

2 E. No. 25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**DEFECTOS SUPERFICIALES EN COLADA SEMICONTINUA
DE BARRAS DE ALUMINIO DE SECCION PEQUEÑA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

P R E S E N T A

DANIEL URIBE HERNANDEZ

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- SOLO COMO UN GUERRERO SE PUEDE SOBREVIVIR EN EL CAMINO DEL CONOCIMIENTO -DIJO-. PORQUE EL ARTE DEL GUERRERO ES EQUILIBRAR EL TERROR DE SER HOMBRE CON EL PRODIGIO DE SER HOMBRE.

CONTEMPLA A LOS DOS , UNO POR UNO . SUS OJOS ERAN CLAROS Y APACIBLES. HABIAN INVOCADO UNA OLEADA DE NOSTALGIA AVASALLADORA Y, CUANDO PARECIA A PUNTO DE ESTALLAR EN APASIONADAS LAGRIMAS, CONTUVIERON LA MAREA.

CREO QUE, POR UN INSTANTE, VI. VI LA SOLEDAD HUMANA COMO UNA OLA GIGANTESCA CONGELADA FRENTE A MI, DETENIDA POR EL MURO INVISIBLE DE UNA METAFOTA.

MI TRISTEZA ERA TANTA QUE ME SENTI EUFORICO. ABRACE A LOS DOS.

DON GENERO SONRIO Y SE PUSO EN PIE. DON JUAN TAMBIEN SE LEVANTO, Y COLOCO SUAVEMENTE LA MANO EN MI HOMBRO.

-VAMOS A DEJARTE AQUI -DIJO-. HAZ LO QUE TE PAREZCA CORRECTO. EL ALIADO TE ESTARA ESPERANDO AL BORDE DE AQUEL LLANO.

SEÑALO UN VALLE OSCURO EN LA DISTANCIA.

-SI TODAVIA NO SIENTES QUE SEA TU HORA, NO VAYAS A LA CITA -PROSIGUIO-. NADA SE GANA FORZANDO LAS COSAS. SI QUIERES SOBREVIVIR, DEBES SER CLARO COMO EL CRISTAL Y ESTAR MORTALMENTE SEGURO DE TI MISMO.

VIAJE A IXTLAN

SUMARIO

El presente estudio es continuación del trabajo realizado -- por el Ing. Tomás Rangel O., el cual sirviera para la cons-- trucción de una máquina de colada semicontinua. En este mismo se hace una breve descripción del proceso de colada continua de "enfriamiento directo" (Direct Chill) para un metal - no ferroso y su situación en el desarrollo tecnológico.

De la máquina de colada semicontinua utilizada, para la producción de barras de aluminio de sección circular de - - - 12,755 cm² se consideran las partes de que se compone, la - función de cada una de ellas y cómo el ajuste de los parámetros (velocidad de colada, temperatura de colada, enfriamiento de la lingotera, enfriamiento secundario, etc.), que ri-- gen la operación, disminuye y elimina los defectos superfi-- ciales encontrados en las barras.

Se proponen diversos mecanismos para explicar el origen de - algunos de estos defectos, enfatizando la importancia de los espacios de aire (gaps) formados y que reducen la transferencia de calor en la lingotera.

Con esto se pretende la adquisición de los conocimientos fundamentales en la vasta rama de la colada continua, para la - comprensión y aplicación de este estudio de manera práctica.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCION	
1.1 Importancia del Proceso de Colada Continua.	1
1.2 Genralidades.	4
II. REVISION HISTORICA DE LA COLADA SEMICONTINUA	
2.1 Antecedentes Históricos.	7
2.2 Procesos de Colada Semicontinua de Aluminio	9
2.2.1 Proceso ALCOA de enfriamiento directo.	9
2.2.2 Procedimiento ISOMET	11
2.2.3 Proceso FORGES DE CRANS	12
2.2.4 Proceso Electromagnético	13
III. TIPOS DE DEFECTOS EN COLADA CONTINUA	
3.1 Defectos Externos.	17
3.1.1 Segregación.	17
3.1.1.1 Bandas de Segregación Superficial Continua.	17
3.1.2 Exudaciones.	18
3.1.2.1 Exudaciones Regulares.	18
3.1.2.2 Exudaciones Irregulares.	20
3.1.3 Pliegues por solidificación discontinua.	21
3.1.4 Grietas Superficiales.	23
3.1.5 Poros.	23
3.2 Defectos Internos.	24
3.2.1 Segregaciones.	24
3.2.1.1 Bandas de Segregación Discontinua.	24
3.2.1.2 Bandas periódicas de segregación.	25

	Página
3.2.2 Grietas Internas.	27
3.2.3 Inclusiones no Metálicas.	29
3.2.4 Poros.	29
 IV. MAQUINA DE COLADA SEMICONTINUA UTILIZADA	
4.1 Recipiente caliente.	33
4.2 Lingotera.	36
4.3 Sistema de enfriamiento secundario.	37
4.4 Falso fondo.	37
 V. METODO EXPERIMENTAL.	
5.1 Variables del proceso.	40
5.1.1 Temperatura de colada.	40
5.1.2 Velocidad de colada.	43
5.1.3 Flujos primario y secundario.	45
5.2 Análisis del material.	45
5.2.1 Ensayos de calidad.	46
5.2.2 Análisis metalográfico.	47
5.2.3 Técnicas metalográficas.	48
 VI. RESULTADOS.	
6.1 Variables de operación.	49
6.1.1 Velocidad de colada.	51
6.1.2 Temperatura de colada.	51
6.1.3 Enfriamiento en la lingotera.	53
6.1.4 Enfriamiento secundario.	53
6.2 Lingotera.	56
6.3 Defectos encontrados.	57
6.3.1 Pliegues.	57
6.3.2 Grietas superficiales.	61
6.3.3 Gotas exudadas irregulares.	65
6.3.4 Líneas de fricción.	65
6.3.5 Sangrado.	65
6.4 Solidificación.	68
6.5 Estructura de colada.	69
6.5.1 Macroestructura.	69
6.5.2 Microestructura.	72

	Página
VII. DISCUSION.	
7.1 Formación de los defectos.	75
7.1.1 Pliegues.	75
7.1.2 Líneas de fricción.	79
7.1.3 Grietas.	81
7.1.4 Sangrado.	84
7.1.5 Gotas exudadas irregulares.	85
VIII. CONCLUSIONES.	86
IX. RECOMENDACIONES.	88
X. BIBLIOGRAFIA.	90

I. INTRODUCCION

1.1 Importancia de la colada continua

Las investigaciones de un procedimiento que permitiese la -- obtención de mayores velocidades de solidificación, han abocado a un procedimiento que comparte una refrigeración intensa y directa del metal durante toda la solidificación, conocido bajo el nombre de colada continua o de colada directa. El cual ha hecho dar un paso gigantesco a la metalurgia del aluminio.

Aun cuando el proceso es de importancia industrial en la producción en gran escala de lingotes destinados a la laminación y estrusión , el mayor énfasis de este estudio es su empleo en fundiciones que deseen producir barras de un diámetro pequeño, utilizables en trabajos futuros o en formas intermedias para extrusión por impacto. Utilizando un metal - que no puede ser tan exitosamente procesado por otros métodos como:

- Fundición en arena en verde
- Fundición en molde permanente
- Fundición a presión
- Fundición en cáscara (shell)
- Fundición centrífuga
- Fundición en yeso

- Fundición en revestimiento cerámico (Investment casting)

Estos métodos tradicionales de colada presentan los inconvenientes que a continuación se enumeran:

1. Los rechupes que se producen en los lingotes obligan a una reducción de tamaño de estos o al empleo de mazarotas con la consiguiente pérdida de metal que esto supone.
2. Las segregaciones originan diferencias de composición - entre la cabecera y el pie y entre las paredes y el centro del lingote.
3. Es necesario producir desbastes intermedios.
4. Pérdidas de tiempo y de energía.

Estos inconvenientes quedan resueltos en la colada continua, ya que en este proceso:

1. Existe un rendimiento metálico elevado (por lo menos 95%)
2. No se producen rechupes, pues se llena de metal inmediatamente el hueco central que se produce por la con -----

tracción de la barra.

- 3 La colada continua es más rápida que la colada tradicional.
- 4 En secciones de barras pequeñas, se reduce la importancia de las segregaciones transversales y longitudinales.
- 5 Se eliminan tiempos muertos de procesos intermedios.

Debido a las ventajas mencionadas anteriormente, la colada continua se generalizará abatiendo costos y aumentando la producción.

Además el proceso tiene como ventajas inherentes, la obtención de barras con microestructuras finas, homogéneas y de densidad uniforme, ya que desde el punto de vista calidad, hay dos aspectos a considerar:

- Calidad superficial del producto.
- La estructura metalográfica del mismo.

Los dos relacionados con el tipo y grado de la segregación.

En la máquina de colada semicontinua, la cual basa su funcionamiento en el sistema de "enfriamiento directo" (direct -- chill), tratamos de obtener todas estas ventajas, mediante la aplicación de los sistemas "nivel de derrame controlada" --- (level pouring), y el sistema de "recipiente caliente" o "cabeza caliente" (hot top).

El objetivo de realizar un análisis de los defectos superficiales y de las estructuras metalográficas de las barras producidas y su caracterización a la luz de los trabajos existentes, es identificar y cuantificar las variables del proceso para determinar si es posible mejorarlo bajo las circunstancias particulares del mismo.

Por tal razón, la descripción de los ensayos se hace con referencia a los productos de la máquina de colada instalada en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

1.2. Generalidades.

Se denomina colada continua a el procedimiento en que se -- obtienen barras, que avanzan y solidifican a medida que se va vertiendo el metal en una lingotera sin fondo, que se alimenta indefinidamente mientras no se interrumpa la operación. -

Dicha solidificación se logra mediante el enfriamiento de la lingotera (de manera enérgica con agua), el cual debe ser -- adecuado para que en la superficie del metal se forme una -- cáscara o piel sólida lo suficientemente gruesa para resistir los esfuerzos provocados por el sistema extractor de la máquina, así como los efectos de la presión metalostática.

Tan pronto la superficie del metal colado establece el primer contacto con la lingotera, la calidad de esta superficie es controlada por la velocidad con que solidifica el metal, lo cual a su vez depende ⁽³⁾ de dos grupos de factores:

- Tipo de aleación y el diseño de la lingotera, incluyendo su sistema de enfriamiento.
- La práctica de colada (temperatura de colada, velocidad de colada, distribución del metal, etc.), incluyendo el enfriamiento directo.

La barra colada y solidificada parcialmente es retirada continamente desde la base de la lingotera e inmediatamente - después recibe un enfriamiento directo con agua (enfriamiento secundario), hasta quedar la barra totalmente solidificada.

El proceso de colada directa en sí mismo es un proceso continuo y cuando se realiza horizontalmente puede dar una longitud ilimitada. La mayor parte de la producción de aluminio en lingotes se obtiene, sin embargo, por colada continua vertical, y en este caso la longitud está limitada por la profundidad del foso de colada y la capacidad de extracción de la máquina; de ahí que el proceso se denomine "semicontinuo".

En la actualidad, en la colada por métodos semicontinuos, --
(1)
existen dos formas de introducir el metal fundido, en la lingotera:

1. La superficie del metal líquido, está dentro de la lingotera y próxima al nivel en el cual la solidificación toma lugar. El metal fundido es suministrado desde un canal alimentador, localizado a un nivel superior. En esta categoría están los lingotes colados por el sistema de enfriamiento directo (DC).
2. La superficie del metal fundido está fuera de la lingotera a un nivel superior al cual toma lugar la solidificación. El metal es suministrado mediante el sistema de nivel de derrame controlado (Level-Pouring).

II. REVISION HISTORICA DE LA COLADA SEMICONTINUA

2.1 Antecedentes Históricos.

La idea de la colada continua es muy antigua, ya que se eleva en la literatura técnica a patentes anteriores al año ---
(7)
1900. Por ejemplo en 1840 G.E. Seller patentó en Estados --
Unidos de Norteamérica una máquina para colar en forma con--
tinua tuberfa de plomo, con la cual construyeron la primera
instalación tipo vertical en 1841, G. Seller y J. Leing.

Sir Henry Bessemer, en Inglaterra, en el año 1846 hizo un in
tento serio de lo que ahora es el proceso de colada continua
de aluminio y plomo. Posteriormente fue propuesto un dispo-
sitivo de colada continua en 1887 por R.M. Daelen, el cual -
combina la refrigeración directa e indirecta del metal; este
dispositivo no se experimentó industrialmente en su época, -
pero contiene a grandes rasgos los principios de los siste--
mas de colada continua recientes.

En 1930 comenzaron los estudios semiindustriales en Alemania
y en los Estados Unidos, y la instalación de una máquina de
colada continua con conformación directa del metal la hizo -
Hanzelett (Estados Unidos) en el año 1931, también la URSS -
en el instituto Tsniichermett se investigó este sistema.

Estos estudios condujeron en 1935 a la primera realización industrial, en particular en la Vereinigte Leichtmetallwerke y en la Wieland Werke.

En Francia, los primeros ensayos seimiindustriales se efectuaron hacia 1937, la primera instalación para la colada -- continua de aluminio funcionó en la fábrica de Faremoutier de la Cégédur (entonces Societé du Duralumin).

Actualmente la mayor parte de los semiproductos de aleaciones de aluminio empleados en el mundo, se obtienen por este procedimiento. En la mayoría de los casos la colada es semi continua, es decir los semiproductos son colada en una cierta longitud y extraídos después de parar la colada.

Existen en Alemania, en los Estados Unidos y en Inglaterra -- algunas instalaciones industriales que realizan la colada -- verdaderamente continua: se obtiene el metal solidificado en la longitud requerida por medio de una sierra móvil, sin que haya interrupción de la colada. Estas instalaciones han tenido un desarrollo limitado, puesto que llevan consigo complicaciones mecánicas e inversiones muy importantes.

2.2 Procesos de colada semicontinua de aluminio.

Los siguientes procesos son del tipo vertical y con lingotera sin movimiento, los cuales se están empleando:

2.2.1 Proceso ALCOA de enfriamiento directo.

Basado en una patente de W.T. Ennor, noviembre 3 de 1942. ⁽¹²⁾
Proceso desarrollado y utilizado por Aluminum Company of America. En este proceso se vacfa, en forma continua, lingotes - de aluminio y aleaciones de aluminio, el molde es vertical es tacionario, enfriado por agua y se completa la solidificación por aplicación directa de agua en la parte inferior del molde.

Al inicio del proceso, el molde está tapado por un bloque o - falso lingote, colocado sobre un elevador.

El metal fundido se alimenta desde un horno a través de vertedores y conductores, regulando el flujo manual o automática-- mente por medio de un flotador controlador, de modo que coincide con la rapidez de colada, que se controla mediante el -- elevador o mediante rodillos impulsores.

El proceso se muestra esquemáticamente en la figura 1, la velocidad de colada varía de 2.54 a 25.4 mm. por minuto, depen-

diendo de la aleación y del tamaño del lingote; el número de lingotes colados por vez, varía de 1 a 20.

