

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



ESTUDIO TECNICO-ECONOMICO DEL HORNO DE
CUBILOTE, HORNO DE ARCO ELECTRICO Y DEL
HORNO DE INDUCCION.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
Ingeniero Químico Metalúrgico
P R E S E N T A N

CALIXTO ISAAC GARCIA PATRACA
ANTONIO PADILLA VAZQUEZ

México, D. F.

1975



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS. Tesis
ADQ. 1975
FECHA 1975
PROC. U. T. 197



GUINIA

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: KURT NADLER G.
VOCAL : JOSE CAMPOS C.
SECRETARIO: FERNANDO MALDONADO M.
1er. SUPLENTE: Ma. EUGENIA NOGUEZ A.
2do. SUPLENTE: HUMBERTO RODRIGUEZ C.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

FACULTAD DE QUIMICA

U N A M.

SUSTENTANTE: CALIXTO ISAAC GARCIA PATRACA

ASESOR DEL TEMA: M en C. FERNANDO MALDONADO M.

A MIS PADRES:

JUAN GARCIA SALAS

AMANDA P. DE GARCIA

CON INMENSO CARIÑO Y ADMIRACION.

A MIS HERMANOS:

HECTOR

RODOLFO

JUAN

A MI INSEPARABLE COMPAÑERA POR SU

VALIOSA AYUDA:

MARIA GUADALUPE.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. BERNARD A. HASLER por su cooperación y guía.

Al Ing. FERNANDO MALDONADO MENDOZA así como a la Profesora MARIA EUGENIA NOGUEZ AMAYA por sus consejos y ayuda para poder realizar este trabajo.

INDICE

I. - INTRODUCCION

II. - TEORIA DE FUNDICION

- 2.1) Fusión de los metales
- 2.2) Propiedades físicas y de fundición de los metales líquidos.
- 2.3) Solidificación.
- 2.4) Control de calidad.

III. - HORNO DE CUBILOTE

- 3.1) Descripción de equipo.
- 3.2) Materias primas.
- 3.3) Proceso (Operación)

IV. - HORNO DE ARCO ELECTRICO

- 4.1) Introducción
- 4.2) Principios de transferencia de calor.
- 4.3) Descripción de equipo.
- 4.4) Operación.

V. - HORNO DE INDUCCION

- 5.1) Principios del horno de inducción.
- 5.2) Descripción de equipo.
- 5.3) Operación.

VI. - COMPARACIONES Y CONCLUSIONES

- 6.1) Comparación metalúrgica.
- 6.2) Comparación económica.
- 6.3) Conclusiones.

VII. - BIBLIOGRAFIA.

1.0 INTRODUCCION

Actualmente se están llevando a cabo grandes cambios dentro de la industria de la fundición y ello debido al nuevo tipo de piezas requeridas por la industria que tienen que llenar cada día especificaciones más sofisticadas y a la vez aumentar el número de piezas de consumo ordinario dada la gran cantidad que se hace necesaria cubrir, y así, dentro de estos cambios una de las etapas clave que marca nuevos rumbos, es la fusión de metal que nos ha de dar un producto final.

La industria de la fundición se encuentra frente a un reto pues cada día tiene que incorporar los adelantos que llenarán una necesidad creciente en el medio que se desenvuelve y a su vez se agudiza el encarecimiento de los materiales que usa y principalmente de las fuentes de energía usada ya sea que se trate de carburante, gas natural, derivados del petróleo o la corriente eléctrica que son las que emplean los tres tipos de fusión más frecuentemente usados dentro de la industria de la fundición mexicana, y que son, el horno de cubilote, horno de arco y el horno de inducción.

Con el horno de cubilote encontramos un dilema que parece muy serio ya que desde mediados de los años cuarenta se empezó a vislumbrar el que llegara a faltar el energético principal que es el coque, para los años que estarían por venir, pero esto se ha tornado más crítico pues no se preveía el crecimiento tan desmesurado de la producción de hierro fundido, lo cual no quiere decir que tal situación limitante lo esté estrangulando sino que se debe tomar muy en cuenta el elevado costo del energético que está puesto en el mercado debido claro está, a que los costos de su explotación se están incrementando y cada día es más difícil encontrar nuevos yacimientos carboníferos, una solución para aliviar la situación, es el procurar hacerle modificaciones al cubilote para reducir el consumo de coque, tal como introducir gas natural y derivados del petróleo resolviendo en cada fundición los problemas que surjan de tales ajustes pues cada una tiene materiales con determinadas características especiales, y en el país hay de todo tipo y tamaños de cubilote, por lo tanto, se debe planear el uso del coque determinando que piezas esencialmente se deben fundir y programarlas perfectamente tomando en cuenta su costo y calidad, procurando el uso correcto y bien determinado de los elementos que intervienen dentro del proceso pirometalúrgico del hierro.

Ahora bien, los otros dos métodos de fusión más usados, que son el horno de arco directo y el horno de inducción emplean como fuente energética la corriente eléctrica de la cual no se puede pensar que su falta sea tan drástica o que se vaya a carecer de ella en un lapso de tiempo determinado, pero nos encontramos con que el costo va aumentando paulatinamente lo cual nos

ha llevado a plantear todos estos puntos clave dentro de este estudio técnico y económico, para aprovechar en cada paso del proceso de fusión -- del hierro las características que definiremos precisa y específicamente, para lograr bajar los costos de fusión de tonelada de hierro por KWH empleado y hacer de esta manera más costeable la fundición, y poder llevar a cabo en un futuro con estos derroteros planteados, proyectos más ambiciosos y de mayor alcance pues se presentan prometedoras metas.

Se tratará de establecer todas las características y principios que rigen la fusión de los metales así como sus posteriores etapas hasta lograr la pieza deseada. Muchas veces se tratarán temas muy a fondo, los cuales no serán utilizados en su totalidad para los fines de aplicación de este estudio pero esto es con el fin de enfatizar que la fundición es un proceso complejo en el cual intervienen innumerables factores físicos y químicos que la afectan, y que no están totalmente comprendidos.

Este estudio, aunado a los esfuerzos ya llevados a cabo y los que estén por terminar, tiene por objeto tratar de allanar el camino eliminando hasta donde sea posible, los frenos impuestos a la industria de la fundición por los costos de la energía, así como lograr la calidad requerida de las piezas ya terminadas y usar correctamente las características de cada horno con sus ventajas y desventajas procurando llevar siempre en mente un control total a través de todo el proceso contando con la eficiencia técnica y económica para hacer progresar paso a paso a la industria de la fundición que posee un futuro tan prometedor.

2.1 FUSION DE LOS METALES

Introducción.— Dentro de la totalidad de los aspectos del estudio técnico-económico de los sistemas de fusión, el común denominador es la obtención del metal fundido necesario que a continuación se explica con todas sus características y que se lleva a cabo dentro de una típica fundición, ya sea con cubilote, arco eléctrico, o en horno de inducción.

Lo primero que se encuentra dentro de la tecnología de la fusión de los metales es la materia, que va a depender del sistema para fundir y la variedad de problemas con los cuales se puede enfrentar el medio para fundir; chatarra, lingote, retorno, etc. y tendrá variadas formas, tamaños, pureza química y además aleantes según lo requiera el tipo de horno y las características buscadas en el metal colado. Finalmente, dentro del horno con el refractario adecuado y proporcionando la cantidad de calor requerida se lleva a cabo la fusión de la carga.

Lo que se obtiene es una aleación fundida con un contenido de calor apropiado que se transfiere a una olla de la cual se cuecen los moldes a la temperatura deseada.

Los Problemas de la Composición.— En los procesos de fusión del hierro desde el punto de vista metalúrgico, el principal problema que se encuentra son los cambios de la composición del metal. Para producir una fundición con las propiedades y características requeridas, la aleación debe ser de una composición específica. La composición normalmente se obtiene de una carga con una composición inicial diferente, la cual se altera en el curso del proceso de fusión. No sólo debe tener los elementos específicos dentro de los límites requeridos, sino que se deben evitar los elementos indeseables como el contenido de impurezas.

Con algunas excepciones, casi todos los metales se encuentran en la naturaleza como compuestos químicos simples o complejos, a menudo combinados en la chatarra empleada. La aleación de los diferentes hierros obtenidos en la industria está basada en la aplicación de las leyes de la termodinámica química. Estas leyes explican también por qué los metales regresan a la forma de sus compuestos siempre y cuando las condiciones externas permitan que esto ocurra. Tales condiciones se encuentran en los procesos de fusión de la mayoría de los metales. Ahora todas estas condiciones y elementos contaminantes se deducen como sigue para los 3 diferentes medios de fusión de que nos ocupamos:

a) La atmósfera normal (O_2 , N_2 , H_2O y CO_2) como por ejemplo, en la fusión en los hornos eléctricos, donde no existe una protección especial en la fusión que se aplica.

b) Los productos de combustión del aceite, gas o coque usados en la fusión (CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , con O_2 y N_2 del aire); con combustibles só-

lidos los elementos se encuentran en las cenizas, pueden actuar también como contaminantes.

c) El recipiente refractario en el cual es fundido el metal, si no es completamente inerte a la fusión, puede existir contaminación metálica o no metálica como por ejemplo con silicio, aluminio, oxígeno o hidrógeno.

d) Materiales en o dentro de la carga y varios instrumentos usados para ayudar a la fundición y elementos para medir temperatura y analizar composición. También se puede introducir arena o productos de corrosión y pueden contener otros elementos metálicos y no metálicos que no se pueden separar.

En cualquier proceso, sin embargo, la composición final depende sobre todo de la composición de la carga total junto con cualquier cambio durante la fusión.

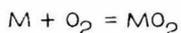
Desde el punto de vista de los cambios de composición, los procesos de fusión pueden caer dentro de dos grupos, ya sea que empleen un solo horno o un sistema duplex: procesos de fusión simple o contínuo y procesos de fusión-refinación. En el primer grupo se encuentran los procesos donde son relativamente pequeños los cambios de composición que ocurren durante la fusión y son muy pequeños los ajustes que son necesarios antes de vaciar. En un proceso en el que se combina fusión y refinación, la carga fundida puede ser ajustada para la composición requerida. El contenido de grafito en el hierro y a menudo el contenido de otros elementos, es disminuido durante la fusión por la oxidación y las reacciones oxidantes de la escoria, el contenido de oxígeno de la fusión es subsecuentemente corregida por el uso de desoxidantes.

El amplio rango de materias primas y energéticos han propiciado el desarrollo de gran número de procesos de fusión ahora en uso para diferentes aleaciones y el perfeccionamiento de los más usados y los grandes avances de la tecnología en los más modernos con lo cual ha surgido la necesidad de adquirir criterio para poder saber qué es lo que debemos emplear y después de analizar todos los factores que contribuyen a caracterizar un horno y otro y las diferencias existentes, se podrá optar por el horno que más convenga a las necesidades de la industria que se trate de instalar o que se trate de ampliar. Para ilustrar con un ejemplo, en la fusión de hierro, la cuestión más relevante y en la cual se basa este estudio es la elección más económica para tener un proceso efectivo para que con la técnica que se use, la fundición salga con las propiedades requeridas.

Cambios Metalúrgicos Durante la Fusión. - Los cambios de composición ocurren en los procesos de fusión como un resultado de las reacciones químicas en los 3 hornos que se estudiarán y que se analizan aplicando las leyes del equilibrio homogéneo y heterogéneo y de la cinética de las

reacciones, las cuales están sujetas a la termodinámica química. Otros cambios pueden ser explicados más directamente en términos de las variables de la presión y temperatura, o de los cambios físicos y el comportamiento de los metales líquidos.

Reactividad Química.— Cuando un hierro está contenido en un crisol refractario, durante el calentamiento para llegar al punto de fusión, los gases en contacto con el metal pueden reaccionar con el mismo y esta reacción ocurre con más facilidad con el oxígeno. La reacción entre el hierro sólido y el refractario sólido es lenta en la mayoría de los casos, por lo que puede ser despreciada. La reacción del metal líquido o sólido con oxígeno si es importante y puede ser representada por la ecuación química:



El oxígeno puede disolverse en el metal líquido o depositarse como una capa o polvo en la superficie la cual puede entrar en la escoria o el flujo, disolver el oxígeno es generalmente perjudicial.

La reacción de oxidación puede ser usada en algunas aleaciones para remover de la fusión elementos perjudiciales tales como el exceso de carbón en el hierro gris, como es el caso del cubilote que es el horno donde más sucede.

La facilidad con la cual reaccionarán los ingredientes de la fusión en los diferentes tipos de hornos se puede expresar por sus elementos en términos de los potenciales químicos. En toda reacción, un cambio está involucrado; el potencial químico es una medida de la energía libre disponible y puede con ello calcularse la cantidad de energía eléctrica en los hornos de arco directo y de inducción para llevar a cabo la reacción sin pérdida de la misma, puesto que esta energía es la fuerza que conduce la reacción. Así el potencial o la energía libre de reacción de los elementos que más intervienen en los sistemas de fusión aquí en estudio, han sido determinados pudiendo proporcionarnos el punto de comparación metalúrgico en los tres hornos al mostrarnos en los diagramas de energía libre donde podemos llevar a cabo la fusión de hierro que se quiera de una forma más económica y fácil dependiendo de la materia prima que se tenga.

Como se sabe, una reacción ocurre cuando hay una disminución total en la energía libre del sistema, o sea que la energía libre de los productos es más pequeña que la de los reactivos. El cambio de la energía libre está definida como: $G = G_{\text{prod.}} - G_{\text{react.}}$, y el valor de una reacción espontánea es negativa. El cambio más grande en la energía libre en el sistema, es la fuerza que maneja la reacción, además la energía libre depende de la temperatura. Para los diferentes elementos que intervienen en los sistemas de fusión en estudio, el efecto del incremento

de la temperatura promueve la descomposición o unión de unos con otros según sea su afinidad, además de que hay que tomar en cuenta de que a altas temperaturas los óxidos del refractario, pueden ser apreciablemente menos estables y ser también una fuente de contaminación.

Equilibrio.— Uno de los objetivos en los sistemas de fusión es mezclar dos o más metales dentro de una aleación o disociar otras aleaciones para formar las deseadas. No existe una propiedad física o química que se pueda usar para predecir el grado de solubilidad de un metal en otro, pero los diagramas de equilibrio proveen la información necesaria. Un diagrama de equilibrio también indica la temperatura a la cual una aleación líquida comienza a solidificarse, siendo esto importante para determinar la temperatura de sobrecalentamiento requerida para llevar a cabo satisfactoriamente el proceso de fusión.

El contenido de calor de un hierro fundido a una temperatura dada está proporcionado por el calor requerido para llevar al metal al punto de fusión, el calor latente de fusión y el calor requerido para el sobrecalentamiento, se ha determinado experimentalmente para el hierro y sus aleaciones y están dados en tablas. Tales datos son usados para calcular el calor requerido por los hornos de fusión y para resolver problemas de flujo de calor en el enfriamiento de fundiciones. El calor de solución puede alterar hasta cierto punto la temperatura de fusión en una aleación. Existe un gran cambio en la temperatura cuando de la fusión se lleva a cabo procesos de refinación como en los sistemas duplex, ya sea con hornos de cubilote y hornos de inducción o de hornos de arco eléctrico y hornos de inducción donde se ha de volver a controlar la temperatura del metal fundido estrictamente.

Cabe hacer notar que los principios metalúrgicos someramente resumidos aquí, y de más uso en los sistemas de fusión en estudio, indican que el conocimiento de la termodinámica es esencial para entender el total de los problemas con los cuales nos enfrentaremos al comparar los sistemas de fusión para el hierro y sus aleaciones. Los cálculos aproximados en los cambios de composición pueden ser hechos suponiendo un comportamiento ideal, pero un tratamiento cuantitativo de sistemas no ideales es sólo posible cuando el grado de separación de la idealidad puede ser establecido experimentalmente.

