestran en las figuras 22,23 y 24, expuestas a continuación :

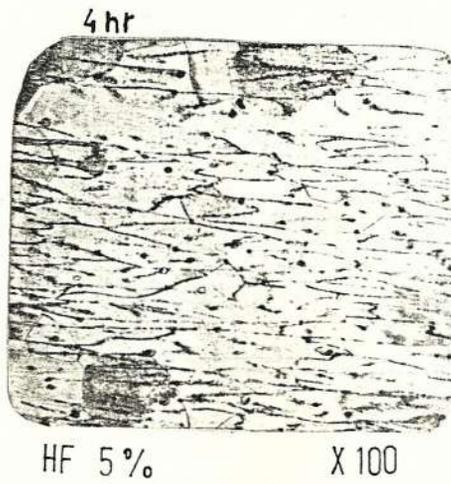
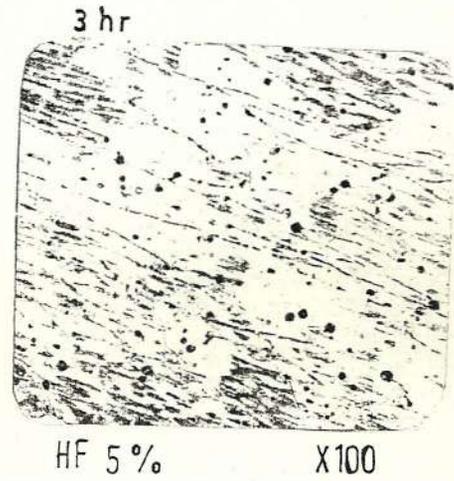
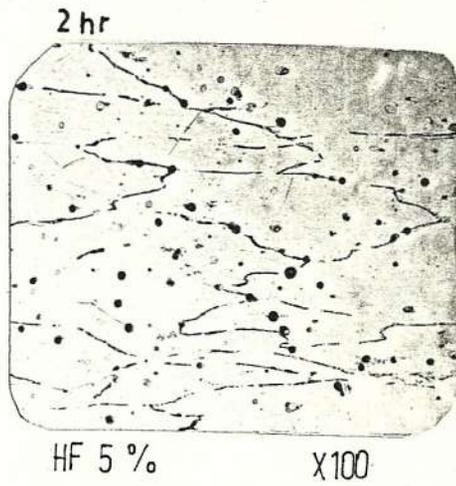
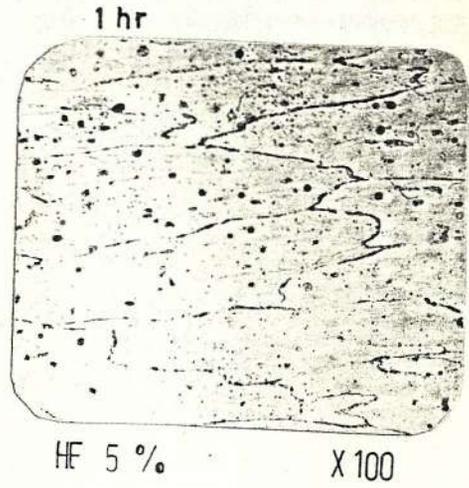
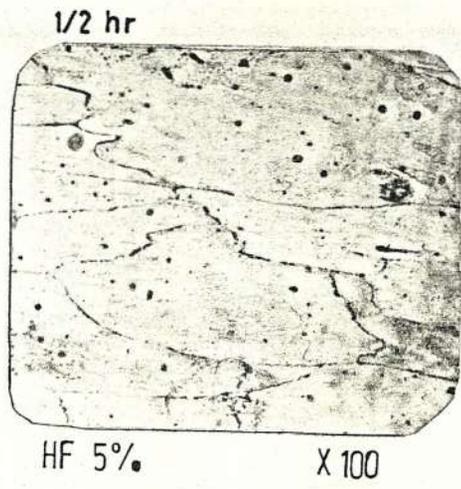