Se producen lingotes para lámina y placa, lingotes redondos para extrusión y forja, lingotes cuadrados para laminar y -- forjar, con secciones tan grandes como de 9500 cm^2 o más.

Cuando se emplea un elevador se pueden colar grandes longitudes, comúnmente de 250 a 375 cm de largo, limitadas por la carrera del elevador; o bien, cuando se emplean rodillos los lingotes se cortan a las longitudes finales.

La calidad superficial es adecuada tal y como sale de la colada, para ciertas aleaciones y productos, o puede requerir quitar una delgada capa superficial para otras aleaciones o para aplicaciones más críticas.

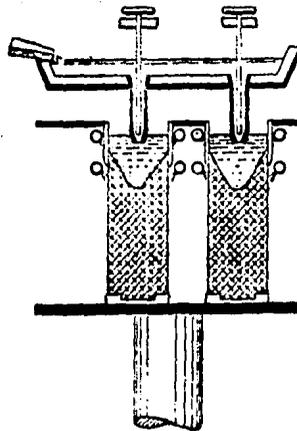


Fig. 1. Colado de lingotes de aluminio por el procedimiento DC (Cortesía de Aluminum Corporation of America).

2.2.2 Procedimiento ISOMET. (7)

De la compañía Francesa de metales, 1953, Fig. 2, el metal es refrigerado debajo de la lingotera con refrigeración independiente, por una serie de rampas de niebla cuya disposición es regulable. La niebla se origina por pulverización de agua por medio de aire comprimido.

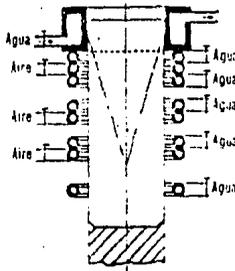


FIG. 2. Lingotera de refrigeración moderada tipo ISOMET.

Este método de refrigeración permite hacer variar de manera muy flexible la velocidad de refrigeración y obtener la solidificación deseada. Es posible regular la temperatura de la placa al final de la solidificación, entre 450 y 550°C. y laminarlas con el calor de fundición, como se hacía en antiguos procedimientos. Los inconvenientes son la disminución del 30 al 50% de la velocidad de colada y la necesidad de una alimentación final de la colada.

Pechiney, Fig. 3, ha propuesto un procedimiento análogo, en el que el metal se enfría en la base de la lingotera, que lleva un circuito de refrigeración independiente, por una serie de rampas de chorro de agua de situación regulable, ramificados sobre un regulador de presión equipado con un sumidero.

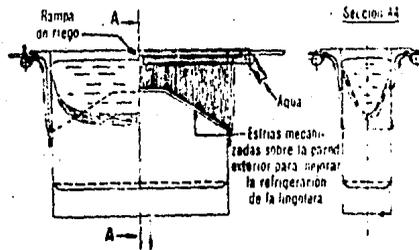


FIG. 3. Lingotera de refrigeración moderada tipo PECHINEY.

2.2.3 (7) Proceso FORGES DE CRANS. 1955.

En este proceso, la lingotera se refrigera por acción de un chorro de agua de pequeño caudal, para limitar la velocidad de solidificación del metal, Fig. 4.

La velocidad de colada es mayor que en los dos anteriores -- procedimientos, pero la sensibilidad del metal a las condiciones de transformación siguen siendo mayores.

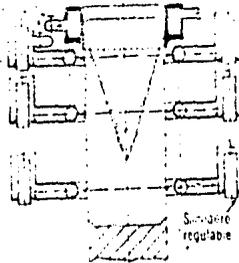


FIG. 4. Lingotera de refrigeración moderada tipo CRANS.

2.2.4 Proceso electromagnético.

De gran interés es la aplicación de los principios electro--
magnéticos en la construcción de un molde corto. (4)

En este caso, (Fig.5), el metal líquido es contenido por el campo electromagnético generado por un inductor; dicho campo genera una corriente inducida en el metal, con circulación -- en sentido opuesto a la del inductor, produciendo por ende, - una repulsión entre ambas superficies.

La solidificación se logra mediante un enfriamiento directo - con agua, en la superficie del lingote a través del campo y a una distancia corta por abajo de la interfase sólido-líquido, por lo que no ocurre refusión; se controla el ángulo de incidencia del agua y su punto de aplicación en forma tal que la interfase está ubicada en el centro del campo inducido (Fig.6)

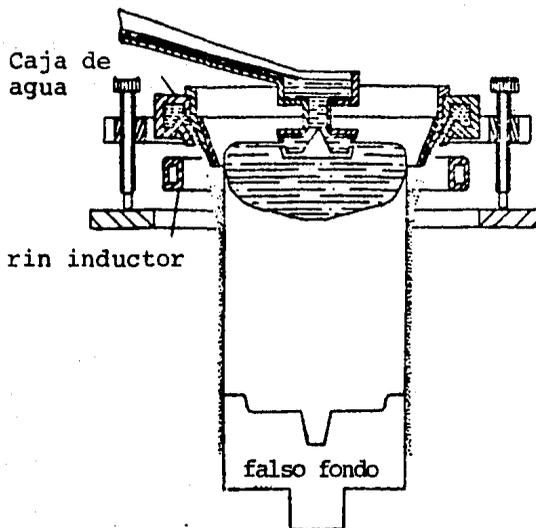


FIG. 5. Sistema electromagnético, equipo de colada.

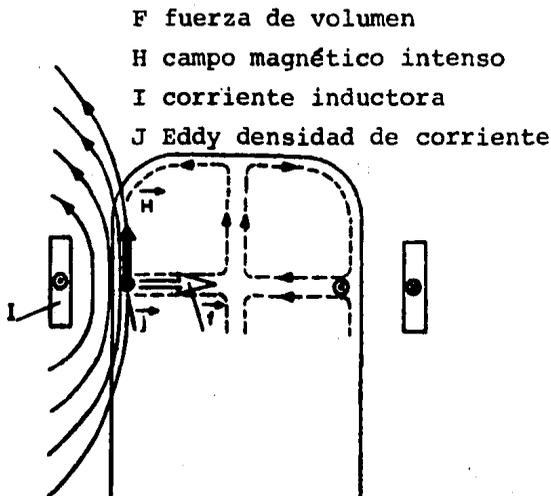


FIG. 6. Principios físicos implicados
E.F. Enley, International Met. Rev.
june 1976.

El método es aplicable en la colada de bloques y barras y se estima que funciona industrialmente en varias ciudades de la Unión Soviética, en donde existen plantas piloto.

Como ventajas de este proceso tenemos:

1. Superficies lisas y brillantes, sin segregación notoria, los cuales pueden ser laminados sin descortezado previo.
2. Tamaño de la subestructura celular fino, esto reduce -- principalmente las altas temperaturas de homogeneización y precalentamiento, así como la tendencia a la fisura---ción durante el laminado en caliente.

El tamaño celular de la superficie puede ser de la mitad al obtenido por el sistema DC, que oscila entre 40 y 70 μm .

III. TIPOS DE DEFECTOS EN COLADA CONTINUA

El aspecto característico que tienen las barras de colada -- continua es una consecuencia de el desarrollo de los distintos mecanismos para las diferentes aleaciones y condiciones de colada. Los defectos aparecen dependiendo, por lo tanto, del tipo de proceso (enfriamiento directo DC, Cabeza caliente, Horizontal, etc.). Existen clasificaciones de acuerdo al tipo de defecto, en particular utilizaremos algunas de W. J. Bergmann y de Kurt Buxmann.

Para el estudio de los defectos que se presentan en la colada continua, existe una clasificación⁽¹³⁾ general; defectos - externos y defectos internos.

	Segregaciones
	Exudaciones
Defectos Externos	Pliegues por solidificación discontinua
	Grietas superficiales
	Poros
	Segregaciones
Defectos Internos	Grietas internas
	Inclusiones no metalicas
	Poros

3.1 DEFECTOS EXTERNOS

3.1.1 Segregaciones

3.1.1.1 Bandas de segregación superficial continua.

Se trata de capas segregadas uniformes y zonas empobrecidas que resultan de un proceso de segregación de desarrollo continuo.⁽²⁾

Si se hace un corte metalográfico en un plano paralelo a la dirección de colada, se observa que el espesor de ambas zonas no presenta variaciones esenciales. Este tipo de capas segregadas uniformes pueden ser tan lisas que sólo un minucioso análisis puede demostrar su existencia.

Sin embargo, frecuentemente pueden aparecer manifestaciones macroscópicas superficiales importantes que se aprecian como líneas de fricción⁽⁶⁾ y granos de gas (Fig. 7).

También pueden aparecer, en algunos casos protuberancias superficiales en ciertos puntos del perimetro que se mantienen a lo largo de toda la barra y tienen asociada una segregación uniforme.

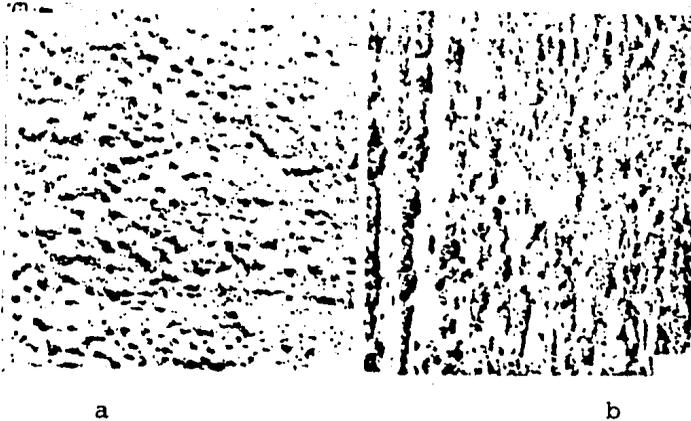


Fig. 7. Distintas topografías superficiales según Buxmann. a) Grano de gas
b) Líneas de fricción.

3.1.2 EXUDACIONES

3.1.2.1 Exudaciones regulares.

De acuerdo a los mecanismos de solidificación en la lingotera (Fig.8) en la primera fase se forma (en 1) una costra (capa sólida de metal), constituida de cristales primarios ricos en aluminio; en la segunda fase se origina (en 2) una capa de aire entre la piel en curso de solidificación y la pared de la lingotera, por efecto conjunto de la contracción al efectuarse la solidificación y la contracción que experimenta el metal solidificado cuando llega (en 4) al sistema de enfriamiento secundario.

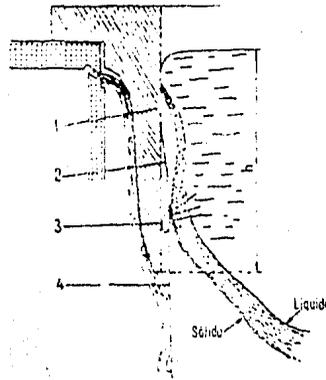


FIG. 8. Mecanismos de solidificación en una lingotera de colada continua. (7)

Esta película de aire es mala conductora de calor, reduce -- considerablemente los intercambios térmicos entre el metal y la lingotera, lo que modifica el equilibrio térmico entre el metal todavía líquido y el metal de la primera costra solidificada que se encuentra a una temperatura muy similar a la del comienzo de su solidificación.

La capa solidificada sufre un recalentamiento que lleva consigo la refundición parcial de las juntas de los granos. El líquido resultante de esta refundición comienza a exudar (en 3) -- bajo los efectos combinados de la contracción de la presión metalostática del metal líquido situado por encima del frente de solidificación y las fuerzas capilares que se desarro-

llan en los canales intergranulares.

A estos efectos puede añadirse la acción propia del hidrógeno eventualmente presente en el metal que se desprende en el momento de la solidificación y tiende a repeler hacia el exterior el líquido de bajo punto de fusión.

En la última fase las exudaciones llegan al contacto con el agua de riego y coagulan rápidamente, Fig. 9.

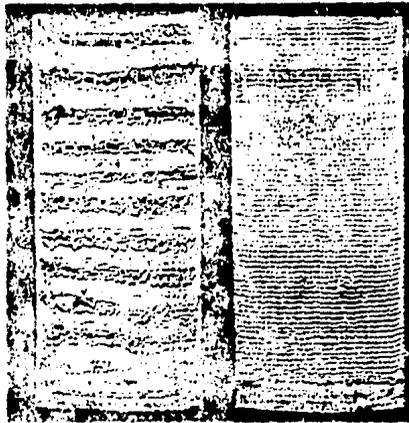


FIG. 9. Exudaciones periódicas de 99.25% colada continua.

3.1.2.2. Exudaciones irregulares.

(25)

Se encuentran en la superficie de las barras, cuando la aleación presenta un intervalo de solidificación más amplio, ejemplo: AlMg 4,5; AlCu 4,5; AlZnMgCu.

Se encuentran también zonas empobrecidas en aleantes a milímetros de profundidad, bajo la superficie de la barra.

3.1.3 Pliegues por solidificación discontinua.

Durante la colada de lingotes de aluminio por el proceso de nivel de derrame controlado y con cabeza caliente (Fig. 10), varia como resultado del flujo discontinuo de metal, la velocidad de enfriamiento dentro de la lingotera, formándose --- pliegues⁽¹⁾. Originando un modelo cíclico para la macroestructura de la región, asociando a esta una segregación.

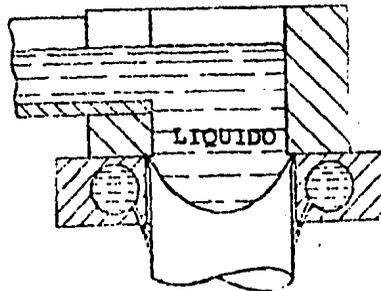


Fig. 10. Modelo típico para el proceso de nivel de derrame controlado(1).

Para comprender la solidificación en este proceso es necesario conocer la naturaleza del flujo metálico dentro de las zonas de enfriamiento, así como la influencia de la sobrecarga con la cual esta en contacto el metal y sirve de base para la extracción de calor a través del material refractario.

La cinética del flujo de metal dentro de las zonas y superficies del molde son como se muestra en la FIG. 11

En la cima de la lingotera, las condiciones de flujo de calor causan que el menisco crezca cerca de la pared y desciende del estado a y b, permaneciendo el menisco en contacto con la cara horizontal de la cabeza. Consecutivamente un espacio se forma arriba del menisco y la cabeza, el menisco puede crecer en la orilla de la cabeza sobresaliente (estado c) dentro de ciertas condiciones de extracción de calor, las dimensiones interiores del menisco causan que el metal sea bloqueado y no llene el espacio (estado d y e) eventualmente el enfriamiento decrece por el vacío causado, la temperatura aumenta y funde la cáscara, el líquido finalmente entra (estado f), llenando el espacio y el proceso se repite (estado g).

