



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**Transferencia de Calor en el Molde de Colada
continua para Aceros no Planos**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

JORGE ALFREDO DUARTE VAZQUEZ

MEXICO, D. F.

1977



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

LAB Tesis 1977
NO M-19 **128**
FECHA _____
PROC _____
S _____



QUIMICA

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE

PRESIDENTE	ING. MANUEL F. GUERRERO FERNANDEZ
VOCAL	ING. ALBERTO OBREGON PEREZ
SECRETARIO	M. en C. ALEJANDRO ESPRIU MANRIQUE
1er SUPLENTE	M. en C. MA. EUGENIA NOGUEZ AMAYA
2 SUPLENTE	ING. HUMBERTO MALAGON ROMERO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

DEPTO. DE VACIADO CONTINUO EN LA COMPANIA HOJALATA Y
LAMINA DE MEXICO, EN SAN SAN MIGUEL XOXTLA, PUEBLA.
Y FACULTAD DE QUIMICA.

SUSTENTANTE:

JORGE ALFREDO DUARTE VAZQUEZ

ASESOR DEL TEMA M. en C. ALEJANDRO ESPRIU MANRIQUE

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

A mis padres

A todos mis profesores en la Facultad de Química,
especialmente para el M. en C. Alejandro Espriu

De manera muy sincera a los Ingenieros Antonio
Cuellar Jiménez y Ricardo Arenas Andrade

Y para todas las personas que de alguna manera
contribuyeron en mi vida de estudiante

A todos; muchas gracias

TEMARIO DE LA TESIS

I	INTRODUCCION.....	1
	a).- Definición de colada continua.....	1
	b).- Importancia de la colada continua.....	3
	c).- Objetivo.....	5
II	GENERALIDADES.....	10
	a).- Breve reseña histórica de la colada continua.	10
	b).- Diferentes tipos de máquinas para colada con- tinua.....	15
III	CONDICIONES PARTICULARES DEL ESTUDIO.....	28
	a).- Hornos y tipos de aceros.....	30
	b).- Equipo auxiliar.....	35
	c).- Descripción de la máquina de colado continuo.	37
	d).- Operación.....	50
IV	TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL MOLDE DESDE EL PUNTO DE VISTA TEORICO.....	63
V	ESTUDIO PRACTICO.....	96
VI	ANALISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES.....	130
VII	BIBLIOGRAFIA.....	138

CAPITULO I

Introducción.

En las siderúrgicas modernas la necesidad de incrementar el volumen de producción aunado al desarrollo tecnológico, ha conducido a implantar métodos continuos a lo largo de todo el proceso de producción de acero. Tal es el caso del fenómeno de la solidificación del acero que llevó a crear la colada continua.

En el proceso convencional de colado, una vez que el acero líquido proveniente de los hornos está en condiciones de ser vaciado, es transportado a las lingoteras previamente preparadas. Los lingotes solidificados y a una temperatura conveniente son transportados a la zona de desmoldeo. Acto seguido se desmoldean y se transportan a los hornos de precalentamiento donde se les suministra calor suficiente para que tengan la temperatura adecuada para ser laminados posteriormente en el molino de desbastes.

Los inconvenientes por este método son evidentes:

Perdidas de calor

Transporte costoso por gruas

Eficiencia y aprovechamiento bajo (dependiendo desde luego del tamaño de los lingotes)

Mayor espacio para las instalaciones
Mayor inventario de producto intermedio
Mayor inversión
Mayor cantidad de mano de obra
Mayor gasto de energía

Dependiendo de varios factores, los investigadores han notado que el aprovechamiento del acero líquido a palanquilla en este proceso es de aproximadamente 80%.

A este proceso se opone el de vaciado continuo que obviamente tiene que realizar varias operaciones para llegar en forma más económica al mismo producto final. Sin embargo no es la economía la única razón para considerar la instalación y operación de una máquina de vaciado continuo, - sino que a ella se suman:

Mayor calidad
Mayor uniformidad
Ausencia de rechupes
Material de grano más fino
Mejor superficie
Mejor rendimiento

El aprovechamiento del acero líquido a producto final en las máquinas de vaciado continuo puede variar entre el 92% y el 93%. En las figuras 1 y 2 se puede apreciar

el avance mundial de este proceso en la industria siderúrgica.

De la figura 3 se aprecian los diferentes pasos requeridos con el proceso de lingoteras para llegar a palanquillas, comparado con el proceso de colada continua.

La colada continua es ya, una práctica generalizada en la industria del acero, tanto para la producción de no planos (palanquillas y barras) y para productos planos (planchones). Se puede asegurar que todas las plantas que se van a construir para la fabricación de palanquilla, barras y planchones, usarán este sistema y que todo el acero que se produzca para estos fines dentro de unos 20 años con excepción de algunos aceros altamente aleados, será colado en forma continua.

El proceso de la colada continua (figura 4), se logra vaciando el acero líquido de la olla, a través de un recipiente llamado distribuidor, a un molde sin fondo que tiene las dimensiones de la sección a colar y que es enfriado con agua que circula a través de una chaqueta. El metal líquido, vaciado a el molde a una velocidad constante, solidifica parcialmente y el producto es extraído a una velocidad, también constante, por medio de unos rodillos.

El espesor de la capa solidificada aumenta gra-

dualmente y debe completarse al llegar el producto a los rodillos. Posteriormente una tijera montada en un mecanismo que se desplaza a la misma velocidad que el producto, corta finalmente el producto a la longitud requerida para ser laminado posteriormente.

Durante la solidificación del acero que se efectúa en el molde de cobre refrigerado con agua para una palanquilla, las paredes metálicas alcanzadas a desarrollar son relativamente delgadas y el centro del metal se conserva aun líquido. Estas paredes deben ser capaces de resistir las fuerzas de fricción que se producen con las paredes del molde al extraer la palanquilla y al mismo tiempo contener la presión ferrostática que ejerce el metal líquido y las fuerzas de tensión a que está sujeta la capa solidificada. Una falla puede producir una ruptura con la consiguiente pérdida del material líquido.

Aunque esto puede ocurrir en cualquier punto entre la entrada del molde y la solidificación final, es fácil de entender que el peligro de una fractura es mucho mayor a la salida inmediata del molde donde la palanquilla ya no tiene el apoyo de las paredes del mismo.

Para poder resistir entonces, la capa solidificada debe tener un cierto espesor y ser uniforme en todas

las paredes. Este espesor es función de la velocidad de disipación de calor y el tiempo de permanencia dentro del molde.

El objeto de este trabajo es el desarrollar un estudio teórico y experimental de la transferencia de calor en el molde de la máquina de vaciado continuo identificando y cuantificando las variables que afectan el proceso para determinar hasta donde es posible mejorarlo bajo circunstancias particulares de estas variables en producción específica de planquillas de aceros de bajo carbón.

Por tal razón las descripciones y ensayos se harán con referencia a estos productos en la planta de colada continua instalada en la compañía Hojalata y Lámina S.A. de San Miguel Xoxtla, Puebla.

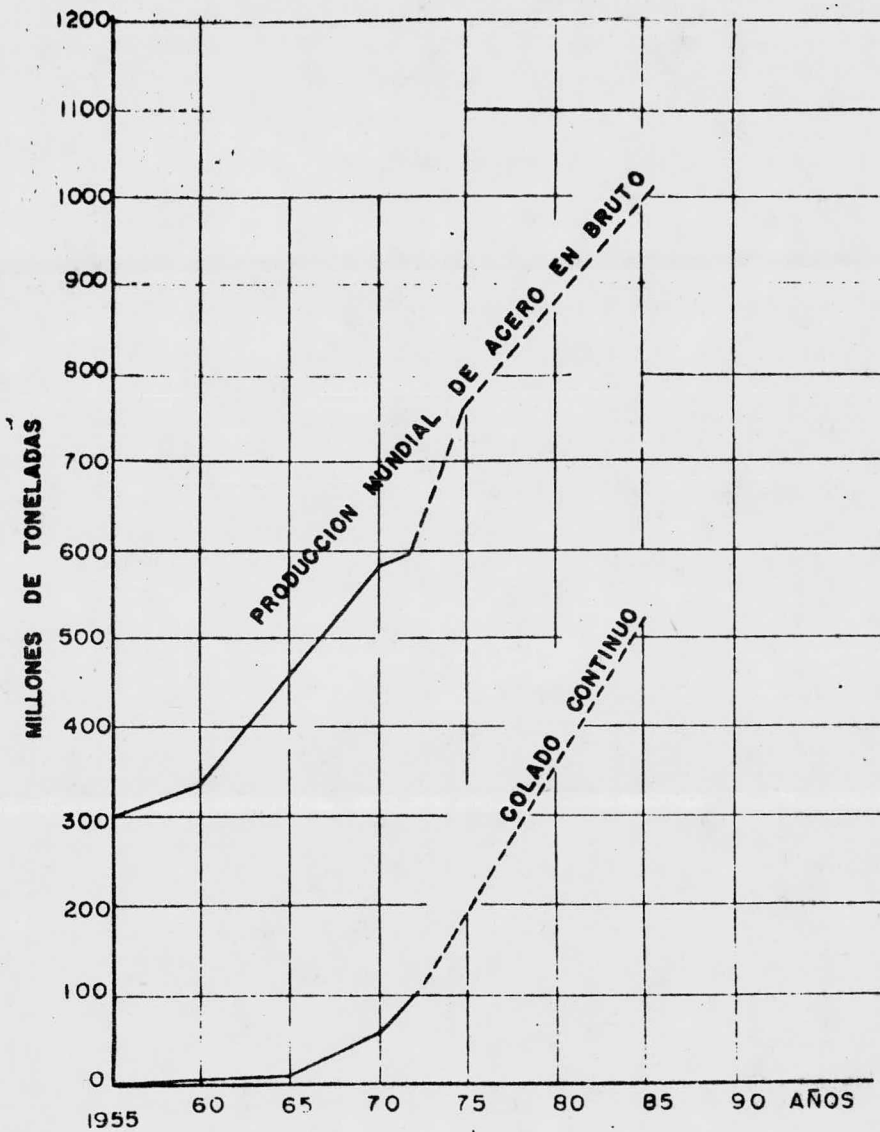
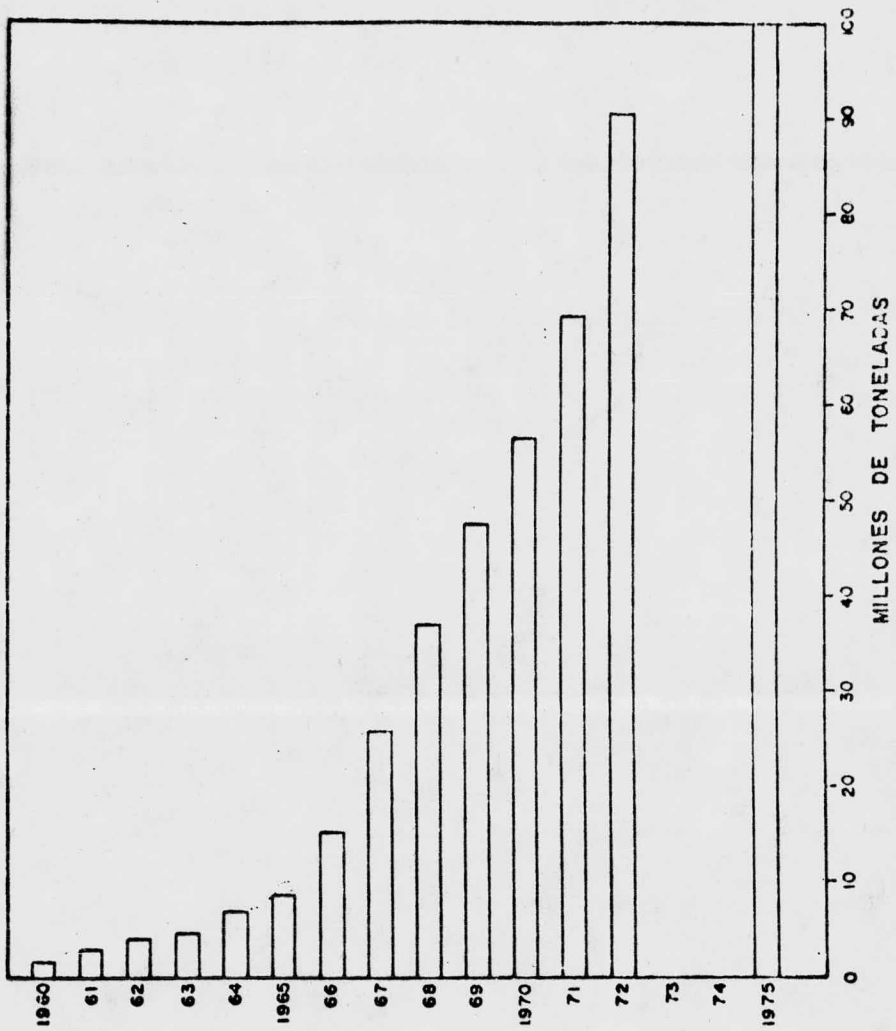


Fig.- 1

GRAFICA COMPARATIVA DE CRECIMIENTO DE PRODUCCION MUNDIAL DE ACERO EN BRUTO Y COLADO CONTINUO



CAPACIDAD DE PRODUCCION MUNDIAL DE COLADO CONTINUO

Fig.- 2

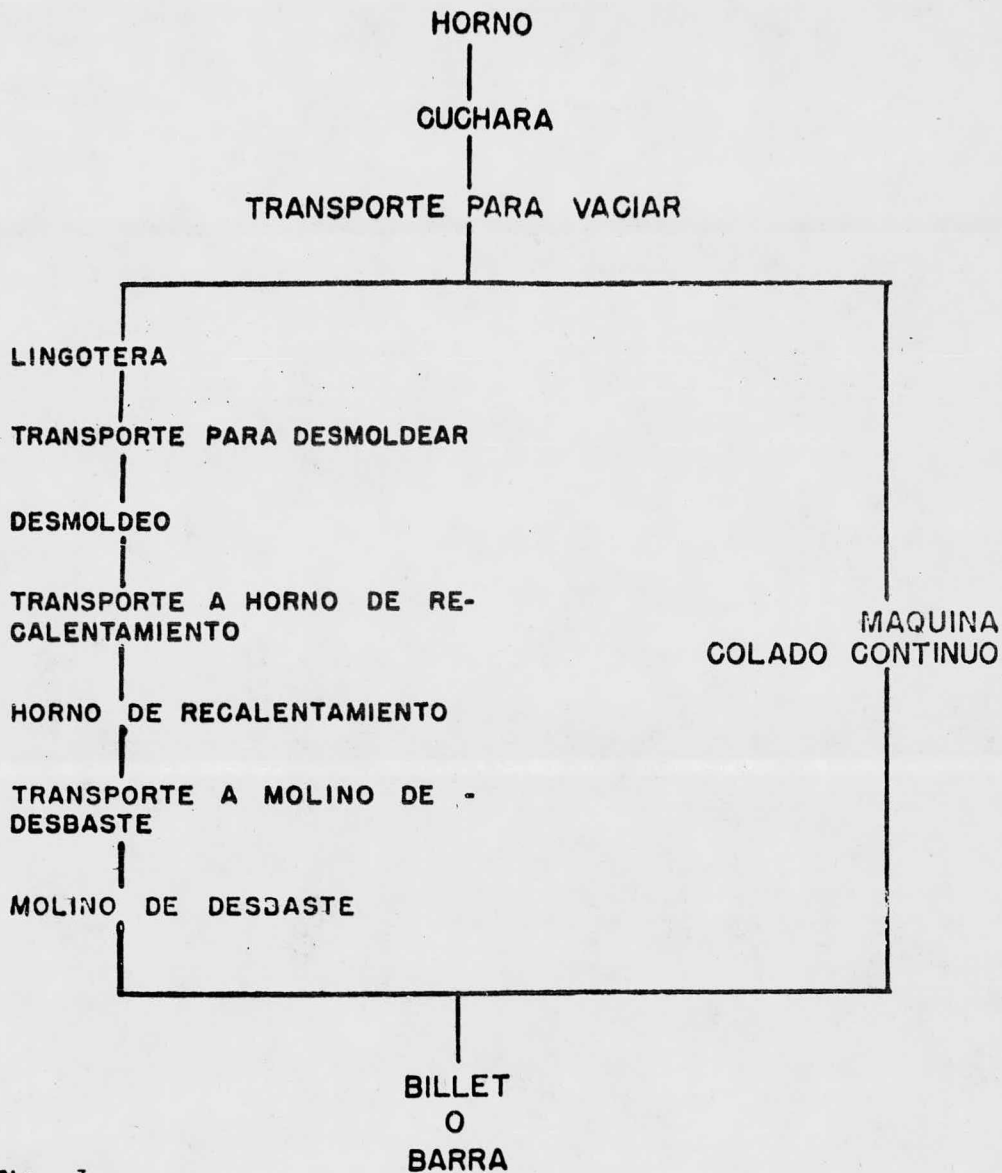


Fig.- 3

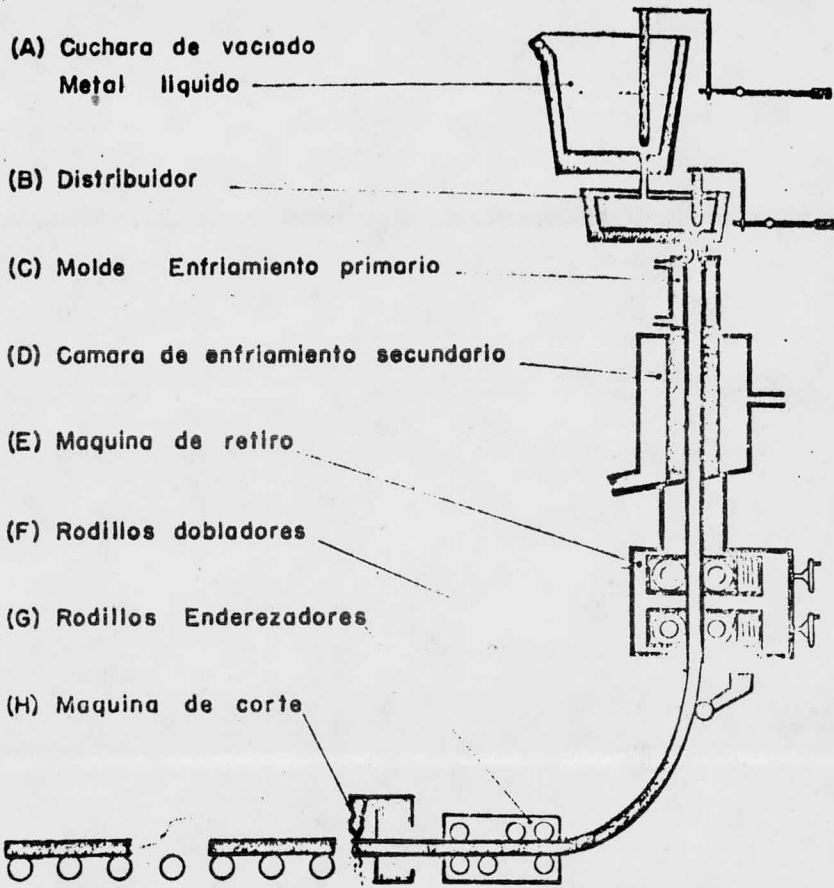


DIAGRAMA GENERAL COLADO CONTINUO

Fig.- 4

CAPITULO II

Reseña Histórica de la Colada Continua.

Los inicios de la colada continua se remontan a mediados del siglo pasado, cuando G.E. Sellers en el año de 1840 patentó en Norteamérica una máquina para colar -- continuamente tubería de plomo. Fue sin embargo, Sir -- Henry Bessemer, el primero en hacer un intento serio de lo que es ahora el proceso de colada continua, logrando en Inglaterra en el año de 1846, la fabricación de hojas de aluminio y plomo directamente del metal líquido; esta máquina incluía también la fabricación de vidrio (fig. 5). En aquella época no tuvo aceptación dicho proceso -- y en Gran Bretaña no se fabricó ninguna máquina de vaciado continuo. Años más tarde en 1857 logró en Norteamérica colar continuamente lámina y barras delgadas de acero directamente del metal líquido y en 1865 en Europa lámina de acero con diferentes patentes. Posterior a Sir Henry, el señor J. Laing registró un dispositivo para colar en forma continua tubos de metales no ferrosos según una patente Norteamericana.

Las investigaciones realizadas en el año de -- 1886, por el Norteamericano B. Atha, desembocaron en una patente de una máquina para colar lingotes. Su procedi-

miento era semicontinuo, ya que la parte superior del -- lingote solidificado servia como base para el siguiente lingote a colar. El diseño de Atha se basó en consideraciones económicas, ya que con su sistema, el lograba - reducir las perdidas por mazarotas que se producen usando el sistema convencional de lingoteras. La instalación de Atha contó con aceptación y se llegaron a producir hasta el año de 1910 varios millones de toneladas de acero por este método, el que despues fue usado para la manefactura de limas.

Otros investigadores pioneros en el proceso de colada continua fueron entre otros muchos: Dalen, Dupont, Lanna, Hesse, Pehrson, Rossi etc. Ellos con sus modificaciones lograron que el avance de este proceso continuara.

Pero no fue sino hasta el año de 1932-33 cuando los trabajos del investigador Alemán Siegfried Junghans, implantaron la base de la tecnología actual de la colada continua.

Se observó, que durante los primeros intentos utilizando la colada continua en el acero, este se pegaba al molde inmediatamente despues del enfriamiento con agua, no obstante la lubricación a que se sometia el molde y que ayudaba a disminuir este problema sin llegar a -

ser la solución total.

Junghans propuso que se aplicara al molde un -- movimiento ascendente-descendente con una amplitud de desplazamiento de 2 o 3 centímetros y con una relación de oscilación de 3 a 1, siendo la velocidad descendente aproximadamente igual a la velocidad de extracción de la palanquilla.

Ian Holliday modificó el principio de Junghans, él corrigió las últimas tendencias de agrietamiento en el molde y el "atoramiento" del metal, proporcionando una velocidad variable de sube y baja para el molde, de forma que se cambie como tiro negativo. (Fig. 6).

Holliday explicaba esto diciendo que: "Se logran resultados muy superiores si el recorrido del molde en su descenso se efectúa a una velocidad ligeramente mayor que la extracción de la palanquilla. Así, la cara solidificada inicialmente, se desmenuza en dos formas; durante la carrera ascendente relativamente rápida, y muy lentamente durante la carrera descendente". Como esta actúa en dirección opuesta a la primera se le llama desprendimiento negativo o tiro negativo.

Holliday encontró un punto importante al introducir el tiro negativo en el año de 1950 y fue que:

A ningún tiempo (excepto el instante durante el cambio de dirección) está el molde en el mismo camino, - en la misma dirección y a la misma velocidad de la colada, entonces hay una mínima oportunidad para que la colada se pegue a la pared del molde.

A partir de este momento, a pesar de que los adelantos y las aplicaciones se efectuaron a un paso bastante lento, en el año de 1958 ya había en operación 17 plantas de colada continua de poca capacidad y unas 7 en construcción. Para 1964 había ya en existencia 77 plantas en operación y en 1968 existían 187 plantas de las - cuales algunas tienen capacidad hasta de 200 toneladas - en cada distribuidor.

