



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

Fundición de Hierro Gris Aplicada a la Fabricación de Moldes para Lingotes

FACULTAD DE
QUIMICA



BIBLOTECA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A N
GUILLERMO TREJO CABRALES
JAVIER BECERRA MOYA
QUERETARO, QRO. 1977

PROPIEDAD DE LA FACULTAD
DE QUIMICA DE LA U. A. Q.

A MIS PADRES:

Por su gran amor y confianza
que siempre me han brindado.

A la memoria de mi Tío el
Sr. Lucas Becerra Navarro
y su Sra. Esposa
Margarita G. de Becerra.

J. DEL REFUGIO JAVIER BECERRA MOYA

A mis hermanos con cariño:

EVANGELINA
MARCO ANTONIO
FELIPE
JOEL

A mi Tío el Sr.
ADOLFO BECERRA N.

A mis Abuelitos.

A mis Maestros, en agradecimiento
a mi formación.

A Guillermo Trejo Cabrales
por su valiosa ayuda.



A la memoria de MI MADRE
con cariñoso recuerdo.

A MI PADRE con cariño y
respeto porque hizo posible
con su esfuerzo la termina-
ción de mi carrera.

A todas aquellas personas
que contribuyeron desinte-
resadamente para la rea-
lización de este trabajo.

GUILLERMO TREJO CABRALES

I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION GENERAL	6
<u>CAPITULO I</u>	7
Diseño de Moldes para Lingotes.	
<u>CAPITULO II</u>	28
Variables operacionales de la siderurgia que afectan el diseño del molde.	
<u>CAPITULO III</u>	44
Influencia del uso de los moldes para -- lingotes en las plantas de aceración -- sobre su vida y consumo.	
<u>CAPITULO IV</u>	60
Estructura y composición de los moldes - para lingotes.	
<u>CAPITULO V</u>	79
Estructura y composición de los moldes - para lingotes de hierro con grafito esferoidal.	
<u>CAPITULO VI</u>	96
Efecto de las variables de fabricación - en la vida del molde para lingotes.	
<u>CAPITULO VII</u>	105
Práctica realizada en HYLSA, Planta <u>Monte</u> rrey.	
CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFIA	142

INTRODUCCION GENERAL

Dada la gran importancia que tiene en la actualidad los moldes para lingotes durante la fabricación de lingotes de acero en la producción de planos y no planos se hace necesario entonces presentar nuevos tipos de moldes que puedan satisfactoriamente aumentar la calidad y cantidad de lingotes producidos.

Por esta razón en este trabajo se tiene la finalidad de realizar un estudio sobre todos los detalles que están empleados en la fabricación de moldes para lingotes. Abarcando desde el diseño, usos, estructura, variables de fabricación estudio experimental y proporcionando en base a la anterior el tipo de molde que pueda dar los mejores resultados en la Industria Siderúrgica, especialmente con aquellas que trabajen con lingotes hasta de 8 toneladas de peso.

C A P I T U L O I

DISEÑO DE MOLDES PARA LINGOTES

INTRODUCCION:

El diseño de moldes para lingotes se determinan principalmente por factores de calidad y rango de producción y naturalmente, la forma y dimensiones internas del molde corresponden a la forma y dimensiones externas del lingote.

Los objetivos principales del diseño de moldes para lingotes son aumentar el rango de producción de lingotes y disminuir el costo, sin detrimento de la calidad del lingote. Estos objetivos pueden lograrse mejor diseñando el molde para que tenga resistencia, rigidez, uniformidad en las caras internas, facilidad de manejo y larga vida.

Casi todos los moldes para lingotes de uso normal para fabricación de lingotes de acero se hacen de hierro colado, prefiriéndose el hierro producido en cubilote. Se ha tratado al acero como un material para moldes de lingotes de tiempo en tiempo, pero casi invariablemente sufre distorsión que provoca dificultad al desmoldear el lingote. Desde principios de la década de los cincuenta se han usado moldes de hierro con grafito esteroidal, generalmente para funcionar sobre una base experimental, con éxito limitado.

1.1 FACTORES DE DISEÑO QUE AFECTAN LA CALIDAD Y RENDIMIENTO DEL LINGOTE.

No obstante que la forma del lingote se determina principalmente por consideraciones de calidad del lingote, hay ciertos aspectos que afectan la vida del

molde y por lo tanto, los costos totales. Con respecto a estos aspectos, es necesario cierto grado de precauciones. Esto es particularmente cierto en la reducción y radio de las esquinas del lingote, el contorno del molde y para moldes de placa, la razón del lado amplio al lado estrecho.

1.1.1 Reducción del Lingote.

En los lingotes WEU (rectangulares o cuadrados) es necesaria la reducción para producir un lingote profundo libre de defectos de tubo y axiales secundarios.

Generalmente el grado de reducción para lograr esto no excederá de 0.5 pulg/pie (42 mm/m). Los requerimientos del Taller de Fundición no imponen un límite máximo del grado de reducción, pero el molino de rolado preferiría la mínima reducción posible, para igualar el trabajo a todo lo largo de lingote. Con respecto a la vida del molde se requiere una cierta reducción mínima para asegurar el desprendimiento del lingote del molde y por lo tanto, minimizar el daño mecánico al mismo.

Para los lingotes NEU (circulares, hexagonales, octogonales, etc), las consideraciones de calidad y los requerimientos del molino de rolado coinciden en que la reducción debe ser tan pequeña como sea posible. El factor de control es la cantidad necesaria para asegurar el caso de desmoldeo. Este se acepta generalmente entre $1/8$ y $1/4$ de pulg/pie (10 a 20 mm/m), pero depende en cierto grado del tamaño del lingote. Los criterios involucrados son evitar la formación de lingotes "pegajosos" que pueden significar daño mecánico al molde al liberarlos y la prevención de un contacto prolongado entre el lingote y la superficie del molde debido a la dilación en la formación de la garganta de aire.

1.1.2 Radio de la esquina.

El radio de la esquina es un mínimo de 6% de la raíz cuadrada del área de sección transversal interior del molde. Un radio de esquina excesivo en moldes cuadrados o rectangulares puede -- producir una incidencia mayor de segregación en la esquina del lingote y fracturas longitudinales en aceros susceptibles. Por otro lado, si el radio es demasiado pequeño, entonces puede actuar como un incrementador de esfuerzos en el molde produciendo fracturas en las esquinas del mismo y fallas prematuras. En forma similar, -- las estrías mal diseñadas en moldes octagonales o de lados múltiples pueden dar aumento a las fracturas longitudinales o a gargantas de rolado ó forjado en los lingotes o al desarrollo de fracturas de esquina incipientes en los moldes.

El uso de un radio de esquina graduado de un extremo del molde al otro correspondiente a la variación de la sección transversal debida a la reducción del molde, da una reducción de esquina efectiva. Esto ayudará a la separación del lingote. También puede ser esencial evitar las fracturas longitudinales y gargantas mencionadas con anterioridad en los lingotes de lados múltiples.

1.1.3 Contorno del Molde.

Para aceros susceptibles de fracturas en el vaciado, es de utilidad práctica usar moldes con superficies corrugadas. El mayor perímetro obtenido de esta manera sirve para hacer más rápido el enfriamiento inicial y por lo tanto, lo hace soportar mejor los esfuerzos debidos a la presión que ejerce el metal.

Las corrugaciones pueden, sin embargo, servir -

como incrementadores de esfuerzos y de acuerdo con Fowler¹, generar puntos para la formación de fisuras. Por tanto, si se usan corrugaciones, deben diseñarse cuidadosamente. Fowler sugiere que una simple onda sinusoidal es lo mejor para controlar fracturas y fisuras. (Fig. 1.1)

Según Fowler, sin embargo, un contorno de onda de seno simple puede producir un agrietamiento vertical excesivo en lingotes de forja largos. Para tales lingotes una configuración estriada parece ser lo mejor. (Fig. 1.2). Dado que la profundidad de la estria y el radio de la cresta están diseñados para eliminar las gargantas durante la forja, cuando aún puede relevar suficientemente los esfuerzos superficiales durante el vaciado.

Gruznov² se avoca al uso de corrugaciones asimétricas (de dientes de sierra) en moldes grandes de plancha y declara que el uso de tales moldes reduce el tiempo tomado para la formación de la garganta de aire entre el lingote y el molde, dando de esta manera un enfriamiento inicial y un fortalecimiento de la superficie del lingote más rápidos. Declara que con el objeto de prevenir la formación de fracturas longitudinales, en lingotes de plancha vaciados directamente, la capa inicial del lingote debe ser más gruesa en las proyecciones de costilla del lingote que en las depresiones. Esto puede lograrse reduciendo la distancia entre los ápices de las corrugaciones, aumentando la altura de la corrugación, reduciendo el ángulo en el que converge la superficie y reduciendo el radio de curvatura de la proyección de costilla.

Las costillas altas hacen que los lingotes se pegan mientras se enfrían y los dientes de sierra de las superficies amplias de los lingotes de plancha deben entonces ser asimétricos y escalonados. El mecanismo de formación de fracturas es el mismo que en las fracturas de esquina.

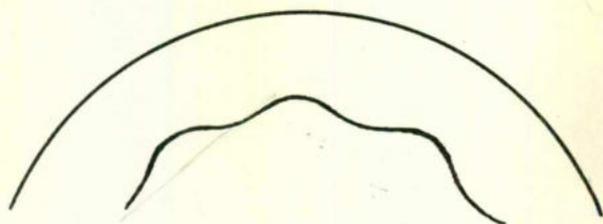


FIG.1-1 Molde corrugado-contorno de onda sinusoidal

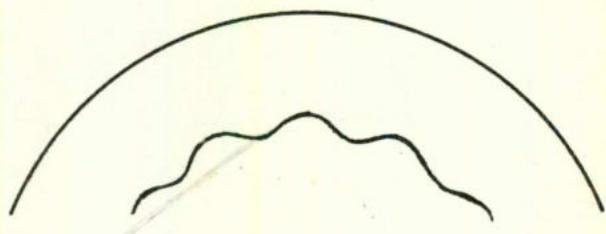


FIG.1-2 Molde corrugado-contorno estriado

Con los moldes corrugados el contorno de la superficie interior del molde intensifica el efecto de --cuarteaduras canalizando las fracturas hacia las --esquinas, facilitando de esta manera la separación de la superficie. El efecto es reducir la vida media de los moldes corrugados en comparación con los moldes planos equivalentes. En forma similar, mientras el uso de superficies concavas en el molde puede --ser ventajoso con relación a la calidad del lingote permitiendo cierto relajamiento de los esfuerzos de superficie del lingote, puede producir cierta variación o inestabilidad del lingote al entrar en el --molino, especialmente en los lados estrechos de los lingotes de plancha. El uso de superficies laterales estrechas y concavas, sin embargo, puede ser --ventajoso para reducir el "traslape de rodado".

Fowler también establece que la experiencia ha demostrado que las superficies exteriores relativamente planas en el molde pueden servir para concentrar los esfuerzos con el resultante resquebrajamiento del molde. En los moldes de plancha tales esfuerzos se concentrarían en los lados estrechos, resultando en fracturas de los mismos lados. Si las superficies exteriores son curvas y dobladas hacia las esquinas, la distribución de esfuerzos tiende a ser --más uniforme. El radio de curvatura óptimo dependerá del tamaño y forma del molde; los moldes de plancha requieren radios diferentes para los lados estrechos y amplio.

1.1.4 Relación Lado Amplio, Lado Estrecho (Relación de --forma del Molde).

Idealmente la forma del lingote debería aproximarse tanto como fuera posible a la forma del producto --rolado. Esto implica una alta relación de forma para moldes de plancha. Las altas relaciones de forma tienen un efecto negativo en la vida del molde debido a la distribución adversa de esfuerzos unido al riesgo aumentado de quemar o rayar las superficies amplias por el desalineamiento de la corriente de vaciado con el vaciado directo. También puede

haber una tendencia aumentada del molde a combarse en servicio y la fabricación de moldes se hace más difícil si se requieren refuerzos planos.

Una alta proporción de lingotes de acero efervecen- te se hace en molde de plancha. Las relaciones de - forma que exceden de aproximadamente 2:1 pueden - - afectar adversamente la acción de efervecencia.

1.1.5 Tolerancias de Fabricación.

Las variaciones relativamente pequeñas en las dimen- siones del molde pueden producir cambios de peso -- considerable en el lingote; por lo tanto es impor-- tante que el taller de fundición deberá ser capaz - de fabricar moldes con especificaciones dimensiona- les razonablemente exactas. Generalmente los moldes de tamaño mediano se hacen a una tolerancia de 3.0 mm. en dimensiones de sección transversal y de 6.0 mm., en longitud. Es particularmente importante que el corazón este bien centrado, de otra manera, las- paredes del molde de espesor variable pueden resul- tar en una alta concentración de esfuerzos en la -- parte más delgada y posiblemente una falla prematu- ra del molde.

Las caras interiores de los moldes deben ser lisas- y libres de defecto. El no lograr esto puede resul- tar en problemas de pegado inmediatos.

1.2 FACTORES DE DISEÑO QUE AFECTAN LA VIDA Y CONSUMO DEL - - MOLDE.

1.2.1 Forma de falla.

Los moldes se mantienen en servicio por tanto tiem- po como puedan producir lingotes satisfactorios -- o no presenten un peligro a la seguridad. Hay dos- formas principales de fallas en los moldes de lin- gotes y varias subsecuentes. El ciclo repetido de- calentamiento y enfriamiento al cual los moldes -- están sujetos durante su periodo de uso produce --

considerables esfuerzos dentro de la pared del molde, crecimiento y oxidación de la superficie interior. Los esfuerzos, más pronto o más tarde, producen agrietamiento o fracturas de las paredes del molde. Tales fracturas se extienden en cada calentamiento subsecuente hasta que el molde no puede usarse más. El crecimiento y la oxidación de la superficie interior del molde produce el desarrollo de un molde fisurado, comenzando donde la superficie del molde se calienta más en el servicio y extendiéndose gradualmente sobre toda la superficie interior. Cuando después de una extensa vida, el fisuramiento se hace muy severo, aparecen fracturas más profundas y la pared del molde puede partirse verticalmente, comenzando con frecuencia en la base y extendiéndose a lo largo de todo el molde.

Generalmente, sin embargo, el molde se hace inservible antes de alcanzar este paso ya sea por el aumento en la dificultad para separar el lingote de los moldes o por un incremento de los defectos de la superficie del lingote.

Las fisuras pueden ser "sobresalientes" ó "hundidas", dependiendo de cual sea el efecto predominante ya sea el crecimiento del hierro del molde, dando fisuras o grietas sobresalientes hasta una profundidad de 32 mm. o una oxidación localizada de la superficie resultando en una forma hundida menos profunda de fisura, quizás a una profundidad de 6 mm. El efecto de fisura se asocia principalmente con las condiciones de servicio y en menor grado con las condiciones del taller de fundición.

Las fracturas del molde generalmente son verticales ya sea en cara o en la esquina, pero no siempre. (Fig. 1-3). Las fracturas horizontales aunque son más raras, ocurren particularmente en los moldes rectangulares. Las fracturas pue-

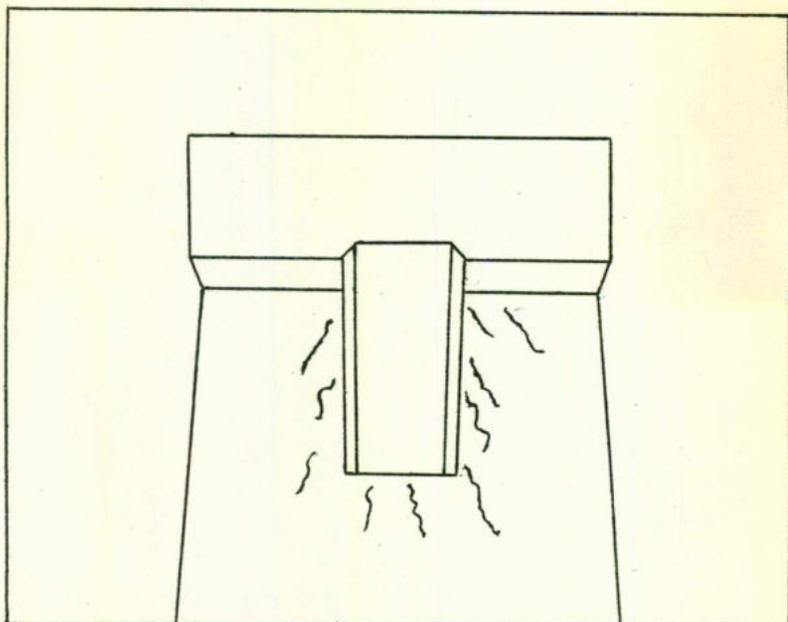


FIG.1-3 Molde cuadrado de 4ton agrietado

den ocurrir repentinamente en el primer calentamiento o pueden desarrollarse gradualmente después de un tiempo de servicio considerable.

Los factores principales que afectan la incidencia de fracturas del molde son los procedimientos de fabricación del taller de fundición, incluyendo la rigidez de la arena del molde, su tratamiento después del vaciado, las condiciones de servicio y su diseño.

Otras formas de falla que ocurren con menor frecuencia incluyen el daño mecánico causado frecuentemente por su tratamiento rudo al separar el lingote, pero que también puede deberse a un diseño defectuoso, particularmente en relación al posicionamiento y tamaño de las orejas, muñones, tabletas de localización, etc. El quemado de la superficie interior de los moldes causado por un vaciado fuera de centro o un vaciado demasiado caliente. Si el acero se vierte muy caliente, es posible que el lingote y el molde se fundan juntos. Esto sucede más frecuentemente en la base del molde y puede resultar en que una parte del molde se desprenda al separar el lingote. A esto se le llaman asiento desprendido.

1.2.2 La Relación Molde Lingote. (M/L).

La vida del molde varía considerablemente de acuerdo con el tamaño, condiciones de uso, método de fabricación, etc., y aún de un tipo de moldes usados en un taller de fundición puede obtenerse una gran variedad de duraciones individuales.

El consumo del molde puede relacionarse directamente con el costo de producción de los lingotes. Es vital por lo tanto, que los moldes sean diseñados para obtener un consumo mínimo y un máximo de duración. Estos dos términos no son -

necesariamente sinónimos y por lo tanto se definirán:

La vida del molde es el número de lingotes producidos en un molde en particular antes de que sea necesario deshecharlo. Las cantidades calculadas para la vida del molde generalmente se refieren a la vida promedio alcanzada por este tipo de diseño del molde en particular usado en un taller de fundición.

El consumo del molde es el peso del molde "consumido" por tonelada de lingote vaciado, generalmente calculado en libras/toneladas. Una interpretación demasiado literal de esto podría dar la impresión de que el molde se desgasta cada vez que se usa y que los lingotes vaciados más tarde en la vida del molde son por lo tanto mayores que los vaciados cuando el molde es nuevo. Esto no es así, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Consumo de molde}^3 = \frac{\text{Peso del molde} \times 2240}{\text{Peso del lingote} \times \text{vida del Molde.}} \quad (1)$$

6

$$\frac{\text{Consumo del molde} \times \text{Vida del molde}}{2240} = M/L \dots \dots (2)$$

Es inmediatamente obvio que para una determinada vida del molde, el consumo del molde se minimiza cuando la relación del peso del molde al peso del lingote es mínima.

1.2.3 Espesor de la pared.

Si ignoramos el peso de las orejas, muñones, tabletas de localización, etc., entonces la relación M/L (molde/Lingote) es una medida promedio del espesor de la pared del molde. Los valores-

altos corresponden a las paredes gruesas y los bajos a los moldes de paredes delgadas. Se esperaba que lo primero diera un alto consumo debido al volumen del exceso de hierro del molde que se lleva; y que lo segundo diera un alto consumo debido al aumento de susceptibilidad a las fracturas.

Si M/L es comparada contra el consumo del molde para cualquier tipo de molde en particular, uno esperaría lógicamente una inflexión en la curva para indicar un consumo mínimo del molde en un valor óptimo de M/L (Fig. 1-4). Los moldes con paredes excesivamente gruesas, con fallas por fisuras darán un alto consumo del molde, lo mismo que los moldes con paredes excesivamente delgadas con fallas con agrietamiento. La relación entre M/L y el consumo del molde fue investigada primero por N. H. Bacon⁴, quien hizo recomendaciones para la relación M/L óptima, de acuerdo con el tipo de molde, tamaño, etc. (Fig. 1-5).

La experiencia ha demostrado que el factor que afecta principalmente la vida del molde, está relacionado con las condiciones de uso de las acerías. Consecuentemente, el mismo molde puede dar considerables diferencias en la vida y consumo promedios cuando se use en diferentes talleres de fundición. Los datos inevitablemente fallan, debido a la naturaleza del proceso. No sucede con frecuencia que los moldes idénticos en todos aspectos, pero de relación M/L diferente, o de diferentes espesores de paredes, se usen en la producción de un tipo de lingotes bajo idénticas condiciones de servicio. También naturalmente ha existido un marcado rechazo de parte de los fabricantes de acero para usar moldes con una relación M/L muy baja, digamos de menos de 0.8, por temor a fallas prematuras del molde. De aquí la falta de información, particularmente en el rango en el cual se podría

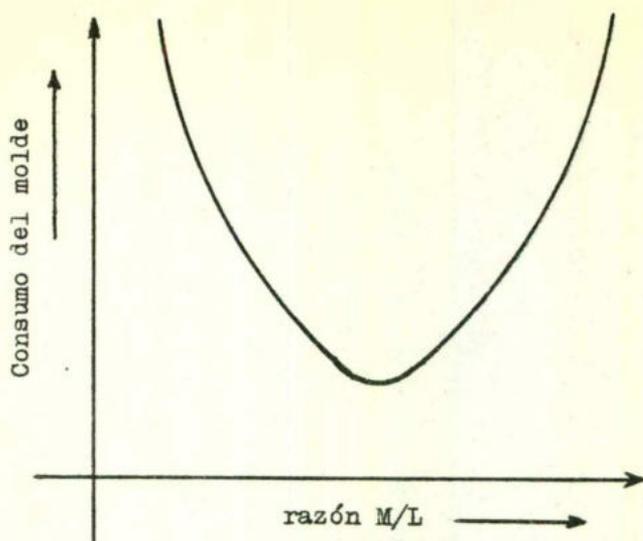


FIG.1-4 Efecto de la razón M/L sobre el consumo del molde (hipotético)

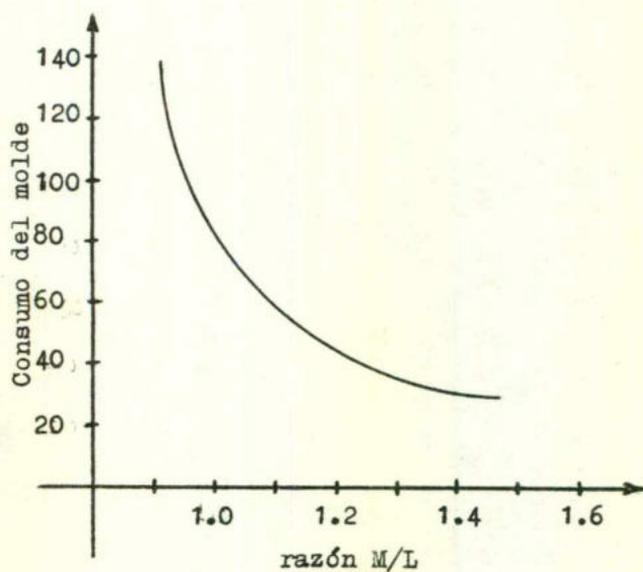


FIG.1-5 Razón M/L óptima para moldes (Bacon)

esperar que el consumo del molde indicara un incremento. Pero hay alguna indicación en los datos examinados por Bacon, de que hay una relación M/L óptima, que dará un consumo mínimo del molde para un molde específico bajo condiciones de uso específicas, (Fig. 1-6).

Además de la curva (Fig. 1-5) que muestra la M/L óptima para moldes de diferentes capacidades, Bacon también derivó las siguientes ecuaciones para calcular el espesor de pared medio en pulgadas, a partir de la relación M/L.

Espesor de pared = $0.21 \text{ M/L} \times A$

Para moldes redondos, octagonales o casi cuadrados donde A es el área seccional transversal en pulgadas cuadradas.

Espesor de pared = $0.20 \text{ M/L} \times A$

Para moldes de plancha con una relación de forma de 2:1

Pero como se indica en el Tercer Reporte del Sub-Comité de Moldes para Lingotes BISRA⁵, el espesor de pared obtenido de esta manera no será el mejor en todas las circunstancias. Pueden ser necesarias algunas correcciones para ajustar se a las condiciones particulares de uso, especialmente con respecto al foso de fundición que se use y al espaciamiento de los moldes en el foso.

La posibilidad de fractura del molde es inversamente proporcional al espesor medio de pared. Así que si las paredes son lo bastante gruesas, pueden eliminarse las fracturas mayores, pero al costo de un consumo de molde excesivo. Si el espesor de pared se reduce para minimizar el consumo del molde, entonces también deben mejor

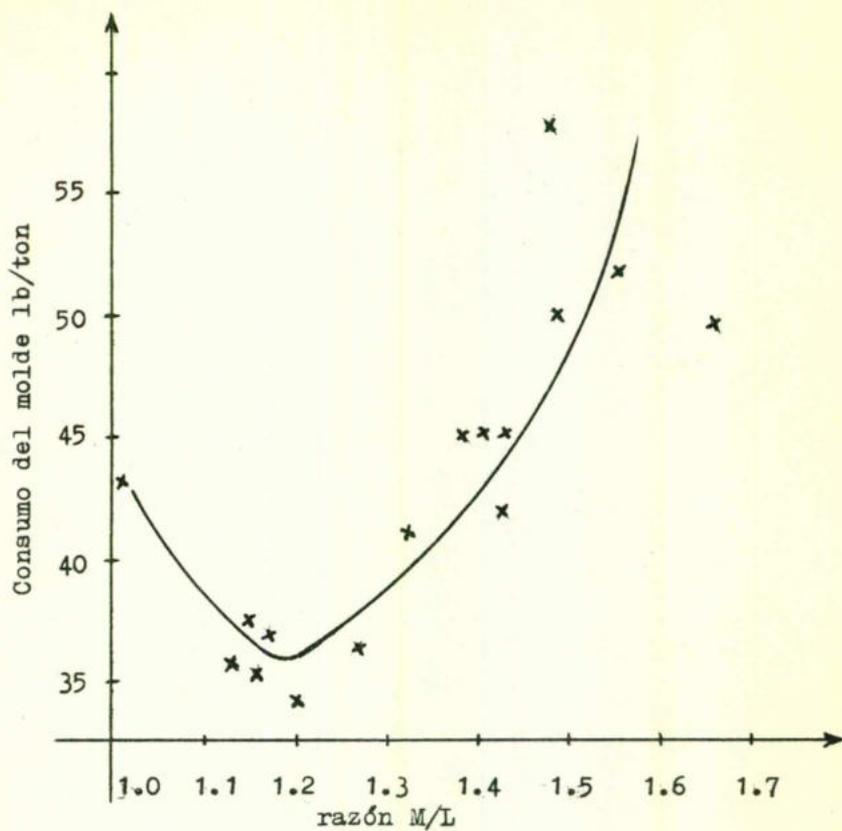


FIG.1-6 Relación entre la razón M/L y el consumo del molde (después de Bacon)

rarse las condiciones de fabricación, la resistencia del metal, las condiciones de uso en las acerías y el diseño del mismo. La variación del espesor en la pared del molde depende de la forma del lingote. El molde más simple es redondo, para el cual el espesor de pared es uniforme en toda la sección transversal pero también puede variar de la parte superior a la inferior (Fig. 1-7). Los moldes octagonales y de lados múltiples son ligeramente más complejos ya que se presentan las estrías en las esquinas. Para estos moldes, el contorno exterior puede seguir el contorno interior (Fig. 1-8), con o sin curvatura de las caras exteriores; o puede de hecho ser circular (Fig. 1-9).

En el último caso, el espesor de la cara es ligeramente mayor que el espesor de la esquina y la relación M/L se aumenta proporcionalmente. Generalmente es necesario engrosar el molde en cada extremo abierto, especialmente en moldes grandes, para reforzar el molde y contraatacar la formación de fracturas. Hay una corriente de opinión, sin embargo, que considera tales bandas de refuerzo innecesarias e incluso detrimentales.