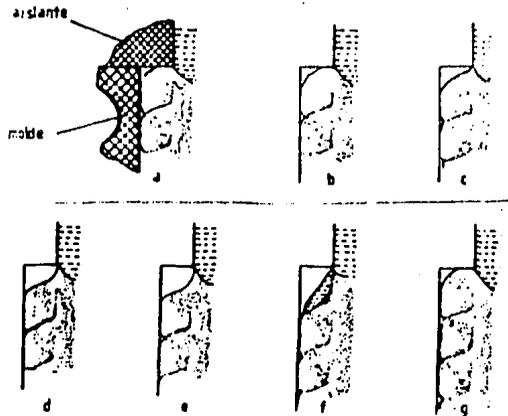


FIG. 11. Modelo discontinuo de solidificación en el sistema de cabeza caliente. Según Bergmann

3.I.4. Grietas superficiales

Las grietas (14) se producen durante la solidificación y después de esta, por la desigualdad de enfriamiento de las diversas partes del lingote, una zona que solidifique antes -- que las zonas que la circundan originan una variación del volumen creando fuertes tensiones, que llegan a producir roturas.

A estas causas es preciso añadir la resistencia que se presenta en la lingotera y la falta de alineación de la lingotera con las guías de la barra colada.

3.I.5. Poros

La porosidad superficial (9), surge a causa de una insuficiente alimentación de líquido para compensar la contracción debida a la solidificación. Se producen fuerzas de succión en los canales interdentríticos, las cuales pueden propagarse a la superficie, si no está completamente solidificada; si la succión excede las fuerzas capilares del líquido residual de la superficie, este es succionado, produciendo un poro. Estos defectos aparecen en colada continua con molde en movimiento; especialmente en aleaciones con amplio rango de solidificación, pues ellas solidifican con estructura celular -- más gruesa que el aluminio menos aleado en iguales condiciones de solidificación y las fuerzas capilares son más bajas en subestructuras gruesas.

Los poros periféricos, tienen su origen casi sin excepción en un contenido de lubricante elevado, otra causa puede ser, el agua de condensación en la lingotera antes de la colada - o agua proveniente del enfriamiento directo que se introduce en la lingotera durante la operación de colada.

3.2 DEFECTOS INTERNOS

3.2.1 Segregaciones

3.2.1.1 Bandas de segregación discontinua

Se presentan sobre todo en aleaciones con rango de solidificación demasiado angosto, cuando la colada se realiza con sobrecabeza. Aquí se introducen las zonas segregadas en forma de proyecciones hacia el interior de la barra (Fig. 12).

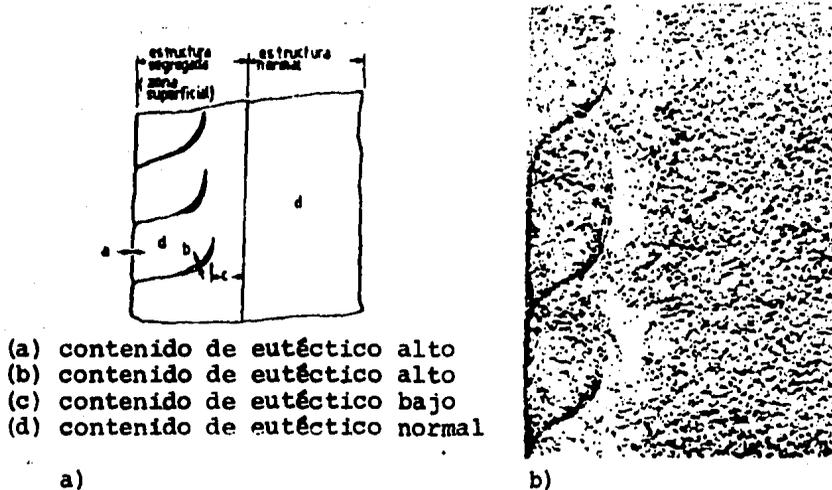


Fig. 12. a) Esquema de las bandas por solidificación discontinua, b) Estructura del lingote, W. J. Bergman Met. T. (1).

La aparición de este defecto fue descrita por Bergmann como una combinación de diversos fenómenos, uno de ellos es la segregación dendrítica, que es la diferencia de composición química dentro de cada grano y se debe principalmente a las diferencias entre las temperaturas de solidificación de los componentes de la aleación.

3.2.1.2 Bandas periódicas de segregación

Este defecto se presenta generalmente en aleaciones de estrecho rango de solidificación (Al comercialmente puro, aleaciones Al-Mn). Consiste en bandas periódicas perpendiculares a la dirección de extracción de la barra. (Fig. 13). Esta segregación tiene asociadas las siguientes características:

- a) Debajo de las corrugaciones se encuentran zonas empobrecidas de aleante.
- b) La superficie de la barra es ligeramente ondulada, - las bandas de segregación se encuentran preferentemente en los valles de dichas ondulaciones.

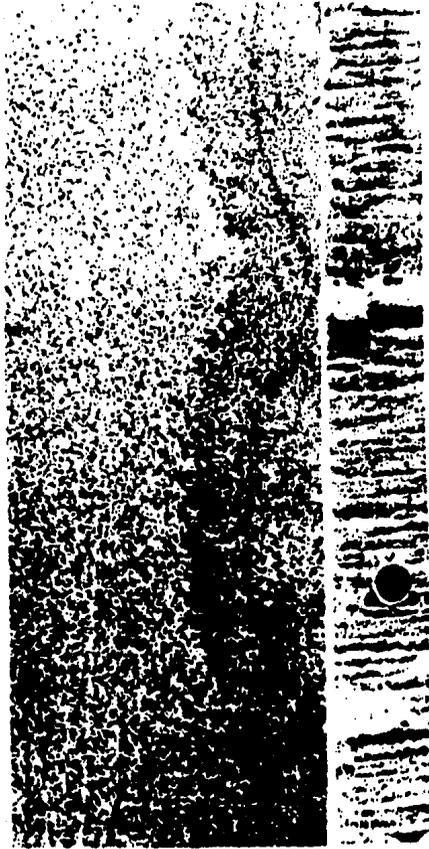


Fig. 13 Bandas periódicas de segregación,
según Buxmann(4).

3.2.2. Grietas internas.

Las causas generadoras de grietas internas son: la tensión - térmica, el cambio de estado, un excesivo enfriamiento y una excesiva velocidad de colada. Las grietas se producen cerca del límite de la interfase sólido-líquido, es decir que las grietas internas se producen la mayoría de las veces inmediatamente por debajo de solidus. (27)

Existen también elementos de soluto que aumentan la susceptibilidad a la formación de grietas.

La influencia de la velocidad de colada y el diámetro de la barra para diferentes aleaciones de aluminio, en la formación de grietas centrales, se muestra gráficamente en la figura 14. Recientemente se ha demostrado que la velocidad de colada puede elevarse proporcionalmente, controlando el sistema de enfriamiento secundario. (9) (7)

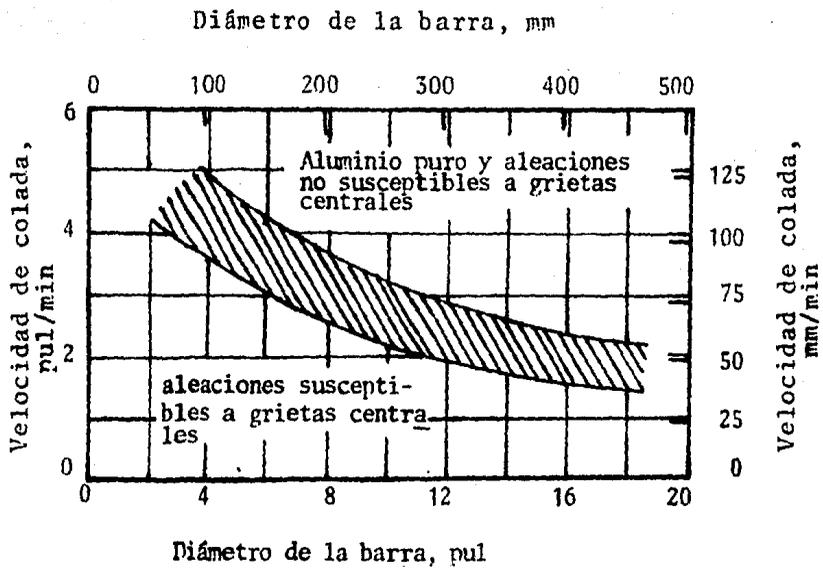


Fig. 14 Velocidad de colada en función del diámetro de la barra y el tipo de aleación (9).

3.2.3. Inclusiones no metálicas.

Las inclusiones no metálicas en el interior de las barras son granos o puntos duros⁽¹⁵⁾, principalmente productos --- óxidos de composición variable Al_2O_3MgO (espinela), Al_2O_3 -- (corindón), SiO_2 (cuarzo). Estos granos duros pueden haberse formado en refusiones anteriores, por sobre calentamiento del baño que produce la oxidación de elementos en la -- aleación, también pueden ser granos de arena, despojos del crisol, etc.

Procesos como la limpieza del crisol, de los canales, de el contenedor, así como de la lingotera, y el empleo de fundentes capaces de eliminar los óxidos disminuyen las inclusiones.

3.2.4. Poros.

La porosidad interna en los lingotes de aluminio aparece en forma de cavidades angulares interdendríticas o como poros esféricos pequeños del tipo mostrado en la figura 15.

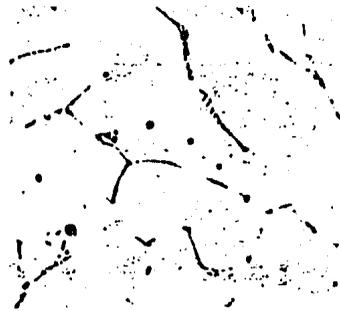
La forma y el tipo de porosidad está asociada con el contenido de hidrógeno (en el caso de poros esféricos es mayor el - contenido de H_2), de la velocidad de solidificación, de la-

rapidez de enfriamiento y de la aleación.

La porosidad interdendrítica (ver fig. 16) resulta del rechazo del H_2 en el sólido hacia el metal líquido.

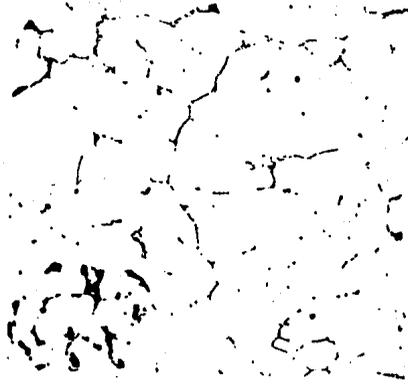
Los poros esféricos son formados por la porción del H_2 que permanece en el metal sólido. El gas en estas pequeñas esferas tiene una alta presión.

Mediante un calentamiento la porosidad interdendrítica angular comienza a redondearse y aparece como pequeñas esferas, figura 17.



Electropulido 400X

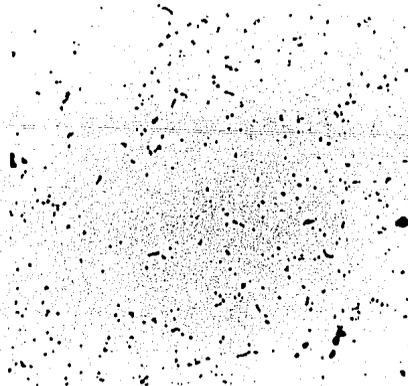
Fig. 15. Poros esféricos en el lingote colado de forma semicontinua con el proceso DC, aleación 1100 (9).



20% H_2SO_4 caliente

100X

Fig. 16. Porosidad interdendrítica angular, aleación 6063. Metals Handbook Vol. 8.



No atacada

50X

Fig. 17. Porosidad angular interdendrítica, después de un calentamiento de homogeneización a $-565^{\circ}C$ por 12 hrs. Tiene la forma de pequeños poros esféricos, aleación 5052. Metals Handbook Vol. 8.

IV. MAQUINA DE COLADA SEMICONTINUA UTILIZADA

Mediante la descripción y disposición del equipo, se pretende dar una idea de la influencia que éste tiene en la calidad superficial de la barra. El equipo de colada tipo vertical con lingotera fija, se encuentra en un laboratorio del IIM - en condiciones operativas (Fig. 18), sus características se enumeran enseguida.

Equipo

Recipiente caliente

Lingotera

Sistema de enfriamiento secundario

Fondo falso.

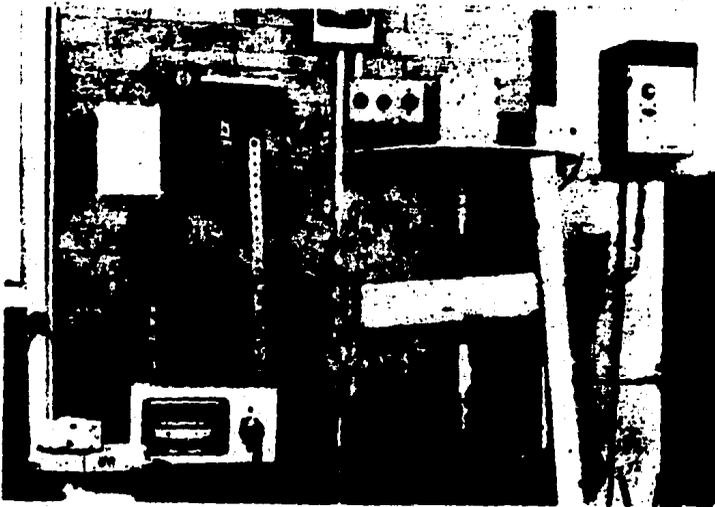


FIG. 18. Fotografía del equipo de colada semicontinua tipo vertical.

4.1 Recipiente caliente

La cabeza caliente como se denomina en el área industrial, - es básicamente un recipiente de forma cilíndrica, construido de un material refractario, que recibe el aluminio líquido y lo alimenta a la lingotera a un flujo constante y con un mínimo de turbulencia.

Con la cabeza caliente se disminuye la longitud efectiva de la lingotera y se permite un rango más amplio en la velocidad de colada. Los parámetros principales de este recipiente -- distribuidor son:

- a) Diámetro interior de la cabeza.
- b) Sobrecabeza introducida en la lingotera.
- c) Temperatura de precalentamiento.
- d) Altura del nivel de aluminio líquido.

Este tipo de sistema tiene como inconveniente, que la solidificación del metal se produce de manera discontinua, debido a que la cabeza tiene un diámetro menor que la lingotera (Fig. 19), lo que produce un reborde que presenta una superficie de contacto para el metal que esta solidificando (Fig. 11), - de esta solidificación discontinua se obtiene una estructura variable en función tambien de la sobrecabeza ⁽¹⁾.

