



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

56
2 es.
1998
FEB 17 11:15 AM

"DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA COLADA CONTINUA DE BANDAS DE ALEACION DE ALUMINIO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
ARTURO HERRERA PRADO
DEMETRIO HERRERA PRADO

ASESOR: M. EN C. TOMAS RANGEL ORTIZ.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO.

1998.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

262684



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLÁN
P R E S E N T E

AT'N: Q. María del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S.-C

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: trabajo de tesis:

" Diseño y desarrollo de un sistema para colada continua de
bandas de aleación de aluminio "

que presenta el pasante: Herrera Prado Arturo
con número de cuenta: 9061730-6 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de México, a 13 de marzo de 1998

PRESIDENTE	M. en C. Tomás Rangel Ortiz	
VOCAL	Ing. Sergio de Moraes Benites	
SECRETARIO	M. en C. Enrique Curiel Reyna	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Jesús García Lira	
SEGUNDO SUPLENTE	M. en I. Ana María Paniagua Mercado	



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Q. María del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S.-C

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: El Trabajo de tesis

" Diseño y desarrollo de un sistema para colada continua de
bandas de aleación de aluminio"

que presenta el pasante: Herrera Prado Demetrio

con número de cuenta: 9061733-7 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 13 de marzo de 1998

PRESIDENTE	M. en C. Tomás Rangel Ortiz	
VOCAL	Ing. Sergio de Moraes Benítez	
SECRETARIO	M. en I. Enrique Curiel Reyna	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Jesús García Lira	
SEGUNDO SUPLENTE	M. en I. Ana Maria Paniagua Mercado	

Agradecemos especialmente a nuestro asesor **M. En C. Tomás Rangel Ortiz** por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Agradecemos la colaboración y el apoyo brindado por los profesores:

M. En C. Enrique Curiel Reyna

M. En I. Ana Maria Paniagua Mercado

Dedicada a nuestros Padres

Pedro Herrera Guadalupe
Catalina Prado Melgarejo

Nuestros Hermanos:

Felipe
Gloria
Pedro
Isabel

OBJETIVO:

Construir un sistema experimental de molde móvil para obtener bandas de aleación de aluminio de pequeñas dimensiones por el proceso de colada continua, y que muestre las características esenciales de dicho proceso. El objetivo se desarrollará en las siguientes etapas:

- 1) Diseño del sistema de molde móvil.
- 2) Construcción del sistema de molde móvil.
- 3) Optimización del sistema de molde móvil de acuerdo a los parámetros que rigen al proceso, aplicado a una aleación de aluminio en particular.

PREFACIO

En el presente trabajo se trata un tema que actualmente tiene gran importancia dentro de la industria de la transformación a nivel mundial: “El proceso de colada continua”, el cual en los últimos años ha tenido un gran desarrollo.

Las grandes ventajas que presenta el proceso de colada continua sobre los procesos convencionales de colada, hacen de este un tema de mucha relevancia. Actualmente gran parte de los productos semiterminados de aleaciones de aluminio, cobre y acero se obtiene mediante este proceso.

Podemos dividir el trabajo en dos partes: 1) Descripción del proceso de colada continua. 2) Obtención de un sistema de colada continua.

Dentro de la descripción del proceso de colada continua hablaremos del inicio del proceso, en que año aparece y quienes intervienen en su desarrollo; así como también hablaremos sobre el principio del proceso. Desde sus inicios el desarrollo del proceso ha sido hasta cierto punto lento, puesto que es un proceso en el cual se requiere un estricto control sobre los parámetros que involucra por lo cual la inversión en sistemas de este tipo es elevada; aún así el proceso ha adquirido diferentes formas y modalidades de aplicación las cuales surgen de las características geométricas del producto semiterminado requerido, por lo tanto

hablaremos de los tipos de colada continua y las primeras máquina desarrolladas a nivel industrial. De las ventajas y desventajas que un proceso a nivel industrial pueda ofrecer depende el éxito de su desarrollo de dicho proceso, por lo que hablaremos de algunas de estas.

La relación compleja existente entre los parámetros que rigen a este proceso ha traído consigo el desarrollo de numerosos métodos numéricos, los cuales permitan optimizar algunos sistemas y obtener resultados que sirvan como base para la obtención de mejoras en el proceso.

Dentro de los procesos de colada continua tenemos aquellos en los cuales se utilizan moldes móviles, la segunda parte de este trabajo esta dirigido a la obtención de un sistema de este tipo, lo que se busca con esto es obtener un sistema a nivel laboratorio el cual nos de un panorama del como opera un sistema de este tipo.

Como mencionamos anteriormente, el costo de inversión inicial de un sistema de colada continua es elevado por lo que se busca que el sistema sea accesible económicamente.

De esta manera en este trabajo buscamos conjuntar la información que al respecto de este tema este disponible y dar un panorama amplio sobre los procesos de colada continua.

INDICE:

INTRODUCCION:

• Historia del proceso de colada continua.....	1
• El principio del proceso de colada continua.....	3
• Tipos de colada continua.....	5
1- Colada continua vertical.....	5
a) Proceso Alcoa de enfriamiento directo.....	6
b) Proceso Isomet.....	7
c) Proceso Pechiney.....	8
d) Proceso Forges de Crans.....	9
e) Proceso electromagnético.....	10
f) El nuevo proceso de colada con cabeza caliente.....	13
2- Colada continua horizontal.....	14
a) Proceso Ugine Venthon.....	15
b) Proceso Kaiser Aluminium.....	16
c) Proceso Reynolds Metal.....	17
d) Proceso Alcoa.....	18
3- Procesos de molde móvil.....	20
a) Máquinas de colar con ruedas y bandas sin fin.....	20
a.1 Máquina Properzi.....	20
a.2 Máquina Rigamonti.....	22
a.3 Máquina llamada “4R” ó “RSC”.....	23

b) Máquinas de bandas articuladas y cintas lisas sin fin.....	25
b.1 Máquina Hunter Douglas.....	26
b.2 Máquina Hazelett.....	27
c) Máquina de colada entre cilindros.....	28
c.1 Máquina Hazelett.....	28
c.2 Máquina Hunter Engineering Co.....	29
c.3 Máquina “3C” Pechiney-Coquillard.....	31
• Aleaciones de aluminio empleadas en los procesos de colada continua.....	34
• Ventajas y desventajas.....	36

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

I.1 Proceso de solidificación.....	39
I.1.1 Solidificación.....	39
I.1.2 Proceso de colada usando moldes aislados.....	40
I.1.3 Proceso de colada en el cual la resistencia de la interfase es dominante.....	44
I.2 Transferencia de calor.....	47
I.2.1 Conducción de estado estable.....	47
I.2.2 Sistema unidimensional sin generación.....	47

1.3	Hornos eléctricos.....	51
1.3.1	Hornos de resistencia.....	51
1.3.2	Horno de crisol.....	52
1.3.3	Ternopares.....	52
1.3.4	Transferencia de calor en las paredes.....	52
1.4	Trenes de engranes.....	58
1.4.1	Trenes simples.....	58
1.4.2	Trenes compuestos.....	59

CAPITULO II

DESARROLLO DEL SISTEMA

II.1	Diseño del sistema de molde móvil.....	61
II.1.1	Molde o lingotera.....	63
II.1.2	Ruedas guía.....	65
II.1.3	Banda.....	66
II.1.4	Estructura de soporte.....	66
II.2	Sistema de fundición y vaciado.....	68
II.2.1	Hornos de fundición.....	68
II.2.2	Contenedor.....	71
II.2.3	Alimentador.....	72
II.3	Sistema de refrigeración.....	73
II.3.1	Tanques de agua fría.....	73

II.3.2 Depósito de nivel de agua.....	74
II.3.3 Regulador de flujo.....	75
II.3.4 Colector.....	75
II.4 Sistema motriz.....	76

CAPITULO III

EXPERIMENTACION

III.1 Pruebas del horno.....	77
III.2 Pruebas del contenedor	79
III.3 Realización de los experimentos.....	80

CAPITULO IV

RESULTADOS.....	81
-----------------	----

APENDICE A

TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de transferencia de calor en las interfaces.....	86
Tabla 2. Coeficiente de transferencia de calor de los materiales empleados en el molde y banda.....	86

Tabla 3. Propiedades físicas de los sólidos.....	87
Tabla 4 Tipos de aleaciones de aluminio y composiciones representativas.....	88

APENDICE B

CALCULOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS

• Resistencia térmica en el molde.....	89
- Resistencia térmica entre las paredes del molde.....	89
- Resistencia térmica en la banda.....	90
• Calor extraído en el molde.....	91
- Calor extraído a través de las paredes del molde.....	91
- Calor extraído a través de la banda.....	92
• Tiempo de solidificación.....	92
• Relación de velocidades del sistema móvil.....	93
• Velocidad de colada.....	93
• Cálculos para el diseño del sistema móvil.....	94
• Sistema de fundición y vaciado.....	96
-Cálculo de pérdidas a través de las paredes del horno.....	96
• Cálculos para determinar el flujo de agua de enfriamiento.....	98
CONCLUSIONES.....	100
BIBLIOGRAFIA.....	101

INTRODUCCION.

HISTORIA DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA.

La colada continua tiene su origen en 1840, cuando G. E. Seller, presenta un desarrollo de colada continua en tubos de plomo. A pesar de esto, los estudios sobre este proceso comienzan en 1846 con Sir Henry Bessemer en Inglaterra quien detalla lo que ahora conocemos como proceso de colada continua de aluminio y plomo, después en 1858 registró la patente para un procedimiento de colada y laminación simultánea de acero entre dos cilindros refrigerados, tal procedimiento aun no ha dado resultados debido a las temperaturas elevadas con que se trabaja el acero, y tan solo ha sido aplicado recientemente bajo diversas formas con mayor éxito en la colada de aleaciones de aluminio.

En 1872 los ingleses W. Wilkinson y E. Taylor, son los primeros en documentar la idea de colada continua con moldes móviles. B. Atha en 1886, creó una máquina de proceso intermitente. Una máquina semejante a las que operan actualmente fué diseñada por el alemán M. Dealen en 1889 en la cual combina la refrigeración directa e indirecta del metal; aunque no fué experimentada industrialmente.

En el año de 1915 G. Mellan considera un control automático, para la alimentación del metal al molde que depende del nivel del metal líquido.

Los estudios semi-industriales empiezan en 1930 en Alemania a cargo de S. Junghans quien es considerado el padre de la colada continua moderna, el sugirió una oscilación no armónica que no influye en la transferencia de calor entre la barra y el molde, más tarde en 1933 construye la primer planta industrial de colada continua de bronce en Alemania, aplicando el método vertical mediante el uso de un molde abierto, con la cual alcanza una producción anual considerable.

Más adelante en Estados Unidos de América surge la primer planta Scoville Manufacturing C. O; mientras en Alemania surgen las primeras instalaciones de colada continua de aluminio, tales como La Vereinigte Leicht Metallwerke y la Wienland Werke.

En Francia fué hasta el año de 1937 cuando se realizan los primeros ensayos semi-industriales, apareciendo la primer instalación de colada continua de aluminio en la fábrica de la Faremountiers de la Cégédur (entonces Societé du Duralumin).

EL PRINCIPIO DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA.

Se le denomina colada continua al proceso por medio del cual se obtienen productos semiterminados que avanzan y solidifican a medida que se va vertiendo el metal líquido en un molde, el cual contiene un falso fondo .

La solidificación del metal líquido se obtiene mediante un enfriamiento del molde de manera brusca por medio de agua, produciendo una transferencia de calor del metal líquido hacia el agua a través de las paredes del molde, la cual nos permite obtener una cáscara o pared sólida lo suficientemente gruesa capaz de resistir los esfuerzos producidos por el sistema extractor que desliza al falso fondo por debajo del molde, así como también la presión metalostática generada por la piletta del metal líquido que se crea en el centro del molde.

Conforme el metal solidificado es retirado por debajo del molde, recibe un enfriamiento directo por medio de agua; esto es , el metal es bañado directamente sobre su superficie con agua para obtener la solidificación total del metal.

El proceso inicial en esta modalidad de colada continua es el denominado de enfriamiento directo (direct chill) o de doble nivel DC,

de aquí la relación de los parámetros que rigen al proceso determinan la calidad interna y externa del producto. La mayor parte de los defectos externos se producen en el molde o lingotera, puesto que mientras mayor sea la longitud de la lingotera el área de contacto entre la superficie del metal solidificado y la pared del molde aumenta, esta relación produce serios problemas, ya que debido a la solidificación del metal se presenta una contracción del mismo, lo que provoca un aislamiento parcial entre la pared del molde con la superficie del metal, reduciendo así la transferencia de calor la cual produce refusiones de la capa ya solidificada creando irregularidades en la superficie externa del producto.

La utilización de moldes cortos como una propuesta para atenuar el problema anterior ha sido aplicada con el fin de disminuir el área de contacto del metal solidificado con la superficie del molde, dando paso casi directamente al enfriamiento directo (secundario) después de vertir el metal líquido al molde.

TIPOS DE COLADA CONTINUA.

Los procesos de colada continua se pueden clasificar en tres:

- 1) **Colada continua vertical.**
- 2) **Colada continua horizontal.**
- 3) **Colada continua de molde móvil.**

Estos tipos de colada continua presentan ventajas y desventajas según las condiciones, limitaciones, propiedades y dimensiones del producto.

1.- Colada continua vertical.

La mayor parte de la producción de aluminio en lingotes se obtiene por este proceso, en este caso la longitud está limitada por la profundidad del foso de colada y la capacidad de extracción del lingote de la máquina; por esta razón se le denomina colada semicontinua, sin embargo mantiene la misma calidad y eficiencia en la obtención de los productos, ya que estos presentan las mismas propiedades. Una ventaja de la colada semicontinua es la facilidad para obtener en una sola operación varias barras al mismo tiempo en igual número de lingoteras, aprovechando un solo sistema motriz.

Dentro del tipo de colada vertical encontramos los siguientes procesos empleados:

a) Proceso Alcoa de enfriamiento directo.

Este proceso utilizado por Aluminium Company of America, esta basado en la patente de W. T. Ennor, noviembre 3 de 1942; en este proceso se vacian en forma continua, lingotes de aluminio y aleaciones del mismo, el molde es vertical estacionario el cual utiliza tanto el enfriamiento primario (indirecto) como el secundario (directo).

Al inicio del proceso, el metal liquido es retenido dentro del molde por un falso fondo el cual se desplaza a través de un elevador. El metal liquido es alimentado desde el horno hasta el molde a través de conductores y vertedores, el flujo del metal puede ser regulado manual o automáticamente por medio de un flotador el cual se controla mediante el elevador o mediante rodillos impulsores.

La velocidad de colada varía dependiendo del tipo de aleación y dimensiones del lingote y va desde 2.54 hasta 25.4 mm. por minuto, el número de lingotes colados al mismo tiempo varía de 1 a 20.