Los moldes cuadrados pueden tener caras planas o arqueadas (Fig. 1-10 y 1-11). En la práctica esto parece tener poco efecto en la vida del molde, dado que el espesor de la pared es adecuado. Sin embargo, el espesor de esquina debe ser siempre ligeramente menor que el espesor de la pared central. El Sub-Comité de Moldes para Lingotes de la BISRA recomienda un espesor de esquina de 96% del espesor de la cara central y dá un ejemplo de tipo de molde hecho inadvertidamente con un espesor de esquina mayor que el espesor de cara, así:

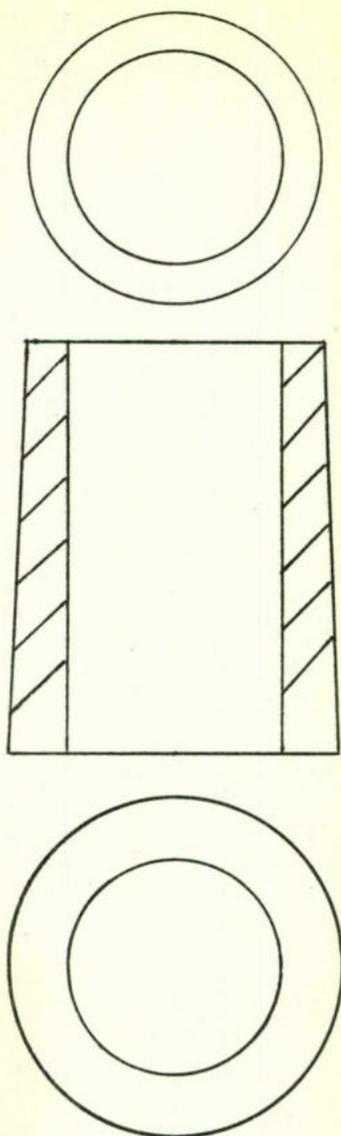


FIG.1-7 Moldes redondos

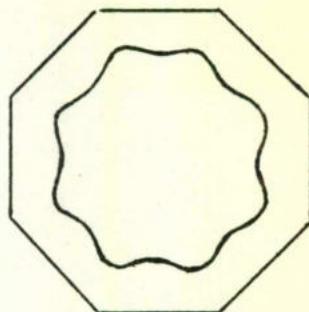


FIG. 1-8 Molde octogonal
Contorno exterior idem

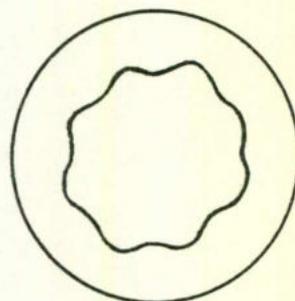


FIG. 1-9 Molde octogonal
Contorno exterior circular

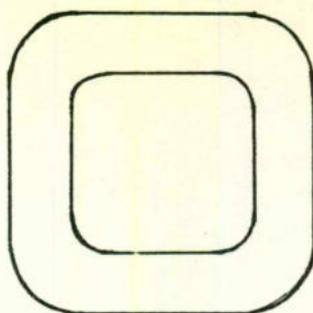


FIG.1-10 Molde cuadrado-caras planas

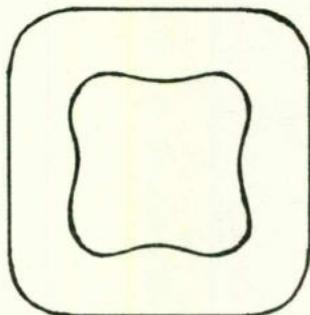


FIG. 1-11 Molde cuadrado-caras redondas

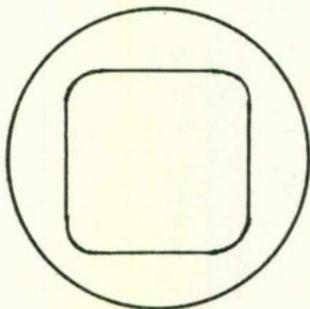


FIG. 1-12 Molde cuadrado-modificado para obtener un patrón isotérmico más uniforme

Molde Anormal Molde Normal.

Espesor en el Centro de la cara.	4½ pulg.	4¼ pulg.
Espesor en las esquinas	4 3/4 pulg.	4 pulg.
Peso del Molde	4320 Kg.	3800 Kg.
Vida Promedio	110 coladas	134 coladas
Consumo	23 Lb/ton.	16 Lb/ton.

En forma similar a los moldes rectangulares de plancha, el espesor en la esquina debe ser menor que el espesor en el centro de la cara: también se recomienda hacer el lado amplio del molde más grueso que el lado estrecho.

La incidencia de fractura en los moldes para lingotes puede relacionarse con la distribución de esfuerzos en la pared del molde en servicio: que a su vez puede relacionarse con el patrón isotérmico desarrollado durante y después del vaciado del lingote. Los cambios abruptos en la sección o en el espesor de las paredes debido a la colocación de orejas, muñones, tabletas de localización o incluso de bandas de refuerzo⁶, pueden afectar el patrón isotérmico dentro del molde y actuar como aumentos de esfuerzos, reduciendo de tal manera la vida del molde. Diferentes investigadores han determinado patrones isotérmicos para varios tipos de moldes 6, 7, 8. Otros han fijado los esfuerzos en la pared del molde, midiendo la tensión en las paredes exteriores -- del mismo 9, 10. Estas investigaciones demuestran que el máximo esfuerzo en las caras exteriores de los moldes cuadrados o rectangulares aparece dentro de los primeros minutos después de iniciar el vaciado. Esto corresponde a la máxima temperatura diferencial a través de la pared del molde.

Buttler⁹ y Glaisher usaron un calibrador de tensión Tomlinson modificado para medir la tensión en tres direcciones a 60 grados uno del otro, -- sobre la superficie exterior de los moldes, durante su uso en una acería. Suponiendo cierta relación esfuerzo/tensión de acuerdo con la temperatura del hierro del molde y dando tolerancia para la expansión termal, calcularon que los esfuerzos de aproximadamente el 70% del esfuerzo de tensión último, se desarrollaban después de los primeros minutos de iniciado el vaciado. -- Al principio, los esfuerzos eran principalmente verticales, pero se hacían horizontales después de 7 u 8 minutos. Goreau¹⁰ y Duflot usaron calibradores de tensión de resistencia eléctrica en moldes cuadrados de 3 a 6 ton. Anotaron altos esfuerzos de tensión desde el inicio del vaciado con la máxima elongación a una temperatura de la pared exterior del molde de aproximadamente 70 grados C. Encontraron que el esfuerzo inicial -- era horizontal haciéndose vertical después de -- 15 minutos. Hay un elemento de duda acerca de -- las cantidades de esfuerzos obtenidas porque la fuerza tensil del hierro para cualquier molde -- en particular no puede medirse exactamente sin -- destruir el molde, pero es evidente que en las -- capas exteriores de la pared del molde se desarrollan considerables esfuerzos tensiles.

Para moldes redondos, el patrón isotérmico es -- mucho más simple; estando los isoterms espaciados uniforme e igualmente de manera que, en teoría al menos, todos los puntos de la superficie exterior alcanzan la misma temperatura en un momento determinado. El esfuerzo sobre la superficie exterior se hace uniforme y si el espesor -- de la pared del molde es adecuado, los moldes -- redondos pequeños son virtualmente indestructibles.

Partiendo de esto, recientemente se han hecho -- intentos de alterar radicalmente el diseño de --

los moldes cuadrados con el objeto de obtener un patrón¹¹ isotérmico más uniforme (Fig. 1-12). -- Una característica de tales moldes es la baja -- relación de espesor de esquina a cara. Esto ha -- producido una falla prematura por fracturas en -- las esquinas de los primeros moldes prototipos -- hechos con este diseño modificado.

De acuerdo con la literatura, el igualamiento -- del patrón de esfuerzo sobre el perímetro exte-- rior de la sección transversal de pared del mol-- de aún requiere de un espesor adecuado en el pun-- to más débil. En la práctica esto significa que-- el diseño modificado puede aumentar la relación-- M/L y por lo tanto, a menos que se aumente subs-- tancialmente la vida del molde, se aumenta el -- consumo del mismo. Las subsecuentes pruebas se -- han efectuado utilizando moldes hechos de hierro de grafito esferoidal. Se penso que la mayor duc-- tilidad y la mayor fuerza tensil del hierro de -- grafito esferoidal aumentaría la resistencia del molde al shock térmico y contrarrestaría la ten-- dencia a las fracturas en las esquinas.

A pesar de que la ductilidad mejorada ha produ-- cido fallas debidas a la distorsión excesiva, se han obtenido resultados promisorios.

(5)

CONTINUA.

CAPITULO 2

VARIABLES OPERACIONALES DE LA SIDERURGIA QUE AFECTAN EL DISEÑO DEL MOLDE

INTRODUCCION:

El diseño de Moldes debe tomar en cuenta los requerimientos operacionales de la fundición en particular. El manejo eficiente por medio del equipo existente; placas inferiores que se ajusten en las carretillas de lingotes existentes y que se adapten satisfactoriamente a la distribución de la pista del riel; instrumento de colocación adecuados para permitir a los moldes adaptarse a las placas inferiores, etc. Todos estos requerimientos han sido considerados al diseñar el molde.

2.1 Manejo del Molde.

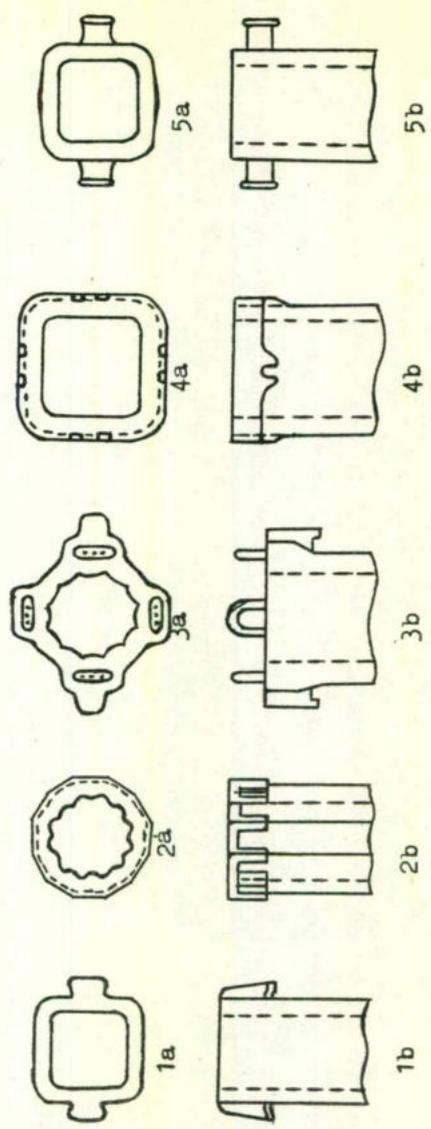
Para la producción de lingotes de tamaños intermedios digamos, de 4 a 15 tons., pocas acerías usan fundición en fosa actualmente. La mayoría funden los lingotes sobre placas de asiento colocadas sobre carretillas para lingotes. El ciclo del molde comprende la preparación y limpieza del mismo, su colocación sobre la placa de asiento, el vaciado, la separación del lingote del molde y el enfriamiento del molde. Esto significa levantar y transportar el molde de los caballetes de enfriamiento al foso de fundición y nuevamente al inicio del ciclo. En la mayoría de las acerías modernas, los moldes se limpian y colocan sobre la placa de asiento en un taller especial de preparación de moldes adyacentes a la nave de fundición. Alternativamente pueden prepararse carretillas para lingotes y placas de asiento en el taller de preparación y el molde puede limpiarse y colocarse sobre las carretillas en la nave de enfriamiento; pero en todo caso, estas operaciones rara vez se efectúan sobre la misma nave de fundición ya que de lo contrario, el gran número de moldes usados y el largo tiempo que se

requiere para el enfriamiento causarán congestión -- miento.

La separación de los lingotes puede efectuarse en la nave de enfriamiento de los moldes o puede hacerse -- junto a los hornos de calentamiento dependiendo del -- tipo de lingotes que se trate. Generalmente, para la fabricación de lingotes WEU, estos se sacan de los -- moldes levantándolos y si la operación se efectúa cer -- ca de los hornos de calentamiento, entonces los lin -- gotes pueden sacarse de los moldes y cargarse en los hornos en una sola operación. Sin embargo, frecuentemente se requiere una operación intermedia que implica levantar juntos el molde y el lingote de las carre -- tillas de lingotes y colocarlos en una segunda carre -- tilla equipada con entrepaños.

Esto levanta los lingotes a tal vez 10 ó 12 pulgadas -- (254 ó 305 mm) dentro de los moldes y permiten a los -- trinquetes de la grúa tomar las puntas de los lingo -- tes. En la fabricación de NEU, los moldes generalmen -- te se separan de los lingotes por grúa en la nave de -- enfriamiento de moldes y se colocan sobre caballetes -- de enfriamiento. Los lingotes son cargados subsecuen -- temente sobre las carretillas para lingotes para ser -- llevados a la nave de calentamiento y ser cargados -- en los Hornos. Además de estas operaciones normales, -- puede ser necesario en casos de emergencia manejar -- los moldes en la misma nave de fundición. Para facili -- tar el levante, los moldes pueden ser adaptados con -- orejas o muñones. Para los moldes WEU, estos se colo -- can solamente en paredes opuestas, en la parte supe -- rior e inferior en el caso de lingotes que se peguen, -- siendo necesario voltear completamente el molde para -- liberar el lingote del molde. La Fig. 2-1 ilustra el -- tipo de instrumento de levante en uso general. El más -- común es una oreja del tipo mostrado en la Fig. 2-1a. -- Los moldes reciben un manejo bastante rudo y las ore -- jas deben ser lo bastante fuertes para soportarlo. -- Si la oreja falla, no solamente el molde debe desha -- cerse prematuramente, sino que las circunstancias en -- las que la oreja se rompe podrían constituir un peli --

FIG.2-1 Moldes con muñones u orejas de levante de uso general



gro a la seguridad. El diseño de la oreja debe ser en tal forma que no actúe como aumento de esfuerzo, lo que podría producir una falla prematura por fractura de molde. En la práctica esto significa que la provisión de una oreja de levante deberá fortalecer la pared del molde en vez de debilitarla.

La provisión de un número adecuado de grúas para separar los lingotes es vital para evitar el congestiónamiento y un daño indebido a los moldes. Las grúas de separación están equipadas con instrumentos adecuados para levantar los moldes y un pistón central que puede ejercer una fuerza considerable que se usa para sacar los lingotes pegados a los moldes. Si no se dispone de un número adecuado de grúas para separar puede ser necesario liberar los lingotes pegados, suspendiendo el lingote y el molde de la grúa y girándolos para que golpeen contra algún objeto sólido hasta sacar el lingote del molde. Esta práctica puede aumentar significativamente el número de moldes deshechados prematuramente debido a daños mecánicos.

2.2 Preparación del Molde.

El enfriamiento del molde dentro de la misma nave de fundición no es eficiente debido al calor exterior que es una característica de las naves de fundición y el congestionamiento que puede producirse. Es preferible enfriar los moldes en caballetes especiales, en una nave destinada exclusivamente a tal efecto. Esta debe construirse tan cerca como sea posible de la nave de fundición con el objeto de reducir al mínimo la transportación, pero debe tener ventilación adecuada.

La eficiencia¹² y rapidez de enfriamiento de los moldes se aumenta si los caballetes se elevan sobre el nivel del piso. Esto asegura una convección adecuada de aire.

Los moldes pueden limpiarse tan pronto como se enfrían lo bastante para permitir un manejo normal. Es-

to puede hacerse manualmente por medio de raspadores y/o cepillos de alambre que se usan para remover todas las partes de escoria, óxido o acero salpicado de las caras interiores del molde. Alternativamente, -- hay instrumentos operados mecánicamente que pueden -- usarse para este propósito. Si se va a usar un recubrimiento, debe aplicarse por aspersión, inmersión o con una brocha, después de limpiarse. Sin embargo, -- excepto en la inmersión, esto se hace con frecuencia -- después de haber colocado los moldes en la nave de -- fundición. Como muchos de los revestimientos para -- moldes más efectivos son muy volátiles, los moldes no pueden recubrirse a una temperatura mayor a 70 u 80°C, de lo contrario hay peligro de explosiones. También -- los moldes son un poco más accesibles en el foso de -- fundición, especialmente si el recubrimiento se aplica por medio de una pistola de aspersión. Sin embargo debe darse el tiempo suficiente para que seque el recubrimiento en el molde antes del vaciado.

2.3 Colocación de los Moldes.

Para la fundición en carretillas los moldes se colocan sobre placas de asiento generalmente hechas de -- hierro fundido. Como ya se discutió, es necesario, -- con el fin de reducir los efectos de cola de pescado -- y que el metal se extienda sobre la superficie, en la parte inferior del lingote durante el rolado, darle -- a dicha parte del lingote la forma de un cono o pirámide truncada. Esto se efectúa haciendo un orificio -- de forma adecuada en la placa de asiento y no importa si el lingote se vacía directamente o cuesta arriba -- el molde puede posicionarse exactamente sobre el orificio del asiento. Para este propósito, son esencial -- mente los instrumentos de localización. El método -- usado más comúnmente es el de poner pernos en la placa de asiento que ajustan en las tabletas de localización del molde (Fig. 2-2).

Es importante, sin embargo, que lo mismo que las orejas, las tabletas de localización estén diseñadas para reducir al mínimo la formación de esfuerzos en el-

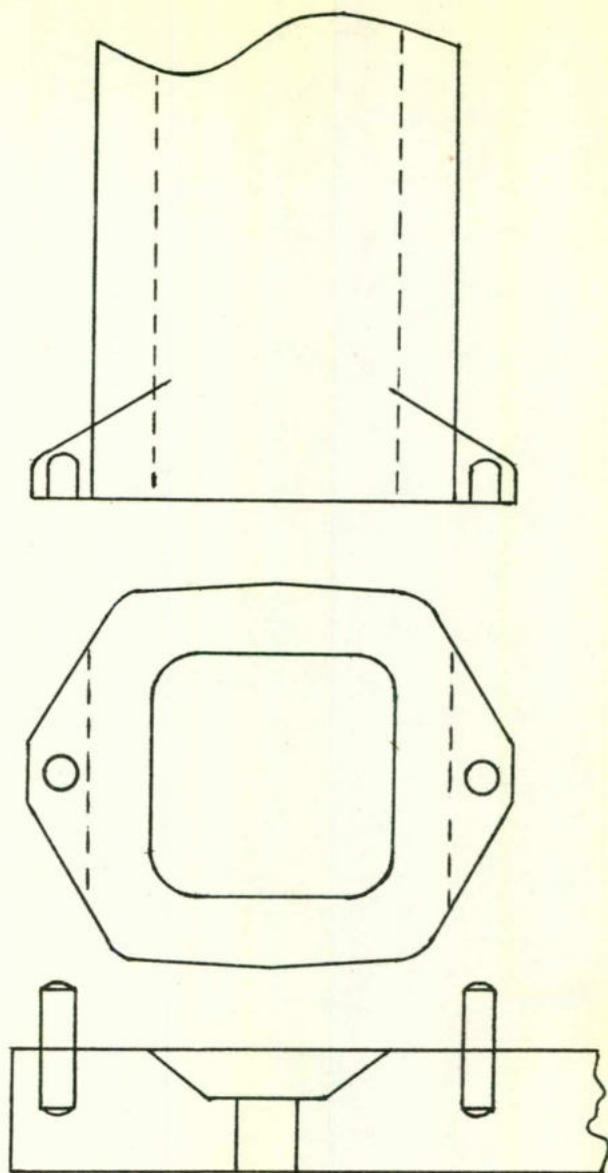


FIG.2-2 Colocación de un molde por medio de pernos

molde. Si la tableta de localización penetra en la pared del molde, éste se debilita en la base de localización, podría resultar en la necesidad de desechar prematuramente el molde (Fig. 2-3).

Los moldes deben espaciarse adecuadamente en las placas de asiento y se requiere un diseño cuidadoso de la misma y del molde, con el fin de asegurar que la distribución de temperatura sea uniforme dentro de las paredes del molde, además de una carga eficiente uniforme y adecuada de las carretillas para lingotes. Si los moldes adyacentes se colocan demasiado cerca, la disipación del calor no es uniforme y las caras adyacentes se calientan más que las no adyacentes. Esto afecta adversamente la vida del molde ya que el avance y la extensión de la fractura son directamente proporcionales a la temperatura máxima alcanzada y al tiempo durante el cual se mantiene la temperatura.

También es necesario siempre asegurar la carga óptima y el uso eficiente de las carretillas para lingotes. Frecuentemente la parte del espacio destinado para el vaciado para una fundición de lingotes es limitada, por lo tanto, es necesario asegurarse de que pueda colocarse un número suficiente de moldes para una fundición completa sobre un número limitado de carretillas para lingotes. Consecuentemente, no obstante que el tamaño del lingote se determina por otros factores, pueden ser necesarios algunos ajustes menores de sección transversal o longitudinal al diseñar el molde.

Además de estos ajustes, necesarios para lograr una carga óptima en las carretillas para lingotes, es necesario asegurarse de que la altura del lingote ponga la punta del molde a un nivel conveniente con relación al andamio de vaciado. Esto facilita el revestimiento del molde, la observación de los lingotes durante el vaciado y la alimentación de adiciones, tales como aluminio. El diseño final, es por lo tanto, un escalón entre los requerimientos del lingote y las limitaciones del foso de fundición.

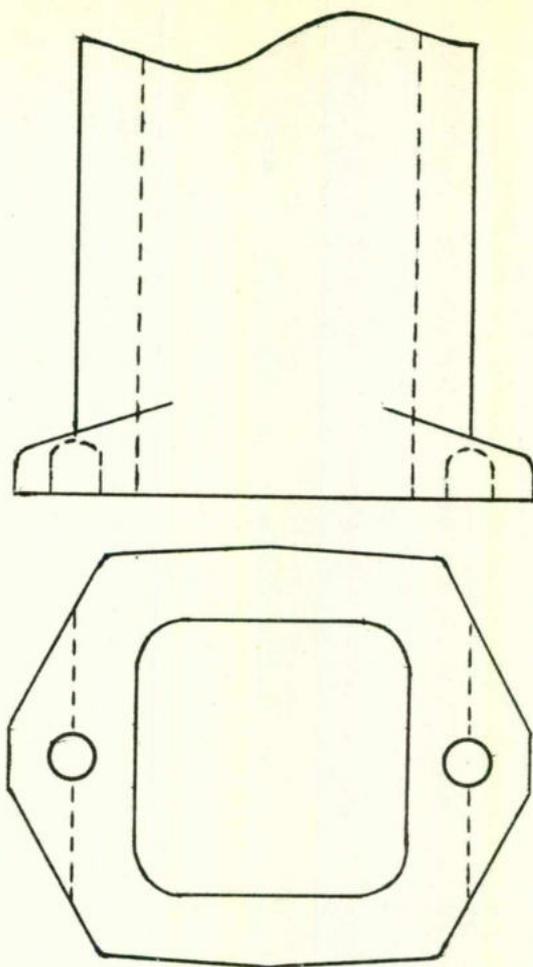


FIG.2-3 Diseño de una tableta de localización

Para el vaciado directo los moldes se colocan sobre una sola placa de asiento de hierro fundido. Es característica del vaciado directo que el chorro del metal en los pasos iniciales del vaciado de cada lingote golpee la placa de asiento con una fuerza considerable. El resultado es que, a menos que la placa de asiento esté adecuadamente protegida, está sujeta a rápida erosión y desgaste. El orificio se ahonda y su forma y volumen se alteran, afectando por lo tanto la cola de pescado, la extensión del metal y el rendimiento del lingote. En la práctica se usa generalmente una forma de protección. Esta puede consistir en pedazos de placas metálicas de desecho o un recubrimiento refractario o ambos. La cantidad en la que los factores de diseño pueden afectar el consumo de la placa de asiento en el vaciado directo de los lingotes de plancha fue reportado por Jackson¹².

Para los lingotes vaciados cuesta arriba, el arreglo es un poco más complicado. Con frecuencia se usan dos placas de asiento con los corredores refractarios, a través de los cuales se alimenta el metal fundido a los moldes, colocados entre ellos (Fig. 2-4). En este caso para evitar la confusión, las placas inferiores serán llamadas placas base y las superiores placas cubierta. Normalmente la placa base no entra en contacto con el metal fundido y excepto por daño mecánico accidental, no debe estar sujeta a desgaste.

El metal fundido entra a los moldes a través de compuertas en la parte inferior de los orificios y la erosión de las placas de asiento por el metal fundido es considerablemente menor que en el vaciado directo. Los lingotes, sin embargo, se erigen dentro de la placa cubierta debido a la diferencia de temperatura entre las caras superior e inferior y si la placa no está diseñada cuidadosamente, puede estar sujeta a un agrietamiento prematuro como resultado. La Fig. 2-5 muestra una placa de asiento diseñada para sostener seis lingotes de 4 Toneladas. La placa de asiento consiste en dos mitades colocadas juntas transversalmente. Con esto se logró una vida promedio de 400 cola-

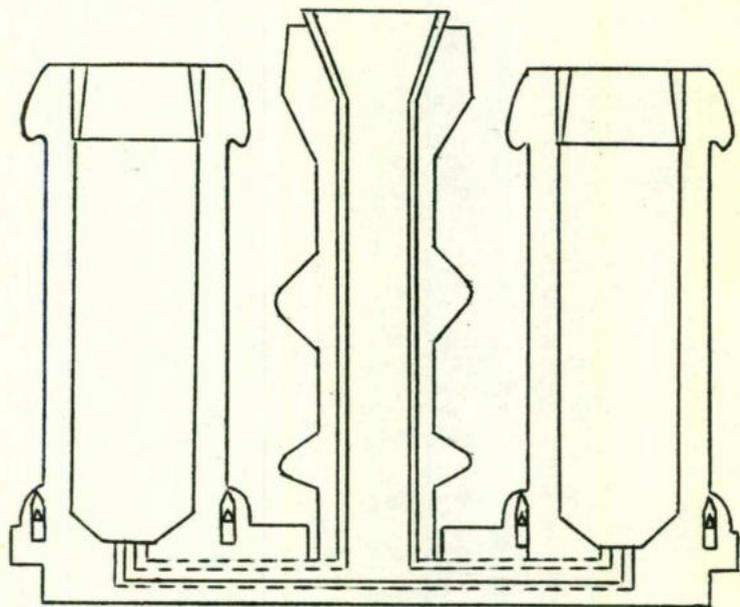


FIG. 2-4 Arreglo de un vaciado de abajo hacia arriba

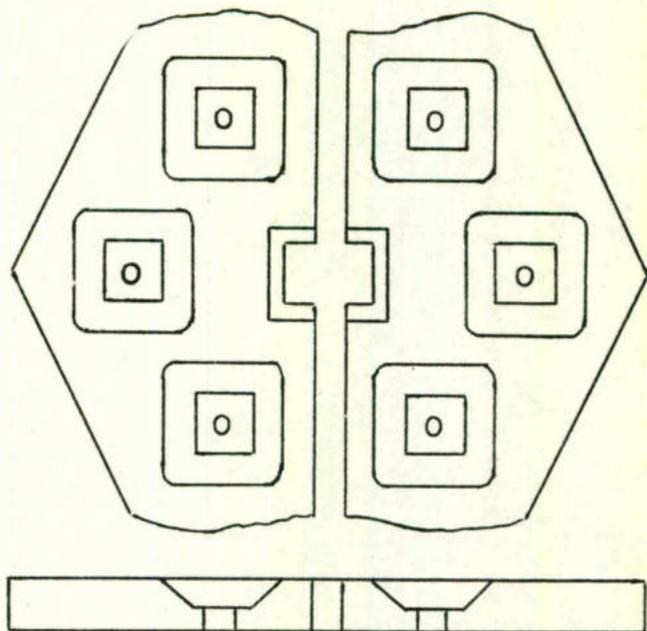


FIG. 2-5 Diseño de una placa cubierta para
6 lingotes cuadrados de 4tons. Vida media
400 coladas

das, lo que equivale a un consumo de placa de asiento de 2.4 lb/ton. de lingote o sea 1.1 Kg/ton.

Cuando el tamaño del lingote aumenta a 5 tons., se ha ce necesario rediseñar el conjunto de vaciado. La -- Fig. 2-6 muestra la placa rediseñada, que también se hizo en dos mitades, pero unidas longitudinalmente. -- Consistía en efecto, de dos fundiciones largas y más-- bien angostas que eran difíciles de fundir libres de esfuerzos residuales. Esta placa cubierta logró una -- vida de 190 fundiciones, equivalentes a un consumo de 6.3 lb/ton. de lingote (2.8 Kg/ton).