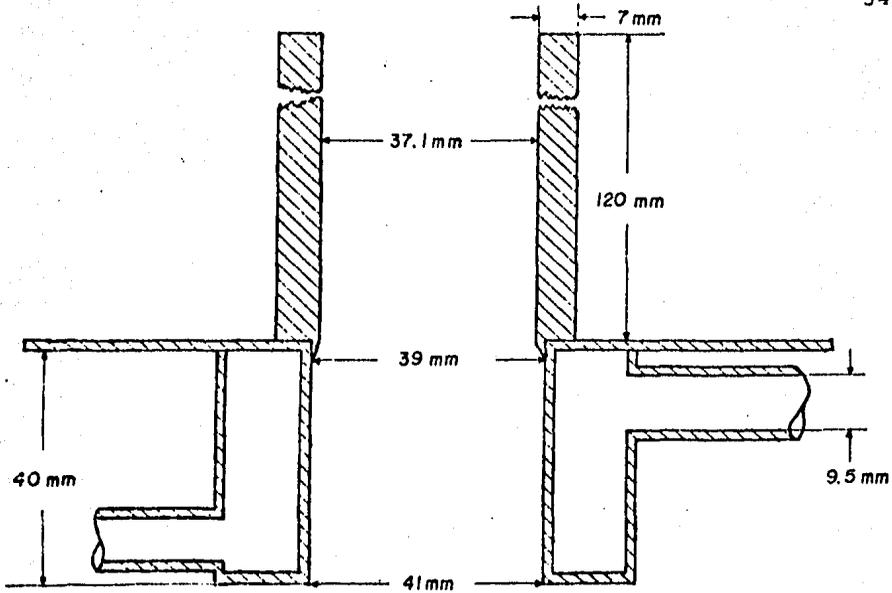


Fig. 19 Sistema de lingotera con cabeza-caliente.

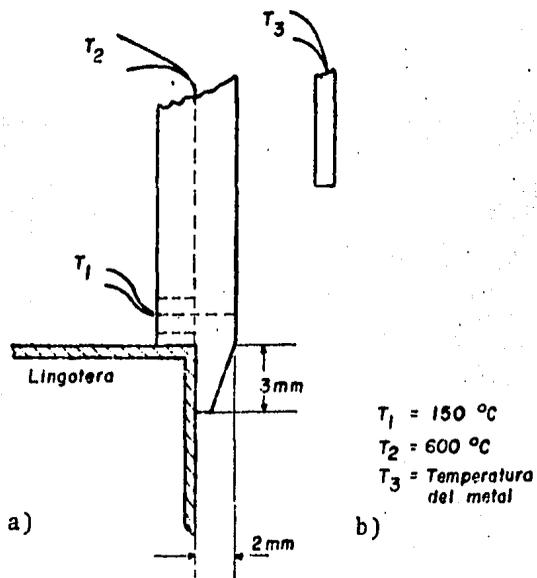


Fig. 20 a) Localización de los termopares (cromel alumel)
 b) Temperaturas de precalentamiento registradas

La profundidad de los pliegues es proporcional al tamaño del reborde (fig. 20) y el grado de formación es afectado por la geometría del reborde, por lo que en este caso se formó una cara en la sobrecabeza con un ángulo de inclinación de 18.5° .

El precalentamiento se hace hasta los 600°C con el fin de -- evitar pérdidas de calor por la gran diferencia de temperaturas existente entre el aluminio líquido y el refractario del contenedor, por otra parte se elimina la humedad que podría originar porosidad. En el caso que el precalentamiento sea superior al óptimo, el aluminio deberá enfriarse más en la - parte posterior del sistema, así observamos que la alta temperatura del contenedor proporcionó un excedente de calor, - que después tendrá que ser retirado.

El control de la temperatura de precalentamiento y del metal se hace mediante termopares (fig. 20b).

El nivel del metal fundido está fuera de la lingotera, lo -- que permite mantener un caudal de alimentación a temperatura poco elevada, necesaria en la obtención de un buen producto. Hay que evitar las variaciones de nivel en la cabeza, ya que la baja densidad del aluminio (2.7 g/cc para aluminio puro) y sus aleaciones⁽¹¹⁾ da como resultado una baja presión metalostática.

4.2. Lingotera.

Es la parte de la máquina considerada como la más importante, debido a las múltiples tareas que desarrolla. La lingotera recibe el metal líquido en un conductor central, de forma cilíndrica en este caso, en el cual solidifica el metal, permitiendo su desplazamiento. Separada del conductor central sólo por el espesor de la pared, se encuentra una chaqueta de agua que fluye formando el sistema de enfriamiento primario.

La lingotera está maquinada en latón 70% Cu, 30% Zn (conductividad térmica $121 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a 600°C ⁽²⁶⁾), es refrigerada en toda su altura para evitar deformaciones en la pared que podrían provocar el enganche y arranque del metal en curso de solidificación, la pared presenta un buen estado superficial y es lubricada antes de la colada. El papel exacto de la lubricación no está completamente aclarado, su acción más evidente es la de facilitar el deslizamiento del metal, en este caso se empleó grasa grafitizada como lubricante.

En cuanto al calor removido por el agua de enfriamiento se llevo a cabo en varias etapas:

1. Transferencia de calor de la cabeza caliente a la lingotera.
2. Transferencia de calor del interior de la barra hacia la superficie de la barra.

3. Transferencia de calor de la superficie de la barra -- hacia la cara interior de la lingotera.
4. Transferencia de calor a través de la pared de la lingotera.
5. Transferencia de calor de la pared externa de la lingotera hacia en agua de enfriamiento.

4.3. Sistema de enfriamiento secundario.

A la salida de la lingotera se inicia el enfriamiento secundario, el cual remueve el calor de la corteza y del núcleo - solidificando totalmente la barra.

El sistema es formado por una serie de boquillas que proyectan chorros de agua a la superficie de la barra.

El enfriamiento debe ser uniforme y el mínimo indispensable, pues el sobreenfriamiento es perjudicial.

4.4. Fondo falso.

El falso fondo se fabricó con una parte de cobre (cabeza) y otra parte de latón con rosca interior (Fig. 21). Tiene un tornillo de acero en el centro de 5/8 de pulgada de diámetro.

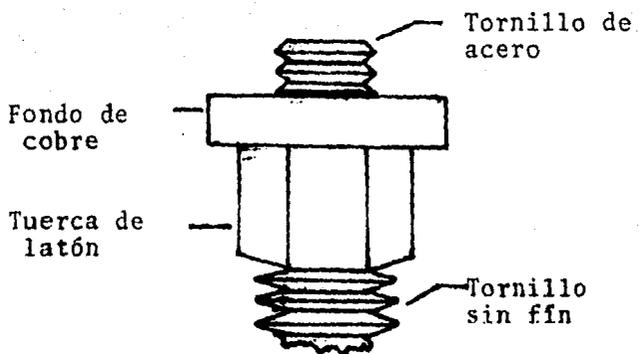


Fig. 21 Componentes del falso fondo.

Las funciones básicas del fondo falso son:

- Tapar la lingotera por su parte inferior.
- Acelerar la solidificación inicial.
- Suministrar la fuerza de extracción.

Al inicio de la operación de colada, el aluminio que fluye del contenedor a la lingotera hace contacto con el falso - fondo acelerando la solidificación, quedando así atrapado el tornillo central, permitiendo iniciar la extracción de la barra a la velocidad requerida.

Las operaciones efectuadas antes de colar el aluminio son - las siguientes:

1. El falso fondo se une por medio de rosca a un eje rígido (tornillo sin fin).
2. Se introduce la cabeza del fondo falso a la lingotera.
3. Se sella con rebaba de aluminio el espacio entre la -- pared de la lingotera y el fondo de cobre.

V. METODO EXPERIMENTAL

5.1. Variables del proceso.

Las variables modificables y con las cuales se trabajó de manera directa e inmediata son: la temperatura de colada del -- aluminio, la velocidad de colada, el flujo de agua del sistema primario (lingotera) y el flujo del sistema de enfriamiento secundario (rociador).

Las consideraciones para asignar los valores de estas variables fueron hechas de la siguiente manera.

5.1.1 Temperatura de colada.

Partiendo de calcular el punto de fusión de la aleación de -- aluminio de una manera experimental y una vez obtenido éste, se toma en cuenta el tiempo que implicaría elevar y mantener la temperatura del metal por arriba de su punto de fusión, de la información existente sobre la solubilidad del H_2 en el -- (17) aluminio (Fig. 22) y la solubilidad del H_2 en aleaciones -- Al-Mg (Fig. 23). Se determinó que a una temperatura de --- 737.5'C el contenido de H_2 es muy elevado, por lo que es recomendable trabajar a temperaturas inferiores a ésta.

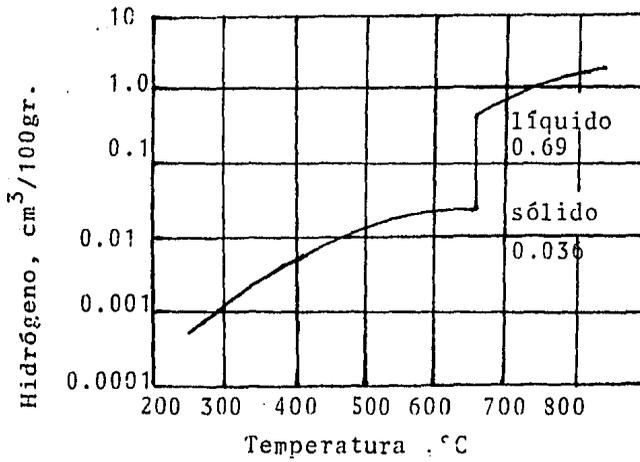


Fig. 22 Solubilidad del hidrógeno en aluminio sólido y líquido. (17)

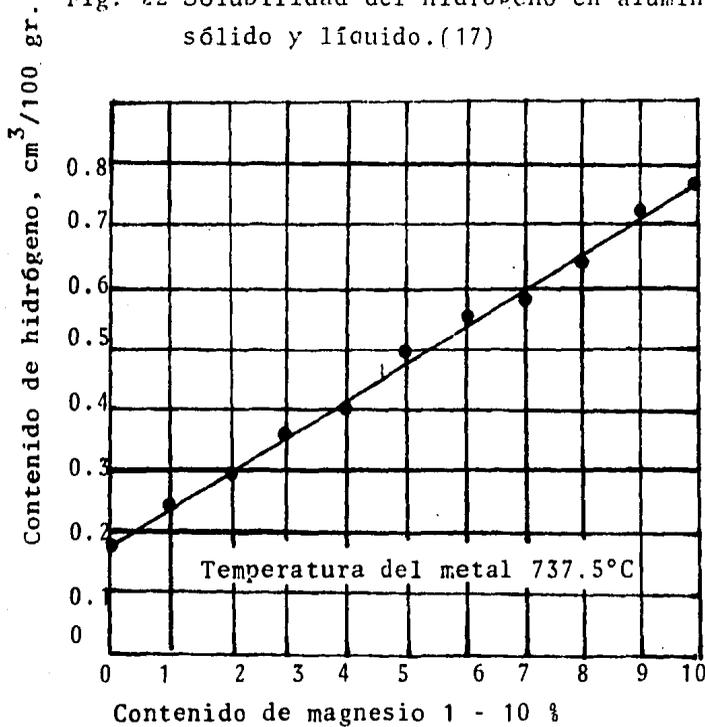


Fig. 23 Efectos de la adición de magnesio en aluminio. (17)

5.1.2. Velocidad de colada.

La velocidad de colada depende, de los factores que rigen la velocidad con que aumenta el espesor de la cáscara, este --- espesor es función de la velocidad de extracción de calor y el tiempo de permanencia de la barra en la lingotera⁽¹⁶⁾, figura 24.

$$\text{Tiempo de permanencia} = \frac{\text{longitud de la lingotera}}{\text{Velocidad de colada}}$$

De la figura 14 predecimos que debido al diámetro de la barra y el tipo de aleación, trabajaremos con velocidades de colada superiores a los 12 cm/min.

En la tabla 1 se muestran los valores calculados del tiempo de permanencia, determinados por la longitud efectiva de la lingotera a una velocidad particular.

TABLA I

Velocidad de colada		Tiempo de permanencia en la lingotera
cm/min	cm/seg	seg.
13	0.2166	17.07
14	0.2333	15.85
15	0.25	14.8
16	0.2666	13.873
17	0.2833	13.058
18	0.3	12.33
19	0.3166	11.6866
20	0.3333	11.11
21	0.35	10.57
22	0.3666	10.11
23	0.3833	9.53
24	0.4	9.25
25	0.4166	8.88
26	0.4333	8.53
27	0.45	8.22
28	0.4666	7.93
29	0.4833	7.65

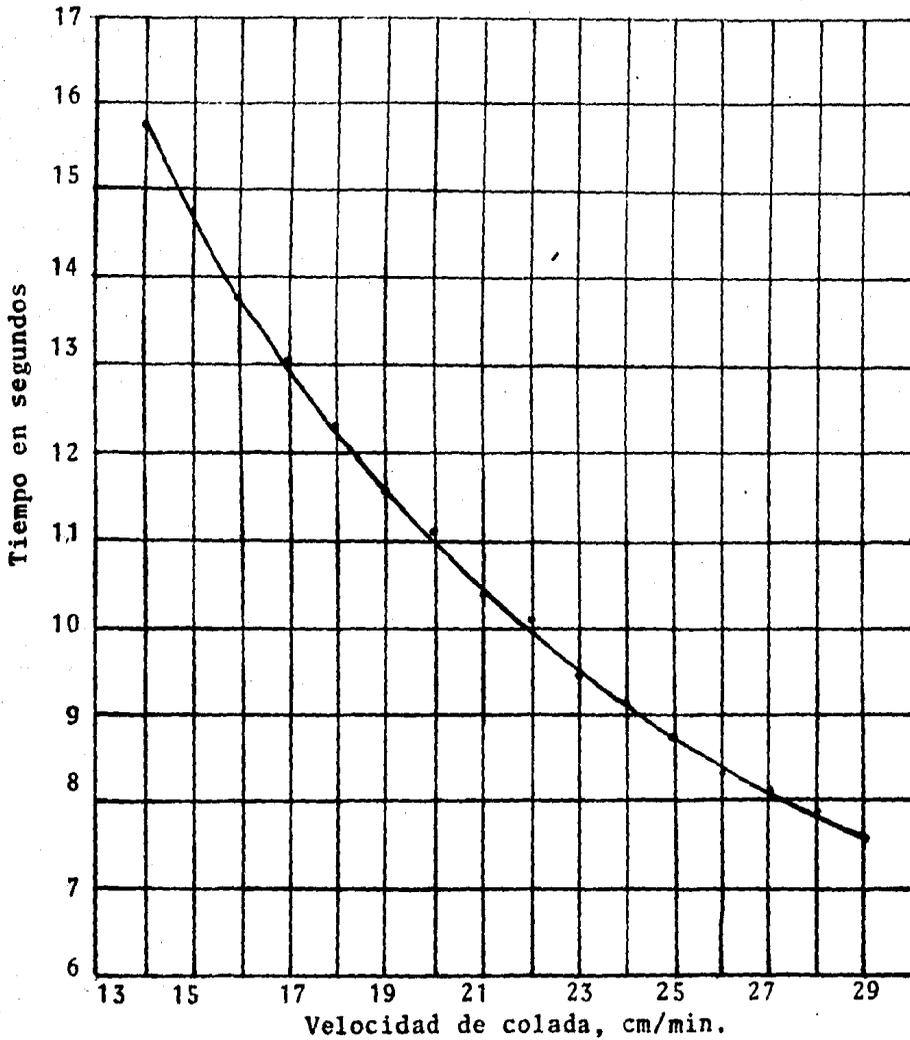


Fig. 24 Tiempo de permanencia de la barra, en la lingotera para diferentes velocidades de colada, longitud de la lingotera 37 mm.