Los productos que se pueden obtener con este proceso son:

- Láminas y placas.
- Lingotes redondos para extruir y forjar.
- Lingotes cuadrados para laminar y forjar;

En algunas aleaciones la calidad superficial es adecuada mientras que en otras se requiere de otras operaciones como el escalpado.

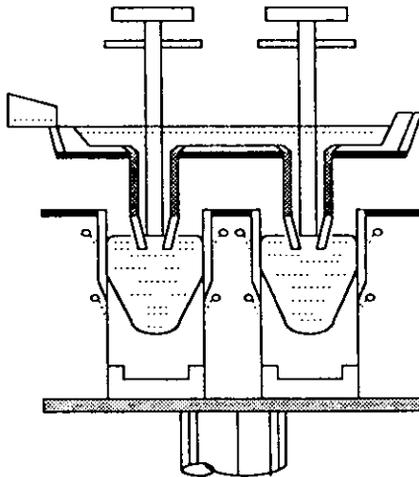


Fig. 1 Lingotera del proceso Alcoa.

b) Proceso Isomet.

Este proceso ha operado en Francia durante varios años; consta de dos enfriamientos, el enfriamiento indirecto (primario) que se lleva a

cabo a través de las paredes del molde y el enfriamiento directo (secundario) el cual se realiza por medio de inyectores de agua con aire formando rampas de niebla y la temperatura del bloque emergente es de aproximadamente 500 °C. El proceso esta limitado en práctica a la obtención de bloques delgados de alrededor de 400 mm. de espesor.

Este método de refrigeración permite variar de manera muy flexible la velocidad de enfriamiento y obtener la solidificación deseada. Así también es posible regular la temperatura del bloque al final de la solidificación.

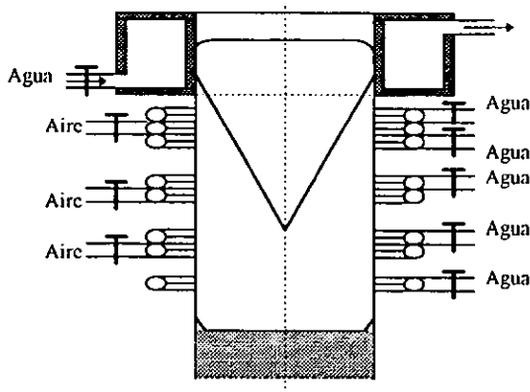


Fig. 2 Lingotera de refrigeración moderada tipo Isomet.

c) Proceso pechiney.

En forma análoga Pechiney propone un proceso en el que la variante que presenta con respecto al proceso anterior radica principalmente en el

enfriamiento directo (secundario), en el que ahora se emplea un sistema integrado por una serie de rampas de chorro de agua regulable ramificados sobre un regulador de presión equipado con un sumidero.

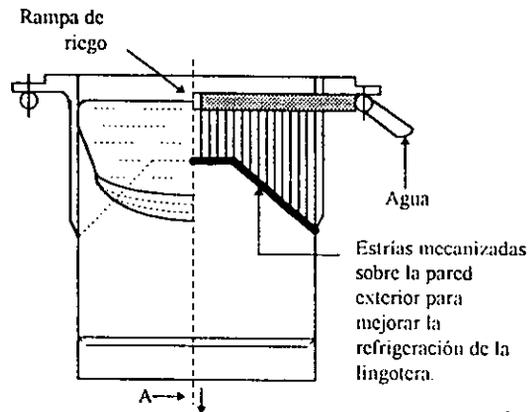


Fig. 3 Lingotera de refrigeración moderada tipo Pechiney.

d) Proceso Forges de Crans.

En este proceso el molde es refrigerado por la acción de un chorro de agua de pequeño caudal, con lo cual se limita la velocidad de solidificación del metal. En este proceso la velocidad de colada es mayor que en los procesos anteriores, aunque la sensibilidad del metal a las condiciones de transformación siguen siendo mayores

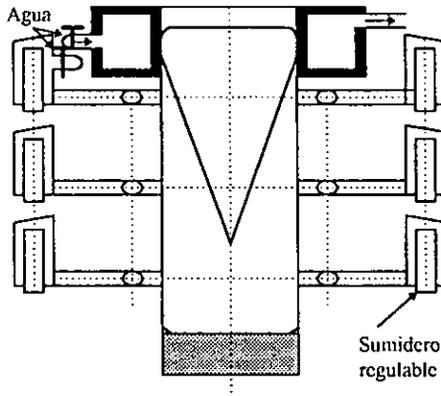


Fig. 4 Lingotera de refrigeración moderada tipo Crans.

e) Proceso electromagnético.

Este proceso es una de las innovaciones dentro de los procesos del tipo de colada vertical. Aquí el uso de un campo magnético sustituye a la lingotera o molde, es decir, que el metal líquido es contenido por las fuerzas electromagnéticas de un campo generado por un inductor produciendo por ende una repulsión por ambas superficies. La refrigeración es directa empleando agua, quedando así eliminada la posibilidad de crearse refusiones superficiales porque el lingote es enfriado a través del campo, y a una distancia corta por debajo de la interfase sólido-líquido; el ángulo de incidencia del agua es controlado y su punto de aplicación es en forma tal que la interface esta ubicada en el centro del campo inducido.

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

Las ventajas que proporciona este proceso son:

1) Superficies lisas y brillantes sin segregaciones notorias, con esto el producto puede ser laminado sin un proceso de escalpado previo.

2) Tamaño de la subestructura celular fino, con lo que se reducen principalmente las altas temperaturas de homogenización y precalentamiento; así como también se reduce la tendencia a la fisuración durante el laminado en caliente. El tamaño celular de la superficie puede ser la mitad del obtenido por el proceso DC que oscila entre los 40 y 70 μm .

El proceso presenta limitaciones en cuanto al tamaño de las barras y el costo de operación es elevado.

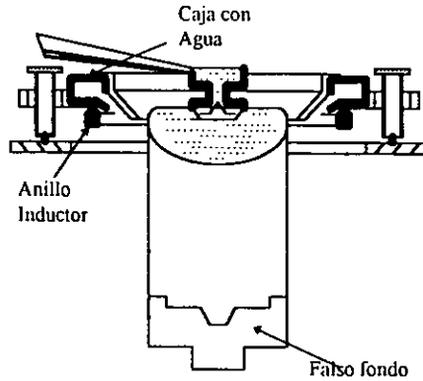


Fig. 5 Sistema electromagnético.
(vista esquemática según Getselev)

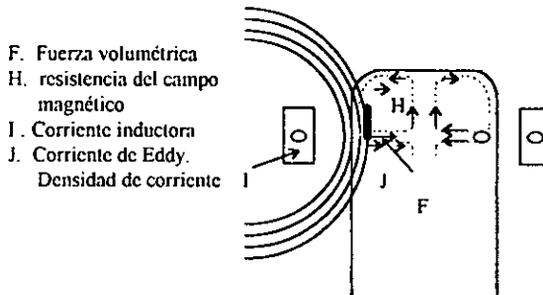


Fig. 6 Principios físicos implicados
en el sistema electromagnético.

f) El nuevo Proceso de Colada con Cabeza Caliente.

(The New Hot Top Casting Process.)

Este proceso desarrollado por Showa Aluminum industries K.K, funciona a través de aire a presión en la superficie interna del molde, también se usa Nitrógeno y Argón (aunque es preferible el aire). Por la parte superior de la lingotera se agrega aceite de castor mediante el uso de una bomba o por gravedad. La altura del molde es de aproximadamente la tercera parte de la convencional en el proceso DC facilitando la obtención de altas velocidades de colada.

Mitamura y colaboradores estiman experimentalmente que la aplicación de aire a presión en el proceso Showa restringe los puntos de contacto del molde con la superficie del molde, reduciendo así el área de contacto y logrando que se obtenga una superficie de fundición lisa.

En este proceso no hay restricciones en cuanto al tamaño del lingote, como en el caso del proceso del campo electromagnético.

2.- Colada continua horizontal.

Este tipo de colada continua surge como una variante del proceso vertical DC. Aquí el molde es colocado en forma horizontal, y el semiproducto avanza en la misma dirección. En la práctica se ha encontrado que los sistemas modernos de colada semicontinua destacan en:

1. Sencillez.
2. Flexibilidad
3. Costo de capital.

En estos procesos la colada puede realizarse de una manera verdaderamente continua mediante el acoplamiento de sistemas auxiliares. A pesar de esto la operación del proceso se realiza normalmente de forma semicontinua para obtener barras de longitudes considerables, mediante el uso de corredores de hasta 30m.

a) Proceso Ugine Venthon.

El proceso horizontal DC. Operado en Venthon Savoie, originalmente fué desarrollado para colar barras utilizadas en el transporte, pero con algunas modificaciones son también usadas en la obtención de alambres y barras (billets) de tamaños pequeños.

En el proceso el flujo de metal llega a un depósito calorifugado a través de una línea de refractario, directamente del depósito de metal se introduce a un molde corto enfriado por agua a través de un orificio de una placa de refractario. Los moldes pueden ser de aluminio o grafito; para la obtención de barras para el transporte con la operación de colada semicontinua, los moldes de aluminio son usados generalmente sin lubricación continua, pero para barras o alambres en colada continua se usa la lubricación de manera continua. Para la producción semicontinua de los dos productos anteriores se pueden usar moldes de grafito sin una refrigeración continua.

Barras redondas de aproximadamente 30 mm de diámetro y barras rectangulares de aproximadamente 25 mm de grueso o más, pueden colarse por este método. Las velocidades de colada varían desde 0.1 hasta 1 m/min. Dependiendo de la sección requerida.

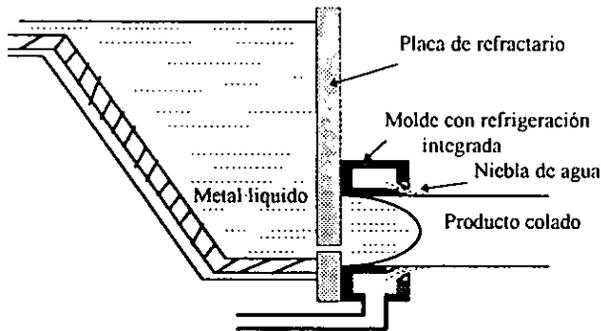


Fig. 7 Proceso Uginé Venthon.

b) Proceso Kaiser Aluminum.

En este proceso destaca la utilización de moldes ensamblados los cuales pueden ser de cobre, cromo-cobre y otros materiales; con esta disposición el molde puede ser cambiado en 10 o 15 min. sin detener por mucho tiempo la operación de colada.

Varios autores resaltan la importancia de la lubricación en los procesos de colada horizontal para lo cual, el lubricante no debe ser intermitente, excesivamente vaporizable o desprender residuos de barniz, generalmente se prefieren productos derivados del aceite de castor y sintéticos, como el di-éster.

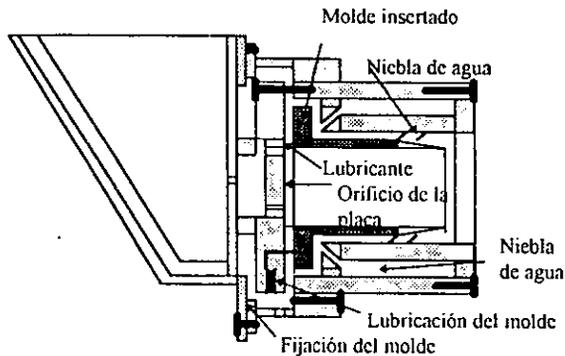


Fig. 8 Proceso de colada usado por Kaiser Aluminium.

c) Proceso Reynolds Metal.

Las variantes usadas en este proceso con respecto al proceso Venthon son: el empleo de un tubo de entrada de carbón, un forro de Marinita y un molde largo de grafito denso. Este proceso es usado de manera semicontinua para colar barras para el transporte, alambres y billets. El uso de la lubricación continua no es necesaria debido a que la operación de colada se realiza de manera semicontinua y a la buena lubricación que ofrece el molde de grafito.

No se han encontrado limitaciones del proceso para la colada de aleaciones que se utilizan en los procesos de colada horizontal general.

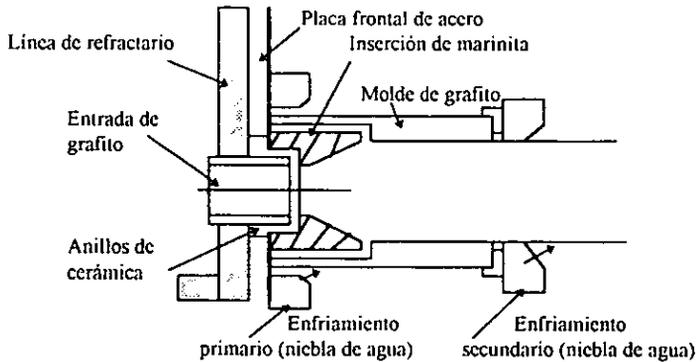


Fig. 9 Proceso Reynolds Metal

d) Proceso Alcoa.

Es probablemente el proceso en el cual la colada horizontal se realiza de una manera verdaderamente continua. En este proceso usado por Alcoa Warrick Factory, donde se cueban horizontalmente largos bloques de aproximadamente 508 X 1370 mm de sección, pueden originarse ciertos problemas por lo que el flujo de agua en el enfriamiento debe ser uniforme y el ángulos de choque debe controlarse entre 7° - 10° para evitar la entrada de agua al molde. A diferencia del proceso de colada vertical DC el molde esta debidamente fijo de manera tal que no existan movimientos.

El bloque en el sistema Alcoa se retira por medio de bandas de rodillos vinculados uno en cada borde en la parte inferior del bloque, y el molde

es colocado por debajo de la línea de extracción con una longitud correspondiente al tamaño del lingote contraído, menos la alta compresión debida al peso del lingote.

Una mala operación de la sierra de disco volante puede provocar un incremento en los defectos superficiales generados en el molde. Para contrarrestar los efectos de convección en el molde y minimizar diferencias entre la superficie de la tapa y la base del bloque, el metal se introduce al molde con un bajo nivel y a una desviación corta en el estante colocado inmediatamente arriba de la ranura de entrada; es vital mantener un flujo uniforme de lubricante en el molde.

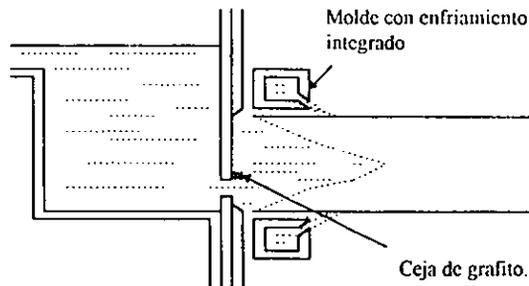


Fig. 10 Proceso Alcoa.

3.- Colada continua de molde móvil.