Tal placa puede, por supuesto, reforzarse aumentando el espesor de toda la sección, pero entonces es necesario lograr un aumento en la vida lo que compensará de más el peso aumentado de la placa.

2.4 Reparación del Molde y de la Placa de Asiento.

La mayoría de los moldes finalmente se desechan al -- terminar su vida útil ya sea debido al fracturamien-- to de la cara interior o por fracturamiento severo -- de la pared del molde. Los moldes que se desechan des-- pués de una vida relativamente corta, sin embargo, -- casi invariablemente es debido a fracturas prematuras o a daños mecánicos; como resultado de un manejo ru-- do. Ambas categorías pueden ajustarse a la reparación de moldes, pero generalmente no es posible reparar -- moldes que sufran daños mecánicos severos. La consi-- deración primordial en todos los casos es la económi-- ca.

¿ Será útil el molde después de la reparación para un número de coladas suficientes para justificar el -- costo de la reparación?

2.4.1 Reparación de Moldes Fisurados.

Generalmente hablando, los moldes se desechan -- por fisuramiento cuando el patrón de fisuramien-- to se hace lo bastante profundo o lo bastante --

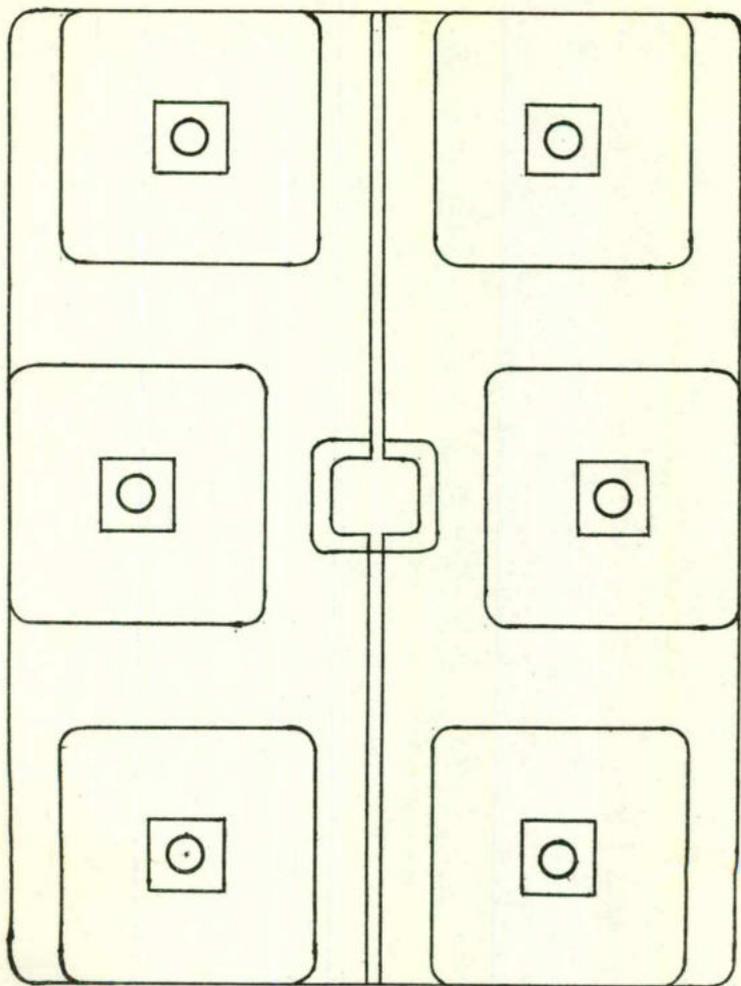


FIG. 2-6 Diseño de una placa cubierta para 6 lingotes cuadrados de 5tons. Vida media 190 coladas

áspero que cause dificultades para separar los lingotes; sin embargo, en ciertos casos, puede ser necesario desechar los moldes antes si se considera que la calidad de la superficie del lingote está siendo afectada adversamente.

Se han desarrollado técnicas para quitar una capa de las caras interiores de los moldes para lingotes y con ellas, lo peor del fisuramiento. Estos procesos, sin embargo, pueden ser relativamente costosos, especialmente en los moldes más pequeños y sufrir las desventajas de que aumenta el tamaño del lingote. Lo último puede o no crear un problema, dependiendo del rango y tipo de producto.

El método usado más frecuentemente implica cepillar toda la superficie interior del molde. Una alternativa es eliminar las áreas más fisuradas con soplete o cincel y completar el tratamiento cepillando. En la práctica, sin embargo, el soplete puede endurecer las capas superficiales, haciendo más difícil la subsecuente eliminación por cepillado.

Se sabe que la renovación de moldes por cepillado es una operación de rutina en por lo menos una de las mayores siderúrgicas de este país y se declara que el proceso es económicamente justificable.

2.4.2 Reparación de moldes fracturados.

Los moldes que fallan prematuramente por fractura son una elección obvia para técnicas de reparación, ya que puede lograrse una larga vida post-reparación, si la reparación comprueba ser satisfactoria. El uso de bandas de acero o de solera alrededor del perimetro del molde para restringir la extensión de una fractura incipiente es una práctica bien conocida que ha sido usada por muchos años. En los últimos 10 - -

a 15 años, sin embargo, las técnicas de soldadura se han desarrollado la suficiente para una aplicación exitosa en moldes de lingotes^{13,14}. Tales métodos se usan ahora muy ampliamente en el extranjero.

Para fracturas, es importante reparar el molde durante los primeros pasos de la formación de la fractura. Mientras más corta y angosta sea la fractura, menor será el costo de la reparación y mayor la efectividad. Las técnicas usadas generalmente incluyen la soldadura de placas o soleras cortas o el punteado a través de la fractura. La operación se efectúa generalmente sin precalentar y usando electrodos de diámetros grandes y se trata de evitar o por lo menos dilatar la extensión de la fractura.

La justificación económica para una reparación de moldes rutinaria depende del tamaño del molde y de la vida extra que se logre. La ganancia en prospecto es mayor mientras mayor sea el molde. Mientras más pronto se haga la reparación será mayor el incremento en la vida útil del molde. Estos puntos se ilustran en la tabla 2.1 que muestra la vida extra aproximada que se requiera para justificar el costo de la reparación, suponiendo que el promedio de vida de un molde sea de 100 coladas, una relación M/L de 1.0 y un costo del molde de 1,100.00 pesos/Ton. de Hierro.

TABLA 2.1 La vida extra requerida para justificar el costo de la reparación del molde.

Tamaño del Molde	Costo de la Reparación	Aumento en la Vida (Fundiciones)
5 Tons.	970 pesos	15
	1940 pesos	30
10 Tons.	970 pesos	8
	1940 pesos	15
15 Tons.	970 pesos	5
	1940 pesos	10

esta tabla está calculada sobre la base de que la justificación de los costos de reparación -- requiere que el consumo del molde post-reparación no sea mayor que el promedio total de consumo del molde.

Las placas de asiento sujetas a fracturas prematuras pueden separarse en forma similar.

CAPITULO 3

INFLUENCIA DEL USO DE LOS MOLDES PARA LINGOTES EN LAS
PLANTAS DE ACERACION SOBRE SU VIDA Y CONSUMO

INTRODUCCION.

Las condiciones bajo las cuales se usa el molde en las plantas de aceración ejercen un considerable efecto sobre la vida promedio lograda del molde, posiblemente mayor, de hecho, que cualquier otro factor para moldes diseñados normalmente. El molde está sujeto a un patrón cíclico más o menos regular de calentamiento y enfriamiento y si se examina en detalle este patrón, pueden localizarse las características que más afectan la vida del molde.

El ciclo normal de las operaciones del molde es como sigue:

- 1.- Los moldes se colocan en el foso de colada.
- 2.- Vaciado de los lingotes.
- 3.- Los lingotes se separan de los moldes.
- 4.- Enfriamiento de los moldes.
- 5.- Limpieza y revestimiento de los moldes.

La temperatura óptima de los moldes para el vaciado de los lingotes es de alrededor de 50°C. Si están demasiado calientes, la calidad del lingote de acero puede afectarse adversamente y aumentar el consumo del molde. Si están demasiado fríos, se aumenta el shock térmico así como también el consumo del molde. También es posible que los moldes que se usen demasiado fríos hayan recogido humedad, la cual produce oquedades en la superficie del lingote. En forma similar, los moldes no pueden limpiarse efectivamente ni pueden aplicarse los revestimientos si los moldes están demasiado calientes digamos 80 a 90°C.

Después de la separación del lingote, los moldes estarán normalmente a una temperatura de más de 600°C; -- por tanto, el enfriamiento es esencial y si no se emplea -- un enfriamiento forzado, el tiempo ocupa la mayor parte -- del ciclo del molde. La Fig. 3-1 muestra una curva típica -- para el enfriamiento de los moldes cuadrados de 4 tonelada -- das en el aire. Para cualquier taller en particular, el -- tiempo real variará de acuerdo con la temperatura de los -- moldes al separarlos de los lingotes, el tipo de caballe -- tes de enfriamiento, el espaciado de los moldes, etc., de -- 9 a 16 hrs.

La temperatura del molde al separarlo del lingote depende del tipo de fundición de acero, del tiempo de -- vaciado y separación, del espaciamiento de los moldes en -- el foso de fundición, etc. El acero efervescente se vacía -- a una temperatura más alta que la mayoría de los aceros -- muertos y por tanto, podría esperarse que el molde se ca -- llente más rápidamente. Evans⁸ demostró, sin embargo, que -- los aceros muertos calientan los moldes más rápido que los -- aceros efervescentes y dan un máximo de temperatura más -- alto en el molde. Además el tiempo durante el cual perma -- nece el lingote dentro del molde antes de la separación, -- es generalmente menor para los aceros efervescentes que -- para los aceros muertos. Un ciclo de molde típico para -- moldes cuadrados de 4 a 7 toneladas, es como sigue:

	Tiempo		Temperatura del
	Hrs.	Mfn.	Molde
Molde colocado	0	0	0°C
Comienza el Vaciado	0	30	60
Termina el Vaciado	1	15	50
Movimiento a la nave de separación.	2	15	600 a 900
Termina la Separación	3	0	600 a 650
Comienza la limpieza del molde	15	0	80
Molde colocado	17	0	60

Los principales factores que afectan la vida y -- el consumo del molde son los siguientes:

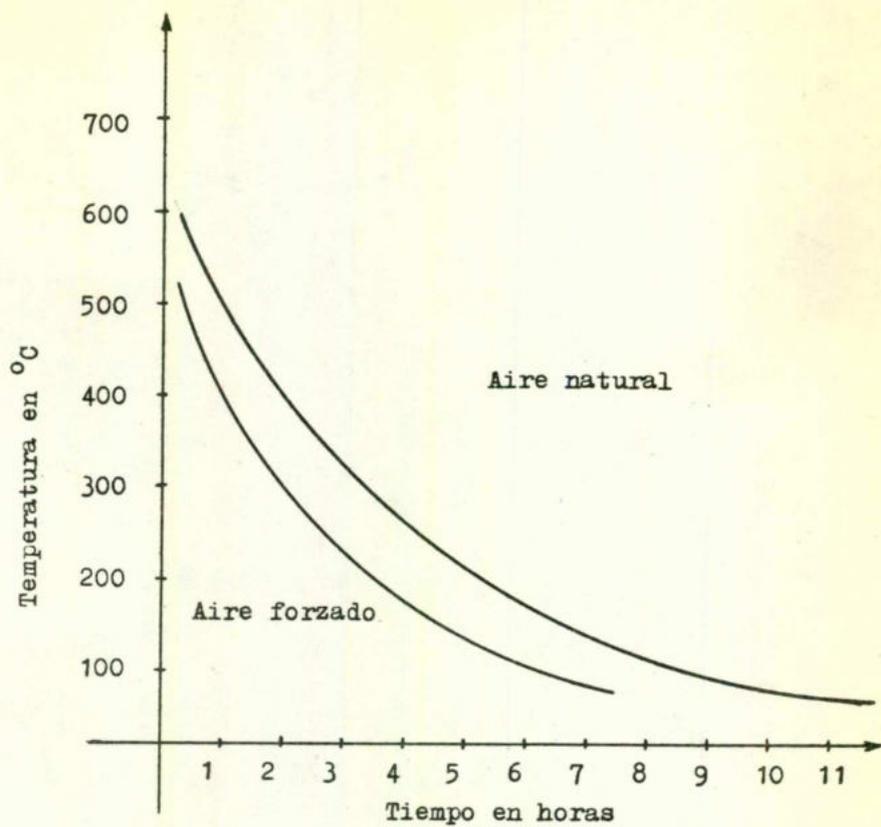


FIG. 3-1 Curva típica de enfriamiento al aire de un molde de 4ton

- 1.- La temperatura del molde en el vaciado.
- 2.- El espaciamiento de los moldes en el foso y el tipo de foso.
- 3.- El tiempo de permanencia, esto es, el tiempo de vaciado a la separación.
- 4.- El tipo de acero y el método de vaciado.
- 5.- Las condiciones de enfriamiento.

Los primeros cuatro factores afectan la distribución de temperatura en el molde y el rango del cambio de temperatura del mismo durante el calentamiento. El factor número cinco está relacionado con la distribución de temperatura y el rango de cambio de temperatura del molde durante el enfriamiento.

3.1 CICLO DE CALENTAMIENTO.

Al comienzo del vaciado, todo el molde está a una temperatura uniforme. El calor se transmite al molde por radiación y conducción del lingote en el proceso de solidificación a través de la cara interna del molde. Este calor se conduce a través de las paredes del molde y un poco se disipa en el aire y los objetos circundantes por convección y radiación de la superficie exterior del mismo.

Las isoterms típicas dentro de la pared del molde en diversos momentos después del vaciado se muestran en la fig. 3-2. Después de 3 ó 4 minutos se forma una garganta entre el lingote y el molde debido a la concentración de la superficie del lingote y la expansión de la pared del molde; la conducción ya no es un factor de transmisión del calor y este factor se reduce proporcionalmente. El tiempo de formación de la garganta de aire corresponde a la diferencia máxima de temperatura entre las caras interior y exterior del molde fig. 3-3 y también al máximo esfuerzo tensil medido en la superficie exterior del molde^{9,10}.

En los moldes redondos, si consideramos una sección horizontal, la distribución isotérmica y por tanto la distribución de esfuerzos, es uniforme en todo el-

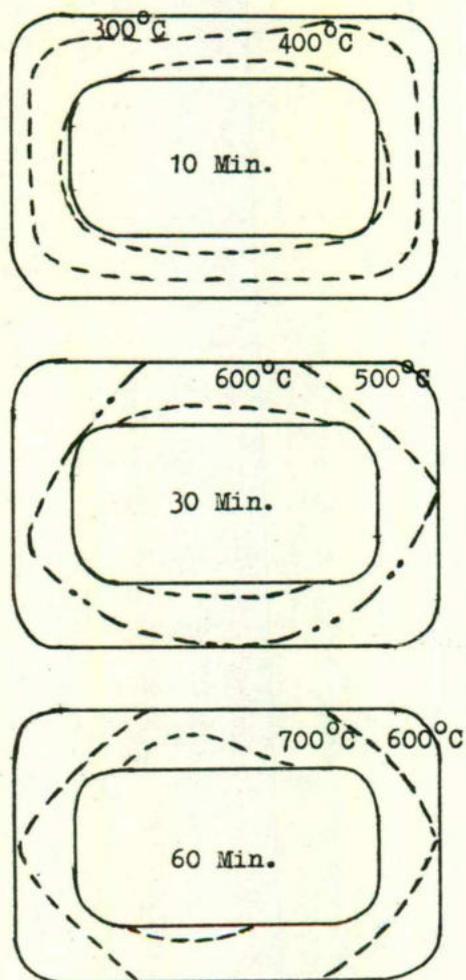


FIG. 3-2 Isothermas en la pared del molde a diferentes tiempos después del vaciado

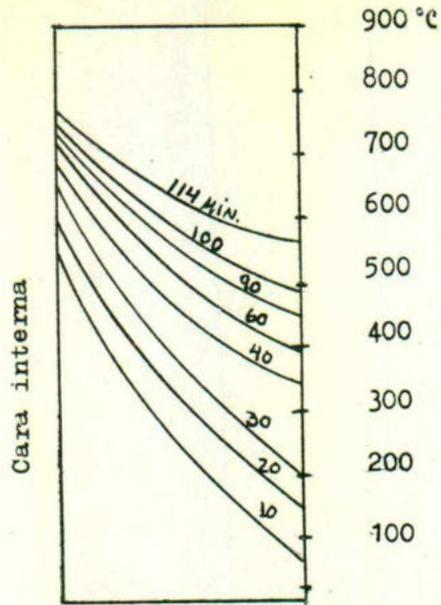


FIG. 3-3 Gradientes de temp. através de la pared del molde después del vacia

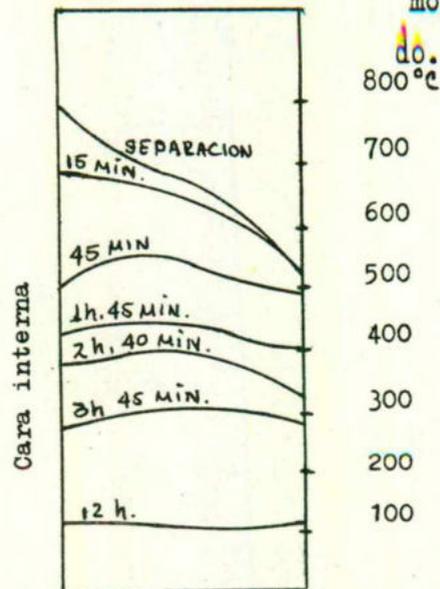


FIG. 3-4 Gradientes de temp. através de la pared del molde después de la separación.

perímetro del molde. Con los moldes de lados múltiples cuadrados o rectangulares sin embargo, el patrón isotérmico se distorsiona y por tanto la distribución de esfuerzos no es uniforme en todo el perímetro del molde. Por esta razón, cuando los moldes fallan por grietas prematuras, estas se inician generalmente en la superficie exterior del molde.

3.1.1 Agrietamiento del Molde.

Debido a que los esfuerzos que producen agrietamiento prematuro ocurren dentro de los primeros minutos del vaciado, los principales factores implicados son los siguientes:

- 1.- La temperatura inicial del molde.
- 2.- El tipo de acero que se está vaciando.
- 3.- El método de vaciado.
- 4.- El espesor de la pared de molde.

Varga¹⁵ calcula las siguientes cantidades para el rango de expansión térmica del hierro del molde a diversas temperaturas.

Rango Promedio hasta 700°C	1.54×10^{-3}	mm/mm/100°C
Rango Promedio de 740 a 780°C	Nulo	
(Transformación eutéctica)		
Rango Promedio de 780 a 900°C	1.73×10^{-3}	mm/mm/100°C
Rango Promedio hasta 900°C	11.69×10^{-3}	mm/mm/100°C

Se ha demostrado que la cara interior del molde alcanza su máxima temperatura entre 900 y 1000°C a una hora ó una hora y media después de terminado el vaciado. De aquí que las capas internas de la superficie del molde estarán sujetas a una expansión térmica considerable produciendo grandes esfuerzos tensiles en la cara exterior del molde. Estos esfuerzos alcanzan su valor máximo dentro de los primeros minutos del vaciado, en parte debido a que el gradiente de temperatura a través de la pared del molde se encuentra entonces al máximo y en parte debido a que el hierro del molde se hace más plástico sobre 500°C, pro-

duciendo de esta forma un relajamiento de esfuerzos. Evans⁸ encontró que el máximo gradiente de temperatura para moldes de 10 a 15 Tons., eran respectivamente de 550 y 600°C, un poco después del vaciado, en comparación con los 800°C antes de la separación Figs. 3-3 y 3-4. Mientras menor sea la temperatura inicial del molde, mayor será la diferencia de temperatura entre las caras interior y exterior del mismo, y por tanto, el esfuerzo producido será mayor. Por consecuencia los moldes más fríos están propensos a sufrir grietas prematuras que los moldes tibios.

La temperatura de vaciado del acero varía de acuerdo con el tipo de acero que se vacíe y afectará proporcionalmente la distribución de temperatura en la pared del molde. El vaciado directo generalmente es más rápido que el vaciado cuesta arriba y por tanto producirá un aumento de esfuerzos más rápido.

Como ya se explicó, las paredes de molde más gruesas dan un mayor grado de relajamiento de esfuerzos y por tanto reducen las posibilidades de agrietamiento del molde.

3.1.2 Fisuramiento del Molde (CRAZING)

La mayoría de los moldes que no fallen por agrietamiento se desearán eventualmente por fisuramiento de la cara interior. Este es el patrón de trabajo que aumenta en la cara interior después de ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento. Esta asociado principalmente con las altas temperaturas alcanzadas por la cara interior y por el tiempo que se mantienen estas temperaturas. De aquí que los principales factores implicados son:

- 1.- La temperatura inicial del molde.
- 2.- El tipo de acero que se vacíe.
- 3.- El espaciamiento de los moldes en el foso de colada y el tipo de foso.

4.- El tiempo del vaciado a la separación.

Mientras mayor sea la temperatura inicial del molde, mayor será la temperatura de la cara interior. La temperatura de vaciado que varía con el tipo de acero tendrá un efecto similar. La distribución de temperatura dentro del molde -- también variará de acuerdo con el diseño, la -- conicidad y el espesor de la pared del mismo.

La temperatura máxima alcanzada en la pared -- interior del molde dependerá también de la -- pérdida de calor de la superficie exterior del mismo. Es importante, por tanto, que los moldes deben espaciarse adecuadamente en el foso de -- fundición. Si los moldes se colocan demasiado -- juntos, digamos, a menos de 10 ó 12 pulgadas -- de separación, se restringe la pérdida de calor. Los moldes que se colocan en fosos hundidos, en lugar de sobre carros de fundición, pierden menos calor ya que el calor se refleja en las paredes del foso.

Quizás el factor más importante es el tiempo -- entre el vaciado y la separación, ya que el -- tiempo durante el cual la pared interior del -- molde permanece a una temperatura alta se relaciona directamente con este factor.

Como ya se indicó, el fisuramiento puede ser -- hundido, el cual se asocia con una oxidación -- localizada en la superficie interior del molde; o saliente, que se asocia con el crecimiento -- del hierro del molde. Ambos casos dependen del tiempo a altas temperaturas. Mientras mayor -- sea la temperatura y el tiempo implicados, mayor será el efecto. De aquí la importancia de -- reducir el tiempo de vaciado a separación al -- mínimo posible. El efecto de la pronta separación sobre la vida del molde se ilustra por -- Jackson¹², para moldes de plancha de 10 Tons. -- Fig. 3-5.

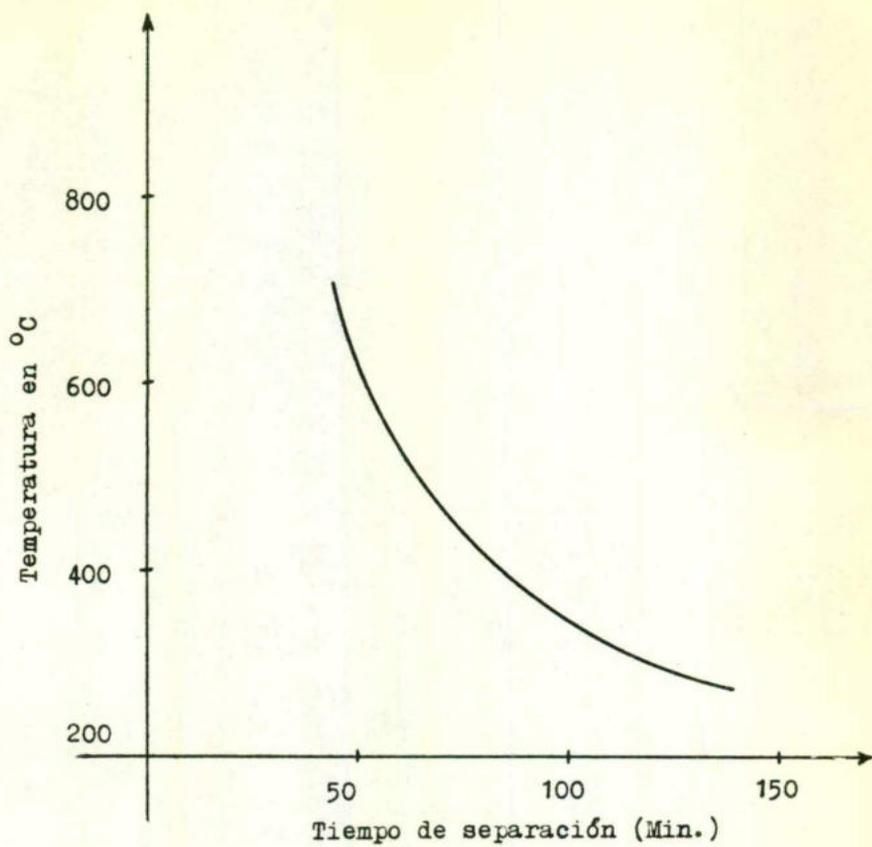


FIG. 3-5 Efecto de una separación prematura sobre la vida del molde

3.2 CICLO DE ENFRIAMIENTO.

El fisuramiento se desarrolla gradualmente después de un período de muchos ciclos de enfriamiento y calentamiento del molde, y el fisuramiento avanzado se asocia generalmente con las fracturas. Tal fracturamiento comienza generalmente en un extremo abierto sobre la cara del molde, extendiéndose a todo lo largo del mismo hasta que llega a las esquinas. El enfriamiento forzado aumenta el esfuerzo localizado en la cara interior y la experiencia ha demostrado que el enfriamiento rápido del molde, especialmente con agua, puede reducir considerablemente su vida, intensificando el desarrollo del fisuramiento y el correspondiente fracturamiento.

3.2.1 Enfriamiento Natural por Aire.

Con el enfriamiento normal por aire, los moldes se colocan en caballetes elevados permitiéndose que se enfrien por convección natural de aire a través de los moldes. En la fig. 3-1 se muestra una curva típica de enfriamiento para un molde cuadrado de cuatro toneladas. El tiempo necesario para el enfriamiento, a partir de la temperatura promedio a la separación 600°C , varía de acuerdo con el tamaño, peso y el espaciado de los moldes en el caballete. Evans¹⁵ efectuó una investigación comprensiva sobre los ciclos de temperatura en moldes de 15 y 10 Tons. Las tablas 3-1 y 3-2 muestran los efectos de los tiempos de enfriamiento recortados sobre las temperaturas máximas que los moldes alcanzan en uso. Es evidente que la restricción de los tiempos de enfriamiento y el vaciado en moldes calientes puede acelerar el fisuramiento y reducir drásticamente la vida del molde.

Estos moldes alcanzaron sus máximas temperaturas aproximadamente 90 minutos después de iniciar el vaciado. De esto se deduce que si los tiempos de vaciado a separación son de 90 minutos o más, el tiempo de enfriamiento del molde será

el máximo; pero si pueden reducirse los tiempos de vaciado a separación, entonces se obtiene -- un efecto proporcionado en el tiempo de enfriamiento del molde. Marchall¹⁰ calculó cantidades correspondientes a moldes cuadrados de 4 Tons.- que demuestran que pueden ahorrarse hasta dos - horas de tiempo durante el enfriamiento, reduciendo drasticamente los tiempos de separación-Tabla 3-3.

Practicamente, sin embargo, no es posible separar en menos de 45 minutos y el tiempo ahorrado en el enfriamiento es menor.

En la práctica, el método de enfriamiento del - molde que se adopte depende del espacio que se disponga y de lo económico que resulte dedicarse ese espacio a las instalaciones de enfriamiento de moldes. Tampoco debe olvidarse que el tiempo implicado en el enfriamiento normal por aire -- impone el uso de grandes cantidades de moldes.- La llegada de la fabricación de acero al oxígeno ha aumentado en múltiples formas la fabricación de acero y dado que estos procesos de alto rango de producción generalmente necesitan edificios menores que los procesos de solera abiertos reemplazados, los fosos de fundición también tienden a ser menores. La viabilidad económica de dedicar áreas para el almacenaje y -- enfriamiento de moldes se encuentra, por lo tanto, en revisión constante y deben considerarse los métodos de enfriamiento de moldes acelerado.

3.2.2 Enfriamiento Acelerado de Moldes.

Los métodos practicables para el enfriamiento - acelerado de moldes incluyen:

- 1.- El enfriamiento por agua.
 - a).- La inmersión del molde en agua.
 - b).- Chorros de agua.
 - c).- La aplicación de agua por aspersion.