5.1.3. Flujos primario y secundario.

Para la obtención de estos valores se recurrió a la información del IQM. T. Rangel, quien diseñó la lingotera y calculó la extracción de calor en ella, los valores iniciales proporcionados por éste así como los de otras variables del proceso se encuentran en la Tabla 2.

TABLA 2. PARAMETROS OBTENIDOS.

Parámetros	Valores
T_c Temperatura de colada °C	685 a 750
v_c Velocidad de colada cm/min	más de 12
Nivel del metal en la cabeza caliente, cm.	6 a 10
Temperatura del agua para enfriamiento °C	16 a 18
T_f Temperatura de fusión del Al, °C	660
f_p Flujo primario l/min.	8.2 a 10
f_s Flujo secundario l/min.	1.2 a 3

5.2 Análisis del material.

Los estudios se efectuaron en las barras de 4.02 cm. de diámetro obtenidas por colada semicontinua con aluminio de bajo contenido de aleantes, la composición de esta aleación está en la tabla 3.

TABLA 3. COMPOSICION QUIMICA DE LA ALEACION

Composición %	Mg	Si	Fe	Mn	Cu
	1.65	0.88	0.55	0.35	0.1

Al igual que cualquier otro tipo de producción se necesitan métodos de ensayo y control en la fabricación de las barras, estos métodos son de especial importancia debido a los defectos que se producen en la colada continua.

(20)

En el examen de calidad de las barras de Al, se consideran - los siguientes aspectos:

- a) La inspección visual.
- b) El control dimensional.
- c) Examen de calidad interna.

5.2.1 Ensayos de calidad.

Las determinaciones se efectuaron en la superficie periférica de la barra tal como se obtiene de la colada, así como de la zona bajo ésta mediante un descortezamiento de ensayo de 1 a 3 milímetros de profundidad, el cual nos permite comprobar la existencia bajo superficie de perforaciones, grietas y la profundidad de los pliegues.

Para la observación de los defectos internos se utiliza el -
 corte profundo de la superficie, según las dimensiones anota-
 das en la figura 25.

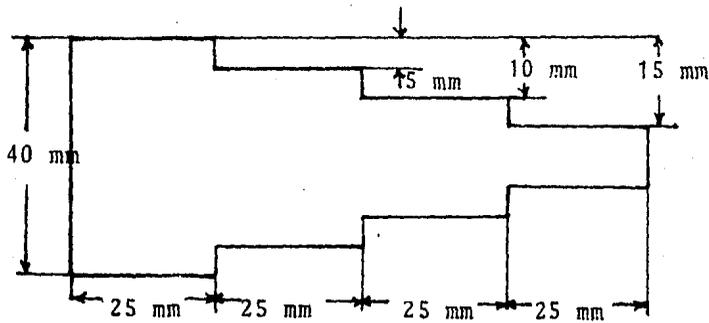


Fig. 25 Probeta de control de calidad interna.

5.2.2 Análisis metalográfico.

El análisis se realizó en los siguientes planos: plano α que corresponde a la sección transversal de la barra; plano β que es el plano longitudinal que contiene al eje de la barra (Fig. 26).

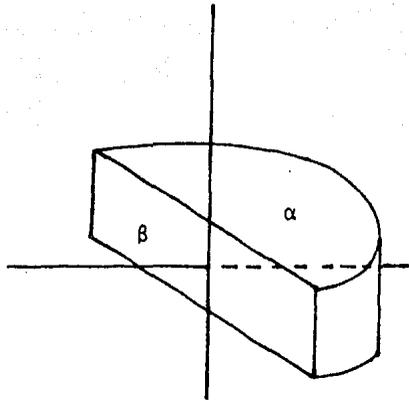


Fig. 26 Planos para análisis metalográficos.

5.2.3 Técnicas metalográficas.

Las probetas destinadas para la observación de estructuras - fueron pulidas hasta papel esmeril 600 y posteriormente se - pulieron con alúmina de 0.1 micras y con magomet.

Los ataques químicos se realizaron con los reactivos siguientes.
(8)

REACTIVO	OBSERVACIONES	COMPOSICION
Tucker's	El ataque es por inmersión uso macroestructura.	HF (conc.) 15 ml.
		HCl (conc.) 45 ml.
		HNO (conc.) 15 ml.
		H ₂ O ³ 25 ml.
Perryman	El ataque es por inmersión uso microscopio	HNO ₃ (conc.) 45 ml.
		HF (conc.) 5 ml.
		H ₂ O 50 ml.

VI.- RESULTADOS

De acuerdo a las características de los defectos encontrados, mediante los métodos de ensayo⁽²¹⁾ en la superficie y - bajo la superficie de la barra, registrados en la tabla 4, - los resultados se dividieron en :

- Variables de operación
- Lingotera
- Defectos encontrados
- Solidificación
- Estructura de colada

6.1 Variables de operación

El manejo de las las variables, tiene como función alcanzar un equilibrio entre la extracción de calor del sistema de - colada continua y las propiedades térmicas de la aleación, que permita obtener barras de la calidad deseada. Las variables que intervienen en la práctica experimental estan anotadas en la tabla 5 y gráficas en la figura 31. Su influencia sobre la calidad superficial es ejemplificada en seguida.

TABLA 4 METODOS DE ENSAYO

METODO	INDICACION PARA						
	GRIETAS TRANSVERSALES		POROS	PLIEGUES	SEGREGACION	EXUDACION	SANGRADO
	D	G					
Inspección visual de la superficie.	X	X		X	X	X	X
Escarpado de ensayo (1 mm).	X	X		X			
Control de defectos internos		X					
Análisis metalográfico.	X	X	X	X	X		X

D: débiles

G: gruesas

6.1.1 Velocidad de colada

Es la velocidad de colada la variable que permitió la obtención de las primeras barras y determina el efecto de las otras variables en el proceso. Una velocidad de colada menor a 20 cm/min hace imposible la obtención de las barras por este sistema (Figs. 27 y 29), ya que en un momento dado se extrae todo el calor necesario para mantener al metal líquido en la lingotera, aún cuando existe aluminio líquido en la cabeza-caliente. Colar a velocidades altas, implica eliminar una cantidad excedente de calor por medio de la lingotera a expensas del calor de solidificación; en consecuencia se reduce el espesor de la piel solidificada a la salida de la lingotera y por ende se aumenta el riesgo de la refusión y el derrame del metal.

6.1.2 Temperatura de colada

El control del factor temperatura evita en particular la rotura de las barras (Figs. 29 y 31), este se exige debido a que la velocidad de colada, el diámetro de la barra y el flujo secundario tienen gran influencia en la temperatura del metal por solidificar, los sobrecalentamientos pequeños del aluminio evitan la formación de grietas y desgarres, permitiendo también el aumento de la velocidad de colada, disminuyéndose así el tiempo de permanencia del metal en la lingotera.



Fig. 27 Barra rota por una velocidad de colada baja, $v_c = 13$ cm/min, y $T_c = 720^\circ\text{C}$.



Fig. 28 Rotura de la barra y derrame de metal, provocados por velocidad alta; $v_c = 27$ cm/min y $T_c = 705^\circ\text{C}$.



Fig. 29 Barra rota a causa de una elevada temperatura de colada; $T_c = 720^\circ\text{C}$ y $v_c = 22$ cm/min.



Fig. 30 Rotura en estado pastoso, presencia de piletta líquida, enfriamiento deficiente; $v = 12$ cm/min, $T_c = 720^\circ\text{C}$, $f_c = 8.14$ l/min y $f_s = 1.767$ l/min.

6.1.3 Enfriamiento en la lingotera.

El enfriamiento primario controla en general, la velocidad de crecimiento de la piel solidificada, un excesivo enfriamiento, trae como consecuencia el enfriamiento del metal que formara la barra (aumentando la interfase sólido-líquido), el cual no podrá reducir su volumen lo suficiente - por el poco calor que le queda y se entrapa en la lingotera, rompiéndose la barra en un estado pastoso (Fig. 27).

Un enfriamiento menor en la lingotera, puede provocar -- segregación, así como una línea de rotura por adhesión de la piel solidificada al molde por un espesor mínimo (Fig. 30).

6.1.4 Enfriamiento secundario.

El control del enfriamiento secundario, en relación con el control del enfriamiento primario es más severo, pues su influencia sobre la forma y profundidad de la pileta del aluminio líquido es grande (ver figuras 49 y 53), por lo que un excesivo enfriamiento secundario reduce la pileta, aumentando la contracción del metal, pero puede solidificar totalmente la barra.

Un enfriamiento secundario deficiente, provoca un ensanchamiento de la punta de la pileta, aumentando la posibilidad de la rotura de la piel y el derrame del metal (Fig. 30).

El aluminio líquido al estar en una región de la lingotera de menor conductividad térmica, recalienta la piel en ese punto, por lo que la piel se refusiona y se perfora.

- Muestras registradas en la tesis
 ● Muestras no registradas en la tesis

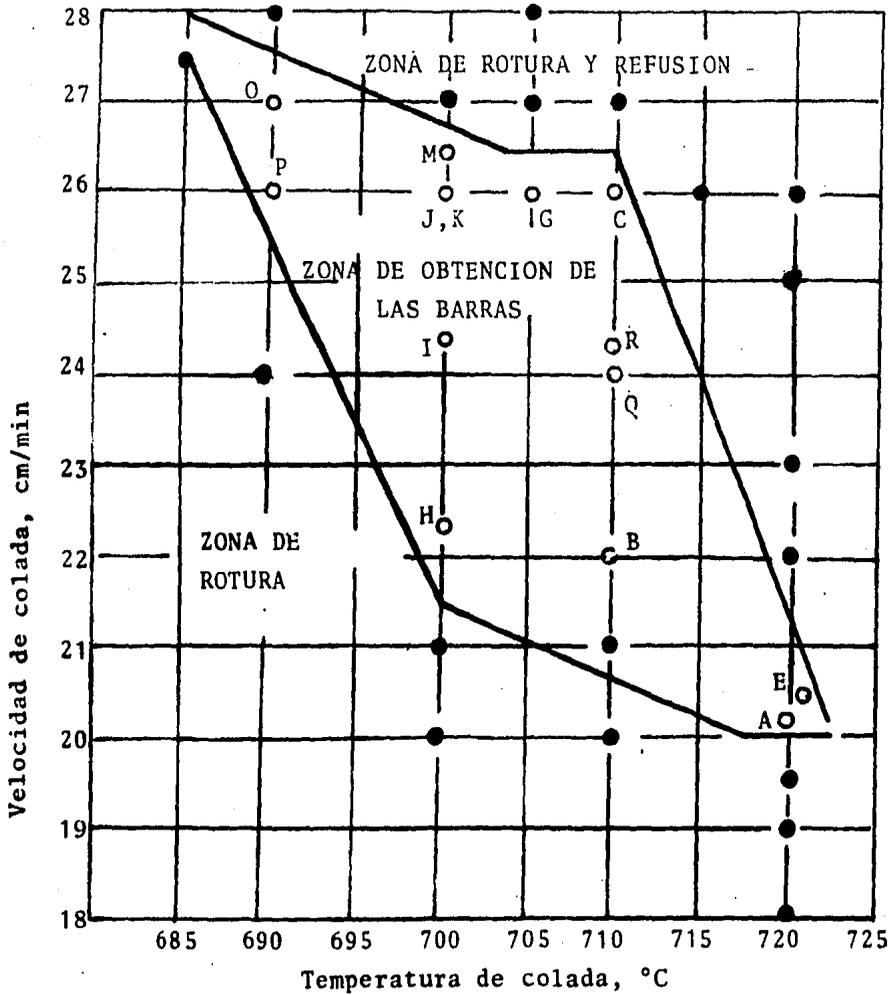


Fig. 31 Gráfica de las variables de operación en donde se muestra su influencia en la velocidad de solidificación del aluminio.

La cantidad de agua del enfriamiento directo, es determinada por el calor que debe removerse de la corteza y del núcleo de la barra, y solamente puede variar en función de, - la velocidad de colada y de la calidad interna del producto (forma, distribución y tamaño del grano).

En la tabla 5 se encuentran los valores para los flujos: primario y secundario.

TABLA 5 REGISTRO DE LAS VARIABLES DE OPERACION

Registro de la muestra	T_c °C	v_c cm/min	f_p l/min	f_s l/min
T	690	28.0	9.568	2.486
O	690	27.	9.568	2.486
M	700	26.5	9.112	2.348
J	700	26.	9.568	2.486
G	705	26	9.568	2.486
C	710	26	9.568	2.486
P	690	26	9.568	2.486
R	710	24.2	8.7	2.346
N	710	24.	9.695	2.036
Q	710	24	9.568	2.346
I	700	24.3	9.568	2.036
H	700	22.3	10.72	1.256
B	710	22.	9.568	2.036
W	720	22.	9.112	2.236
E	723	20.5	9.335	2.263
A	720	20.2	9.112	2.486
S	720	13.	9.112	2.263

6.2 LINGOTERA

La calidad de la piel solidificada, en mucho depende de la transferencia de calor uniforme en la lingotera, en los casos en que el tiempo de permanencia del metal en la lingotera es mayor a 8.5 segundos (Fig. 24) esto es muy notorio, --pués las barras presentan mayor cantidad de defectos en la región de entrada del agua de enfriamiento a la lingotera.

La contribución de la lingotera a la disminución de los defectos superficiales, será mayor si se contempla la eliminación de las siguientes condiciones:

- Mala alimentación del agua a la lingotera.
- Excesivo desgaste de la lingotera.
- Deficiente o excesiva lubricación.
- Mal alineamiento de la lingotera con la barra extractora.

Estas condiciones intervienen en la formación de las, grietas, desgarres y de las bandas superficiales.

6.3 Defectos encontrados

Los defectos presentes en las superficies analizadas fueron:

- 1.- Pliegues o bandas
- 2.- Grietas superficiales
- 3.- Gotas exudadas irregulares
- 4.- Sangrado
- 5.- Líneas de fricción

En seguida son ejemplificados estos, considerandose además los factores del proceso (Fig. 48) que contribuyen a su formación.

6.3.1 Pliegues

Estos se forman en las barras perpendicularmente a la dirección de extracción (Fig. 35) pero no ocupan toda el área superficial de estas. La importancia de las bandas presentes en las barras, radica en que aparecen en todas las barras que se obtienen en las condiciones de operación de la zona 1, - del diagrama mostrado en la figura 32.

Las siguientes gráficas demuestran, que el número de pliegues disminuye conforme se aumenta la velocidad de colada (Figs. 33 y 36) y que además existe un grosor máximo para estos pliegues el cual disminuye considerablemente (Fig. 34) al aumentarse la velocidad de extracción de las barras.