Actualmente como se puede apreciar en la figura 2, la producción mundial de acero bruto ha llegado a ser de 750 millones de toneladas y la producción de acero para colada continua de aproximadamente 200 millones de toneladas, lo cual representa un 27% de la producción mundial de acero en bruto, instaladas en ceca de 300 plantas, lo que indica la aceptación de este proceso.

En México, para la fabricación de productos no planos, la colada continua de balanquillas ha tenido gran

aceptación. Al hablar de palanquillas diremos que se trata principalmente de una sección cuadrada que puede variar entre los 50 mm. y los 150 mm. por lado, aunque también puede tratarse de secciones redondas, hexagonales etc.

En la tabla II-I se muestran las compañías que tenían colada continua de palanquilla en México hasta el año de 1973 y su producción desde 1970.

En 1976, deberá operar la nueva planta de colado continuo para palanquillas instalada en la Siderúrgica Lazaro Cardenas - Las Truchas, con una producción de 1,300,000 ton/año; así como también otras plantas no integradas entre las que destacan Aceros Yucatán, Aceros - Corsa etc., con lo que se incrementará considerablemente la producción de no planos por colada continua en México.

En la tabla II-II se vé la producción aproximada de palanquilla que se producirá por colada continua en México para el año de 1980.

Respecto a productos planos, Altos Hornos de México instaló la primera planta de colada continua de planchones en el país y su operación debe de arrancar en este año.

Diferentes Tipos de Máquinas.-

Originalmente en el proceso de colada continua se usaron solo máquinas de tipo vertical (figura 7). En este arreglo la forma de la colada se efectúa en un molde recto refrigerado por agua; se reenfria en un área secundaria provista de espesas también vertical para de ahí pasar a los rodillos de salida en donde es cortada en longitudes apropiadas y llevadas a posición horizontal para ir a los bancos de enfriamiento.

Naturalmente la altura de la máquina debe ser suficiente para asegurar la solidificación completa antes de que se corten los productos.

Como ejemplo tenemos que para secciones pequeñas como de 100 mm^2 , la altura requerida para la máquina sería de 15 m.; cuando la sección del producto llegara a ser de 230 mm^2 , la altura tendrá que ser incrementada a 25 m.

En la mayoría de las instalaciones verticales, con objeto de reducir la altura de la estructura, parte de las máquinas se construye en forma de torres y el resto del equipo se coloca a un nivel más bajo del piso. -- Aún así, se han encontrado muchas dificultades en la ins-

talación de plantas verticales ya existentes.

Como resultado de lo antes expuesto, se desarrolló un nuevo diseño de las máquinas en las que se curvó el hilo de metal y se enderezó nuevamente antes de cortar a longitudes apropiadas. Sin embargo el encorvado y enderezado tiene ciertas limitaciones tanto en -- el tamaño de sección como en algunos grados de aceros -- que pueden ser dañados durante estas operaciones, por lo que se continua construyendo máquinas de tipo vertical, para la fabricación de ciertas secciones, así como para la producción de algunos aceros especiales.

A partir del año de 1960 se desarrollaron las máquinas curvas, la razón por lo que se crearon fué -- principalmente, en que resulta una instalación más económica, ya que disminuye en gran medida la altura de las naves y del resto del equipo. A continuación describo diferentes tipos de máquinas curvas.

La máquina alta con doblado abajo de los rodillos extractores y descarga horizontal, (figura 8), es también una máquina con un diseño anticuado y por su alto costo ha dejado de producirse en cantidad.

Esta máquina puede trabajar con las mayores ve

locidades de colada. Al molde recto puede darsele conicidad con cierta facilidad y el soporte secundario, que es necesario para las coladas a altas velocidades, puede ser alineado más fácilmente al molde.

La calidad interna de los productos fabricados con este tipo de máquinas, es excelente para todo tipo de aceros debido a que se logra un enfriamiento muy simétrico y a que el doblado se efectúa una vez que el producto ha solidificado.

También en este tipo de máquinas, el molde, la cámara de enfriamiento y los rodillos extractores están alojados en una misma línea vertical. Debajo de la unidad de extracción, la palanquilla es doblada 90° y ya en posición horizontal, es enderezada, cortada y descargada. La barra falsa (ver próximo capítulo) puede ser --reinsertada para la siguiente colada, antes de que el producto vaciado sea totalmente descargado de la máquina. Aunque esta máquina reduce el tiempo de preparación y con esto se incrementa la productividad, no se compensa el costo adicional de los rodillos de enderezado.

Con objeto de reducir los altos costos de capital que ocasionan las máquinas altas se desarrolló -

una máquina de baja altura, con el molde recto pero con el doblado debajo del molde (figura 9).

Los moldes usados en este tipo de máquinas son del mismo tipo a los usados en las máquinas altas pero el doblado para obtener la descarga horizontal empieza aproximadamente a un metro de distancia del molde. La curvatura que se establece en esta área, continua a través de la cámara de enfriamiento secundario hasta los rodillos de extracción. En este tipo de máquina no es posible usar una barra falsa rígida por lo que se usa una barra con articulaciones lo que la vuelve flexible.

La mayor desventaja que presenta este modelo es la elevada concentración de esfuerzos a que es sometido el material en el punto del doblado. Estos esfuerzos pueden ser tan grandes que llegan a provocar grietas internas a lo largo de los límites de los cristales dendríticos que se formaron durante la solidificación. Estas grietas aumentan cuando el contenido de carbón en el acero se incrementa.

Los rodillos que soportan y conducen el producto a lo largo del doblado reciben también grandes esfuerzos por lo que sufren desgastes y a fin de evitar defec-

tos hay la necesidad de cambiarlos con frecuencia, aumentando así el costo de mantenimiento.

En la figura 10 se aprecia una máquina de baja altura de molde curvo con descarga horizontal. La característica principal de este diseño es la curvatura que presenta el molde con el mismo radio de la máquina, esto elimina la necesidad de doblar el producto por debajo del molde, con lo que aparte de que se evita la concentración de esfuerzos, se simplifica el diseño de la cámara de enfriamiento secundario y los rodillos sirven ahora solamente como guía del producto y de la barra falsa cuando se inicia la colada.

La mayor eficiencia en este diseño y una reducción en los costos de capital, han hecho que este sea el tipo de máquina que más se instala en la actualidad.

Las técnicas de la colada continua han experimentado hasta ahora un desarrollo tal que el buen funcionamiento de las máquinas y la realización de las metas de la producción ya no constituyen un problema, igualmente, hay también una mejor comprensión de los criterios metalúrgicos que determinan el éxito de los productos con una alta calidad.

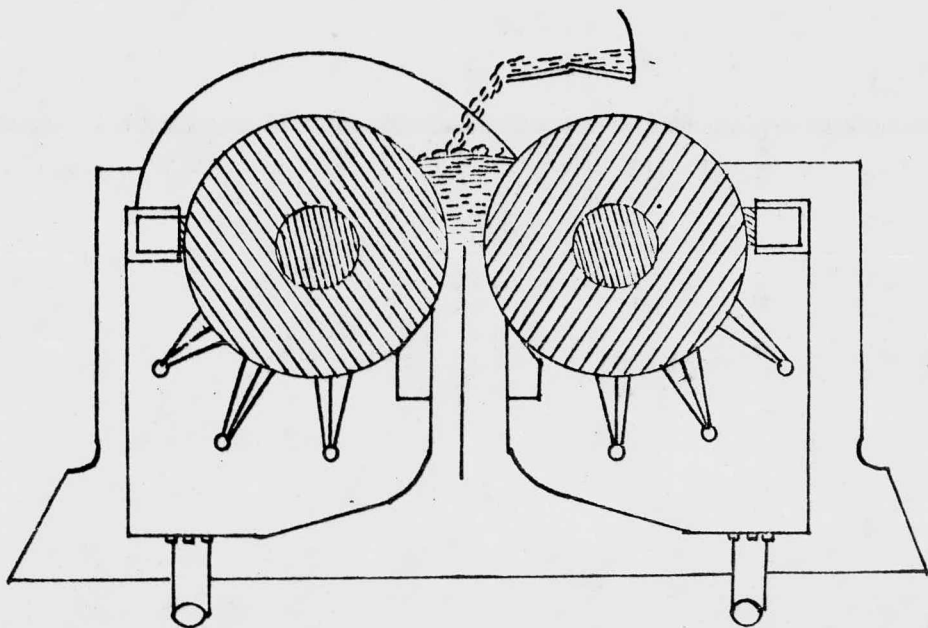


Fig.- 5. MAQUINA DE COLADO CONTINUO DE
SIR. HENRY BESSEMER.

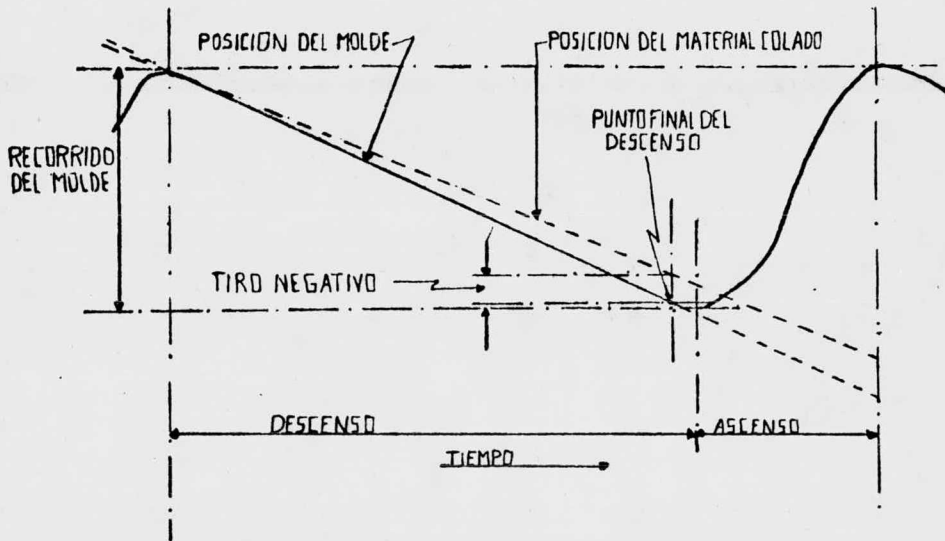
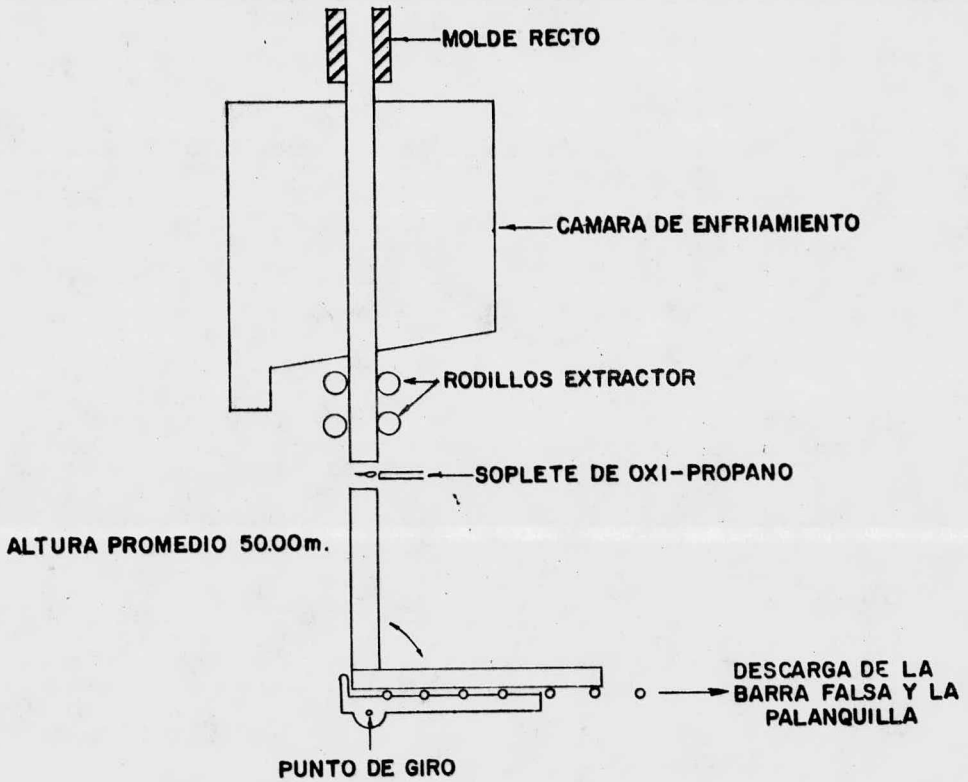
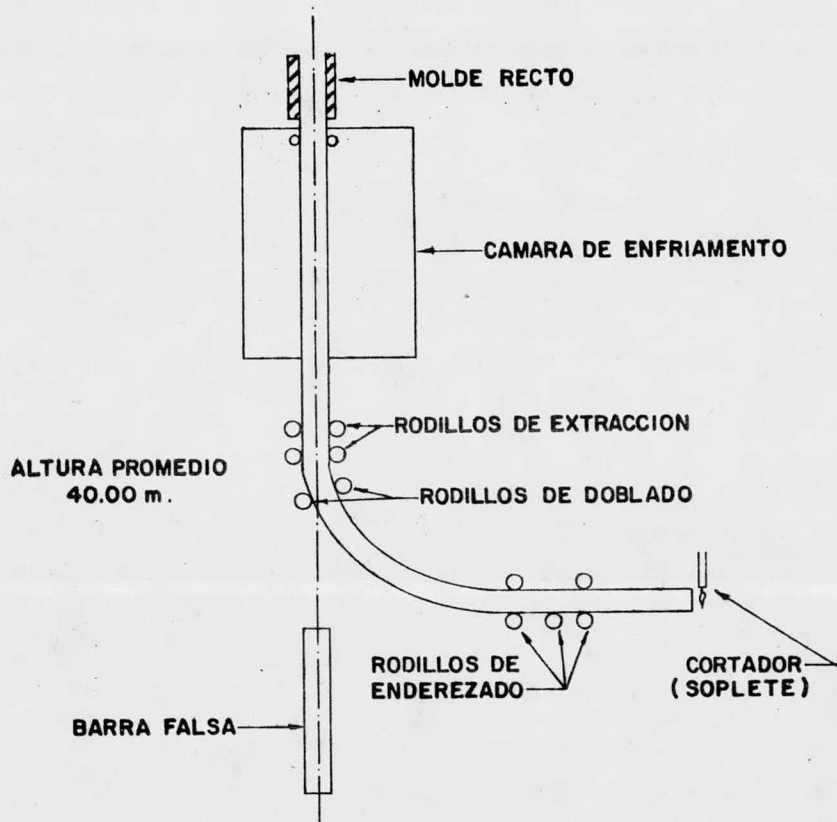


Fig.- 6 EN EL TIRO NEGATIVO, EL MOLDE DESCIENDE ALGO MAS RAPIDO QUE EL ACERO.



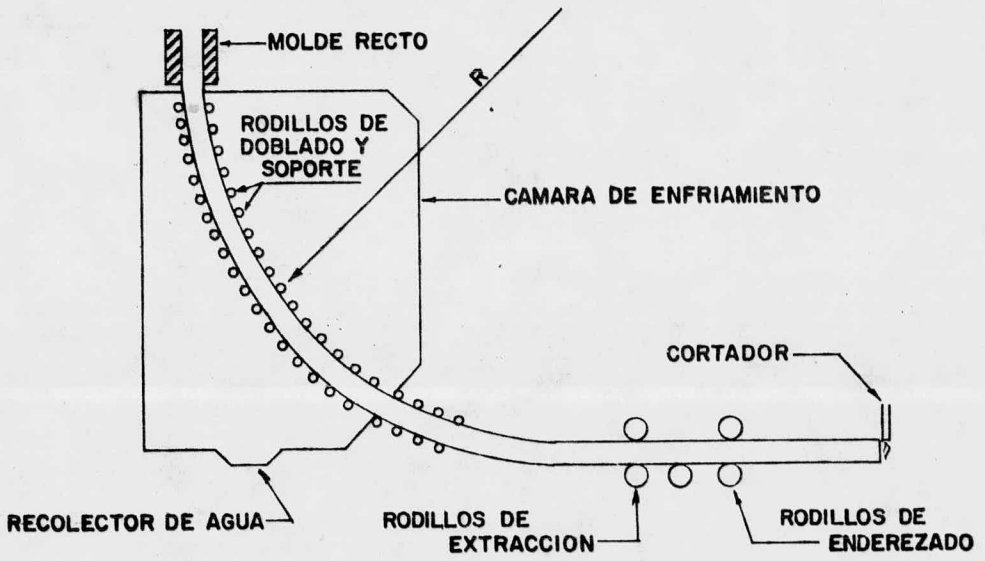
MAQUINA ALTA CON CORTE VERTICAL

Figura.- 7



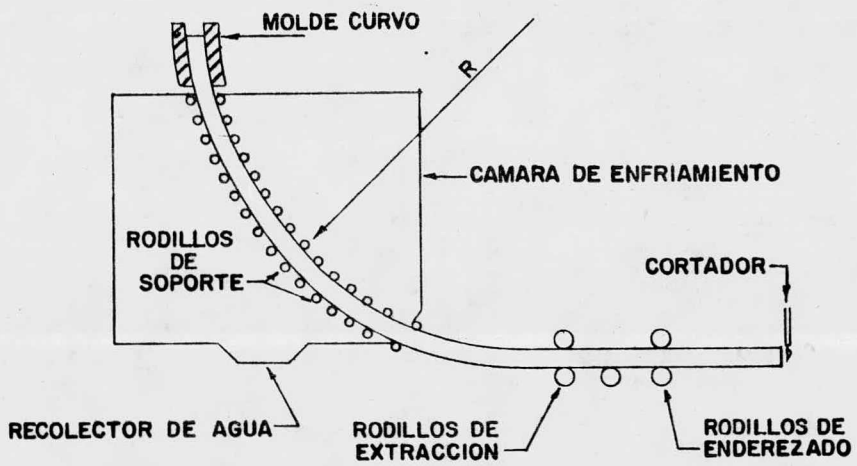
MAQUINA ALTA CON DOBLADO DEBAJO DE LOS
 RODILLOS EXTRACTORES Y DESCARGA
 HORIZONTAL

Figura .- 8



MAQUINA DE BAJA ALTURA, MOLDE RECTO CON DOBLADO DEBAJO DEL MOLDE

Figura -- 9



**MAQUINA DE BAJA ALTURA, MOLDE CURVO
 CON DESCARGA HORIZONTAL**

Figura 10

TABLA 11-1
 PRODUCCION DE ACERO EN MEXICO POR COLADA CONTINUA (PALANQUILLA)
 (MILES DE TONELADAS)

	ACEROS CHIHUAHUA	ACEROS ECATEPEC	HYLSA	CIA. SID. DE GUADALAJARA.
1970	74.0	71.3	193.3	35.3
1971	73.0	84.0	235.4	39.8
1972	73.0	84.6	310.0	54.0
1973	76.1	86.4	360.0	80.0

	ACEROS NACIONALES	LAMINADORA ATZCAPOTZALCO	TOTAL
1970	—	—	373.9
1971	—	—	432.8
1972	—	—	521.6
1973	35.0	22.0	659.5

FUENTE DE INVESTIGACION DIRECTA

TABLA 11-11

PRODUCCION DE ACERO EN MEXICO POR COLADA CONTINUA (PALANQUILLA)

1960
(MILES DE TONELABAS)

	10 ³ Ton/año	% DEL TOT POR C.C.
ACEROS DE CHIHUAHUA S.A.	92.0	3.5
ACEROS ECATEPEC S.A.	81.3	3.2
HYLSA DE MEXICO S.A.	750.0	28.6
CIA. SIDERURGICA DE GUADALAJARA S.A.	110.0	4.2
ACEROS NACIONALES S.A.	216.0	8.2
LAMINADORA ATZCAPOTZALCO S.A.	70.0	2.7
SICARTSA.	1 300.0	49.6
T O T A L	2 619.3	

FUENTE DE INVESTIGACION DIRECTA

CAPITULO III

Condiciones Particulares del Estudio.

Los principios de la colada continua y sus leyes principales se encuentran ahora bien establecidos, - lograndose a lo largo de la década pasada un considerable avance en el diseño de la maquinaria, y desarrollandose un mejor comportamiento funcional en los productos. Este desarrollo, desde coladas para pequeñas palanquillas cuadradas, hasta planchones de más de dos metros de ancho, ahora comunes, significa que el proceso no es simplemente un sustituto para la colada convencional de lingotes y desbaste primario, sino un proceso por derecho propio.

No obstante, existen aún limitaciones que requieren de una atención meticulosa para que se logre la producción con una calidad aceptable. Es erróneo pensar que con la colada continua se logrará remediar todos los males del proceso convencional y hay que reconocer que - para poder realizar plenamente los logros potenciales del proceso, en particular para poder lograr un mayor rendimiento y mejor calidad, habrá que prestarle una atención especial a la calidad del acero líquido que es llevado a la máquina, ya que en la colada continua la rápida soli-

dificación con las consiguientes tenciones elevadas en la piel, hacen necesario controlar la temperatura, la metalúrgia y la química de la aceración; además los muchos adelantos logrados en el diseño de la maquinaria, desde las máquinas verticales iniciales hasta las máquinas de radio curvo, se tradujeron en un mejoramiento de la calidad. Sin embargo, una apreciación de la situación actual con respecto a la calidad de los productos colados en continuo, revela que hoy en día existen los mismos defectos que desde hace diez años, pero una mejor comprensión de las causas y de los recursos reparadores condujo a resultados muy mejorados en lo concerniente a la calidad externa e interna de los productos. Esto, a su vez, dió lugar a una mayor confiabilidad en casi todos los campos de aplicación. Además, aumentó de tal manera la producción de buenos productos para la venta, que se ha echo corriente obtener niveles de rendimiento de 98% a 99% de buenos productos antes del acondicionamiento.

Por lo tanto, como se aprecia en lo anteriormente expuesto, la colada continua no se puede ni debe de considerarse aislada, sino que debe analizarse en -

estrecha relación con todos los procesos siderúrgicos, de tal forma de obtener los mejores resultados finales.

Hornos y Tipos de Acero.-

El planeamiento de una instalación de colada continua queda fijado básicamente por la carga y el ciclo de fusión en la acería así como el tamaño de la sección a colar. Además, el grado de utilización de la máquina está dado principalmente por el número de unidades de colada, lo cual significa el menor cambio de sección posible, limitación en el número de calidades de aceros colados, tiempos cortos de parada y reparación y los tiempos de sangrado de los hornos programados en fase.

Para obtener resultados óptimos se usan las coladas secuenciales o empalmes, y estas solo son posibles cuando el tiempo de colada es igual o un múltiplo del tiempo de fusión. La capacidad de colado no se puede aumentar arbitrariamente mediante un aumento en la velocidad de colado, ya que la velocidad máxima de colado está dada por el tiempo de solidificación calculado para cada sección. Así por ejemplo, en el caso de desbastes planos es factible colar en 45 minutos, lo que está de acuerdo con el ciclo de un convertidor, es por tanto

posible que en este tipo de instalaciones se combinen las máquinas con convertidores grandes de cerca de 350 toneladas. Así, es notable la tendencia a instalaciones para productos planos con convertidores de oxígeno de gran capacidad. En cambio, para las secciones chicas, especialmente palanquillas, todavía se presentan dificultades con los hornos de gran capacidad debido a su menor capacidad en tiempo, por lo que es más común el uso de hornos de arco eléctrico de diversas capacidades.