La inmersión total del molde en agua se practica en algunas siderúrgicas donde el espacio está severamente limitado. Estas compañías logran un intervalo (tiempo de vaciado a vaciado) del molde de 2 hrs. Este método es completamente efectivo debido a que el tiempo de enfriamiento se puede reducir a unos cuantos minutos. También es relativamente flexible. El tiempo de inmersión y la condición del molde en la inmersión pueden controlarse para lograr el óptimo rango consistente de enfriamiento con una reducción mínima en la vida del molde. El factor principal en el enfriamiento del molde que afec-

a).- Inmersión del molde en agua.

hidrógeno. De estos tres métodos, el uso del agua es indudablemente el más simple y fácil de aplicar, pero tiene el inconveniente de que reduce la vida del molde. Las cantidades publicadas con respecto a esta reducción varían del 5% al 50%. Puede ser, sin embargo, que comenzando a usar el agua cuando el molde esté al "negro-caliente", el tiempo del ciclo del molde podría aun acortarse considerablemente, comparado con el enfriamiento normal por aire, sin ninguna reducción significativa en la vida del molde. El uso del agua podría todavía ser adverso a la calidad del lingote, sin embargo, si los moldes se enfrían a menos de aproximadamente 150°C. El agua puede penetrar en las fisuras de la superficie del molde y aumentar las erupciones en la superficie del lingote y/o provocar la inclusión de hidrógeno.

1.- Enfriamiento por agua.

2.- Aire a presión.

ta su vida está relacionado con los -- altos gradientes de temperatura localizados dentro de las paredes del mismo. Se esperaría que una separación más -- rápida, reduciendo la temperatura máxi- ma del molde, reduciría los gradientes de temperatura y el efecto dañino de - la inmersión en agua. La formación y - ruptura de la película de vapor de - - agua durante la inmersión, sin embargo podría aumentar los gradientes de temperatura localizados en la superficie y los esfuerzos localizados durante el enfriamiento. Para eliminar esta posibilidad y mejorar el control del en- - friamiento, sería preferible usar una- aspersion fina de agua.

b).- Chorros de agua.

El enfriamiento de los moldes por chorros de agua tiene todas las desventajas asociadas con la inmersión en - -- agua, sin ventajas que las compesen. La interpretación más simple del enfriamiento por chorros de agua implica el uso de mangueras que lancen el agua so bre los moldes en el foso. Aditamentos más complicados podrían comprender caballetes especialmente preparados con chorros en la parte superior. Esto daría un enfriamiento más uniforme, pero ningún aditamento puede evitar la re-- ducción en la vida del molde.

c).- Aplicación de agua por aspersion.

El uso de aspersiones de agua debería asegurar una distribución más uniforme y controlada del agua sobre la super-- ficie del molde, y reduciendo el tiempo de contacto de agua y la superficie

del molde evitaría hasta cierto punto - los esfuerzos localizados debidos a las diferencias de rangos de enfriamiento.- El rango de enfriamiento por aspersión sería menor que en la inmersión o los chorros de agua, pero, aún así, mucho más rápido que en el enfriamiento natural por aire. Consecuentemente, uno esperaría lógicamente que el efecto sobre la vida del molde sería un poco menos drástico que en la inmersión o los chorros de agua. Hay pocas referencias publicadas sobre el efecto del enfriamiento del molde por aspersión, pero en la siderúrgica rusa Kuznetsk¹⁷ usa casi -- 100% de enfriamiento por aspersión durante el verano y aproximadamente el -- 33% durante el invierno. Se reporta que la aspersión de agua en los moldes en la siderúrgica Kokuran Steel Works de Japón¹⁸ ha dado un consumo de molde -- alto, en comparación con el enfriamiento natural por aire.

Parece aceptarse generalmente que el enfriamiento por agua de los moldes es -- dañino a la vida de los mismos, pero -- preferiblemente al uso de moldes calientes.

2.- Enfriamiento por aire a presión.

El rango de enfriamiento por aire puede aumentarse por convección forzada. Mientras que se concede que el tiempo de enfriamiento puede -- reducirse a la mitad con esta técnica, con -- poca o ninguna pérdida en la vida del molde, son evidentes las dificultades técnicas debido a los altos requerimientos de potencia. El método no ofrece ventajas económicas sobre el enfriamiento natural por aire.

TABLA 3-1.- Efecto del tiempo de enfriado del molde en la temperatura máxima alcanzada en uso para moldes de plancha de 15 Tons.

	20h	10h	9h	4h
Temperatura inicial del molde en el vaciado °C.	50/60	140/160	150/185	330/365
Temperatura máxima a $\frac{1}{4}$ de la cara interior °C.	855/860	855/885	915/935	980/995

TABLA 3-2.- Efecto del tiempo de enfriado del molde en la temperatura máxima alcanzada en uso para moldes de 10 Tons.

	Normal	16h	10/12h
Temperatura inicial del molde en el vaciado °C.	20/50	85/95	120/150
Temperatura máxima a $\frac{1}{4}$ de la cara interior °C.	885	910/920	925/945

TABLA 3-3.- Efecto del tiempo de separación sobre el tiempo requerido del molde.

Tiempo de Vaciado a separación	Tiempo Promedio de Enfriamiento para alcanzar 100°C.
15 min.	4 Hrs.
30 "	5 "
45 "	6 "
1 Hra.	6.5 Hrs.
1.5 Hrs.	6.75 Hrs.

C A P I T U L O 4

ESTRUCTURA Y COMPOSICION DE LOS MOLDES PARA LINGOTES

Introducción:

Se han efectuado largos y exhaustivos estudios - durante muchos años con el fin de lograr la comprensión de la estructura básica del hierro de moldes para lingotes, - siendo el objetivo obtener una vida óptima del molde a un costo mínimo. A pesar de esto, nuestro conocimiento sigue siendo casi totalmente empírico. Pero es posible formular ciertos principios y establecer rangos de composición que se ha encontrado que dan los mejores resultados en la práctica.

4.1 Propiedades deseables que debe tener el material del molde.

Se requiere que los moldes para lingotes soporten en servicio un tratamiento cíclico más o menos regular - de calentamiento y enfriamiento sobre un rango de temperatura de aproximadamente 900 grados centígrados en la cara interior y de 650 a 700 grados centígrados en la cara exterior.

La periodicidad de este tratamiento varía de acuerdo con el tamaño del molde y el tipo de práctica de la fabricación del acero.

A través de su vida el molde debe sufrir tan poco cambio como sea posible en resistencia, estructura, superficie, características y dimensiones. El material del que se haga el molde deberá ser barato y fácil de conseguir y el proceso de fabricación debe ser simple reproducible y confiable. Si examinamos las propiedades deseables de los moldes para lingotes más cuidadosamente, a la luz de las condiciones de servicio, es evidente que las siguientes son pre-eminentes;

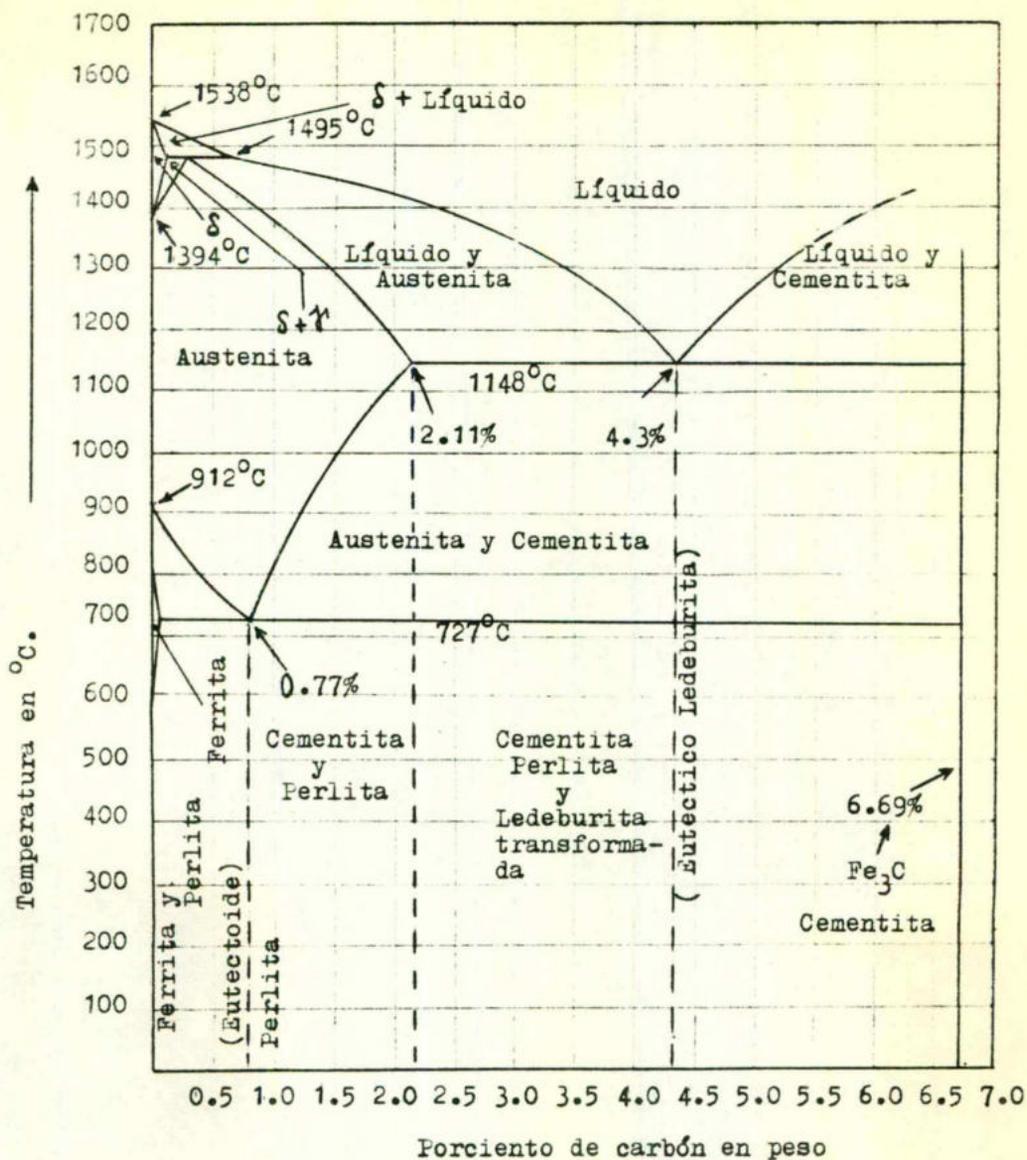
- 1) Resistencia al choque térmico, crecimiento de grano y oxidación.
- 2) Conductividad térmica relativamente alta y expansión térmica baja, con el objeto de disipar el calor rápidamente con un cambio dimensional y/o aumento de esfuerzos mínimo.
- 3) Una estructura uniforme con el fin de minimizar la variación de esfuerzos dentro del molde.
- 4) Resistencia y ductilidad suficiente para eliminar el agrietamiento y soportar el manejo mecánico.

El material perfecto no ha sido inventado aun y nunca lo será, pero el hierro colado satisface muchos de los requerimientos y ha sido por muchos años el material tradicional para la fabricación de moldes para lingotes.

4.2 Estructura del Hierro Colado.

El hierro colado es un material complejo y su estructura varía considerablemente de acuerdo a la composición, método de fabricación y condiciones de colada. Básicamente es una aleación de hierro-carbono, con más de 2% de contenido de carbono. La referencia al diagrama de fase, hierro-carbono en la figura 4.1, indica que en el rango más alto de carbón eutéctico (ledeburita) se forma en un contenido de carbono de aproximadamente 4%. Las aleaciones de hierro-carbono que contienen entre 2 y 4.3% de carbono se llaman hipoeutécticas y cuando tienen más del 4.3% de carbono se llaman hipereutécticas.

Una característica distintiva de los hierros colados hipereutécticos es la presencia de carbono libre que precipita en la forma de grafito en la solidificación (Fig. 4.2). Con los hierros hipoeutécticos, sin embargo, la cementita puede formar núcleo más rápidamente que el grafito y si el rango de enfriamiento es lo bastante rápido, se suprime la formación de grafito y se obtiene un hierro "blanco" consistente en una matriz de perlita y ledeburita transformada. Tal estructura es extremadamente dura y frágil y consecuente-



* FIG. 4-1 Diagrama de fase de la aleación binaria Hierro-Carbono.

*(Tomado del Metals Handbook)

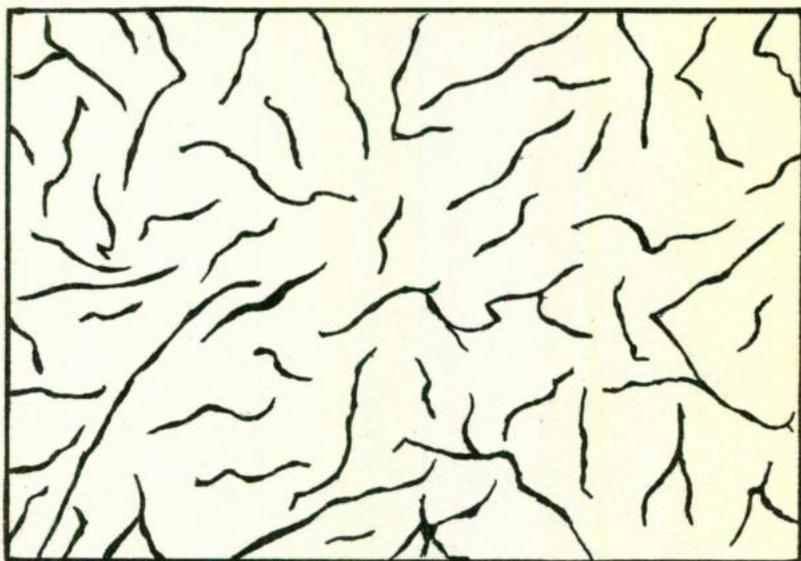


FIG. 4-2 Láminas de grafito

mente de poco uso para la fabricación de moldes, aún suponiendo que los moldes para lingotes pudieran enfriarse lo suficientemente rápido en la práctica de fabricación. El enfriamiento más lento produce una estructura consistente en laminas de grafito incluidas en una matriz de perlita. El enfriamiento muy lento permite que las laminas de grafito crezcan a expensas de la perlita y la estructura que se obtiene consiste en laminas de grafito incluidas en una matriz de ferrita. Los rangos intermedios de enfriamiento producen una estructura intermedia llamada comúnmente hierro "atruchado".

Para hierros de composición hipereutéctica la formación de grafito se suprime más difícilmente y normalmente no pueden producirse hierros blancos.

Como ya se mencionó, los moldes fallan principalmente por fisuramiento o por fracturamiento. Lo primero ocurre como resultado de la oxidación de la red de grafito en la capa interior de la superficie del molde aunado al crecimiento del hierro debido al cambio de volumen al pasar a través del punto de transición. Generalmente se concede que un hierro suave de estructura abierta en el cual se presenta la ferrita asociada con frecuencia a las laminas de grafito; facilita la formación de fisuramiento.

El agrietamiento por otro lado, se asocia con una estructura más dura y más frágil obtenida en el hierro con una estructura completamente perlítica, a veces con autéctico de fósforo de hierro presente. En el pasado, la práctica en diferentes plantas de aceración ha tendido hacia la fabricación de hierros perlíticos, pero siempre ha existido una corriente de opinión favorable a una matriz ferrítica. Esto es, no obstante, algo académico, ya que en la práctica no puede obtenerse una estructura totalmente ferrítica.

La estructura ideal del molde para lingotes debe, por tanto, encontrarse entre los extremos de un hierro ferrítico con una red fina de laminas de grafito y un hierro totalmente perlítico con laminas gruesas de

grafito, teniendo en cuenta que el tamaño del molde y el rango de enfriamiento de la fundición ejercen un efecto considerable sobre las estructuras obtenibles. Esto podría verse muy simplemente como un intermedio entre una estructura perlítica propensa al agrietamiento y una estructura ferrítica propensa al fisuramiento, pero en la práctica esta posición es mucho más compleja. La estructura del molde es casi invariablemente heterogénea y varía de la superficie al centro, especialmente si se incluyen secciones de espesores muy diferentes con rangos de enfriamiento diferentes. Por esta razón se funden apéndices del molde con el fin de comprobar la estructura del mismo y el análisis puede dar resultados equivocados, a menos que se interprete con cuidado.

Suponiendo que las técnicas de muestreo se apliquen correctamente, las comprobaciones analíticas de los apéndices se correlacionan bien con las muestras del metal caliente tomadas de las cucharas donde se colaron los moldes⁰. En forma similar, hay una correlación entre la estructura del molde y la del apéndice, para un tipo particular de molde bajo ciertas condiciones de fundición, que puede usarse como guía para la estructura de la pared del molde.

En un molde no usado, las capas internas de la superficie y el fondo tienden a ser ferríticas. A mayores profundidades de la superficie, la estructura cambia de ferrítica a perlítica o parcialmente perlítica. Se ha observado diversamente que este cambio es progresivo a $\frac{1}{2}$ ó 1 pulgada. Al final de esta zona, la estructura tiende a ser más estable, con un engrosamiento simultáneo en las laminas de grafito.

Durante la vida del molde ocurre la decarburización de la superficie y suponiendo que se evite la falla prematura por fracturamiento, la capa ferrítica puede extenderse hasta una profundidad de $\frac{1}{2}$ pulgada ó más. Esto se acompaña por la penetración del óxido, oxidación de las laminas de grafito y la conocida red de fisuramiento. Las superficies exteriores del molde también cambian al aumentar la vida de éste, pero los cambios son menos

drásticos que en la superficie interior ya que las temperaturas alcanzadas son mucho menores. Si la estruc-tura inicial es perlítica, entonces el ciclo repetido de calentamiento y enfriamiento tiende a dar alguna -- esferoidización y eventualmente la proporción de ferrita aumenta y se asocia generalmente con las laminas de grafito.

4-3 EFECTO DE LA COMPOSICION SOBRE LA ESTRUCTURA Y PROPIEDDES.

a) Carbono Total.

El contenido de carbono en los hierros para moldes - de lingotes se presenta en tres formas:

- 1.- Carbono combinado como cementita en la perlita.
- 2.- Carbono libre como laminas de grafito.
- 3.- Carbono combinado como Fe_3C ó (Fe_3C/Fe_3P) exis--
tente en forma libre.

Consecuentemente cuando se habla de la composición - del hierro, es usual cuantificar el contenido total de carbono, los contenidos de carbono combinado y de carbono grafitico.

Los hierros hipereutéticos, si se enfrían lentamente antes de la solidificación, pierden algo de carbono como grafito, debido a ruptura de la cementita -- primaria. Esto se separa en la escoria como Kish. Se ha afirmado que la presencia de Kish resulta en una estructura abierta y propensa al fisuramiento y el - Sub-Comité¹⁹ de moldes para lingotes recomienda un nivel de carbono total que de apenas una combinación eutética o ligeramente hipereutética sin formación excesiva de Kish. Sin embargo, es esencial una estructura grafitica adecuada con el fin de obtener -- una buena resistencia al choque térmico y alta con--ductividad de calor.

Como ya se ha establecido, las estructuras perlíti--cas están asociadas con una tendencia a la separa- -ción o agrietamiento prematuro del molde, particular

mente con las secciones más grandes y pesadas. La relación entre la estructura perlítica y el agrietamiento depende, sin embargo, del separamiento laminar de la perlita. La perlita fina puede dar una estructura propensa a las grietas, mientras que la perlita gruesa parece ser menos dañinas.

Consecuentemente, el carbono combinado debe mantenerse bajo, especialmente en los moldes grandes y debe evitarse, si es posible, la presencia de cementita.

Las investigaciones realizadas por el Grupo de Técnicas de Fundición del Sub-Comité de Moldes para lingotes de BISRA han establecido que la cementita libre, frecuentemente asociada con complejos de carburo de hierro/fosfuro de hierro, se presentan con frecuencia en los moldes sujetos a agrietamiento prematuro. Pero hay una corriente de opinión que considera que tales complejos se encuentran en la mayoría de los moldes grandes. La forma física en la que existe el carburo de hierro libre o carburo de hierro/fosfuro de hierro, parece ser la característica esencial relativa al comportamiento del molde para lingotes en servicio.

Encuestas de literatura disponible confirman que la mayoría de las fundiciones pretenden un contenido total de carbono de 3.6 a 3.9% o un carbono equivalente (CE) de 4.2 a 4.5% (donde $CE = \%C + 1/3\% Si + 1/3\% P$), obteniendo de esta forma una composición eutéctica o ligeramente hiper-eutéctica. Los resultados de diversas investigaciones para determinar el contenido total de carbono óptimo con respecto a la vida del molde, han dado, sin embargo, casi exclusivamente resultados indeterminados.

El balance, parecería que el contenido total de carbono debería estar en el rango eutéctico o ligeramente hiper-eutéctico con alto contenido de grafito y bajo carbono combinado.

b) Silicio.

El contenido de carbono para la composición eutéctica se afecta por otros elementos, el silicio, que -- reduce el contenido de carbono requerido para la composición eutéctica, de manera que a 3% de silicio, -- el carbono eutéctico se reduce de aproximadamente -- 4.3 a 3.5%. En la práctica, el efecto de agregar silicio es aumentar la grafitización y reducir el carbono combinado ya que los mayores contenidos de silicio necesitan una temperatura de colada más alta, en la cual aumenta la solubilidad del carbono. Así, el aumento de silicio tiene un efecto similar al disminuir el rango de enfriamiento. Consecuentemente, la estructura obtenida depende de la interacción del contenido de carbono total, silicio y del espesor de la colada. Por esta razón es conveniente consultar frecuentemente el carbono equivalente, que toma en cuenta el contenido de silicio y la composición eutéctica, en lugar de considerar solamente el carbono total. El aumento de silicio reduce el contenido total de carbono combinado y por tanto aumenta la -- proporción de ferrita. Los hierros de más alto silicio tienden a ser más ferríticos. El silicio, sin -- embargo, se disuelve en la ferrita y tiene un efecto fragilizante sobre ella, contrarrestando así el efecto benéfico de reducir el contenido de carbono combinado.

En vista de los efectos conocidos del silicio sobre el hierro, sería lógico que los grandes aumentos de silicio serían beneficiosos para las secciones más delgadas y los bajos contenidos del mismo serían buenos para las secciones más gruesas y pesadas.

El sub-Comité para moldes de lingotes¹⁹ ha investigado el efecto del contenido de silicio en la vida de diversos tipos y tamaños de moldes. El resultado parece favorecer los niveles de bajo silicio, para moldes hasta de 7 toneladas de capacidad, pero para los moldes grandes, la cantidad no es tan clara. El trabajo publicado después del tercer reporte del Co-

mité tiende en general a confirmar sus hallazgos. Bartolani, Damicheli y Longaretti²⁰ compararon los moldes para lingotes de 2 a 5 tons. de capacidad producidos - en cubilotes de revestimiento ácido y de revestimiento básico. Los producidos en el cubilote básico tenían -- mayor carbono total y manganeso, y menores contenidos de silicio y azufre, luego se encontró que daban mejor servicio aquellos moldes equivalentes producidos - en un cubilote de revestimiento ácido. Bauer²¹, Duflot y Gibeau compararon los moldes producidos en dos fundiciones y encontraron una diferencia significativa en la vida del molde. Los mejores resultados se obtuvieron en moldes que tenían los contenidos de carbono total y manganeso más altos y los contenidos más bajos de Silicio.

Por otro lado, Bobrovskikh y Nicolae²² efectuaron estudios estadísticos en la vida de los moldes para lingotes y encontraron que al aumentar el contenido de -- silicio se mejora la vida promedio del molde. Ferry²³ examinó 23 moldes nuevos y 10 usados para establecer -- las diferencias estadísticas y no encontró efectos notables en contenido de carbono ó silicio. Joseffson y Backstrom²⁴ describieron un método para probar muestras pequeñas de hierro para moldes de lingotes, para determinar la susceptibilidad al agrietamiento por fisuras. Para los hierros probados que eran en su mayoría moldes fuertemente hipereutéticos, se encontró que un -- aumento del 1 al 2% de silicio produce la cantidad de agrietamiento por fisuras, pero se pensó que el factor determinante era la estructura cerca de la superficie.

P. Rocquet y M. Olette²⁵ investigaron el crecimiento de los hierros colados y concluyeron que el crecimiento es pequeño si la temperatura no alcanza el punto de transformación Ac_1 ($780^{\circ}C$). El silicio aumenta el punto de transformación y, por tanto, el aumento de silicio -- deberá ser benéfico al dilatar la aparición del fisuramiento. Si por el contrario, los moldes exceden la temperatura de transformación, entonces el bajo silicio -- puede ser benéfico ya que el crecimiento aumenta con -- el silicio. Una prueba estadística efectuada en moldes

cuadrados WEU de 4 tons., en Steel Peech-Tozer²⁶ en 1966, incluyendo aproximadamente 5000 moldes mostr6 concluyente que los contenidos de silicio de 0.9 a 1.2% resultaban en una vida promedio del molde mayor que los contenidos de silicio de 1.2 a 1.4%. Siendo una diferencia de 0.1% de silicio equivalente a una diferencia de tres - - pulgadas en la vida del molde. La forma predominante de falla para estos moldes fue el fisuramiento. El sub-comité de Moldes para lingotes recomienda un contenido de silicio de 0.8 a 1.5% para moldes menores de 10 tons., de capacidad y de 1.5 a 2.0% para moldes mayores de 10 tons., de capacidad.

c) Fosforo.

El f6sforo en el hierro colado tiene un efecto poco apreciable en la grafitizaci6n y no es por tanto, un agente grafitizante. El aumento en el f6sforo, mejora la fluidez, pero al costo de una mayor fragilidad y una tendencia mayor a la porosidad en las secciones gruesas. Las adiciones de hasta aproximadamente 0.8% aumenta la resistencia a la tensi6n. Esto ocasiona la posibilidad de aumentar la proporci6n de eut6ctico Fe_3P .

Este eut6ctico consiste en una soluci6n de f6sforo en hierro alfa, fosfuro de hierro (Fe_3P) y posiblemente cementita. Se forma como una microestructura caracteristica de espiguilla y se ha observado con frecuencia en los moldes que fallan por agrietamiento prematuro.

El Sub-Comit6 de Moldes para Lingotes recomienda que el contenido de f6sforo de los moldes mayores de 10 tons. de peso debe mantenerse en menos de 0.06%. Para los moldes peque1os, calculan los resultados de varias pruebas que indican que los niveles de f6sforo hasta de 0.20%, cuando se encuentran asociados con bajo silicio, pueden ser ben6ficos.

Parece no haber muchos trabajos publicados sobre el efecto del f6sforo en la vida del molde para lingotes despu6s del reporte del Sub-Comit6. Duflot²⁷ investig6 las posibles causas del agrietamiento en los moldes de 3 a 5 tons. y concluy6 que contenidos de f6sforo manores de 0.2% no se observaba ning6n efecto da1ino del f6sforo. Sobre - -

0.2% se reducía la vida de algunos moldes. Duflot y Derot²⁸ investigaron los moldes de más de 3 tons. - de peso y establecieron que el contenido de fósforo superior al 0.2% contribuía al agrietamiento.

Los efectos del contenido del fósforo de hasta -- 0.45% han sido investigados en la fundición de la - Compañía de Ingeniería Distigton. Tales moldes dan vida satisfactoria; pero se necesita cuidado para - asegurarse de que las fases del fosforo de hierro - libre estén en forma física requerida si quiere evitarse el agrietamiento prematuro. El contenido de - fósforo debe ser inferior al nivel en el cual, bajo determinadas condiciones de fabricación, la fase del fosforo libre comienza una red dentro de la estructura.

La prueba estadística efectuada en Steel Peech & -- Tozer²⁶ sobre moldes cuadrados de 4 tons., trataba de confirmar o desmentir la creencia de que el bajo silicio en combinación con un alto fósforo resulta benéfico. De hecho, los resultados demostraron que el efecto benéfico del bajo silicio era muy significativo estadísticamente, ya fuera en combinación -- con alto o bajo contenido de fósforo. El efecto del fósforo, sin embargo, a pesar de ser ligeramente -- benéfico hasta 0.2%, no demostró una significación estadísticamente en combinación con altos o bajos - contenidos de silicio.

d) Azufre.

Generalmente se considera al azufre como dañino al hierro del molde para lingotes por lo que se hacen esfuerzos para mantener bajo el contenido. Cuando - se presenta como sulfuro de hierro tiende a retardar la grafitización y también aumenta la contracción. Como la presencia de sulfuro de hierro es altamente indeseable, el manganeso debe presentarse - en cantidades suficientes para recoger el azufre -- como sulfuro de manganeso.