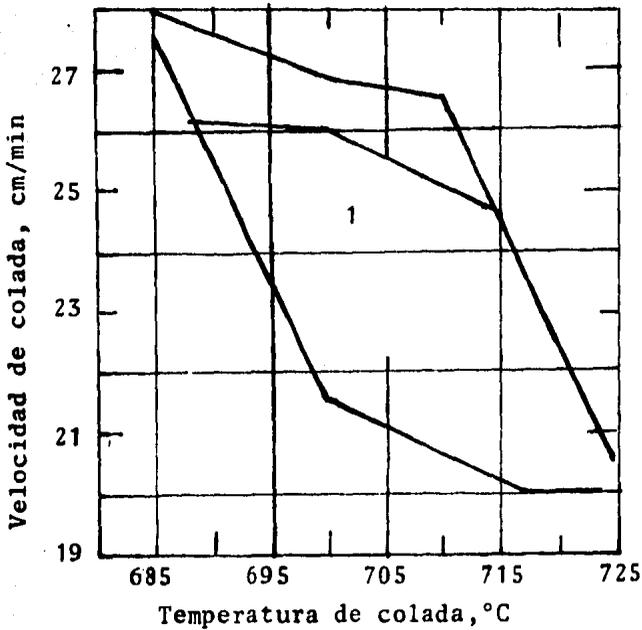


Fig.32 Diagrama de obtención de barras, zona 1 formación de bandas.

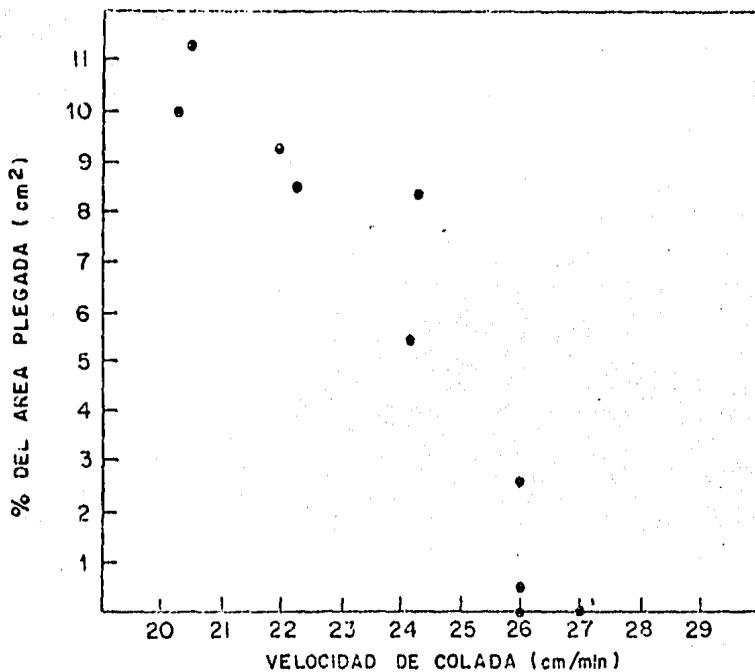


Fig. 33 Relación por ciento de pliegues-velocidad de colada.

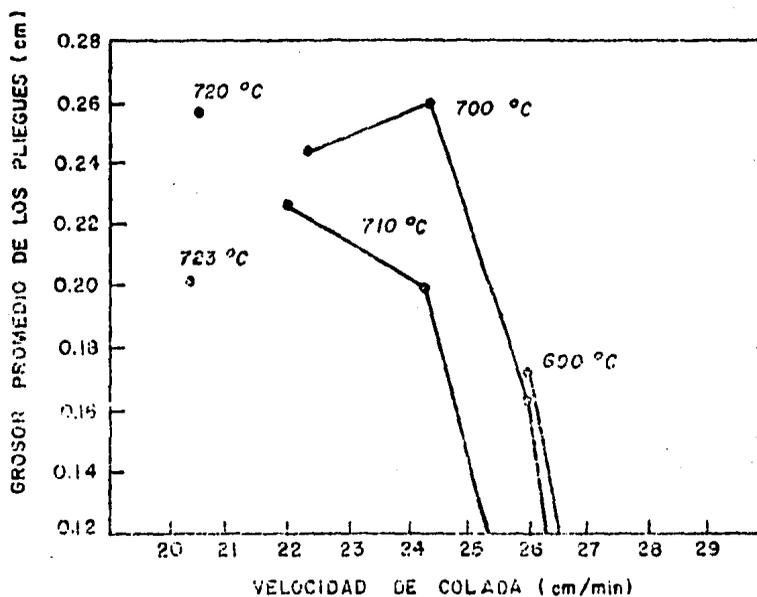


Fig. 34 Gráfica grosor promedio de los pliegues, contra velocidad de colada, tomando en cuenta la temperatura de colada.

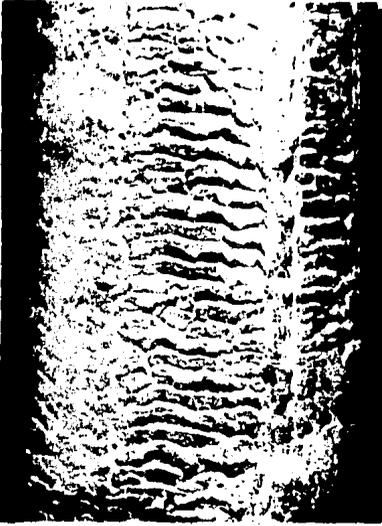


Fig. 35 Topografía de una barra de colada semicontinua, $v_c = 20.2$ cm/min.

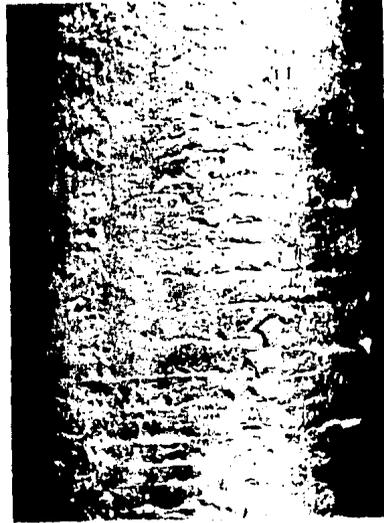


Fig. 36 Disminución del número de pliegues, $v_c = 24.$ cm/min.



Fig. 37 Grietas transversales presentes a intervalos regulares.

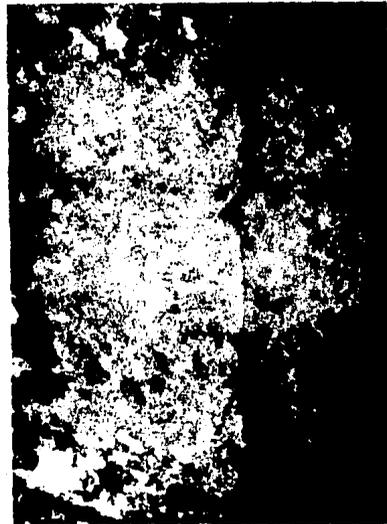


Fig. 38 El plano β , permite observar la profundidad de estas grietas.

6.3.2 Grietas superficiales

Las grietas exteriores pueden presentarse de distinta manera y por diferente causa. Una solidificación discontinua llega a producir una grieta transversal débil. En las figuras 37 y 38 se distinguen las grietas entre los pliegues, se originan por esfuerzos de tipo térmico, estas grietas se presentan en la zona 2 (Fig. 39) del diagrama de obtención de barras.

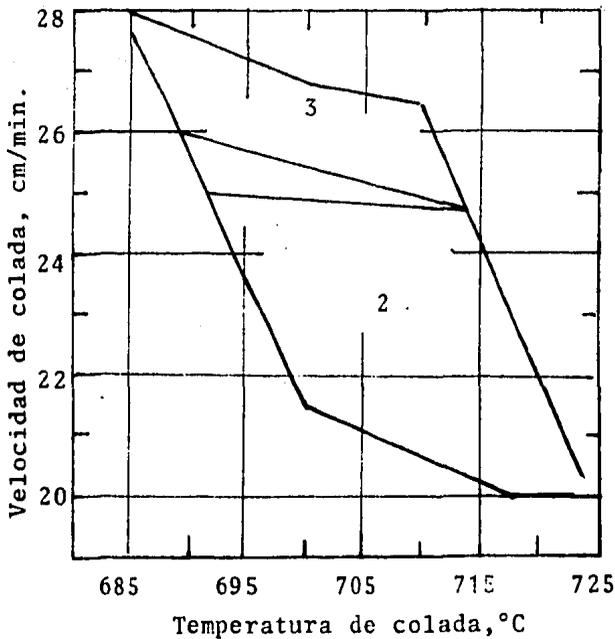


Fig. 39 Diagrama de obtención de barras, zonas de grietas

Las grietas transversales gruesas ocurren por desgarramiento de la piel formada por los primeros cristales si esta es débil, en un momento dado, y el enfriamiento no es lo suficientemente intenso. El aspecto de estas grietas se puede ver en la figura 43 y se originan en la zona 3 del diagrama.

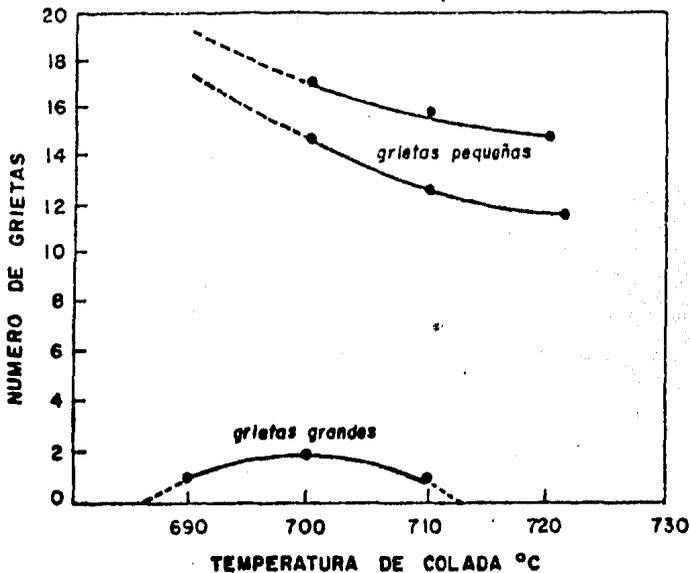


Fig. 40 De la diferencia en el número de grietas presentes, se obtienen dos zonas con características distintas.

Una comprobación del diferente origen de las grietas, se consigue al graficar los valores de: el número de grietas, la longitud y la profundidad de éstas. En la figura 40, se determinan gráficamente estas dos zonas de agrietamiento.

De las figuras 41 y 42 resulta que las grietas pequeñas disminuyen, mientras que las grietas grandes aumentan conforme la velocidad de colada se incrementa, esto es debido al origen mecánico de las grietas gruesas; el aumento en la profundidad de las grietas débiles al incrementar la temperatura del metal (fig. 42), nos comprueba su origen térmico.

Para ambos casos, la tendencia a aumentar en tamaño y en profundidad es mayor a 700°C.

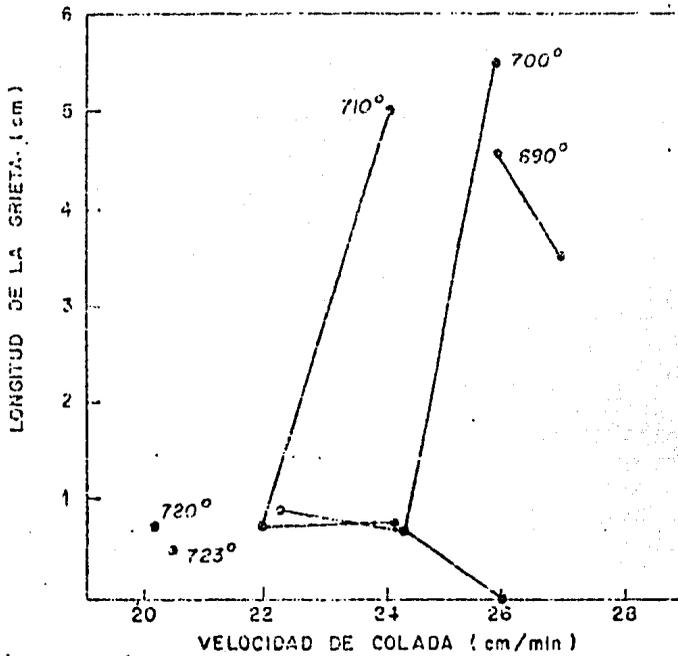


Figura 41.

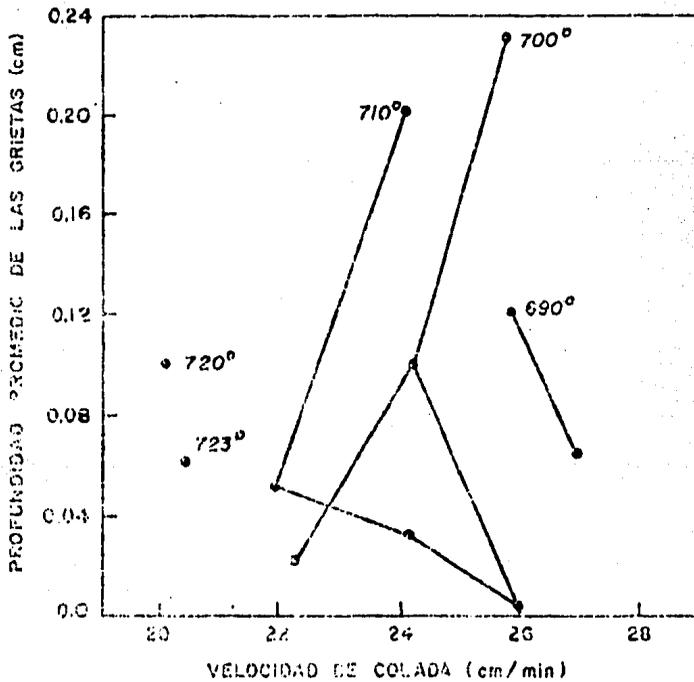


Fig. 42 Profundidad de las grietas como función de la temperatura y de la velocidad de colada.



Fig. 43 Barra que presenta desgarres en la piel, grietas gruesas.



Fig. 44 Gotas exudadas irregulares, topografía asociada.



Fig. 45 Topografía de una barra de colada semicontinua, líneas de fricción.



Fig. 46 Barra obtenida a; $T = 690\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $v_c = 27\text{ cm/min}$, sangrado superficial.

6.3.3 Gotas exudadas irregulares.

Estas gotas enriquecidas de soluto⁽⁶⁾, se presentaron sólo -- en barras obtenidas en condiciones extremas de temperatura y velocidad (710°C y 26 cm/min). Son de forma irregular y ocupan una área promedio cada una de 0.9 cm², la topografía asociada (Fig. 44) no presenta pliegues o grietas.

6.3.4 Líneas de fricción.

Son el resultado de un proceso de segregación de desarrollo continuo⁽⁶⁾, se presentan en todas las barras obtenidas, son de un espesor aproximadamente constante, pero disminuyen --- cuando se aumenta la velocidad de colada y se disminuye la - temperatura del metal colado (Fig. 46).