Los principios físicos y químicos discutidos pueden ser aplicados a un número de problemas muy amplio y que aparecen en los controles de composición de fusión. Esto incluye la selección de materias primas para cargas y refractarios en los 3 sistemas de fusión que se están estudiando además del control de las atmósferas del horno, y el control de los efectos de las variables del proceso, tales como temperatura y composición. En la actualidad la naturaleza esencial de los procesos de fusión en el horno de cubilote, horno de arco eléctrico y horno de inducción están bien entendidos, pero para los cálculos cuantitativos, de-

ben ser aplicados en la práctica muchas variables las cuales diferencian fundamentalmente un proceso de otro.

Grandes cantidades de aleación son producidas usando chatarra y más frecuentemente mediante procesos duplex directamente en las fundiciones por fusión-refinación. Los procesos de fusión están basados en mezclar cargas de chatarra, lingotes de hierro y scrap de varias especies y entonces los cambios de composición en la fusión pueden ser apreciables. Esto es típico en los hierros grises. El hierro gris está en el caso límite entre fusión continua y fusión-refinación por los métodos que utiliza la industria para fundirlos, con especial referencia a las variaciones de contenido en carbono, silicio, manganeso, etc. Todas las aleaciones son reducidas por oxidación al nivel bajo deseado y entonces la composición es reajustada con adiciones especiales.

Está claro que algunos cambios de composición son inevitables en los tres sistemas de fusión que aquí se estudian, pero si se cuenta con una libre selección del sistema, entonces dependerá de las tolerancias en la composición de la carga y del producto final, y el grado de cambio de composición que puede ser controlado durante la fusión.

Cuando se utilizan en forma continua los tres sistemas de fusión o combinados en proceso duplex, se encuentra que en tales procesos hay fundente o escoria, lo que nos obliga a remitirnos a los diagramas y tablas de energía libre para analizar hasta dónde es técnica y económicamente posible la fusión deseada dentro de un sistema continuo o uno duplex pues es necesario el estudio de las leyes del equilibrio químico en las reacciones que se estudian.

Es necesario enfatizar que todos los factores que intervienen en el equilibrio en relación a escorias y fundentes y metal fundido son significativos, es decir, puntos de fusión, presiones de vapor, densidades, toxicidad y corrosividad de las varias sales usadas, así como de los óxidos, lo cual será también otro parámetro para obtener el máximo provecho del sistema de fusión con el que se cuenta o el que se desea utilizar.

La selección conveniente de los compuestos químicos para fundente está limitado a algunos compuestos químicos, por lo tanto, es de pensar que la importancia de los datos de equilibrio químico en los procesos de refinación son más importantes que en los de fusión continua. Esto se debe a la naturaleza compleja de los sistemas involucrados cuando se funde hierro, pues el metal fundido cuenta con carbón, silicio, manganeso, cromo, algo de azufre y fósforo, etc., en tanto que la escoria tiene silicio, aluminio, calcio, hierro, oxígeno, carbón, azufre y fósforo, formando varias soluciones. Aunque el comportamiento de tales sistemas ha sido determinado experimentalmente, es difícil porque frecuentemente involucra temperaturas de alrededor de 1500°C. En el presente, algunas de las características de los sistemas complejos de refinamiento

usando el horno de cubilote y horno de arco para refinar o usando horno de arco y para refinar horno de inducción no son completamente entendidos, no se tienen todos los datos disponibles para sus cálculos. En general hasta ahora los estudios científicos son rebasados por la práctica, pero es frecuentemente con la teoría con la que se pueden introducir modificaciones en los procesos de refinación con horno de arco eléctrico o con horno de inducción en proceso duplex, dando como resultado un perfeccionamiento considerable en la producción.

Ahora, por otra parte, debemos también considerar en la comparación de los tres sistemas de fusión, los problemas físicos ya que revisan también importancia al analizar cada sistema por separado o en proceso duplex. Si tomamos en cuenta la presión de vapor, si una aleación es fundida y tiene un alto punto de fusión y un aleante tiene un bajo punto de fusión, pero además una alta presión de vapor, puede ser impracticable la mezcla de tales elementos directamente, tal como sucede con las adiciones en el horno de cubilote. La solución puede encontrarse en el premezclado de las composiciones más favorables para cada medio que usamos para fundir, para producir aleaciones afines, o en añadir el elemento volátil (bajo precauciones especiales) justamente antes de que empiece a fluir el metal fundido. Como sucede cuando se adiciona magnesio al hierro fundido durante la producción de hierro nodular, la presión de vapor del magnesio es más alta, por eso es que debe de sellarse el cucharón al hacer la adición.

La fusión es normalmente el camino más conveniente para tener una aleación homogénea a la cual se le adiciona los aleantes que son distribuidos o disueltos uniformemente en el solvente que son los problemas más frecuentes que se encuentran al trabajar en forma deficiente el sistema de fusión que se use o un punto de los más importantes para poder analizar comparativamente los hornos de cubilote, hornos de arco o los hornos de inducción. La producción de una aleación homogénea requiere el uso de técnicas especiales en el estado líquido que varía profundamente en los tres sistemas de fusión que se están estudiando, seguido por un rápido enfriamiento durante la solidificación afectada por la historia de su fusión siendo el problema más importante en el estado sólido la homogeneidad buscada en el material que es colado.

Un estudio de los procesos de fusión usados en la fundición, revela que varios problemas están relacionados entre sí. Para la solución de una producción general y óptima, es necesario considerar factores metalúrgicos, de Ingeniería e Ingeniería de procesos. El mayor número de los problemas de control de composición química pueden ser resueltos con la ayuda de las ciencias básicas, pero las soluciones obtenidas deben estar acordes con los factores de ingeniería en el funcionamiento de los sistemas de fusión que se emplee, ya sea en forma continua, o usando dos de ellos en forma semicontinua y los factores operacionales de la ingeniería de diseño y producción, tal como volumen de material fundido, los requerimientos de tal material con sus diferentes caracte-

rísticas, la rapidez de fusión, temperaturas, sobrecalentamiento necesario para llevar a cabo la fusión y homogenización y no volatilizar las aleaciones, etc., además de cuidar, analizar y planear costos, etc. En la planeación de una nueva fundición estos problemas pueden ser considerados aplicando los datos científicos y empíricos existentes. En tanto que en una fundición ya establecida, mucho se puede mejorar analizando las prácticas presentes para una solución general óptima de la fusión.

2.2 PROPIEDADES FISICAS Y DE FUNDICION DE LOS METALES LIQUIDOS.

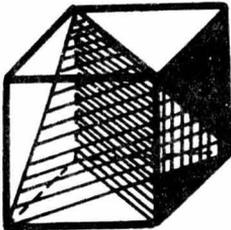
Introducción.— La física de los líquidos concierne esencialmente con la estructura y propiedades del estado líquido en términos de las fuerzas de unión y de energía de los átomos. La fisicoquímica trata más generalmente de las interacciones entre átomos de 2 ó más elementos diferentes. Las propiedades de fundición, por otra parte, están encaminadas a explicar el comportamiento del metal en estado líquido en el momento de vaciarlo en el molde y su solidificación subsecuente y la influencia de ésta en las propiedades de fundición. De esto resulta que las propiedades de fundición pueden ser afines a las propiedades físicas y fisicoquímicas de los metales, pero éstas pueden ser también afectadas por la secuencia de otros fenómenos físicos o químicos que ocurren durante el proceso de fundición. En otras palabras, el comportamiento específico de un metal líquido fundido empíricamente y que surge de un proceso de fundición, puede ser científicamente relacionado e interpretado en términos de ciertas propiedades fundamentales.

Debido a la complejidad de tales propiedades, su medida e interpretación es en muchos casos cualitativa y empírica.

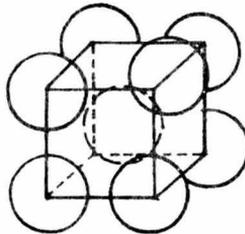
En orden de importancia de las propiedades de fundición de los metales, es por lo tanto esencial recordar brevemente las propiedades físicas y fisicoquímicas a las cuales las propiedades de fundición son afines.

PROPIEDADES FISICAS DE LOS METALES LIQUIDOS

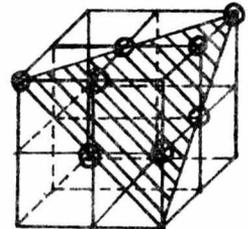
1.1) Estructura.— La estructura de los metales sólidos es cristalina, implicando un arreglo geométrico regular fijo de átomos sujetos todos ellos por grandes fuerzas de unión (metálicas, con algunos metales y aleaciones y no metálicas)



SISTEMA CUBICO



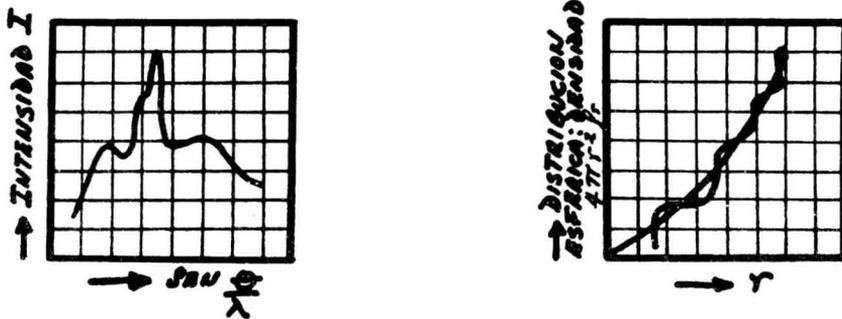
SISTEMA C.C.C



(c)

Ver Fig (c) planos octaedros de átomos de alta densidad en un sistema centrado en el cuerpo.

En el estado gaseoso, los átomos son libres de movimiento en sus alrededores, y en un recipiente cerrado su comportamiento y propiedades pueden ser analizadas en términos de la teoría cinética de los gases. En el estado líquido, los átomos están semi-fijos (semi-inmóviles), pero las fuerzas de unión, sujetan a los átomos y los mantienen juntos en un recipiente abierto; el estado líquido es, con respecto a muchas de estas propiedades una transición del estado gaseoso al estado sólido cristalino, cambiando continuamente al azar de uno a otro estado. Algunos conocimientos útiles acerca de la distribución de los átomos en el estado líquido pueden ser obtenidos mediante la medición de la reflexión de los rayos x. Si un haz de rayos x de longitud de onda λ es dirigido a la superficie del metal líquido, la variación del ángulo de incidencia θ , la intensidad de la reflexión I puede ser graficada en contra del valor del $\frac{\sin \theta}{\lambda}$



Los datos de reflexión de rayos "x" sugieren que la distribución de los átomos en movimiento continuo en el líquido, es tal que su distancia en un momento dado a un átomo fijo no es completamente al azar. Uno de los métodos propuestos de evaluación de esta distribución de los datos de rayos x es el obtener la densidad de distribución radial " $\rho(r)$ " (densidad por unidad de volumen o distancia r); Esto puede ser obtenido por un análisis matemático de $I \sim \frac{\sin \theta}{\lambda}$ y resulta en una gráfica de $4\pi r^2 \rho(r)$ (distribución esférica).

Tales mediciones de los rayos "x" muestran que las distancias interatómicas más lejanas en el líquido, no son muy grandes en comparación con el sólido (esto es de acuerdo con el valor relativamente bajo de expansión volumétrica de los metales en la fusión).

Secundariamente, los datos de densidad de distribución sugieren que algunas clases de arreglos espaciales transitorios de átomos existen en los líquidos (el término "cuasi cristalino" es frecuentemente usado) y

algunos modelos físicos de estos arreglos, han sido propuestos.

Para fines del estudio de la fusión de metales, los resultados de los experimentos más interesantes con estructuras de líquidos son aquellos concernientes a los efectos de la temperatura y de los aleantes. Los datos de los rayos X muestran que los picos de la densidad de distribución desaparecen gradualmente al ir aumentando la temperatura, ejemplo: los líquidos se convierten más generalmente en turbulentos (esto es, están en completo desorden).

Los experimentos revelan que en algunos metales puros (por ejemplo Ge ó Sn) existen 2 distribuciones de preferencia. Ha sido sugerido que esta segunda distribución extra es debido a la existencia de "clusters" (conglomerados). Por ejemplo, hay regiones en el líquido de una distribución específica, debido a diferencias en los enlaces y por consiguiente una distribución interatómica diferente que la del líquido original. Con la adición de solutos, ciertas anomalías han sido mostradas en las gráficas de intensidad de reflexión de Rayos "X" en líquidos cuya composición corresponde a algún importante cambio de fase como se indica en el diagrama de equilibrio para el estado sólido.

Esto además sugiere algunas formas de agrupamiento. Por ejemplo, la existencia de 2 diferentes clases de distribución atómica en el líquido. Una clase de distribución difiere de la otra por la naturaleza de los enlaces, o porque hay una distribución preferida de átomos en regiones donde los enlaces A-A, A-B ó B-B, pueden predominar. Por ejemplo, agrupamientos que podrían existir en el líquido con una composición eutéctica, esto correspondiendo a una proporción tal de las 2 clases de átomos como ocurre en la segunda fase del eutéctico en el estado sólido; la proporción es distinta desde la matriz.

Estudios estructurales de metales líquidos en general, son de importancia considerable para el entendimiento del comportamiento en la solidificación de metales y aleaciones.

VISCOSIDAD

La viscosidad o fricción interna de los líquidos podemos definirla como la resistencia al flujo.

El principal resultado metalúrgico que resulta de la medición de la viscosidad nos muestra la variación de la viscosidad de un metal líquido con la temperatura, así como los cambios que ocurren en la viscosidad con la composición de una aleación.

De lo anterior, podemos decir que las variaciones de viscosidad con la composición, nos indica que en algunos sistemas binarios se presentan variaciones apreciables en la viscosidad o la composición correspondiente de una fase intermetálica en el estado sólido. Esto es debido a la existencia de una distribución no homogénea de elementos solutos en el solvente (metal) de algunas aleaciones.

Debido a una falta de exactitud de los datos de viscosidad para las aleaciones, se carece en la actualidad de una teoría comprensiva sobre la viscosidad de los metales líquidos.

TENSION SUPERFICIAL

Las mediciones de viscosidad indican la naturaleza de las débiles fuerzas interatómicas que sujetan a todos los átomos de un líquido, permitiendo que estos tengan un movimiento continuo al azar en un volumen confinado (cerrado). La acción de tales fuerzas de enlace en la superficie libre del líquido es halar los átomos de la superficie hacia adentro, debido a la naturaleza no simétrica de la distribución de las fuerzas en la superficie.

La fuerza "P" requerida para halar los átomos de la superficie de un líquido sobre la longitud "l" en la superficie se define como tensión superficial del líquido (σ)

$$\sigma = \frac{P}{l}$$

Las aplicaciones de la σ en la fusión metalúrgica, son muy extensas tratándose con problemas de refinación, nucleación y fenómenos de crecimiento, flujo de metales y alimentación de fundiciones.

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS METALES LIQUIDOS

La fisicoquímica abarca entre otras con un rango de propiedades de los metales líquidos, entre la cual podemos mencionar a la reactividad química que es importante en la fusión de los metales y el control de la composición.

Otro aspecto de la fisicoquímica que es importante para la fusión de los metales, es aquella que trata con las leyes que gobiernan la coexistencia de fases aleantes a diferentes temperaturas y presiones. La aplicación más amplia es la regla de las fases, la cual nos conduce al concepto del diagrama de equilibrio.

GENERALIDADES DEL DIAGRAMA DE EQUILIBRIO

Un diagrama de equilibrio en fundición metalúrgica, puede ser considerado como un resumen gráfico de los principales datos experimentales que muestran la existencia de fases en términos de concentración de aleantes y de temperatura.

Estas fases pueden ser identificadas en el estado sólido por examen metalográfico. Las fases son descritas como cristales o como granos o microconstituyentes de la estructura, la cual varía en tamaño (macro 0.1 mm ó micro 0.1 mm), en forma poliédrica o superficies externas irregulares y una distribución homogénea o heterogénea. En algunas aleaciones, el número de fases se puede encontrar íntimamente mezcladas todas ellas, a esta mezcla de fases se le describe como constituyentes (eutécticos y eutectoides).