Un suceso notable en muchos moldes para lingotes es la existencia de una zona rica en azufre en las superficies interior y exterior. Se pensó que esto se debía a los restos de azufre del corazón de arena. Las pruebas en las cuales los corazones de arena se revestían con compuesto portadores de azufre no confirmaron ésto, sin embargo,, la causa de la segregación de azufre, que generalmente ocurre entre $1/16$ y $1/8$ de pulgada bajo la superficie parece yacer en cualquier otro lugar. Una posible explicación es -- que el líquido rico en azufre asociado con los -- cristales de ferrita que se forma inmediatamente en la fundición, aparece como segregación.

Mientras que esto se considera indeseable, no ha -- habido evidencia concluyente de que la presencia de zonas superficiales ricas en azufre sea dañina a la vida del molde.

El bajo punto de fusión de sulfuro de manganeso -- causa una segregación extensiva del sulfuro a través de la fundición y se han hecho muchos intentos para establecer las estructuras del molde para lingotes sobre la base de las huellas de azufre. Aún -- no se ha obtenido definitiva, pero el sub-comité -- de Moldes para lingotes sugirió que las estructuras dendríticas o granulares-dendríticas finas parecen dar los mejores moldes.

Beaujard y Bechet²⁹ examinaron "redondillas" de -- 90 mm. (3.6 pulg.) y de 150 mm (6.0 pulg.) producidas en tres cubilotes diferentes. Encontraron numerosas inclusiones de sulfuro de hierro y de sulfuro de manganeso. En temperaturas de alta fusión, se -- encontraron alineadas a lo largo del eje de las -- dendritas. En las temperaturas de baja fusión estaban distribuidas indiscriminadamente, pero formando grandes grupos en algunos lugares. Se establecieron sin embargo, que la estructura obtenida era una función de la masa de la fundición, así como la temperatura de fusión. El Sub-Comité sugirió que el -- efecto del azufre es ocultado casi totalmente por --

otras variantes, pero las evidencias indican que es de seable un bajo contenido de azufre.

En un intento por obtener bajos contenidos de azufre, algunas fundiciones han experimentado con un tratamiento de ceniza de sosa, como lo reportó el Sub-Comité, y también Gibeau³⁰. Todos están de acuerdo en que la vida del molde se mejora, pero no es cierto que esto se deba solamente al bajo contenido de azufre, ya que el efecto del tratamiento de ceniza de sosa es también -- para reducir el contenido de silicio y quizás produce cambios en la estructura del hierro.

Harris³¹ establece que en combinación con manganeso y bajas temperaturas de fusión, el exceso de azufre produce marcas de rayas y puntos fríos que provocan el -- agrietamiento prematuro de los moldes y lingotes pegajosos.

e) Manganeso.

El manganeso es también en cierta medida productor de -- hierro blanco y además, la cantidad excesiva de este en combinación con azufre tenderá a retardar la grafitización, a refinar y endurecer la perlita y a producir un hierro más propenso a las grietas.

En las cantidades presentes generalmente, sin embargo, -- su efecto es ligero y puede considerarse como, un antidoto a los contenidos de silicio excesivo. Si el contenido de manganeso es insuficiente con todo el azufre -- presente se obtendrán inclusiones de sulfuro de hierro -- que tenderá a debilitar la estructura. Por consiguiente los contenidos muy altos o muy bajos de manganeso pueden ser dañinos a la vida del molde.

Bortolani, Demicheli y Longaretti compararon moldes de 2 a 5 tons., producidos en cubilotes básicos y ácidos. -- Encontraron que los producidos en cubilotes básicos daban mejor servicio. Estos moldes se caracterizaban por un mayor carbono total y manganeso y menores cantidades de silicio y azufre. Shank³² describió los métodos --

de producción usados para moldes WEU de 25 3/8 x -- 24 1/8 (pulgadas) hechos en los talleres de la Corporación de Combustible & Hierro de Colorado. Estableció que la mejor vida del molde se obtiene si el contenido de manganeso se mantiene tan bajo como -- sea posible. El rango normal era de 0.35 a 0.45%. -- Los moldes con más de 1% de manganeso se encontraron más susceptibles al agrietamiento.

Duflot²⁷ examinó moldes de 3 a 5 tons., hechos en -- dos fundiciones. Se declaró que los mejores resultados se obtenían en los moldes con un mayor contenido de carbono total y manganeso, y con menores contenidos de silicio.

Las fundiciones francesas tienden a controlar la relación Si/Mn de acuerdo con la relación M/L del molde, aduciendo que los moldes más delgados muestran una tendencia al agrietamiento, y por tanto requieren contenidos mayores de silicio y menores de manganeso. Un Análisis estadísticos arrojó la siguiente relación:

$$\text{Si/Mn} = 6.83 - 2.92 \text{ M/L.}$$

Dumitrescu³³ describió una investigación de 99 moldes cuadrados de 3 tons. y estableció una relación entre la vida del molde y los contenidos de silicio, manganeso y azufre, como sigue:

$$K = \frac{\% \text{ Si}}{\% \text{ Mn} - (1.73 \text{ S}\% + 0.3)}$$

Se intenta que el denominador refleje el exceso de manganeso del combinado como MnS. Una forma de K -- contra la vida del molde mostró una buena relación -- Fig. 4-3, con una vida mínima de K de 7 a 9.

Duflot y Derot²⁸ investigaron moldes de más de 3 -- tons. de peso concluyeron que los contenidos de manganeso demasiado altos o demasiados bajos (por ejemplo, menos de 0.3%) contribuían al agrietamiento del --

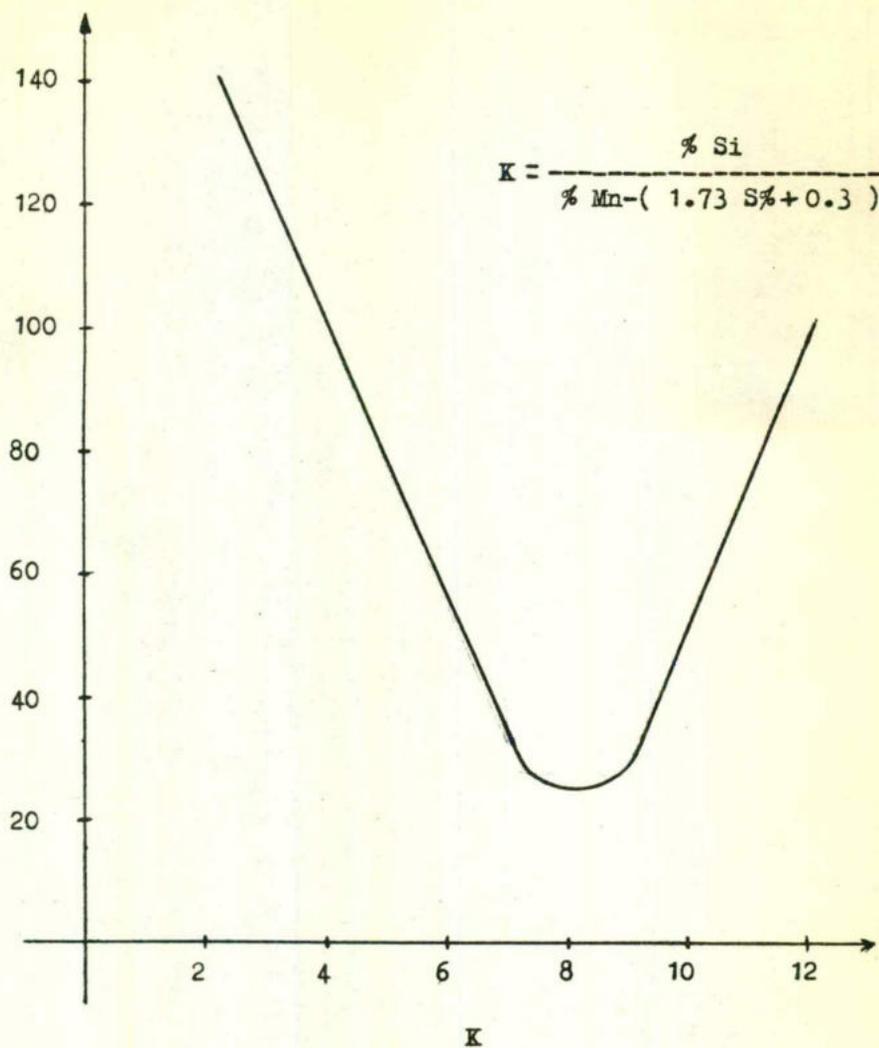


FIG. 4-3 Efecto de la razón silicio a manganeso libre sobre la vida del molde. (Dumitrescu)

molde. Harris³¹ sugirió que a pesar de que el efecto del manganeso es difícil de detectar, se piensa que el manganeso más alto (0.5 a 1.2%) dá los mejores resultados, mientras que un contenido bajo puede causar agrietamiento. El Sub-Comité de Moldes -- para Lingotes¹⁹ recomienda un contenido de manganeso de 0.8 a 1.2% para todos los tamaños de moldes.

f) Nitrógeno.

Los contenidos de nitrógeno relativamente altos, especialmente para las secciones más pesadas, produce una formación de grafito compacto. Este aparece como láminas cortas y gruesas en la microestructura. La presencia de grafito en forma compacta se asocia -- con el aumento en la resistencia a la tensión y -- probablemente además con un aumento en la tendencia a la falla por agrietamiento.

Kyle y Montgomery³⁴ investigaron el efecto del carbón equivalente en la vida del molde para moldes hechos en cubilote con inyección de aire caliente y -- en cubilotes con inyección de aire a temperatura ambiente. Encontraron que con el cubilote con aire -- precalentado, hierros para moldes de alta carga de acero, los valores del carbón equivalente bajos -- (menores de eutéctico 4.3%) estaban asociados con -- un marcado descenso en la vida del molde. Este fenómeno no se mostraba en los cubilotes de aire a temperatura ambiente. El examen de la microestructura de los moldes con bajo carbón equivalente hechos -- del hierro de cubilote de aire caliente reveló la -- presencia de grafito compacto. Se demostró subsecuentemente que esto se debía a la presencia de -- nitrógeno libre. Se encontró una relación entre el contenido total de nitrógeno para metal de aire caliente (alto acero);

$$N_2 \text{ total (ppm)} = 160 - 26.8 N_2\% \bar{+} 22$$

Este estudio se efectuó en moldes de más de 7 tons. de peso, y para tales moldes sujetos a falla por --

agrietamiento, es evidente que el nitrógeno libre - puede tener un efecto extremadamente dañino. Se señaló que para los moldes pequeños que tiende a fallar por fisuramiento en lugar de agrietamiento, la presencia de nitrógeno libre podría ser benéfica ya que podría ayudar a estabilizar la perlita y a dilatar la aparición del fisuramiento.

- g) Elementos residuales. Cu, Sn, B, As, Co, Sb, Cr y - Pb.

Poco se conoce respecto al efecto de estos elementos en la vida del molde. Las cantidades pequeñas - de As B ó Sn (0.005%) pueden tener un efecto notable de estabilización de carburo y pueden por consiguiente influir en la vida del molde. El cromo -- es un fuerte estabilizador de carburo, pero es difícil que se presente en cantidades suficientes para tener mucho efecto en los hierros comerciales para moldes. Harris³¹ establece que el cromo del orden - del 1%, sin embargo, en combinación con un bajo carbono total o con un rango de enfriamiento aumentado o ambos, puede asociarse con la falla prematura. -- También señala que la presencia de plomo es dañina, ya que aparece para actuar en detrimento de la estructura del grafito.

TABLA 4-1.- Resumen de las recomendaciones para la composición de moldes para lingotes -- hechas por el Sub-Comité para moldes -- de lingotes BISRA.

	Moldes Menores de 10 Toneladas	Moldes Mayores de 10 Toneladas
Carbono Total %	3.6 a 3.9	3.6 a 4.3
Silicio %	0.8 a 1.5	1.5 a 2.0
Azufre %	0.08 Máx.	0.08 Máx.
Fósforo %	0.05 a 0.20	0.06 Máx.
Manganeso %	0.8 a 1.2	0.8 a 1.2

C A P I T U L O 5

ESTRUCTURA Y COMPOSICION DE LOS MOLDES PARA LINGOTES DE
HIERRO CON GRAFITO ESFEROIDAL

INTRODUCCION:

Los diversos materiales de hierro colado para la fabricación de moldes para lingotes han estado sujetos a -- pruebas e investigaciones por muchos años. Uno de tales --- materiales es el hierro nodular ó Grafito Esferoidal (GE).- Como su nombre lo indica, es una forma del hierro en el -- cual el grafito se presenta como nódulos (Fig. 5-1) a diferencia de las láminas y rosetas intercaladas en el hierro -- colado normal (Fig. 5-2).

Los moldes fabricados de hierro nodular ó GE se han usado, principalmente sobre una base experimental, desde principio de los 50as. Los resultados obtenidos han tendido a ser más bien conflictivos, pero dado que pueden vencerse ciertas dificultades básicas, las ventajas económicas pueden ser satisfactorias.

EL HIERRO CON GRAFITO ESFEROIDAL.

Se hace por el tratamiento de hierro fundido, -- generalmente en la cuchara, con una aleación de magnesio, - o magnesio elemental bajo presión, junto con la desulfuriza ción y desoxidación del hierro líquido. Esto produce una -- modificación en las condiciones de cristalización del grafi to que se obtiene en forma de una distribución uniforme en forma de nódulos individuales en una estructura básicamente ferrítica (Fig. 5-1).

A la temperatura ambiente la forma de equilibrio de carbono en el hierro consiste en grafito en una matriz - ferrítica.

La grafiticaci³ón tiene lugar en dos pasos; - - - primer paso: La grafiticaci³ón del carbono presente en exceso de aquel soluble en austenita ocurre durante la solidi-

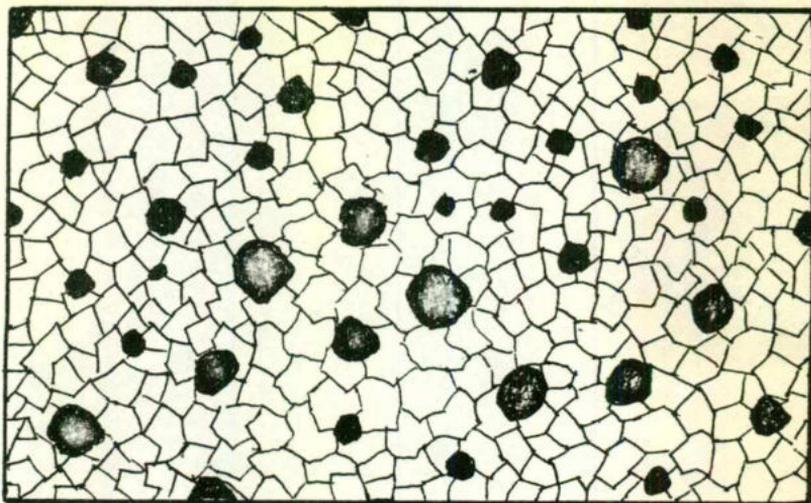


FIG. 5-1 Hierro con grafito esferoidal en matriz ferrítica.

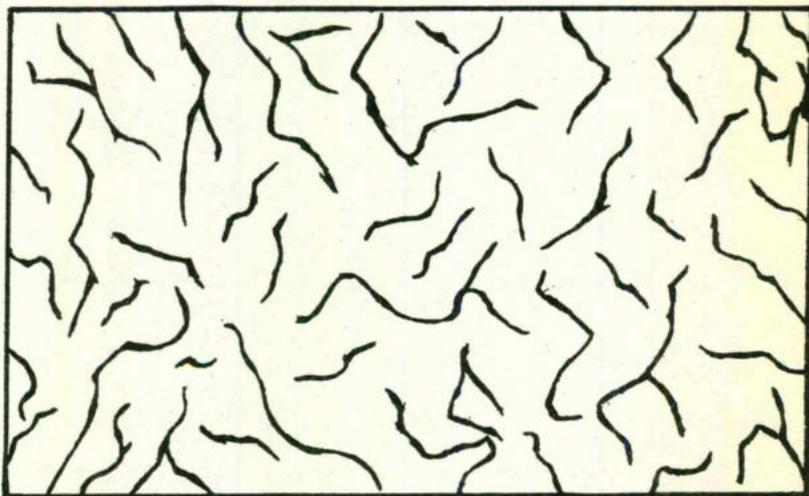


FIG. 5-2 Hierro con láminas de grafito.

ficación o durante el recocido subsecuente en el rango austenítico. El segundo paso; consiste en la grafitización del carbono soluble en la austenita y esto puede ocurrir ya sea directamente de la austenita durante el enfriamiento, o por medio de la formación intermedia de perlita, bainita o martensita. La grafitización de la perlita y la austenita produce un aumento de la cantidad de los nódulos primarios existentes pero la descomposición de la martensita resulta, según se ha observado, en la formación de nódulos nuevos.

Es evidente, además, que el control de la estructura final del hierro con GE puede ejercerse por la composición, manipulación de los rangos de enfriamiento y/o recocido de la colada. Ya que lo último es caro para fundiciones del tamaño de los moldes normales para lingotes, debe obtenerse el control por la composición química y rangos de enfriamiento adecuados.

El hierro con GE conserva las ventajas de facilidad de fusión y buena costeabilidad asociadas con el hierro de grafito en láminas.

5.1 Propiedades Comparativas del Hierro con GE y el de Láminas de Grafito.

Las propiedades deseables en los materiales para moldes de lingotes son los siguientes:

- a) Conductividad térmica relativamente alta y baja expansión térmica con el fin de disipar rápidamente el calor con el mínimo cambio de dimensiones y/o aumento de esfuerzos.
- b) Resistencia al choque térmico, crecimiento y oxidación.
- c) Estructura uniforme con el fin de reducir la variación de esfuerzos dentro del molde.

- d) Suficiente resistencia y ductibilidad para eliminar el fracturamiento y soportar el manejo mecánico.

a) CONDUCTIVIDAD TERMICA.

La forma de grafito es el factor que más influye en las propiedades físicas del hierro cuando consideramos su uso como material para moldes de lingotes. - La conductividad térmica del grafito es mucho mayor que la de la ferrita, perlita o cementita (Tabla -- 5-1), y es evidente por tanto que la distribución - de grafito en toda la pared del molde debe influenciar la conductividad térmica del molde para lingotes.

Es razonable suponer también que el calor se conducirá más fácilmente a través del grafito laminar en trelazado de un hierro colado convencional que a través del grafito esferoidal de un hierro nodular. Esto se confirma con los valores obtenidos para la conductividad térmica de los hierros de grafito en láminas ferrítico y perlítico y del hierro con GE - (Tabla 5.2). Entonces, el hierro nodular parece ser inferior al hierro de grafito en láminas con respecto a la conductividad térmica.

Los moldes hechos de hierro con GE tenderán además a calentarse más rápidamente y a disipar el calor - menos fácilmente a los alrededores. Esto, unido a - la alta ductilidad del hierro con GE produce un - aumento en la tendencia de los moldes hechos de hierro con GE a deformarse en servicio.

b) Resistencia al Choque Térmico.

La resistencia al choque térmico depende principalmente de la resistencia y ductilidad del material. - El grafito es débil y quebradizo, y cuando se presenta en láminas entrelazadas, produce un debilitamiento del hierro. El efecto se reduce cuando el -

grafito es independiente y esferoidal. Consecuentemente el hierro con GE desarrolla una fuerza ténsil y tenacidad mucho mejores, sobre el hierro de grafito en láminas.

Para los moldes de lingotes, por supuesto, es importante que la fuerza se mantenga sobre el rango de temperatura experimentado en un ciclo normal del molde en la siderúrgica. La tabla 5.3 muestra que el hierro con GE es mucho muy superior al hierro de grafito en láminas en este respecto. En términos prácticos esto significa que los moldes de hierro con GE deben ser mucho más resistentes a la falla por agrietamiento prematuro comparados con los moldes de grafito en láminas.

c) Resistencia al Crecimiento y a la Oxidación.

El fisuramiento de la superficie interior del molde resulta de los efectos combinados de la oxidación y el crecimiento del hierro. Los resultados de muchas investigaciones han indicado que el crecimiento del hierro sujeto a un ciclo repetido de calentamiento y enfriamiento puede atribuirse a:

- 1).- Grafitización.
- 2).- Cambios de volumen al pasar por el punto de transformación Ac_1 .
- 3).- Oxidación, particularmente del silicio en el hierro. De estas causas las últimas dos parecen ser las más importantes para hierros que se calientan repetidamente en exceso del punto de transformación Ac_1 como es normalmente el caso con moldes de lingotes, con la posible excepción de los moldes para lingotes muy pequeños. La penetración de óxido es ayudada por la presencia de láminas de grafito, que generalmente son atacadas preferentemente, y por la "abertura" de la estructura causada por la contracción y expansión repetidas. La forma de las láminas de grafito afecta la cantidad y ra

pidez de la oxidación; las láminas gruesas aumentan la permeabilidad de los hierros a los gases y por consiguiente aumenta la susceptibilidad a la oxidación y al crecimiento.

Con los hierros GE, los nódulos de grafito están desconectados y no ofrecen canales para la salida y progreso de la oxidación. Así, el crecimiento y la oxidación se reducen y los hierros con GE tienden a dar una forma más fina y menos dañina de fisuramiento en comparación con los moldes de grafito en láminas.

d) Resistencia Mecánica.

La relativamente alta resistencia y ductilidad del hierro con GE le confiere alta resistencia a los esfuerzos de tipo de choque y los moldes de hierro con GE además están menos sujetos a sufrir daños mecánicos bajo las condiciones de manejo normal en la planta de aceración. Los bajos costos del molde, sin embargo, necesitan el uso de moldes descartados como material de desecho para cargar el horno. En este aspecto, la alta resistencia y ductilidad son desventajas, y sin duda se desarrollarán técnicas especiales para vencer las dificultades para romper los moldes de desecho.

5.2 Ventajas Asociadas con el Uso de Hierro con GE para Moldes.

El hierro con GE generalmente muestra las siguientes ventajas en comparación con el hierro de grafito en láminas:

- 1.- Mayor resistencia al agrietamiento.
- 2.- Mayor resistencia a la aparición, desarrollo y severidad del fisuramiento.
- 3.- Mayor resistencia mecánica.

3 Desventajas Asociadas con el Uso del Hierro con GE para Moldes.

a) Distorsión.

Como se estableció anteriormente, el hierro con GE - tiene menor conductividad térmica y mayor resistencia y ductilidad comparado con el hierro de grafito en láminas. Cuando se usa en molde para lingotes, -- estas propiedades pueden ser desventajosas. La conductividad térmica reducida puede producir un aumento de temperatura más rápido en la superficie interior del molde y una reducción en el rango de disipación del calor. En combinación con una ductilidad relativamente alta, esto puede resultar en deformación o distorsión del molde. Klep³⁵ reporta que la cara más severamente calentada, por ejemplo la que esta adyacente a otros moldes, se distorsiona hacia adentro y la cara menos severamente calentada se -- distorsiona hacia afuera. El efecto resultante crea dificultades de separación que produce el desecho -- prematuro del molde. Además, el aumento de esfuerzos en las esquinas del molde puede aumentar la ruptura en las esquinas. El problema de distorsión es -- más evidente en los moldes de plancha y mientras mayor sea la relación y forma, serán más severa la distorsión. Para moldes de diseño convencional hechos -- de hierro con GE, se ha encontrado que la distorsión es la mayor causa de falla. Para vencer esto, es necesario desarrollar diseños radicalmente nuevos. Primero se pensó en la reducción del espesor de la pared hasta aproximadamente la mitad de los moldes de grafito en láminas reduciendo la cantidad de calor -- dentro del mismo molde y aumentando la disipación de calor a los alrededores resolvería el problema y al mismo tiempo, reduciría drásticamente los costos de los moldes. La distorsión resultó, sin embargo, en -- vida corta del molde. En la planta Liezen de Vöest, -- Alemania, se fundieron moldes de espesor de pared reducido con costillas exteriores que se pretendía -- aumentarían la estabilidad de las paredes, pero no --

hubo éxito. Ideas más modernas se han concentrado en el igualamiento de esfuerzos dentro de la pared del molde. Los estudios teóricos han demostrado que la distribución uniforme de isoterms dentro de la pared del molde pueden obtenerse si el espesor de la esquina se reduce drásticamente en comparación con el espesor de la cara central. (Fig. 5-3).

El trabajo de la Compañía de Ingeniería Distington - Alemania, sobre el diseño fundamental de moldes para lingotes desarrolló el concepto del molde isotérmico, para el cual los rangos de abstracción del calor del lingote por las paredes del molde son similares en todas las posiciones de la periferia del lingote. El plan general de esta idea está cubierto por la patente Británica N° 1,086.946. Parecería que sería deseable un valor de 0.30/0.40 para la relación de espesor de pared de la cara de la esquina a la cara central. Los moldes para lingotes hechos en estas proporciones han estado sujetos a extensas pruebas en las plantas de aceración y para tales moldes hechos de hierro con GE, se han establecido las siguientes características:

- 1.- Vida muy mejorada con relación a los moldes convencionales de grafito en láminas.
- 2.- Ninguna distorsión del molde.
- 3.- Incidencia y severidad de fisuramiento reducidas.
- 4.- Mejor solidificación del lingote reduciendo los problemas de segregación del lingote.

Una característica limitante del diseño es el mínimo espesor de esquina que puede aceptarse como práctico. Si la relación M/L debe mantenerse dentro de límites razonables, la relación de espesor de pared deseable entre la cara central y la esquina de 0.30/0.40 puede no alcanzarse en la práctica. Por ejemplo: lingotes cuadrados de 5 tons., hechos con este diseño modificado requerirían un espesor en la esquina de aproximadamente 2 pulgadas. Durante el

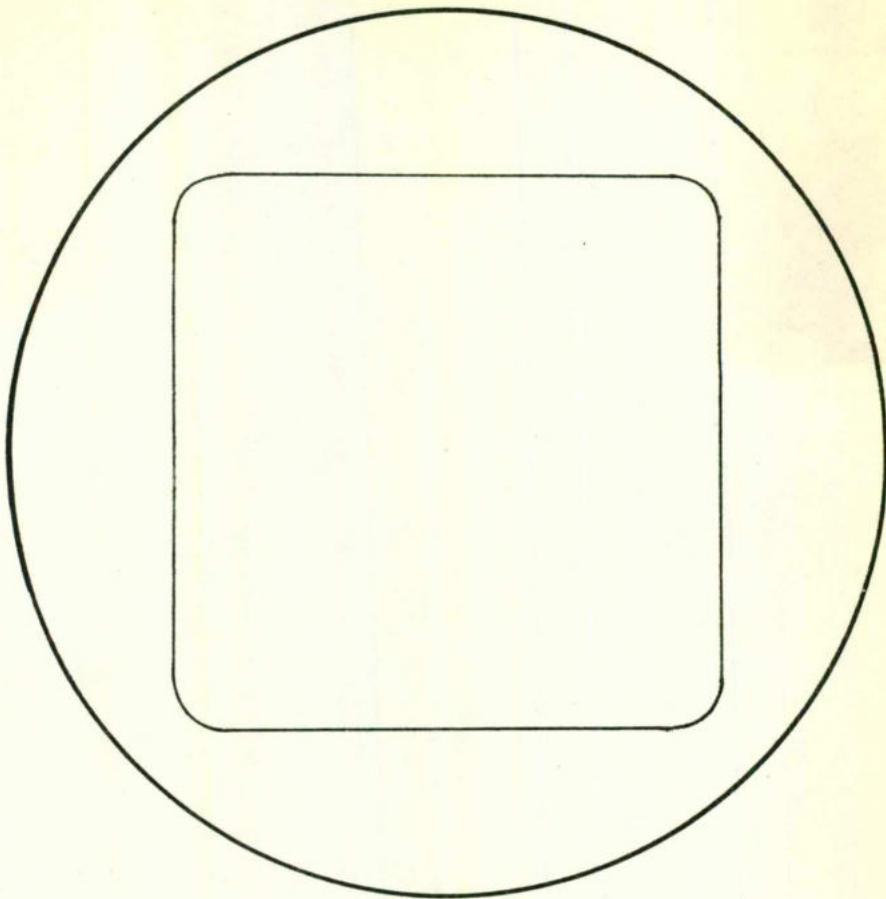


FIG. 5-3 Molde hecho con hierro de grafito esférico con diseño modificado.

servicio, tales moldes han mostrado transformación de la estructura del metal en las esquinas, cambiando el hierro de dúctil a una forma relativamente -- frágil que produce agrietamiento de la esquina. Las pruebas con moldes de mayor relación de espesor de pared entre la esquina y la cara central han dado -- resultados satisfactorios y es evidente que la -- modificación del diseño del molde puede vencer el -- problema de la distorsión.