Dentro de este tipo de colada tenemos tres grupos:

- Máquinas de colar con ruedas y banda flexible sin fin.
- Máquinas de bandas articuladas y cintas lisas sin fin.
- Máquinas de colar entre cilindros.

a) Máquinas de colar con ruedas y banda sin fin:

a.1 Máquina Properzi.

Esta máquina fué concebida por Hilario Properzi hacia el año 1950, para la colada de desbastes de forma triangular de aluminio y aleaciones, destinadas a la fabricación de alambre conductor o no conductor.

Su fundamento es el siguiente: se cuela en el canal de una rueda metálica de 1000 a 1200 mm de diámetro, refrigerada por agua y cerrada a lo largo de 180° (por una banda de acero dulce de dos a tres mm de espesor). La cinta se sitúa sobre el canal por medio de una segunda rueda de 1000 mm de diámetro, alineada en el plano de la rueda de colada y dispuesta a dos o tres mm de ella.

El metal solidificado, que esta se separa del canal por una zapata, sale con una temperatura de 450 °C a 500 °C, y se introduce en un tren de laminación donde es transformado en alambre de 8 a 20 mm de diámetro.

Las primeras máquinas experimentadas hacia 1950 para el aluminio colaban desbastes de secciones comprendidas entre 300 y 325 mm² a razón aproximadamente de 500 Kg./h. Los modelos más recientes cuelan desbastes de 900 a 2100 mm² y alcanzan producciones de 1 a 4.5 ton/h correspondientes a velocidades de 8 a 10 m/min.

En estas condiciones, la duración de la banda que cubre al molde es de 50 a 100 ton coladas.

La colada de aleaciones de gran intervalo de solidificación presentan mayor problema que las de aluminio ordinario o las aleaciones que contienen pocos elementos de aleación, debido a la forma angulosa del desbaste y la asimetría de refrigeración entre el canal y la banda que tiende a provocar grietas de contracción.

Este procedimiento ha aportado, sin ninguna duda, una solución elegante a los problemas de fabricación de alambre de aluminio y de aleaciones para cualquier empleo, en particular para uso eléctrico.

Con relación a los antiguos trenes de alambre clásicos, posee una mejora de la productividad y de la calidad, así como de las condiciones de trabajo. Permite la comparación con los trenes de alambre más modernos, con la enorme ventaja de permitir la fabricación de bobinas de peso elevado, lo que simplifica los problemas de mantenimiento, almacenamiento y de transporte.

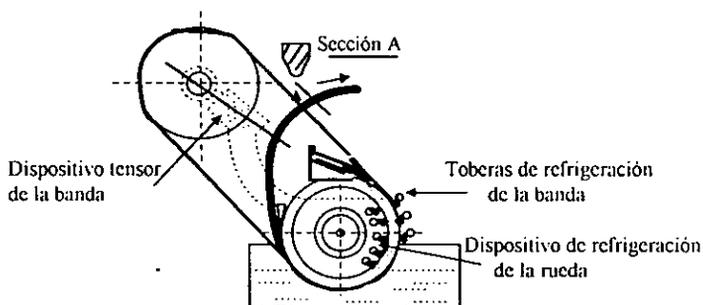


Fig. 11 Esquema de una máquina Properzi.

a.2 Máquina Rigamonti.

Esta máquina imaginada por Giuseppe Rigamonti, es de hecho la aplicación de la máquina Properzi para obtener desbastes de sección rectangular. El desbaste puede desprenderse en el sentido de la colada por medio de un dispositivo particular sobre la rueda tensora, con una ligera torsión del desbaste. Esta torsión contribuye a la limitación de las posibilidades de colada de esta máquina. En desbastes con un ancho de más de 160 a 180 mm y espesores superiores a 25 a 30 mm, el esfuerzo

de torsión llega a ser muy importante y el desbaste no puede ser separado fácilmente. Debido a las dificultades de alimentación, no se pueden colar espesores inferiores a 15 mm. Según la aleación y la sección colada pueden alcanzarse velocidades de 3 a 8 m/min.

Se utilizan máquinas Rigamonti en Suiza y en los Estados Unidos para la colada de desbastes de aluminio y aleaciones poco cargadas, destinadas a la fabricación de pastillas para la extrusión por impacto. La calidad obtenida se considera como satisfactoria para esta aplicación.

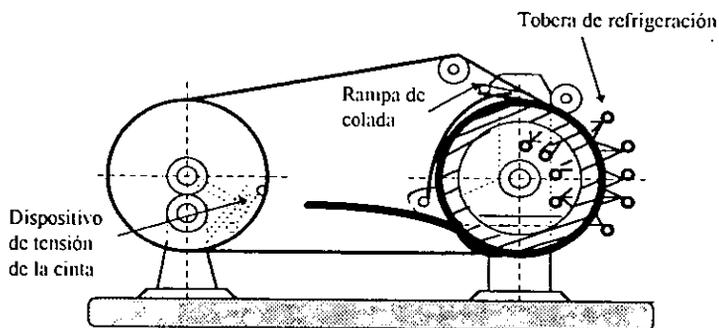


Fig. 12 Esquema de una máquina Rigamonti

a.3 Máquina Llamada "4R" o "RSC".

La aluminium Laboratories Ltd. en Banbury (Inglaterra), que disponía desde 1954 de una máquina Rigamonti ha llegado a lanzar una máquina de colada que permite un desprendimiento del desbaste mas sencillo que en el caso de la máquina italiana

Esta máquina llamada "RSC" (Rotary Strip Casting) lleva, como las anteriores una rueda de colada acanalada, refrigerada con agua, cerrado en unos 180° por una cinta sin fin de acero colado. La tensión de la cinta está asegurada por un juego de tres ruedas, dispuestas en un mismo plano alrededor de la mesa de colada, de forma que permite el desprendimiento del desbaste colado sin torsión lateral.

Actualmente algunas máquinas "RSC" o "4R" funcionan industrialmente en Francia, Inglaterra, Suiza, Estados Unidos y Holanda, para la colada de desbastes de aluminio destinados a empleos diversos. Una de las principales aplicaciones es la fabricación de bandas y pastillas para la extrusión por impacto.

La mayor parte de estas máquinas están concebidas para colar desbastes de 15 a 30 mm de espesor y de 300 de anchura como máximo. Parece difícil superar la anchura de 300 mm a causa de la deformación de la cinta que tiende a encorvarse en el canal.

La velocidad de colada, en el caso de un desbaste de aluminio de 20 x 100 mm, por ejemplo, es del orden de 6 a 8 m/min.

Se han realizado ensayos de coladas de aleaciones con máquinas de este tipo. Si se trata de colar desbastes para laminación, no ha sido siempre posible la solución correcta de los problemas presentados por la

isotropía y la delgadez de la estructura de recristalización. En el caso de aleaciones de amplio intervalo de solidificación, ha resultado a veces, difícil evitar las grietas de colada, por las mismas razones que en la máquinas Properzi y Rigamonti: curvatura del desbaste y asimetría de refrigeración entre el canal y la cinta.

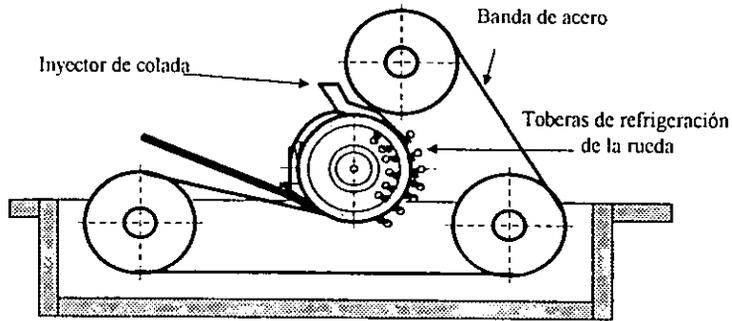


Fig. 13 Esquema de una máquina <<4R>> (4 Ruedas).

b) Máquinas de bandas articuladas y de cintas lisas sin fin.

Las máquinas de este tipo cuelan desbastes de secciones rectangulares, en posición sensiblemente horizontal. Hasta el momento no se han empleado con la laminación directa del desbaste a la salida de la máquina de colar. El desbaste se corta a la medida y su temperatura se estabiliza en un horno; después es laminado en caliente.

b.1 Máquina Hunter Douglas.

Esta máquina puesta a punto por J. L. Hunter en la Hunter Douglas Corporation, en Riverside (California), hacia 1950, está constituida por dos cadenas sin fin, de eslabones de fundición articulados, refrigerados por agua y que se mueven horizontalmente.

La alimentación del metal se efectúa por una de las extremidades con una boquilla ajustada a presión constante por medio de un rebosadero. La banda solidificada sale sin deformación por el otro extremo a una temperatura de 450 a 500 °C.

La instalación de Riverside que funcionaba todavía en 1953, constaba de dos máquinas que se empleaban en la colada de desbastes de 25 x 180 mm de aleaciones de aluminio, destinadas a la fabricación de lámina para persiana.

Las cadenas sin fin de estas máquinas estaban constituidas cada una por 26 eslabones. La longitud recta útil era de 800 mm. La velocidad de colada era de 1.5 m/min., es decir, 1 ton/h.

No parece que estas máquinas hayan tenido un gran desarrollo, a causa de su complicación mecánica y de las necesidades resultantes de conservación.

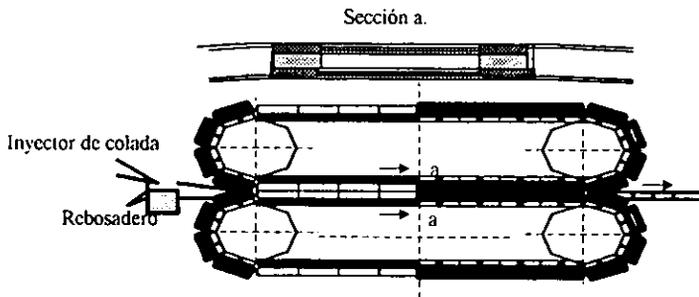


Fig. 14 Esquema de una máquina Hunter-Douglas de cadena sin fin.

b.2 Máquina Hazelett.

El principio de esta máquina se asemeja al de la Hunter-Douglas. La diferencia reside en el hecho de que las dos cadenas tensadas se sustituyen por dos cintas sin fin, de acero al carbón, tensadas por rodillos y refrigeradas con agua. La estabilidad de los costados está asegurada por dos montajes de bloques de aluminio que se deslizan sobre un fleje de acero. Los dos montajes se mantienen a distancia constante por medio de guías regulables. Esta disposición permite variar fácilmente la anchura y el espesor del desbaste.

Los primeros ensayos industriales de la máquina Hazelett se hicieron de 1951 a 1953 en los talleres Baldwin (Estados Unidos). El prototipo permitía colar desbastes de 15 a 25 mm de espesor y de 150 a 500 mm de anchura, de aluminio y aleaciones poco cargadas a velocidades comprendidas entre 3 y 10 m/min.

Actualmente, algunas máquinas Hazelett funcionan de manera industrial o semiindustrial en los Estados Unidos para la fabricación de barras de aluminio empleadas como conductores eléctricos y bandas de las que se cortan pastillas para la extrusión por impacto. Ciertos modelos permiten colar desbastes de aluminio y aleaciones poco cargadas de 15 a 30 mm de espesor y de anchura hasta 1000 mm con velocidades de 2 a 4 m/min., cuyo estado superficial y capacidad de laminación son adecuadas.

En lo referente a aleaciones de amplio intervalo de solidificación, parece ser que no hallamos hoy en día en estado de experimentación y que no se ha podido resolver el problema de las grietas de colada.

c) Máquinas de colada entre cilindros.

La idea de colada y laminación simultáneas entre cilindros se debió a Bessemer, pero esta idea no recibió en su época aplicación realmente industrial.

c.1 Máquina Hazelett.

Fué reanudada hacia 1921 por Hazelett que propuso y realizó una máquina constituida por dos cilindros paralelos refrigerados por un riego

de agua, cuyo eje eran horizontales, entre los que se introducía el metal líquido por medio de una boquilla ajustada. La colada del metal se efectuaba de arriba hacia abajo.

Los prototipos Hazelett, experimentados hacia 1936 en algunas fábricas americanas para la colada de aluminio. No han conducido a un empleo industrial, como consecuencia del mal comportamiento de los cilindros y de las perforaciones numerosas que se producían durante la colada.

c.2 Máquina Hunter Engineering Co.

J. L. Hunter volvió a considerar en 1954 la idea de Hazelett y construyó una máquina con los ejes de los cilindros situados en un mismo plano horizontal.

- La alimentación del metal entre los cilindros se efectúa “en fuente”, de abajo hacia arriba, por medio de una boquilla ajustada de refractario especial, con un dispositivo de “rebose” permite regular la presión metalostática del metal y su nivel entre los cilindros, de manera que no pueda desbordarse por encima de la línea de laminación. Esta disposición evita las “perforaciones” de metal que se producirían fácilmente con la máquina Hazelett.

- Los cilindros, de unos 500 mm de diámetro, constan de un anillo de acero de 25 a 30 mm de espesor refrigerados interiormente por circulación de agua.

- El desbaste solidificado se cizalla a cada lado unos 8 a 10 mm para eliminar las grietas de los costados; a continuación se enrollan en una bobina de grandes dimensiones a medida de que se efectúa la colada, a la salida de la máquina, para ser vuelta a laminar a un espesor más pequeño.

Varias de estas máquinas funcionan de manera industrial en los Estados Unidos, algunas de las cuales pueden colar bandas de aluminio y aleaciones de 1000 mm de ancho y de 6 a 8 mm de espesor, con velocidades de 0.8 a 1.2 m/min., o sea, 1 a 1.500 ton/h.

Los desbastes se emplean en general en la fabricación de productos que no llevan especificaciones severas, como placas onduladas, elementos de cubiertas plegados o conformados, bandas para cercas de jardín, papel de aluminio.

La duración media del anillo de los cilindros que es uno de los puntos delicados de la máquina, es del orden de 500 ton. Sin embargo, aparecen grietas en seguida durante las primeras horas de trabajo; no son perjudiciales hasta la colada de unos centenares de toneladas.

c.3 Máquina “3C” Pechiney-Coquillard.

El grupo Pechiney-Coquillard ha estudiado y puesto a punto, en el periodo de 1957-1959, en Froges, en estado semiindustrial, una máquina de colar parecida a la Hunter-Engineering, pero que presenta con relación a ésta, simplificaciones y notables mejoras.

Los ejes de los cilindros, están dispuestos paralelamente en un plano vertical como en un laminador clásico y la alimentación de metal se efectúa por una boquilla colocada horizontalmente, lo que facilita considerablemente las observaciones, las maniobras de enganches y desenganches, así como los comienzos de la colada.

Los cilindros se mecanizan con un canal que da el espesor y forma del desbaste. Esta técnica ha permitido obtener desbastes mas limpios que la máquina Hunter-Douglas y la reducción considerable de los trabajos de conformación de los cantos.