6.3.5 Sangrado.

Se trata de una fuga del metal líquido, hacia el espacio -- dejado al romper la piel (Fig. 46), el sangrado superficial se puede presentar en las barras obtenidas en la zona 4, en el diagrama de la figura 47.

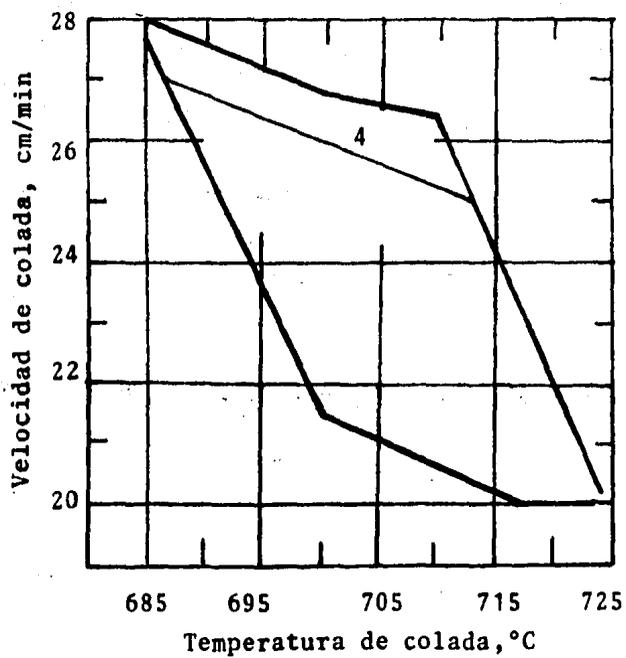


Fig.47 Obtención de barras por colada semicontinua, zona 4 presencia de sangrado.

Fig. 48 DEFECTOS QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN LA COLADA SEMICONTINUA

67

Factores a considerar	SOLIDIFICACION DISCONTINUA	SANGRADO	GRIETAS EXTERNAS		SEGREGACION	POROS	ROTURA	EXUDACION
			D	G				
Molde deformado				X				X
Velocidad de extracción alta		X		X				X
Enfriamiento secundario defectuoso	X	X		X	X			X
Enfriamiento defectuoso en la lingotera	X		X	X	X			X
Sobre-cabeza	X		X		X			X
Lubricante				X		X		X
Velocidad de extracción lenta	X		X		X			X
Temperatura de colada excesiva			X	X	X	X	X	X

D: débil G: gruesa

6.4. Solidificación.

En colada continua el espesor de la piel solidificada varía con la distancia, al viajar el metal dentro de la lingotera, por lo cual, en la operación de colada debemos considerar ; la forma que adquiere la pileta de metal solidificado -- (fig. 49), y que esta piel además tenga un grosor crítico (aproximadamente de 5 mm) necesario para contener el metal todavía en estado líquido. En mucho depende la geometría de la pileta y la longitud metalúrgica del enfriamiento secundario, por lo que este debe ser lo más uniforme en toda la barra. En la superficie de la lingotera la velocidad con la que se transfiere el calor, se reduce considerablemente por la presencia de los dos espacios de aire formados (gaps).



Fig. 49 Forma de la pileta líquida, en una barra colada a : $T_c = 710 \text{ }^\circ\text{C}$ y $V_c = 26 \text{ cm/min}$.

6.5. Estructura de colada.

Una vez caracterizadas las topografías de las barras, se --
observo la macroestructura y la microestructura asociada a -
estas, con el objeto de determinar algun mecanismo que expli-
que la formación de estos defectos durante el proceso.

6.5.1. Macroestructura.

Sobre la formación de las diversas estructuras observadas -
se puede decir lo siguiente:

- La figura 50 muestra una barra de estructura de grano ---
equiaxial pequeño, está estructura se logra con tiempos de
permanencia del metal en la lingotera mayores a 9.5 segundos.

-La estructura de grano equiaxial que se forma en las super-
ficies de las secciones longitudinales (ver figuras 50, 51,
52 y 53), se debe al rápido enfriamiento que soporta la capa
periférica, con lo que la fuerza inductora de la nucleación
de gérmenes es muy elevada, por lo que se forman estos gra-
nos.

- La estructura columnar mostrada en la figura 53, es característica de una aleación de bajo contenido de soluto⁽⁹⁾, - la cual se ve muy influenciada por la velocidad de coldada y por el enfriamiento, así mismo nos indica si el enfriamiento es homogéneo para la superficie de la barra, en caso contrario, la dirección de los granos columnares no coincide con el eje central longitudinal de la barra.

- El metal contenido en la lingotera llega a enfriarse por debajo de la temperatura de solidificación (Figs. 52 y 53) -- antes que los granos columnares alcancen el centro, formando se una zona central de granos equiaxiales, en vez de alargados, partiendo de núcleos de cristalización situados en el centro.

6.5.2 Microestructura.

En el plano α de una barra(*), que sólo presenta líneas de fricción, se observó la región próxima a la superficie (Fig. 54), esta presenta una banda de segregación periódica muy --- pequeña, la subestructura es dendrítica con bordes segregados, y el espesor máximo de la banda es de 900 μm .

En la dirección longitudinal presenta las característi- cas de una banda de segregación periódica, de una longitud - mayor que las encontradas en el plano α . Es decir que presen- ta en sus dos plano α y β una segregación al parecer de tipo periódico.

Las bandas segregadas presentan un cambio notable de -- estructura respecto al resto de la estructura de la barra (Fig. 55), pero no existe una separación neta de ambas zonas, si -- bien aparece una zona más clara a continuación de la capa --- periférica (Fig. 56), que podría contener menor cantidad de elementos aleantes. El espaciado celular (Fig. 57), es decre-- ciente hacia el interior de la barra.

* Muestra registrada como G: $T_c = 705^\circ\text{C}$ y $v_c = 26.5$ cm/min.



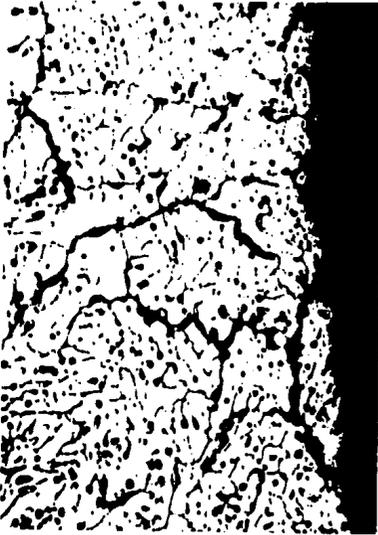
Reactivo Perryman 50X

Fig. 54 Plano α , región periférica, muestra G.



Reactivo Perryman 50X

Fig. 55 Plano β , región periférica, muestra G.



Reactivo Perryman 200X

Fig. 56 Región periférica, plano β , muestra G.



Reactivo Perryman 200X

Fig. 57 Plano β , a 0.9 - milímetros del borde periférico, muestra G.

TABLA 6

TOPOGRAFIA SUPERFICIAL	ORIGEN	FIGS. No.	REFERENCIA
ONDULADA	Formación de un espacio de aire, refusión parcial de la cáscara, deformación por presión metalostática, extracción de calor grande.	35	Buxmann(6)
		36	
		37	Siebell(4)
			Emley(4)
			Collins(4)
GOTAS EXUDADAS IRREGULARES	Formación de un espacio de aire entre la lingotera y la barra, refusión.	44	Buxmann(6)
LINEAS DE FRICCIÓN	Segregación inversa, presión metalostática en primer espacio de aire.	45	Mc Cubbin(22)
GRIETAS GRUESAS	Rotura de la piel, tensión mecánica.	43	
GRIETAS DEBILES	Fractura de la piel, tensión -- térmica, extracción de calor grande.	37	Collins(4)
		38	
SANGRADO	Rotura de la piel, flujo del metal líquido.	46	Saucedo(23)

VII DISCUSION

La discusión se hace en base a las características de los defectos superficiales que se encuentran sintetizados en la tabla 6, tomando en cuenta la información existente en la literatura sobre el tema, así como los datos obtenidos en las barras elaboradas en el IIM.

7.1 Formación de los defectos.

7.1.1 Pliegues.

Cuando se producen, suele ser, debido a una solidificación discontinua al variar el caudal de metal líquido, este rebasa el nivel de la piel solidificada pasando entre ésta a la pared de la lingotera. Como se muestra en el esquema de la figura 58, en la cima de la lingotera, hay una extracción de calor por la sobre-cabeza, ya que se encuentra introducida en la lingotera, por lo que la cáscara solidificada adquiere la forma del reborde, la piel desciende del estado a y b, permaneciendo en contacto con la cara horizontal de la cabeza, mientras esto sucede se forma un espacio de aire arriba del menisco, disminuyéndose la extracción de calor (estado b), el metal líquido ejerce una fuerza que deforma la piel, dentro de estas condiciones el aluminio líquido es bloqueado y no llena el espacio (estado d), eventualmente, el aluminio líquido funde parte de la cáscara, una parte del líquido entra -- (estado e), llenando despues el espacio (estado f) y el proceso se repite (estado g).

El mecanismo propuesto es una variación al presentado - por Bergmann ⁽¹⁾, sólo que este caso en particular, se tomo en cuenta la formación de las grietas(débiles), los pliegues superficiales, y la piel solidificada que conserva la forma del reborde de la sobre-cabeza(Figs. 60 y 61).

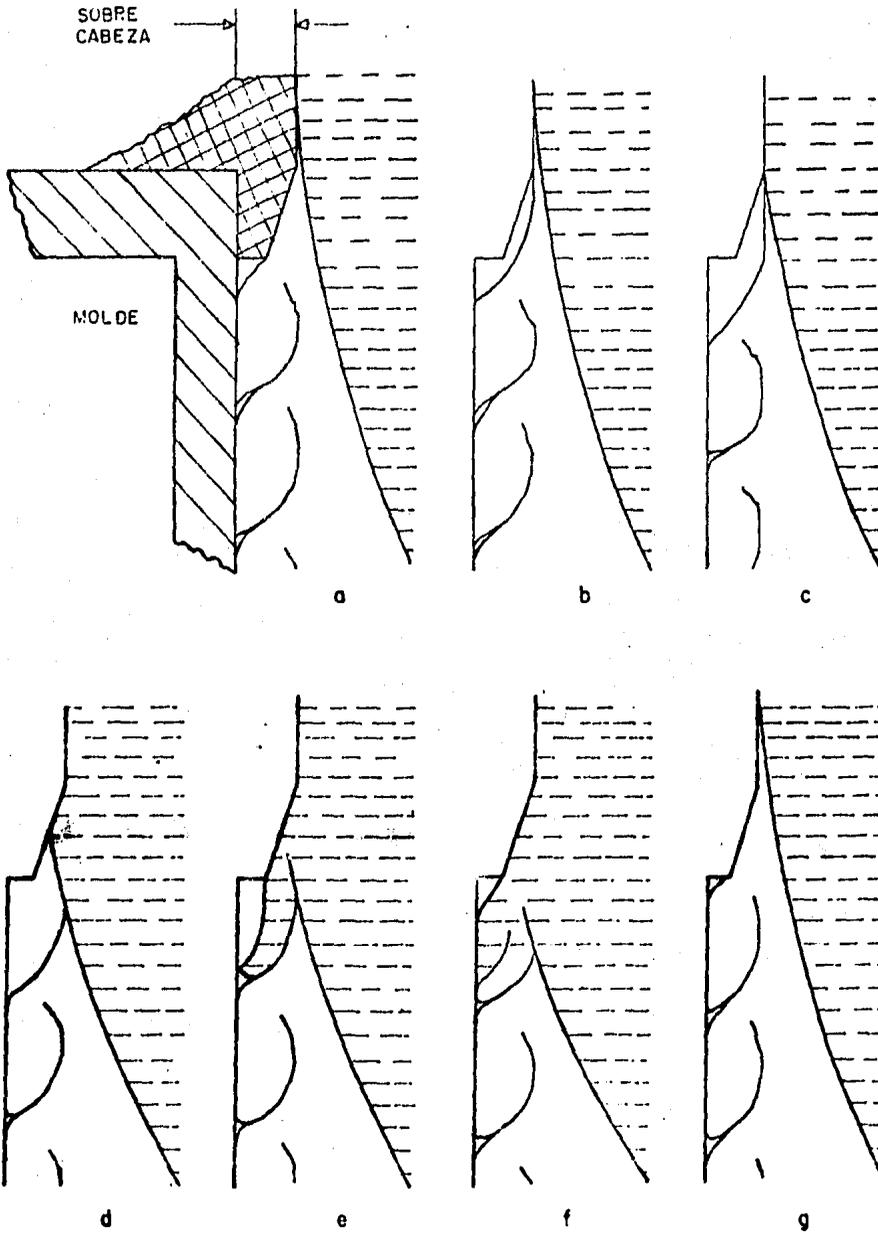


Fig. 58 Esquema del mecanismo propuesto para el caso de solidificación discontinua



Reactivo Perryman 100X

Fig. 59 Pliegues por solidificación discontinua, grieta débil presente.



Reactivo Perryman 100X

Fig. 60 Pliegues, muestra B, deformación de la piel y forma de la sobre-cabeza.



Reactivo Perryman 50X

Fig. 61 Muestra B, plano α , estructura de una banda de solidificación discontinua.



Fig. 62 Línea de fricción originada en el primer espacio de aire, por refusión y segregación.

7.1.2 Líneas de fricción.

Estás líneas nacen en el primer espacio de aire formado ---- (Fig. 62), se propone el mecanismo esquematizado en las figuras 63 y 64, en donde se considera además el trabajo(8) y la posibilidad de una extracción de calor puntual relacionada con el perfil presentado por la lingotera.

Se plantea como primer etapa, la refusión parcial de la superficie debido a la formación de un espacio entre la barra y la superficie de la lingotera. El mecanismo de entrada -- del líquido al espacio de aire, es una combinación de segregación y exudación. La capa superficial solidificada sólo llega a tocar la lingotera en ciertos puntos, en esas condiciones se produce un arrastre de material, con una extracción de calor hacia la lingotera, presentandose las líneas de --- fricción.

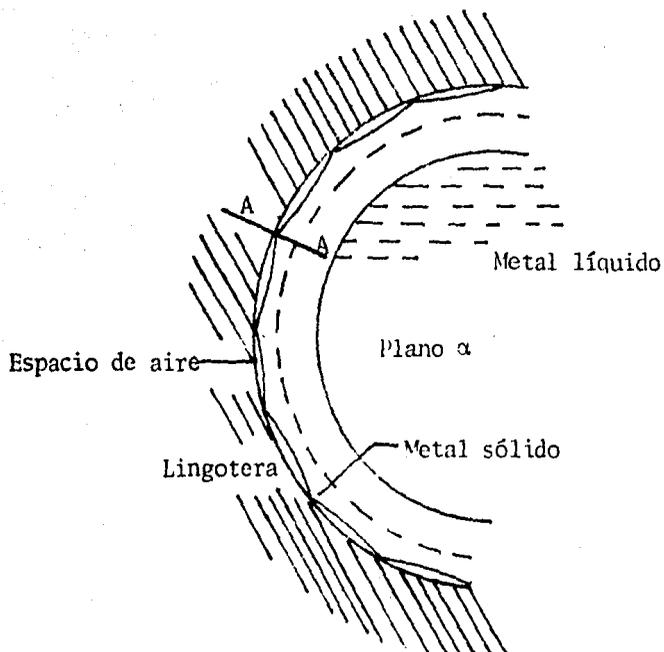


Fig. 63 Modelo de contracción no uniforme de una barra de colada semicontinua, con filtración del líquido hacia el espacio de aire.