Kempers³⁶ reporta que los fabricantes japoneses de moldes pretenden una matriz ferrítica-perlítica en hierro con GE con hasta 75% de perlita con el fin -- de mejorar la "rigidez" del hierro y contrarrestar -- de esta forma la distorsión. Podría esperarse, sin -- embargo, que esto aumente la formación de carburo -- primario y consecuentemente el debilitamiento del -- material del molde, produciendo el agrietamiento. -- La producción normal japonesa de moldes para lingotes de hierro con GE es aproximadamente 14,000 tons. al año.

b) Soldabilidad.

Las características estructurales del hierro con -- GE combinadas con la baja conductividad calorífica -- resultan en un aumento en la tendencia a que el lingote y el molde se solden, particularmente con los lingotes vaciados directamente. Cuando esto ocurre, generalmente tiene lugar cerca de la parte inferior del molde y el efecto es arrancar parte de la pared del molde al separar el lingote (Asiento arrancado). Este defecto puede ocurrir con los moldes convencionales de hierro colado, y está asociado particularmente con el vaciado directo y las temperaturas excesivas del acero líquido.

c) Uso de Moldes para Pedacería.

La mayor resistencia y ductilidad del hierro con -- GE, mientras que beneficia al molde durante el servicio en la planta de aceración, puede ser una des-

ventaja después de que termina la vida útil del molde. Los viejos moldes de hierro de grafito en láminas se rompen y constituyen una fuente útil de metal de pedacería para cargar los hornos. De hecho, el uso de los moldes viejos para este propósito es esencial para la economía de la planta de aceración. El hierro con GE, sin embargo, es mucho menos frágil que el hierro de grafito en láminas y los moldes son por consiguiente más difíciles de romper y con mayores costos.

d) Costo de Fabricación.

El hierro con GE es más caro de producir que el hierro de grafito en láminas, de aquí que cuando se usa en la fabricación de moldes para lingotes, el consumo de molde por tonelada de acero producida necesita ser proporcionalmente menor que en los moldes de grafito en láminas, para que sea económicamente-viable. El costo de hierro con GE es aproximadamente de 25 a 40% mayor que el del hierro de grafito en láminas.

5.4 Influencia de la Composición del Hierro Sobre las Propiedades del Hierro con GE.

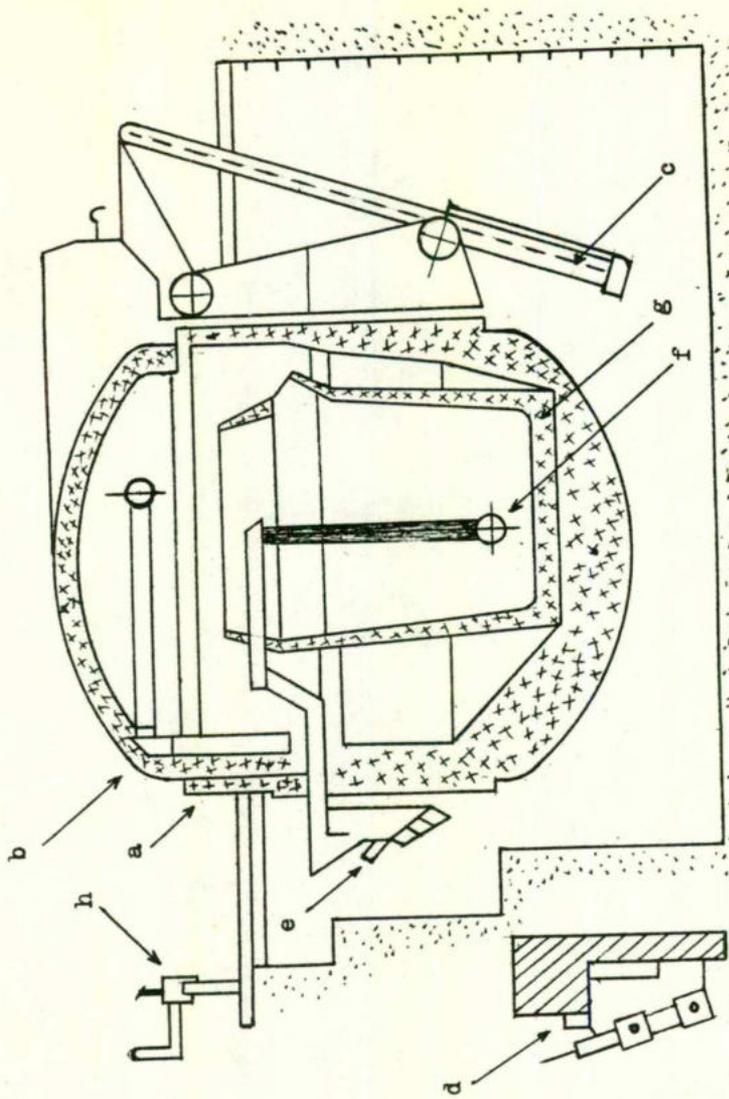
Se ha publicado relativamente poca información confiable sobre la composición deseable del hierro nodular para el uso en la fabricación de moldes para lingotes. Esto quizás no es sorprendente en vista del hecho de que la fabricación y uso de moldes de hierro con GE debe considerarse aún en la etapa experimental. Los datos publicados acerca de la vida del molde lograda varía desde menos de la mitad de la de los moldes equivalentes de grafito en láminas hasta tres o cuatro veces la de los moldes equivalentes de GE. Esto se debe probablemente a las diferentes formas de falla de los dos materiales del molde y a las diferencias del diseño del mismo. Por tanto, los efectos de la composición sobre la vida del molde tiende a ser oscuros y difíciles de definir.

5.4.1 Método de Fabricación.

La composición química del hierro es hasta cierto punto dictada por el método de producción del hierro con GE. La característica esencial es que la esferoidización del grafito sea completa. Esto se logra por medio del tratamiento del hierro líquido con magnesio y se han desarrollado diversas técnicas con el fin de obtener la interacción necesaria. Esto puede resumirse como sigue:

- 1) Adición de una aleación de Níquel-Magnesio. -- Esto es costoso y agrega innecesariamente el Níquel al hierro.
- 2) Tratamiento del hierro líquido dentro del caldero con aleaciones de Silicio y Magnesio. -- Las aleaciones de Silicio-Magnesio son menos densas que el hierro y por tanto se requieren técnicas especiales para sumergir al fondo -- las aleaciones en el metal licuado. Si no se hace ésto, la reacción ocurre en la superficie del metal y la recuperación del Magnesio es baja. Sin embargo, puede ponerse una aleación de Magnesio-Ferro-Silicio en el fondo -- del caldero y vaciar el hierro sobre ella.
- 3) El uso de Magnesio elemental en un caldero -- sellado o un caldero a presión en el cual se permite que la reacción proceda a la presión de vapor del Magnesio. Usando esta técnica, -- el costo del material en bruto es bajo y la -- recuperación de Magnesio es alta, pero, es -- necesaria una erogación de capital considerable al principio.

Lepata³⁷, describe la producción de hierro -- con GE en los talleres de "HIERRO Y ACERO DONETS" por medio de la inoculación con Magnesio en una cámara sellada (Fig. 5-4) en la -- cual se aumenta la presión interna a un máximo de seis atmósferas antes de la inoculación.



Clave: - a-cuerpo; b-tapa; c-mecanismos de levante y seguridad de la tapa; d-idem c; e-orificio para la adición de magnesio; f-agitador; g-cuchara h-valvula para la ventilación y regulación de la presión.

FIG. 5-4 Cuchara sellada rusa para la producción de hierro con grafito esferoidal.

La cámara está diseñada para tomar un caldo - de 5 a 7 tons., y para producir de 10 a 14 -- tons., de hierro por hora.

Para el éxito de una esferoidización del grafito es esencial que el contenido de azufre - en el hierro debe ser bajo, preferentemente - menor a 0.015%. Los hierros con mayores conte- nidos de azufre pueden tratarse con éxito, -- pero la adición del Magnesio debe aumentarse - proporcionalmente con el fin de lograr el gra- do necesario de desulfurización.

El grafito esferoidal se forma más fácilmente - si el contenido de carbono es cercano a la -- composición eutéctica. El contenido de Magne- sio residual debe ser de aproximadamente - -- 0.04 a 0.06%.

5.4.2 Estructura del Hierro con GE.

Hay un desacuerdo considerable sobre las caracterís- ticas estructurales óptimas deseables en el hierro - con GE para moldes, pero generalmente se acepta que - es esencial la esferoidización completa del grafito. Los moldes hechos con estructuras parcialmente esfe- roidizadas casi invariablemente han fallado prematu- ramente en uso.

La proporsión de perlita en la estructura está abier- ta a la discusión. Lógicamente uno podría sostener - que debería ser preferible una estructura totalmente ferrítica ya que la ferrita favorece la conductivi- dad térmica (tablas 5.1 y 5.2), la resistencia al -- choque térmico y da mejor elongación. La perlita, -- aunque da mayor resistencia puede aumentar la grafi- tización debido al calentamiento y enfriamientos - - cíclicos a que se somete durante el servicio y que - también podría acentuarse por la relativamente baja- conductividad térmica. Kempers³⁰ da la formación de-

grafito en láminas como una de las principales causas de falla prematura de los moldes de hierro con GE, siendo las otras los defectos de fundición, por ejem: puntos fríos, porosidad, etc., y el exceso de perlita o la formación de carburo primario o de ferrita frágil al alto silicio. También establece que la máxima conductividad térmica está asociada con:

- a) Una estructura puramente ferrítica.
- b) El contenido de Silicio tan bajo como sea posible (1.0 a 1.7%).
- c) Un mínimo de estabilizadores de perlita y carburo, por ejem: Mn, Ni, Mo, Cr, y Al.

El efecto de Silicio, sin embargo, sobrepasa todos los demás factores. (Tabla 5.4).

Tanaka³⁸ recomienda una estructura que contenga de 35 a 45% de perlita y una saturación de Carbono de 0.99 al 1.05%, esta estructura se logra controlando la composición de carga y el rango de enfriamiento. Establece que los valores de Carbono de 0.98% y menores pueden aumentar los defectos de agrietamiento y recomienda la siguiente composición:

Carbono	3.7 a 3.85%	(Se pretende a 3.8%).
Silicio	1.6 a 1.85%	(Se pretende a 1.6%).
Manganeso	0.6%	

Klepp³⁵ considera que la composición química tiene poco efecto sobre la vida del molde, pero el alto Carbono y el bajo Manganeso son favorables con el fin de evitar las grietas por esfuerzos. Se establece que el Silicio no tiene efecto obvio y el factor más importante es la forma del grafito.

En los talleres de "Hierro y Acero Donetz" se mantiene el contenido de Carbono sobre el 3% para evitar que decrezca la fluidez y el aumento de encogimiento. El contenido de Silicio es de 2.5 a 2.8% con

el fin de evitar la formación de cementita y se establece que se mejoran las propiedades plásticas del -- hierro si se mantiene el contenido de Manganeso en un máximo de 0.6% y el Fósforo a 0.12%.

TABLA 5-1.- Conductividad térmica de ferrita, perlita, cementita y grafito.

Grafito - - - -	0.42	Cal/cm.seg.°C.	Longitudinal
Grafito - - - -	0.27	" "	Transversal
Ferrita - - - -	0.18	" "	
Perlita - - - -	0.12	" "	
Cementita - - -	0.02	" "	

TABLA 5-2.- Conductividad térmica de los hierros de grafito en hojuelas y grafito esferoidal.

Hierro de grafito en láminas (Ferrítico)	0.10 a 0.15	Cal/cm.
Hierro con grafito GE (Ferrítico)	0.08 a 0.10	" °C
Hierro con grafito en láminas (Perlítico)	0.09 a 0.12	" "
Hierro con grafito GE (Perlítico)	0.05 a 0.08	" "

TABLA 5-3.- Fuerza tensil de los hierros de grafito en láminas y GE sobre diferentes rangos de temperaturas.

	30°C	400	600	800°C
Hierro de grafito en láminas	10.5	9.2	6.6	2.0 Kg/mm ²
Hierro con grafito GE.	41.2	38.6	19.6	9.8

TABLA 5-4.- Efecto del contenido de silicio sobre la conductividad térmica del hierro con GE.

Si %	Conductividad Térmica (Cal/cm.seg.°C)
0.65	0.126
1.1	0.117
1.65	0.093
2.0	0.085
2.3	0.071
4.8	0.049

C A P I T U L O 6

EFECTO DE LAS VARIABLES DE FABRICACION EN LA VIDA DEL MOLDE PARA LINGOTES.

INTRODUCCION.

Los factores que afectan la durabilidad y vida del molde para lingotes pueden clasificarse ampliamente en Variables de fundición, variables de diseño, variables de usuario. Las variables de fabricación o fundición son los aspectos de las técnicas de procesos de fabricación que -- afectan la composición, la estructura y la condición física del molde para el lingote, y por tanto tiene la influencia directa sobre el funcionamiento del molde en la planta de aceración. La mayoría de los usuarios de moldes saben - de las amplias discrepancias en la vida promedio que presentan frecuentemente los moldes del mismo tamaño y diseño, usados bajo idénticas condiciones en la siderúrgica, - pero hechos en diferentes fundiciones.

6.1 Fabricación de Moldes para Lingotes.

Los moldes para lingotes para uso en plantas de aceración están hechos casi invariablemente de hierro colado moldeados individualmente en moldes de arena. Las - principales operaciones implicadas son: moldeo, fundición colado, enfriado y acondicionamiento.

6.1.1 El Moldeo.

Generalmente se usan lanzadores de arena, moldeadoras o apizonadoras operadas mecánicamente en - la preparación de cajas y corazones de moldeo que pueden apizonarse separadamente o producirse simultáneamente del mismo modelo, cubiertos con pintura negra por aspersión o brocha y colocadas en horno para que se sequen. La temperatura de - los hornos se mantienen a aproximadamente - - -

300-350°C y el tiempo de secado depende del tamaño del molde. Después de secarse, el molde, corazón, placa de asiento etc., se ensamblan, aseguran y se agregan los aditamentos de alimentación.

La arena de moldeo puede ser una mezcla sintética compuesta de arena sílica, bentonita, polvo de carbón o grafito, o puede ser una arena mezclada naturalmente en la que los granos de arena y arcilla se usan como asociados (puede hacerse pequeñas adiciones de bentonita).

El procedimiento usual es gradual, separar y reprocessar la arena usada, para reducir el consumo de arena nueva. Una composición típica de arena sintética puede ser reprocessada: arena vieja - 90%, arena sílica nueva 5%, bentonita 3.5%, y polvo de carbón 1.5%.

Si la producción de moldes para lingotes es pequeña, el modelo de la caja de moldeo y la caja del corazón pueden hacerse de madera, pero si se hace un suministro continuo de moldes idénticos, los modelos de hierro fundido o los modelos de plástico dan ventajas al reducir las variaciones dimensionales y los costos. Las fundiciones pequeñas también pueden verse obligadas a recurrir al apizonado manual, lo que tiende a dar más variantes que el apizonado mecánico.

La necesidad de enfriar los corazones que implica tiempos prolongados, el transporte y mano de obra adicional, la provisión de hornos, combustible, etc., han producido en los últimos años un aumento en el interés en las arenas autoasentables que se endurecen en la caja de corazón. Los procesos de este tipo desarrollados durante las dos últimas épocas, incluyen:

- a) Proceso de CO_2 en el que se agrega el silicato de sodio a la arena y se endurece la mezcla pasando CO_2 a través de ella. Este proceso se --

ajusta a la producción repetitiva y también a la producción de cantidad limitada.

b) Proceso de Concha y Caja Caliente.

Que tienden a ser limitados en aplicación a carreras largas para justificar el costo del equipo del modelo.

Estos procesos se siguieron en intentos de producir arenas asentables en frío usando aceites de linaza y palma, además de secadores de pintura y un agente oxidante adecuado. Más recientemente han tenido lugar desarrollos que implican el uso de resinas de urea-formaldehído modificadas con alcohol furfurilo y tipos de resinas similares.

En el presente no se usan ampliamente los procesos de este tipo a pesar de las sustanciales ventajas económicas en prospecto, debido a ciertos problemas que no han podido vencerse. En particular, el tiempo de asentamiento parece ser muy sensitivo a la temperatura de la arena, las cajas del corazón y la temperatura ambiente de la fundición.

Se han desarrollado nuevas técnicas similares para moldes, particularmente en las fundiciones mayores que requieren el uso de arenas autoasentables. Dos de tales procesos son:

- a) Proceso de CO_2 : Se agrega silicato de sodio a la arena y la mezcla se endurece por medio del gas CO_2 . Los desarrollos recientes han usado cemento y silicato dicalcico como agentes endurecedores.
- b) Proceso de arena fluida o Moldeable:- Este hace uso de la reacción entre el silicato de sodio y el silicato dicalcico, pero se agrega una agente de superficie activo durante la mezcla, lo que causa el arrastre -

de pequeñas burbújas de aire fluizando de esta manera la maza de arena.

La mezcla puede entonces vaciarse simplemente en la caja de moldeo. Se lleva 40 min. para asentarse y la fundición puede tener lugar de 4 a 5 horas después del llenado.

6.1.2 Fundición.

La unidad tradicional de fundición para la producción de moldes para lingotes es el cubilote. De hecho, el 90% de las fundiciones de hierro producidas en México se hacen de metal de cubilote. La razón no es difícil de encontrar debido a que el cubilote es indudablemente el horno de fundición más económico para la producción de cantidades relativamente pequeñas de hierro.

La mayoría de las fundiciones de molde para lingote usan cubilotes de aire a temperatura ambiente, que pueden tener recubrimientos ácidos o básicos. Los recubrimientos básicos son más caros, pero dan la ventaja del control de azufre en el metal. Con cualquier proceso es posible un control exacto de los niveles de carbono, silicio y manganeso pero es esencial cargar una alta proporción de arrabio y/o moldes rotos. También es necesario para una operación eficiente el uso de coque de fundición de alto grado.

El uso de cubilotes de aire precalentado comenzó a alcanzar popularidad cuando el coque de alto grado se escaseó en Alemania después de la guerra. Desde entonces han sido ampliamente aceptados y ahora cuentan con aproximadamente con el 20% de la producción total de hierro en México. El costo de capital de los cubilotes de aire precalentado es considerablemente más alto que el de los cubilotes de aire a temperatura ambiente, pero la mayor alimentación de calor los hace menos dependiente de suministro de coque de alto grado. Alternativamente, la mayor eficiencia puede utilizarse reduciendo la relación de -

arrabio a pedacería en la carga. La eficiencia de operación del cubilote con aire precalentado es tal de hecho, que pueden usarse cargas de 100% de pedacería de retorno, reduciendo considerablemente el costo. Sin embargo, con tales cargas, se hace más difícil el control de la composición química.

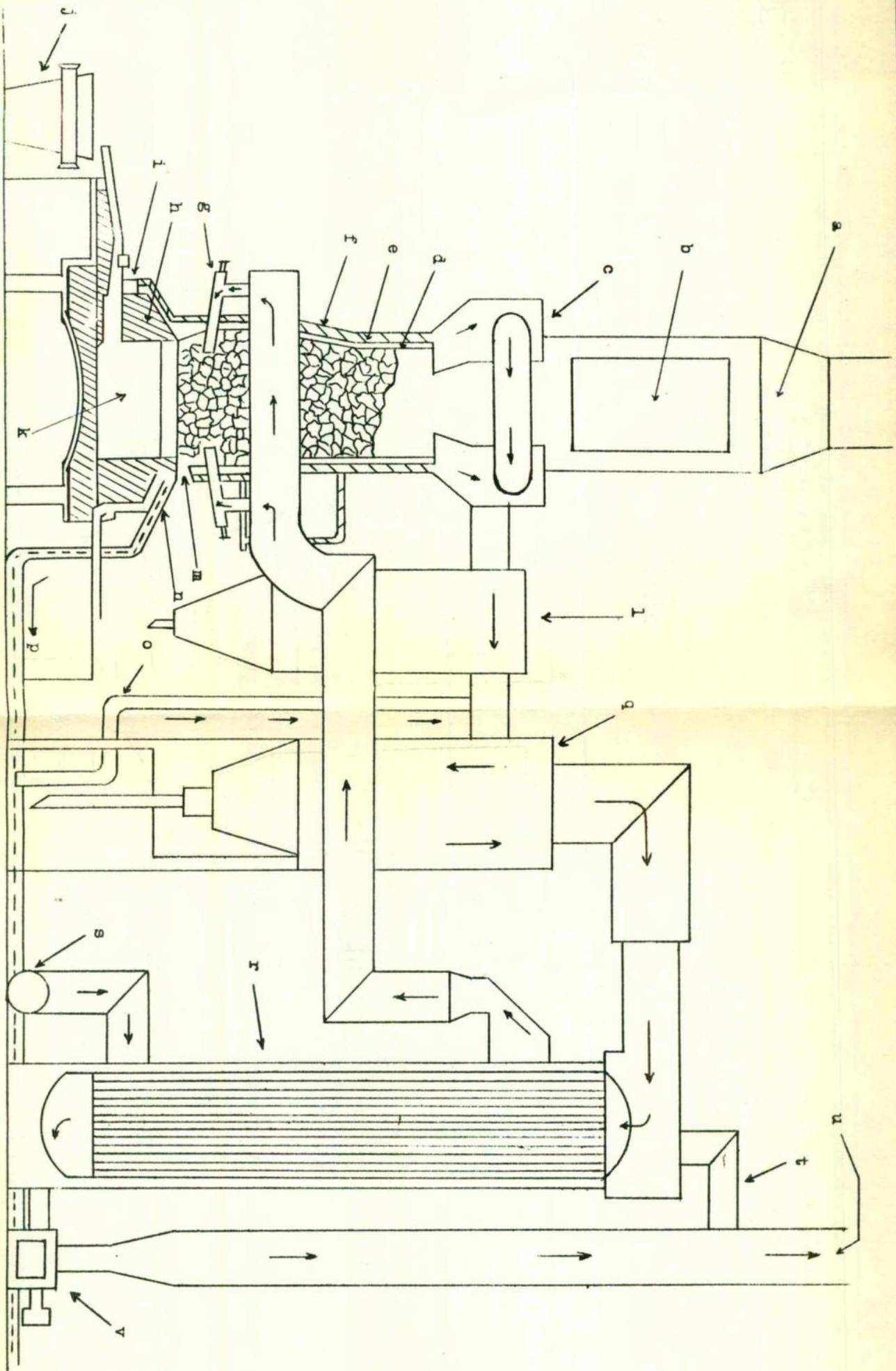
Los cubilotes de máxima eficiencia deberían usarse continuamente, y esto requiere enfriamiento por agua de las zonas de fusión. Esto ha provocado el desarrollo de cubilotes con aire precalentado sin recubrimiento refractario, que tienen una cubierta de acero. Fig. 6.1

No se aplican ningún recubrimiento refractario, pero en la operación se forma una capa de escoria solidificada sobre la pared enfriada por agua. Este tipo de horno es capaz de producir hierro con cargas compuestas esencialmente de pedacería de retornos. La práctica de fundición básica asegura el control adecuado del nivel de azufre. Jelly³⁹ enlistó las ventajas del cubilote con aire precalentado en comparación con el de aire sin precalentar de la siguiente manera:

- 1.- Menor combustible en consumo.
- 2.- Composición de carga más barata.
- 3.- Mayores temperaturas de vaciado.
- 4.- Mayor colección de carbono.
- 5.- Menor colección de azufre.

La principal economía resulta de la composición de carga más barata. En ciertas circunstancias puede resultar ventajoso usar hierro de alto horno para la fabricación de moldes para lingotes. Sin embargo, es más difícil controlar la composición del hierro en comparación con la operación del cubilote y el análisis del hierro está sujeto a variaciones periódicas, cuyos límites dependen principalmente de las propiedades físicas y químicas de la carga de mineral fundente. El hierro de alto horno puede tender a hacer hipereutéctico y a dar excesiva formación de Kish. Entonces sería necesario diluir el hierro-

Fig. 6-1 Diagrama esquemático de un cubilote con aire recalentado, entrado por cortina de agua sin revers-
imiento refractario.



CLAVE DEL DIAGRAMA 6-1

- a.- Cúpula.
- b.- Puerta de Carga.
- c.- Salida de Gases.
- d.- Revestimiento refractario hipotético.
- e.- Revestimiento de escoria.
- f.- Cortina de Agua refrigerante.
- g.- Toberas de cobre.
- h.- Revestimiento refractario.
- i.- Pico del cubilote.
- j.- Cuchara de 25 toneladas.
- k.- Metal fundido.
- l.- Mezclador de polvos.
- m.- Orificio de escoria.
- n.- Agua.
- o.- Abastecedor del aire para la combustión.
- p.- Sólidos más agua.
- q.- Cámara de combustión.
- r.- Recuperador.
- s.- Receptor del aire de las compresoras
- t.- Recirculación del gas.
- u.- Gas de escape.
- v.- Ventilador principal.

en el vaciado con pedacería de retorno. Los altos hornos se operan normalmente junto con las plantas de operación y el tipo de hierro que se hace se controla para que llene los requerimientos de los procesos de la fabricación de acero. El uso de hierro de alto horno para la fabricación de hornos para lingotes es cuando mucho un intermedio entre composición y estructura, a menos que se instituya un proceso de tratamiento especial para controlar la composición del hierro dentro de los límites deseados.

Se han hecho experimentos con hornos de aceite sobre gas natural y el gas natural se ha usado para suplir al coke en los cubilotes. Hablando generalmente, sin embargo, el intercambio de calor de estos combustibles en los hornos de cubilotes es menos eficiente que el de coke.

La escasez de coke de fundición de alto grado y la aplicación más estricta de la legislación sobre contaminación del aire pueden en el futuro producir el cambio de algunos cubilotes por hornos de fundición eléctricos. El hierro puede fundirse en hornos de arco o en hornos de inducción de alta o baja frecuencia.

De estos, los hornos de baja frecuencia ofrecen la ventaja de un bajo costo de capital y parecerían los más favorables. Hay dos diseños básicos de hornos de baja frecuencia:

- a) El horno de inducción que es fundamentalmente una unidad de fundición.
- b) El horno de tipo de canal que puede usarse como unidad de sosten en un proceso duplex de cubilote-horno eléctrico. Los costos de operación tienden a elevarse, a menos que el horno se use continuamente.

6.1.3 Colada.

El horno de fundición se vacía en una cuchara y-

el metal se vierte ya sea directamente o cuesta -- arriba en el molde de arena. Con frecuencia se usan cucharas de vaciado de labio donde el tonelaje -- es relativamente pequeño, en cuyo caso la escoria sería lo suficientemente visbosa para ser detenida por el labio, por medio de un desescoriador. Alternativamente pueden usarse cucharas de teté. También pueden incorporarse trampas para la escoria en el sistema de vaciado. Donde se vacían grandes cantidades de metal puede usarse una cuchara de -- vaciado por la parte inferior.

El aditamento de alimentación varía de acuerdo con las diferentes fundiciones pero depende de la composición del hierro (el hierro de composición eutéctica es el menos sugeto al encogimiento) y a -- las condiciones de vaciado. Es esencial que debe -- alcanzarse un rango constante de vaciado.

Los desarrollos modernos incluyen la práctica de -- cuchara con agitador para un control más exacto -- de la composición y particularmente para la carburización y desulfurización.

Los defectos más comunes asociados con la colada -- incluyen:

- 1.- Puntos fríos: Rupturas en el aumento uniforme del metal en el molde, atribuibles a la baja temperatura de vaciado y/o a la baja fluidez.
- 2.- Penetración del metal: Hierro fundido que penetra en la arena del molde o corazón y produce una superficie áspera en la colada; asociada -- frecuentemente con la alta temperatura de vaciado y/o la alta fluidez.
- 3.- Escoria atrapada: particularmente o cerca de -- las entradas.
- 4.- Kish atrapado: en hierro hipereutéctico.
- 5.- Fracturas de encogimiento o lagrimas calientes: posicionamiento defectuoso de entradas y elevadores y/o bajas temperaturas de vaciado.
- 6.- Porosidad de gas, hierro esponjoso: Esto puede

estar asociado con el hidrogeno en el metal que surge de las adiciones húmedas del horno, o de cucharas húmedas.

- 7.- Cavidades de encogimiento: asociadas con el contenido de carbono y/o las altas temperaturas de vaciado, alimentación inadecuada y con la raguez del molde arena.