El equipo de aceración con que se contaba en la empresa donde se efectuó el presente estudio tiene las siguientes características:

Hornos de arco eléctrico marca Lectromelt-modelo KT.

Capacidad 60 toneladas nominales.

Transformadores 20,000KVA. 60 ciclos.

Carga real.- 70 toneladas

Producción real.- 65 toneladas/colada.

Tiempo de colada.- 180 minutos (neto) 240 minutos (bruto).

Respecto a el acero, se puede decir que la mayoría de las calidades de aceros se pueden colar en forma con-

tinua, por lo menos con el mismo resultado que el lingoteado convencional. Desde el punto de vista de pureza, segregación y propiedades mecánicas son tan buenos o aún mejores los productos de la colada continua que los del sistema de lingoteado.

El gran campo de aplicación de la colada continua es la producción de aceros comunes:

Aceros calmados y de baja aleación para la construcción, tubos, productos planos y redondos, pero también calidades para trefilado y embutido profundo son producidos por colada continua en todos los países industrializados. Aceros para resortes al Si-Mn, calidades inoxidables y resistentes a los álcalis, especialmente aceros austeníticos, hasta los aceros aleados para herramientas y sin aleación. Los aceros ferríticos inoxidables al cromo así como aceros para transformadores que requieren de cuidados especiales. Por tanto, el control de la desoxidación para la colada continua es más riguroso que para la practica convencional, si se quiere lograr un nivel aceptable.

Esto se explica porque durante la solidificación del acero, dependiendo del equilibrio carbono-oxígeno, se desprende una cierta cantidad de gas. Este desprendimiento

de gas, que aparece durante la colada, a menudo en forma -
dispareja, puede llevar a producir fallas internas y exter-
nas en forma de poros. Especialmente en el caso de aceros
dulces se presentan significativas oscilaciones en la con-
centración de oxígeno para un mismo contenido de carbono.
Si se compara la colabilidad de aceros efervecientes por co-
lada continua y por lingoteado, en el primero se ve dificul-
tado el desarrollo de la efervescencia por la rápida solidi-
ficación a causa del intenso enfriamiento del producto y
por el efecto de la presión ferrostática, por lo que se re-
quiere de un buen trabajo de desoxidación (calmar el acero).

En el periodo de desarrollo inicial del proceso -
se usó silicio como desoxidante principal, pero para cier-
tos productos hubo que usar aluminio, habiendose realizado
esfuerzos para lograr un método para controlar el contenido
de aluminio soluble dentro de ciertos margenes muy estrechos.
técnicas tales como la inyección a alta velocidad de grana-
llas de aluminio, alambres o barras de aluminio, y la diso-
lución sumergida de bloques sólidos de aluminio son ahora
bien conocidos; y contribuyeron en gran medida a obtener -
mejores productos.

Recientemente se ha implantado la desgasificación

al vacío como medio para mejorar la limpieza del acero por reducción de los niveles de oxígeno y también hidrógeno para fabricación de piezas forjadas y planchas pesadas.

La oxidación secundaria, es decir, la exposición del flujo del metal de la olla al distribuidor y de este al molde también ha merecido atención, habiéndose desarrollado técnicas tales como coladas por inmersión (boquillas sumergidas dentro del molde con una capa de escoria sintética de protección) y capas protectoras de gas inerte alrededor de los chorros de metal.

Otro requisito importante en la colada continua es la solidificación rápida y pareja del acero líquido para que se forme una piel exenta de defectos de cualquier tipo. Esto a su vez requiere que se haga llegar acero de temperatura uniforme al molde y luego un régimen constante de extracción de calor a través del enfriamiento en el molde y luego de las rociaduras secundarias para lograr un producto uniforme de forma maciza perfecta. El control de la temperatura mejoró como resultado de esfuerzos exhaustivos, particularmente en las prácticas del convertidor básico y del horno de arco eléctrico, pero aún son necesarias correcciones en la olla del acero. Estas incluyen la degasificación, -

como se mencionó anteriormente, pero es más común el barrido con argón para la igualización de la temperatura y también para ayudar a la disolución de la chatarra de acero - que se adiciona en casos en que la temperatura es demasiado elevada.

Como se mencionó en la introducción, el estudio realizado en esta tesis es para aceros de bajo carbón y baja aleación; contándose además con equipo de inyección de argón.

Equipo Auxiliar.-

Una vez que el acero en los hornos se encuentra con la composición química deseada y la temperatura adecuada tiene que ser transportado a las máquinas de vaciado continuo; para este fin se usa un recipiente de acero revestido interiormente de ladrillo refractario conocido como olla de vaciado.

La olla, también llamada cuchara, suministra el acero en el distribuidor, para que de este pase a el molde donde se efecturá la solidificación.

La olla en su parte inferior puede tener una válvula del tipo deslizante o una barra tapón con lo que se controla el flujo del metal líquido hacia el distribuidor, pero también se puede vaciar por el pico inclinando la olla y un

operador controla el flujo del metal. Las capacidades de las ollas puede variar mucho y existen hasta de 125 toneladas. Para facilitar la operación y mantener entre los hornos y las máquinas de vaciado un ritmo constante, es conveniente disponer de un número adecuado de ollas, así como un área de trabajo especial dedicada a la limpieza, preparación y reparación. Se debe contar además, con una zona de precalentamiento y el equipo para colocar las ollas en posición de vaciado.

Las ollas con las que se trabajó presentan las siguientes características:

Ollas de colada de 70 toneladas de acero líquido.

Precalentamiento durante 60 minutos a 600 C.

Valvula de descarga por el fondo; barra tapón enfriada por aire.

Diámetro de las boquillas de 35 milímetros.

Refractario sílico-aluminoso.

En el equipo auxiliar se incluyen también los equipos de secado y precalentamiento de los distribuidores, los sistemas de lubricación y las estaciones de engrasado, de recepción y distribución de energía eléctrica, instrumentos de medición y registro, equipo de almacenaje, taller

de reparación de moldes, suministro y control de fluido hidráulico, carros para transferir distribuidores, gruas viajeras, planta de tratamiento de agua, equipos de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas.

Descripción de la Máquina de Vaciado Continuo.-

Para tener una idea más clara de lo que es una máquina de vaciado continuo, se presenta una descripción de sus partes principales.

Torre porta olla:

Se encuentra localizada al nivel de la plataforma de colada. Su función es la de recibir la olla con el acero líquido en sus brazos. Las máquinas modernas cuentan con torres giratorias, con dos brazos, cada uno capaz de soportar una olla llena de acero. Cuando una olla está a punto de ser vaciada completamente, otra es recibida en el brazo opuesto de tal forma que girando la torre 180 la nueva olla queda en posición de vaciado para iniciar una nueva colada.

Distribuidor:

El distribuidor (figura 11) es un recipiente de forma generalmente rectangular revestido interiormente de ladrillo refractario, su función es la de recibir el acero líquido proveniente de las ollas. Descansa sobre unos carros que lo transportan de la estación de precalentamiento

a la máquina de colado. Tiene tres funciones principales: Proporcionar un control adecuado en el flujo del metal líquido, guiar el acero líquido hacia los moldes; en máquinas de hilos múltiples, distribuir uniformemente el metal en los diferentes moldes. El acero líquido pasa a través de boquillas de material refractario alojadas en la base del distribuidor para de ahí pasar al molde.

La capacidad de carga del distribuidor puede variar de acuerdo a las máquinas y al número de hilos con que cuenten estas, (figura 12), el rango de carga es muy amplio y puede ir de 1 a 200 toneladas.

El distribuidor debe de ser preparado antes de ser instalado en la máquina para iniciar la colada. Esta preparación consiste en la reparación del material refractario - destruido, cambio o limpieza de boquillas y precalentamiento del material refractario.

El tipo de material refractario que se utiliza en el distribuidor es generalmente: Tabiques de silicatos y tabiques de alta alúmina. Recientemente se estan usando con muy buen éxito placas aislantes colocadas en el piso y en las paredes del distribuidor que eliminan el precalentamiento del distribuidor, ofrecen una mayor seguridad para las coladas en secuencia y aumentan en forma considerable la vida del refrac

tario. Utilizando las mencionadas placas se requiere solo de un ligero calentamiento en las boquillas.

Las boquillas que como se dijo son parte integral del distribuidor pueden ser del tipo sumergidas (figura 13), para evitar la reoxidación en algunos aceros especiales, o no sumergidas, es decir que se encuentran sobre el molde. Estas boquillas estan echas de material refractario a base de alúmina y óxido de silicio, sin embargo el material más empleado hoy en día es el zircón ($ZrSiO_4$).

Los distribuidores usados fueron:

Distribuidor tipo T de 4 hilos.

Capacidad de 3 toneladas de acero líquido.

Boquillas del distribuidor del tipo no sumergidas de silicato de zirconio.

Diámetro de las boquillas de 13 a 15 milímetros.

Temperatura de precalentamiento 1100 C.

Tiempo de precalentamiento 150 minutos.

Molde.-

El molde (figura 14) es sin lugar a dudas una parte primordial en las máquinas de colado continuo, ya que en el, el acero líquido solidificará parcialmente y tomará la forma que tendra el producto final al termino del proceso.

Existen varios tipos de moldes: Moldes de bloque,

moldes de placas y moldes tubulares. Los moldes de bloque estan hechos de un bloque sólido de cobre forjado; son los que menores problemas cusan en las coladas pero tambien son los de más alto costo. Los moldes de placa son más económicos y estan formados por cuatro placas de cobre unidas por un bastidor enfriado por agua; este tipo de moldes tiene el problema de que no es fácil lograr una buena unión en las esquinas lo que en las prácticas de vaciado puede ocasionar numerosos problemas. Los moldes del tipo tubular son los que con mayor frecuencia se emplean, sobre todo en el colado continuo de palanquillas ya que su costo no es tan alto como los de bloque y dan mejor servicio que los de placas. Las dimensiones de los moldes varia de acuerdo al producto que se quiere producir.

El molde será más eficiente en la medida en que la transferencia de calor sea mejor, por esta razón se escogió el cobre como material para la fabricación de los moldes. A medida que el acero va solidificando en los moldes, el metal sufre una contracción por el brusco enfriamiento, y como resultado de esto se forma una capa de gases entre las paredes interiores del molde y la capa del metal solidificado. Esta capa gaseosa presenta un obstáculo para la transferencia de calor, y para tratar de eliminarla a los moldes se -

les ha efectuado una conicidad para tratar de compensar la contracción del metal que solidifica. Esta capacidad ayuda además a aumentar la vida del molde y reduce algunos defectos en el material como la rombocidad y las grietas que se presentan en las esquinas.

El molde es refrigerado con agua, la cual circula a través de una chaqueta entre las paredes exteriores del molde. Esta chaqueta es de acero. El agua de enfriamiento permanece dentro de un circuito cerrado, y debe ser desmineralizada y tratada químicamente para tener un valor de Ph dado por el fabricante de las máquinas y que generalmente varía entre 7 y 8 para evitar incrustaciones calcáreas en las paredes del molde.

Como se vió en la historia, para prevenir que el acero se pegue al molde y evitar rupturas en la costra solidificada a la salida del molde, existe un mecanismo oscilatorio que imprime a el molde un movimiento ascendente y descendente en el mismo sentido que la línea de centro del molde. La carrera y frecuencia pueden variarse para determinadas velocidades, esto puede ser manual o automático, y se puede considerar independientes del tamaño de la sección a colar.

El mecanismo de oscilación más común esta formado

por una leva con una oscilación de relación de 3:1; esto quiere decir que tres cuartas partes del ciclo el molde baja a una velocidad, y la cuarta parte restante el molde regresa a su posición original. Se tiene además el tiro negativo.

Estos efectos de oscilación se pueden obtener por medios hidráulicos o por sistemas electro-mecánicos que son más económicos.

Existe en el molde además un sistema de lubricación que ayuda a reducir las fricciones entre el acero colado y las paredes del molde proporcionando además un mejor acabado superficial en el producto e incrementando el tiempo de vida del molde. Para la lubricación se emplean principalmente aceites del tipo vegetal, como aceite de colaza y aceite de girasol, ya que los gases que se producen en su combustión son menos dañinos que los que producen los aceites minerales. En la actualidad se emplean algunas esencias sintéticas en polvo para la lubricación.

Para el desarrollo del estudio se utilizaron los siguientes moldes:

Moldes curvos de cobre electrolítico del tipo tubular.

Longitud 800 milímetros.

Secciones de 102 X 102 milímetros.

Flujo de agua en los moldes 1200 L/min. aproximadamente.

Control automático de nivel de acero. Fuente de radio activo de cobalto 60.

Relación de oscilación de 3:1.

Lubricación con aceite de colaza, 22 cc/mm/cara.

Zona Secundaria de Enfriamiento.-

Una vez que la palanquilla ha salido del molde, -entra en la zona secundaria de enfriamiento o cámara de enfriamiento (figura 15) cuya función es la de conseguir un -incremento en el espesor de la costra solidificada en el molde hasta un punto en que la solidificación pueda completarse solamente por radiación en el medio ambiente. En la zona secundaria el producto es guiado y soportado por una serie de rodillos entre los cuales se encuentran colocadas unas boquillas o aspersores que forman parte de este sistema abierto -de enfriamiento.

Estas boquillas que expulsan agua están conectadas a los tinacos de almacenamiento por un sistema de tuberías que corren paralelos al eje del producto. Las boquillas se

distribuyen en igual número y en igual posición para cada cara del producto, ya que el gasto de agua debe ser idéntico para cada lado o pared, para poder lograr una eliminación de calor uniforme, ya que de no tener en esta forma la pérdida de calor se pueden presentar problemas debido a que se formarían tensiones diferentes en las paredes del producto lo que podría ocasionar la formación de grietas, fracturas y arrugamiento en la piel. También se ha notado que las altas presiones del agua sobre las caras del producto puede traer defectos superficiales en las caras del producto, por lo que se recomiendan presiones relativamente bajas que pueden variar entre 4 y 6 Kg/cm².

Gastos excesivos pueden causar también defectos en el producto, por ejemplo ocasionan grietas internas, por lo que se recomienda para mejores resultados gastos cercanos a 1100 L/min. por cada cara. El agua que se utiliza en esta zona también es recirculada y tratada químicamente para desmineralizarla, para esto se recolecta en unos tanques y después se bombea a la planta de tratamiento de aguas.

Existen diferentes tipos de boquillas utilizados en la industria: Por chorro laminar, por chorro hueco o cónico y por atomizado; el tipo empleado más comúnmente es el de atomizado ya que es el que menos problemas causa.

La máquina utilizada contaba con las siguientes características:

Flujo de agua repartido en tres zonas;

500-600 L/min./cara.

Presión del agua; 6.5 Kg/cm^2 .

Unidad extractora-Enderezadora.-

La unidad de extracción y enderezado (figura 16) está formada por rodillos, que como su nombre lo indica se encargan de extraer y de enderezar la barra colada para lograr tener una descarga horizontal. Los rodillos, generalmente, son impulsados mediante motores eléctricos de corriente directa, y son reversibles con el objeto de poder introducir la barra falsa en el molde al empear las coladas o cuando se presentan problemas en alguna colada y hay necesidad de remover el producto.

Los rodillos se encuentran generalmente divididos en dos secciones, y cada sección es capaz de desplazarse hacia arriba o hacia abajo mediante la acción de un cilindro hidráulico. Este movimiento es necesario para facilitar el cambio de sección cuando se pretende colar otro producto de diferentes dimensiones sin que con esto se ocasionen cambios en las máquinas y para poder proporcionar la presión neces-

saria para que la fuerza de arrastre de los rodillos se transmite a el producto o a la barra falsa. Por lo regular los rodillos inferiores van fijos y son los rodillos motrices.

La unidad enderezadora-extractora presentaba las siguientes características:

Mecanismo hidráulico.

Presión de enderezado de 50 a 70 Kg/cm².

Rodillos tres superiores/tres inferiores.

Sistema de corte.-

Existen varios tipos de cortes para obtener la palanquilla u otro producto a la longitud requerida para su manejo. Las máquinas de corte se encuentran localizadas un poco despues de los rodillos extractores-enderezadores y pueden ser de diferentes tipos:

Oxi-gas; por medio de sopletes a base de oxígeno y algún otro gas de corte, como acetileno por ejemplo.

Cizalla hidráulica, que son tijeras accionadas por mecanismos hidráulicos.

Cualquiera que sea el sistema de corte empleado, debe existir una perfecta sincronización entre el cortador y la velocidad de salida de la palanquilla, barra o plan-

chón, para poder asegurar el corte a la longitud seleccionada. Para poder lograr esto, se emplea un mecanismo en el cortador que lo hace viajar a la misma velocidad que al producto, cuando es necesario efectuar un corte, la base se monta en el producto viajando a la misma velocidad que este, mientras el cortador entra en acción.

La estación de corte de la máquina fué la siguiente:

Tijera vertical de corte automático.

Presión de corte 210 Kg/cm².

Longitudes de las palanquillas de 2.10 a 12.8 m.

Barra falsa.-

La barra falsa (figura 17) es un aditamento que proporciona un sellado en el fondo del molde al inicio de la colada. La barra se extiende desde la base del molde hasta por lo menos el primer rodillo del sistema de extracción. La barra falsa no es más que una cadena eslabonada de acero, con un extremo rígido. Este extremo rígido se denomina cabeza, la cabeza se fija a la cadena por medio de una rosca. La cadena se mantiene dentro del molde por medio de la unidad extractora-enderezadora, sellándose con pedacería de chatarra y asbesto los huecos que quedan en-

tre la cabeza y el molde para evitar fugas de acero líquido al iniciarse la colada. Las máquinas cuentan además con un almacén para la barra falsa. Este se encuentra entre las líneas de las máquinas. Hay uno para cada línea y tienen una longitud cercana a la de la barra. Tan pronto la barra es separada del producto, se levanta por medio de un dispositivo hidráulico a los depósitos donde permanece hasta el inicio de la otra colada.

Cama de Enfriamiento.-

La cama de enfriamiento como su nombre lo indica es donde los productos ya en completo estado sólido terminan de enfriarse en el medio ambiente para de ahí pasar a los almacenes. Se puede dividir en varias partes que trataré de enumerar: Mesa de rodillos; están situadas desde la unidad extractora-enderezadora, pasando a través de la máquina de corte, hasta donde empieza la cama de enfriamiento. Su función es la de transportar el producto por medio de rodillos instalados en ella. Los empujadores; estos se encuentran colocados en el último tramo de la mesa de rodillos. Cuando los productos se han detenido por los paradores, topes colocados al final de la mesa de rodillos,

se transfieren a las camas de enfriamiento por medio de los empujadores. Estos pueden ser a base de cilindros neumáticos o eléctricos con cadenas, y un transportador de uñas. Finalmente la cama de enfriamiento que se encuentra situada perpendicularmente a la mesa de rodillos, los productos desplazados por los empujadores caen a las camas de enfriamiento a través de una placa inclinada. Durante su recorrido a lo largo de la cama, los productos giran 90° sobre su eje longitudinal, con objeto de lograr un enfriamiento más uniforme. Cuentan con unos dispositivos mecánicos excéntricos que les permiten efectuar dichos giros.

El equipo de la máquina consistió en:

Sistema de descarga; Empujador automático hidráulico.

Una cama de enfriamiento para cada línea. 36 palanquillas/cama.

Para más datos del equipo con que se realizó el trabajo fué: Máquinas CONCAST tipo curvo de las siguientes características:

	promedio	máximo	mínimo
Capacidad de la máquina en ton/h	48	60	37

Velocidad de vaciado por línea. m/min.	2.8	4.0	1.9
tiempo de colada minutos.	80	105	65

La máquina es de cuatro líneas con un radio de curvatura de 4 metros.

Operación de la Máquina de Colada Continua.-

En esta parte se trata de dar en forma detallada la forma en que opera este proceso:

Antes de iniciarse la colada, aproximadamente 2 horas la olla y el distribuidor que van a ser utilizados se ponen a calentar. Ya cuando la colada está a punto de iniciar, se ponen en movimiento los rodillos de la mesa - para llevar la barra falsa a la unidad extractora-enderezadora. Por medio de esta se lleva la barra falsa en dirección opuesta a la colada, hasta que la cabeza se encuentra unos 10 o 15 centímetros dentro del molde. Se procede a sellar la cabeza de la barra en el molde para evitar fugas de acero líquido; para este fin se colocan las rebabas de acero dentro del molde sobre la cabeza de la barra falsa lo

que además ayudará a acelerar el proceso de solidificación. cuando el molde recibe el acero líquido del distribuidor.

En estas condiciones la máquina se encuentra lista para iniciar la colada.

En la planta de aceración mientras tanto, el acero es vaciado a la olla y se determina su temperatura. De aquí pueden suceder tres casos:

Que el metal se encuentre frío, es decir con una temperatura baja para el tipo de acero que se va a colar, en este caso la olla es regresada a la planta de aceración.

Que el metal este demasiado caliente, entonces se agrega chatarra para bajar la temperatura del baño.

Que el metal tenga la temperatura adecuada, entonces es transportado a la planta de colado.

Una vez que la olla llega a la planta de vaciado es colocada en la torre porta-ollas por medio de una grúa, misma que se utilizó para transportar la olla del area de aceración.

En estos momentos el calentamiento del distribuidor es suspendido y es transportado por medio del carro hacia la plataforma de colado. Se colocan además unas canaletas bajo las boquillas del distribuidor. Se abre el

circuito del agua del molde y se comprueba su funcionamiento. Si todo marcha normal, se abre el tapón de la olla y se procede a llenar el distribuidor con el acero líquido; con pequeñas lanzas de cobre que expelen oxígeno se funden los tapones de las boquillas y el acero que sale se tira al depósito de escoria por medio de los canalones; esto se efectúa en cada una de las líneas, tan pronto como el acero sale con un chorro constante y sin escoria, se retiran los canalones permitiendo el paso del acero a los moldes. En el principio de la colada solo se vacía un poco de acero a cada molde y se colocan los canalones para desviar los chorros a la caja de escoria, esto se efectúa con el fin de que el acero, que cayó al molde tenga tiempo de solidificar. En seguida se retiran los canalones y se deja llenar el molde.

Una vez que el acero líquido se encuentre en un nivel de aproximadamente 20 centímetros dentro del molde se ponen a funcionar las siguientes unidades:

Sistema de oscilación del molde.

Sistema de lubricación del molde.

Unidad extractora-enderezadora.

Circuito de agua en la zona secundaria.

Con esto se efectua la extracción de la barra falsa a una velocidad predeterminada, y el metal se encuentra ya sólido en la cabeza, asegurando con esto la extracción de la palanquilla.

En el molde el enfriamiento con agua permenece durante toda la operación, y el aceite lubricante dentro de las paredes del molde ayuda a reducir la fricción entre la palanquilla y el molde. La oscilación del molde efectuada por medios mecánicos, donde la longitud de carrera es constante, mientras que la frecuencia es variable, pudiendo ajustarse a las necesidades de la colada.