FIG 22 Pruebas de recocido a 450°C

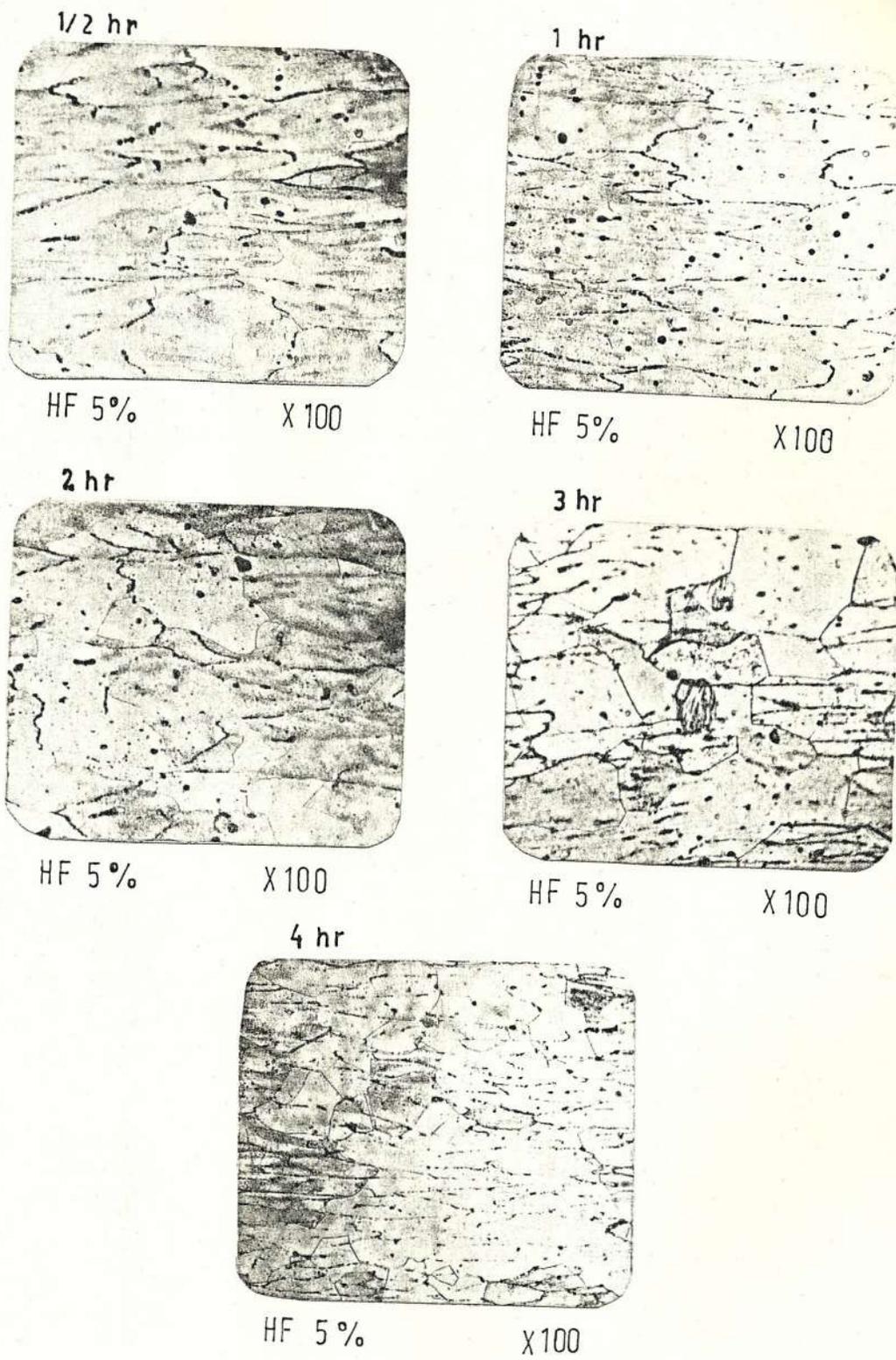
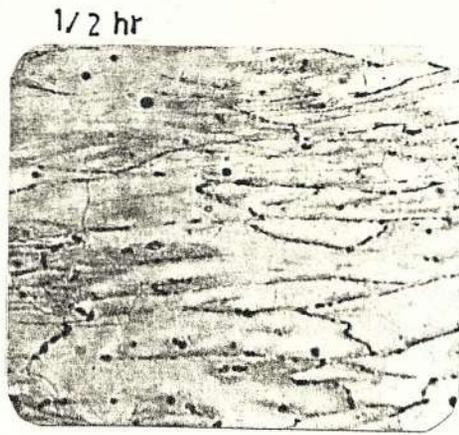
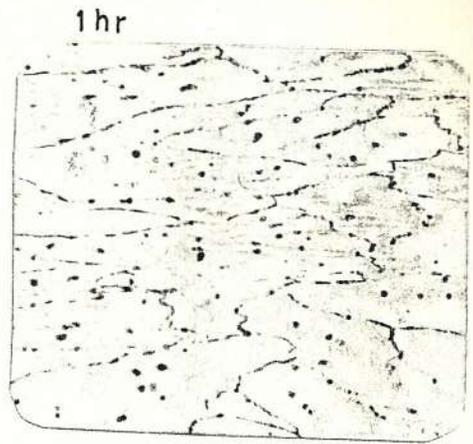