De un diagrama de equilibrio, podemos obtener la siguiente información:

- a) Para una aleación de cierta composición, se muestra la temperatura a la cual los cambios de fase pueden ocurrir bajo proporciones de enfriamiento o calentamiento muy lentos.
- b) A la temperatura a la cual los cambios de fase están ocurriendo, el diagrama muestra la composición de la nueva fase en equilibrio con la que está comenzando su transformación.
- c) Para todas las zonas donde las 2 fases co-existen, el diagrama puede ser usado para obtener las cantidades relativas de las 2 fases bajo el equilibrio pero usando la regla de la palanca.

APLICACION DE LOS DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO EN FUNDICIÓN

METALURGICA.

Los diagramas de equilibrio son construidos sobre la base del equilibrio o en proporciones tales que las lentas transformaciones de fase que permiten los cambios que preceden para que se lleven a cabo, deben seguir a estos. Para estudios de la fusión de los metales, sin embargo, se usan medidas de enfriamiento o calentamiento al no equilibrio para fines prácticos en la fabricación de fundiciones. Es por lo tanto necesario predecir estas modificaciones en las relaciones fase-temperatura-composición mostradas en el diagrama de equilibrio, las cuales están probablemente siendo producidas por medidas de transformación fuera del equilibrio

Un ejemplo de estas transformaciones es la solidificación y los fenómenos de los tratamientos térmicos.

El diagrama de equilibrio Fe-C puede ilustrar la importancia de los problemas al no-equilibrio. (Ver Diagrama Fe-C).

El diagrama de equilibrio Fe-C anticipa que a la temperatura ambiente, las fases podrían ser ferrita y grafito. En realidad la proporción de enfriamiento requerido para dar estas 2 fases a la temperatura ambiente, debe ser muy lenta, más que una aleación que contenga fases ferríticas y de grafito y que puede ser obtenida sólo bajo condiciones especiales. Usando proporciones de enfriamiento normales, las fases Ferrita y Fe_3C son estables sobre un cierto rango total de carbono. Sin embargo, aleaciones Fe-C conteniendo alrededor de más del 2%, pueden ser fácilmente hechas grafiticas por adición de ciertos elementos aleantes, tales como silicio, obteniendo una familia de aleaciones ampliamente conocidas como hierro gris o grafito. Contenidos de carbón más bajos, por ejemplo, aceros al carbón, la inestabilidad teórica de la fase Fe_3C es de muy poca significación práctica, independientemente de las altas temperaturas aplicadas para estas aleaciones.

Otro problema el cual es frecuentemente encontrado en la aplicación de los diagramas de equilibrio en la fundición metalúrgica, es la interpretación de la composición de la aleación. Podemos tomar como ejemplo el sistema Fe-C. Aunque en este diagrama los elementos están indicados como Fe y C, asumiendo bajo la situación de la pureza del metal usado para establecer el diagrama puede ser muy significativo. El concepto de hierro puro o carbón, tiene sólo significación teórica. Los diagramas de equilibrio están basados generalmente sobre la alta pureza de los metales disponibles en el tiempo en que los diagramas fueron hechos, pero en fundición metalúrgica igualmente la alta pureza de los metales, pocas veces es siempre usado. Una fusión normal de hierro o acero, por ejemplo, contiene hierro, carbón, silicio, manganeso, fósforo y azufre, en tanto que muchos otros elementos pueden estar presentes en pequeñas cantidades.

Los problemas encontrados cuando aplicamos los diagramas de equilibrio para aleaciones binarias a sistemas actuales conteniendo ciertas cantidades de otros elementos son muy variados. Tales impurezas pueden causar la apariencia de una fase no predicha por el diagrama de equilibrio, como con las aleaciones Fe-C donde pequeñas cantidades de impurezas pueden favorecer la presencia, ya sea de Fe_3C o de grafito. Más frecuentemente las impurezas influyen en el tamaño, forma o en cantidades iguales de fases predichas.

En el caso de transformaciones de no-equilibrio, los diagramas de equilibrio pueden ser usados para indicar la dirección de los cambios,

y algunas de las consecuencias de las razones del no equilibrio.

En muchos instantes, la cinética o el factor proporcional sobre impuesto en el diagrama de equilibrio, puede necesitar la construcción de un tipo especial de diagrama para una presentación más clara de los efectos cinéticos. Por ejemplo, enfriamiento muy rápido de aleaciones Fe-C desde el rango austenítico nos llevan a un número de productos de diferente transformación, las cuales son mejor explicadas en los diagramas especiales, llamadas transformaciones tiempo-temperatura o Curvas "S" para los aceros.

El diagrama de equilibrio, es el punto de partida para analizar la presencia y número de fases en la estructura de las aleaciones de fundición.

Con la prueba adicional provista por el microscopio, rayos "X" y otras pruebas físicas o químicas, partiendo de la naturaleza de la estructura predicha, puede usualmente ser explicada satisfactoriamente. Sin embargo, los diagramas no indican la probabilidad del tamaño físico o forma geométrica y la distribución de las diversas fases en la estructura de fundición. Esto puede ser determinado por los fenómenos de solidificación y tratamientos térmicos. Los diagramas de equilibrio son también indirectamente útiles para correlacionar fundiciones y algunas otras propiedades de aleaciones con su composición. Hay un medio valorable de comparación del comportamiento de una propiedad específica con la composición de un sistema de aleaciones dado, también como la comparación de tales propiedades para diferentes sistemas de aleaciones.

La propiedad de los diagramas, son por lo tanto, de interés teórico como práctico.

PROPIÉDADES DE FUNDICION

1) Consideraciones generales de las Propiedades de Fundición. - Anteriormente se ha llegado aparentemente de la discusión de las propiedades físicas, que aleaciones de ciertas composiciones pueden tener distintas propiedades ventajosas para usarlas en los procesos de fundición. Esto implica que los procesos de fundición, pueden ser más fácilmente llevados a cabo con tales aleaciones, y también el producir fundiciones con mejores propiedades en lo que se refiere a calidad.

Algunas de estas propiedades, por ejemplo, la habilidad en el llenado de los moldes, esto es, la fluidez, la baja contracción volumétrica durante el enfriamiento, insensibilidad a las tensiones de fundición o a los fenómenos de segregación en la estructura de fundición,

todas estas propiedades son concernientes a todas las aleaciones, algunas otras propiedades son más específicas y se aplican con mayor énfasis para aleaciones con composición especial.

FLUIDEZ

Ha sido generalmente observado en la práctica de fundición, que en el llenado de los moldes de diseño complicado, particularmente aquellos de los cuales incluyen varias secciones, además todo siendo constante, que algunas aleaciones llenan la cavidad del molde y reproducen los detalles en la fundición terminada mejor que otras. Esta propiedad particular de una aleación, ha sido definida por los fundidores como fluidez de fundición, o simplemente fluidez. Podemos decir que la fluidez es una propiedad empírica compleja. Datos experimentales indican que la fluidez, puede ser influenciada por ciertas propiedades físicas y químicas de los aleantes, por las características de los moldes y por los métodos usados en el llenado de los moldes. Es por lo tanto necesario diseñar o establecer una prueba que satisfaga la definición empírica de la fluidez y que relacione tales mediciones arbitrarias de la fluidez a las propiedades físico y fisicoquímicas del metal y del molde y a las fuerzas que actúan sobre el metal durante el llenado del molde.

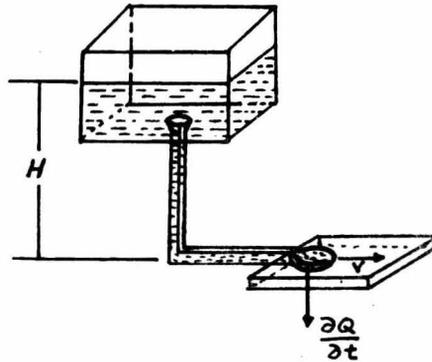
La siguiente figura nos muestra la situación típica de una fundición donde un metal líquido es vertido y llena el molde bajo la fuerza de gravedad, comenzando con una energía potencial en la posición H. Al entrar dentro del molde, el metal líquido ha obtenido una cierta cantidad de energía cinética, $\frac{mv^2}{2}$ la cual es usada para difundir el metal a lo largo de la cavidad del molde y llenando el molde arriba de su volumen. En el mismo tiempo, el metal líquido está siendo enfriado por las pérdidas de calor causadas por las paredes del molde $\frac{dQ}{dt}$, hasta que en el curso del llenado del molde, el metal puede alcanzar la temperatura de solidificación desde la posición de entrada del metal dentro del molde hasta los puntos más lejanos. Podría teóricamente ser posible el tratar la fluidez como un problema en términos de una ecuación general de energía, tomando en cuenta el flujo de energía en el sistema y las pérdidas de energía calorífica durante el flujo. Los constantes de tal ecuación, podrían ser relacionadas a las propiedades térmicas de las aleaciones líquidas y a las propiedades físicas, tales como viscosidad y tensión superficial, para explicar en orden el comportamiento específico de la fluidez de las diferentes aleaciones.

Una evaluación cuantitativa de la fluidez no ha sido probada completamente en la práctica, principalmente por la falta de datos sobre las propiedades físicas y térmicas requeridas. Otra dificultad fundamental a un acercamiento a la prueba de fluidez, es la falta de acuerdo que exis-

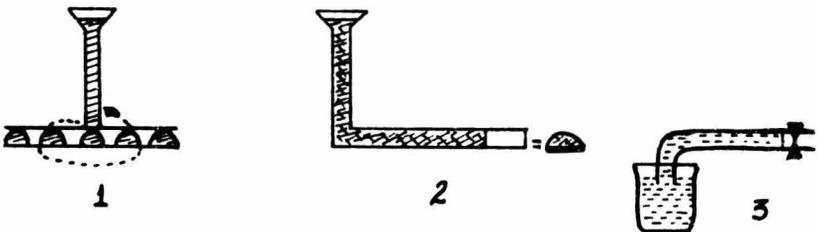
te entre los metalurgistas en definir una prueba estandar de fluidez en una pieza la cual podría ser usada para la evaluación experimental de la ecuación general de energía de la fluidez. En la actualidad, la fluidez es medida usando una gran variedad de diseños de piezas para efectuar la prueba, con el objeto de obtener una medida comparativa de la sensibilidad de la fluidez en un tipo particular de pieza, variando el metal, el molde y el llenado de éste (o el vaciado).

APLICACIONES DE LA FLUIDEZ

Un número variado de pruebas han sido propuestas para medir la fluidez, abajo se ilustran algunas.



CONCEPTO DE FLUIDEZ



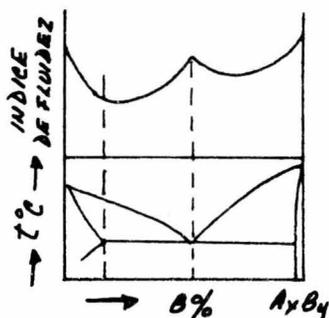
MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE FLUIDEZ

1: ESPIRAL

2: SUPERFICIE SUSPENDIDA

3: SUCCION POR VACIO

El problema de seleccionar una pieza de prueba es esencialmente que usando una característica específica en este diseño, muestre un grado perceptible de la sensibilidad de las variables de especial interés para una aplicación particular. La unidad estandar o fluidez, indica usualmente cuál es escogida en varias pruebas, la longitud o el área de la pieza probada obtenida bajo condiciones constantes controladas de fabricación. Resultados de pruebas típicas obtenidas por algunas clases de pruebas de fluidez se muestran por la figura:



**CAMBIOS TÍPICOS DEL
INDICE DE FLUIDEZ
PARA UNA ALEACION
BINARIA.**

Tales resultados revelan, por ejemplo, que un índice de fluidez arbitraria de una aleación, se incrementa con la temperatura de vaciado de la aleación, y que, de otro modo, bajo condiciones de prueba comparables, los valores de fluidez de un metal puro y de una aleación eutéctica son mayores que sus valores de estas aleaciones solidificando sobre un rango de temperatura. Esta observación ayuda a explicar una de las razones por qué de la gran preferencia práctica por el eutéctico o aleaciones cerca del eutéctico para fines de fundición, particularmente para piezas fundidas en varias secciones. Estas pruebas pueden ser usadas para estudios comparativos de los efectos de los moldes sobre la fluidez o para el control de la calidad de las piezas fundidas en las fundiciones.

Sobre las bases de datos de la fluidez para aleaciones binarias o más complejas, es posible hacer una selección cuantitativa de aleaciones apropiadas para moldes específicos, diseños de fundición o procesos de fundición. Por ejemplo, el efecto útil de añadir fósforo al hierro gris para la producción de piezas fundidas de varias secciones puede deducirse y explicarse a partir de las gráficas fluidez-composición.

Un incremento en la proporción de fósforo en el eutéctico de la aleación, tanto como una temperatura de enfriamiento más lenta, estos 2 factores mejoran el grado del llenado del molde.

Los datos de fluidez, en ausencia de una ecuación general de fluidez, en el presente son obtenidos e interpretados separadamente para cada problema particular práctico. Por ejemplo, el efecto de la temperatura de vaciado, puede ser analizado en términos de calor disponible y transferencia de calor en el molde. El efecto de la composición de la aleación sobre la fluidez, es más difícil de explicar cuantitativamente, aparte la posible variación del contenido de calor con la composición en una aleación binaria, otras propiedades físicas tales como viscosidad y tensión superficial actúan al mismo tiempo.

Las evidencias experimentales disponibles, sugieren que el mayor factor que afecta la variación de la fluidez con la composición en una aleación, es la proporción y el modo de desarrollo de los cristales durante la solidificación; en otras palabras, la manera en la cual la corteza de la pieza fundida está solidificando formando una interfase de desarrollo, aparte de las paredes del molde y la cual puede interferir el flujo del líquido en el llenado del molde.

La interferencia causada por cristales con superficies irregulares de desarrollo (dendritas) en aleación con un gran rango de enfriamiento es mucho más grande que cuando comparativamente en una interfase de cristalización uniforme de metales puros y aleaciones eutécticas.

VOLUMEN DE EXPANSION Y CONTRACCION

Concepto.— Una de las propiedades generales de los sólidos o líquidos en relación a su contenido de energía calorífica, es el incremento ó decremento en sus dimensiones debido a la absorción o pérdida de calor. Esto es causado por un incremento o decremento en la amplitud de la vibración atómica en la estructura del cristal. Tales cambios de dimensión son usualmente expresados en términos de expansión lineal o volumétrica o coeficientes de contracción, los cuales tienen valores numéricos característicos para diferentes substancias.

Un incremento en el punto de fusión en el calor absorbido (calor latente de fusión) nos lleva a la separación de los enlaces del estado sólido, y un incremento discontinuo en el volumen se observa. Tal expansión del volumen se observa. Tal expansión del volumen es la fusión generalmente observada, sin embargo, pocos metales, tales como bismuto y antimonio presentan una contracción. Un incremento mayor en la expansión del volumen ocurre en el estado líquido, y el proceso completo es opuesto en el enfriamiento. El problema de la expansión lineal en el calentamiento es de importancia por el tratamiento térmico de las piezas fundidas, pero el fenómeno de contracción en el enfriamiento desde el estado líquido es de un mayor interés y es generalmente descrito como el fenómeno de contracción o disminución en metales fundidos.

PROPIEDADES DE CONTRACCION

Por medio de la figura 1 podemos resumir los cambios volumétricos que ocurren a un metal puro o a una aleación en un enfriamiento desde el estado líquido.

Existen valores numéricos de contracción volumétrica durante la solidificación, los cuales solamente están disponibles para algunos metales y aleaciones. A continuación como una guía de las características del volumen de contracción de algunos metales puros y aleaciones, se construyó la siguiente tabla, la cual contiene valores aproximados de algunas propiedades físicas y de fusión de líquidos metálicos y aleaciones cerca de su temperatura de enfriamiento.