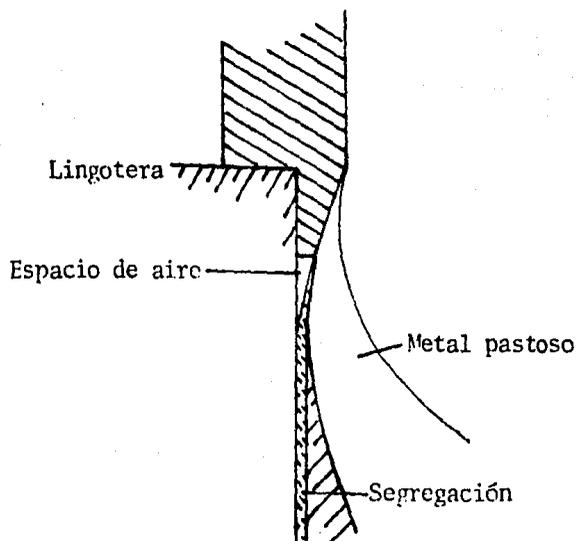


Fig. 64 Corte longitudinal del modelo de líneas de fricción, corte A-A existe contacto entre el metal solidificado y la lingotera.

7.1.3 Grietas.

Las grietas transversales pequeñas son de origen térmico (excesivo enfriamiento en la lingotera), como en la formación de pliegues (Fig. 59), existe una piel que solidifico primero y al introducirse el metal sobre esta piel se crean tensiones al cambio de estado del metal en condiciones térmicas diferentes, hasta romper esta unión (valle de los pliegues), extendiéndose la rotura a los límites de grano (Fig. 65) siguiendo la dirección de la piel que solidifico primero y que conserva la forma del reborde de la sobre-cabeza.

Las grietas transversales grandes son de origen mecánico, una velocidad de colada alta y el metal en estado pastoso que no contrae lo suficiente, hacen de la fricción un factor capaz de romper la piel en vías de solidificación, la profundidad de estas grietas es función de la interfase sólido-líquido. La rotura de la piel por adhesión a la pared de la lingotera, se provoca aproximadamente a 1.6 cm de la cima de la lingotera (Fig. 69).

Aún cuando el tamaño y el ancho de las grietas débiles son diferente al de las grietas gruesas, en profundidad llegan a ser iguales.



Reactivo Perryman 200X

Fig. 65 Muestra B, plano β , grieta transversal - débil.



Reactivo Perryman 50X

Fig. 66 Muestra K, plano β , grieta transversal - gruesa.



Reactivo Perryman 100X

Fig. 67 Estructura de un sangrado, valle de una grieta gruesa, muestra O.



Reactivo Perryman 100X

Fig. 68 Línea límite entre el metal sangrado y la piel rota (parte inferior).

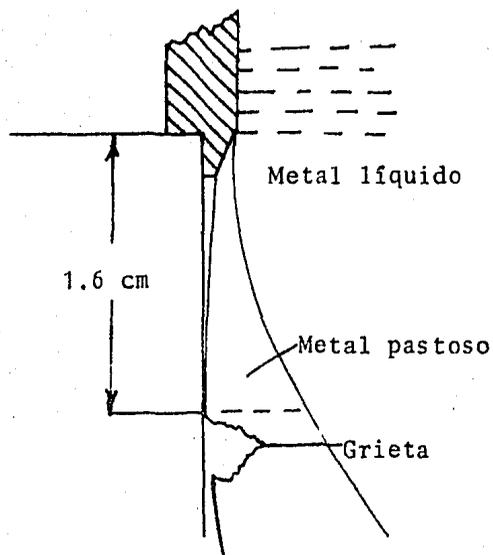


Fig. 69 Distancia aproximada a la que se origina una grieta transversal gruesa, en una lingotera de 41 mm. de diámetro.

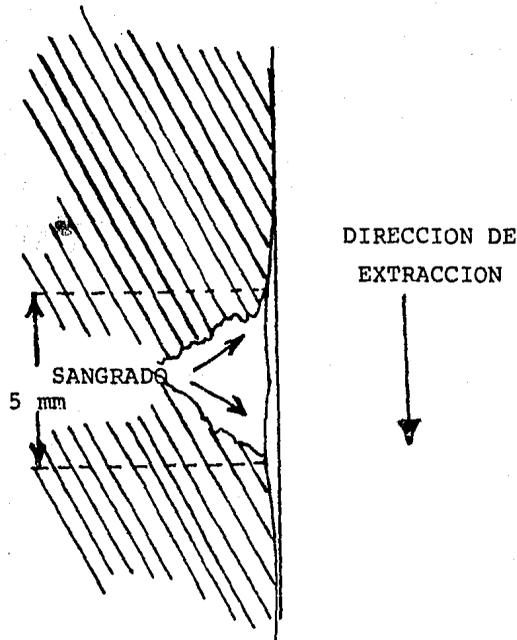


Fig. 70 Sangrado en el valle de una grieta transversal gruesa(23).

7.1.4 Sangrado

Se debe a un flujo lateral del aluminio líquido, a través de la zona pastosa hacia la superficie de la barra, después de que se rompe la piel de la barra. El metal sangrado tiene asociado un espacio mayor en sus ramales dendríticos (Fig. 67) aún cuando solidifica rápidamente. Cuando el sangrado es fuerte llena totalmente la grieta y da una apariencia superficial plana (Figs. 46 y 70).

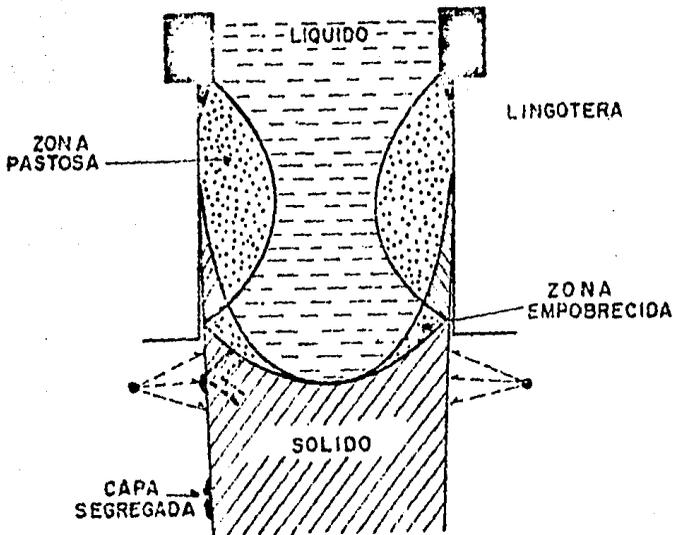


Fig. 71 Esquema del mecanismo propuesto para explicar el origen de la exudación en forma de gotas.

7.1.5 Gotas exudadas irregulares.

Utilizando el modelo de Buxmann⁽⁶⁾, se propone el mecanismo esquematizado en la figura 71; el espacio formado en la parte inferior, disminuye considerablemente la extracción de calor de la lingotera⁽⁴⁾, provocando refusión y segregación en alguna zona interior de la barra, el líquido enriquecido impelido por la presión exuda, sin que el enfriamiento secundario logre impedirlo. En general la solidificación del líquido exudado, tiene lugar sin tocar la lingotera. Otros mecanismos que se supone contribuyen a la segregación son :

- Turbulencia en el líquido.
- Convección térmica.
- Flujos producidos por la evolución de gases.

VIII. CONCLUSIONES

En base a resultados experimentales y a las consideraciones teóricas, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Con el sistema de "cabeza caliente" se logra aumentar la velocidad de colada, se promueve la solidificación discontinua y la formación de grietas transversales débiles.
- La remoción de calor excesiva causa la solidificación prematura del metal, obteniéndose una superficie plegada (cold shuts).
- La profundidad de los pliegues es proporcional a el ancho del reborde de la cabeza caliente.
- Aumentar la velocidad de colada, permite mantener un caudal constante de metal, disminuyendose así las líneas de -- fricción, los pliegues, las grietas débiles, y se promueven las grietas gruesas y el sangrado.
- Una causa que origina las grietas es: la mala combinación de la velocidad de colada y el enfriamiento secundario.

- La formación de los espacios de aire (gaps), disminuye la extracción de calor, alterandose las condiciones de solidificación.

- Los defectos superficiales disminuyen conforme se aumenta la velocidad o la temperatura de colada.

- Cualquier modificación a las variables: temperatura de colada, velocidad de colada, enfriamiento primario y enfriamiento secundario, repercute en la estructura interna de la barra.

IX. RECOMENDACIONES

Considerando la continuación de el trabajo de investigación en colada continua en esta o en otra línea, se recomienda - que:

- Se trabaje en la zona 4 del diagrama de obtención de ba---
rras (Fig. 47), en la cual existen las condiciones para ob-
tener un mínimo de defectos superficiales (Figs. 72 y 73), -
ya que los intervalos de temperatura de colada y de veloci--
dad de colada, así como los flujos primario y secundario --
son determinantes en la calidad de la barra.



Fig. 72 Superficie de una barra obtenida a: 690°C y 26 cm/min.

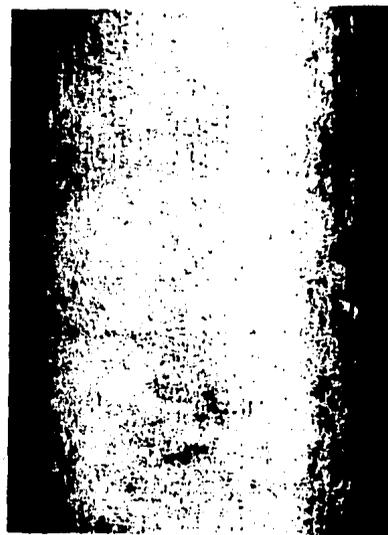


Fig. 73 Superficie de una barra obtenida a: 705°C y 26 cm/min.

- En la región en que se localiza la entrada de agua a la lingotera, el número de pliegues es mayor, por lo que una lingotera mejor diseñada (con una transferencia de calor uniforme), permitiría disminuir las zonas 1 y 2 del diagrama de obtención de barras, aumentando la zona de trabajo.

- Aplicar el enfriamiento secundario, tan pronto termine la lingotera.

- La colada a velocidades altas exige medidas y consideraciones sobre cualquier oscilación que pueda presentar la barra extractora al momento de bajar, ya que este movimiento provoca la rotura de la barra de aluminio.

X.- BIBLIOGRAFIA

- 1 W. J. Bergmann; Metallurgical Transaction, 1, 1970, p. 3361.
- 2 W. J. Bergmann; J. Metals, Febr., 1973, p. 23.
- 3 W. J. Bergmann, Aluminium, 51 , 1975, p. 336
- 4 E. F. Emley ; International Metals Reviews, 6, 1976, p. 143.
- 5 F. Roman , M. Solari y H. Biloni; PMM/ 1 228, 1977.
- 6 K. Buxmann ; Metall , Febr. , 1977, p. 31
- 7 P. Barrand y R. Gadeau; Enciclopedia del aluminio, Grupo Pechiney, Ed. URMO, Bilbao, Vol. 2, 1968 ,p. 265.
- 8 T. Pérez , M. Solari y H. Biloni ; El aluminio en Latinoamerica, Ed. IIM-UNAM-OEA, 2, 1983, p. 208.
- 9 Metals Handbook; Metallography Structures and phase - diagrams, American Society for Metals, Vol. 8, 1973, p. 163.
- 10 Metals Handbook ; Atlas of microestructures, Vol. 7, 1973, p. 205.
- 11 V. Ruiz S. ; Moldeo y Fundición, 1, 1978, p. 13.
- 12 AMSTEAD, B. H. ; Manufacturing Processes, FIRST-6THED, 1978.
- 13 M. A. Sanchez Moreno; Análisis de defectos en productos de colada continua, Tesis Profesional, IPN-ESIQIE, 1978.
- 14 Colada continua de acero, JOBST - THOMAS WASMUHT, Santiago de Chile, Ed. 1, 1977, p. 76.

- 15 Enciclopedia del aluminio, Grupo Pechiney, ED. URMO, Vol. 4, 1968, p. 123.
- 16 A. F. Lara; Estudio sobre los defectos en palanquillas obtenidas por colada continua, sus defectos y medidas preventivas, Tesis Profesional, Facultad de Química UNAM, 1974.
- 17 Gole ; SOLIDIFICATION SCIENCE AND FOUNDRY, FORD MOTOR COMPANY, DOBORN, MICHIGAN 4812.
- 18 A. J. Duarte Vázquez; Transferencia de calor en el ---molde de colada continua para aceros planos, Tesis Profesional, Facultad de Química UNAM, 1977.
- 19 T. Rangel ; El aluminio en latinoamerica, IIM-UNAM-OEA, 3, 1983, p. 35.
- 20 G. Komma, H. Jacobi y K. Wünnenberg ; Siderurgia latinoamericana, Marzo, 1982, p. 35.
- 21 T. Fastner, B. Elwisiher, A. Niedermayr y F. Wallner ; Siderurgia Latinoamericana, Abril, 1982, p.30.
- 22 J. C. Mc Cubbin ; Light Metals , Vol. 2, 1975, p. 137.
- 23 Saucedo, J. Beech and G. J. Davies; THE DEVELOPMENT -- OF SURFACE IN STEEL INGOTS AND STRANDS, 6TH INTERNATIONAL VACUUM METALLURGY CONFERENCE SPECIAL MELTING, SAN - DIEGO, CALIFORNIA.
- 24 J. F. Lizeaga Eskuisabel; Técnica Metalúrgica, Enero-Febrero, 1972, año 27, No. 188, p. 47.
- 25 T. Pérez, M. Solari y H. Biloni; Defec. de fund. en C. Semicont. de aleac. 6063, Inf. No 1, CNEA, Argentina, 1967.

- 26 E. A. Krasnoschiokov, A. S. Sukomiel: Problemas de Termotransferencia, Ed. MIR Moscú, 1977, p. 303.
- 27 Hiromu FUJII, Tetsuro OHASHI and Takeshi HIRUMOTO; Transaction I SIJ ,Vol. 18, 1978.
- 28 Myrn L. Begeman y B. H. Amstead; Procesos de fabricación , Compañía editorial Continental, 13ed. , 1980.
- 29 J. Szekely; RATE PHENOMENA IN PROCESS METALLURGY, by - Wiley-Interscience, 1971, p. 325.