FIG 23 Pruebas de recocido a 500°C



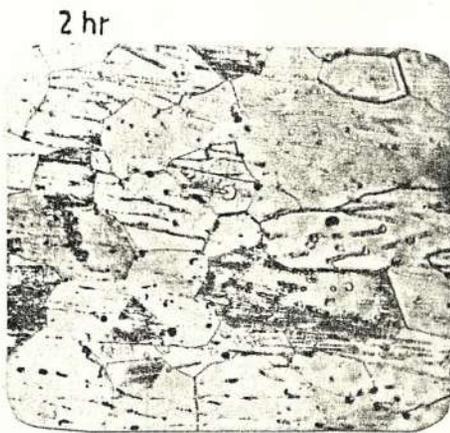
HF 5%

X 100



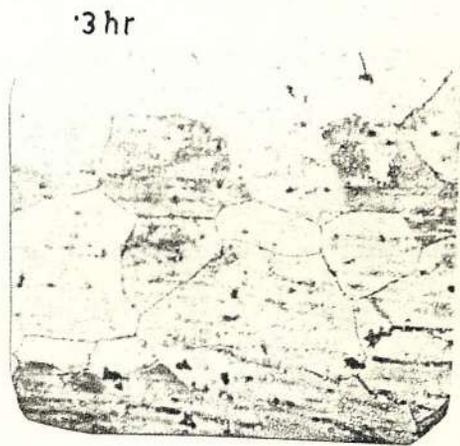
HF 5%

X 100



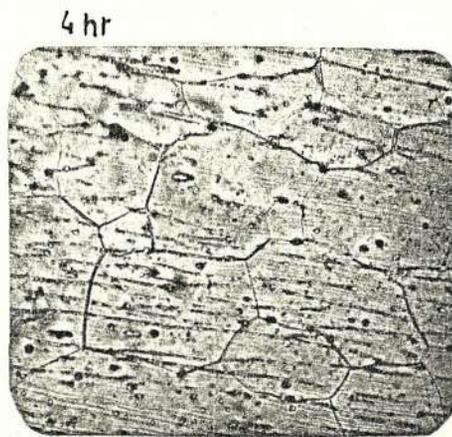
HF 5%

X 100



HF 5%

X 100



HF 5%

X 100

FIG 24 Pruebas de recocido a 550°C



### 3.3.3. PROPIEDADES MECANICAS

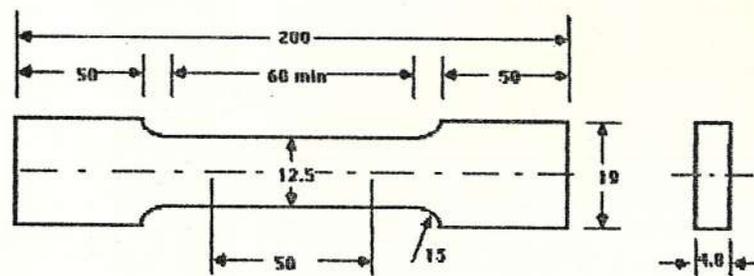
POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"  
E.I.M.C.P.

Para evaluar las propiedades mecánicas del producto terminado se emplea al igual que para el metal base, la norma ASTM designación E 8, utilizando esta vez probetas de sección rectangular para los ensayos de tensión cuyas dimensiones se muestran en la figura 25.

Las probetas utilizadas para estos ensayos deben ser obtenidas de segmentos de planchas de segunda laminación recocidas junto con un lote de discos y luego maquinadas preferentemente en fresadora.

A excepción de las mordazas empleadas para ensayar este tipo de probetas, el equipo utilizado en la determinación de las propiedades mecánicas del producto terminado es el mismo que se presentó en la sección 3.1.2.