Metal y Aleación	Composición. % en Peso	Fluidez 100 unidades arbitrarias p/metal puro.	Viscosidad.	Tensión superficial dinas/cm	Densidad (g/cm^3) a 20°C y temperaturas del líquido.	Cambio de volumen en la solidificación, valor en % a 20°C.
------------------	---------------------------	---	-------------	------------------------------	--	--

Al	99.99	100	2.84	860	2.60	6.6
Al-Cu	Max. solubilidad en sólido (5.7)	60	3.1	850	2.38 2.80 2.48	6.3
Al-Cu	Eutéctico (33%)	125	2.4	--	3.45 3.14	4.8
Al-Si	Max. solubilidad en sólido (1.65)	65	3.4	820	2.68 2.43	6.2
Al-Si	Eutéctico (1.7)	68	1.8	820	2.65 2.46	3.5
Fe	99.99	100	6.3	1790	7.87 6.79	3.5
Fe-C	Max. solubilidad en sólido (2.01)	70	8.5	1550	7.75 7.05	--
Fe-C	Eutéctico (FeC 4.26) (Fe ₃ C 4.3)	140	3.4	1330	7.22 7.16	Fe-C, 0-1 Fe-Fe ₃ C 3-4

Basándonos en esta tabla, podemos decir que los datos de contracción para los metales y aleaciones, es que sus valores dependen de la composición y la constitución de la fase, y que estos valores difieren considerablemente de un metal a otro. Por ejemplo, en pocas aleaciones, digamos hierro colado, la magnitud de la contracción en la solidificación no es constante, pero va a depender de las fases que se formen durante la solidificación.

Debido a un gran volumen específico, cuando se forma grafito en el enfriamiento, la contracción volumétrica en la solidificación es muy pequeña o casi cero, pero en cambio en la fase Fe_3C , la contracción volumétrica es mayor.

APLICACIONES DE LA CONTRACCION

Los problemas creados debido al fenómeno de contracción volumétrica, los podemos agrupar en 2³ grupos principales:

- a) Aquellos que surgen al querer obtener piezas fundidas de alta exactitud dimensional.
- b) Aquellos en los cuales se trata de controlar el proceso de solidificación para que no resulte una contracción volumétrica del metal líquido en el molde durante la solidificación.
- c) Aquellos problemas que surgen durante la expansión o contracción en el estado sólido.

Siempre que vaciamos metal a un molde con una cavidad de un volumen dado hasta llenarlo, el metal líquido comienza a contraerse, debido al enfriamiento. Una solución a este decremento en el volumen puede ser fácilmente compensado añadiendo más metal líquido al molde manteniéndolo lleno hasta alcanzar la temperatura de solidificación. Sin embargo, esto

no es tan fácil, ya que durante la solidificación, el problema de estar metiendo metal líquido a todas las partes del molde donde la contracción de volumen se está llevando a cabo puede ser muy compleja, y además sin olvidar aspectos como son tiempo, economía, etc. Muchas partes de la pieza fundida podrían solidificar con cavidades (rechupes) como una compensación incompleta de metal líquido para contrarrestar la contracción volumétrica. Así en algunos casos deberán tomarse precauciones especiales para asegurar que todas las partes del molde estén completas: Por ejemplo, que el aire sea capaz de escapar de la cavidad del molde o resultará una pieza incompleta o fuera de dimensiones.

Así la pregunta en el problema de la solidificación, no es la magnitud de la contracción durante el enfriamiento, sino antes el asegurar que la solidificación ocurre en tal o cual camino que nada o solamente una pequeña proporción de contracción de volumen es dejada en la pieza fundida como un rechupe, o porosidad de varias formas, tamaños y distribución. La sensibilidad de una contracción de un rechupe de una aleación binaria puede ser mostrada mediante un diagrama: Fig. I

Donde el volumen de la contracción interna del rechupe es graficado Vs. la composición de la aleación, como una propiedad de fundición es definida como el volumen de cavidades internas probables como resultado de una fundición de un diseño arbitrario que es producida de una misma manera que todas las aleaciones probadas.

Los problemas de contracción en una pieza fundida son de diferente clase, desde el enfriamiento de la línea solidus hasta la temperatura ambiente. Estos problemas de contracción, son usualmente originados por una distribución no-uniforme de la temperatura, y por lo tanto, resultará una contracción no-uniforme durante la fusión o después de la solidificación. En general, la contracción lineal de un sólido es no-uniforme.

Como resultado de la contracción no-uniforme en el estado sólido, se presentan 2 grandes problemas en los procesos de fusión:

Primeramente, una contracción no-uniforme dada conduce a varios tipos de esfuerzos (tensiones) en la pieza fundida, lo cual puede conducir a uno o más de los siguientes casos: una deformación plástica no-uniforme y por lo tanto una posible distorsión de la pieza fundida, esfuerzos residuales, así como también una posible fractura de la pieza. La sensibilidad de los esfuerzos de una aleación es una medida de la habilidad a hacer piezas fundidas donde los problemas de tensión son particularmente severos. Se han hecho varios tipos de pruebas y cuyos resultados pueden ser graficados de la forma siguiente: FIGURA II

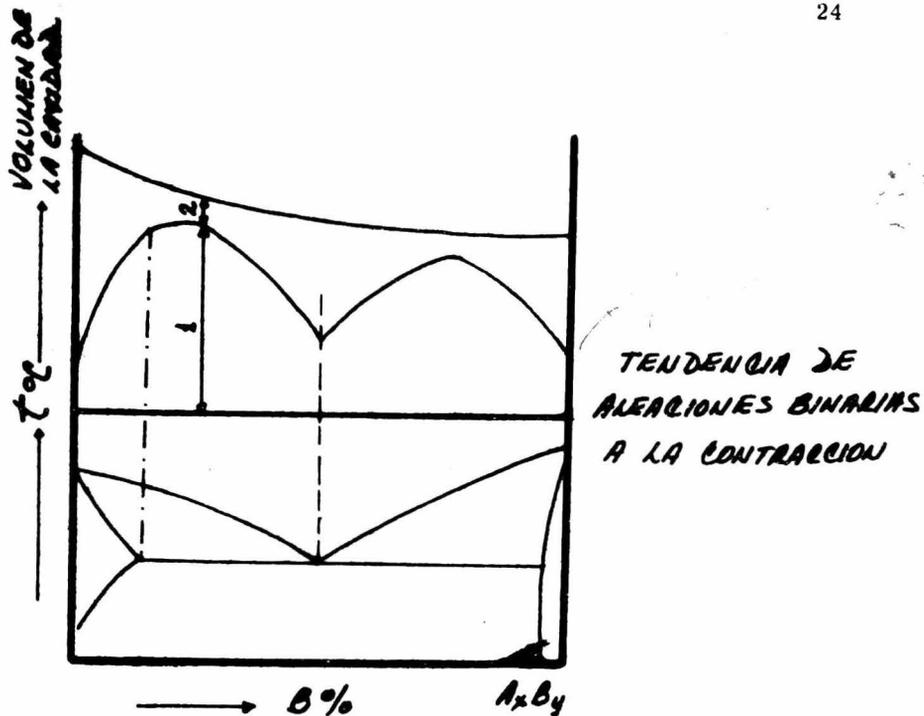


FIGURA I

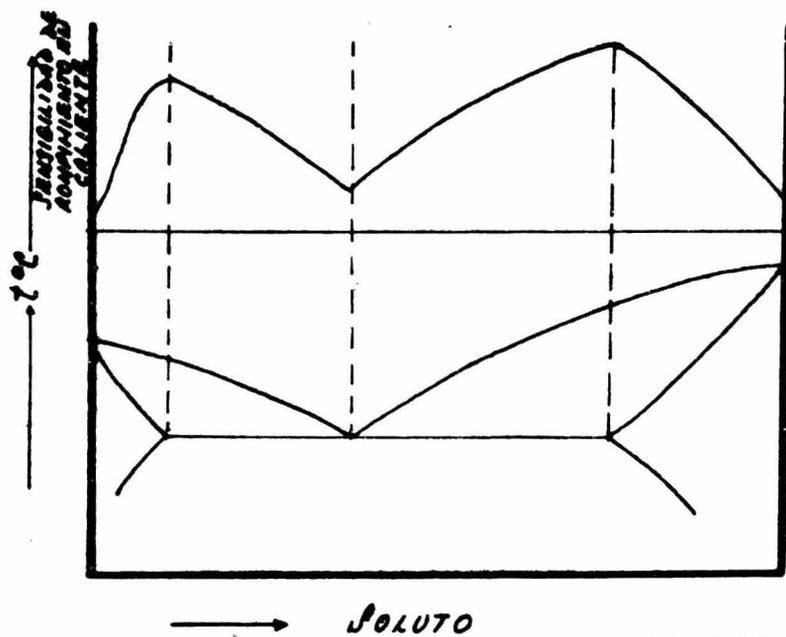


FIGURA II

TENDENCIA AL RONDINIENTO EN CALIENTE RELACIONADA CON LA POSICION DE UNA ALEACION

Otra consecuencia de la contracción sólida tal vez de mayor importancia práctica, es la diferencia de temperaturas que existe entre la temperatura ambiente de trabajo en una fundición y la temperatura que hay dentro de la cavidad del molde o de cierto diseño usado. Entonces, para poder obtener una pieza de ciertas dimensiones, es por lo tanto necesario agrandar el tamaño del diseño para contrarrestar la contracción. En otras palabras, el agrandamiento requerido es definido en la práctica como el diseño hecho que contrarreste la contracción. Debido a la naturaleza no-uniforme de la contracción sólida de una fundición, la evaluación exacta para poder contrarrestar la contracción, es un problema bastante difícil debido a los diseños complejos de las piezas fundidas. Sin embargo, se han aplicado reglas empíricas para tal fin, estas reglas se discuten en muchos libros referentes a fusión de metales.

PROPIEDADES Y PRUEBAS ESPECIFICAS DE FUNDICION (CALIDAD DE FUSION).

Las propiedades generales de fundición discutidas hasta el momento, si bien complejas en la evaluación de las variables del metal, del molde y de los procesos, no obstante se aplican a la mayoría de las aleaciones. Algunas otras propiedades de fundición y sus pruebas, son usadas en las fundiciones con un objetivo más limitado para ocuparse de algunos problemas específicos de una aleación dada o de un proceso de fundición. Este tipo de propiedades y de pruebas son usados como regla para el control de proceso del cual nos ocuparemos más adelante.

A continuación trataremos de resumir los ejemplos más conocidos de pruebas para el control de la fusión.

PRUEBAS DE COMPOSICION

Este tipo de pruebas son para revelar la calidad del metal. El metal líquido en el horno es de una composición compleja, la cual contiene los elementos requeridos y además otros elementos no especificadas que son impurezas y algunos de los cuales pueden ser más dañinos que otros en las piezas fundidas producidas. Entonces es por eso que muchas pruebas son usadas en las fundiciones para revelar la composición (calidad) del metal líquido como un sustituto para un análisis químico completo, el cual puede ser, ya sea bastante costoso o bien, no suficientemente rápido.

Por lo tanto, podemos decir que las pruebas de calidad aplicadas al metal líquido son usadas para demostrar la presencia o ausencia de aquellos elementos en el metal líquido las cuales pueden ser críticas para la calidad de la pieza fundida.

Una de las pruebas más importantes que existen es aquella que relaciona la estructura de una aleación a su composición. Es decir, si el ejemplo tomado es enfriado de una manera reproducible y estandar, tal que para muchas aleaciones una correlación útil puede ser obtenida entre la composición de la aleación y su micro o macro estructura. Este tipo de pruebas puede ser usado para llevar un control aproximado de la composición (como por ejemplo, aleaciones de Mn, fundición de hierro y aceros al carbón). Actualmente, este tipo de pruebas cualitativas, está siendo reemplazada por un control analítico cuantitativo.

Hay un ejemplo de la manera más usual de la aplicación del diagrama de equilibrio. Esto es, tomando una curva de enfriamiento de una muestra de hierro fundido, puede ser usado como un método rápido y aproximado de obtener una indicación del contenido de elementos aleantes promoviendo la formación de grafito en la estructura de fundición (es por medio del C.E%).

PRUEBAS DE CONTRACCION

En este punto, existen 2 tipos de pruebas:

1) Aquellas pruebas usadas para comparar diferentes aleaciones con respecto a su sensibilidad de contracción, y

2) Aquellas que son usadas para comparar las variaciones de la sensibilidad de contracción como un resultado de diversos procesos para una aleación en particular. (Pruebas de contracción para la calidad del metal).

Este último tipo de prueba, sirve para indicar que algunas variaciones en la composición durante la fusión acompañadas por un cambio en el comportamiento de la solidificación puede alterar la sensibilidad de la contracción en una aleación. El principio que se usa es el de someter a una pieza fundida a una solidificación unidireccional, con el fin de que el comportamiento de contracción se llegue a mostrar; esto es, sea perceptible en la superficie libre de la pieza probada. Entonces por medio de observaciones visuales o calibradas de las piezas probadas permite el hacer deducciones acerca de la desviación de la composición requerida y cómo se puede corregir.

PRUEBAS SOBRE LA ESTRUCTURA DE FUNDICION Y OTRAS PROPIEDADES.

Aquí nos vamos a referir a algunas pruebas especiales diseñadas para probar la estructura de ciertas aleaciones. Este tipo de pruebas

son usadas para verificar la calidad del metal antes y durante el vaciado de las piezas, con el fin de evitar en lo posible la producción de piezas fundidas con una estructura de fundición que no sea satisfactoria. Ya que es importante el asegurar la microestructura del hierro fundido de acuerdo al tipo que se quiera; porque la microestructura de la mayor parte de los hierros fundidos es sensible a la composición, al proceso de fusión, así consecuentemente a la medida del enfriamiento. Por lo tanto, hay pruebas especiales que relacionan los efectos de la composición y la medida del enfriamiento a la microestructura de la pieza fundida.

Por ejemplo, en la prueba de la cuña, la profundidad de la zona delgada en la cual solidifica estructura blanca y que puede ser relacionada a la composición de hierro gris, usando el concepto de % C.E. y predice la conveniencia de obtener el hierro gris adecuado para producir piezas fundidas de ciertas dimensiones y propiedades.

CONCLUSIONES

El comportamiento de los líquidos teóricamente logra entender con la ayuda de la física y la química. Algunas de las propiedades de líquidos de mayor interés en metalurgia son difíciles de medir. En ausencia de datos numéricos y teorías relevantes, muchos de los problemas surgidos en la fusión de los metales, tales como la fluidez o fenómenos de contracción, son entendidos en la práctica por medio de pruebas empíricas y mediciones directas. Una mayor excepción a estas reglas empíricas, es el rango de estos problemas que surgen en la solidificación de aleaciones, las cuales pueden ser relacionadas a diagramas de equilibrio. Aunque las aleaciones usadas industrialmente son muy complejas y su estructura se desvía de las condiciones de equilibrio de la solidificación, los diagramas de equilibrio son el punto de partida de la discusión sobre la estructura de fundición.

2.3 SOLIDIFICACION.

Metalúrgicamente la solidificación de un metal líquido dentro de un molde, es uno de los puntos más importantes, tal vez el más interesante de todos los procesos de fundición. Los problemas metalúrgicos iniciales como son la preparación de la carga, fusión y control del metal líquido, y los problemas subsecuentes tales como examinación y evaluación de las propiedades de fundición, todos estos problemas están directamente relacionados a los objetivos y resultados del proceso de solidificación. El principal objetivo del control metalúrgico de la solidificación, es simplemente el de lograr la estructura requerida en un metal fundido. Al referirnos al término lograr la "estructura requerida", creemos necesario considerar 3 aspectos primordiales:

- a) Cristalización del metal líquido, esto es, transformación de fase líquido-sólido, con especial referencia al oxígeno y características del sólido formado.
- b) Los efectos del no-equilibrio sobre la cristalización, así como los cambios físicos que ocurren durante o inmediatamente después de la cristalización y que tienen una relación sobre las propiedades de los cristales y de la estructura en general.
- c) Las propiedades del metal fundido en relación a los 2 aspectos anteriores tomando en cuenta los efectos del tamaño y forma de las piezas fundidas, así como los diversos tipos de defectos que pueden presentarse en la estructura de fundición.]