6.1.4 Acondicionamiento.

Después de completar el vaciado se permite que la fundición se solidifique y enfrie en el molde por un tiempo que dependen del tamaño y peso. - Generalmente se saca la arena del molde de fundición del lingote, particularmente la arena -- del corazón, por medio de chorros de agua de -- alta presión. La arena que se saca se enfria, - se limpia y se clasifica para reusarse. La limpieza y acondicionamiento de la fundición se -- hace por medio de un cincel neumático, o rectificarlo, con el fin de eliminar los últimos - - vestigios de la arena pegada.

C A P I T U L O 7

PRACTICA REALIZADA EN HYLSA, PLANTA MONTERREY

REPORTE N° 1

INVESTIGACION DE DEFECTOS Y BAJA VIDA
DE LINGOTERAS

(Con Molibdeno)

MUESTRAS: Se muestrearon tres lingoteras de prueba aleadas con Molibdeno, las cuales quedaron numeradas y - distribuidas de la siguiente manera:

LINGOTERA N° 3176.

Muestra N° 1 - Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región inferior.

Muestra N° 2 Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región superior.

Muestra N° 3 Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región central.

LINGOTERA N° 3167.

Muestra N° 4 - Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región superior la cual - se dividió en dos partes: Una superior -- externa y otra superior interna; con el - objeto de conocer los detalles estructura les de ambas partes.

Muestra N° 5 Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región central.

LINGOTERA N° 3169

Muestra N° 6 Correspondiente a la fractura sufrida por la lingotera en su región superior.

Muestra N° 7 Correspondiente a la fractura sufrida por la lingotera en su región central.

OBJETIVO: Estudiar su estructura y composición química pa ra relacionarlas con la baja vida sufrida por - estas lingoteras de prueba.

VIDA TOTAL DE ESTAS LINGOTERAS: N° 3176 - 6 coladas
 N° 3167 - 14 coladas
 N° 3169 - 11 coladas

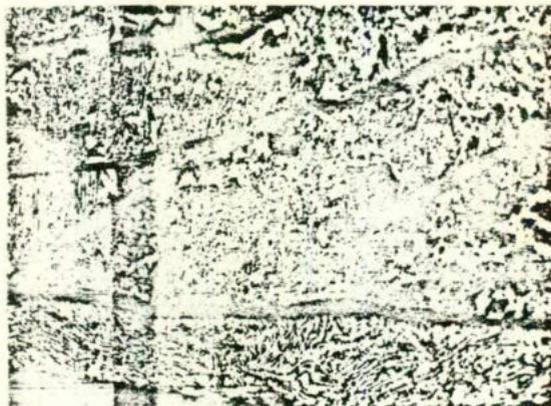
ANALISIS QUIMICO

	<u>3176</u>			<u>3167</u>		<u>3169</u>	
	<u>1.</u>	<u>2.</u>	<u>3.</u>	<u>4.</u>	<u>5.</u>	<u>6.</u>	<u>7.</u>
Carbono Total	3.62	3.36	3.10	3.60	3.32	3.10	3.40
Carbono Grafitico	2.70	3.00	2.40	3.10	2.60	2.80	2.90
Carbono Combinado	0.92	0.36	0.70	0.50	0.72	0.30	0.50
Manganeso	0.42	0.46	0.42	0.52	0.46	0.47	0.46
Fósforo ,	0.140	0.140	0.155	0.150	0.170	0.100	0.140
Azufre	0.024	0.024	0.030	0.022	0.024	0.026	0.026
Cobre	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12
Níquel	0.10	0.06	0.06	0.06	0.10	0.03	0.06
Silicio	1.53	1.57	1.41	1.63	1.53	1.46	1.46
Cromo	0.08	0.06	0.06	0.07	0.08	0.06	0.06
Molibdeno	0.08	0.06	0.08	0.10	0.10	0.08	0.08
C. E.	4.13	3.88	3.57	4.14	3.82	3.59	3.89

NOTA: NO SE AGREGO ARRABIO

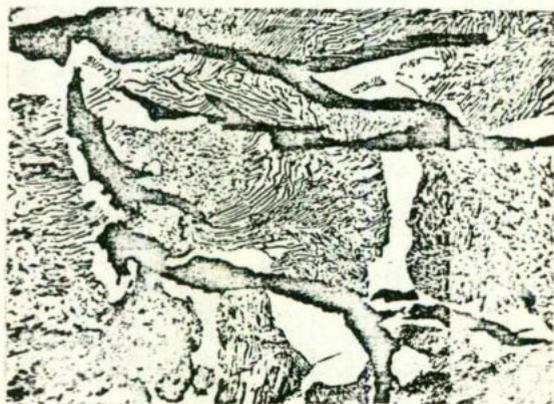
LINGOTERA N° 3176

Muestra N° 1 Microsección N° 9567.- Grafito en láminas tipo A y C, tamaño 2 y 3 con pocas formaciones de grafito compacto. Estructura perlítica 55% laminar, 25% - fina, 10% esferoidizada con 10% de ferrita y escasas zonas de esteadita (fosfuro de hierro).



400 X

NITAL 2 %

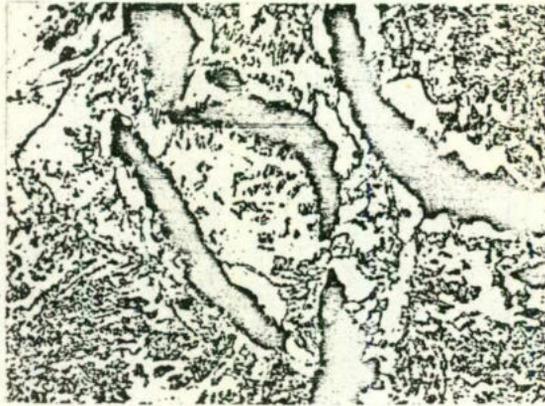


400 X

NITAL 2 %

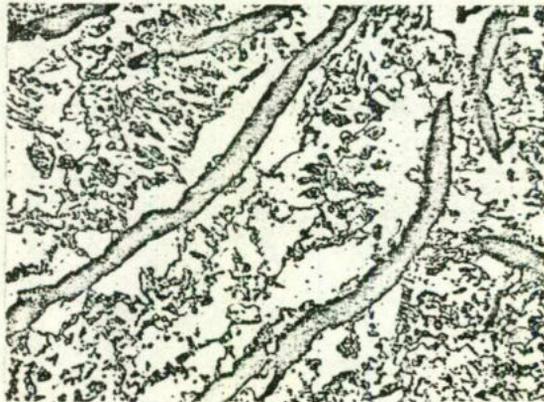
LINGOTERA N° 3176

Muestra N° 2 - Microsección N° 9568.- Grafito en láminas las tipo A con poco del tipo C, tamaño 2, 3 y 4 con mayores formaciones de grafito compacto. Estructura - - perlítica 60% esferoidizada, 10% laminar, 5% fina y 25% ferrita. Mayores regiones de esteadita.



400 X

NITAL 2 %



400

NITAL 2 %

LINGOTERA N° 3176

Muestra N° 3 - Microsección N° 9569.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2 y 3 con pocas formaciones de grafito compacto. Estructura perlítica 65% fina, 25% gruesa y 10% de ferrita. Pocas regiones de esteadita.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

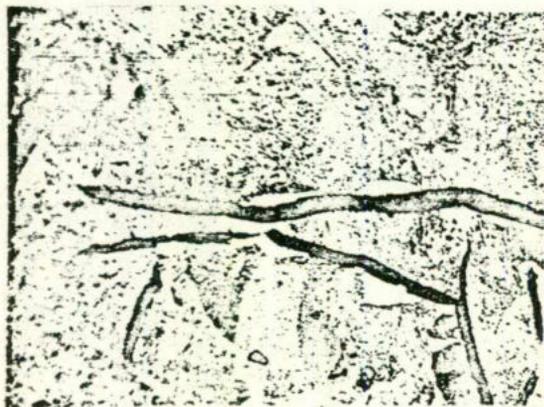
LINGOTERA N° 3167

Muestra N° 4 - Microsección N° 9570.- Grafito en láminas tipo A con poco del tipo C, tamaños 2', 3 y 4. Estructura perlítica 70% fina, 15% laminar y con 15% de ferrita. -- Escasas regiones de esteadita.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

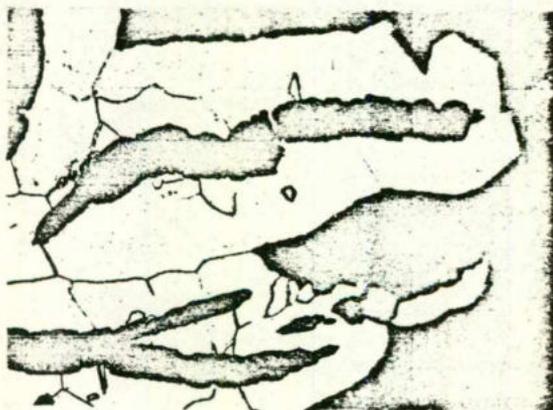
LINGOTERA N° 3167

Muestra N° 4 - Microsección N° 9571.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2 y 3 con formaciones de grafito compacto. Estructura perlítica-ferrítica 50% fina, - 10% laminar, 40% ferrita. Pocas regiones de esteadita.



100 X

NITAL 2 %

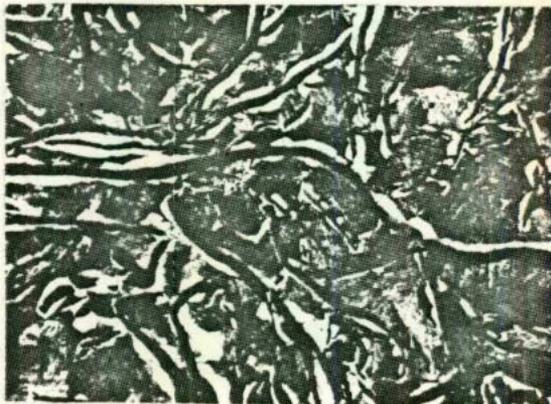


400 X

NITAL 2 %

LINGOTERA N° 3167

Muestra N° 5 - Microsección N° 9572.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2 y 3 con formaciones de grafito compacto. Estructura perlítica 60% fina, 15% laminar y con 25% ferrita. Bastantes regiones de es--teadita.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

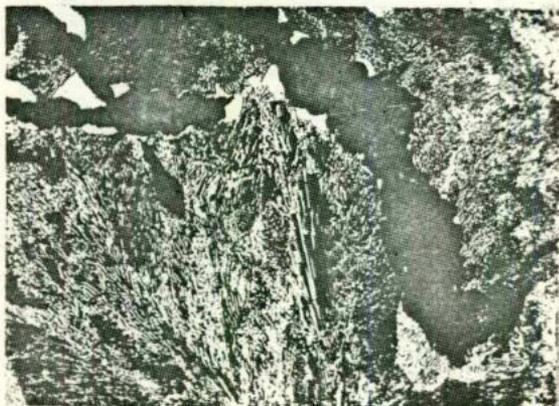
LINGOTERA N° 3169

Muestra N° 6 - Microsección N° 9573.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2, 3 y 4. Con bastantes formaciones de grafito compacto. Estructura perlítica 45% -- fina, 40% laminar, 5% esferoidizada y con 10% de ferrita. Escasas regiones de esteadita.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

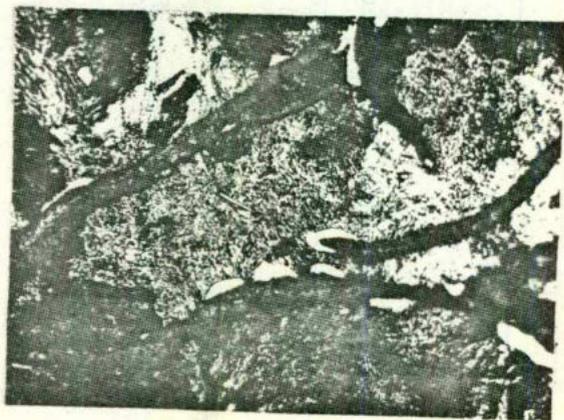
LINGOTERA N° 3169

Muestra N° 7 - Microsección N° 9578.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2, 3 y 4 con bastantes formaciones de grafito compacto. Estructura perlítica 80% -- fina, 16% laminar y con 10% de ferrita. Escasas regiones de esteadita. Zonas decarburadas en pocas regiones con grasa y escoria.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

Por el estudio efectuado a todas las probetas de estas lingoteras de prueba, se puede decir en términos generales lo siguiente:

La matriz predominante es la perlítica, la ferrita se presenta con porcentajes muy bajos y el grafito lo encontramos en la forma de láminas tipos A y C, tamaños - 2, 3 y 4; así como también en la forma de grafito compacto.

Por supuesto que este tipo de estructura no es la más recomendable que deben presentar las lingoteras de acuerdo a la teoría; ya que estas deben de tener una alta resistencia al choque térmico, una buena conductividad térmica y una resistencia al impacto determinado y la estructura perlítica no le proporciona estas características.

Este tipo de estructura se presenta cuando la composición y la velocidad de enfriamiento son tales que se impide la grafitización de la cementita eutectoide y la matriz será totalmente perlítica.

Por lo que respecta a la ferrita, esto se encuentra como se mencionó anteriormente con un porcentaje muy bajo lo que da como resultado que la vida de las lingoteras se vea reducida debido a la formación de grietas causadas por choques térmicos y la ferrita es la estructura que presenta mayor resistencia a este tipo de falla; pero cabe hacer la aclaración que una estructura predominante ferrítica da lugar también al defecto conocido como "quemado" por lo que es necesario que la estructura sea tal que pueda ser capaz de resistir el choque térmico y las quemaduras.

Esta estructura es la ferrítica-perlítica con una composición de 60% - 70% ferrita y 40% - 30% perlita. Por lo que se sugiere que la lingotera tenga un tiempo de permanencia de 3 a 4 días dentro del molde y después terminar el enfriamiento al aire quieto.

Terminada esta operación tomar muestras en diferentes -- regiones, hacer metalografía ver tipo de estructura y -- comprobar que sea ferrítico-perlítica; en caso contrario modificar los tiempos de permanencia en el molde hasta -- lograr este tipo de estructura. |

En lo que se refiere al grafito, tenemos que este no se encuentra distribuido con la homogeneidad deseada y que además se presenta en la forma conocida como "compacta" -- cuya formación se atribuye a la presencia de gas Nitrógeno. Esto trae como consecuencia que disminuya en algo la conductividad térmica de gran importancia puesto que reduce la vida de la lingotera. Por lo que es necesaria -- una mayor proporción de carbono total así como también -- de grafito libre, mejor distribución y eliminar el contenido de Nitrógeno mediante la adición de Aluminio.

Es conveniente también la formación de grafito nodular -- puesto que este tipo de grafito presenta una alta resistencia a las tensiones provocadas por las expansiones -- y contracciones a que es sometida la lingotera durante -- su uso en Aceración por lo que se sugiere añadir Magnesio como inoculante para dar lugar a la formación de este tipo de grafito. Pero hay que aclarar que el porcentaje de Magnesio no deberá exceder de 0.06%.

En lo referente al análisis químico, los resultados reportados por el laboratorio muestran que los valores -- porcentuales de Carbono total y equivalente están bajos de los recomendados por la teoría. Las posibles causas -- de esta baja son muy variadas y dar una explicación satisfactoria traería como resultado una investigación más minuciosa la que de momento es imposible llevar a cabo -- dado el poco tiempo de que se dispone.

Lo que si es importante es que una decarburización puede dar lugar a la formación de grietas puesto que la lingotera al expandirse está sujeta a esfuerzos desiguales -- por la presencia de esta falla.

Para los elementos Si, Mn, P y S se puede decir que los porcentajes reportados se encuentran dentro de los valores recomendados por la teoría.

A continuación se presentan unas recomendaciones para aumentar la vida de las lingoteras:

- a) El contenido de (C + Si) deberá estar dentro de 5.15% a 5.95%.
- b) El Silicio deberá ser balanceado con el contenido de carbón en la siguiente forma:

<u>C</u>	<u>Si</u>
3.95%	1.588%
3.85%	1.873%
3.75%	2.04 %

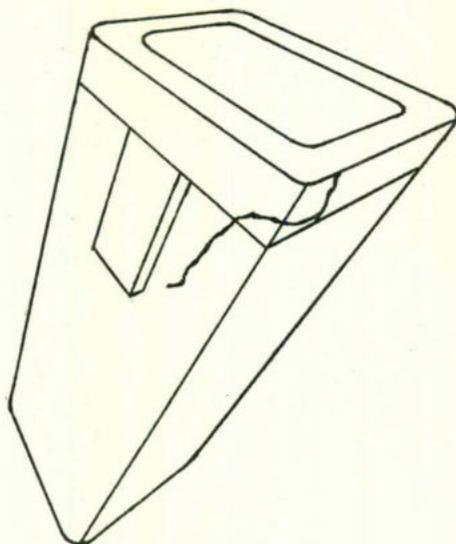
- c) Incrementando la razón Si/Mn se incrementa la vida de la lingotera.
- d) El Manganeso deberá estar dentro de 0.6 a 0.8%.
- e) La influencia de una razón más alta de Mn/S es benéfica para incrementar la vida de la lingotera.

Para concluir este reporte comentaremos algo acerca de estas lingoteras de prueba aleadas con Molibdeno.

Estas lingoteras tuvieron un período de vida mucho muy bajo comparado con las lingoteras HYLSA que operan actualmente. Esto no era lo que se esperaba puesto que al agregar Molibdeno se mejoran todas las propiedades de la lingotera, entre ellas y muy importante es aumentar la resistencia al choque térmico que es el principal formador de grietas.

Independientemente de lo argumentado en los párrafos anteriores, las causas por las cuales hubo baja vida pueden ser las siguientes:

- 1° El tipo de fractura que sufrieron estas lingoteras se ilustra en la siguiente figura:



Este tipo de fractura se presenta principalmente por presencia de grietas algunas de ellas imperceptibles a simple vista, localizadas en la parte superior de la lingotera causadas por rechupes y porosidades provocadas, la primera por contracciones debidas a enfriamientos rápidos y la segunda por la presencia de gases atrapados que son generalmente H_2 y N_2 debido a la humedad que tengan el molde y el corazón. Todo esto aunado con un uso indebido, propiciará que estas grietas sigan avanzando por las zonas más débiles hasta llegar a la fractura total de la lingotera.

- 2° Si lo que se esperaba al agregar Molibdeno era incrementar la vida de la lingotera, y debido a que esto-

no fue así, entonces es probable que, (y así lo demuestra el análisis químico) no se haya agregado la carga correcta de Ferro-Molibdeno por tonelada de carga por lo que sería conveniente volver a efectuar el balance de materia y determinar la cantidad de Fe-Mo por tonelada de carga que se necesita agregar para obtener un porcentaje de 0.1% - 0.3% de Molibdeno que es el más recomendable.

- 3° Otra probable razón es que posiblemente el Molibdeno no se agregó a la temperatura en la cual es soluble en la ferrita lo que pudo dar origen a la formación de carburos.
- 4° Por último y de gran importancia es que no se agregó arrabio y se sugiere tomar en cuenta esto porque cuando el hierro de fundición se recicla constantemente presenta la falla conocida como "agotamiento", el cual repercute en la vida de la lingotera.

R E P O R T E N° 2

DEFECTOS Y BAJA VIDA DE LINGOTERAS
(Sin Molibdeno)

MUESTRAS: Se muestrearon dos lingoteras en regiones diferentes, las cuales quedaron numeradas y -- distribuidas de la siguiente manera:

LINGOTERA N° 1119

- Muestra N° 1 Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región inferior.
- Muestra N° 2 Idem región superior.
- Muestra N° 3 Idem región central.

LINGOTERA N° 2285

- Muestra N° 4 Corresponde a la fractura sufrida por la lingotera en su región inferior.
- Muestra N° 5 Idem región central.
- Muestra N° 6 Idem región superior.

OBJETIVO: Conocer su composición química y metalográfica y en base a esto determinar la causa de la baja vida de las lingoteras.

VIDA TOTAL DE ESTAS LINGOTERAS: N° 1119 - 28 Coladas.
N° 2285 - 42 Coladas.

ANALISIS QUIMICO

	<u>1119</u>			<u>2285</u>		
	<u>1.</u>	<u>2.</u>	<u>3.</u>	<u>4.</u>	<u>5.</u>	<u>6.</u>
Carbono Total	3.60	3.70	3.72	3.70	3.80	4.10
Carbono Grafitico	3.10	3.18	3.36	3.10	3.50	3.40
Carbono Combinado	0.50	0.52	0.36	0.60	0.32	0.70
Manganeso	0.52	0.46	0.48	0.55	0.48	0.55
Fósforo	0.140	0.110	0.155	0.130	0.150	0.140
Azufre	0.040	0.045	0.028	0.028	0.032	0.020
Cobre	0.12	0.10	0.11	0.10	0.10	0.08
Níquel	0.11	0.04	0.11	0.04	0.11	0.04
Silicio	1.63	1.53	1.63	1.78	1.70	1.78
Cromo	0.08	0.04	0.08	0.06	0.08	0.06
Molibdeno	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01
Carbono Equivalente	4.19	4.25	4.30	4.34	4.42	4.74

Lingotera N° 1119

Muestra N° 1 - Microsección 9579.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2, 3, 4 y 5 con formaciones de - grafito compacto. Estructura perlítica 45% laminar, - 45% fina, 5% esferoidizada y con 5% de ferrita. Zonas con esteadita (eutéctico de fosfuro de hierro).



100 X

NITAL 2 %

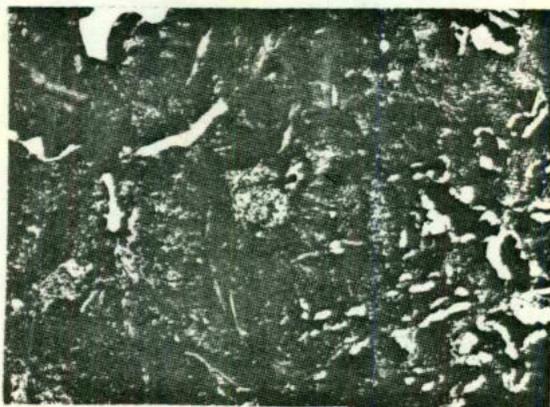


400 X

NITAL 2 %

LINGOTERA N° 1119

Muestra N° 2 - Microsección 9581.- Grafito en láminas tipo A con poco del tipo C, tamaños 2, 3, y 4. Se aprecian mayor formaciones de grafito compacto. Distribución heterogénea. Estructura perlítica 30% laminar, 30% fina, 30% esferoidizada y con 10% ferrita. Bastantes zonas con es--teadita.



~100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

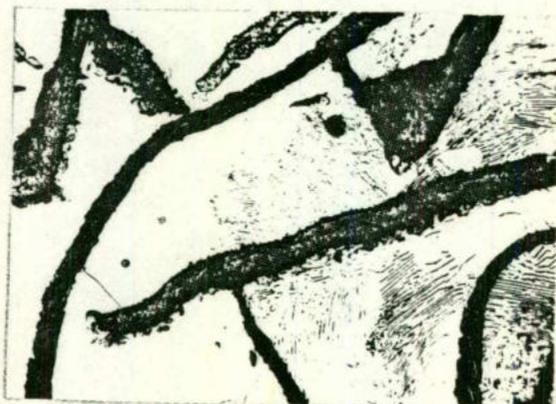
LINGOTERA N° 1119

Muestra N° 3 - Microsección 9582.- Grafito en láminas-tipo A y C, tamaños 2, 3, y 4. Apreciándose una saturación del grafito en toda la región, del orden del 95%. Estructura perlítico - ferrítica 40% laminar, 10% fina, 10% esferoidizada y con 40% ferrita. Zonas de esteadita.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

LINGOTERA N° 2285

Muestra N° 4 - Microsección 9583.- Grafito en láminas - tipos A y C, tamaños 2, 3 y 4. Apareciéndose una completa saturación del grafito en toda la región del orden - del 95%. Estructura ferrítica 90% ferrita, 5% laminar, - 5% esferoidizada. Muy escasas zonas de esteadita.



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

LINGOTERA N° 2285

Muestra N° 5 - Microsección 9584.- Grafito en láminas - tipos A y C, tamaños 2, 3 y 4. Observándose zonas decarburadas con impurezas tales como grasa y escoria. Estructura ferrítica 90% ferrita, 10% perlita fina y esferoidizada alrededor del grafito.



100 X

NITAL 2 %

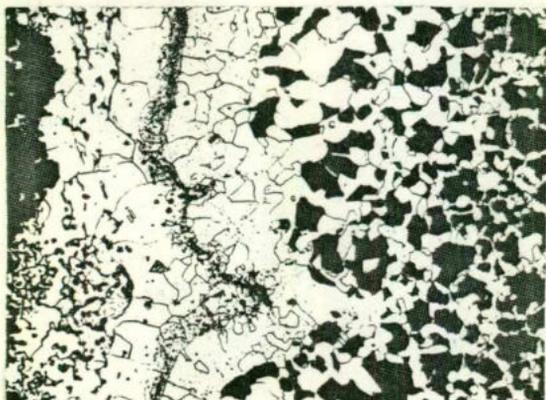


400 X

NITAL 2 %

LINGOTERA N° 2285

Muestra N° 6 - Microsección 9585.- Grafito en láminas tipos A y C, tamaños 2, 3 y 4 con escasas formaciones de grafito nodular. De nuevo se aprecian zonas decarburadas muy notables en las cuales encontramos impurezas como grasa y escoria en forma de grumos. Estructura -- perlítica 45% laminar, 45% fina y con 10% ferrita.



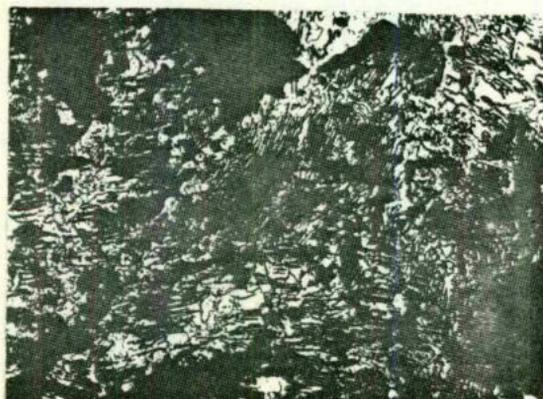
100 X

NITAL 2 %



100 X

NITAL 2 %



400 X

NITAL 2 %

Las estructuras que presentan estas dos lingoteras son tan diferentes que el estudio de cada una se hará por separado.

LINGOTERA N° 1119.- Presenta una estructura perlítica en un 82% y el resto en ferrita en un 18%. Esta estructura es la menos recomendable que deben poseer las lingoteras por las razones argumentadas en el Reporte N° 1 por lo que, se recomienda para estas lingoteras sin Molibdeno, seguir el mismo tratamiento sugerido en el reporte anterior.

En lo que se refiere al grafito encontramos diferencias notables con respecto a las lingoteras con Molibdeno y que son las siguientes:

Una distribución muy poco homogénea del grafito a lo largo de toda la lingotera con formaciones además de grafito compacto apreciándose más esto en unas regiones que en otras.

Esto es de considerable importancia ya que sabemos que si en una región hay mayor cantidad de carbono grafito que en otras se producirán esfuerzos desiguales debido a las expansiones y contracciones a que está sujeta la lingotera durante su uso dando origen a la formación de grietas. Lo anterior es cierto porque a mayor cantidad de Carbono habrá:

- a) Mayor conductividad térmica.
- b) Menores contracciones.
- c) Mayor resistencia al agrietamiento promovido por choques térmicos.
- d) Mayor resistencia a la fatiga térmica.

y a menor cantidad sucederá lo contrario.

Por último el tipo de fractura que presenta esta lingotera es exactamente igual a la que sufrieron las lingoteras con Molibdeno; por lo que aunado a lo anterior, las posibles causas por las cuales se presentó este tipo de fractura fueron explicadas en el Reporte N° 1.

LINGOTERA N° 2285.- Presenta una estructura muy variable ya que en las partes inferior y central es ferrítica y en la superior es perlítica; esto, de acuerdo a las observaciones efectuadas a las tres probetas.

Puesto que en la actualidad a ninguna lingotera se le da el tratamiento térmico de recocido, quiere decir entonces que ésta lingotera permaneció dentro del molde por un determinado tiempo, mayor de 9 Hs. que fue lo que originó la estructura ferrítica en las partes inferior y central. Y por lo que respecta a la región superior la cual presenta estructura perlítica, es evidente que esta región no fue protegida mediante una tapa de arena por lo que su enfriamiento se llevó a cabo más rápidamente dando origen a esta estructura.