A continuación se pasa a la zona secundaria de enfriamiento que se encuentra a la salida inmediata del molde, como ya se ha dicho, al salir el acero del molde, su centro permanece en estado líquido, por lo que se requiere un enfriamiento adicional. En la zona secundaria se atomiza agua con espreas a todas las caras y vertices con lo que se consigue que la capa de acero sólida aumente de espesor. La velocidad de extracción se encuentra ligada al enfriamiento secundario, pues la longitud del cono líquido dentro de la barra, debe estar sólido al llegar al nivel de los rodillos de extracción. Es importan-

te además, pues con un enfriamiento deficiente se podría causar perforaciones en el producto, y si el enfriamiento es excesivo puede dar origen a grietas superficiales.

Al salir la barra o palanquilla de la torre de enfriamiento, pasa a la unidad extractora-enderezadora, aquí el equipo de la barra falsa se despega y se coloca en su sitio de almacenaje fuera de la línea de colada, solo la cabeza sigue unida a la palanquilla, ya en posición horizontal la extractora mediante sus rodillos motores ajusta la velocidad de vaciado de la palanquilla, de acuerdo a la cantidad de acero líquido que es cargado a los moldes.

En seguida se encuentra la máquina de corte. - La palanquilla se corta a la longitud requerida por medio del mecanismo de la tijera hidráulica que regula el corte de forma automática. Aquí también se desconecta la cabeza de la barra falsa.

Al final de la colada la cantidad de acero que cae dentro de los moldes disminuye, al bajar el nivel del acero en el distribuidor, con lo que se disminuye la velocidad de colada. Cuando el distribuidor está casi vacío se colocan los canalones para desviar el acero que ahora

viene acompañado de escoras. El distribuidor es desplazado en su porta carro y llevado a la zona de reparación. En este momento el sistema de oscilación y la unidad extractora-enderezadora disminuye su velocidad o se detienen por completo, para asegurar la solidificación total del extremo final de la palanquilla. La última palanquilla es descargada con lo que se suspende el sistema de oscilación, engrasado, enfriado y el movimiento de los rodillos extractores, se procede a reparar o limpiar la máquina según sea el caso y se prepara todo el equipo para una nueva colada.

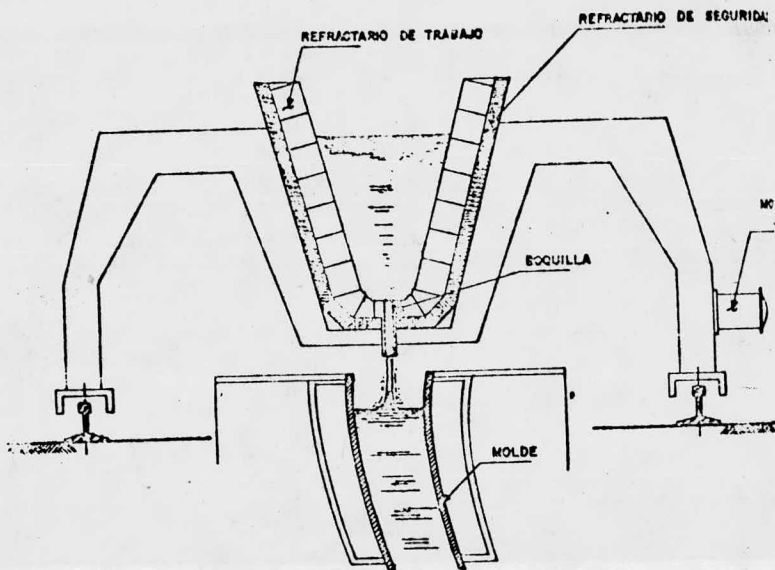
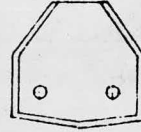


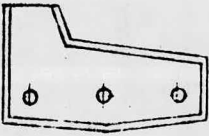
Fig.- 11 DISTRIBUIDOR Y CARRO PORTA DISTRIBUIDOR



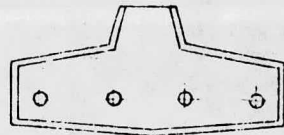
PARA UN HILO



PARA DOS HILOS

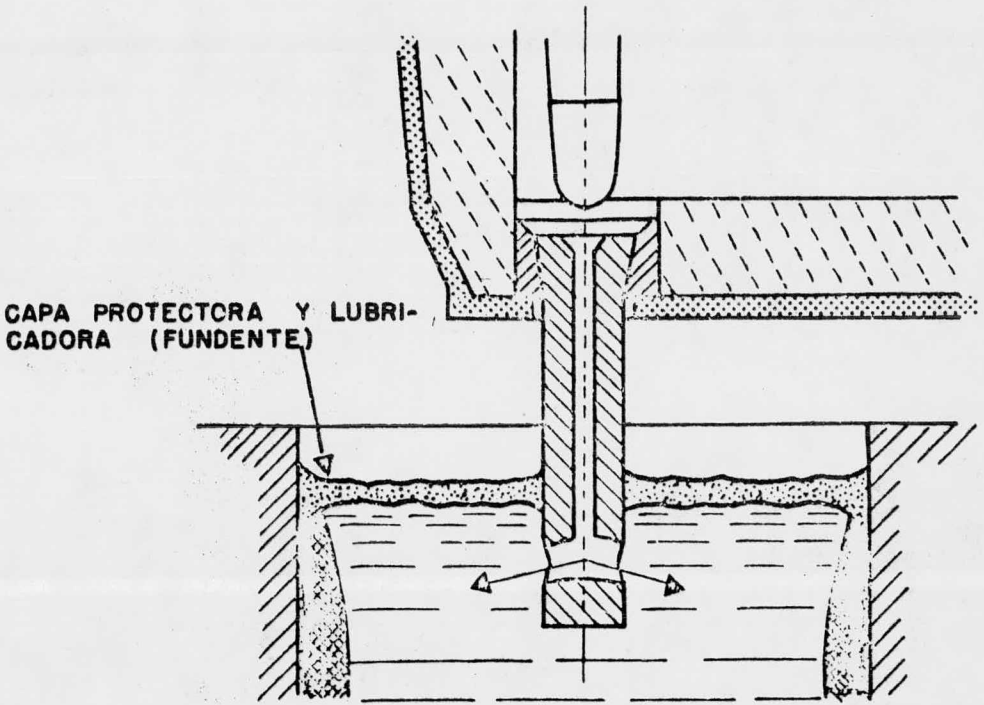


PARA TRES HILOS



PARA CUATRO HILOS

Fig.- 12 VARIAS FORMAS DE DISTRIBUIDORES



USO DE BOQUILLAS SUMERGIDAS EN COLADO CONTINUO

FIG.- 13

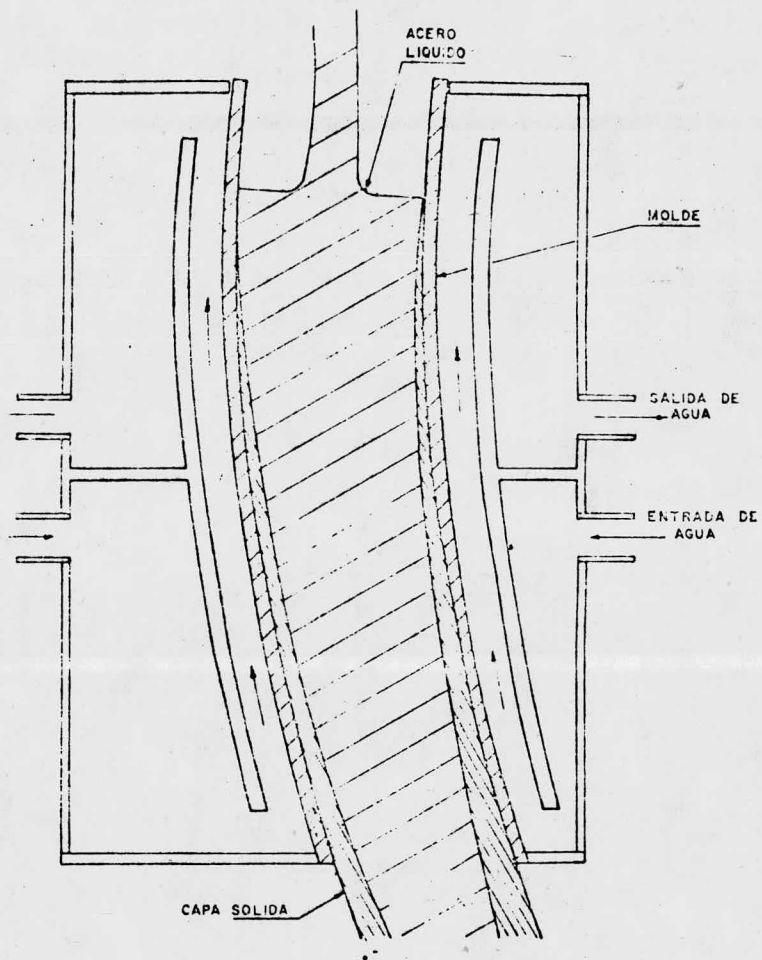


FIGURA 14 **MOLDE.**

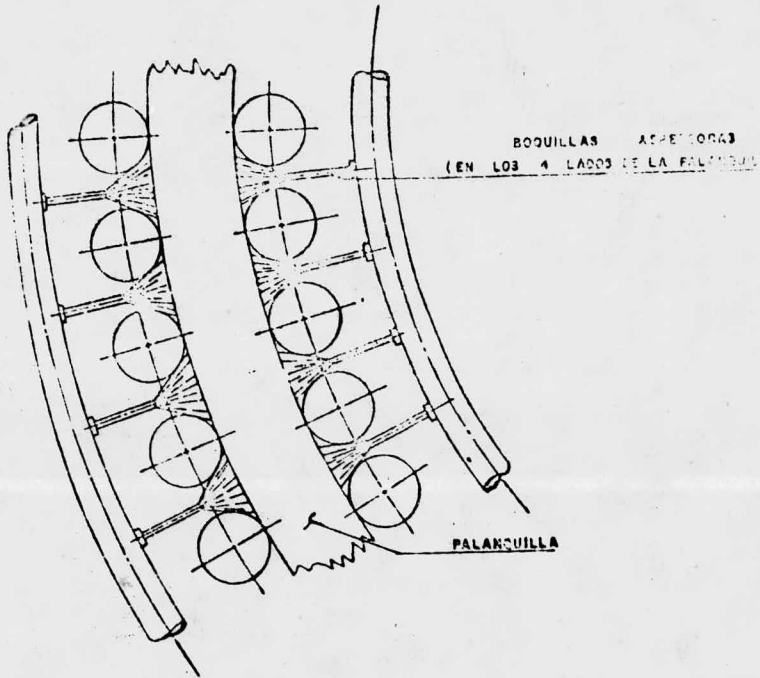


Fig.- 15

ZONA DE ENFRIAMIENTO SECUNDARIO.

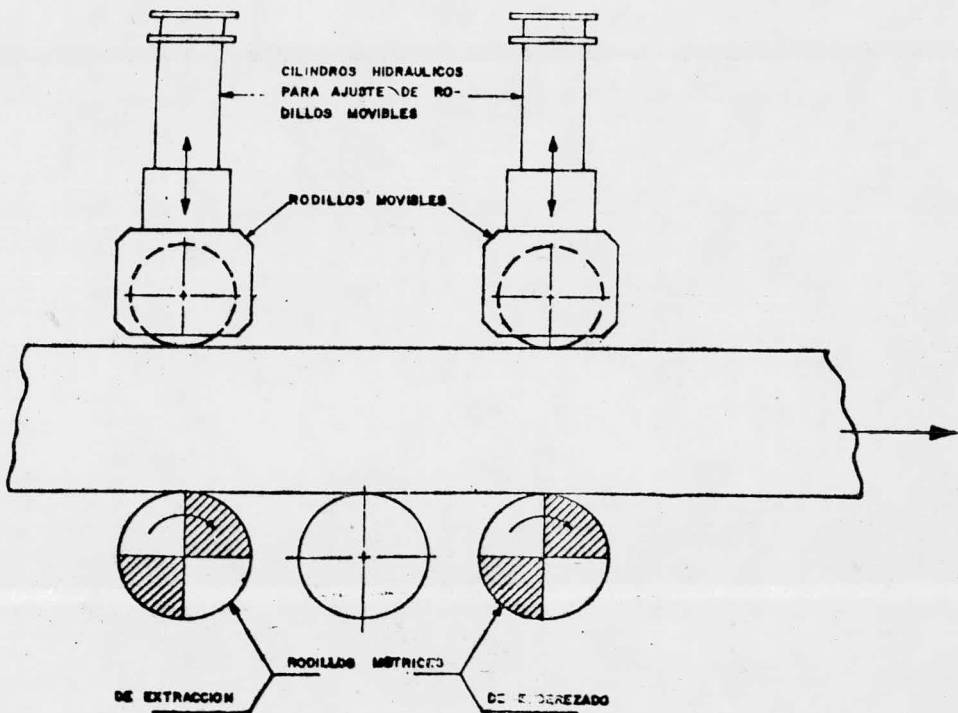
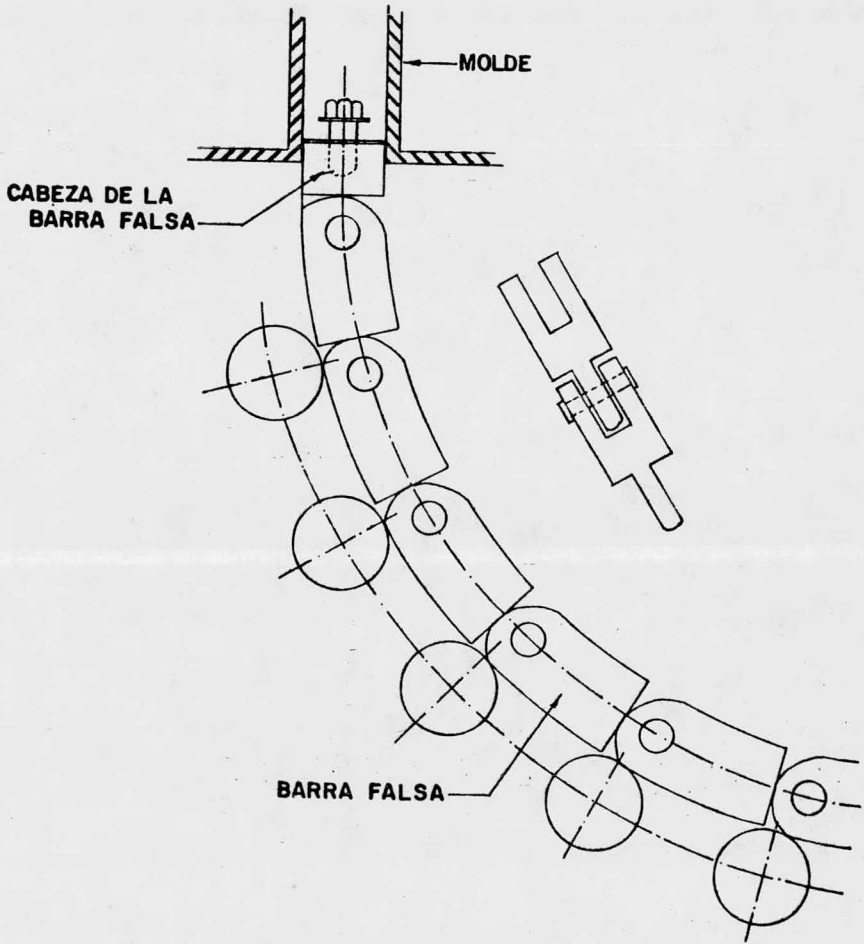


FIG.- 16 UNIDAD EXTRACTORA - ENDEREZADORA.



BARRA FALSA

Figura .- 17

CAPITULO IV

Transferencia de Calor en el Molde Desde el Punto de Vista Teórico.

Los procesos que se desarrollan en el molde de una máquina de vaciado continuo son decisivos para la forma y calidad superficial del producto fundido. Mientras que la forma depende exclusivamente de la geometría del molde, por lo que se considera un parámetro fijo, existen varios factores que pueden influir sobre la calidad superficial del producto. Estos factores se ponen de manifiesto en cambios en la resistencia mecánica de la piel y en los esfuerzos que debe resistir esta piel de la barra que se está formando. Si esta piel resulta sobrecargada de esfuerzos debido al rozamiento y a la presión ferrostática, en el producto comienzan a aparecer grietas, que, finalmente pueden conducir a una ruptura. A causa de esto se ve la necesidad de llevar un control del proceso que nos permita neutralizar a estos factores perturbadores.

Es pues importante para la vigilancia y el control del proceso de colada continua el obtener una buena información sobre las condiciones en que se encuentra el molde a lo largo de toda la colada.

Para este efecto hay que tener en cuenta en primer lugar la medida y el análisis del paso de calor a través del molde. El rendimiento térmico del molde representa la resultante de todos los factores que influyen en la transmisión de calor del acero líquido hasta el agua de refrigeración que circula en la chaqueta del molde. Es por ello que la medida de la transferencia de calor en el molde resulta muy eficaz para llevar un control en el desarrollo del proceso de solidificación en la colada continua dentro del mismo.

A continuación se considera un estudio teórico de la transferencia de calor en el proceso de vaciado continuo y en especial dentro del molde.

a).- Transporte de calor en procesos de solidificación convencionales.

En la mayoría de los procesos para obtener piezas coladas y lingotes, el flujo de calor no se lleva a cabo en forma continua como se trata en la mayoría de las veces. El metal líquido caliente es derramado sobre un molde a temperatura ambiente; la disipación del calor específico y el calor de fusión del metal que solidifica, se realiza a través de resistencias térmicas, como son

las paredes del molde frío, antes de completar su solidificación. La figura 18 muestra este proceso esquemáticamente para la solidificación de un metal puro. Es considerado generalmente que es el calor del metal líquido que solidifica el que atraviesa las resistencias térmicas.

Este problema es complejo física y matemáticamente cuando la geometría de los productos no es simple, cuando las propiedades térmicas se toman como función de la temperatura o cuando se consideran aleaciones. Problemas como estos son resueltos por computación. Sin embargo, existen aproximaciones sencillas para ciertos casos de interés desde el punto de vista de ingeniería.

El problema de flujo de calor se puede simplificar si el molde es considerado como una extensión semi-infinita; es decir, que la parte exterior del molde no se sobrecalienta durante la solidificación del metal y si se considera también que el metal es vaciado exactamente a su temperatura de fusión T_M , como se aprecia en la figura 19.

Consideremos primero el problema unidimensional de flujo de calor.

El metal es vaciado exactamente a la temperatura de fusión T_M , en un molde con un espesor de pared x , y que se encuentra inicialmente a una temperatura igual a T_0 . Entonces la superficie del molde será calentada hasta la temperatura T_M en un tiempo t . Esto es un problema dimensional de flujo de calor y la solución está dada por la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} ; \quad \alpha_m = \frac{k_m}{\rho_m C_s} \dots (1)$$

Donde:

α_m = difusividad térmica del molde

k_m = conductividad térmica del molde

ρ_m = densidad del molde

t = tiempo

x = espesor de la pared del molde

C_s = constante para cada metal

La solución a esta ecuación para el estado límite está dada por la temperatura, T_1 como una función del tiempo t , a la distancia de la superficie del molde x .

$$\frac{T - T_M}{T_0 - T_M} = \text{Erf} \frac{X}{2\sqrt{\alpha_m T}} \dots\dots (2)$$

En donde la función error está denotada por Erf. La función error de cero es cero y la función error de infinito es la unidad. La velocidad de flujo de calor dentro del molde en la interfase metal-molde está dada por:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = -k_m \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{x=0} \dots\dots (3)$$

Donde:

X = incremento positivo de izquierda a derecha en la figura 19.

q = velocidad de flujo de calor

A = area

Para la diferenciación parcial de la ecuación 2 respecto a X , a $X=0$, y combinando los resultados con la ecuación 3, la velocidad del flujo de calor a través de la interfase metal-molde es:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = -\sqrt{\frac{k_m \rho_m C_m}{\pi t}} (T_M - T_0) \dots\dots (4)$$

ahora el calor que entra en el molde proviene para este caso, solo del calor de fusión del metal. Como la pared y el líquido según la figura 19 están a la temperatura T_M exactamente, tenemos:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = - \rho_s H \frac{\partial S}{\partial t} \dots\dots (5)$$

En donde S es el espesor de solidificación; si combinamos las ecuaciones 4 y 5 e integramos para $S = 0$:

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_0}{\rho_s H} \right) \sqrt{k_m \rho_m C_m} \sqrt{t} \dots\dots (6)$$

La ecuación 6 predice la forma en la cual las propiedades del metal y del molde determinarán la velocidad de colada en un molde relativamente aislado. Como se ve, el espesor del metal es una función parabólica del tiempo t , lo cual quiere decir que la velocidad de solidificación es al principio muy rápida para después decrecer conforme el metal se calienta,

El problema unidimensional de transferencia de calor sirve para ilustrar mucha de la importancia de los aspectos térmicos en la solidificación, pero para algunos problemas, es importante evaluar los tiempos libres y las velocidades de formas complejas.

Consideremos otra vez el problema de flujo de calor en la pared del molde, en el que el contorno de la pared tiene influencia en la capacidad de absorción de calor. Por ejemplo, el flujo de calor dentro de un molde de contorno cóncavo o convexo puede compararse con el de una pared plana. Para formas simples, sin embargo, las diferencias no son muy grandes y se pueden usar una aproximación al suponer que un centímetro cuadrado de superficie del molde tiene una capacidad constante para absorber calor, con poca importancia del contorno o lugar de la colada.

Con esta aproximación, se puede reemplazar S en la ecuación 6 por V_s/A , donde V_s es el volumen de solidificación al tiempo $t = 0$, tomando $t = t_f$ como el tiempo de solidificación total en una colada de volumen V_s .

$$\frac{V}{A} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_0}{\rho_s H} \right) \sqrt{R_m \rho_m C_m} \sqrt{\tau_F} \dots (7)$$

6

$$\tau_F = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \dots (8)$$

Donde C es una constante para cada metal, material del molde y temperatura del molde.

La ecuación 8 es conocida como regla de "Chvorinov", usada para comparar los tiempos de solidificación de coladas sencillas.

Para formas tales como esferas o cilindros es posible derivar una función más exacta que la expresión de la ecuación 7, si relacionamos t_f a V/A , suponiendo que no existe divergencia en el flujo de calor. En estos casos la ecuación diferencial parcial aplicable para el flujo de calor en el molde es:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial T^2} + \frac{n}{T} \frac{\partial T}{\partial T} \right) \dots \dots (9)$$

Donde:

r = radio de la colada

n = 1 para cilindro, 2 para esfera.

y siguiendo un procedimiento identico al que fué usado para derivar la ecuación 7, la expresión equivalente es:

$$\frac{V}{A} \cdot \frac{T_H - T_0}{\rho_s H} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{R_m \rho_m C_m \sqrt{T_F} + \frac{n R_m T_F}{2T}} \right] \dots \dots (10)$$

Por comparación de las ecuaciones 7 y 10 se ve que la aproximación de Chvorinov es más válida cuando la difusividad térmica $\frac{k_m}{\rho_m C_m}$ decrece, y es también cercanamente válida para esferas y cilindros.

b).- Transporte de calor y solidificación del acero en el proceso de colada continua.

Para tener una base en la especulación de el

mecanismo de solidificación del acero en la colada continua se ha seleccionado la siguiente lista de características de solidificación, las que también han sido reconocidas en estructuras de coladas convencionales de lingotes.