**ASTM**  
**Ensayos de tensión para**  
**Materiales metálicos**  
**E8**



**FIG 25** Probeta de sección rectangular  
para ensayos de tensión

Los resultados obtenidos de los ensayos de las propiedades mecánicas del producto terminado, se muestran en la siguiente tabla :

Probeta No.	Resistencia Tracción (Kg/mm <sup>2</sup> )	Resistencia Rotura (Kg/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento %	Dureza (BHN)
1	5.23	3.66	48.00	19.1
2	5.40	4.07	60.65	18.1
3	4.85	3.89	46.40	19.1
4	5.25	3.79	44.45	19.1

TABLA 10 Propiedades Mecánicas del producto terminado

#### 3.3.4. PRUEBAS DE EXTRUSION

Con el propósito de determinar un criterio de aceptación de un lote de discos recocidos, se realizaron diversas pruebas de extrusión en planta, utilizando cuatro grupos de discos pertenecientes a un mismo lote de producción, comportando durezas diferentes conseguidas mediante una práctica de recocido a 500 °C y varios tiempos de permanencia en el horno de 2, 3, 4 y 5 horas respectivamente.

Los resultados obtenidos de las pruebas de extrusión efectuadas en planta, se presentan en la figura 26, la misma que será analizada posteriormente en las discusión de resultados.

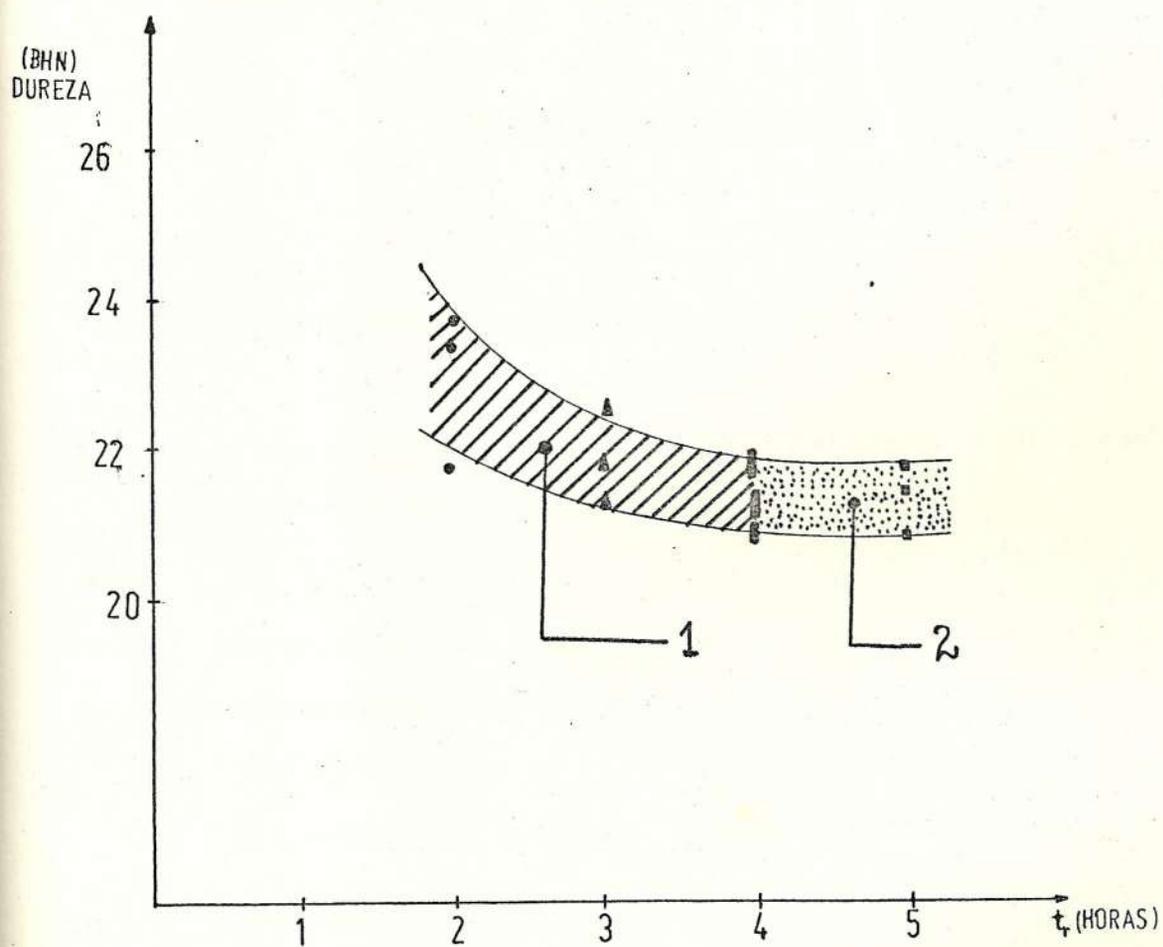


FIG 26 Resultados de pruebas de  
extrusión en planta  
(Tr = 500°C)