Un dispositivo de regulación del nivel de metal en la boquilla, del tipo de flotador, permite regular muy sencillamente la presión metalostática a un valor pequeño, justo suficiente para la alimentación, de modo que se reduzca al máximo los riesgos de perforación.

Se efectúa durante la colada una pulverización continua sobre los cilindros con un protector gravitado que permite la obtención de desbastes con un estado superficial satisfactorio, muy superior al que se obtiene con la máquina Hunter-Engenning.

La boquilla se fabrica con elementos desmontables e intercambiables de hierro fundido, prensados entre bridas de acero calorifugados interiormente con placas de un refractario aislante especial.

La primera máquina experimentada en Froges en 1957, fabricaba bandas de 350 x 8 mm que aumentaron en seguida a 780 x 8 mm. Sirvió de base para la realización en 1961 de una máquina capaz de colar desbastes de 900 x 8 mm.

La velocidad de colada es del orden de 0.80 a 1.20 m/min. según la aleación y ancho del desbaste.

La temperatura de los desbastes a la salida de la máquina de colar es de entre 400 y 450 °C. el estado superficial obtenido es similar al que se obtiene con los modernos laminadores de desbastes en caliente, del tipo dúo. La calidad de los desbastes es muy suficiente para la fabricación de papel de aluminio de 0.009 a 0.011 mm de calidad comercial.

La máquina ha sido empleada únicamente, hasta el momento, en la fabricación de desbastes de aluminio destinados a la laminación de bandas y papel de aluminio.

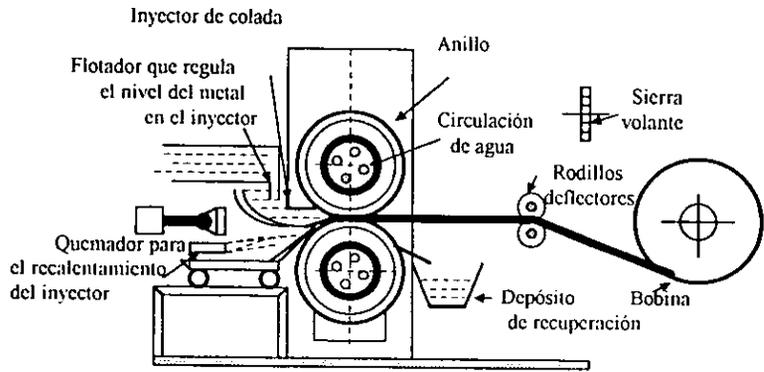


Fig. 15 Esquema de la máquina Pechiney-Coquillard.

ALEACIONES DE ALUMINIO EMPLEADAS EN LOS PROCESOS DE COLADA CONTINUA.

Una de las desventajas que presentan este tipo de colada, se da en el manejo a altas temperaturas, por lo que estos procesos encuentran su mayor aplicación en aleaciones con bajo punto de fusión, y aún más en aleaciones de aluminio. Aunque en la actualidad ya es posible colar aleaciones de cobre y acero.

En este trabajo hablaremos en particular de las aleaciones de aluminio. En la tabla 1 se muestran algunas de las principales aleaciones que se trabajan, así como también su composición representativa de elementos.

Como podemos observar las aleaciones caen en dos grandes clases: las llamadas no tratables térmicamente, y las tratables térmicamente. En la categoría anterior tenemos la aleaciones puras y la aleaciones de Al-Mn, las cuales son ampliamente usadas como rolados para muchas aplicaciones, por ejemplo: láminas para la construcción, en edificios, como chapas y recipientes. Los grados puros comercialmente tales como la 1200 realmente es una aleación Al-Fe-Si en la cual los niveles de estos elementos pueden necesitar de un control cuidadoso dependiendo del uso final que estas tengan.

Las aleaciones de Al-Mg roladas, encuentran una considerable aplicación en el área del transporte y el campo estructural, donde su alta resistencia, buena soldabilidad y resistencia a la corrosión son ventajas que presentan estas aleaciones.

De las aleaciones tratables térmicamente, las del tipo Al-Mg-Si son muy empleadas particularmente en la extrusión, para propósitos estructurales y decorativos. Mientras en las de alta resistencia, las aleaciones que contienen cobre, encuentran gran aplicación en la aeronáutica y algunas otras aplicaciones estructurales.

Las aleaciones de Al-Zn-Mg son muy soldables y envejecen naturalmente en las aleaciones de composición más bajas; las aleaciones de mayor composición contiene cobre desarrollado, con un envejecimiento artificial las de mayores niveles son accesibles para trabajos convencionales.

Las versiones de pureza controlada de aleaciones puras de aluminio y de varios tipos de aleaciones son empleadas en electricidad o decorativos de anodizado, las aleaciones con magnesio diluido se usan en autos y trenes.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Al igual que todos los procesos de fundición, la colada continua presenta ventajas y desventajas.

Como ventajas tenemos:

1. No es necesario el empleo de grandes trenes de laminación de mayor costo que la colada continua.
2. No se necesita fabricar lingotes como producto intermedio en el proceso de fabricación de barras.
3. Se reduce la pérdida de material por despunte de los lingotes, se aumenta el rendimiento del material.
4. Se obtiene un producto de gran uniformidad y se evitan las segregaciones más o menos importantes de diversos elementos.
5. El rendimiento en perfiles rolados es de aproximadamente del 10% del rolado a partir de lingotes.

6. La estructura del material obtenida por el proceso de colada continua es dendrítica como en otros procesos, pero es más fina y uniforme que en la colada tradicional, por que la longitud entera recibe el mismo tratamiento en el molde de metal.
7. Las propiedades físicas y los acabados de superficie, son comparables con los obtenidos en otros procesos con molde de metal.
8. Eliminación de los tiempos muertos, que en la colada tradicional ó individual resultan de la permanencia del metal en el molde.
9. En la colada de pequeños desbastes seguida de laminación en continuo, se evitan determinadas operaciones como: el escalpado ó descortezado, recalentamiento, y se puede reducir el número de pasadas en la laminación.
10. La colada continua es baja en costo unitario de mano de obra.

En cuanto a las desventajas podemos mencionar:

1. En el caso de los procesos con refrigeración directa, el contacto rápido del metal en curso de solidificación con el agua de refrigeración, acarrea riesgos de exudaciones e incluso perforaciones acompañadas a veces de explosiones.

2. La velocidad de solidificación al ser muy elevada, tiene como consecuencia la formación de segregaciones menores interdendríticas importantes, desarrollo de tensiones de colada generadoras de grietas y roturas y aumento del riesgo de inclusiones no metálicas.

3. El costo del equipo total es alto, cerca del doble al de los procesos de colada tradicional, debido a las características del proceso los parámetros deben ser sumamente controlados y esto por lo general sólo se logra mediante el empleo de equipo automático.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS.

I.1 PROCESO DE SOLIDIFICACION.

I.1.1 Solidificación.

En muchos procesos de colada y producción de lingotes, el flujo de calor no se da de manera constante. El metal líquido es vertido dentro de un molde frío; el calor específico y el calor de fusión del metal solidificando, pasa a través de una serie de resistencias térmicas en el molde hasta su completa solidificación. La figura I.1.1 muestra estos procesos esquemáticamente para la solidificación de un metal puro. Las resistencias térmicas las cuales, en general, deben ser consideradas son: a través del líquido, el metal solidificado, la interfase molde- metal y a través del mismo metal.

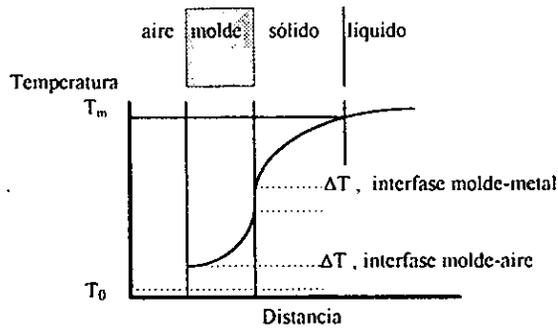


Fig. 1.1.1 Perfil de la temperatura en la solidificación de un metal puro.

El problema es matemática y físicamente complejo, puede ser igual o más simple cuando la geometría es considerada, cuando las propiedades térmicas permiten variar la temperatura, o cuando las aleaciones son consideradas. Problemas tales como los anteriores ahora son tratados usualmente por métodos computarizados, y algunos ejemplos serán considerados posteriormente.

1.1.2 Procesos de colada usando molde aislados.

La característica importante de solidificación de estos procesos es que el metal es mucho mejor conductor de calor que el molde mismo. Así parte de la solidificación depende primordialmente de las propiedades térmicas del molde. La conductividad térmica del metal prácticamente no tiene influencia. También excepto en donde la capa es de sección relativamente grande, el molde puede ser considerado de

forma semi-infinita en longitud, la parte exterior del molde no es calentada durante la solidificación. El problema de calor ilustrado en la figura 1.1.1 es representativo de la solidificación de un metal, considerando las diferentes resistencias térmicas por las que atraviesa el flujo de calor (incluyendo el sobrecalentamiento), tornándose complejo. Por lo que, se consideran algunas simplificaciones como se muestra en la figura 1.1.2.

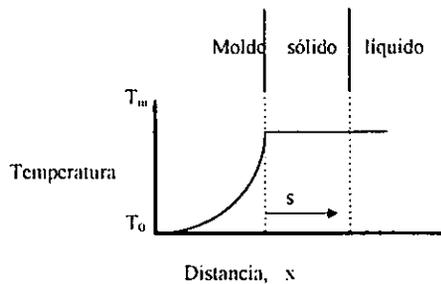


Fig. 1.1.2 Perfil de temperaturas aproximado en la solidificación de un metal puro en su punto de fusión.

Se considera al problema como un flujo de calor unidireccional. El metal es vaciado exactamente en su punto de fusión, la pared plana del molde se encuentra a temperatura ambiente T_0 inicialmente. Así la superficie del molde es calentada repentinamente hasta T_M en un tiempo $t = 0$. Esto es transitorio, el problema del flujo de calor en una dirección y la solución obedecen a la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha_m \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (1.1.1)$$

Donde:

α_m - Difusividad térmica del molde, cm^2/s

K_m - Conductividad térmica del molde, $\text{cal}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$

ρ_m - Densidad del molde, g/cm^3

t - Tiempo, s

x - Distancia de la pared del molde, cm (negativo dentro del molde).

La solución a esta ecuación diferencial para los límites de condición de estado dados arriba, la temperatura T en el molde como una función del tiempo t a una distancia de la superficie del molde x :

$$\frac{T - T_M}{T_0 - T_M} = \text{erf} \frac{-x}{2 \sqrt{\alpha_m t}} \quad (1.1.2)$$

Donde **erf** denota la función de error. La función de error de cero es cero y la función de error de infinito es uno.

La parte de flujo de calor dentro del molde en la interfase molde-metal esta dado por:

$$\left[\frac{q}{A} \right]_{x=0} = -K_m \left[\frac{\delta T}{\delta x} \right]_{x=0} \quad (1.1.3)$$

Cuando x incrementa positivamente de izquierda a derecha en la fig. I.1.2, q es parte de flujo de calor, y A es el área de la interfase molde-metal. Por diferenciación parcial de la ecuación I.1.2 con respecto a x , con $x=0$ y combinando los resultados con la ecuación I.1.3 la parte de flujo de calor a través de la interfase molde-metal es:

$$\left[\frac{q}{A} \right]_{x=0} = - \sqrt{\frac{K_m \rho_m C_m}{\pi t}} (T_M - T_0) \quad (I.1.4)$$

Donde c_m es el calor específico del metal del molde. Ahora, el calor del molde viene solamente de calor de fusión del metal solidificado a partir de entonces la temperatura del sólido como la de la pared y como la del metal líquido es exactamente T_M , fig. I.1.2. Así que.

$$\left[\frac{q}{A} \right]_{x=0} = - \rho_s H \frac{\delta S}{\delta t} \quad (I.1.5)$$

donde S = espesor solidificado.

Combinando las ecuaciones I.1.4 y I.1.5, e integrando de $s=0$ en $t=0$.

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{T_M - T_0}{\rho_s H} \right] \sqrt{K_m \rho_m C_m t} \quad (I.1.6)$$

La ecuación I.1.6, predice la manera en la cual las propiedades térmicas del metal y el molde se combinan para determinar el

enfriamiento de una parte del metal colado en un molde relativamente aislado. Nótese que la alta temperatura de fusión y el calor bajo de fusión (sobre un volumen base) favorecen la solidificación rápida.

El producto $K_m \rho_m C_m$ es una medida de la parte en la cual el molde puede absorber calor y es en algún tiempo llamada la difusividad de calor. El espesor del metal sólido es una función parabolica del tiempo, en la cual la media de la solidificación parte es inicialmente muy rápida y decrece conforme el molde es calentado.

1.1.3 Procesos de colada en los cuales la resistencia de la interfase es dominante.

En un grán número de importantes procesos de colada, el flujo de calor está controlado en grán parte por la resistencia en la interfase molde-metal. Estos procesos incluyen la colada de molde permanente, fundiciones a presión, refrigeración por salpicadura (splat cooling), y procesos manufacturados por reducción a polvo. Cuando la resistencia de la interfase molde-metal es de esencial importancia, la distribución de temperaturas a través del metal solidificado y el metal se muestra en la figura 1.1.3 . Toda la temperatura escapa a través de la interfase. El molde considerado de extensión infinita, queda originalmente a temperatura T_0 .

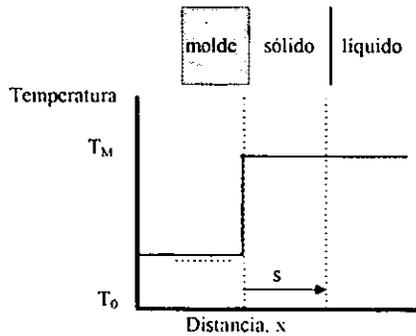


Fig. I.1.3 Perfil de temperatura durante la solidificación contra una pared grande plana del molde controlando la resistencia de la interfase molde-metal.