La cristalización es un campo complejo que envuelve varios aspectos, tanto de fisicoquímica, termodinámica y de cristalografía. En el estado líquido, los átomos están en movimiento y sin un orden o arreglo determinado, esto cambia dentro de un sólido, donde los centros de los átomos forman patrones regulares, o redes cristalinas, obedeciendo ciertas leyes de geometría cristalina. En un sólido, la posición de un átomo vibrando alrededor de su centro, está relativamente fijada con respecto a sus átomos vecinos, es decir, esta posición no varía más que una distancia interatómica de los centros vibratorios de los átomos vecinos en la red cristalina.

Esta posición relativa se conserva excepto cuando se aplica una energía térmica o mecánica como en el caso de difusión o de deformación plástica.

En el estado líquido donde los átomos están en movimiento, se transforman dentro del estado sólido, a una red cristalina con arreglos regulares de la siguiente manera: un número pequeño de los átomos del

líquido forman un pequeño embrión o núcleo en el cristal sólido, que va creciendo hasta que el líquido se agota.

Teóricamente podríamos inducir a desarrollar el total del líquido de un metal puro dentro de un cristal simple, o alternativamente el número de núcleos al principio de la cristalización podría ser extremadamente grande, de tal manera que la estructura final de la pieza fundida debería estar hecha de un número muy grande de pequeños cristales con una orientación espacial diferente de la de sus ejes principales de la red cristalina. En la práctica, este tipo de cristales simples son solamente desarrollados bajo condiciones de laboratorio y para fines especiales, y estos cristales son generalmente pequeños. Industrialmente los metales fundidos o las aleaciones invariablemente contienen una gran cantidad de cristales o de granos de varias fases en la estructura.

CRISTALIZACION (Transformación de Fase L-S).

En general, la cristalización de los metales líquidos sigue los patrones de cristalización de muchos otros líquidos. En principio, el mecanismo de la solidificación de los metales se debe a los trabajos realizados por TAMMANN, quien trabajó en base a la cristalización de ciertos líquidos orgánicos.

Podemos definir de una manera sencilla a la cristalización como una transformación de fase, esto es, el cambio del estado líquido al estado sólido mediante un enfriamiento, y por lo tanto, consideramos conveniente estudiar los cambios de energía en el proceso.

En el enfriamiento, el líquido pierde parte de su energía en forma de calor, llegando a ser estructuralmente inestable con relación al estado sólido. La principal característica del estado líquido es el desorden y movimiento de sus átomos. Cuando se baja la temperatura, la distancia entre los átomos decrece. Como la energía térmica que mantiene la vibración de los átomos es menor en los alrededores, entonces la fuerza de atracción de un átomo con otro llega a ser mayor. Con un enfriamiento mayor, la fuerza de atracción de los átomos establece la ausencia de cualquier movimiento y así de esta manera el líquido llega completamente a solidificarse. Existen procesos donde el líquido solidifica manteniendo durante un tiempo una estructura previa en el estado sólido (es decir, líquidos sobre enfriados), son muy raros entre los métodos de transformación líquido-sólido, sin embargo, ocurren como es el caso del vidrio.

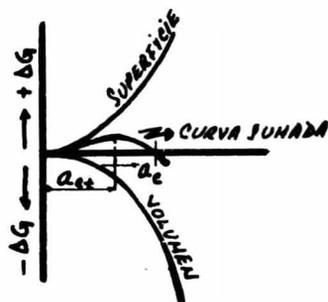
Como este caso, podemos considerar otros mecanismos posibles de enfriamiento, donde podemos citar aquel donde el líquido se transforma instantáneamente desde el estado de desorden al estado de orden como

una transformación de bloque a una temperatura constante. Podemos decir que esta probable clase de transformación, se lleva a cabo cuando están involucrados pequeños cambios de energía, de tal forma, que es infrecuente entre las transformaciones de fase en los metales. Un ejemplo de esto es cuando una clase de fase sólida cambia a otra similar cristalográficamente, tal como la transformación austenita-martensita en los aceros.

Todo lo anterior, nos deja una tercera posibilidad, es decir, cuando solamente una pequeña fracción del líquido se transforma en principio en un núcleo sólido. En este caso, la formación del núcleo sólido requiere un incremento local de la energía libre, pero el cambio total de energía del líquido transformado y del núcleo sólido formado, es disminuída, satisfaciendo así los requerimientos del proceso a seguir. De esta manera, el líquido se transforma gradualmente en sólido, primero por la formación de un núcleo y luego su subsecuente crecimiento. La energía requerida para la transformación de este proceso permite avanzar, ya sea a una temperatura constante, o con cambios de temperatura y esto va a depender de la composición del líquido original y del sólido formado. Por medio de la película de transición de líquido a sólido, podemos explicarnos en términos generales la naturaleza microscópica o macroscópica de la transformación.

NUCLEACION HOMOGENEA Y HETEROGENEA

Un líquido puro, por ejemplo, un metal conteniendo solamente una clase de átomos, de tal forma que con un enfriamiento alcancen una temperatura donde la proximidad o densidad de empaque de los átomos es tal que un pequeño número de ellos sean capaces de saltar juntos y formen un núcleo sólido. Tal núcleo, compuesto de los mismos átomos que el líquido mismo, se llama núcleo homogéneo. Las condiciones requeridas de energía para la formación de tal núcleo pueden ser analizadas mediante la siguiente figura:



TAMAÑO CRÍTICO a_{ct} DE
EL NUCLEO PARA LA
ESTABILIDAD TERMODINÁMICA

Supongamos que la formación de estos pequeños núcleos son de un cubo con un lado de dimensión A , envuelve un cambio de energía por unidad de volumen ($\Delta g_{LS}'$). Esto es la energía de enfriamiento:

$$\Delta g_{LS} = A^3 \Delta g_{LS}'.$$

Entonces la energía total del sistema es reducida durante la solidificación por la ecuación anterior y ésta es graficada en la dirección negativa como se ve en la figura anterior. La formación de un núcleo sólido, también representa la formación de una superficie nueva, y esta energía interfacial por unidad de superficie, representa un incremento en el cambio de energía del sistema, y se representa por una gráfica positiva, vista en la figura anterior. Para el sistema cúbico, esto es igual a $6a^2 \cdot \Delta G_i'$. Por lo tanto, el total del cambio de energía libre será:

$$\Delta g = -a^3 \cdot \Delta g_{LS}' + 6 a^2 \cdot \Delta g_i'$$

lo cual puede verse en la gráfica 2. (a) donde hay un tamaño crítico A_{cr} para un núcleo estable. Abajo de este tamaño, el núcleo se redisuelve en el líquido y arriba de este tamaño, el núcleo es capaz de desarrollarse, porque es acompañado por un decremento total de la energía libre disponible en el sistema. En otras palabras, un decremento en la energía libre debido a un cambio de fase (L-S) es mayor que el incremento debido a la formación de una superficie frontera. Estas consideraciones de energía explican el por qué los líquidos tienen un sobre-enfriamiento abajo de la temperatura de transformación de equilibrio, suficiente para satisfacer la condición de un decremento en la energía total antes de que la transformación pueda ocurrir. De lo anterior podemos concluir que a la mayor temperatura de sobre enfriamiento, el tamaño crítico más pequeño satisface todavía la condición de un decremento en la energía libre. (Ver figura 3).

Estas relaciones pueden ser trasladadas dentro de la dependencia de la proporción de la nucleación sobre la temperatura de enfriamiento como se puede apreciar en la figura 4 . La proporción de nucleación como primer incremento con la temperatura de sobre enfriamiento donde el núcleo más pequeño es capaz de desarrollarse, pero es reducido posteriormente, debido a un decremento estático en el número de colisiones de los átomos que es necesario para la formación del núcleo.

Todas estas ideas teóricas, si bien son de gran ayuda para un entendimiento en forma general de la cristalización desafortunadamente no se presta por ello mismo para una interpretación cuantitativa experimental, o bien para una aplicación directa en metalurgia. Llegamos a esto porque se ha demostrado claramente que en la cristalización de metales, la nucleación homogénea juega un papel muy pequeño. La razón de esto es que los metales son esencialmente sustancias impuras. En los procesos normales de cristalización, las partículas sólidas me-

tálicas o no-metálicas, algunas de las cuales pueden ser descritas en forma general como impurezas o inclusiones, están distribuidas en el mismo líquido y el metal líquido está también en contacto con la superficie sólida del molde.

Cuando las condiciones de energía lo permiten, la cristalización puede comenzar, ya sea en las paredes del molde, o en las impurezas. Todo esto se conoce como nucleación heterogénea. La naturaleza, cantidad y distribución de las partículas heterogéneas en los metales líquidos, son difíciles de controlar en la práctica de fundición, y frecuentemente el control no es siempre llevado a cabo.

Si bien los conceptos principales de la nucleación heterogénea son generalmente aceptados, muchos de estos, antes de ser usados, deberán ser completamente comprendidos o bien aplicar completamente la teoría de control a la estructura de fusión de los metales.

La existencia de una barrera de energía en la formación de un núcleo homogéneo, es la principal razón de por qué un sólido comenzará a cristalizar sobre las partículas sólidas disponibles a la temperatura de equilibrio sin necesidad de un sobre enfriamiento. Por lo tanto, un líquido a la temperatura de equilibrio de solidificación puede ser más fácilmente nucleado por partículas sólidas finas de la misma composición que el mismo metal líquido.

Esta idea de una nucleación artificial homogénea es frecuentemente usada en los laboratorios para iniciar el crecimiento de cristales simples. Estos métodos no pueden ser aplicados en la práctica de fundición, ya que la temperatura de vaciado del metal líquido es bastante alta para fundir y disolver completamente partículas sólidas de la misma aleación.

El núcleo heterogéneo es por definición, tanto físicamente como químicamente, diferente del líquido cristalizando. Uno de los principales problemas en aplicar la teoría de la nucleación heterogénea, es el establecer las propiedades esenciales de las partículas nucleantes; hasta que ellas puedan ser introducidas sucesivamente en aleaciones dentro del núcleo sólido, donde este núcleo presente, puede no estar disponible en número adecuado o clase.

La superficie ligante y la similitud cristalina son factores importantes cuando consideramos el comportamiento de un núcleo heterogéneo.

La figura 5, muestra cómo una partícula heterogénea puede ser mojada por un metal líquido o no, dependiendo de la naturaleza de las fuerzas de interfase entre ellos.

La relación entre las fuerzas en la superficie y el principio del crecimiento del cristal o la superficie de un núcleo heterogéneo, puede ser representado por la siguiente relación:

$$\sigma_{HL} = \sigma_{HS} - \sigma_{SL} \cos \psi$$

De esta relación se desprende que entre menos sea el valor de ψ , mayor será la tendencia del metal líquido a mojar la superficie de la partícula heterogénea y, por lo tanto, mayor será el potencial de la partícula para iniciar la cristalización.

Las características de la energía de superficie de numerosas partículas e impurezas comúnmente encontradas en metales líquidos, son poco entendidas en detalle.

Se ha encontrado que una cierta medida de similitud entre el metal líquido y las partículas heterogéneas, es necesaria para una nucleación efectiva, y que una diferencia en el tamaño de la red unitaria básica de los 2 sistemas cristalinos, deberá no ser mayor de 15 a 20% para las partículas que actúan como núcleo heterogéneo.

Sin embargo, algunas partículas que satisfacen estas condiciones estructurales, todavía no tienen efectos nucleantes, indicando esto que la similitud cristalina, no es solamente la condición para que ocurra la nucleación heterogénea. A causa de las limitaciones del conocimiento a fondo de la nucleación heterogénea es posible aplicar los principales conceptos tratados anteriormente para influir en el comportamiento de la solidificación de muchas aleaciones de fundición. Tales procesos son conocidos como refinamiento de grano o tratamiento de inoculación.

Para asegurar la disponibilidad y distribución de las partículas finamente dispersas en el metal líquido a la temperatura de solidificación con el fin de lograr efectos óptimos de nucleación, es necesaria la aplicación de pruebas empíricas.

CRECIMIENTO DEL CRISTAL

Los procesos de nucleación representan un cambio dinámico e instantáneo a la temperatura requerida y en general difíciles de estudiar experimentalmente debido a la naturaleza opaca de los líquidos metálicos. Por otro lado, el crecimiento del cristal puede ser controlado, y en una etapa dada, detenido o bien hacerlo seguir en la forma deseada. Estas técnicas permiten el crecimiento de la superficie de los cristales metálicos y de esta forma hacen posible su examinación para obtener las principales características del crecimiento del cristal durante la cristalización.

Los arreglos de átomos en un cristal, no son perfectos, conteniendo un gran número de defectos entre los que podemos nombrar defectos de punto, defectos lineales y defectos de planos. Se cree que el crecimiento del cristal sobre una escala atómica, es iniciada por alguno de los defectos anteriores y avanza con los átomos sujetos a través de los planos del núcleo sólido hasta que un plano es cubierto totalmente.

Cuando un plano tiene así su crecimiento por una capa atómica, la falla o defecto que inició el crecimiento es transferido automáticamente a un nuevo plano, el cual crece de la misma manera.

Las características microscópicas y macroscópicas del crecimiento de cristales metálicos sobre una escala atómica, son los mejores progresos en el estudio de las formas de crecimiento de cristales metálicos que se han hecho. Referente a esta posición, es conveniente primero considerar los principales tipos de cristales metálicos observados en las estructuras de fundición, así como analizar la manera en la cual estos cristales podrían haber crecido.

MORFOLOGIA MACROSCOPICA DEL CRECIMIENTO DE CRISTALES EN METALES

Con relación a los cristales de minerales, las regularidades de las superficies exteriores dan una indicación de las propiedades cristalinas esenciales del mineral. El tipo de sistema cristalino, los ejes de simetría, así como otras características macroscópicas observadas todas ellas son derivadas de los arreglos ordenados de los átomos en el cristal. Sin embargo, con los metales las condiciones del crecimiento del cristal son usualmente tales que las superficies externas de los cristales son irregulares. Sin embargo, su naturaleza cristalina interna es idéntica a la de los minerales y es usualmente examinada por análisis de patrones obtenidos por la reflexión de ondas, con una determinada longitud de onda corta, tales como rayos-x pasados a través del cristal. Mediante la reflexión de patrones se puede deducir un arreglo particular de átomos en varias clases de cristales.

En la siguiente figura (III) lámina (A), podemos encontrar ejemplos típicos de las formas de los cristales metálicos.

Algunos cristales macroscópicos, algunas veces pueden ser vistos claramente a simple vista o en pequeñas ampliaciones, y este tipo de cristales son llamados macrocristales o macrogranos; y de la misma manera, pequeños cristales son descritos como microcristales y la estructura como microestructura. En las piezas fundidas podemos encontrar tanto el tamaño macro como el micro en los cristales, y con-

trolando el proceso de nucleación y crecimiento, podemos variar el tamaño de los cristales dentro de límites moderadamente amplios.

Las superficies frontera de los cristales en la estructura de fundición en general son completamente irregulares, y en particular la de los metales puros y soluciones sólidas de aleaciones. Cuando estos cristales son toscamente esféricos en su forma, se dice que son equiaxiales, y cuando son extendidos en una dirección son descritos como columnares.

Los componentes intermetálicos los cuales frecuentemente obtenemos en aleaciones de 2 o más metales, tienen ciertas propiedades características de crecimiento, y como una regla estos cristales muestran superficies planas, las cuales en algunos casos son parecidas a los cristales de minerales.

Los componentes intermetálicos de los cristales se pueden clasificar como equiaxiales o columnares, pero éstos usualmente revelan una mayor variedad y forma que la de las soluciones sólidas de cristales y forman por ejemplo, poliedros, láminas y agujas. En tanto que los cristales mostrados en la figura anterior, son típicos; esto es, los metales puros y soluciones sólidas de cristales pueden ser hechos con planos o con superficies de crecimiento plano, y algunos componentes intermetálicos también crecen con superficies externas irregulares.