## C A P I T U L O   I V

### DISCUSION DE RESULTADOS

#### DE LOS ANALISIS DE LA COMPOSICION QUIMICA

En el presente trabajo se han analizado 5 muestras de aluminio : M1, M2, M3, M4 y M5.

M1 corresponde a una muestra extraída de lingotes virgenes importados.

M2 corresponde a una muestra extraída del baño fundido cuya carga de fusión fue 100 % lingotes virgenes importados.

M3 corresponde a una muestra extraída del baño fundido cuya carga de fusión fue 100 % esqueletos de láminas troqueladas.

M4 corresponde a una muestra extraída de un lote de discos cuya carga de fusión fue 60 % lingotes virgenes

y 40 % esqueletos de láminas troqueladas; y

M5 corresponde a una muestra extraída de un lote de discos cuya carga de fusión fue 100 % láminas troqueladas.

De los análisis efectuados en el laboratorio por el método de absorción atómica se desprende lo siguiente :

- 1) El porcentaje de impurezas encontradas en las 5 muestras ensayadas, en ningún caso sobrepasan los límites señalados por las normas.
- 2) Los títulos encontrados para las 5 muestras mencionadas fueron los siguientes :  
M1: 99.98 % ; M2: 99.84 % ; M3: 99.81 % ;  
M4: 99.79 % ; M5: 99.76 % . Nótese que los porcentajes de pureza mas elevados corresponden a cargas de fusión más limpias; mientras que los "más bajos" pertenecen a cargas de metal procesado anteriormente o mezclas de metal virgen con metal procesado que es sometido a reciclaje.
- 3) Además de las impurezas presentadas en los resultados de la composición química de las

muestras analizadas, también se detectaron trazas de otros elementos como Ca, Cd, Pb, Ni, Cr, provenientes tal vez del proceso electrolítico de obtención del aluminio.

#### DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tensión sobre las probetas de sección rectangular correspondientes al producto terminado dan valores promedios de resistencia a la tracción de 5.18 (Kg/mm<sup>2</sup>) resistencia a la rotura 3.85 (Kg/mm<sup>2</sup>), alargamiento de 49.87 % y dureza Brinell 18.85 BHN. Estos valores si bien no coinciden exactamente con los valores propuestos en la sección 1.3.2 , sin embargo, están dentro de las cifras corrientemente admitidas para el aluminio refinado en productos laminados comerciales.

#### DE LA ESTRUCTURA Y TAMANO DE GRANO

Durante el presente trabajo se han presentado los cambios microestructurales que sufre el material desde su estado de colado (figura 14), pasando luego a laminado (figura 16) y finalmente al de laminado y recocido, listo para ser extruido (figura 22,23 y 24) .

Así, la figura 14 correspondiente a la sección transversal de un lingote colado, muestra una estructura de granos grandes equiaxiados debidos a un enfriamiento más o menos lento en lingoteras de hierro fundido previamente precalentadas. El tamaño de grano de la estructura de colado es aproximadamente de 300 micras. Los puntos negros corresponden a partículas insolubles de  $FeAl_3$  presentes en el material.

La figura 16 representa la estructura típica de una placa de segunda laminación en la cual se observan los granos completamente deformados en el sentido de la laminación. Nótese que las partículas de  $FeAl_3$  mencionadas anteriormente siguen presentes y su distribución en el material es uniforme.

Finalmente en las figuras 22, 23 y 24 se presentan las estructuras correspondientes a los ensayos de recocido a 450 °C, 500 °C y 550 °C y tiempos de permanencia en el horno de 1/2 hora, 1 hora, 2 horas, 3 horas y 4 horas, respectivamente para cada una de ellas, observandose lo siguiente :

- 1) Existe una fuerte tendencia a la recristalización en granos gruesos, incluso, antes de que ocurra la

recristalización primaria, lo cual se atribuye a una particularidad del aluminio refinado.