Parte del flujo de calor a través de esta interfase del metal colado en su punto de fusión es:

$$\left[\frac{q}{A} \right]_{x=0} = -h (T_M - T_0) \quad (1.1.7)$$

combinando la ecuación I.1.7 con la ecuación I.1.5 para el caso de una pared grande, plana y horizontal e integrando desde $S=0$ y $t=0$ se tiene:

$$S = h \frac{T_M - T_0}{\rho_s H} t \quad (1.1.8)$$

La ecuación I.1.8. puede ser generalizada para la colada de formas simples para calcular el tiempo de solidificación t_f en términos de la relación volumen-área de colada:

$$t_f = \frac{\rho_s H}{h (T_M - T_0)} \frac{V}{A} \quad (1.1.9)$$

donde : ρ_s = densidad del metal sólido, g / cm³

H = calor de fusión, cal / g

h = coeficiente de transferencia de calor cal / cm²°C s
(interface)

T₀ = temperatura ambiente °C

T_M = punto de fusión del metal °C

V = volumen considerado cm³

A = arrea considerada cm²

Las ecuaciones I.1.8 y I.1.9 son válidas cuando la resistencia de flujo de calor a través de la interfase es grande comparada con otras resistencias en el metal y el molde. Excepto cuando el molde es relativamente aislante, esta condición se da cuando

$$h \ll \frac{K_s}{S} \quad (I.1.10)$$

Cuando el molde es relativamente aislante, va incluida la condición necesaria que .

$$h^2 \ll \frac{K_m \rho_m C_m}{t} \quad (I.1.11)$$

1.2 TRASFERENCIA DE CALOR.

1.2.1 Conducción de estado estable.

Se llama estado estable al caso de transferencia de calor en que el tiempo no es un factor. Considerar la transferencia de calor en donde no interviene el tiempo permite simplificar el análisis en cierta medida. La ecuación principal para la conducción de estado estable con generación interna es:

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = 0 \quad (1.2.1)$$

que se conoce como la ecuación de **Poisson**; la ecuación de **Laplace** se aplica para la conducción de estado estable sin generación interna de calor:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (1.2.2)$$

Las dos ecuaciones anteriores se aplican a un medio isótropo, o sea el medio cuyas propiedades no varían con la dirección; se supone que las propiedades físicas también son independientes de la temperatura.

1.2.2 Sistemas unidimensionales sin generación.

Una forma de la ecuación de Laplace en una dimensión es:

$$\frac{d}{dx} \left[x^i \frac{dT}{dx} \right] = 0 \quad (1.2.3)$$

en donde los límites son: $i = 0, 1, \text{ ó } 2$ en coordenadas rectangulares, cilíndricas y esféricas, respectivamente.

Paredes planas.

En el caso de una pared plana como la mostrada en la figura 1.2.1, se aplica la ecuación 1.2.3 con $i = 0$.

La ecuación y condiciones de frontera que se deben satisfacer son :

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (1.2.4)$$

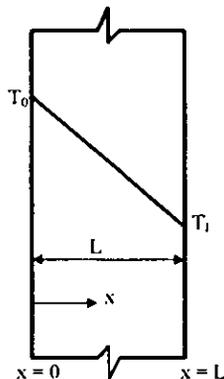


Fig. 1.2.1 Conducción de estado estable en una pared plana.

$$\begin{aligned} T(x) = T(0) = T_0 & \quad \text{en } x = 0 \\ T(x) = T(L) = T_L & \quad \text{en } x = L \end{aligned}$$

La ecuación se puede separar e integrar dos veces para obtener

$$T(X) = c_1x + c_2 \quad (1.2.5)$$

y se pueden evaluar las constantes de integración c_1 y c_2 , aplicando la ecuación de frontera, con lo que se obtiene

$$c_1 = \frac{T_L - T_0}{L} \quad \text{y} \quad c_2 = T_0$$

Cuando se sustituyen c_1 y c_2 en la ecuación 1.2.5, la expresión final para el perfil de temperaturas queda.

$$T(x) = \frac{T_L - T_0}{L} x + T_0$$

ó

$$T(x) = T_0 - \frac{T_0 - T_L}{L} x \quad (1.2.6)$$

De acuerdo con la ecuación 1.2.6, la variación de la temperatura es lineal en una pared plana bajo las condiciones especificadas como se muestra en la figura 1.2.1.

Se puede usar la ecuación de la razón de Fourier para determinar el flujo de calor o la razón de flujo de calor en este caso, la ecuación de la razón presentada en forma escalar es:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.2.7)$$

Dado que en el caso de estado estable q_x es constante, se puede separar e integrar directamente esta ecuación como

$$q_x \int_0^L dx = -kA \int_{T_0}^T dT$$

quedando:

$$q_x = \frac{kA}{L} (T_0 - T_L) \quad (1.2.8)$$

En otra forma, se pudo haber evaluado el gradiente de temperatura dT/dx de la ecuación 1.2.6 y sustituyendo en la ecuación 1.2.7 para lograr un resultado idéntico. Se emplean estas dos formas alternas de evaluar el calor, ya sea por integración directa de la ecuación de la razón de Fourier o resolviendo el perfil de la temperatura y sustituyendo la expresión del gradiente de temperaturas en la ecuación de la razón. En determinados casos el enfoque puede ser más sencillo que el otro. Aunque no se pueda establecer un enunciado general en este sentido.

La cantidad kA/L , en la ecuación se denomina la conductancia térmica para una placa o pared plana. Se llama resistencia térmica al recíproco de esta cantidad, L/kA .

1.3 HORNOS ELECTRICOS.

Los hornos eléctricos en general presentan la mayor parte de la ventajas técnicas exigidas a un material de fusión para obtener un metal de calidad:

- Perfecta regulación de la temperatura.
- Reducida pérdida por fuego
- Escaso contenido de gas.

Los hornos eléctricos se clasifican en :

- Hornos de resistencia.
- Hornos de inducción.

1.3.1 Hornos de resistencia:

Las resistencias pueden ser metálicas o no. El calentamiento por resistencias metálicas, el más general puede hacerse por:

- Por inducción; en el caso de los hornos de solera.

- Por radiación y conducción; en el caso de los hornos con crisol.

1.3.2 Horno de crisol:

Se utiliza generalmente, para mantener la temperatura del metal y no para la fusión, a causa del coste de esta fusión. Este horno puede tener también una doble regulación, permite más fácilmente el empleo de fundentes que el horno de solera.

1.3.3. Termopares.

Para la medición de la temperatura del horno, se utilizaran pares **Cromel-alumel**, que tienen una fuerza electromotriz elevada y que varía de una forma regular con la temperatura. Pueden ser utilizados sin riesgo hasta una temperatura de 900 °C y según su utilización puede estar cubierto o protegido por una vaina de hierro fundido o recubierto.

1.3.4 Tránsito de calor en las paredes.

Aunque es posible separar la conducción, convección y radiación para facilitar su estudio, es poco usual el caso en que una situación real de ingeniería de la transferencia de calor no involucre al menos dos, si no es que los tres mecanismos.

La figura 1.3.1, muestra una pared plana compuesta, formada por dos materiales distintos, que separan dos gases a distintas temperaturas.

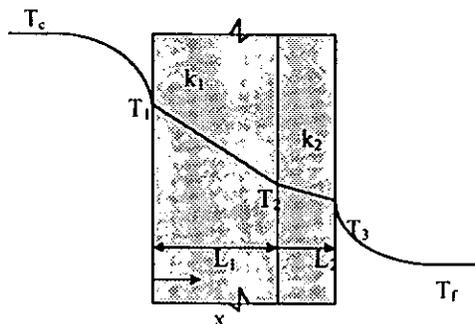


Fig. 1.3.1 Transferencia de calor a través de una pared plana compuesta con convección en las superficies

Se puede imaginar este caso físicamente como el de la pared de un horno en que se coloca un material próximo al gas caliente de horno por sus cualidades aislantes y se coloca el otro fuera o adyacente al aire, debido a su apariencia, o quizás sus cualidades estructurales ambas. Denotando por T_c y T_f las temperaturas caliente y fría del gas respectivamente, las temperaturas superficiales de los materiales por T_1 y T_3 y la temperatura de interfase entre los dos materiales de la pared por T_2 , para la razón de transferencia de calor para cada parte en este proceso se puede escribir

$$q_{c \rightarrow 1} = h_c A (T_c - T_1)$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = -k_1 A \frac{dT}{dx}$$

$$q_{2 \rightarrow 3} = -k_2 A \frac{dT}{dx}$$

$$q_{3 \rightarrow f} = h_f A (T_3 - T_f)$$

Para el caso de estado estable, las dos expresiones de la conducción toman la misma forma, siendo la diferencia los límites de integración. Obteniendo el valor $q_{1 \rightarrow 2}$, se tiene

$$q_{1 \rightarrow 2} \int_0^{L_1} dx = -k_1 A \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \frac{k_1 A}{L_1} (T_1 - T_2) \quad (1.3.1)$$

De un análisis semejante para $q_{2 \rightarrow 3}$ obtenemos

$$q_{2 \rightarrow 3} = \frac{k_2 A}{L_2} (T_2 - T_3) \quad (1.3.2)$$

Se notara aquí que el perfil de la temperatura es lineal para la condición de estado estable a través de una pared plana.

El estado estable también requiere que todas las q sean iguales; por tanto, se puede escribir las siguientes igualdades:

$$q = h_c A (T_c - T_1) = \frac{k_1 A}{L_1} (T_1 - T_2)$$

$$= \frac{k_2 A}{L_1} (T_2 - T_1) = h_r A (T_3 - T_1)$$

Cada una de estas forma es suficiente para calcular el flujo de calor. Se pueden obtener expresiones adicionales si se escribe cada diferencia de temperatura en función de q como:

$$T_h - T_1 = q \left[\frac{1}{h_c A} \right]$$

$$T_1 - T_2 = q \left[\frac{L_1}{k_1 A} \right]$$

$$T_2 - T_3 = q \left[\frac{L_2}{k_2 A} \right]$$

$$T_3 - T_r = q \left[\frac{1}{h_r A} \right]$$

La adición de dos o más de estas expresiones para q . Por ejemplo, si se suman las dos expresiones de la conducción, se obtiene

$$q = \frac{T_1 - T_3}{\frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A}} \quad (1.3.3)$$

que involucra la diferencia en temperaturas superficiales como fuerza motriz. Con esto se puede evaluar q sin conocer la temperatura T_2 de la interfase.

Si se suman todas las ecuaciones de las diferencias de la temperatura, se obtiene la siguiente expresión para q

$$q = \frac{T_c - T_f}{\frac{1}{h_c A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_f A}} \quad (1.3.4)$$

que solamente involucra la diferencia global o total de temperaturas, entre los gases caliente y frío.

Se puede considerar que la ecuación 1.3.4 relaciona la cantidad que se va a transferir (calor) con la razón de la fuerza motriz (la diferencia de la temperatura) al efecto combinado de cada parte del paso del flujo del calor. Estos últimos efectos constituyen individualmente las resistencias que ofrece cada parte a la trayectoria del flujo de calor. Este concepto es análogo a la ley de Ohm, en donde la contraparte de la trayectoria de calor es sencillamente

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_t} \quad (1.3.5)$$

siendo $\sum R_t$ una suma apropiada (en serie, en paralelo o una combinación) de las distintas resistencias involucradas.

La resistencia térmica de una película convectiva es $1/hA$; la conducción a través de una pared plana es L/kA . Estos términos son los recíprocos de las conductancias térmicas.

I.4 TRENES DE ENGRANAJES.

Se llama tren de engranajes a toda transmisión constituida por más de dos engranajes.

I.4.1 Trenes simples:

Está constituido por varios ejes de rotación paralelos, fijos en el espacio, cada uno de ellos llevando una rueda dentada (figura I.4.1). La condición de acoplamiento en este tipo de transmisión exige que todas las ruedas tengan el mismo paso normal. Tal como se verificará a continuación, la relación de transmisión depende exclusivamente del número de dientes de las ruedas de entrada y salida, siendo el papel de las ruedas intermedias el de controlar el sentido de la rotación del eje de salida así como la separación entre ejes.

$$n = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{\omega_2 \omega_3 \omega_4}{\omega_1 \omega_2 \omega_3} = \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{Z_2 Z_3 Z_4} = \frac{Z_1}{Z_4}$$

donde:

n = relación de transmisión.

ω_e = velocidad angular de entrada.

ω_s = velocidad angular de salida.

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ = velocidad angular de los engranes: 1, 2, 3, 4 respectivamente.

Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 = número de dientes de los engranes: 1, 2, 3, 4 respectivamente.

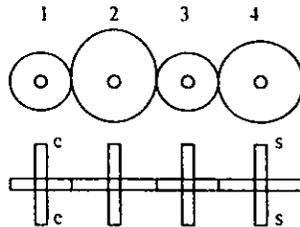


Fig. 1.4.1 Tren simple.

1.4.2 Trenes compuestos.

Este difiere del tren simple en que cada eje lleva dos engranajes solidarios logrando una transmisión más compacta (figura 1.4.2). Cuando se utiliza para la transmisión de potencias bajas o en instrumentación se pueden seleccionar todas las ruedas con el mismo paso normal. Si se utiliza para la transmisión de grandes potencias se puede variar el paso normal en cada etapa, (al pasar de un eje de alta velocidad a uno de baja, el tamaño del diente, y consecuentemente el paso normal, aumentan). Para el tren indicado en la figura 1.4.2 la relación de transmisión será.

$$n = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_1 \times Z_3}{Z_2 \times Z_4}$$

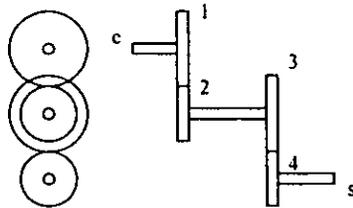


Fig. 1.4.2 Tren compuesto.

CAPITULO II

DESARROLLO DEL SISTEMA

II.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE MOLDE MOVIL.

Gran parte del estudio para el diseño del sistema y más en particular de la lingotera o molde móvil estará basado en un análisis realizado a un sistema de molde móvil el cual es una mezcla de los procesos Mann y Properzi. En este sistema compuesto por una rueda acanalada cubierta por una banda ambas de acero, en el cual se cuelan barras de aluminio de 5.0 por 4.7 cm² se obtuvieron los siguientes resultados:

1. El coeficiente de transferencia de calor en la interfase molde-metal, juega un papel esencial en la solidificación del metal.

2. El tiempo de solidificación es inversamente proporcional al coeficiente de transferencia de calor.

3. La formación de espacios de aire entre el metal y la banda de acero incrementa el tiempo de solidificación, y provoca una solidificación asimétrica.

4. El coeficiente de transferencia de calor entre el molde y el agua fría tiene poca influencia sobre el tiempo de solidificación, este coeficiente es substancialmente grande comparado con el coeficiente de transferencia de calor de la interfase molde-metal.

El análisis incluye también el uso de moldes de cobre y latón (CuZn33) cuyos resultados indicaron una reducción en el tiempo de solidificación de aproximadamente 10% y 7.5% respectivamente en comparación con el molde de acero. Las desventajas primordiales de los materiales mencionados son para el cobre puro su baja resistencia mecánica y para el latón su bajo punto de fusión.

En el sistema móvil desarrollado en este trabajo se obtienen bandas de aluminio de aproximadamente 2.5 cm de ancho por 0.2 cm de espesor.

Cabe destacar que el sistema de molde móvil obtenido en este trabajo será una réplica a escala de un sistema para obtener bandas de aproximadamente 22 cm de ancho por 2 mm de espesor, la representación de dicho sistema solo se hará de una manera estructural y solo del sistema móvil; por lo que tanto los análisis de transferencia de calor en la lingotera, en los hornos etc. así como las dimensiones de los sistemas auxiliares se apegaran única y exclusivamente a este sistema.