1).- La solidificación de la columna ocurre cuando existen gradientes definidos de temperatura en la interfase solidificante. El proceso de colada continua da oportunidad a mantener estos gradientes de alta temperatura, entonces el molde no se sobrecalienta como ocurre en los lingotes convencionales. Más importante, es que, una gran fracción del calor, es eliminado mediante aspersión de agua en la superficie del producto colado, entonces se puede retardar el proceso de transferencia de calor debido a las aberturas producidas por el aire.

2).- En ausencia de formación de gas, la solidificación puede ser reconocida por un sistema de dendritas característico de este proceso, las que indican aproximadamente la dirección de transferencia de calor. El fenómeno de macrosegregación hace posible el reconocer la columna dendrítica en la sección solidificada.

3).- Debido a la rápida velocidad inicial de eliminación de calor, la piel exterior de un lingote solidifi-

ca rápidamente, en la colada continua la acción enfriadora se puede favorecer mediante la baja temperatura y la alta conductividad térmica de la pared de cobre del molde. Así la rápida velocidad de solidificación puede concebir inhibiciones en las reacciones formadoras de gas.

4).- La mayoría del gas formado durante la solidificación del acero resulta de la reacción entre el carbono disuelto y el oxígeno.

5).- Una vigorosa formación y evolución del gas tienden a eliminar la microsegregación, lo que hace posible reconocer las dendritas en la estructura solidificada.

6).- La evolución de las burbujas de gas a lo largo de la interfase que solidifica, está acompañada por una definida macrosegregación negativa en la parte solidificada y positiva en el metal que permanece líquido. El tipo de distribución de los sulfuros a través de la sección solidificada da un índice de la tendencia a la segregación durante la solidificación del acero en este proceso.

Las observaciones que se han efectuado en exámenes de varias secciones con características reconocidas en la estructura de los lingotes colados convencionalmente proveen de una base para especular sobre los mecanismos de solidificación en la colada continua de aceros.

Sin embargo los mecanismos de solidificación en colada continua no solo difieren con la composición química del acero y el nivel de oxígeno dentro del mismo, lo que nos produce los gases que se atrapan en el producto, sino que además varían con las dimensiones de la sección a colar y con los diferentes tipos de máquinas que existen.

En observaciones realizadas para diferentes estudios se encontró un mecanismo simple para la solidificación de aceros al carbón.

En estos aceros se reconoce que un enfriamiento inicial se forma en la superficie, con lo que se forma una piel que se parece a la piel externa de un lingote colado en forma convencional. Conforme el producto recorre el molde, la velocidad de eliminación de calor es retardada y se desarrolla una interfase sólida relativamente uniforme, en la cual, existe un gradiente de temperatura definido.

Bajo estas condiciones comienza una alta solidificación direccional, en la cual, la sección ha sido arrastrada al molde enfriado por agua, el espesor de la capa solidificada crece y ocurren algunas fracturas pequeñas.

Como en la colada convencional, estas fracturas iniciales son causa de la formación de boquetes aislados.

entre la cáscara sólida y la superficie del molde enfriado por agua.

En estos momentos, la velocidad de transferencia de calor ha sido retardada y el gradiente de temperatura en la interfase sólida reducida, las características de solidificación columnar son poco pronunciadas.

Conforme la colada va bajando en el molde enfriado por agua, la cáscara sólida enfriada se contrae. Probablemente esta contracción produce un boquete entre el producto colado y la pared del molde, por lo cual la transferencia de calor se ve retardada. Esta interferencia en el proceso de transferencia de calor disminuye la velocidad de solidificación en el molde, hasta el punto donde no hay una diferencia marcada con los estados iniciales del enfriamiento en los lingotes convencionales.

Conforme la velocidad de solidificación baja, el gas que se forma a lo largo de la pieza solidificada es más difícil de ser envuelto. Cuando aumenta la evolución del gas, es necesario regular el nivel de oxidación cuidadosamente, sobre todo en aceros con bajo contenido de carbón.

Los aspectos cualitativos de este control son aparentemente similares a los involucrados en la regulación

del gas en la práctica convencional de lingote de acero. Se supone que la corriente continua de metal que entra en el molde, causa corrientes de metal líquido que circula a lo largo de la superficie solidificada, lo cual ayuda a liberar los gases formados exactamente dentro de la piel. La presencia de dichas corrientes de metal líquido en el proceso de colada continua fué reconocida en diferentes investigaciones.

La mayor parte de las burbujas de gas que se forman durante el inicio de la solidificación, son desalojadas por los efectos combinados de las corrientes de metal y la reacción formadora de gas relativamente vigorosa. Al estar solidificando el metal, es difícil reconocer una sopladura en la superficie del producto.

Se concluye que cualquiera que sea la posición de estas sopladuras canalizadas puede ser influenciadas por el cambio en la velocidad de transferencia de calor y que este efecto es enmascarado por la similitud que presentan los efectos del nivel de oxidación y la velocidad de arrastre de la colada.

Se ha encontrado además que existen tres áreas de enfriamiento en el molde, conforme el acero líquido entra

en el molde proveniente del distribuidor en el curso del proceso de colada continua.

Una zona tubular de metal líquido con una alta temperatura es limitada por una zona de cristalización, en la cual los cristales crecen y el calor de cristalización es eliminado, ver la figura 20. Esta zona posteriormente puede ser dividida en una fase sólido-líquido, en el que una parte líquida forma cristales y la otra se encuentra semilíquida. Se puede encontrar entonces un trabajo de crecimiento de cristales ó dendritas del flujo central y un fluido que se mueve libremente y que encuentra espacios entre los cristales dendríticos que han crecido. La temperatura de la superficie exterior solidificada junto a la pared del molde y las temperaturas en las interfases varían con el tiempo.

Conforme la sección es arrastrada, se va desarrollando una "cabeza creciente de metal". Al crecer la cabeza de metal se tiende a una supresión de la formación y evolución del gas. Como en la práctica convencional, una evolución del gas poco vigorosa da como resultado que dentro del metal queden atrapadas burbujas de gas con lo que

se forman grandes y continuas sopladuras canalizadas. Una contracción y expansión simultáneas de estos canales a lo largo de planos paralelos a la superficie indican una formación de burbujas y una liberación similar a la que se encuentra a la mitad inferior de los lingotes convencionales. En secciones obtenidas de productos de colada continua, las huellas obtenidas de formación de burbujas pueden haber sido influenciadas por cambios en la velocidad de la corriente de metal líquido que entra al molde y la forma en la cual las corrientes de metal son distribuidas a través del cono que se forma en las interfases metal sólido-líquido.

Se encontró en diferentes investigaciones que los grados de segregación son como en el lingote convencional, solo la parte final de la colada tuvo una segregación negativa considerablemente alta.

La formación de gas en la zona central es errática probablemente influenciada por contracciones locales de elementos reactantes, por la presencia de núcleos dispersos y por la forma de operar la máquina de vaciado continuo.

Los variados sistemas de sopladuras que encierra la zona central, interfieren con el proceso de transferen-

rencia de calor, y, como resultado de esto, no hay evidencia de solidificación columnar en el centro de la sección.

Ocasionalmente, donde hay discontinuidades o donde el grado del acero tomado tiene baja conductividad térmica, se observan algunas evidencias de solidificación dendrítica al azar en el centro de la sección.

Al salir del molde el producto, su superficie exterior es enfriada por un sistema de aspersion de agua, y los gradientes de temperatura agudos reaparecen. Debido a la continua y efectiva eliminación de calor que tiene efecto en esta zona de chorro de agua, el gradiente de temperatura en la interfase solidificada permanece hasta la solidificación total. Bajo estas condiciones, las dendritas columnares se extienden hacia el centro, hasta que ellas encuentran la superficie sólida que aparece de las paredes opuestas o adyacentes.

La solidificación del acero en la colada continua, por otra parte, se completa por los efectos correlacionados de la corriente de metal que se alimenta en el molde enfriado por agua a una velocidad constante y a una conductividad de la cabeza de la barra falsa para el metal en una sección dada.



QUIMICA

Esta cáscara como es natural variará de espesor, desde cero, cuando el metal entra en el molde, hasta una sección completamente sólida en un lugar alejado del nivel del molde. Una ilustración esquemática de las condiciones que existen para alcanzar un estado continuo de operación se muestra en la figura 21.

Resumiendo lo enteriormente dicho tenemos: Las corrientes de acero son primero enfriadas en el molde, el cual puede ser referido como primera sección de enfriamiento. Siguiendo al molde se halla la sección de enfriamiento secundario, la cual tiene gran importancia. Estos dos elementos de enfriamiento requieren ser estudiados, tomando en cuenta los trabajos y problemas que aparecen al solidificar el acero líquido.

En la solidificación del acero se tienen las siguientes conclusiones básicas:

1).- Las altas temperaturas de fusión y los altos contenidos caloríficos indican que el acero debe ser producido en una máquina de vaciado continuo, a una velocidad rápida para evitar que se atore en la máquina.

2).- La baja conductividad térmica y la baja emisividad tienden a retardar la posibilidad de altas velo-

na central. Si la estimación de la zona líquida profunda es muy grande, la inversión de capital en la instalación puede ser excesiva. En la mayoría de los trabajos obtenidos experimental y teóricamente sobre procesos de cristalización de metales que solidificaron en un rango de temperatura conocidas, puede parecer lógico llegar a ciertas suposiciones de lo que sucede en un molde de una máquina de colada continua.

Una suposición interesante a la que se llegó es que la temperatura de la cáscara formada disminuye rápidamente en el molde y en la zona secundaria. Al mismo tiempo las dimensiones exteriores se reducen y la zona central líquida conserva su volumen, esto es debido a que la presión ferrostática, la cual previene una reducción en las dimensiones de la piel solidificada, pero al mismo tiempo esto causa la aparición de tensiones en esta costra solidificada y estas tensiones pueden ser la causa de rupturas en el molde con lo que el metal líquido que permanece en el centro se libera.

Se ha encontrado también en diversas investigaciones que el grosor de la cáscara no es siempre uniforme alrededor del perímetro y a lo largo de la colada. Además el

espesor en las esquinas es menor que entre las esquinas. Es lógico pensar entonces, que las fracturas de tipo longitudinal que se forman en las esquinas están no solo relacionadas con el espesor de la piel, sino que también, con las propiedades plásticas del metal y con los cambios que sufre en sus propiedades mecánicas.

Se ha observado también que la temperatura de la piel entre las esquinas es mayor que la temperatura que presentan estas. Por esta razón, se ve la importancia del enfriamiento secundario después del molde.

Una vez que se ha hecho un breve estudio de la solidificación del acero en una máquina de colado continuo y que se ha observado que en la práctica no es posible considerar el enfriamiento primario independiente del secundario pasamos a considerar con más detalle lo que ocurre únicamente en el molde que es lo relacionado con este estudio.

C).- Transmisión de calor en el molde.

En condiciones aproximadamente estacionarias solo una pequeña parte del contenido calorífico total del material fundido es eliminado en el molde. Sin embargo, la cantidad de calor desprendido debe ser el suficiente para garan

tizar que la palanquilla que sale del molde presente una piel de resistencia adecuada, de forma que pueda resistir la presión interior de la columna de acero líquido y las fricciones mecánicas exteriores. Como se dijo anteriormente, los procesos de solidificación y de agitación dan lugar a diferentes contactos y, por tanto, a unos intercambios diferenciales de calor entre la piel de la palanquilla y la pared refrigeradora del molde. Así se sabe, por ejemplo, que las condiciones de transferencia de calor en la zona superior del molde son excelentes, mientras en la parte inferior del molde dichas condiciones son deficientes. Estas diferencias locales en la transferencia de calor son características del molde de colada continua y son a causa de los procesos de contracción, de calentamiento y demás procesos de deformación que afectan a la capa del material que se encuentra sujeta a fuerzas mecánicas exteriores y por otra parte cada vez más resistente. Solo con un gasto económico considerable podrían estudiarse estas condiciones locales de transferencia de calor.

Sin embargo, es mucho más fácil determinar el

calor eliminado a lo largo de toda la longitud del molde, su-
poniendo una valiosa información tanto de los datos de can-
tidad de calor eliminados en un instante dado, como las que
se refieren a mayores intervalos de tiempo.

En este sentido, resulta apropiado considerar el
rendimiento térmico global. Naturalmente el número de apa-
ratos necesarios aumenta en el caso de querer medir por se-
parado el rendimiento térmico en cada una de las paredes del
molde.

Existe una relación cíclica entre los procesos de
contracción, calentamiento y deformación, ya mencionados y
el desprendimiento del producto de la pared del molde por
la contracción que sufre. El primer desprendimiento surge
debido a la contracción al solidificar el producto, seguido
de la contracción térmica en la piel de la palanquilla, y es-
ta se mantiene en tanto que la resistencia de la piel sea
suficiente para soportar las tensiones que provoca la pre-
sión ferrostática y el rozamiento entre la pared de la pa-
lanquilla y las paredes del molde.

Al formarse el primer desprendimiento disminuye
bruscamente la refrigeración en la zona donde se ha produ-
cido el desprendimiento lo que da lugar a un calentamiento

local en la piel. Pero simultaneamente, disminuye de nuevo la resistencia de la piel, de forma que la creciente presión ferrostática que actua en el interior de la palanquilla logra deformar plasticamente la piel localmente despegada, obligándola de nuevo a adaptarse a la pared del molde.

Entonces comienza de nuevo el ciclo, pero con un periodo más largo; y en efecto, a medida que progresa la solidificación aumenta la resistencia de la piel de la palanquilla, y en consecuencia los procesos que se desarrollan desde el momento del despegue hasta el nuevo contacto resultan más lentos. Esto tiene como consecuencia un empeoramiento en las condiciones de refrigeración en la parte inferior del molde, hecho que se ha podido comprobar mediante distintas mediciones realizadas con termopares empujados en la pared del molde.

Tanto en los procesos de conformación de la piel como en la capacidad de esta piel para resistir las sollicitaciones mecánicas que aparecen durante la solidificación, guarda una estrecha relación con las propiedades mecánicas en caliente del acero. En el caso de que se modifiquen estas propiedades y con ellas el comportamiento de la piel, por ejemplo, durante una colada o bien durante coladas com-

parables, debería de reflejarse el cambio del rendimiento térmico en el molde. Tales observaciones presuponen por otra parte, que las variaciones del rendimiento en el molde que se buscan no son enmascarados por otros factores.

Tenemos entonces que para poder atacar el problema de la predicción de la velocidad de solidificación en el molde de una máquina de vaciado continuo, es necesario tomaren cuenta dos factores importantes: En primer lugar, es necesario conocer que factores físicos controlan la transmisión de calor desde la superficie de la palanquilla, y caracterizarlo mediante ecuaciones; una vez realizado esto el problema matemático debe de ser resuelto.

Desafortunadamente, el proceso que controla la transmisión de calor en el molde de vaciado continuo es muy complejo. Pero es facil de notar, que la resistencia térmica de la pared del molde y la del agua que enfría a este, son pequeñas comparadas con la resistencia térmica entre la superficie externa de la palanquilla y la superficie interna del molde, y que es, entonces, esta resistencia la que controla casi totalmente la transferencia de calor. Es extremadamente difícil el experimentar con los procesos que ocurren en la región en que se encuentran estas superficies

y es más difícil aun, el poder efectuar predicciones teóricas sobre ellas.

Para poder predecir el espesor de la distancia entre la superficie de la palanquilla y la superficie interior del molde, sería necesario resolver las ecuaciones elastoplásticas en condiciones no isotérmicas junto con las ecuaciones de transferencia de calor durante la solidificación. Y esto no solo está más allá de la capacidad del presente trabajo, sino que, existe además poca información disponible sobre las propiedades mecánicas de los metales cerca de su punto de fusión, por otra parte, existe poco conocimiento sobre el comportamiento de los lubricantes a altas temperaturas y solo es posible hacer conjeturas sobre el espesor de la capa lubricante ó sobre la conductividad térmica ó composición de los gases que se forman de la descomposición del lubricante. Por tanto en este trabajo no será posible determinar contribuciones de transferencia de calor relativas a la radiación y a la conducción gaseosa que existen entre la pared interior del molde y la superficie de la palanquilla.

Este panorama se muestra además complicado cuando se trate de resolver las ecuaciones del problema mate-

mático. Los datos para lograr una solución formal, de las ecuaciones involucradas en el fenómeno de solidificación, se pueden obtener solo cuando la temperatura de la superficie exterior de la palanquilla puede ser especificada a través del periodo de solidificación, y esto no es posible en el proceso de colada continua. Además hay que transformar la ecuación de conducción de calor en una ecuación diferencial finita, para que sea resuelta por computación.

Es importante enfatizar que estos métodos son aproximados, y que pueden tener algún error en el frente de solidificación debido a la liberación del calor latente, y este error es muy difícil de evaluar.

Se requiere pues, de una solución más simple que la aproximación anterior, y el problema debe ser tratado en términos de un coeficiente efectivo de transferencia de calor entre la superficie de la palanquilla y la pared del molde. Este método es extremadamente poderoso, así como también las ecuaciones del análisis, las cuales conceden que el coeficiente de transferencia de calor sea determinado de la cantidad de calor que es eliminada del molde por medio del agua de refrigeración, y esta cantidad puede ser medida fácilmente en plantas comerciales o experimentales.

En vista de lo complicado de la naturaleza del proceso de transferencia de calor discutido anteriormente, el uso de un coeficiente de transferencia de calor constante, puede, a primera vista parecer absurdo. Sin embargo en la investigación experimental del rendimiento térmico del molde de colada continua, ha mostrado, que el coeficiente de transmisión de calor no varía grandemente. En sus investigaciones, Krainer y Tarmann (3), encontraron que el coeficiente de transferencia de calor dentro del molde es constante; y, Akimenco y Skvortosov (3), con un molde muy grande, mostraron que el coeficiente es constante en más de la tercera parte del molde y que después cae gradualmente hasta cerca de su valor inicial en la parte superior del molde.

Para el uso y diseño de máquinas de colada continua, el concepto de un coeficiente constante de transferencia de calor, tiene la ventaja de ser sencillo. El efecto de factores tales como: la construcción del molde, la velocidad del agua de enfriamiento, la práctica de lubricación, pueden ser englobadas juntas dentro de un parámetro, con lo que se facilita la comparación entre diferentes moldes y diferentes condiciones de trabajo. Esta ventaja en la simplicidad, solo puede ser válida si, el coeficiente de trans-

ferencia de calor varia lentamente con la velocidad de colada, especialmente si el coeficiente puede ser facilmente determinado de un balance de calor en el molde con la cantidad de calor ganada por el agua. Una vez que se ha hecho esto, el espesor del metal solidificado y la distribución de temperaturas dentro del molde puede ser facilmente determinado.

Esta simple técnica, sin embargo, puede ser usada solamente cuando la conducción de calor a través del metal solidificado en la dirección de arrastre es despreciable en comparación con el transporte de calor radial de la masa de la palanquilla.

Entonces, si consideramos que los gradientes de temperatura en la delgada cascara de metal solidificado que se forma dentro del molde de una máquina de vaciado continuo, son muy grandes en la dirección normal a la cara del molde, comparados con cualquier otra dirección, y si despreciamos la transferencia pequeña debida a la radiación y a la convección, y si hacemos la suposición posterior de que el coeficiente dentro del molde es constante, es posible mostrar un modelo que controla el proceso de solidificación dentro del molde.

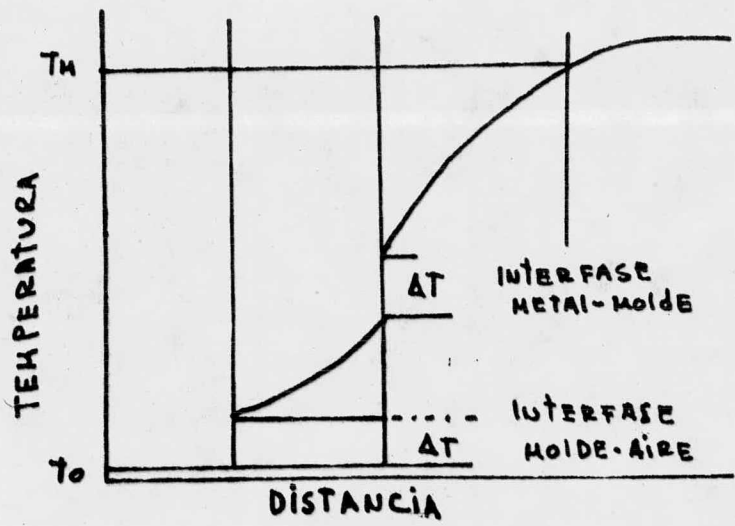
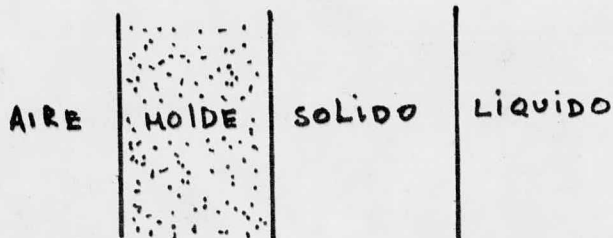


Fig.- 18 Perfil de temperatura en la solidificación de un metal puro.

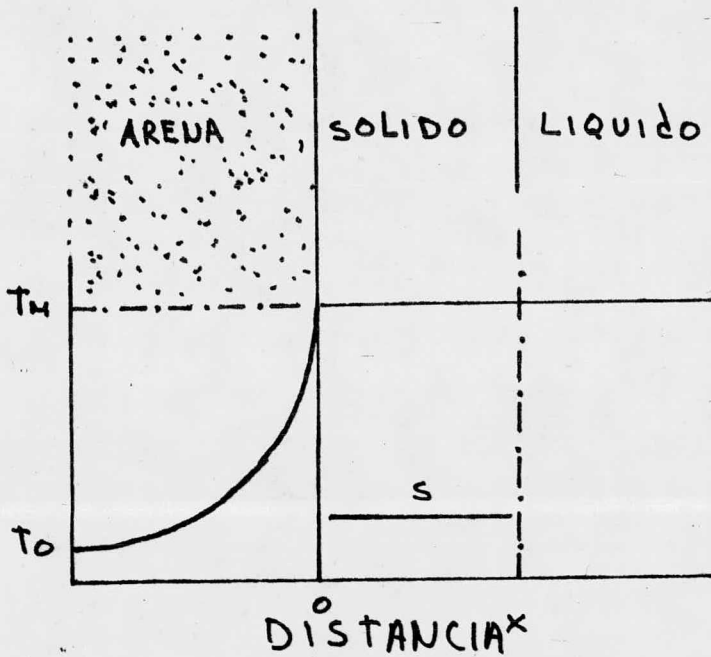


Fig.- 19 Perfil de temperatura aproximado en la solidificación de un metal puro vaciado a su punto de fusión contra la pared de un molde plano.