Por lo que se refiere al Carbón grafito tenemos que la distribución es totalmente heterogénea con formaciones de grafito compacto y la presencia de una amplia zona decarburada con impurezas tales como grasa y escoria. Debido a que tanto en la lingotera N° 1119 como en la 2285 se han presentado estas características relacionadas con el carbón grafito, es conveniente comentar lo siguiente:

La formación de grietas superficiales que aparecen en la superficie interior de la lingotera resultan de los efectos combinados de oxidación y crecimiento del hierro. Los resultados de gran número de investigaciones han indicado que el crecimiento de el hierro sujeto a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento pueden ser atribuidas a: (1) Grafitización; (2) cambios del volumen al pasar através del punto de transformación Ac_1 ($723^{\circ}C$); (3) oxidación, particularmente de el silicio en el hierro.

De estas las dos últimas parecen ser las más importantes para los hierros que son repetidamente calentados en exceso de el punto de transformación Ac_1 como es normalmente el caso de las lingoteras -

(con la posible excepción de moldes para lingotes muy pequeños). La penetración del óxido es ayudada por la presencia del grafito en hojuelas, las cuales son -- generalmente preferidas para ser atacadas; y por la -- abertura (opening) de la estructura causada por repe-- tidas expansiones y contracciones. La forma del gra-- fito en hojuelas afecta el tamaño y la rapidez de la oxidación; el grafito basto incrementa la permeabili-- dad del hierro a los gases y por consiguiente incre-- menta la susceptibilidad a la oxidación y el creci-- miento.

La solución para evitar la oxidación y el crecimiento es la presencia también de grafito esferoidal en el -- hierro, porque los nódulos de grafito están desconec-- tados unos a otros y no promueven canales para la sa-- lida y progreso de la oxidación. Por consiguiente -- tanto el crecimiento como la oxidación están deteni-- das y el grafito esferoidal en el hierro tiende a dar un menor deterioro en comparación con el grafito en -- hojuelas.

Lo siguiente es una sugerencia tentativa para evitar-- la oxidación y crecimiento en base a lo anterior:

- a) Contenido de Carbón en, o cercano al nivel eutécti-- co (en conjunción con él) contenido de Silicio.
- b) Manganeso tan bajo como sea posible, cerca del -- 0.6%.
- c) Silicio bajo para promover la conductividad térmi-- ca, digamos 1.3 - 1.8%.
- d) Azufre tan bajo como sea posible, 0.012% (necesa-- rio para propiciar la esferoidización).
- e) Magnesio 0.04 - 0.06%
- f) Fósforo bajo 0.06 máximo.

CONCLUSIONES

INTRODUCCION.

En base a los conceptos teóricos presentados en capítulos anteriores, se presentó el siguiente diseño - abalado por un estudio estadístico integral, pretendiendo se con esto mejorar la vida de los moldes para lingotes - de tan amplio uso en las Plantas de Aceración de los Estados Unidos Mexicanos.

Este diseño incluye dos aspectos fundamentales:

- 1.- Composición química.
- 2.- Tecnología de fabricación.

El tipo de molde que se diseñó, y que se cree - dará el mejor rendimiento, se ilustra con todo detalle en la figura C-1.

1.- COMPOSICION QUIMICA.

Para investigar el efecto de los constituyentes químicos sobre la vida de los moldes para lingotes, se consideraron todos los constituyentes químicos separadamente manteniendo las otras variables constantes.

La suma de los contenidos (C + Si) es un factor importante para determinar la vida de los moldes. En los moldes donde los porcentajes de Mn y S estaban dentro de límites constantes de 0.5 a 0.8% y de 0.05 a 0.06% respectivamente, fueron considerados dentro de este estudio. La figura C-2 define claramente la relación de la vida del molde con el contenido de (C+Si). Es evidente a partir de esta figura que de 5.15 a 5.95% de (C + Si), la vida del molde permanece practicamente sin cambio alguno. Más allá de estos dos puntos, -

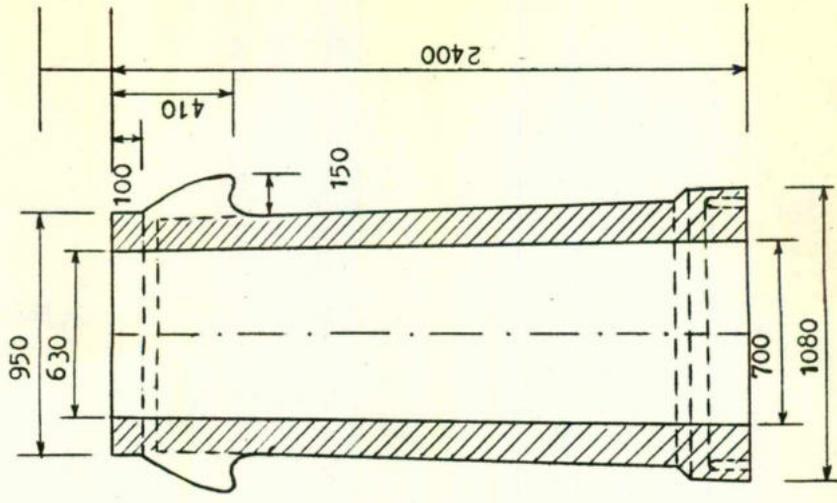


FIG. C-1b

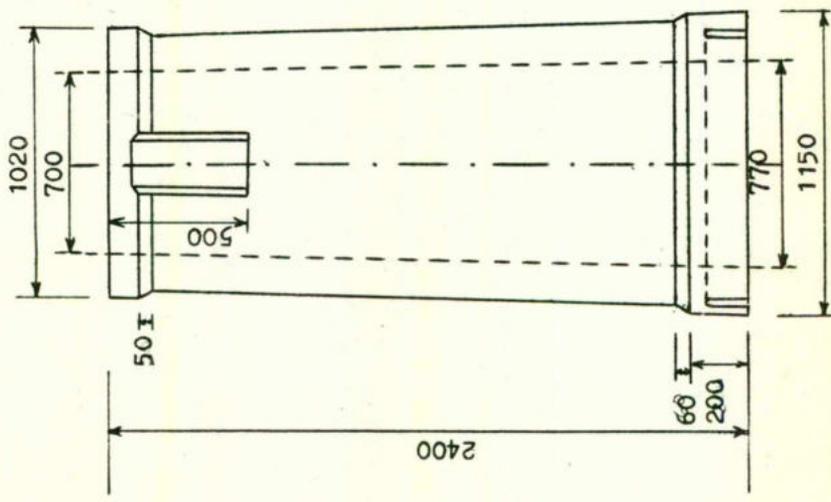


FIG. C-1a

FIG. C-1 Diseño de un molde para lingote.

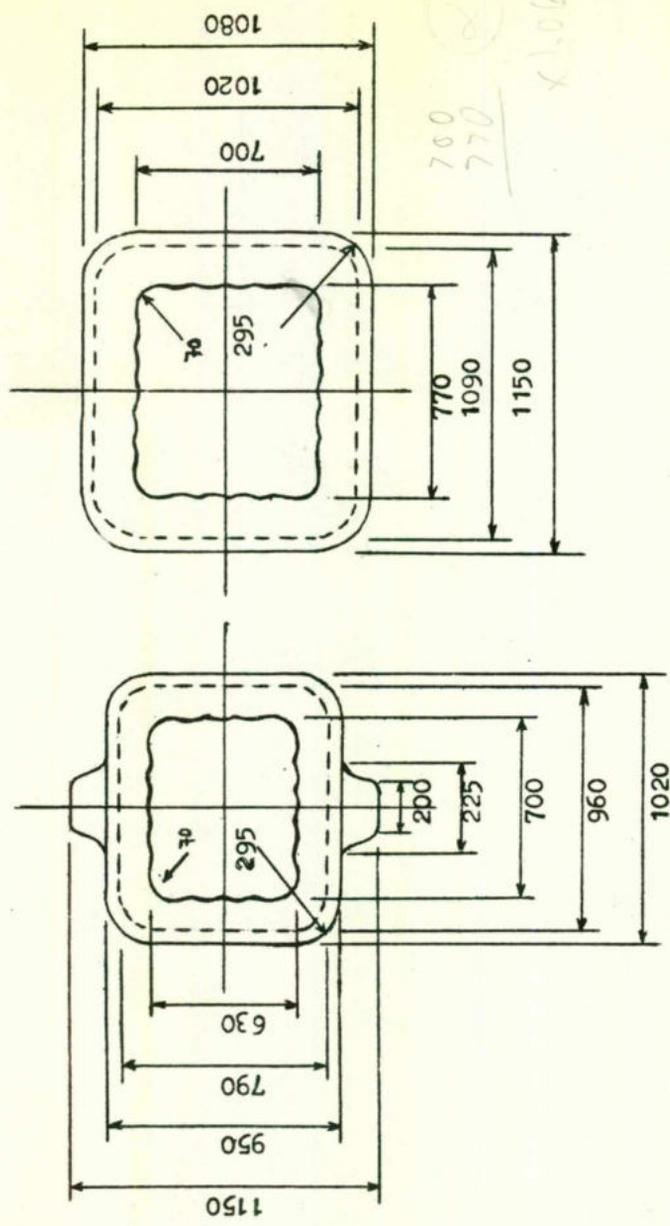


FIG. C-1a''

FIG. C-1a'

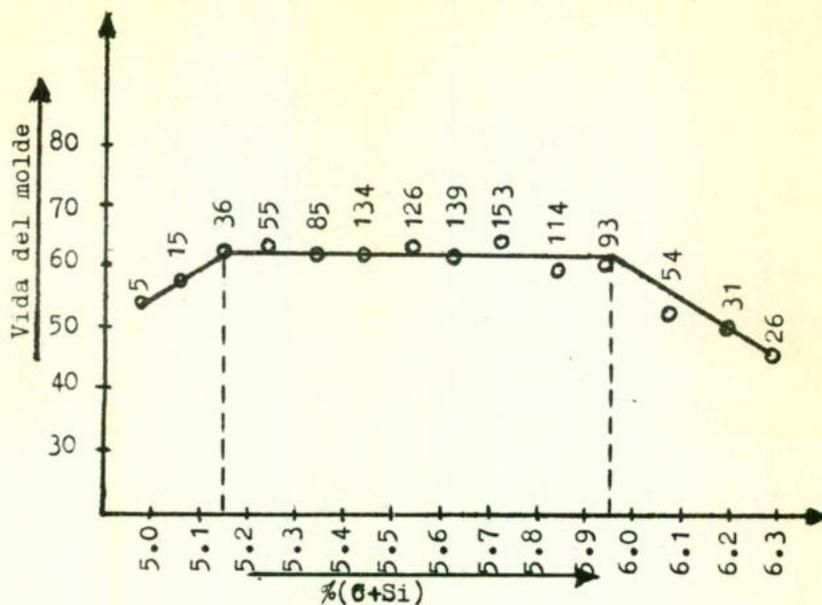


FIG. C-2 Relación entre la vida del molde y la suma de los porcentajes de carbono más Silicio.

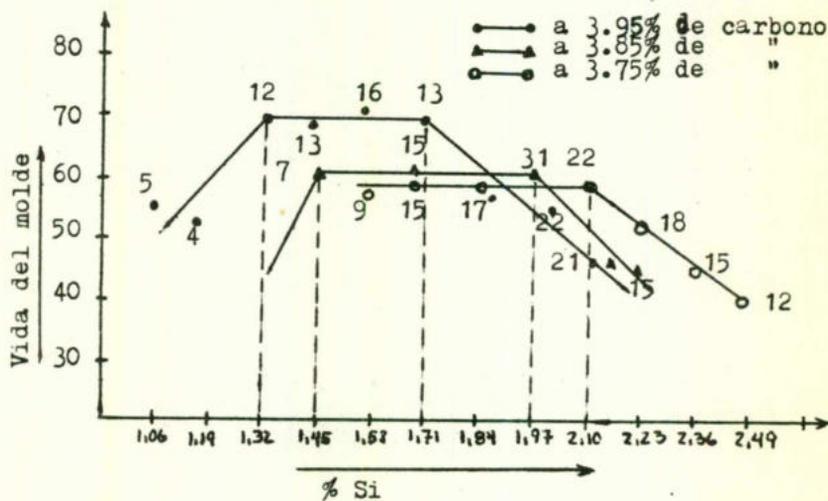


FIG. C-3 Vida del molde graficada contra el % de Si a un porcentaje de carbono constante.

se observa que la vida del molde se deteriora marcadamente.

Se han realizado intentos para investigar el efecto -- del contenido de Si solo, sobre la vida del molde a un nivel de Carbono constante, fig. C-3. Un estudio crítico de la fig. C-3 revela que moldes con contenido de Si de 1.32 a 1.71% a un nivel de Carbono de 3.95% resultaron ser los mejores durante el servicio. Con 3.85% de Carbono, el límite óptimo de contenido de Si para el mejor rendimiento de los moldes es de 1.45 a 1.97%, -- mientras que con un contenido de Carbono más bajo -- (3.75%) el contenido de Si puede ser aumentado por -- arriba de 2.10%. Es también evidente de esta figura -- que hay una tendencia de aumentar la vida de los moldes incrementando el contenido de Carbono. La vida de servicio de los moldes se puede aumentar en un 16% incrementando el contenido de Carbono de 3.75 a 3.95%.

Para obtener la correlación entre el contenido de Mn -- en el hierro y la vida de servicio de los moldes se -- consideró una variación en un rango de 5.15 a 5.95% -- del contenido de (C + Si). La figura C-4 representa -- el efecto del contenido de Mn en el hierro sobre la -- vida de los moldes.

Los moldes que tienen un contenido de Mn entre 0.6 y -- 0.8% parecen ser los mejores durante el servicio.

La relación inversa entre la vida útil de los moldes y las concentraciones de S en el hierro se muestra en la figura C-5. Es obvio que a partir de esta figura que -- el S juega un papel importante en detrimento sobre la vida del molde y que bajando el contenido de S de -- 0.08 a 0.05% la vida del molde se puede aumentar en un 25%.

El efecto de las razones Mn/S y Si/Mn sobre la durabilidad del molde se consideraron separadamente tal como se muestra en las figuras C-6 y C-7. La influencia benéfica que presentan estas razones cuando su valor va-

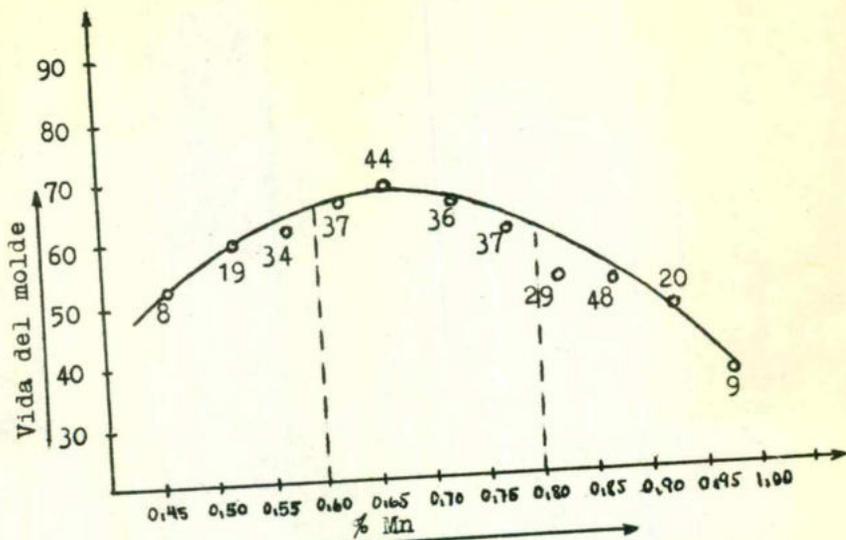


FIG. C-4 Efecto de el contenido de manganeso sobre la vida del molde.

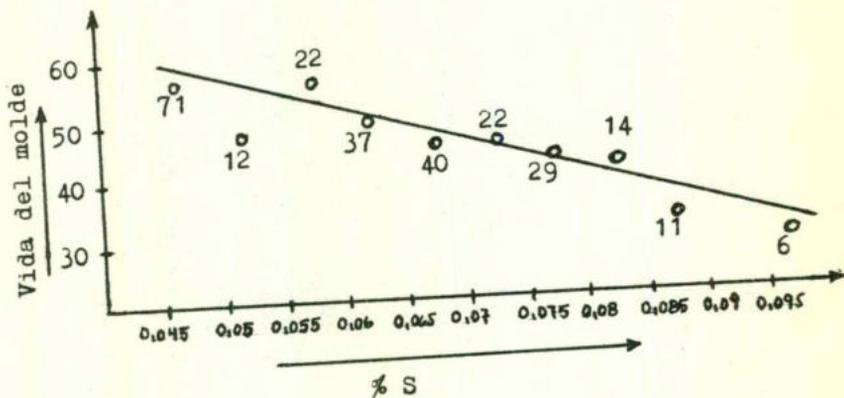


FIG. C-5 Vida del molde como una función de los contenidos de azufre en el hierro

en aumento, es clara a partir de las dos figuras - - - (C-6 y C-7).

La variación del contenido de Fósforo en el hierro - - está también limitada (0.2 a 0.24%) aunque se aclara - que no se pudo detectar ninguna relación entre el contenido de Fósforo y la vida útil del molde. Pero en ba se a un estudio exaustivo de los datos disponibles en la literatura, se llegó a la conclusión que para aumentar la resistencia al crecimiento en el hierro, el contenido de Fósforo se deberá mantener tan bajo como sea posible, por ejemplo 0.15%.

2.- TECNOLOGIA DE FABRICACION.

Los factores tecnológicos que afectan la durabilidad - del molde son: La temperatura del metal en el cubile--te, la velocidad de colada y la temperatura de vacia--do.

En el presente estudio se pudo encontrar una relación- entre la temperatura del metal en el pico del cubilote y la de vaciado con la vida útil del molde. Esto se -- muestra en la figura C-8. Es evidente que la vida del- molde aumenta cuando las diferencias de temperatura -- entre el pico y la de vaciado es de 80 a 130 grados -- centígrados, y más alla de estos dos límites la vida - del molde disminuye.

La velocidad de colada es uno de los factores más im--portantes que pueden aumentar la vida del molde.

El efecto de la velocidad de colada sobre la vida del- molde se muestra en la figura C-9. Es evidente a partir de esta figura que un incremento en la velocidad de -- colada de 15 a 32 Kg/seg. aumenta la vida del molde en un 60%.

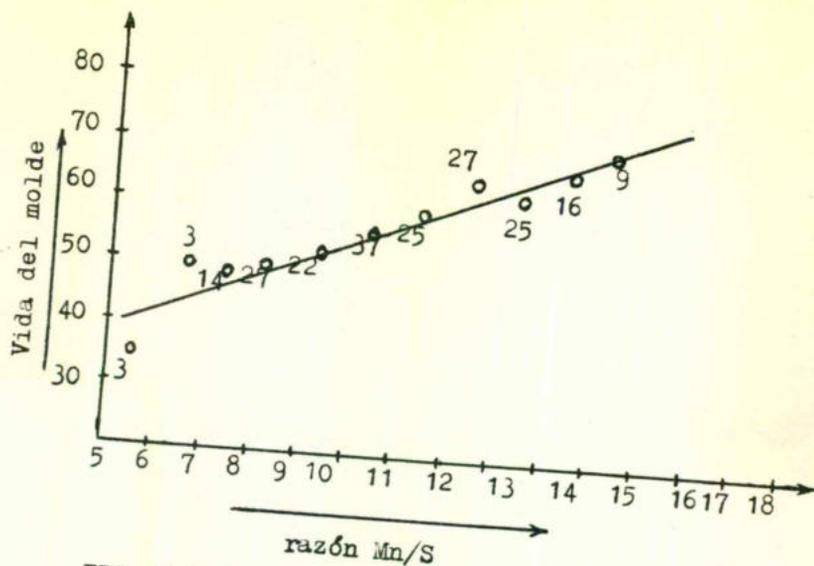


FIG. C-6 Influencia de la razón Mn/S sobre la vida del molde.

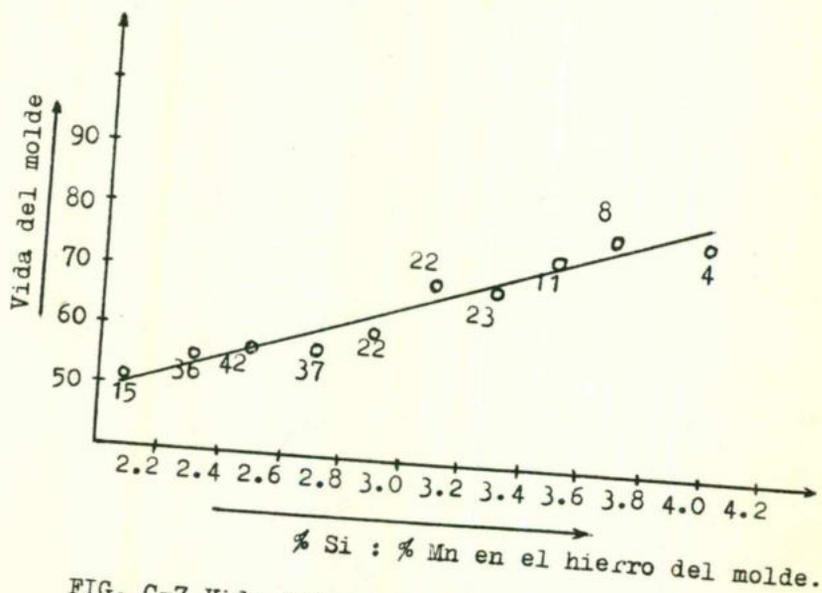


FIG. C-7 Vida del molde como una función de los porcentajes de Si/Mn.

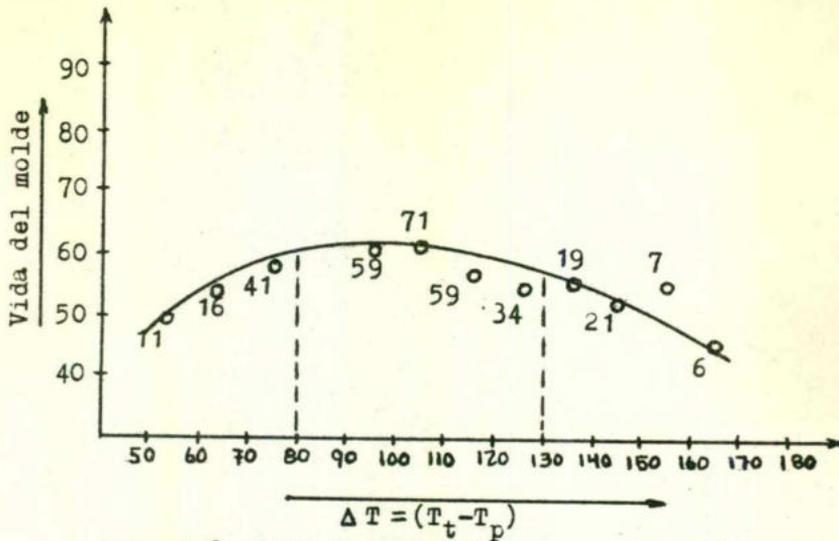


FIG. C-8 Relación entre la vida del molde y ΔT donde T_t es la temperatura en el pico y T_p es la temperatura de vaciado.

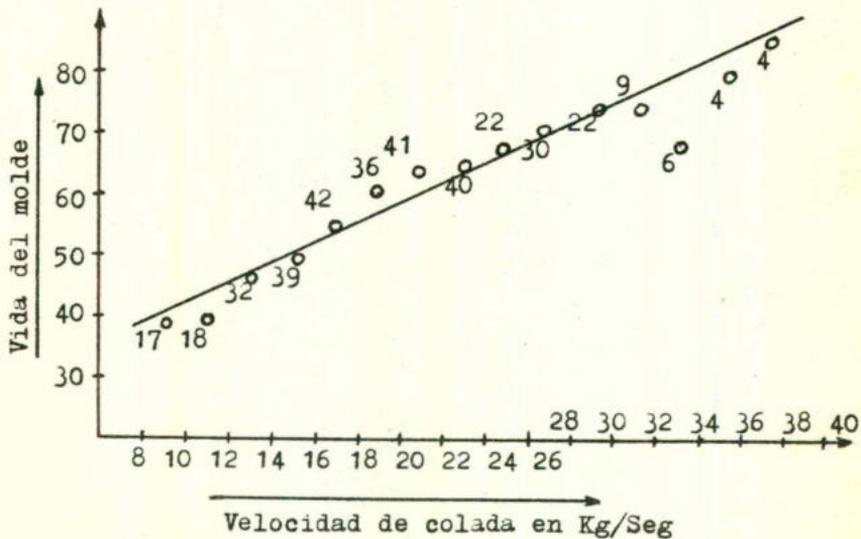


FIG. C-9 Relación entre la vida del molde y la velocidad de colada en Kg/Seg.

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

- 1.- R.G. FOWLER: Journal of metals, Ago. 1966 Vol. 18; 972-976.
- 2.- A.K. Gruznov et al; Stal 5, 1969; 463-365.
- 3.- R.E. Lismer and F.B. Pickering: JISI March 1972; - 263-267.
- 4.- N.H. Bacon: JISI Enero 1968; 81-95.
- 5.- ISI Spee report # 52 Feb. 1975.
- 6.- A.P. Banks JISI Sept. 1966; 173-177.
- 7.- R.T. Fowler and I.H.W. Savage: JISI Julio 1972 - - 277-288.
- 8.- E.R. Evans Iron and Steel, Marzo, Abril y Mayo 1967.
- 9.- M.W. Buttler and W.H. Glaisher: JISI Julio 1971; -- 287-301.
- 10.- P. Goureau and J. Dutlot: Foundarie, Feb. 1965.
- 11.- British Patent N° 1,086,946.
- 12.- A. Jackson: JISI 1971 Vol. 167; 289-301.
- 13.- British Patent N° 802,496.
- 14.- Yu Ya Gretskii et al: Stal in English 1966 Vol. 12; 978-980.
- 15.- F. Varga: Koh Lapok Ontode 1973 May; 97-105.
- 16.- R. I. Marchall: Steel Peech & Tozer, Met Report - - Enero 1972.
- 17.- I. Zagdravnykh: Stal Mayo 5 1973.
- 18.- K. Nagami & M. Tsubone "New Mould Cooling Ph" Oct.- 1964.
- 19.- Tercer reporte del sub-comité de moldes para lingotes BISRA: ISI Spee Report N° 52, Feb. 1965.

- 20.- G. Bortolani International Foundry Congress 1964.
- 21.- G. Bauer et al: Foundrie Feb. 1967 N° 133; 64-79.
- 22.- S. M. Bobrovskikh and A. G. Nikolaev Stal 1967; -- 84-88.
- 23.- M. Ferry; Foundrie, 1967 N° 133 Feb. 55-63.
- 24.- A. Josefsson and B. Backstrom: Annaler Vol. 144; - 739-756.
- 25.- P. Rocquet and M. Oletti Foundrie Julio 1967; - - 2565-2577.
- 26.- D. R. Thoraton: SPT Metallurgical Internal Report Ene. 1966.
- 27.- J. Dutlot Foundryman's Soc. Vol. 4; 387-397.
- 28.- J. Dutlot and Derot foundrie Oct. 1968 N° 153; - - 467-474.
- 29.- L. Beaujard and Mme S Bechet foundrie Feb. 1967; - 80-89
- 30.- A. Gibeau foundrie Junio 1969; 262-265.
- 31.- K. G. Harris Foundryman's Soc. Mayo 1969; 230-240.
- 32.- J. H. Shank Heating Industrial 1974 Vol. 21.
- 33.- T. Dumitrescu Rumana Metallurgie 1966; 55-62.
- 34.- I. E. Kyle and W. Montgomery Steel Times 1969 Julio; 463-467.
- 35.- F. Klepp, Stahl und Eisen Ago. 1965; 977-981.
- 36.- H. Kempers, Giesserei Ene. 1966 N° 1; 15-18.
- 37.- B. G. Lepata et al, Stal in English 1967 Vol. 4; - 307-308.
- 38.- K. Tanaka, Modern Castings, Mayo 1972.
- 39.- R. Jelly Foundryman's Nov. 1967; 432-437
- 40.- Ing. Roberto Bañuelos del Rfo, HYLSA, Monterrey, Méx.
- 41.- Dr. Juan Francisco Mojica HYLSA, Monterrey, Méx.

- 42.- Dr. Federico Angel Rodríguez, HYLSA, Monterrey, Méx.
- 43.- Sr. Roberto González Guerra, HYLSA, Monterrey, Méx.