II.1.1 Molde o lingotera..

El molde o lingotera, esta compuesto por una barra de cobre rectangular con una canal de aproximadamente 2.5 cm de ancho por 0.2 cm de profundidad rolada colocada sobre una rueda de acero como se muestra en la figura II.1.2.

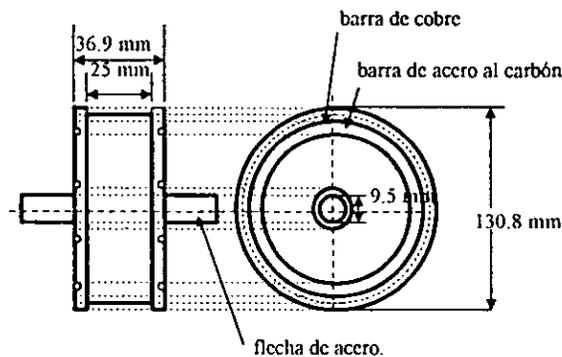


Fig. II.1.1 Esquema del molde

De acuerdo a los análisis mencionados anteriormente el uso de un molde de cobre trae consigo la reducción del tiempo de solidificación, la rueda de acero se emplea para compensar la baja resistencia mecánica del cobre.

El estudio del comportamiento de los procesos de transferencia de calor son muy importantes debido a que las características de los demás sistemas dependen de estos. Los cálculos realizados (apéndice b) indican un proceso de transferencia de calor en donde la resistencia

térmica de la interfase molde-metal es dominante (proceso explicado en el capítulo I) por lo tanto las dimensiones de espesor del molde juegan hasta cierto punto un papel secundario en cuanto a la transferencia de calor.

También, de acuerdo con los cálculos la mayor parte del calor transferido del metal colado al medio ambiente se da a través de las paredes del molde.

El molde tiene por tapa una banda vinculada por tres ruedas guías como se muestra en la figura II.1.2. Se opta por un molde de un diámetro mayor al de las ruedas guías (aprox. el doble) para evitar que en este debido a la velocidad la banda presente un defasamiento, provocando que pudiera quedarse en ocasiones el molde destapado.

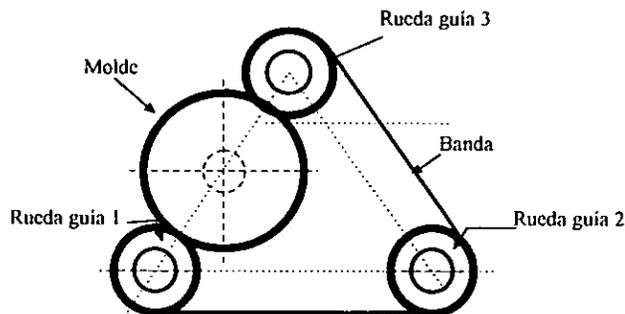


Fig. II.1.2 Esquema del sistema de molde móvil desarrollado.

II.1.2 Ruedas guía.

El sistema cuenta con tres ruedas guía maquinadas de una barra de acero rolada en frío con 48.92 mm de diámetro, 36.8 mm de ancho y 3.5 mm de espesor. Estas ruedas tienen una flecha del mismo material de 9.5 mm de diámetro. Como se muestra en la figura II.1.3.

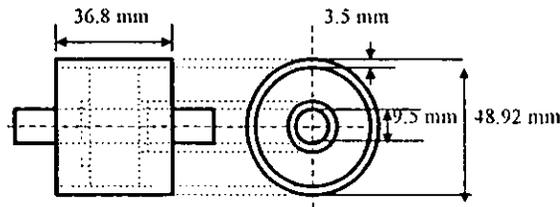


Fig. II.1.3 Dimensiones de las ruedas guías.

La rueda guía 1 con una flecha de 110.5 mm de longitud, acopla al sistema motriz por medio de un engrane, el cual da el movimiento de rotación.

En la rueda guía 2 con una flecha de 100 mm de longitud, se ajusta la tensión de la banda del sistema de molde móvil.

La rueda 3 con flecha de 95 mm de longitud puesta a unos 60° con respecto a la horizontal, sirve únicamente como guía de la banda y es el extremo por donde es vaciado el metal líquido

II.1.3 Banda.

Debido a que el espesor del metal a colar es relativamente pequeña, cabe la posibilidad de utilizar una banda de latón flexible con un espesor necesario para evitar el flexionamiento de la misma hacia dentro del molde debido al calor.

II.1.4 Estructura de soporte.

La estructura esta compuesta por 20 tramos de viga tipo H. maquinadas de una barra de acero roladas en frio de forma rectangular de 12.68 mm por 16.0 mm . La figura II.1.4 muestra las dimensiones de la sección transversal de las vigas tipo H .

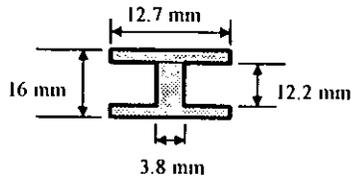


Fig. II.1.4 Sección transversal de una viga de acero.

...La forma de la estructura se muestra en la figura II.1.5, cuya función es mantener fijo el plano de las ruedas:

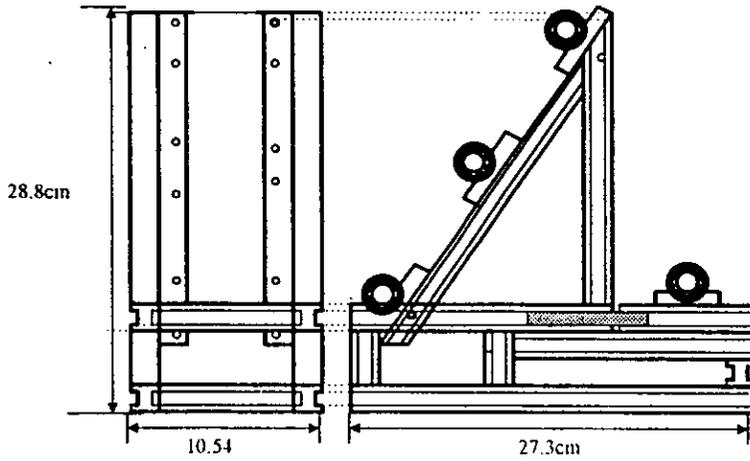


Fig. II.1.5 Estructura de soporte.

Las ruedas se fijan a la estructura mediante unas chumaceras como se indica en la figura.



Fig. II.1.6 Esquema de la instalación del sistema.

II.2 SISTEMA DE FUNDICION Y VACIADO DEL METAL.

El sistema de fundición y vaciado de metal, consta de las siguientes partes:

Horno de fundición.

Contenedor.

Alimentador.

II.2.1 Horno de fundición:

El horno de fundición es un horno eléctrico de crisol móvil. La cantidad de metal a utilizar en las pruebas, es el necesario para colar una banda de una longitud aproximada de 50 cm. pues se considera que en esa longitud los parámetros que rigen al sistema se mantienen estables, además de que la pruebas sólo se realizaran a nivel laboratorio. Para esto el volumen equivalente del metal a utilizar es de 25 cm³.

El horno esta construido para un crisol de carburo de silicio de dimensiones mostradas en la figura II.2.1.

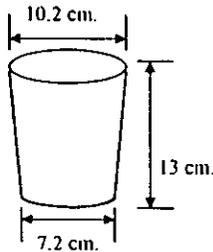


Fig. II.2.1 Dimensiones del crisol usado en el horno de fundición.

El espacio interno del horno es de 10.5 X 11.5 cm. con una altura de 15.5 cm. Para la construcción de este horno, se utilizó ladrillo refractario de arcilla de 6.5 cm. de espesor para las paredes y de 2.5 cm. de espesor para la base y tapa. Todo esto está contenido dentro de una coraza de lamina de acero de aproximadamente 0.15 cm de espesor.

La distribución de las cavidades dentro de las paredes del horno las cuales han de contener la resistencia, se realiza de tal manera que la longitud de la resistencia sea lo mayor posible para tener un calentamiento mas uniforme, dándonos una longitud de aproximadamente 2 m.

Los cálculos de pérdidas de calor a través de las paredes de horno, así como también la cantidad de calor necesario para calentar la carga del horno, (apéndice B) nos dan la pauta para determinar el valor de la resistencia a emplear. Cabe señalar también que este valor estará sujeto

también a la cantidad de corriente que se pueda administrar puesto que como ya mencionamos anteriormente, los experimentos se realizarán a nivel laboratorio por lo que se tratará de usar una corriente total del sistema lo relativamente pequeña para evitar problemas.

La resistencia a utilizar tiene un valor de 10Ω , la distancia entre espiras es de alrededor de 0.7 cm. Y el diámetro de cada espira es de aproximadamente 0.9 cm.

La función del horno es la de elevar la temperatura del metal por encima de su punto de fusión, y en este mismo se realiza la limpieza del metal líquido.

El horno alcanza una temperatura de $730 \text{ }^\circ\text{C}$, en un lapso de 55 min aproximadamente con carga.

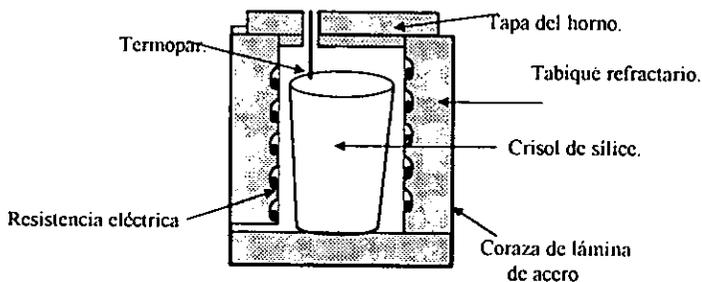


Figura II.2.2 Esquema del horno de fundición.

II.2.2 Contenedor

El contenedor es un horno eléctrico de crisol fijo. A diferencia del horno de fusión, la resistencia del contenedor se encuentra contenida en cavidades externas del mismo crisol, este crisol se construyó de cerámica y se le dió la forma especial, como se muestra en la figura II.2.3.

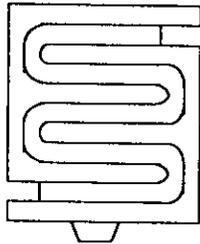


Fig. II.2.3 Vista frontal del crisol del contenedor.

El crisol está aislado térmicamente en la parte externa por tabique refractario de arcilla de aproximadamente 3.2 cm de espesor forrado por una tela de asbesto, todo esto está contenido en una coraza de lámina de acero utilizada en el horno.

La resistencia eléctrica utilizada en el contenedor, tiene las mismas características que la empleada en el horno de fusión solo que esta tiene un valor de 9.5Ω .

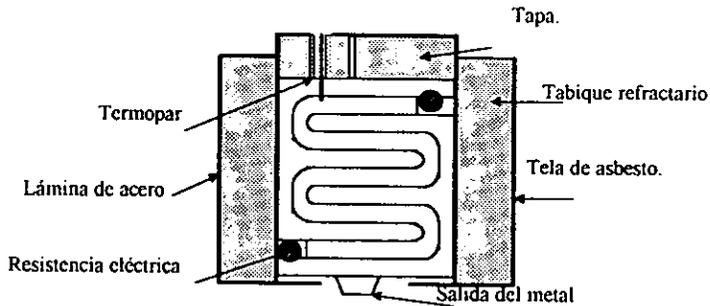


Fig. II.2.4 Esquema del contenedor.

El contenedor alcanza una temperatura de 730 °C en un tiempo de 50 min.

El contenedor recibe el metal líquido del horno, este mantiene al metal a una temperatura adecuada para ser vaciado, además en este dispositivo se regula el flujo de metal líquido hacia el alimentador.

II.2.3 Alimentador.

Esta es una de las partes más importantes y delicadas del sistema, puesto que debido al tamaño del sistema de molde móvil la dificultad para acoplarlo y mantenerlo a una temperatura deseada es muy grande. Este dispositivo irá cambiando de acuerdo a las necesidades, conforme se desarrollen las pruebas.

II.3 SISTEMA DE REFRIGERACION..

La refrigeración del molde se realiza con agua a temperatura ambiente (20 °C aproximadamente). Es importante tener un buen control sobre el sistema de enfriamiento puesto que este dependen directamente algunos parámetros. Como podemos observar en los cálculos de transferencia de calor (apéndice B) la mayor parte del calor transferido al medio ambiente, se da a través de las paredes del molde por lo que la refrigeración se aplicará esencialmente a estas.

Este sistema esta compuesto por las siguientes partes:

- a) Tanque de agua fría.
- b) Depósito de nivel de agua.
- c) Regulador de flujo.
- d) Colector de agua caliente.

II.3.1 Tanque de agua fría.

Este se encuentra por debajo de la mesa de trabajo, tiene una capacidad de 20 litros aproximadamente. Su principal función es la de

reducir la temperatura del agua proveniente del colector al mezclarse con el agua fría. Cabe señalar que la capacidad tanto de este depósito como el de los demás será la necesaria para realizar una sola prueba para una longitud descrita al principio de este capítulo.

Este depósito cuenta con una bomba rotatoria de agua, la cual alimenta al depósito de nivel de agua, es alimentada con 120 v. y una corriente de 0.6 A, la bomba es controlada por un controlador automático de nivel.

11.3.2 Depósito de nivel de agua.

Es un recipiente con una capacidad de 17 litros aproximadamente. Este depósito recibe el agua de la bomba proveniente del tanque de agua fría., el flujo de agua suministrado al molde depende directamente de nivel de este depósito, por lo que el nivel de dicho depósito debe mantenerse casi constante para alimentar al molde con un flujo constante de agua, y el control de la bomba es el que nos permite obtenerlo.

Este depósito se encuentra unos cuantos centímetros por encima del sistema de molde móvil.

II.3.3 Regulador de flujo.

Este regulador se trata de una válvula de compuerta de $\frac{1}{2}$ " , esta válvula nos permite tener una variación del flujo de agua fría desde 0 hasta 3.45 litros por minuto. De esta manera el flujo de agua requerido para el enfriamiento del molde (apéndice B) se satisface

II.3.4 Colector.

Este es un recipiente cuadrado de lámina de acero al igual que los depósitos anteriores, colocado por debajo del sistema de molde móvil. Su función es la de colectar el agua caliente que cae después de bañar al molde, para después mediante una tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ " mandarla al tanque de agua fría.