- 2) A medida que aumenta el tiempo de recocido, van apareciendo nuevos granos y la estructura se va afinando para tiempos de permanencia mas prolongados. Sin embargo, el tiempo en el que se alcanza la recristalización completa de todo el material depende, además, de la cantidad de carga a recocer y de la distribución de la misma dentro del horno.

Para cargas simuladas a las de trabajo en planta, realizadas en hornos de laboratorio, se obtuvieron como parámetros recomendables para el recocido de los discos :  $T_r = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $t_r = 4\text{ hr}$ , siendo el tamaño de grano conseguido con este tratamiento inferior a 100 micras.

- 3) Cuando se emplean temperaturas de recocido de  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la superficie de los discos presenta mejor aspecto y brillantez que cuando se trabaja con temperaturas más elevadas.

DE LAS PRUEBAS DE EXTRUSION

En la figura 26 obtenida de las pruebas de extrusión en planta, se observan dos zonas bién diferenciadas. La zona 1 en la cual no es posible trabajar, puesto que el utilaje se deteriora rapidamente y los tubos presentan rayaduras profundas a lo largo de toda la longitud del tubo (dureza superiores a 21.8 BHN); y la zona 2 donde es posible trabajar regularmente y además se pudo observar que a medida que disminuía el grado de dureza de los discos, la superficie de los tubos era más lisa y brillante (durezas inferiores a 21.8 BHN) y las paradas de producción menos frecuentes (figuras 27 y 28).