Mediante las técnicas metalográficas de pulido y fotografía, podemos estudiar los rasgos característicos de la forma de los cristales en la estructura de fundición.

Las razones de la variación en la forma exterior de los cristales, puede ser explicada experimentalmente, esto es, que los cristales equiaxiales tienden a formarse cuando el calor de fusión liberado durante la cristalización se distribuye uniformemente en todas direcciones, en tanto que los cristales columnares se forman cuando el flujo de calor es en una sola dirección.

Los cristales usualmente crecen de las paredes del molde hacia dentro. Sin embargo, la fase intermetálica de los cristales extendidos se puede obtener con un flujo calorífico multi-direccional. De estas 2 observaciones, podemos sacar 2 características macroscópicas importantes del crecimiento de cristales en los metales, una la sensibilidad al flujo de calor y la segunda la dependencia de la naturaleza de las fuerzas de unión de los átomos en los cristales y, por lo tanto, la energía de superficie de los diversos planos de crecimiento.

MORFOLOGIA MICROSCOPICA DEL CRECIMIENTO DE CRISTALES EN METALES.

Las características de la morfología microscópica de crecimiento son de especial interés, ya que ellas pueden explicar el origen de los

tipos observados de cristales macroscópicos. La morfología microscópica ha sido estudiada por un gran número de diferentes técnicas experimentales.

Mediante esta clase de estudios, se ha demostrado que la morfología microscópica del crecimiento del cristal en un metal, se puede clasificar en 3 tipos principales: laminar, celular y dendrítico. Cuando se presentan diferentes formas de crecimiento u otras variaciones en la estructura de un cristal son reveladas como simple macrogramo:microgramo y son frecuentemente llamadas subestructuras. Muchas de estas características ocurren sobre una escala microscópica.

El tipo de crecimiento laminar de un cristal puede ser explicado por el hecho de que ciertos planos del patrón cristalino básico pueden crecer más rápidamente que otros. La interfaz en un crecimiento laminar de un cristal es característica de todos los cristales, pero es más marcada en los compuestos intermetálicos que en los metales puros o soluciones sólidas de aleaciones. En este tipo de crecimiento, los planos no son perfectamente uniformes mostrando un número de irregularidades.

La dirección pronunciada de crecimiento es perpendicular al plano en el caso de metales puros y soluciones sólidas de aleaciones, pero en los compuestos intermetálicos, el crecimiento es paralelo al crecimiento del plano.

La forma celular de crecimiento en los cristales, aparece a desarrollarse a partir del tipo de plano; valles o corrugaciones parecidas a un arreglo de celda principalmente hexagonal. Se ha demostrado que los metales de extremadamente alta pureza tiende a mostrar el tipo de plano de crecimiento, y que pequeñas adiciones, ya sea de átomos de soluto o una proporción de enfriamiento más rápido, pueden conducir al crecimiento de tipo celular. De esto podemos ver que la transición de un plano a la morfología microscópica celular, depende de la composición del metal y de la partida de las condiciones de equilibrio en el enfriamiento.

El crecimiento de tipo dendrítico de los cristales, es frecuentemente encontrado bajo condiciones normales de cristalización de metales y aleaciones; se pensaba anteriormente que este era el único tipo de crecimiento en los cristales que presentaba una morfología tanto macroscópica como microscópica. Sin embargo, en la actualidad se ha demostrado que el crecimiento dendrítico puede ser visto además como uno de los posibles cambios de forma en el crecimiento de los cristales que ocurre cuando el crecimiento de tipo celular llega a ser inestable, por ejemplo, debido a un mayor incremento, ya sea en el contenido de soluto o en la proporción de desprendimiento de calor du-

rante la cristalización. En general, podemos decir que el crecimiento dendrítico, es un resultado del hecho de que el crecimiento del cristal se ve impedido a a justarse a los requerimientos del cambio de composición durante el enfriamiento (gradiente de concentración del soluto en la interfase), condiciones del flujo de calor de fusión (relación superficie-volumen) y el hábito preferencial de crecimiento de diferentes planos cristalinos (energía de superficie involucrada).

Mediante estudios micromorfológicos del crecimiento de cristales en metales, se ha logrado establecer que los principales parámetros que afectan el crecimiento son:

- a) La composición de las aleaciones (incluyendo el tipo de sistema cristalino).
- b) La relación del crecimiento del cristal .
- c) El gradiente de temperatura prevaleciente.

De esta forma, nosotros podemos entender el origen de las superficies irregulares externas de los macro-cristales. Esta irregularidad se ve incrementada, debido a que varios centros de crecimiento de cristales ocasionalmente se encuentra, y de esta manera sus superficies de contacto o granos frontera son irregulares debido a la diferente orientación de los cristales en el espacio.

Una vez que se ha tratado en una forma general con los parámetros que afectan la solidificación, así como sus causas y efectos sobre nuestro objetivo principal "lograr la estructura requerida" intentaremos relacionarlo a las aleaciones comerciales fabricadas por los 3 métodos de fusión que es la base de esta tesis.

Muchas aleaciones comerciales y una de las más importantes, el hierro gris, que es de la que nos ocupamos, solidifican con un contenido eutéctico o con un comportamiento eutéctico total.

Dado que en los tres sistemas de fusión que estaremos viendo obtenemos estas aleaciones, es de gran interés analizar todas las características del metal proporcionado por los diferentes sistemas para llevar a cabo su solidificación.

A continuación se muestran 3 diagramas que nos presentan el frente de avance de las dendritas en una aleación hipoeutéctica; estas dendritas crecen en su extremo con la temperatura cercana a la del líquido que las está formando. En el primer diagrama, el frente eutéctico, al profundizar las dendritas, sería planar, sin embargo, la

presencia de impurezas que siempre existen al fundir en los diferentes tipos de hornos, hacen que el frente eutéctico se disuelva en celdas; sin embargo, un tercer elemento hace que las celdas tomen una apariencia dendrítica, o una nueva celda eutéctica núcleo, como se ve en la segunda figura.

Los metales eutécticos más comerciales corresponden al sistema hierro-carbono y que se encuentran alrededor del 4% de carbón y que lo obtenemos con diferentes características en los 3 sistemas de hornos que aquí estudiamos. El hierro gris, blanco y dúctil caen en esta clasificación. Un típico hierro gris que obtenemos en los 3 hornos, tiene un contenido de carbón entre 2-4% con 1% o más de silicio y una pequeña cantidad de manganeso.

La estructura y solidificación de los hierros fundidos, puede ser entendida cualitativamente, haciendo uso del diagrama hierro-carbono tratado anteriormente suponiendo una completa difusión de carbón en la austenita durante y después de la solidificación.

La figura (8) muestra esquemáticamente la formación de la estructura de 2 tipos de hierros fundidos. En el lado izquierdo, la rapidez de enfriamiento es tal que la solidificación y subsecuente enfriamiento lleva al sistema **Fe-Fe₃C**.

Suponiendo que existe un equilibrio, las dendritas de austenita se forman arriba de la temperatura eutéctica. En el eutéctico metastable tendremos ledeburita. Un subsecuente enfriamiento a la temperatura eutectoide, y algo de carbón adicional forman la austenita que sigue la línea metastable de solubilidad n=0. Abajo de la temperatura eutectoide metastable, la austenita (ahora de composición eutectoide), es inestable y se transforma en perlita en el enfriamiento, la estructura resultante es lo que llamamos un "hierro blanco". Este es frágil, pero con excelente resistencia y que tiene bastantes aplicaciones dentro de la industria nacional. De esta estructura también se parte para producir el hierro maleable. En la práctica se adicionan fuertes cantidades de carbón al hierro fundido, así como velocidades de enfriamiento rápidas para obtener hierro blanco. Al producir la estructura blanca para hacer hierro maleable, se debe controlar el uso del carbón o los tiempos requeridos para el recocido son muy grandes.

La misma aleación con 3% de carbón, cuando se enfría más lentamente, solidifica de acuerdo al diagrama de equilibrio hierro-carbono, aunque la transformación a la temperatura de eutectoide puede caer en el diagrama metastable. El resultado se muestra en la figura (6) y es un hierro gris perlítico, el cual tiene cierta dureza y resistencia, con "placas" de grafito en la estructura que creció con ayuda de la austenita justo abajo de la temperatura eutéctica de Hierro-G. Este mismo hierro

enfriado más lentamente con solidificación y posterior enfriamiento, estará otra vez de acuerdo con el diagrama de equilibrio. En la transformación eutécticoide, el carbón, en vez de formar Fe_3C , difunde hacia las placas de grafito más cercanas y precipita como grafito adicional. La estructura resultante son placas de grafito encajadas en un hierro de bajo carbón y es llamado hierro gris ferrítico, el cual es blando y altamente maquinable, este hierro también puede ser tratado para tener la estructura de hierro gris perlítico.

La adición de pequeñas cantidades de magnesio a la aleación de hierro con 3% de carbón, pueden propiciar la solidificación de este hierro de acuerdo con el diagrama de equilibrio de Fe-C como hierro gris. Hay sin embargo, una diferencia importante en este mismo tipo de hierro llamado hierro dúctil. La diferencia es que el hierro, en vez de solidificar en placas, lo hace en forma de esferas casi perfectas con sus planos basales orientados perpendicularmente al radio de los nódulos. En las siguientes figuras (7 y 8) podemos ver las estructuras de estos diferentes hierros.

SOLIDIFICACION EUTECTICA DE HIERROS FUNDIDOS

El silicio y otros elementos adicionales al hierro dan como resultado un eutéctico, el cual solidifica en un amplio rango de temperaturas. Las "ramificaciones" o "colonias" eutécticas formadas durante la solidificación, como se muestra en las figuras (9 y 10) se ve dentro de cada rama el grafito que se forma y crece.

La fineza de las estructuras eutécticas en los hierros, está determinada por la velocidad local de interfase. La velocidad local de interfase es una función inversa del número de granos para los cuales la solidificación es en una región. Los elementos de aleación que promueven la nucleación de nuevas colonias eutécticas, dan un grafito grueso espaciado. El silicio es quizá el más efectivo agente nucleante del grafito y a menudo se adiciona al hierro fundido para lograr la formación de la estructura grafitica. Actualmente se ha visto que la adición de silicio además de nuclear el grafito, amplía el rango de las temperaturas de transformación del diagrama estable y metestable. A manera de ejemplo, citemos que hay una diferencia de $7^{\circ}C$ entre la temperatura eutéctica estable y la metestable en el sistema de Fe-C, pero con la adición del 2% de silicio se incrementa esta diferencia a $35^{\circ}C$. Este incremento en la diferencia de temperaturas crea una región térmica mucho más grande en la cual el eutéctico estable crece preferentemente al eutéctico metestable.

El magnesio y otros elementos alteran la solidificación del grafito del sistema Fe-C en tal forma que el grafito forma esferas y no placas.

Se conoce que las esferas de grafito se forman directamente del líquido de hierros hipoeutécticos.

En aleaciones de composición hipoeutécticas, las esferas formadas en el líquido posteriormente son rodeadas por austenita y después crecen por difusión del carbón de la austenita.

Cuando la solidificación forma $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$, en lugar de Fe-G , la estructura crece, como podemos ver en la figura (11). El crecimiento se lleva a cabo preferentemente por un corte de las placas de cementita con leves cambios de orientación, permitiendo a las placas llevar una orientación semejante al abanico, las cuales al final poseen dos diferentes morfología eutécticas. De esta forma la composición del líquido y el cambio de temperatura definen una trayectoria de solidificación en la superficie del líquido.

INCLUSIONES PRIMARIAS

A menudo en las aleaciones fundidas, la primera fase en formarse no es la que comprende la estructura que está en mayor cantidad. Cuando un grano fino se adiciona al metal fundido, la primera fase es usualmente formada involucrando este agente. Cuando se añade un agente desoxidante, el producto de la desoxidación es a menudo una fase cristalina, la cual comienza a solidificar antes que la estructura del material que se encuentra en mayor cantidad.

La morfología de las inclusiones primarias en los metales fundidos, varía grandemente, dependiendo de la cinética de la interfase, las energías relativas de la superficie, colisiones y la viscosidad de la inclusión todos ellos factores que ya fueron explicados anteriormente y que tienen que ver con la forma de fundir el metal por el movimiento del baño en el sistema en el cual se está fundiendo. Las inclusiones primarias de silicio son generalmente esféricas, pero donde la coalescencia ha sido incompleta porque las colisiones ocurren a bajas temperaturas relativamente, justo antes o durante la solidificación de la fase del hierro. Además que se ha visto que las inclusiones primarias aparecen en los espacios interdendríticos.

ESTRUCTURA DE FUNDICION ORIENTADA Y DIRIGIDA

Debido a la distribución al azar de los núcleos y al flujo de calor multidireccional en las piezas fundidas, la orientación de los cristales en la estructura de fundición es generalmente al azar. Como el crecimiento de muchos cristales es preferencial en algunas direcciones cristalinicas, es posible combinar estas propiedades con la extracción direccio-

nal de calor durante la cristalización para obtener una orientación direccional específica en las piezas fundidas.

CONCLUSIONES

La obtención de una estructura de fundición está basada en la nucleación y crecimiento de los cristales, así como la aplicación de las piezas fundidas dependerá de su estructura. Estos factores pueden ser influenciados en cierto grado por medio de ejercer un control de los procesos de nucleación y crecimiento. Esto lo podemos hacer ejerciendo un control en la composición del metal, también haciendo cambios en la proporción de enfriamiento que pueden afectar la nucleación y los mecanismos de crecimiento, y cualquiera de estos efectos puede producir cambios similares en la estructura de fundición, ya que de un incremento en la proporción de enfriamiento, pueden suceder 2 posibilidades: que se incremente el número de núcleos heterogéneos, o que una proporción de los núcleos disponibles se comporten como núcleos activos para que el crecimiento del cristal ocurra.

2.4 CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad en una empresa, es determinante para que ésta prospere, ya que mediante el establecimiento de un control de calidad efectivo en un proceso de fundición, nos lleva automáticamente a cumplir uno de los objetivos principales de una empresa "el producir el número requerido de piezas con sus propiedades específicas, a un mínimo de costo".

En esta parte trataremos de abarcar de una manera general, las propiedades que debe tener una pieza fundida, así como las pruebas y los métodos usados para el control de calidad, ya que muchas pruebas y más aquellas que conciernen más directamente con problemas de Ingeniería de Producción, caen fuera del alcance de esta Tesis.

En general, el término propiedades de piezas fundidas, es un término comprensivo, que incluye tanto propiedades mecánicas como metalúrgicas.

La forma en que se tratará de desarrollar este tema es:

Resumir los diferentes parámetros estructurales relevantes a los problemas de propiedades.

Definición de estas propiedades.

Relacionar los 2 puntos anteriores.

Finalmente las pruebas y métodos de control de calidad.

PARAMETROS QUE DEFINEN UNA ESTRUCTURA DE FUNDICION

La estructura de un átomo en términos de sus partículas, constituyentes, determinan las fuerzas y energías de unión de los átomos en la red cristalina.

De esta forma, para los fines metalúrgicos, las propiedades mecánicas se pueden analizar en términos de la estructura de la red cristalina.

RED CRISTALINA Y SUS IMPERFECCIONES

En una aleación cada cristal o fase tiene su propia red cristalina característica, la cual está determinada por las propiedades atómicas de cada elemento aleante que compone la fase. Los cristales de una aleación

no son ideales y en ellos podemos encontrar diferentes tipos de defecto:

- a) Imperfecciones geométricas de la red. (Defectos de punto, lineal y de superficie).
- b) Distorsiones de la red, debido a átomos de soluto a esfuerzos residuales.
- c) Irregularidades de bloque, debido a la presencia de bloques cristalinos de diferente orientación dentro de un cristal.
- d) Orden o desorden de no-homogeneidad en la distribución de átomos de soluto o de cristales de otra clase dentro de la matriz cristalina.
- e) Cavidades submicroscópicas debido a gases o a fenómenos de solidificación (contracción volumétrica). Figura 12

MICRO Y MACRO CONSTITUYENTES Y SUS DEFECTOS

El concepto de las dislocaciones es adecuado para una consideración cualitativa general del comportamiento de la estructura-sensitiva de metales fundidos, pero antes de desarrollarse la teoría de dislocación, las propiedades de la estructura-sensitiva fueron generalmente interpretadas en términos de micro y macro características de la estructura.