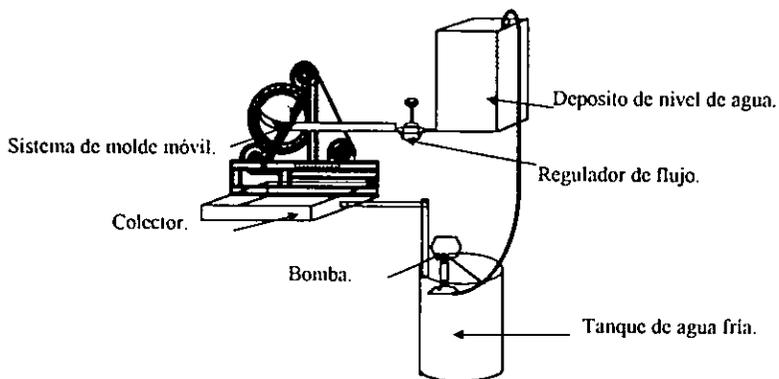


Fig. II.3.1 Esquema de la distribución de los elementos del sistema de refrigeración.

II.4 SISTEMA MOTRIZ.

Del apendice B, tenemos que el sistema motriz debe proporcionar una velocidad máxima por encima de 6.78 rev/ min. , y una velocidad mínima de 0.6 rev/ min.

El sistema motriz es un tren de engranajes compuesto, como se vió en el capítulo I sección 1.5.2 este tipo de engranajes brindan una transmisión compacta. Este tren esta compuesto de tres engranes del mismo paso, el tren de engranajes es movido por un motor de corriente directa al cual se le alimenta con un voltaje variables desde 0 hasta 40 v. lo que permite regular la velocidad suministrada al sistema de molde móvil, cumpliendo con el intervalo de velocidades indicado anteriormente.

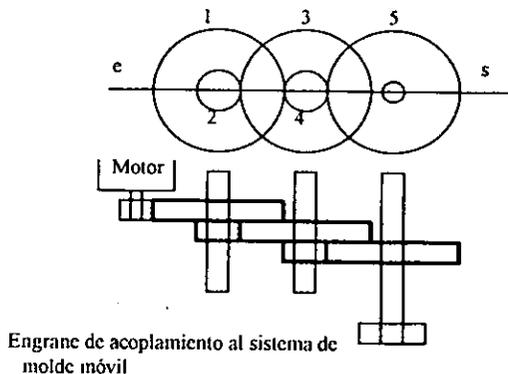


Fig. II.4.1 Sistema motriz empleado

CAPITULO III

EXPERIMENTACION.

III.1 Pruebas del horno.

La velocidad de calentamiento del horno de fundición sin carga se muestra en la siguiente gráfica.

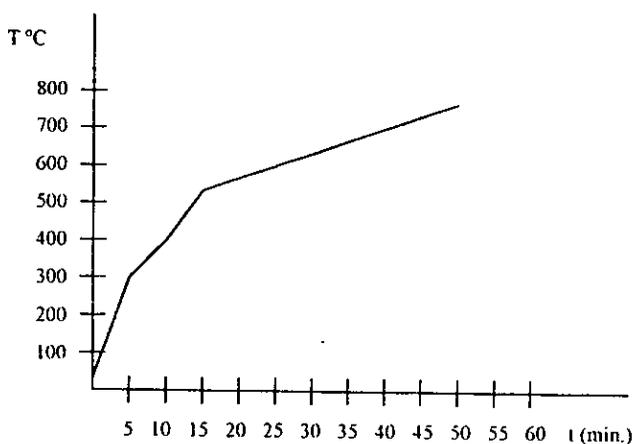


Fig. III.1.1 Gráfica de la velocidad de calentamiento del horno sin carga (sin crisol ni metal)

Como se muestra en la gráfica anterior la velocidad de calentamiento del horno disminuye conforme aumenta el gradiente de temperaturas. El calor perdido a través de las paredes del horno (apéndice B) aumenta conforme el gradiente de temperaturas del interior del horno y del exterior del mismo aumenta.

La aleación de aluminio a emplear es la aleación 380 con composición de 8% Si, 2% Fe, 3.5% Cu, 0.5% Mn, 0.1% Mg, 0.5% Ni, 3.0% Zn, 0.35% Sn, 0.5% otros. Su punto de fusión es de 666 °C.

La prueba del horno con carga se realiza para una cantidad de metal de 67.5 g (equivalente a los 25 cm³ descritos en la sección II.2.1).

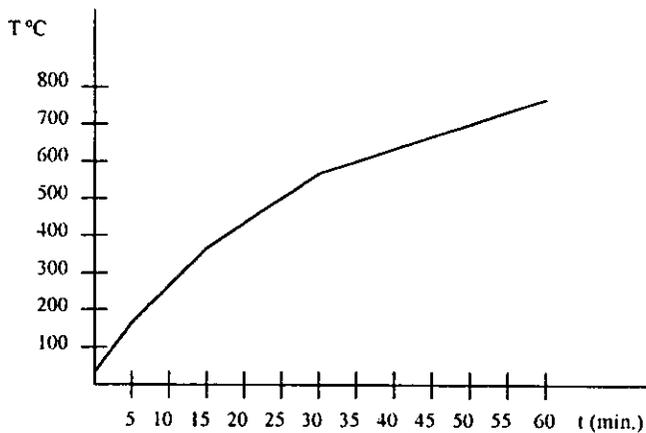


Fig. III.1.2 Gráfica de la velocidad de calentamiento del horno de fundición con carga (crisol y metal)

La figura III.1.2 muestra la velocidad de calentamiento del horno con carga. En la curva de la gráfica se puede notar una velocidad de calentamiento más uniforme que el calentamiento del horno sin carga. También podemos apreciar un incremento en el tiempo de calentamiento de 44% aproximadamente. La temperatura de fusión de la aleación empleada de aluminio realmente es de 666 °C.

III.2 Prueba del contenedor.

El contenedor a diferencia del horno de fundición tiene el crisol integrado (sección II.2.2). La prueba se realiza sin carga de metal, puesto que el metal se funde primero en el horno y después se vacía al contenedor. El cual debe tener la misma temperatura.

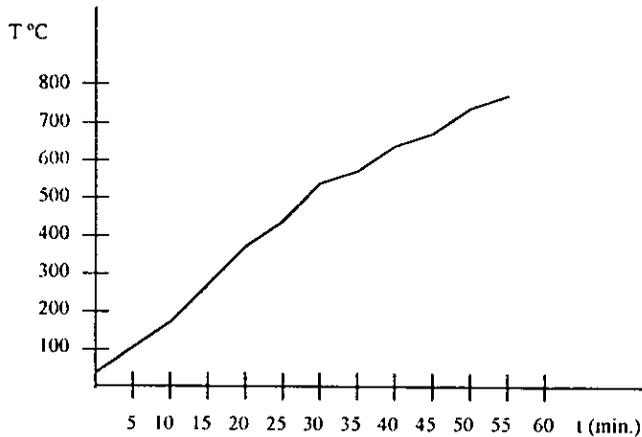


Fig. III.2.1 Gráfica de la velocidad de calentamiento del contenedor sin carga (sin metal).

III.3 Realización de los experimentos.

Los experimentos se realizaron de la siguiente manera:

1. El metal es fundido en el horno de fundición y se eleva su temperatura hasta $710\text{ }^{\circ}\text{C}$, la lectura es tomada en un multímetro con su equivalencia en voltios de 28.4 mV . Al mismo tiempo es puesto en marcha el contenedor.
2. El metal es vaciado al contenedor a la temperatura de $710\text{ }^{\circ}\text{C}$, el horno es desactivado y se activa el alimentador. El contenedor esta controlado automáticamente por un controlador el cual nos mantiene la temperatura de $710\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Después de que el alimentador alcanza la temperatura de $710\text{ }^{\circ}\text{C}$. El alimentador es controlado mediante un variac, y la temperatura es medida con un multímetro.
4. Una vez dispuestos a vaciar el metal, se pone en marcha la máquina junto con el sistema de enfriamiento. Con todo en marcha, se vacía el metal y se obtiene las muestras.

Los termopares se que se utilizan para censar la temperatura son del tipo Cromel-alumel descritos en la sección I.3.3.

CAPITULO IV

RESULTADOS

De los experimentos realizados tenemos las siguientes muestras que fueron coladas bajo las siguientes condiciones:

1. El metal fue fundido y se sobrecalentó hasta 710 °C.
2. El metal es vaciado del contenedor al alimentador a 710°C.
3. La temperatura del alimentador es de 710 °C, sensada a 2 cm antes de la entrada del metal al molde.
4. El flujo del agua máximo del sistema de refrigeración para asegurar que el molde se mantenga frío (3.45 lt/min).
5. La velocidad de la máquina es de 1.38 cm/s.

Las características superficiales obtenidas en las muestras se presentan en las siguientes figuras:

Para la muestra a:



Fig. IV.1 Distribución del metal sobre el molde al inicio de la colada.



Fig. IV.2 Superficie de la muestra obtenida del lado del molde la cual muestra una salpicadura provocada por la humedad del molde..



Fig. IV.3 Superficie de la muestra obtenida del lado de la banda..

Para la muestra b:



Fig. IV.4 Distribución del metal al inicio de la colada la cual presenta un vacío al centro provocado por la mala alimentación inicial del metal líquido al molde



Fig. IV.5 Superficie de la muestra colada obtenida del lado del molde.



Fig. IV.6 Superficie de la muestra colada obtenida del lado de la banda.

Como podemos apreciar en ambas muestras, la distribución del metal líquido sobre el molde se lleva a cabo desde sus orillas hacia el centro del mismo.

Como lo mostraron los cálculos la mayor parte del calor extraído a través del molde se realiza en las paredes del mismo y esto se refleja en las muestras (fig. IV.2, IV.5) ya que presentan una superficie regular libre de ondulaciones provocadas por las refundiciones de la superficie del metal.

En las superficies de las muestras del lado de la banda podemos apreciar ondulaciones resultado de las refundiciones de la superficie del metal en parte, y en parte por la ondulación de la banda debido al calentamiento de la misma.

APENDICE A

TABLAS

Coefficientes de transferencia de calor (h) de las interfaces
en $\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}$

Entre Al y Cu	0.070
Entre molde y agua	0.0031
Entre banda de latón y Al	0.050

Tabla 1 Coeficientes de transferencia de calor de las interfaces.

Coefficientes de transferencia de calor (k) de los materiales
empleados en $\text{cal}/\text{cm s } ^\circ\text{C}$

Aluminio	0.55
Cobre	0.89
Acero	0.13
Latón	0.26

Tabla 2 Coeficientes de transferencia de calor de los materiales
empleados en el molde y banda.

Materiales	ρ (Kg/m ³)	Cp (cal/g °C)	α (m ² /hr.)	k (Kcal/hr m °C)
Metales:				
Aluminio	2700.97	0.224	0.3297	3687.78
Cobre	8889.95	0.092	0.3697	6229.95
Fierro	7880.82	0.122	0.0771	1181.73
Aleaciones:				
Aluminio 2024	2771.10	0.23	0.1635	1961.17
Latón (70% Cu,30% Zn)	8521.54	0.091	0.1179	1704.15
Fierro fundido	7288.16	0.100	0.0603	826.93
Acero inoxidable	7816.75	0.110	0.0158	262.60
Acero suave (1% C)	7116.75	0.113	0.0418	692.83
No metales:				
Asbesto	576.64	0.25		2.57
Tabique (de arcilla refractaria)	2306.58	0.22		(a 100°C 1.81)
Madera roble (a la venta)	816.91	0.57		0.642

Tabla 3 Propiedades físicas de los sólidos. (20 °C).

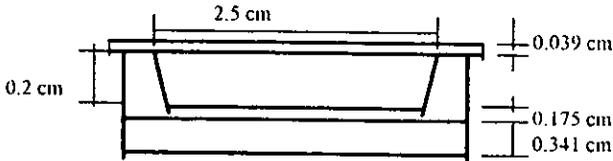
Clases y tipos de aleaciones.	Designación Internacional	Composición aproximada de elementos %.					
		Cu	Mg	Si	Mn	Zn	Otros
No tratables							
Térmicamente							
Puras	1080	99.80% min. Al					
	1050	99.50% min. Al					
	1200 (1100)	99.00% min. Al					
Al-Mn (-Mg)	3003 (3103)	0.1	...	...	1.2	...	...
	3004	...	1.0	...	1.2	...	...
	3800	3.0	0.1	...	0.5	3.0	...
Al-Mg (-Mn)	5005	...	0.8	...	...	...	...
	5050	...	1.4	...	...	...	...
	5052 (5252)	...	2.5	...	...	...	0.25 Cr
	5454	...	2.7	...	0.8	...	0.12 Cr
	5086	...	4.0	...	0.45	...	0.15 Cr
	5083	...	4.44	...	0.7	...	0.15 Cr
	5182	...	4.5	...	0.35	...	...
	5056 (5456)	...	5.1	...	0.12	...	0.12 Cr
Al-Si	4043	...	...	5.2	...	...	...
	4047	...	...	12.0	...	...	...
Tratables							
Térmicamente							
Al-Mg-Si	6063	...	0.7	0.4	...	...	...
	6061	0.27	1.0	0.6	...	...	0.2 Cr
	6082	...	0.7	1.0	0.5	...	...
	6067	1.5	1.1	1.4	0.8	...	...
Al-Cu	2014	4.4	0.5	0.8	0.8	...	...
(-Mg-Mn-Si)	2024	4.4	1.5	...	0.6	...	...
	2219	6.3	...	...	0.3	...	0.1 V, 0.8 Zr
	2117	2.6	0.35	...	...	...	...
Al-Zn-Mg(-Cu)	7005	...	1.4	...	0.4	4.5	0.15 Zr, 0.13 Cr
	7020	...	1.2	...	...	4.3	0.2 Zr
	7039	0.25	2.8	...	...	4.0	0.2 Cr
	7079	0.6	3.3	...	0.2	4.3	0.2 Cr
	7075	1.6	2.5	...	...	5.6	0.3 Cr
	7178	2.0	2.75	...	...	6.8	0.3 Cr

Tabla 4 Tipo de aleaciones y composiciones representativas.

APENDICE B

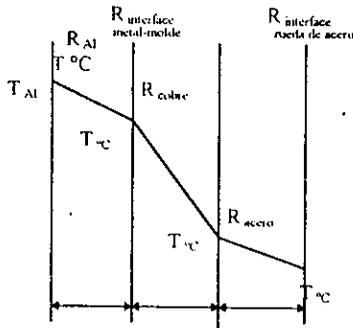
CALCULOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS.

Resistencias térmicas en el molde.



Esquema transversal del molde de colada.

Resistencias térmicas entre las paredes del molde.