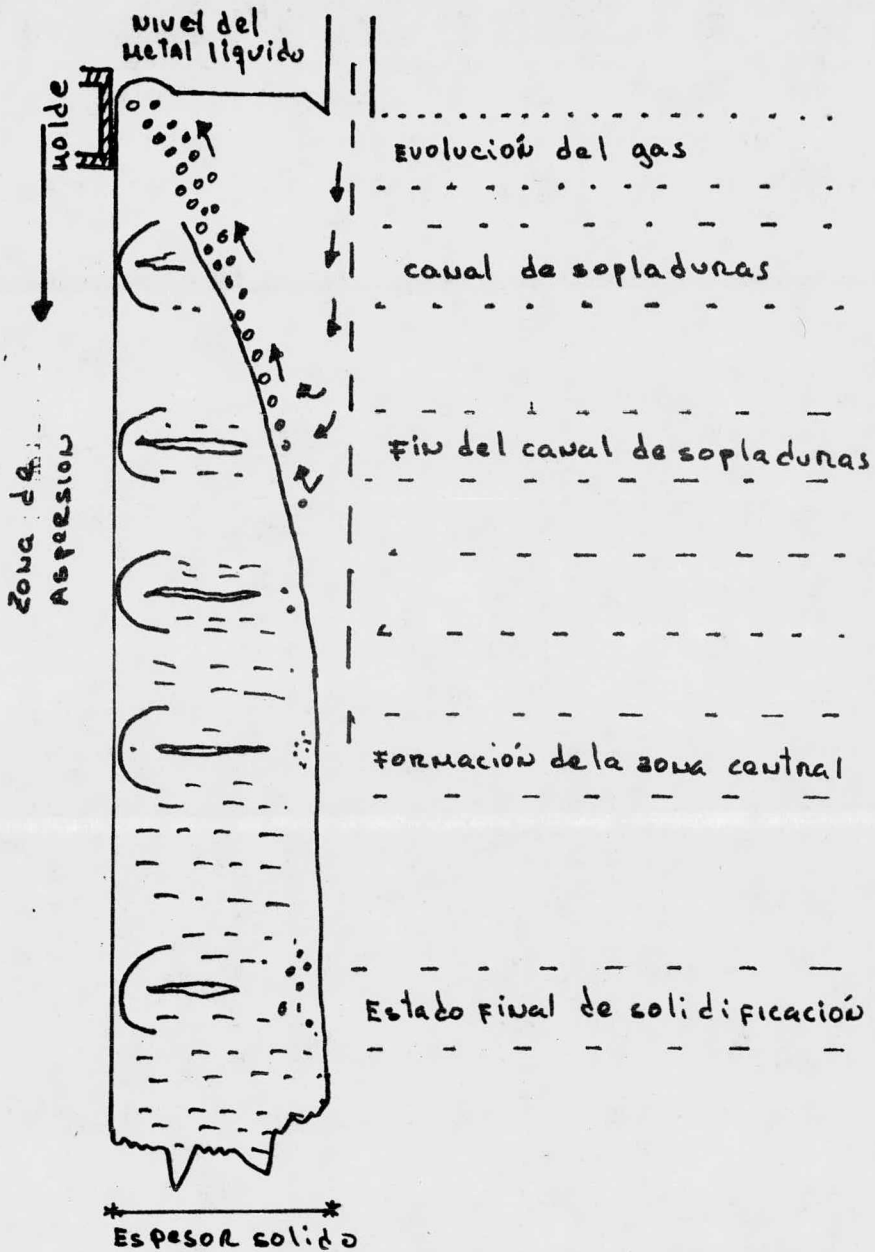


Fig.- 21 Diagrama esquemático mostrando los estados de solidificación en colado continuo.

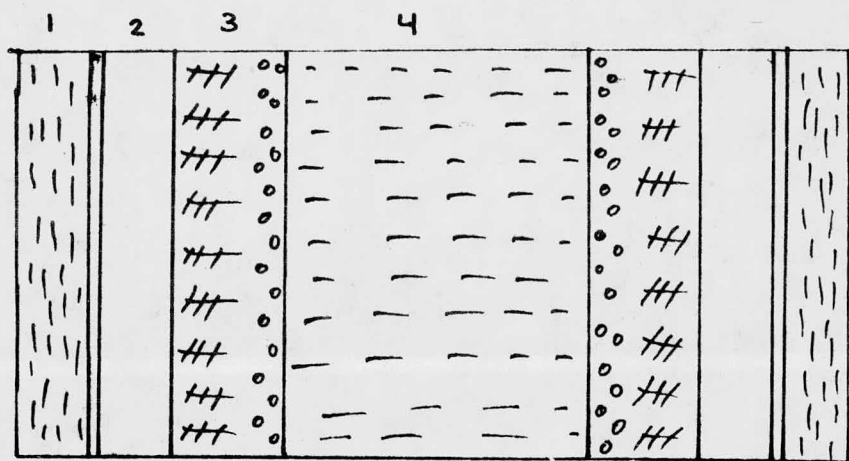


Fig.- 20 En el molde existen tres zonas: Líquido, cristalización y sólido. 1).- Pared del molde, 2).- Metal solidificado completamente, 3).- Metal cristalizando, 4).- Metal líquido.

CAPITULO V

Estudio Práctico.

Una vez que el problema de transferencia de calor en el proceso de colada continua fué analizado tericamente, se pasó a desarrollar un estudio práctico dentro de las condiciones particulares del equipo.

Para poder desarrollar el estudio práctico sobre la transferencia de calor en el molde, en primer lugar, fué preciso el identificar los factores perturbadores del proceso o las diferentes variables que lo afectan, para despues correlacionarlas por medio de ecuaciones matemáticas y obtener resultados que pudieran ser comparados con observaciones hechas en la práctica y con datos directos del área de vaciado continuo en la planta.

Con el fin de poder identificar las variables se efectuó un recorrido en el area de aceración y de vaciado continuo donde por medio de la observación directa y de los registros de los diferentes aparatos medidores se detectaron las diferentes variables llegandose a las siguientes conclusiones:

La temperatura con que es vaciado el acero y que despues pasa por el molde, influye en la transferencia de

calor como era de esperarse. En el caso del presente trabajo esta temperatura se considerará constante para cada uno de los aceros, ya que en el área de aceración se vació durante el transcurso del estudio siempre a la misma temperatura, y generalmente en las plantas comerciales vacían su metal líquido a una temperatura determinada.

- El porcentaje de calor extraído en el molde se modifica sensiblemente al variar la velocidad de colada, en este caso la velocidad de colada se varió desde 2 m/min. a 4m/min para comparar resultados a diferentes velocidades.

- El rendimiento de la transferencia de calor en el molde es una función del paso de calor de la palanquilla al agua de enfriamiento a través de la pared del molde, por lo tanto el flujo de agua se se consideró como un factor perturbador.

- La calidad del agua de refrigeración es muy importante, pues un agua con impurezas puede formar costras en la pared del molde con lo que se retrasa la transmisión de calor.

- La temperatura de entrada del agua de enfriamiento puede tener algún efecto en los resultados, pero

en el trabajo se tomará constante a 20 C que es la temperatura a la que generalmente se encuentra en la planta.

- Entre los factores metalúrgicos que afectan la transferencia de calor en el molde, se encuentra la composición química del acero ya que esta afecta las propiedades térmicas y químicas de la palanquilla y también sus propiedades mecánicas. Se hará consideración de dos de los tipos de aceros mencionados anteriormente.

Una vez identificadas las variables se procedió a efectuar el siguiente estudio.

Hipótesis del modelo matemático.

El modelo matemático que se presenta en este estudio se basa principalmente en el trabajo desarrollado por los científicos rusos K.P. Mairov., N.P. Korotkov., - A.A. Skorotsov., y A.D. Akimenco. (5), ellos tomaron una serie sencilla de ecuaciones y trabajaron en base a un coeficiente constante de transferencia de calor obtenido a partir del calor ganado por el agua de enfriamiento. A continuación se presenta la hipótesis de su modelo.

El modelo matemático debe de ser lo más simple posible, principalmente por la incertidumbre de la hipótesis considerada generalmente para el mecanismo de trans-

ferencia de calor, y también tomando en cuenta que el trabajo se efectuó en una planta comercial, donde se presenta una gran dificultad para calcular los valores de algunos datos físicos con exactitud.

Para lograr tener la base de la hipótesis del modelo matemático se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones.

Refiriendonos a un origen de ejes coordenados dentro de la palanquilla y moviendonos a través de ellos, la transferencia de calor puede ser considerada en una dirección radial, resultando la conducción vertical despreciable si consideramos que el acero tiene una conductividad térmica baja, y esto es aceptado regularmente por la mayoría de los investigadores. Además, se puede verificar en la práctica, que los ejes de las dendritas forman solo un ángulo pequeño con la horizontal. El modelo puede ser desarrollado usando solo dos direcciones o aún considerando una sola dirección.

En el molde el calor es transmitido a la pared del molde desde la superficie de la palanquilla al agua refrigeradora a través de tres resistencias térmicas que son: La interfase palanquilla-pared interior del molde, pared in-

terior del molde-pared exterior del molde, pared exterior del molde-agua refrigeradora. Como se expuso en el capítulo anterior, resulta razonable el usar un coeficiente de transferencia de calor constante para todo el molde.

También haremos consideración de la existencia de dos zonas definidas dentro del molde, una zona de contacto y otra de separación. La longitud de la zona de contacto será determinada por medio de una ecuación calculandose entonces el espesor de la piel solidificada. Cabe decir que ciertos problemas que surgen en la remoción del calor con el agua de enfriamiento no fueron conocidos en este balance, y por tanto, fué hecho sin tomar en cuenta ciertos problemas especiales, y con una hipótesis reconocida por diferentes investigadores para la temperatura de desprendimiento de la palanquilla en la pared del molde.

Después de la selección de la longitud de la zona de contacto en el molde, se determina la zona de separación para darnos el espesor total de la costra sólida en la palanquilla a la salida del molde.

Finalmente se llega a la construcción de unos nomogramas que tratan de relacionarnos todas las variables

del proceso, con lo que se ayudará en la planta a cuantificar con mayor rapidez los resultados de su correlación.

Valores numéricos.

En vista de la dificultad para poder conocer con exactitud el valor de las diferentes variables que intervienen en el proceso, se decidió trabajar por rangos y así combinando todas las posibilidades se logrará tener el valor de cualquier combinación.

Por ejemplo tenemos que el flujo de agua de enfriamiento en la máquina podía variar de 900 L/min a 1500 L/min, la velocidad de vaciado de 2.8 m/min a 4.0 m/min, el rango de calentamiento del agua de enfriamiento a la entrada y salida del molde varía de 7 C a 10 C., etc.

Los resultados que a continuación figuran fueron determinados en investigaciones realizadas para palanquillas cuadradas de 100 centímetros cuadrados de sección para dos tipos de aceros. Un acero del tipo 10-10 al que denominaremos blanco y un acero 10-45 al que denominaremos negro.

Se muestran también las diferentes ecuaciones utilizadas en el trabajo por orden en que se fueron utilizando así como la fuente de donde se obtuvieron.

TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL MOLDE DE VACIADO CONTINUO

FORMULA GENERAL:

$$Q = \alpha_{BM} (T_{SB} - T_{SM1}) \cdot \frac{\lambda_M}{e} (T_{SM1} - T_{SM2}) \cdot \alpha_{Ma} (T_{SM2} - T_a)$$

DONDE:

- Q = Calor
- λ_M = Conductividad térmica del molde
- α_{BM} = Coeficiente de transferencia Billet - Molde
- α_{Ma} = Coeficiente de transferencia Molde - Agua
- T_{SB} = Temperatura de la superficie del billet
- T_{SM1} = Temperatura de la superficie interior del molde
- T_{SM2} = Temperatura de la superficie exterior del molde
- T_a = Temperatura del agua
- e = Espesor del molde

Formula tomada del libro "CONTINUOUS CASTING OF STEEL"

El calor ganado por el agua se considera como el calor que pierde el acero en el molde

$$Q_a = m c_p \Delta T$$

DONDE:

- m = Masa del agua
- c_p = calor específico del agua
- ΔT = Incremento de la temperatura

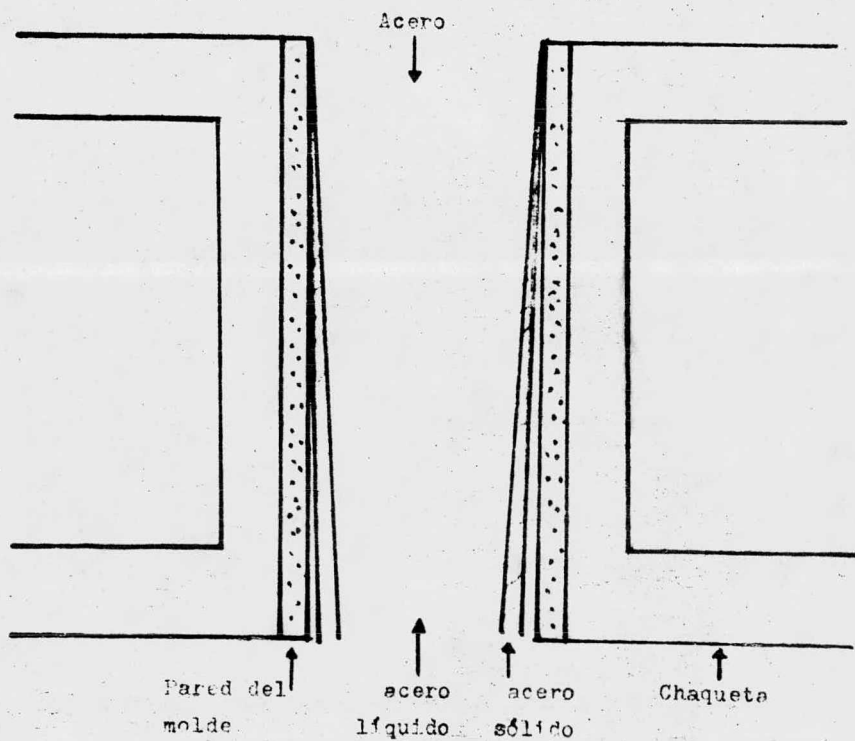
Por falta de datos en la máquina se considera lo siguiente:

Que el incremento en la temperatura del agua a la entrada y salida del molde puede ser:

7 °C, 8 °C, 9 °C, 10 °C.

Que el flujo de agua puede variar entre

800 L/min, 1000 L/min, 1200 L/min, 1500 L/min



El calor del agua varía para los diferentes flujos y diferentes

ΔT de el agua.

MASA	ΔT C°
898 Kg/min	7
998 Kg/min	8
1197 Kg/min	9
1497 Kg/min	10

El flujo de calor se divide entre el area de contacto para dar en:

$$\text{Kcal/m}^2\text{h}$$

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

AGUA

FORMULA:

$$\frac{B (\rho V)^{0.8}}{D^{0.2}}$$

DONDE:

- B = Coeficiente de corrección
- ρ = Peso volumétrico
- D = Diámetro del canal
- V = Velocidad

CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA

TOTAL

$$tot = \frac{1}{\frac{1}{\alpha Ma} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha BM}}$$

CALCULO DEL CALOR DEL ACERO AL ENTRAR AL MOLDE

FORMULA:

$$Q = mHf$$

DONDE:

m = Masa del acero

H = Hentalpia del acero

f = Factor error

* Valor tomado del libro "CONTINUOUS CASTING OF STEEL" para cada tipo de acero.

Masa total = Masa función de la velocidad + Masa del molde

Masa f(velocidad) = Vel. de colada x Sec. de palanq. + Pe

DONDE:

Pe = 7800 Kg/m³

Masa molde = Volumen x Pe

CANTIDAD DE CALOR EXTRIDO AL ACERO EN MOLDE

FORMULA:

% De calor extrido en el molde =

$$\frac{\text{Cantidad de calor extraido en el molde} \times 100}{\text{Contenido de calor del acero al entrar en el molde}}$$

DETERMINACION DE LA ALTURA DE LA ZONA DE CONTACTO

Formula:

$$J = \frac{T \times S \times \gamma \times C_{\text{ret}} \times V}{(T_p - T_a) \times \text{tot}}$$

DONDE;

T = Sobrecalentamiento

S = Mitad del ancho del molde

γ = Gravedad específica del acero

C_{ret} = Capacidad calorífica del acero

V = Velocidad de extracción

T_p = Temperatura del acero

T_a = Temperatura del agua

tot = Coeficiente de transferencia de calor

* Fórmula tomada de la referencia (6)

DETERMINACION DEL ESPESOR DE LA PIEL SOLIDIFICADA

FORMULA:

$$X = \sqrt{K t}$$

DONDE:

- * K = Coeficiente de solidificación
- t = Periodo de tiempo
- X = Espesor de la piel solidificada

* Valor tomado de la referencia (?), para cada tipo de acero.

APENDICE.-

De las páginas 109 a la 117 se muestran los datos obtenidos para el acero blanco.

De las páginas 118 a la 125 se muestran los datos para el acero negro.

De las páginas 126 a 130 se muestran los diferentes nomogramas que se efectuaron para los dos tipos de aceros y que correlacionan a las diferentes variables.

DATOS PARA ACERO BLANCO

Temperatura en el distribuidor a 1540 C
 Temperatura de solidificación a 1521 C

JUNTO DE AGUA	Δ T AGUA	T INT	T EXT	CoF BM	CoF TOT	CALOR
0.9 m ³ /min	7 C°	146 C°	180 C°	950	850	1292190
0.9	8	164	203	1104	972	1476789
0.9	9	182	225	1264	1093	1661388
0.9	10	200	248	1429	1214	1845986
1.0	7	148	186	1061	945	1435767
1.0	8	167	210	1248	1080	1649876
1.0	9	185	234	1413	1214	1845986
1.0	10	203	257	1599	1349	2051096
1.2	7	153	198	1284	1134	1722921
1.2	8	172	224	1496	1295	1969052
1.2	9	191	249	1716	1457	2215183
1.2	10	210	275	1946	1619	2461314
1.5	7	159	216	1626	1417	2153650
1.5	8	179	244	1899	1619	2461314
1.5	9	199	272	2183	1822	2768979
1.5	10	219	300	2481	2024	3076644

CONTENIDO DE CALOR DEL ACERO AL ENTRAR AL MOLDE

VEL. DE COLADA	CALOR
2.8 m/min	5922649 Kcal/h
3.0	6256320
3.2	6589990
3.4	6923674
3.6	7257331
3.8	7591002
4.0	7924672

* Kcal/m²hC

CANTIDAD DE CALOR EXTRAIDO A EL ACERO EN EL MOLDE.

VELOCIDAD DE COLADA	FLUJO	Δ T AGUA	% Q. EXT.	FLUJO	% Q. EXT.
2.8 m/min.	0.9 $\frac{m^3}{min}$	7 C°	6.37	1.0 $\frac{m^3}{min}$	7.07
2.8	0.9 $\frac{m^3}{min}$	8	7.28	1.0 $\frac{m^3}{min}$	8.09
2.8	0.9	9	8.19	1.0	9.10
2.8	0.9	10	9.10	1.0	10.11
3.0	0.9	7	6.03	1.0	6.70
3.0	0.9	8	6.89	1.0	7.65
3.0	0.9	9	7.75	1.0	8.61
3.0	0.9	10	8.61	1.0	9.57
3.2	0.9	7	5.72	1.0	6.36
3.2	0.9	8	6.54	1.0	7.27
3.2	0.9	9	7.36	1.0	8.17
3.2	0.9	10	8.17	1.0	9.08
3.4	0.9	7	5.44	1.0	6.05
3.4	0.9	8	6.22	1.0	6.92
3.4	0.9	9	7.00	1.0	7.78
3.4	0.9	10	7.78	1.0	8.65
3.6	0.9	7	5.19	1.0	5.77
3.6	0.9	8	5.94	1.0	6.60
3.6	0.9	9	6.68	1.0	7.42
3.6	0.9	10	7.42	1.0	8.25
3.8	0.9	7	4.97	1.0	5.52
3.8	0.9	8	5.68	1.0	6.31
3.8	0.9	9	6.39	1.0	7.10
3.8	0.9	10	7.10	1.0	7.88
4.0	0.9	7	4.76	1.0	5.42
4.0	0.9	8	5.44	1.0	6.20
4.0	0.9	9	6.12	1.0	6.97
4.0	0.9	10	6.80	1.0	7.75

VEL. DE COLADA	FLUJO	Δ T AGUA	% Q. EXT	FLUJO	% Q. EXT
2.8 m/min	1.2 m ³ min	7 °C	8.49	1.5 m ³ min	10.61
2.8	1.2	8	9.70	1.5	12.13
2.8	1.2	9	10.92	1.5	13.65
2.8	1.2	10	12.13	1.5	15.16
3.0	1.2	7	8.04	1.5	10.01
3.0	1.2	8	9.19	1.5	11.48
3.0	1.2	9	10.33	1.5	12.92
3.0	1.2	10	11.48	1.5	14.35
3.2	1.2	7	7.63	1.5	9.54
3.2	1.2	8	8.72	1.5	10.90
3.2	1.2	9	9.81	1.5	12.27
3.2	1.2	10	10.90	1.5	13.63
3.4	1.2	7	7.26	1.5	9.08
3.4	1.2	8	8.30	1.5	10.38
3.4	1.2	9	9.34	1.5	11.68
3.4	1.2	10	10.38	1.5	12.97
3.6	1.2	7	6.93	1.5	8.66
3.6	1.2	8	7.92	1.5	9.90
3.6	1.2	9	8.91	1.5	11.14
3.6	1.2	10	9.90	1.5	12.37
3.8	1.2	7	6.62	1.5	8.28
3.8	1.2	8	7.57	1.5	9.46
3.8	1.2	9	8.52	1.5	10.65
3.8	1.2	10	9.46	1.5	11.83
4.0	1.2	7	6.34	1.5	7.93
4.0	1.2	8	7.25	1.5	9.06
4.0	1.2	9	8.16	1.5	10.20
4.0	1.2	10	9.06	1.5	11.33

ALTURAS DE LA ZONA DE CONTACTO

(en Metros)

Δ T c°	Velocidades de colada m/min						
	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
7	0.19036	0.20396	0.21756	0.23115	0.24475	0.25835	0.27195
8	0.16656	0.17846	0.19036	0.20226	0.21416	0.22605	0.23795
9	0.14806	0.15863	0.16921	0.17978	0.19036	0.20094	0.21151
10	0.13325	0.14277	0.15229	0.16181	0.17132	0.18804	0.19036
7	0.17132	0.18356	0.19580	0.20804	0.22028	0.23251	0.24475
8	0.14991	0.16062	0.17132	0.18203	0.19274	0.20345	0.21416
9	0.13325	0.14277	0.15229	0.16181	0.17132	0.18014	0.19036
10	0.11993	0.13337	0.13706	0.14562	0.15419	0.16276	0.17132
7	0.14277	0.15297	0.16317	0.17336	0.18356	0.19376	0.20396
8	0.12492	0.13385	0.14277	0.15169	0.16063	0.16954	0.17846
9	0.11104	0.11897	0.12691	0.13484	0.14277	0.15070	0.15863
10	0.09994	0.10708	0.11421	0.12135	0.12849	0.13563	0.14277
7	0.11421	0.12237	0.13053	0.13869	0.14685	0.15501	0.16317
8	0.09994	0.10708	0.11421	0.12135	0.13849	0.13563	0.14277
9	0.08883	0.09518	0.10152	0.10787	0.11421	0.12056	0.12691
10	0.07995	0.08566	0.09462	0.09708	0.10279	0.10850	0.11921