Es conveniente discutir estas variables estructurales en 3 grupos:

- a) Número de fases aleantes (tipos de cristal) y la cantidad de defectos presentes.
- b) Tamaño y forma de cristales y de defectos, así como su forma equiaxial o elongada con sus superficies frontera, plana, poliédrica o irregular.
- c) Uniformidad de distribución de cristales o defectos dentro de la estructura.

Estas características en la estructura de una aleación dada, son un resultado de el proceso de solidificación.

Es posible explicar muchas de las propiedades de las estructuras de fundición, considerando la interrelación entre el comportamiento de las dislocaciones y las características microscópicas y macroscópicas de la estructura.

Las características más generales de las micro-macroestructuras de una pieza fundida, es la Isotropía y la homogeneidad.

Las propiedades de la estructura-sensitiva de cualquier cristal individual, no son como regla isotrópicas y varían en las diferentes direcciones cristalinas. Si una pieza fundida contiene un pequeño número de cristales grandes, y particularmente si éstos tienen una orientación similar, las propiedades de la estructura sensitiva de la pieza fundida no será totalmente isotrópica. En la gran mayoría de los casos, el número de granos en la estructura de fundición es tan grande y su orientación es al azar que el comportamiento de una pieza fundida es completamente de un material isotrópico.

El término homogeneidad, se usa para describir la regularidad de la distribución de los elementos disueltos, o de las fases dispersas, impurezas o cavidades, en la estructura sobre una escala microscópica o macroscópica.

Una estructura de una pieza fundida puede no ser homogénea de una sección a otra. Este es un problema difícil cuando analizamos las

propiedades de una pieza, ya que varias secciones pueden diferir dependiendo sobre los tipos de segregación presente.

PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de las piezas fundidas, son definidas para fines de Ingeniería en término de 3 propiedades básicas: elasticidad, plasticidad y fractura.

ELASTICIDAD

Se dice que una deformación es elástica, cuando el cambio en forma o volumen producido por el esfuerzo o la temperatura se recupera totalmente; cuando se permite al material regresar a su temperatura o sistema de esfuerzos originales.

La teoría de elasticidad lineal, trata simplemente con la proporcionalidad entre esfuerzo y deformación en una escala macroscópica utilizando constantes elásticas.

Existen varias constantes elásticas de proporcionalidad y sólo se distinguen en el tipo de esfuerzo y deformación relacionadas:

$$\begin{array}{ll} \text{Módulo de Young:} & E = \frac{\sigma}{\epsilon} \\ \text{Módulo de Corte:} & G = \frac{J}{\gamma} \\ \text{Módulo Volumétrico:} & K = \frac{\sigma_{hd}}{\Delta v/v_0} \end{array}$$

El significado de las literales es:

σ = esfuerzo uniaxial de tensión o compresión

ϵ = deformación normal

J = esfuerzo de corte

γ = deformación al corte

σ_{hd} = esfuerzo hidrostático en tensión o compresión.

$\Delta v/v_0$ = expansión o contracción volumétrica fraccionaria

En los materiales cristalinos, la máxima deformación elástica

es por lo general muy pequeña, pero el esfuerzo necesario para producir esta deformación es generalmente grande. Esta razón de esfuerzo contra deformación es elevada, debido a que el esfuerzo aplicado actúa en oposición a las fuerzas restauradoras de uniones primarias (iónica, covalente, metálica).

El valor numérico del Módulo de Young es una característica de un metal puro y la magnitud en el que es afectado, depende en parte por los átomos de soluto o por la presencia de las fases dispersas en la estructura cristalina.

Si el tiempo de aplicación del esfuerzo es grande, y particularmente, si las pruebas elásticas son llevadas a cabo a altas temperaturas, los efectos de la deformación de las dislocaciones llega a ser permanente. De manera similar pero de una manera más pequeña pueden surgir procesos de deformación plástica si los esfuerzos elásticos son repetidos muchas veces, dando lugar a la fatiga.

PLASTICIDAD (DUCTILIDAD Y FRAGILIDAD)

Cuando bajo ciertos esfuerzos, un material rebasa su límite elástico, los cristales dúctiles del material siguen extendiéndose, y al liberar el material del esfuerzo, la deformación elástica desaparece, pero alguna deformación permanente o plástica permanece.

Esto es, la deformación plástica es el cambio de forma que sufre un cuerpo bajo carga, el cual no se recupera cuando ésta se elimina.

Por otro lado, un cristal frágil sufre una fractura inmediatamente o casi al rebasar el límite elástico. La magnitud numérica del límite elástico, dependerá del comienzo de una deformación plástica extensa operando a través del mecanismo de dislocación. Consecuentemente, diversas características estructurales, tales como presencia de átomos de soluto o partículas pequeñas en la matriz cristalina, o fases microscópicas dispersas, afectan el valor del límite elástico de una aleación incrementando el valor del esfuerzo necesario para sacar el flujo de masa de las dislocaciones.

La diferencia entre ductilidad y fragilidad de una aleación, es la habilidad de formar una deformación permanente o plástica por el mecanismo de transporte de dislocaciones a través de los cristales.

Ductilidad es la cantidad de deformación plástica que resiste un material antes de romperse.

Fragilidad es la propiedad de un material que se manifiesta

por romperse sin previa deformación plástica apreciable.

FRACTURA

Los tipos de fractura producidos en materiales dúctiles y frágiles, bajo condiciones de esfuerzos alternados y temperaturas elevadas, tienen su origen en los diferentes modos de nucleación y propagación de fisuras.

Podemos definir a la fractura como la separación de un cuerpo en dos o más partes, y puede tener características dúctiles o frágiles. La fractura frágil ocurre por una propagación rápida de la fisura después de poca o ninguna deformación plástica. En materiales cristalinos ésta se propaga a lo largo de ciertos planos cristalográficos característicos denominados planos de clivaje. La fractura dúctil se produce después de una deformación extensa, y se caracteriza por una propagación lenta de la fisura por medio de un proceso de formación y coalescencia de huecos.

La dependencia del fenómeno fuerza-plasticidad-fractura, sobre el factor de tiempo de la proporción del esfuerzo o la temperatura (procesos de difusión y liberación de esfuerzos) y tipos de esfuerzos (uniaxiales o multiaxiales) serán considerados en conexión con los diversos tipos de pruebas de propiedades mecánicas.

DEFINICION Y EVALUACION DE PROPIEDADES MECANICAS

Normalmente, las pruebas mecánicas llevadas a cabo sobre las piezas fundidas caen dentro de 3 grupos:

- a) Pruebas de proceso y control de calidad.
- b) Pruebas para la evaluación de constantes físicas y propiedades estándar para su uso en ingeniería, así como la aplicación de metales.
- c) Pruebas analíticas para la evaluación del comportamiento de la estructura.

Como en la mayoría de los casos, el desarrollo de estas pruebas difiere en detalles, de acuerdo al diseño del equipo que se trate, es por eso que sólo se verán los principios básicos de las pruebas mecánicas.

DUREZA

Podemos definir a esta propiedad, como la resistencia que pre-

senta un material a ser penetrado por otro cuerpo.

La prueba de dureza mide la resistencia de un material a la penetración de un punzón o una cuchilla. El penetrador es generalmente una esfera, pirámide o cono, hecho de un material mucho más duro que el que se ensaya, como por ejemplo, acero endurecido, carburo de tungsteno sinterizado, o diamante.

La mayoría de las pruebas de dureza producen deformación plástica en el material, y todas las variables que influyen en la deformación plástica la afectan. La prueba de dureza puede hacerse muy fácilmente y la información obtenida se evalúa inmediatamente.

La evaluación numérica o la interpretación de los datos de dureza en término de las propiedades de la estructura atómica, es necesaria para seleccionar y definir las condiciones de medición. Como el objetivo principal con fines prácticos de la prueba de dureza es la de probar las condiciones estructurales de un componente dado o la uniformidad de la estructura en todas sus partes. Como esta prueba tiene carácter no destructivo, se emplea frecuentemente para control de calidad en producción.

PRUEBA DE TENSION

La prueba de tensión, es quizá la más útil de todas las pruebas empleadas para evaluar propiedades mecánicas.

En esta prueba, las muestras se estiran a una velocidad de deformación constante, midiéndose como una variable dependiente, la carga necesaria para producir una elongación especificada.

Con los resultados de la tensión, se puede graficar una curva de carga contra elongación, que generalmente se registran como valores de esfuerzo y deformación unitarios, y son independientes de la geometría de la pieza.

Al iniciarse la prueba de tensión, el material se deforma elásticamente y al sobrepasar su límite elástico, se inicia una deformación plástica. A medida que la muestra continúa alargándose, el esfuerzo ingenieril aumenta y se dice que el material ha sufrido un endurecimiento por trabajo o deformación.

Los resultados de la prueba de tensión, son de gran utilidad. En la mayoría de las estructuras, sólo debe existir deformación elástica, entonces, conocer el límite de fluencia determina la carga máxima aplicable con seguridad. En las técnicas de fabricación, tales como laminado, estirado de alambre y troquelado, dependen de la habilidad del metal para soportar una deformación plástica considerable

antes de romperse. Por lo tanto, es necesario conocer la ductilidad y la velocidad de endurecimiento del material con que se trabaja.

PRUEBA DE IMPACTO

El objetivo principal de la prueba de impacto, es obtener información práctica sobre el comportamiento estructural de aleaciones cuando son sujetas a cargas bajo impulso más allá de su límite elástico. La prueba de impacto, ha sido diseñada para detectar y controlar las condiciones estructurales bajo las cuales una aleación dúctil tiene un comportamiento de fractura frágil. Esto es debido a que los aceros, al igual que la mayor parte de otros materiales (del sistema CCC) absorben más energía al romperse de modo dúctil que frágil, por ello, la prueba de impacto sirve para evaluar la temperatura de transición del estado dúctil al frágil que se observa a medida que la temperatura disminuye.

FLUENCIA

Es la deformación que puede sufrir un material bajo condiciones de esfuerzo constante, como una función del tiempo y temperatura.

Este problema llega a ser particularmente importante cuando la temperatura de aplicación de una aleación es elevada, y entonces, debido al efecto de la temperatura sobre la movilidad de los átomos de la red, éstos pueden cambiar de lugar por el mecanismo de difusión, lo que daría oportunidad para una mayor movilidad de las dislocaciones.

Por lo tanto, debido a que los materiales cristalinos se endurecen en el proceso de deformación, una deformación continua bajo un esfuerzo constante, implica recuperación. La velocidad de fluencia (velocidad de deformación) es el resultado de un balance entre los procesos de endurecimiento y recuperación.

En una prueba de fluencia, los procesos de deformación cristalina y endurecimiento, siguen la misma secuencia que en una prueba de tensión. En la práctica, el método usado más ampliamente es el de fluencia a tensión uniforme con el fin de obtener, ya sea la proporción de fluencia, o bien las características de esfuerzo y el tiempo de fractura.

FATIGA

Un material no soporta durante largos períodos de cargas cíclicas, esfuerzos tan altos como los soportaría bajo una carga estática.

Por lo tanto, en una prueba de fatiga, podemos determinar los esfuerzos que una muestra de un material, puede resistir con seguridad un número determinado de cargas cíclicas.

En adición a todas las propiedades mecánicas anteriores, muchas veces se requiere que las piezas tengan otras propiedades que juegan un papel muy importante para su selección y aplicación, entre estas características podemos mencionar:

- a) Resistencia a la corrosión.
- b) Facilidad para el proceso de unión (soldadura).
- c) Proceso de acabado (pulido, recubrimientos electroquímicos, etc).
- d) Capacidad de amortiguación de impacto.

PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD

Composición.- La composición de un metal, es una variable que no afecta el comportamiento de éste. Las variaciones en la composición surgen principalmente debido a que no existe un control adecuado en la composición química de los materiales de carga (materia prima) que se usan y además los cambios de composición que ocurren en la fusión dependiendo del tipo de proceso que se siga.

Los métodos analíticos para la determinación de la composición de una aleación, difieren en su exactitud, tiempo requerido para el análisis, su especial aplicación para la determinación de elementos específicos, y sobre todo, del costo de los análisis.

La valoración de la composición del metal generalmente necesita análisis de la composición de la carga sólida, o bien de la composición durante la fusión y antes del vaciado del molde.

A continuación se presentará una tabla donde se podrán apreciar los métodos químicos y físicos que son utilizados para comprobar la composición de un metal.

PRINCIPALES METODOS CUANTITATIVOS PARA ANALISIS DE ALEACIONES

METODO GENERAL	METODO ESPECIFICO	PRINCIPIO	CARACTERISTICAS	APLICACIONES
QUIMICO Y FISICOQUIMICO	GRAVIMETRICO (PRECIPITACION)	Separación de elementos o componentes por precipitación.	Exactitud entre 0.5%-1% del contenido del elemento, dependiendo de la técnica. El tiempo de duración depende de la habilidad de quien lo ejecute.	Este es un método clásico general para muchas aleaciones, minerales o escorias, sirve para estandarización.
	GRAVIMETRICO (ELECTROLITICO)	Separación de elementos o sus componentes de una solución por electrolisis.	Es un método simple y rápido pero tiene limitaciones, su exactitud es igual que el anterior o mejor.	Usado principalmente para Cu, Ni, Cd, Zn, Pb.
	GRAVIMETRICO (COMBUSTION)	Separación del elemento de una aleación sólida por formación de un producto gaseoso con otro gas a altas temperaturas.	Es un método rutinario, simple y muy rápido, pero muy limitado, exactitud 0.5%-1%.	Principalmente para determinar el carbón en aleaciones.
	VOLUMETRICO (TITULACION)	Solución valorada para titular la solución que contiene el elemento desconocido el punto final de la reacción es el viraje de color por medio de un indicador.	Tiene muchas variantes basadas sobre diferentes principios químicos, rápido pero tiene una exactitud igual o menor que el gravimétrico, dependiendo del elemento, método y técnica.	Este método es usado más ampliamente que el gravimétrico.

METODO GENERAL	METODO ESPECIFICO	PRINCIPIO	CARACTERISTICAS	APLICACIONES
	VOLUMETRICO (CLORIMETRICO)	Una solución colorida que contiene al elemento desconocido evaluado por diferentes métodos contra estándares calibrados.	Rápido, requiere estándares, tiene menor aplicación que el título métrico exactitud menor que 1%.	Principalmente usado para bajas concentraciones e impurezas.
	POLAROGRAFICO	Electrolisis de soluciones con cátodo de Hg.	Rápido, útil para elementos específicos, usualmente no ferrosos (Pb, Cu en aceros) exactitud aproximada 1%.	Principalmente para trazas de elementos, complementario de otros métodos.
FISICO	ESPECTROGRAFICO.	Espectro de radiación característica de elementos obtenido por chispazo sobre la muestra, dispersado y registrado, la intensidad es comparada contra estándares.	Variación en la intensidad y difracción del chispazo para la evaluación, totalmente instrumentado, rápido, no depende tan mayormente de la habilidad del operador como en los métodos químicos. - Exactitud 2%-5% Alto costo inicial.	Repetición de especificaciones estándar, aleaciones de bajos contenidos, más apropiado para elementos pesados.
	RAYOS-X	Espectro Secundario de Rayos-x para muestras sólidas o en solución.	Totalmente instrumentado, su costo inicial es elevado su exactitud como el anterior.	Es un método complementario al espectrográfico, pero para aleaciones con altos contenidos de elementos.

COMPOSICION Y PROPIEDADES DE PIEZAS FUNDIDAS

Hasta estos momentos se ha visto que las variaciones en las propiedades requeridas de las piezas fundidas, nos lleva a una variación muy amplia en los estándares de composición y sus controles.