Resistencia térmica del aluminio solidificado.

$$R_{Al} = L / kA = 0.1 \text{ cm} / (0.55 \text{ cal} / \text{cm s } ^\circ\text{C}) (A \text{ cm}^2) = 0.1818 / A \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica en la interfase molde-metal.

$$R_{\text{interfase molde metal}} = 1 / hA = 1 / (0.07 \text{ cal} / \text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}) (A \text{ cm}^2) = 14.28 / A \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica a través del molde de cobre

$$R_{Cu} = L / kA = 0.1375 \text{ cm} / (0.89 \text{ cal} / \text{cm s } ^\circ\text{C}) (A \text{ cm}^2) = 0.154 \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica a través de la rueda de acero.

$$R_{acero} = L / kA = 0.341 \text{ cm} / (0.13 \text{ cal} / \text{cm s } ^\circ\text{C}) (A \text{ cm}^2) = 2.6 \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

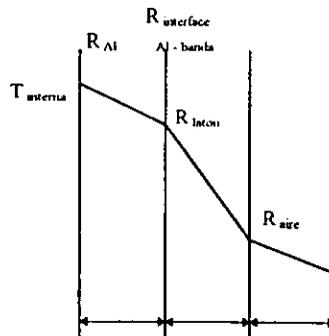
Resistencia térmica en la interfase molde-agua.

$$R_{\text{interfase acero-agua}} = 1 / hA = 1 / (0.1 \text{ cal} / \text{cm s } ^\circ\text{C}) (A \text{ cm}^2) = 10 \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica total del molde.

$$\Sigma R = (0.1818 + 14.28 + 0.154 + 2.6 + 10) \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal} = 27.2 / A \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencias térmicas en la banda.



Resistencia térmica en la interfase banda-metal.

$$R_{\text{interfases banda metal}} = 1 / \alpha A = 1 / (0.050 \text{ cal} / \text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}) = 20 / A \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica en la banda de latón.

$$R_{\text{latón}} = L / \alpha A = 0.039 \text{ cm} / (0.26 \text{ cal} / \text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}) = 0.152 / \text{A s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica del aire.

$$R_{\text{aire}} = 1 / \alpha A = 1 / (0.00162 \text{ cal} / \text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}) = 617.2 \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Resistencia térmica total a través de la banda.

$$\Sigma R = 20 + 0.152 + 0.1818 + 617.2 = 637.53 / \text{A s } ^\circ\text{C} / \text{cal}$$

Calor extraído en el molde.

Del capítulo I tenemos que para el flujo de calor de un sistema estable tenemos que:

$$q = \Delta T / \Sigma R$$

Para el valor del gradiente de temperaturas, se considera una temperatura en el aluminio de 630 °C y la temperatura del agua es la del medio ambiente de aproximadamente 25 °C.

Calor extraído a través de las paredes del molde.

$$q / A = \Delta T / \Sigma R = (630 - 25) \text{ } ^\circ\text{C} / 181.06 \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal} = 605 \text{ } ^\circ\text{C} / 27.2 \text{ s } ^\circ\text{C} =$$

$$q = 22.23 \text{ cal} / \text{cm}^2 \text{ s}$$

Calor extraído a través de la banda.

$$q / A = (630 - 25) \text{ }^\circ\text{C} / (637.5 \text{ s } ^\circ\text{C} / \text{cal}) = 0.949 \text{ cal} / \text{s}$$

$$q = 0.949 \text{ cal} / \text{s}$$

Tiempo de solidificación

De acuerdo con el análisis anterior, la cantidad, de transferencia de calor se da hacia el molde. Para este tipo de molde, el coeficiente de transferencia de calor entre el metal solidificado y el molde juega un papel esencial en la disipación de el calor, por lo que el tiempo de solidificación dependerá directamente de este factor.

Entonces para un molde en donde la resistencia de la interfase metal solidificado y molde es dominante, descrito en el capítulo anterior.

$$t_r = (\rho_s H / [h (T_m - T_0)]) (V/A)$$

$$\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

para un 1 cm de longitud

$$H = 95 \text{ cal} / \text{g}$$

$$A = 2.5 \text{ cm}^2$$

$$h = 0.070 \text{ cal} / \text{s cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V = 0.5 \text{ cm}^3$$

$$T_m = 660 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_r = \{ (2.7 \text{ g} / \text{cm}^3)(95 \text{ cal/g})(0.5 \text{ cm}^3) \} / \{ (0.070 \text{ cal} / \text{s cm}^2 \text{ }^\circ\text{C})(660^\circ\text{C}-25^\circ\text{C})(2.5\text{cm}^2) \}$$

$$t_r = (128.25 \text{ cal}) / (111.125 \text{ cal/s}) = 1.154 \text{ s.}$$

El tiempo de solidificación del metal por cm de longitud es de 1.154 s.

Este tiempo determina la velocidad de colada, dentro del diseño del sistema

Relación de velocidades del sistema móvil.

Poleas

$$(n_1 / n_2) = (d_2 / d_1) = 130.8 / 48.92 = 2.67$$

$$(n_1 / n_2) = 2.67$$

Velocidad de colada.

La velocidad de colada es.

V_c = distancia del metal solidificado / el tiempo que tarda en solidificarse

Cuando el molde esta a temperatura ambiente (25 °C aproximadamente)

$$V_{\max} = (1 \text{ cm} / 1.154 \text{ s}) = 0.866 \text{ cm/s.}$$

Cuando el molde alcanza una temperatura de 600 °C

$$V_{\min} = (1 \text{ cm} / 12.21\text{s}) = 0.0818 \text{ cm} / \text{s.}$$

El perímetro del molde es:

$$P_{\text{molde}} = \pi D = \pi (12.98 \text{ cm}) = 40.77 \text{ cm.}$$

Para una longitud de 40.77 cm el t_{max} de solidificación, es de 23.56 s

$$0.866 \text{ cm} \rightarrow 1 \text{ s.}$$

$$40.77 \text{ cm} \rightarrow 46.18 \text{ s}$$

Entonces, la velocidad máxima de la rueda es:

$$V_{\text{max}} = 0.0216 \text{ rev/s} = 1.29 \text{ rev/min.}$$

El tiempo mínimo de solidificación t_{min} es: 498.4 s

$$0.0818 \text{ cm} \rightarrow 1 \text{ s}$$

$$40.77 \text{ cm} \rightarrow 498.4 \text{ s}$$

Por lo tanto la velocidad mínima de colada es

$$V_{\text{min.}} = 0.002 \text{ rev/s} = 0.12 \text{ rev/min}$$

Cálculos para el diseño del sistema motriz.

Para el diseño del sistema motriz el rango de velocidades dentro del cual varía la velocidad de colada se puede determinar de la siguiente forma:

Como se observa en la ecuación t_f , es inversamente proporcional al gradiente de temperaturas, la relación V/A es constante. Aunque tanto

la densidad ρ_s , calor de fusión H y el coeficiente de transferencia de calor en la interfase h_f , varían con la temperatura, consideraremos a estos como constantes. Dejando así el tiempo de solidificación como función solamente del gradiente de temperaturas.

Entonces tenemos que el gradiente mayor de temperaturas se da cuando el molde se encuentra a temperatura ambiente y el mínimo se tomara cuando el molde se encuentre a $600\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura que talvés no se alcance pero como forma de seguridad lo consideraremos así.

El tiempo de solidificación máximo cuando el molde este a temperatura ambiente que es de 1.154 s .

A hora el tiempo de solidificación mínimo cuando el molde alcanza una temperatura de $600\text{ }^\circ\text{C}$ es de: 12.21 s .

Para la velocidad máxima de colada la velocidad de la rueda motriz es:

$$\frac{n_1}{n_2} = 2.67 \quad \Rightarrow \quad n_1 = (2.67) (1.29 \text{ rev/min.}) = 3.44 \text{ rev/min.}$$

Para la velocidad mínima del molde la velocidad de la rueda motriz es:

$$\frac{n_1}{n_2} = 2.67 \quad \Rightarrow \quad n_1 = (2.67) (0.12 \text{ rev/min.}) = 0.32 \text{ rev/min.}$$

Entonces el sistema motriz debe proporcionar a la rueda motriz una velocidad máxima superior a 3.44 rev/min. , y una velocidad mínima de 0.32 rev/min.

Sistema de fundición y vaciado.

Horno.

Cálculo de pérdidas de calor a través de las paredes del horno.

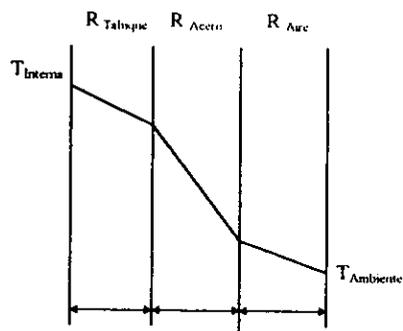
Dimensiones totales de las paredes:

2 paredes de 0.105×0.155 m. , 2 paredes de 0.115×0.155 m. base y tapa igual a 0.115×0.105 m.

Area total de paredes igual a 0.0801 m².

Ladrillo refractario. 0.065 m. de espesor.

Lámina de acero suave ...=0.00158 m. de espesor.



La resistencia térmica del tabique es:

$$R_{\text{tabique}} = \frac{L}{kA} = \frac{0.065 \text{ m}}{1.124 \text{ (W/m}^\circ\text{C) (A)}} = \frac{0.0578}{\text{A}} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

La resistencia térmica del acero es:

$$R_{\text{acero}} = \frac{L}{kA} = \frac{0.00158 \text{ m}}{41.52 \text{ (W/m}^\circ\text{C) (A)}} = \frac{3.805 \times 10^{-5}}{\text{A}} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

La resistencia en el aire es :

$$R_{\text{aire}} = \frac{L}{hA} = \frac{1}{68 \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C) (A)}} = \frac{0.0147}{\text{A}} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

La resistencia total es:

$$\Sigma R_{\text{total}} = 0.0578 + 3.805 \times 10^{-5} + 0.0147 = 0.0725 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$q = \frac{(710 \text{ }^\circ\text{C} - 26 \text{ }^\circ\text{C})}{0.725 \text{ (}^\circ\text{C/W) (A)}} = 9434 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Para obtener el valor total del calor perdido a través de las paredes del horno tenemos:

$$\frac{q}{A} = 9434 \text{ W/m}^2$$

El calor total perdido a través de las paredes del horno cuando la temperatura interna es de 710 °C es:

$$q = (9434 \text{ W/m}^2) (0.0801 \text{ m}^2) = 1441.3 \text{ W.}$$

Por lo tanto utilizaremos una resistencia de una potencia mayor al de las pérdidas obtenidas

Contenedor.

El análisis para el contenedor es de una manera análoga al del horno por lo cual el valor de la resistencia a utilizar en este será igual.

Cálculos para determinar el flujo de agua de enfriamiento

Para calcular la temperatura en la pared externa del molde tenemos

$$630\text{ }^{\circ}\text{C} - T = q (\sum R_{\text{molde}} - R_{\text{interface molde-agua}})$$

$$T = 630\text{ }^{\circ}\text{C} - q (\sum R_{\text{molde}} - R_{\text{interface molde-agua}})$$

$$T = 630\text{ }^{\circ}\text{C} - [(22.23\text{ cal/s})(27.2\text{ s}^{\circ}\text{C/cal} - 10\text{ s}^{\circ}\text{C/cal})]$$

$$T = 247.64\text{ }^{\circ}\text{C}$$

El calor en la interfase molde-agua es igual a:

$$q = \Delta T / R_{\text{interface molde-agua}} = (247.6 - 25)\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ s}^{\circ}\text{C/cal} = 22.26\text{ cal/s}$$

El calor transferido al agua es igual al calor recibido por el agua por lo cual tenemos :

$$q_{\text{interface molde-agua}} = q_{\text{transferido al agua}}$$

$$22.26\text{ cal/s} = m_{\text{agua}} C_{p\text{ agua}} \Delta T$$

$$m_{\text{agua}} = (22.26\text{ cal/s}) / (\Delta T C_{p\text{ agua}})$$

$$\text{El } C_{p\text{ agua}} \text{ a } 25\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ cal/gr }^{\circ}\text{C}$$

$$m_{\text{agua}} = (22.26 \text{ cal/s }) / (247.6 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}) (1 \text{ cal/gr }^\circ\text{C}) = 0.1 \text{ gr/s}$$

$$V = m/\rho$$

La densidad del agua a 25 °C = 0.997 gr/cm³

$$V = (0.1 \text{ gr/s }) / (0.997 \text{ gr/cm}^3) = 0.1 \text{ cm}^3 / \text{s} = 0.006 \text{ lt/min.}$$

Los cálculos anteriores son para 1 cm² de área del molde.

El molde es 2.5 cm, por lo tanto el área es:

$$A_{\text{molde}} = (2.5 \text{ cm }) (1 \text{ cm }) = 2.5 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto el flujo total del agua será .

$$V = (0.006 \text{ lt/min}) (2.5) = 0.015 \text{ lt/min}$$

CONCLUSIONES

Después de terminar el trabajo podemos concluir :

1. La obtención de este tipo de sistemas sugiere un control cuidadoso en cuanto: diseño y construcción así como también de la operación del mismo.
2. Los resultados obtenidos vienen a confirmar lo sugerido por autores tratados en este trabajo en cuanto al comportamiento de los parámetros involucrados en el proceso.
3. La utilización de equipo de pequeñas dimensiones trae consigo problemas de construcción y manejo del equipo, por lo que se requiere de materiales y técnicas mas precisas.
4. La escasa disposición de material bibliográfico a cerca del comportamiento teórico de parámetros involucrados en el proceso dificulta el análisis y el diseño del sistema.

BIBLIOGRAFIA

1) E.F Emley

International metals review, june 1976 pags. 75 - 112

2) Enciclopedia del aluminio Vol. 2 pag. 202 - 223, 242 - 255 y Vol 4
pag. 31,32,35

Ing. Del grupo Pechiney

Ed. URMO 1968.

3) Robert H. Perry

Chemical Engineers Hand book, sección 10 - 49, 3 - 120, 23 - 64

Ed. MC Graw - Hill

4) V de L. Davies and O. Westby

Numerical computation of cast aluminium rod. Pag. 259 - 267
1982.

5) Merton C. Flemings

Solidification Processing. Pag. 1 - 14

Ed. MC Graw - Hill 1974.

- 6) James R. Welty
Transferencia de calor, aplicada a la ingeniería pag. 1-19,71,80,427-429, 462-465
Ed. Limusa 1681 México.
- 7) Donald Q. Kern.
Process Heat Transfer pag. 799
Ed. MC Graw - Hill 1950.
- 8) Lawrence E. Doyle
Materiales y procesos de manufactura para ingenieros. Pag. 215, 216
Tercera edición Ed. Prentice - Hall 1988
- 9) Jose Apraiz Barreiro
Fabricación de aceros y fundiciones. Pag. 684, 685
Tomo II Ed. URMO
- 10) Zeferino Damian Noriega. Pag 146
Tecnología de la fabricación
AGT Editor S. A. México 1986.
- 11) T. Rangel, A. Herrera, M. Quintero N.
AL EN LA. Defectos internos en la colada semicontinua de aluminio
comercialmente puro. Pag. 243 - 255
Instituto de investigaciones en materiales UNAM

12) Juan León

Dinámica de maquinas. Pag 98, 99, 100,

Ed. Limusa México 1983.