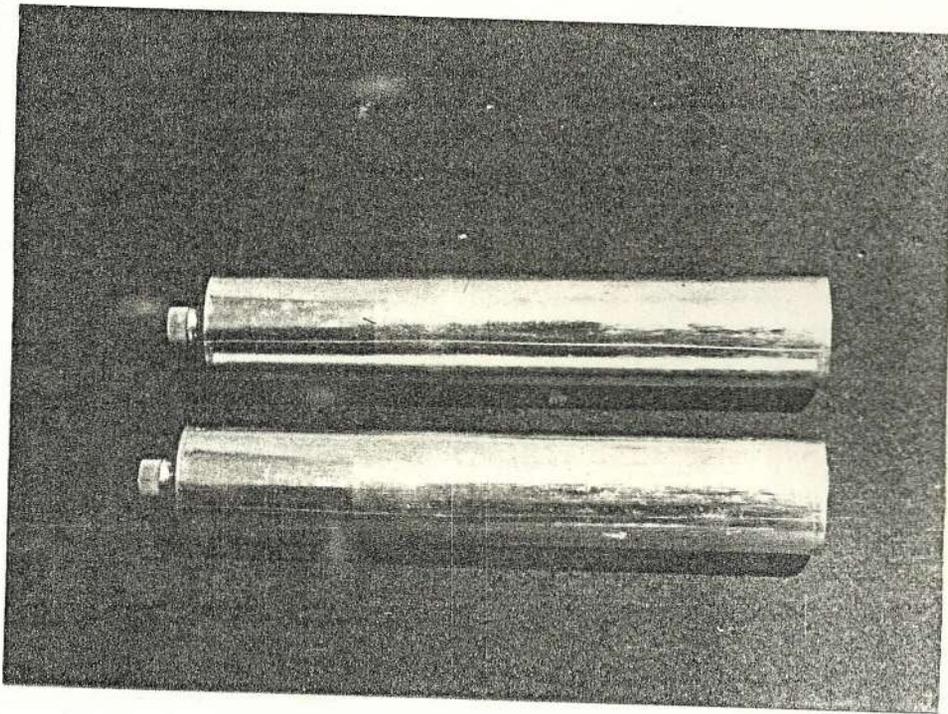


FIG 27 Extrusión de tubos  
en la zona 1

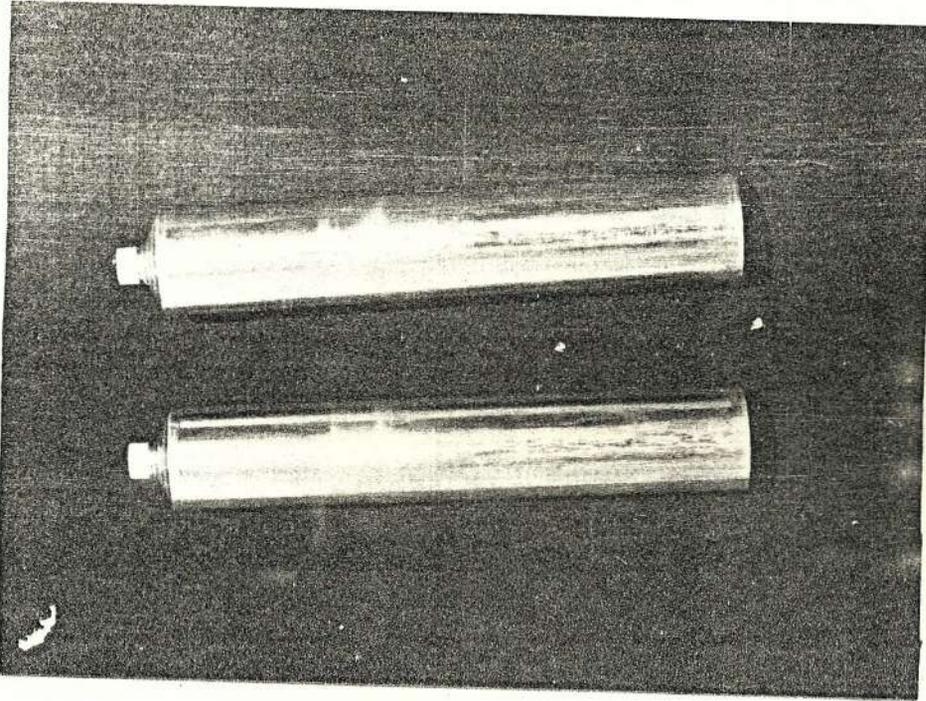


FIG 27 Extrusión de tubos  
en la zona 2

## CONCLUSIONES

- De los resultados de los análisis químicos se concluye que cualquiera de los tipos de cargas de fusión hasta ahora utilizadas cumplen con las normas de pureza requeridas para la elaboración de los discos de extrusión.
- Los parámetros de recocido que dan las mejores condiciones de dureza, tamaño de grano fino y propiedades mecánicas que involucran alta ductilidad de los discos, se encuentran entre 450°C y 500°C de temperatura y tiempos de recocido de 4 a 5 horas.
- En el caso de no contar con los equipos adecuados para la determinación de las propiedades de los discos y hasta que éstos se implementen, las pruebas de extrusión realizadas en planta podrían utilizarse como un indicativo de dichas propiedades.

## RECOMENDACIONES

- Siendo el proceso de fusión el más susceptible en cuanto a la introducción de impurezas en el metal, sería conveniente estudiar la calidad actual de este proceso, y de ser posible, obtener los parámetros óptimos de fusión desde el punto de vista técnico y económico.
- De los métodos de análisis propuestos en el presente trabajo y considerando su costo e importancia, se sugiere implantar un pequeño laboratorio para la determinación del tamaño de grano y dureza de los discos mediante la adquisición, a más del equipo de medición de dureza existente, de un equipo de pulido electrolítico y de un microscopio metalográfico; mientras que los análisis químicos y de propiedades mecánicas podrían realizarse en otros sitios puesto que su alto costo y menor frecuencia y necesidad de ejecución lo justifica.

## BIBLIOGRAFIA

1. Aluminio de Galicia, Informe sobre control de calidad de discos y arandelas de aluminio.
2. ASM, World wide guide to equivalent nonferrous metals and alloys (Metals Park, Ohio: ASM, 1980), pp.6.
3. Enciclopedia del Aluminio, Volumen 2 (Bilbao, España: Ediciones Urmo S.A., 1968)
4. Raymond A. Higgins, Ingeniería Metalúrgica, Tomo 2 (4ta. impresión; México DF, Compañía Editorial Continental, 1976), pp. 21-32.
5. Higgins, Op Cit., pp. 61-64.
6. Enciclopedia del Aluminio, Volumen 3 (Bilbao, España: E. Urmo S.A., 1968), pp. 11.
7. Higgins, Op. Cit., pp. 73.

8. Enciclopedia del Aluminio, V 3, pp. 97.
9. Enciclopedia del Aluminio, V 2, pp. 98-101.
10. Higgins, Op. Cit., pp. 352-353.
11. Enciclopedia del Aluminio, V 2, pp. 104.