TIEMPO DE PERMANENCIA EN ZONA DE CONTACTO

EN HORAS

AT		Velocidades de colada m/min						
a	c°	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
7	0.05507	0.05249	0.05012	0.04794	0.04590	0.04401	0.04223	
8	0.05634	0.05382	0.05152	0.04939	0.04742	0.04559	0.04387	
9	0.05731	0.05484	0.05257	0.05049	0.04857	0.04678	0.04511	
10	0.05808	0.05563	0.05341	0.05136	0.04947	0.04771	0.04608	
7	0.05609	0.05356	0.05124	0.04910	0.04712	0.04528	0.04355	
8	0.05722	0.05474	0.05247	0.05038	0.04846	0.04666	0.04499	
9	0.05808	0.05563	0.05341	0.05126	0.04947	0.04710	0.04608	
10	0.05876	0.05610	0.05414	0.05231	0.05026	0.04854	0.04693	
7	0.05759	0.05512	0.05287	0.05080	0.04889	0.04712	0.04546	
8	0.05850	0.05608	0.05387	0.05184	0.04997	0.04823	0.04661	
9	0.05920	0.05681	0.05463	0.05263	0.05079	0.04908	0.04749	
10	0.05976	0.05739	0.05523	0.05325	0.05143	0.04975	0.04818	
7	0.05904	0.05664	0.05446	0.05245	0.05060	0.04886	0.04729	
8	0.05976	0.05739	0.05523	0.05325	0.05143	0.04975	0.04818	
9	0.06031	0.05796	0.05583	0.05387	0.05207	0.05041	0.04886	
10	0.06075	0.05842	0.05615	0.05436	0.05258	0.05093	0.04940	

ESPEJOR DE

LA PIEL SOLIDIFICADA EN LA ZONA DE CONTACTO

QO m ³ /min	ΔT °C	$\sqrt{\text{MIN}}$	$\sqrt{\text{HORAS}}$	HORAS	ESPEJOR EN m.
.9	7	0.067987	0.001133	0.03565	0.00700
.9	8	0.059487	0.000991	0.03148	0.00661
.9	9	0.052879	0.000881	0.02968	0.00632
.9	10	0.047578	0.000793	0.02816	0.00611
.0	7	0.061187	0.001019	0.03193	0.00667
.0	8	0.053537	0.000892	0.02987	0.00627
.0	9	0.047587	0.000793	0.02816	0.00605
.0	10	0.042829	0.000713	0.02671	0.00582
.2	7	0.050987	0.000849	0.02915	0.00612
.2	8	0.044616	0.000743	0.02726	0.00580
.2	9	0.039658	0.000660	0.02570	0.00557
.2	10	0.035691	0.000594	0.02438	0.00538
.5	7	0.040791	0.000679	0.02607	0.00552
.5	8	0.035691	0.000594	0.02438	0.00521
.5	9	0.031725	0.000528	0.02299	0.00503
.5	10	0.028544	0.000475	0.02181	0.00486

DISTANCIA EN
ZONA DE SEPARACION EN METROS

RPM	Δ T C°	VELOCIDAD DE COLADA EN m/min						
		2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
9	7	0.5096	0.4960	0.4824	0.4688	0.4525	0.4416	0.4280
9	8	0.5334	0.5215	0.5096	0.4977	0.4858	0.4739	0.4620
9	9	0.5519	0.5413	0.5307	0.5202	0.5096	0.4990	0.4884
9	10	0.5667	0.5572	0.5477	0.5381	0.5286	0.5191	0.5096
0	7	0.5286	0.5166	0.5042	0.4919	0.4797	0.4674	0.4552
0	8	0.5500	0.5393	0.5286	0.5179	0.5072	0.4965	0.4858
0	9	0.5667	0.5572	0.5477	0.5381	0.5286	0.5101	0.5096
0	10	0.5800	0.5666	0.5629	0.5583	0.5458	0.5372	0.5286
2	7	0.5572	0.5470	0.5368	0.5266	0.5164	0.5062	0.4960
2	8	0.5750	0.5661	0.5572	0.5483	0.5393	0.5304	0.5215
2	9	0.5889	0.5810	0.5730	0.5651	0.5572	0.5493	0.5413
2	10	0.6000	0.5929	0.5857	0.5786	0.5715	0.5643	0.5572
5	7	0.5857	0.5776	0.5694	0.5613	0.5531	0.5449	0.5386
5	8	0.6000	0.5929	0.5857	0.5786	0.5715	0.5643	0.5572
5	9	0.6111	0.6048	0.5984	0.5921	0.5857	0.5794	0.5730
5	10	0.6200	0.6143	0.6053	0.6029	0.5972	0.5915	0.5857

PIEL SOLIDIFICADA EN ZONA DE SEPARACION

EN METROS

		Velocidades de coleda en m/min						
ΔT		2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
C°								
7		0.00578	0.00551	0.00526	0.00503	0.00481	0.00462	0.00443
8		0.00614	0.00586	0.00561	0.00538	0.00516	0.00496	0.00478
9		0.00670	0.00641	0.00615	0.00590	0.00568	0.00547	0.00527
10		0.00749	0.00717	0.00688	0.00662	0.00638	0.00615	0.00594
7		0.00600	0.00573	0.00548	0.00525	0.00504	0.00484	0.00465
8		0.00623	0.00596	0.00571	0.00549	0.00528	0.00508	0.00490
9		0.00737	0.00706	0.00678	0.00652	0.00628	0.00605	0.00585
10		0.00781	0.00746	0.00720	0.00695	0.00668	0.00645	0.00624
7		0.00627	0.00600	0.00576	0.00553	0.00533	0.00513	0.00495
8		0.00684	0.00656	0.00630	0.00606	0.00584	0.00564	0.00543
9		0.00763	0.00732	0.00704	0.00678	0.00655	0.00633	0.00612
10		0.00842	0.00809	0.00778	0.00750	0.00725	0.00701	0.00679
7		0.00678	0.00651	0.00626	0.00603	0.00581	0.00561	0.00543
8		0.00747	0.00717	0.00690	0.00665	0.00642	0.00621	0.00602
9		0.00826	0.00794	0.00764	0.00738	0.00712	0.00709	0.00669
10		0.00880	0.00847	0.00814	0.00788	0.00762	0.00738	0.00716

ESPESOR TOTAL DE CAPA SCLINIFICADA A LA SALIDA DEL

MOLLE EN METROS

ΔT	Velocidades de colada m/min							
	C°	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
7	0.01278	0.01251	0.01226	0.01203	0.01181	0.01162	0.01143	
8	0.01275	0.01247	0.01228	0.01199	0.01177	0.01157	0.01139	
9	0.01302	0.01273	0.01287	0.01222	0.01200	0.01179	0.01159	
10	0.01300	0.01328	0.01299	0.01273	0.01299	0.01226	0.01205	
7	0.01267	0.01240	0.01215	0.01192	0.01171	0.01151	0.01132	
8	0.01250	0.01223	0.01198	0.01176	0.01155	0.01135	0.01117	
9	0.01342	0.01311	0.01283	0.01257	0.01233	0.01210	0.01190	
10	0.01353	0.01328	0.01302	0.01277	0.01250	0.01227	0.01206	
7	0.01239	0.01212	0.01182	0.01165	0.01145	0.01125	0.01107	
8	0.01264	0.01236	0.01210	0.01186	0.01164	0.01144	0.01123	
9	0.01320	0.01289	0.01261	0.01235	0.01212	0.01190	0.01169	
10	0.01380	0.01347	0.01315	0.01288	0.01263	0.01239	0.01217	
7	0.01230	0.01230	0.01178	0.01155	0.01133	0.01113	0.01095	
8	0.01268	0.01238	0.01211	0.01166	0.01163	0.01142	0.01123	
9	0.01329	0.01297	0.01267	0.01241	0.01215	0.01193	0.01172	
10	0.01366	0.01333	0.01300	0.01274	0.01248	0.01224	0.01202	

DATOS PARA ACERO NEGRO

Temperatura en el distribuidor = 1505 C°

Temperatura de solidificación = 1485 C°

CAUDAL DE AGUA	ΔT AGUA	T INT	T EXT	Cof BM *	Cof TOT *	CALOR *
9 m ³ /min	7 C°	146 C°	180 C°	975	870	1291190
9	8	164	203	1134	994	1476789
9	9	182	225	1298	1119	1661387
9	10	200	248	1409	1243	1845986
0	7	148	186	1089	967	1435767
0	8	167	210	1267	1105	1640876
0	9	185	234	1452	1243	1845986
0	10	203	257	1644	1381	2051096
2	7	153	198	1319	1160	1722920
2	8	172	224	1537	1326	1969052
2	9	191	249	1764	1492	2215183
2	10	210	275	2001	1657	2461314
5	7	159	216	1671	1450	2153650
5	8	179	244	1952	1657	2461315
5	9	199	272	2245	1865	2768979
5	10	219	300	2553	2072	3076643

CONTENIDO DE CALOR DEL ACERO AL ENTRAR EN EL MOLDE

VEL. DE COLADA	CALOR
2.8 m/min	5773720 Kcal/h
3.0	6099000
3.2	6424280
3.4	6749560
3.6	7074840
3.8	7400120
4.0	7725400

Kcal/m²h C

CANTIDAD DE CALOR EXTRAIDO A EL AGRO EN EL SOLERA

EL. DE COLADA	FLUJO	ΔT AGUA	% Q. EXT	FLUJO	% Q. EXT
2.8 m/min	0.9 m ³ /min	7 C°	6.53	1.0 m ³ /min	7.26
2.8	0.9	8	7.47	1.0	8.30
2.8	0.9	9	8.40	1.0	9.33
2.8	0.9	10	9.33	1.0	10.37
3.0	0.9	7	6.18	1.0	6.87
3.0	0.9	8	7.07	1.0	7.85
3.0	0.9	9	7.95	1.0	8.83
3.0	0.9	10	8.83	1.0	9.82
3.2	0.9	7	5.87	1.0	6.52
3.2	0.9	8	6.76	1.0	7.46
3.2	0.9	9	7.55	1.0	8.39
3.2	0.9	10	8.39	1.0	9.32
3.4	0.9	7	5.59	1.0	6.21
3.4	0.9	8	6.39	1.0	7.09
3.4	0.9	9	7.19	1.0	7.98
3.4	0.9	10	7.98	1.0	8.87
3.6	0.9	7	5.35	1.0	5.93
3.6	0.9	8	6.15	1.0	6.77
3.6	0.9	9	6.86	1.0	7.62
3.6	0.9	10	7.62	1.0	8.47
3.8	0.9	7	5.10	1.0	5.67
3.8	0.9	8	5.83	1.0	6.47
3.8	0.9	9	6.56	1.0	7.28
3.8	0.9	10	7.28	1.0	8.09
4.0	0.9	7	4.88	1.0	5.43
4.0	0.9	8	5.60	1.0	6.20
4.0	0.9	9	6.28	1.0	6.98
4.0	0.9	10	6.98	1.0	7.75

CANTIDAD DE CAJOR EXTRAIDO AL AGUJO EN EL MOLDE

VEL. DE COLADA	FLUJO	ΔT AGUA	% Q. EXT	FLUJO	% Q. EXT
2.8 m/min	1.2 m ³ /min	7 C°	8.71	1.5 m ³ /min	10.28
2.8	1.2	8	9.96	1.5	12.44
2.8	1.2	9	11.20	1.5	14.00
2.8	1.2	10	12.44	1.5	15.66
3.0	1.2	7	8.24	1.5	10.31
3.0	1.2	8	9.43	1.5	11.78
3.0	1.2	9	10.60	1.5	13.26
3.0	1.2	10	11.78	1.5	14.72
3.2	1.2	7	7.83	1.5	9.79
3.2	1.2	8	8.95	1.5	11.19
3.2	1.2	9	10.07	1.5	12.59
3.2	1.2	10	11.19	1.5	13.98
3.4	1.2	7	7.45	1.5	9.31
3.4	1.2	8	8.52	1.5	10.64
3.4	1.2	9	9.58	1.5	11.98
3.4	1.2	10	10.64	1.5	13.31
3.6	1.2	7	7.11	1.5	8.88
3.6	1.2	8	8.12	1.5	10.15
3.6	1.2	9	9.14	1.5	11.43
3.6	1.2	10	10.15	1.5	12.69
3.8	1.2	7	6.79	1.5	8.49
3.8	1.2	8	7.77	1.5	9.71
3.8	1.2	9	8.74	1.5	10.93
3.8	1.2	10	9.71	1.5	12.14
4.0	1.2	7	6.31	1.5	8.14
4.0	1.2	8	7.44	1.5	9.30
4.0	1.2	9	8.37	1.5	10.47
4.0	1.2	10	9.30	1.5	11.62

ALTURAS DE LA ZONA DE CONTACTO EN METROS

in	ΔT c°	Velocidades de colada m/min						
		2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
9	7	0.20038	0.21469	0.22896	0.24332	0.25763	0.27195	0.28626
9	8	0.17533	0.18786	0.20034	0.21290	0.22543	0.23795	0.26402
9	9	0.15585	0.16698	0.17808	0.18925	0.20038	0.21151	0.23468
9	10	0.14026	0.15028	0.16027	0.17032	0.18034	0.19036	0.21121
9	7	0.18034	0.19322	0.20607	0.21899	0.23187	0.24475	0.27156
9	8	0.15780	0.16907	0.19031	0.19161	0.20288	0.21416	0.23762
9	9	0.14026	0.15028	0.16027	0.17032	0.18034	0.19036	0.21121
9	10	0.12624	0.13525	0.14425	0.15329	0.16231	0.17132	0.19019
9	7	0.15028	0.16102	0.17172	0.18249	0.19332	0.20396	0.22630
9	8	0.13150	0.14089	0.15026	0.15968	0.16907	0.17846	0.19801
9	9	0.11689	0.12524	0.13356	0.14193	0.15028	0.15863	0.17601
9	10	0.10520	0.11271	0.12020	0.12774	0.13525	0.14277	0.15841
9	7	0.12023	0.12881	0.13738	0.14599	0.15458	0.16317	0.18104
9	8	0.10520	0.11271	0.12020	0.12774	0.13625	0.14277	0.15841
9	9	0.09351	0.10019	0.10685	0.11355	0.12023	0.12691	0.14081
9	10	0.08416	0.09017	0.09616	0.10219	0.10820	0.11421	0.12673

PIEL SOLIDIFICADA EN ZONA DE CONTACTO

EN METROS

FLUJO	ΔT	MIN	HORAS	HORAS	ESPESOR
$^3/\text{min}$	$^{\circ}$				METROS
0.9	7	0.07156	0.001192	0.03453	0.00718
0.9	8	0.06261	0.001043	0.03220	0.00678
0.9	9	0.05565	0.000927	0.03045	0.00648
0.9	10	0.05009	0.000834	0.02889	0.00626
1.0	7	0.06440	0.001073	0.03274	0.00684
1.0	8	0.05635	0.000939	0.03064	0.00643
1.0	9	0.05009	0.000834	0.02889	0.00621
1.0	10	0.04508	0.000751	0.02741	0.00597
1.2	7	0.05367	0.000894	0.02990	0.00627
1.2	8	0.04696	0.000782	0.02797	0.00595
1.2	9	0.04174	0.000695	0.02637	0.00572
1.2	10	0.03757	0.000626	0.02502	0.00552
1.5	7	0.04293	0.000715	0.02674	0.00566
1.5	8	0.03757	0.000626	0.02502	0.00535
1.5	9	0.03369	0.000556	0.02359	0.00516
1.5	10	0.03005	0.000500	0.02237	0.00498

DISTANCIA EN LA ZONA DE SEPARACION EN
METROS

UJO	AT	Velocidades de colada m/min						
°/min	C°	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
0.9	7	0.4996	0.4853	0.4712	0.4566	0.4423	0.4280	0.4137
0.9	8	0.5246	0.5112	0.4999	0.4871	0.4745	0.4620	0.4359
0.9	9	0.5441	0.5330	0.5219	0.5107	0.4996	0.4884	0.4653
0.9	10	0.5597	0.5499	0.5397	0.5396	0.5196	0.5096	0.4887
1.0	7	0.5196	0.5067	0.4939	0.4810	0.4681	0.4552	0.4284
1.0	8	0.5422	0.5309	0.5196	0.5083	0.4971	0.4858	0.4623
1.0	9	0.5597	0.5499	0.5397	0.5296	0.5196	0.5096	0.4887
1.0	10	0.5737	0.5657	0.5557	0.5467	0.5376	0.5286	0.5099
1.2	7	0.5497	0.5389	0.5282	0.5175	0.5066	0.4960	0.4837
1.2	8	0.5685	0.5591	0.5497	0.5403	0.5309	0.5215	0.5019
1.2	9	0.5831	0.5747	0.5664	0.5580	0.5497	0.5413	0.5239
1.2	10	0.5948	0.5872	0.5798	0.5722	0.5647	0.5572	0.5425
1.5	7	0.5797	0.5711	0.5626	0.5540	0.5452	0.5368	0.5189
1.5	8	0.5948	0.5872	0.5748	0.5722	0.5647	0.5572	0.5415
1.5	9	0.6064	0.5998	0.5931	0.5864	0.5797	0.5730	0.5591
1.5	10	0.6158	0.6098	0.6038	0.5978	0.5918	0.5857	0.5732

ESPEJOR EN LA ZONA DE ESTIMACION

EN METROS

DT	Velocidades de colada m/min	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	3.0
10	0.00708	0.00734	0.00784	0.00813	0.00843	0.00935	0.00935
9	0.00661	0.00686	0.00734	0.00761	0.00790	0.00823	0.00823
8	0.00592	0.00617	0.00662	0.00686	0.00714	0.00743	0.00743
7	0.00534	0.00557	0.00599	0.00622	0.00647	0.00675	0.00675
10	0.00669	0.00696	0.00746	0.00774	0.00805	0.00838	0.00838
9	0.00602	0.00628	0.00674	0.00700	0.00728	0.00795	0.00795
8	0.00535	0.00559	0.00602	0.00625	0.00652	0.00680	0.00680
7	0.00484	0.00508	0.00548	0.00571	0.00596	0.00623	0.00623
10	0.00612	0.00640	0.00688	0.00715	0.00744	0.00777	0.00777
9	0.00573	0.00600	0.00647	0.00673	0.00701	0.00733	0.00733
8	0.00478	0.00503	0.00544	0.00567	0.00591	0.00619	0.00619
7	0.00452	0.00478	0.00519	0.00542	0.00567	0.00595	0.00595
10	0.00582	0.00609	0.00657	0.00683	0.00712	0.00744	0.00744
9	0.00515	0.00541	0.00585	0.00609	0.00636	0.00665	0.00665
8	0.00464	0.00490	0.00532	0.00556	0.00580	0.00609	0.00609
7	0.00435	0.00454	0.00496	0.00520	0.00545	0.00572	0.00572
DT	4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8

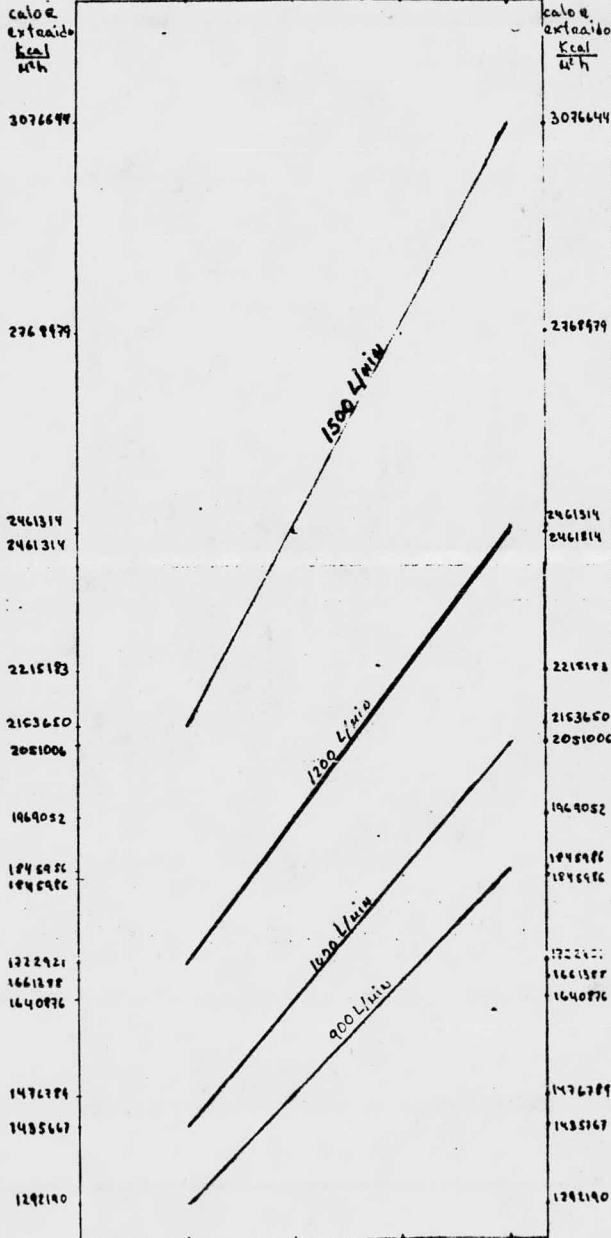
ESPESOR TOTAL DE LA CAPA SOLIDIFICADA A LA SALIDA DEL
MOLDE EN METROS

O	AT	Velocidades de colada en m/min						
	°	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
	7	0.01290	0.01263	0.01238	0.01214	0.01193	0.01172	0.01153
	8	0.01287	0.01258	0.01234	0.01210	0.01188	0.01168	0.01142
	9	0.01313	0.01284	0.01257	0.01233	0.01210	0.01189	0.01163
	10	0.01370	0.01338	0.01309	0.01283	0.01258	0.01235	0.01208
	7	0.01279	0.01251	0.01226	0.01203	0.01182	0.01162	0.01136
	8	0.01262	0.01234	0.01210	0.01187	0.01165	0.01146	0.01121
	9	0.01354	0.01322	0.01294	0.01268	0.01243	0.01221	0.01194
	10	0.01374	0.01341	0.01312	0.01285	0.01260	0.01237	0.01209
	7	0.01250	0.01223	0.01198	0.01175	0.01154	0.01127	0.01111
	8	0.01275	0.01247	0.01220	0.01197	0.01174	0.01154	0.01130
	9	0.01331	0.01300	0.01272	0.01246	0.01222	0.01200	0.01174
	10	0.01390	0.01357	0.01326	0.01298	0.01272	0.01248	0.01221
	7	0.01241	0.01213	0.01188	0.01165	0.01143	0.01123	0.01100
	8	0.01278	0.01249	0.01221	0.01197	0.01174	0.01152	0.01128
	9	0.01358	0.01325	0.01296	0.01269	0.01244	0.01221	0.01196
	10	0.01433	0.01341	0.01311	0.01282	0.01256	0.01232	0.01206

Acero Blanco

dt del agua en °C

7 8 9 10



dt del agua en °C

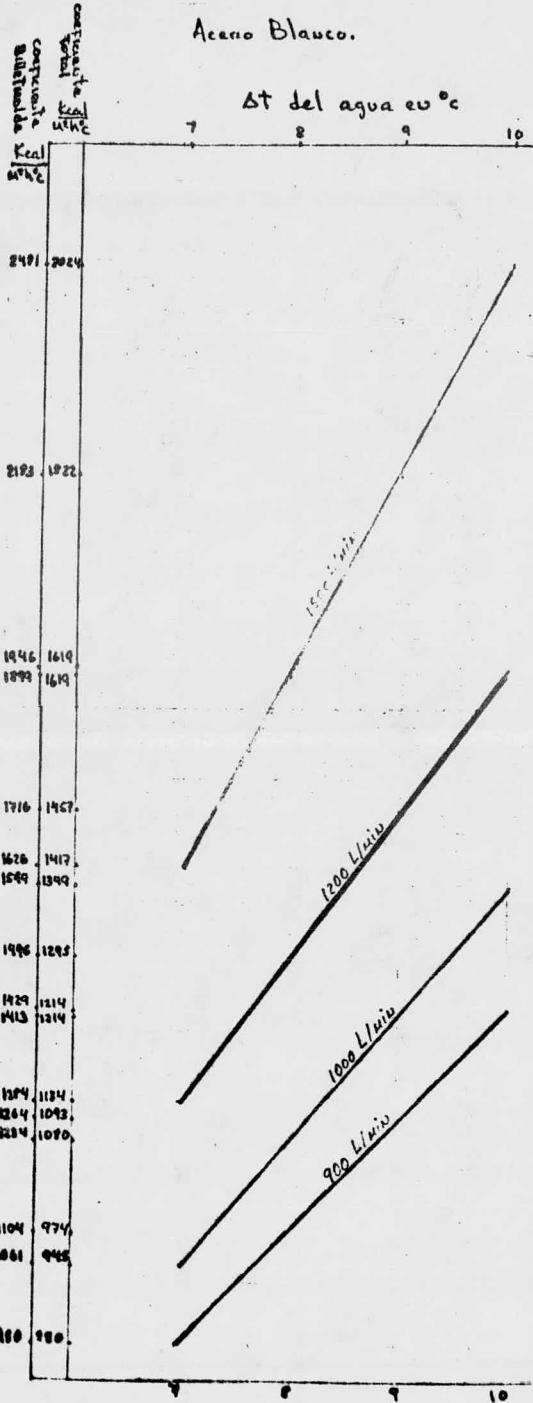
Esposura de la piel solidificada a la salida del molde en mm.
a diferentes velocidades en L/min

	2.9	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
1500 L/min	14	13	13	13	12	12	12
1200 L/min	13	13	13	12	12	12	12
1000 L/min	14	13	13	13	13	12	12
800 L/min	13	12	12	12	12	11	11
700 L/min	13	13	13	12	12	12	12
600 L/min	13	12	12	12	12	11	11
500 L/min	14	13	13	13	12	12	12
400 L/min	13	13	13	13	12	12	12
300 L/min	12	12	12	12	11	11	11
200 L/min	13	13	13	12	12	12	12
150 L/min	13	12	12	12	12	11	11
100 L/min	13	12	12	12	12	12	11
50 L/min	13	13	12	12	12	12	11

José Alfredo Durán Viquez 27/11/76

Acero Blanco.

Δt del agua en $^{\circ}C$



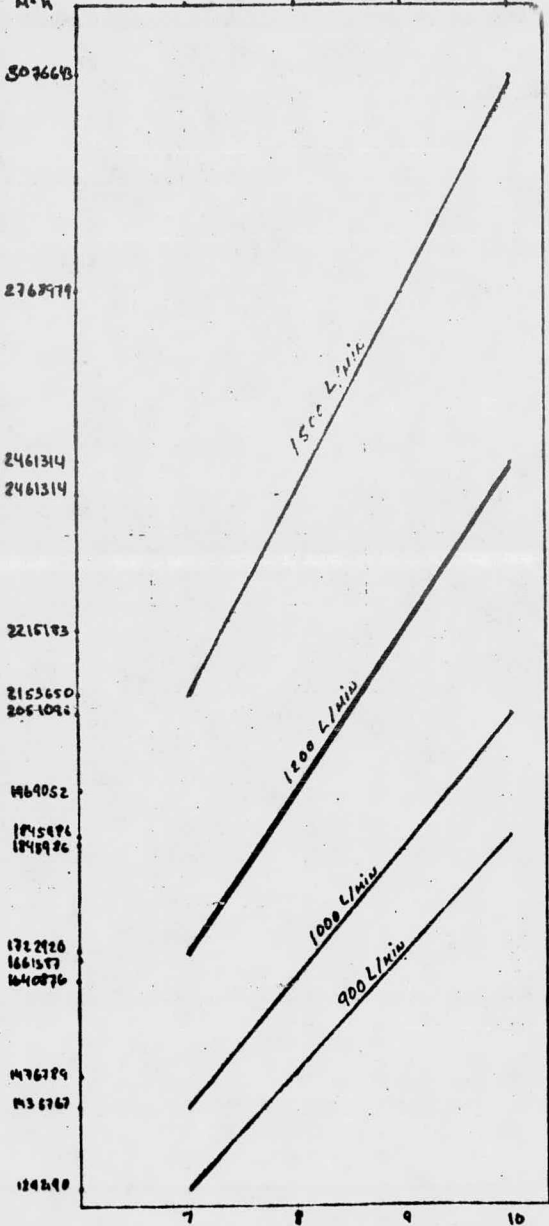
Ala izquierda en números chicos espesor de la piel solidificada a la salida del molde en milímetros. Ala derecha con números grandes % de calor extraído en el molde.

Kcal/m²h	Diferentes velocidades en L/min							
	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	
3076644	14-15	13-14	13-14	13-13	12-12	12-12	12-11	
2769079	13-14	13-13	13-12	12-12	12-11	12-11	12-10	
2461315	14-12	13-11	13-11	12-10	12-10	12-9	12-9	
2461315	13-12	12-11	12-11	12-10	12-10	11-9	11-9	
2215183	13-11	13-10	13-10	12-9	12-9	12-9	12-8	
2153650	12-11	12-10	12-10	12-9	11-9	11-8	11-8	
2051096	13-10	13-10	13-9	12-9	13-8	12-8	12-7	
1969052	13-10	12-9	12-9	12-8	12-8	11-8	11-7	
1845986	13-9	13-9	13-8	13-8	12-7	12-7	12-7	
1845986	13-9	13-9	13-8	13-8	12-7	12-7	12-7	
1722401	12-8	12-8	12-8	12-7	11-7	11-7	11-6	
1661308	13-8	13-8	13-7	12-7	12-7	12-6	12-6	
1640976	12-8	12-8	12-7	12-7	12-7	11-6	11-6	
1486889	13-7	12-7	12-7	12-6	12-6	12-6	11-5	
1436887	13-7	12-7	12-6	12-6	12-6	12-6	11-5	
1293140	13-6	11-6	12-6	12-5	12-5	12-5	12-5	

Acero Negro

ΔT del agua en $^{\circ}C$

7 8 9 10



Expansi6n de la piel solidificada a la salida del molde en milimetros para diferentes velocidades en L/min.

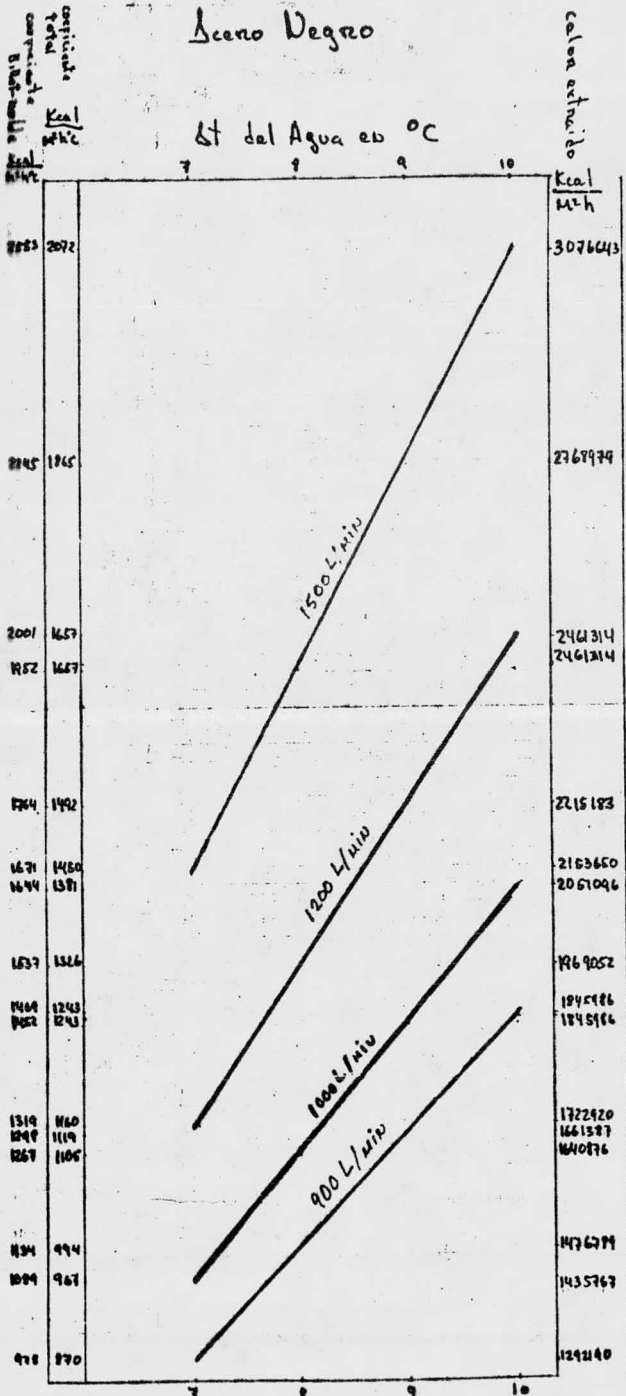
2.8 3.0 3.2 3.4 3.6 3.8 4.0

	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
14	14	13	13	13	12	12	
14	13	13	13	12	12	12	
14	14	13	13	13	13	12	
13	13	12	12	12	12	11	
13	13	13	12	12	12	12	
13	12	12	12	12	11	11	
14	13	13	13	13	12	12	
14	13	13	13	12	12	12	
13	12	12	12	12	11	11	
13	12	13	12	12	12	12	
13	12	12	12	12	12	11	
13	13	12	12	12	12	11	
13	13	12	12	12	12	11	
13	13	12	12	12	12	11	

Jorge Alfredo Duarte Núñez 23/10/76.

Sceno Negro

lit del Agua en °C



A la izquierda en buenos chicos
esperon de la piel solidificada a la salida
del molde en milimetros. A la derecha
en buenos grandes % de calor extraido
a la salida de diferentes vel. en M/min

2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
14-15	14-15	13-14	13-13	13-13	12-12	12-12
14-14	13-13	13-13	13-12	12-11	12-11	12-10
14-12	14-12	13-11	13-10	13-10	13-10	12-9
13-12	13-12	12-11	12-11	12-10	12-10	11-9
13-11	13-11	13-10	12-10	12-9	12-9	12-8
13-11	12-10	12-10	12-9	12-9	11-8	11-8
14-10	13-10	13-9	13-9	13-8	12-8	12-8
13-10	12-9	12-9	12-9	12-8	12-8	11-7
14-9	13-8	13-8	13-8	13-8	12-7	12-7
14-9	13-9	13-8	13-8	12-8	12-7	12-7
13-9	12-8	12-8	12-7	12-7	11-7	11-7
13-8	13-8	12-7	12-7	12-7	12-7	12-6
12-8	12-8	12-7	12-7	12-7	12-6	11-6
13-7	13-7	12-7	12-6	12-6	12-6	11-6
13-7	13-7	12-7	12-6	12-6	12-6	11-5
13-7	13-6	12-6	12-6	12-5	12-5	11-5

Jose Alfredo Duarte Viquez 27/10/76

CAPITULO VI

Análisis de resultados y recomendaciones.

En el estudio realizado sobre la transferencia de calor en el molde de una máquina de colado continuo, se pudo observar la relación que existe entre las diferentes variables y la forma en que estas afectan al proceso.

De acuerdo a esto, se crearon los diferentes nomogramas, con los que se pretende desarrollar prácticas de colado para los diferentes tipos de aceros, a las velocidades de vaciado requeridas dentro de las limitaciones del equipo. El fin de crear estas prácticas de vaciado, que correlacionan las variables, y nos dan un espesor de cascara solidificada constante a la salida del molde, es el de poder usar la computadora para este fin. Es decir, se busca adaptar las prácticas de colado a la computadora, la que se encargaría de ajustarnos las variables.

Por ejemplo, en una línea de una de las máquinas se efectuaron medidas en 20 coladas para diferentes condiciones del equipo y de trabajo y a diferentes horas del día y se encontró que la máquina estaba operando en los siguientes rangos:

- 1.- El flujo de agua varía entre los 1000 L/min

a 1200 L/min.

El incremento de temperatura del agua de enfriamiento es de 9 °C a 10 °C.

Velocidad de extracción de 2.8 m/min a 3.2 m/min.

2.- La máquina se encuentra trabajando en un rango de flujo y de incremento de temperatura conveniente de acuerdo al estudio realizado.

3.- De acuerdo con los nomogramas para acero negro, si logramos conservarnos dentro de estos rangos podríamos aumentar la velocidad de colado a 3.6 m/min a 3.8 m/min.

Este ejemplo nos muestra como la computadora nos permitiría ajustar todas las variables implicadas en el estudio, regulando todos los factores perturbadores que estas implican.

Todos los datos que fueron conseguidos en el estudio fueron verificados en la práctica, incluyendo los espesores de la piel solidificada a la salida del molde calculados, desafortunadamente para poder comprobar el grosor de la piel no se cuenta con métodos que no sean destructivos por lo que se consiguieron pocas muestras de estos valores, pero cabe decir que en todas las que se lograron tomar, los valores medidos coincidieron con los datos obtenidos en el estudio.

En los párrafos siguientes se analizará la influencia de las diferentes variables del proceso sobre el rendimiento térmico del molde.

La temperatura del acero influye sobre el balance térmico del molde; las temperaturas elevadas de sobrecalentamiento tienen como consecuencia elevadas temperaturas en la superficie de contacto y, ante todo, velocidades de solidificación más lentas y espesores más delgados en la costra solidificada.

Por estas y otras razones relacionadas con la cinética de reacción en la solidificación, en general se han impuesto temperaturas de coladas constantes y lo más bajas posibles.

Las condiciones para conseguir un control de temperatura de este tipo son mucho más favorables en el caso de cargas grandes, que en el de cargas pequeñas por que la mayor parte de las veces se remueve el baño con gas para homogeneizar la temperatura. Si bien el control de temperatura de las cargas grandes, como en el caso de colada continua de desbastes planos de gran anchura, pueden dominarse mejor, no dejan de presentarse casos aquí también, de cargas coladas a temperaturas superiores en 20 o más grados

centrifugados arriba del valor deseado, y en tales casos la temperatura del acero constituye un factor perturbador en la medida del rendimiento térmico.

Al efectuarse una variación en la velocidad de colada, se modifica la cantidad de calor que se extrae del molde, la cantidad de calor que se elimina del molde depende de su forma. Así se ha notado que en el caso de coladas de planchones, estos son colados más lentamente que las palanquillas, lo que es traducido en un rendimiento térmico específico menor (cantidad de calor eliminado por metro cuadrado de superficie de molde y por hora) del molde.

En el caso en que se piense en una optimización de la velocidad de colada en función de una determinada calidad superficial, se ofrece la medida de la transferencia de calor como una posibilidad de formular matemáticamente las relaciones, entre composición del acero, velocidad de colada, rendimiento térmico del molde y calidad superficial deseada en la palanquilla.

El mantener el nivel de acero en el molde constante, es importante, pues la variación de este origina una modificación en la superficie de trabajo del molde y

con ello la transferencia de calor. Para un aprovechamiento óptimo en el balance térmico, se recomienda como indispensable una regulación automática del grado de llenado mediante el uso de un tapón graduable instalado en el distribuidor. Una regulación de este tipo no solo sirve para mantener constante el grado de llenado el molde, sino que estabiliza además la velocidad de salida, eliminando la influencia del operario en estos dos importantes factores del proceso.

El rendimiento térmico del molde viene condicionado ante todo por la transmisión del calor de la palanquilla a el molde; el paso del calor a través de la pared del molde y de la pared al agua de refrigeración juegan un papel secundario. Sin embargo es oportuno considerar en que forma pueden modificar el rendimiento global las variaciones de enfriamiento por agua.

La experiencia muestra que el flujo de agua es inversamente proporcional a la diferencia de temperatura a la entrada y salida del molde, por lo tanto una variación en el flujo de agua dentro de los límites normales no tendrá ningún efecto apreciable sobre el rendimiento térmico del molde. Esto es, si el agua de enfriamiento sufre un

aumento o disminución lento de caudal la transmisión de calor no se altera. Una variación en el flujo de agua parece entonces no influir en la transmisión de calor pero si la relacionamos con otros factores del proceso nos puede dar su óptimo.

La calidad del agua de refrigeración es importante ya que incrustaciones de sales en la pared del molde originan una mala transmisión de calor. La medida del rendimiento térmico puede dar pruebas de su gran utilidad para la vigilancia de las condiciones de la pared del molde.

El estudio mostró que la temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del molde puede variar entre los 40 C y los 10 C, pero por cuestiones de control es conveniente mantenerla constante.

Entre los factores metalúrgicos que controlan la transferencia de calor en el molde, se encuentra la composición química del acero, ya que como sabemos refleja cambios en las propiedades mecánicas en caliente de la piel de la palanquilla en formación, y con ello en las condiciones de contacto entre la piel de la palanquilla y la pared del molde. Para poder investigar este aspecto sería necesario el mantener constantes las variables perturbadoras

del proceso como, la temperatura del acero, el grado de llenado del molde, la velocidad de colada etc., limitando así la investigación a distintas calidades de aceros.

Se presenta pues como una necesidad la medición de la transferencia de calor en el molde de la máquina de colado continuo, que abarca una serie de parámetros del proceso, y que ofrece interesantes posibilidades de obtener información para el estudio y la optimización del proceso.

Facilita también llegar a la formación de prácticas de vaciado las que una vez incorporadas a la computadora, nos permite detectar anomalías que puedan presentarse en el transcurso de la colada en el molde como pueden ser: perforaciones, grietas, pared del molde delgada, incrustaciones de sal en la pared del molde, etc., y así el poder evitar estos percances.

Se hace evidente que después de plantear los fenómenos físicos que se forman al correlacionar las diferentes variables que influyen en la transferencia de calor en el molde de colada continua y teniendo a la mano los diferentes datos que esta correlación mostró, sería oportuno el evaluar los resultados usando teorías más refinadas y

complejas, como es el caso del estado discontinuo de transferencia de calor.

Se ve por lo tanto, que el presente trabajo proporciona datos y bases firmes para poder realizar un estudio posterior en forma más detallada y específica, y también el poder continuar el estudio a la zona secundaria de enfriamiento y así lograr que el proceso de colada continua siga en continuo avance dentro de la industria siderúrgica en México.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Dr. Jobst - Thomas Wasmuth.
Situación Actual y Perspectiva de la Colada continua.
Instituto Latinoamericano del Hierro y del Acero.
Memoria del Seminario Latinoamericano.
Octubre de 1972.
- 2.- Emilio Menzel, Eduardo Andres Guida y Roberto Villanueva.
Puesta en Marcha de una Máquina de Colado Continuo.
Instituto Latinoamericano del Hierro y del Acero
Memoria del Seminario Latinoamericano
Octubre de 1972
- 3.- José Gabriel de Leon Roa.
Transferencia de Calor en el Proceso de Colada Continua
del Acero
Curso Panamericano de Metalurgia.
México D.F. 1975.
- 4.- Osamu Saheki.
Experiencias en la Fabricación y Operación de Unidades
de Colada Continua en Japón.
XII Congreso Latinoamericano de Siderurgia
Brasil 1972.

- 5.- K.P. Korotkov, N.P. Mairov, A.A. Skvortsov y A.P. Akimenko.
The Continuous Casting of Steel in Commercial Use.
Editorial Pergamon Press.
Depto. de Metalúrgia de la Universidad de Sheffield.
- 6.- Alberto Fernandez Lara.
Estudio Sobre los Defectos en Palanquillas Obtenidas por Colada Continua. Sus Efectos y Medidas Preventivas.
Tesis Profesional.
Facultad de Química. UNAM. 1974.
- 7.- L. Boulier.
La Coulee Continue de L'Acier.
Aide-Mémoire Bibliographique.
Institut de Recherches de la Siderurgie.
- 8.- Ing. Erhard Mehle.
Colado Continuo de Planchones Y Rillat.
Primera Reunión Bienal de la Industria Siderúrgica Mexicana.
Instituto Mexicano del Hierro y del Acero.
- 9.- Grupo Acero HYLISA.
II Mesa de Trabajo de Ingeniería de Servicio Memoria
Cocoyoc Morelos 1973.

10.- R.D. Felke.

Heat Transfer I

Continuous Casting V Lecture Notes

Iron and Steel Society of AIME.

Houston Texas 1975.

11.- J.K. Brimacombe.

Heat Transfer II

Continuous Casting V Lecture Notes

Iron and Steel Society of AIME.

Houston Texas 1975.

12.- G. Namy.

The Continuous Casting of Steel. Part II

Brutcher Translation No. 6416-11

1964.

13.- Ronald Johnson.

Control de Calidad de Productos Colados en Forma

Continua.

Revista Latinoamericana de Metalúrgia No 187.

Noviembre de 1975.

14.- Von Peter J. Koenig.

Die Messung des Warmehaushalts von Stranggießkoillen

Eine Verfahreustechnische Informationsquelle.

Stahl Eisen No 14.

Julio 1972.

- 15.- Szekely and J. W. Evans.
Radiative Heat Loss From the Surface of Open
Steel Held in a Ladle.
Transactions of the Metallurgical Society of AIME.
Volumen 245 Junio de 1969.
- 16.- J.A. Botta Jr. and Fernando Mendez de Andes.
BOF- Continuous Casting Experience.
Iron and Steel Engineer.
Mayo de 1973.
- 17.- D.J. Blickwede.
Development and Implementation of New Technologies in
the Steel Industry.
HYLSA Investigación.
- 18.- Dale H. Breen and Gordon H. Walter
Computer-Based System Selects Optimum Cost Steels.
Metal Progres.
Diciembre de 1972.
- 19.- M. Economopolus.
New Calculation Method of the Transfer Coefficients
in Steelmaking Processes.
C.N.R.M. No 14
Marzo de 1968.

- 20.- C.R. Gomer and K.W. Andrews.
Study of Steel Solidification by the Use of
Radioactive Isotopes.
Journal of the Iron and Steel Institute
Enero de 1969.
- 21.- Norman A. Robins
Bath-Type Slab Cooling System
Inland Steel Company
- 22.- J. Heraut, F. Bujak, C. Cardon.
Essais et Mesures a L'installation de Coulee
Continue de L'usine de Denain de la Société
Fives-Lille-Cail.
Revue de Métallurgie.
Julio de 1975.
- 23.- A.W. D. Hills.
Heat and Mass Transfer applied to Process
Metallurgy.
Chemical and Process Engineering.
Febrero de 1969.
- 24.- Thomas G. Digges, J. Rosenberg and Glenn Geil.
Heat Treatment and Properties of Iron and Steel.
NBS Monograph 18

25.- J.J. Gautier, Y. Morillon and J. Doumont-Fillon.

Mathematical Study of the Continuous Casting
of Steel.

Journal of the Iron and Steel Institute.

Diciembre de 1975.

26.-Eugene A. Mizikar.

Mathematical Heat Transfer Model for Solidification
of Continuosly Cast Steel Slabs.

Transactons of the Metallurgical Society of AIME.

Volumen 239, Noviembre 1967.