Un problema de interés metalúrgico que surge en este campo en el que ciertos elementos y más frecuentemente los de origen gaseoso y no especificado en los estándares, pueden ser particularmente dañinos a las propiedades de las piezas fundidas. Las razones de esto son en parte fisicoquímica y en parte metalúrgica, ya que tales elementos no es posible determinarlos fácilmente por pruebas analíticas de rutina. Consecuentemente se deberán adicionar otras pruebas para posibles efectos de elementos no especificados.

MOLDES

Las diversas pruebas que se le hacen al metal, están relacionadas con su calidad y propiedades, pero las pruebas a los moldes concierne principalmente con el control de calidad del proceso y producción.

Las pruebas sobre un molde difieren dependiendo del proceso de fusión que se trate y del grado de control de calidad requerido.

APLICACION DE LOS DATOS DE PRUEBA

Estos datos sirven para llevar un registro del proceso, producción, así como del mantenimiento y reproductibilidad de la calidad de las piezas fundidas, análisis y eliminación de las causas de los defectos en las piezas.

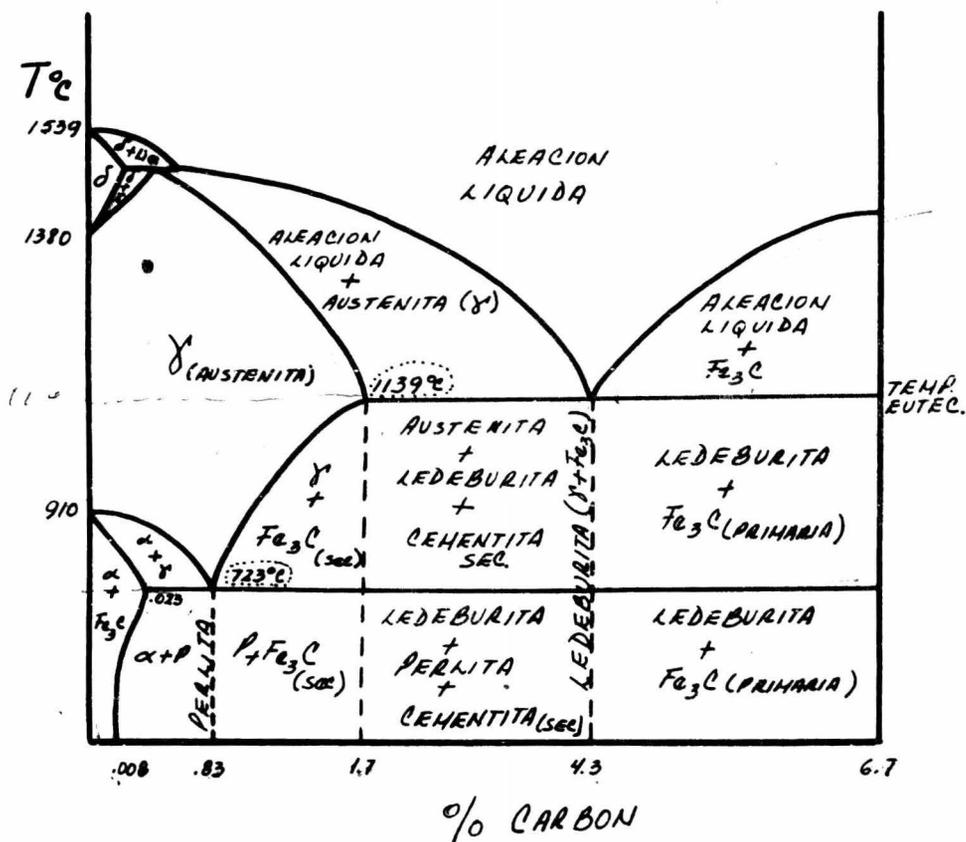
CONCLUSIONES

En este capítulo sobre Teoría de Fundición, se ha analizado el comportamiento de las aleaciones a través de diversas etapas, así como todos los factores que nos pueden afectar su comportamiento y se intentó explicar éste en términos de principios científicos. A través del capítulo, se puede observar y entender que aún la Ingeniería de Fundición, no es posible considerarla en su totalidad como una ciencia aplicada, ya que depende fuertemente sobre la habilidad y experiencia del factor humano, porque en muchos países y aún más, en el nuestro, no es posible contar con materia prima de primera calidad, así como de suficiente personal capacitado para el control de los procesos de fundición.

Si a todo lo anterior, agregamos que la aplicación de una aleación en la industria dependen de la disponibilidad de materia prima, facilidad técnica y de la economía del proceso de fabricación, control del proceso y de los productos, entonces se hace necesario el disponer de un equipo de proceso donde se cumplan requerimientos tales como:

- 1) Fusión predominantemente de cargas con materiales metálicos (chatarra, arrabio y scrap, etc.).
- 2) Un fácil y exacto control de la fusión para lograr las condiciones requeridas.
- 3) Alta flexibilidad del proceso de fusión para extraer metal cuando se requiera.
- 4) Protección ambiental desde el punto de vista de un proceso tecnológico.

DIAGRAMA Fe-C



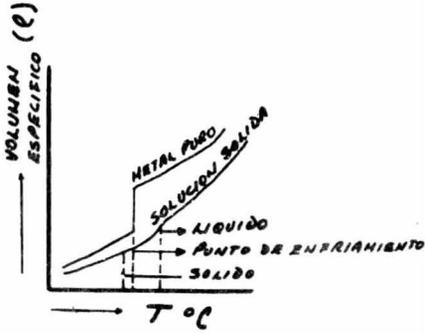


FIGURA 1

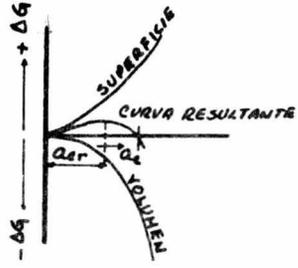


FIGURA 2

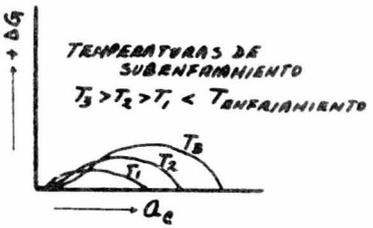


FIGURA 3

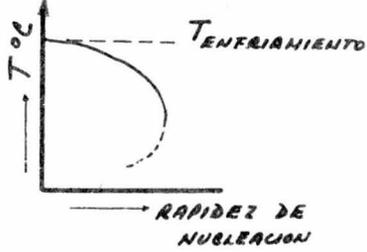


FIGURA 4



RELACIONES DE LA ENERGIA SUPERFICIAL QUE AFECTAN EL MOJADO DE NUCLEOS HETEROGENEOS POR METALES LIQUIDOS

FIGURA 5

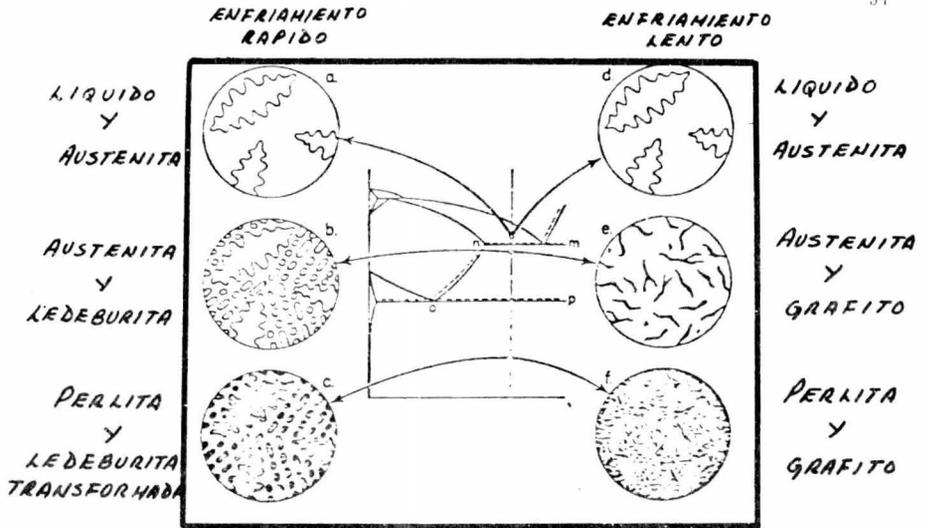
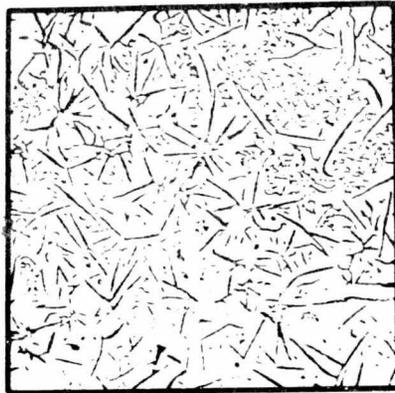


FIGURA 6



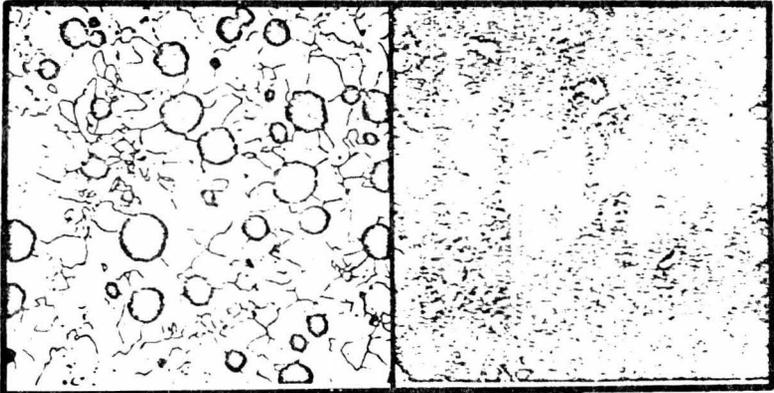
FUNDICION GRIS

FIGURA 7



FIGURA 8

FUNDICION BLANCA



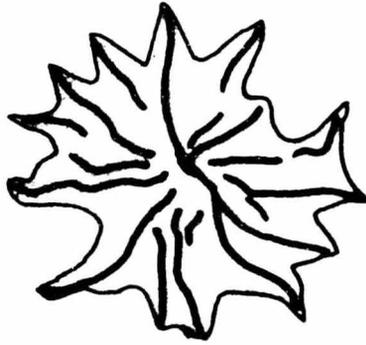
HIERRO DUCTIL
FERRITICO

HIERRO DUCTIL
PERLITICO



HIERRO DUCTIL
TEMPLADO

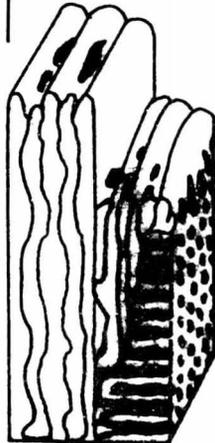
FIGURA 9



CRECIMIENTO EUTECTICO DE Fe-G

FIGURA 10

↑ TENDENCIA DE CRECIMIENTO
DE LA CEMENTITA HACIA
ARRIBA



→ DIRECCION
CRISTALOGRAFICA DE
LA CEMENTITA

→ CRECIMIENTO
LATERAL

CRECIMIENTO EUTECTICO Fe-Fe₃C

FIGURA 11

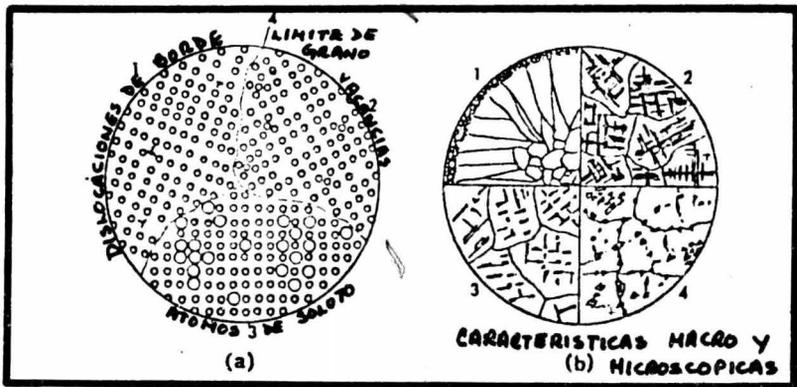
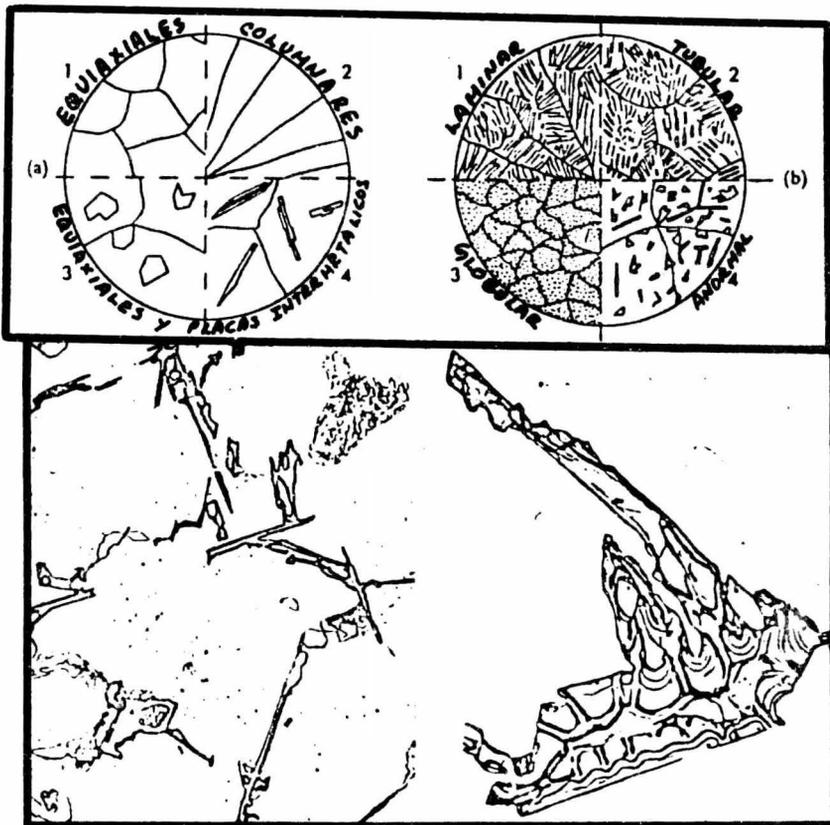


FIGURA 12



FASE INTERMETALICA TIPICA

CRISTAL DE SILICIO REMOVIDO DE UNA ALEACION EUTECTICA

FIGURA (III) LAMINA (A)

3-1 DESCRIPCION DE EQUIPO:

Siendo el Horno de Cubilote del tipo de torre vertical de tal manera que permite que los gases que ascienden entren en contacto directo con los materiales que descienden, teniendo como consecuencia un cambio de calor entre los gases y los materiales de fusión muy eficiente.

Un horno de Cubilote consiste generalmente de una coraza cilíndrica de acero revestida con materiales refractarios y equipada con una caja de viento y toberas para la admisión de aire.

TOBERAS

Por medio de las Toberas se proporciona el paso de aire de combustión a la cama de coque.

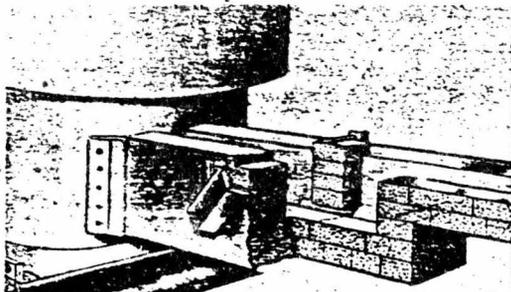
La determinación del tamaño y el área de las Toberas está sujeto a muchas discusiones ya que éstas pueden ser: redondas, cuadradas, o rectangulares, y del tipo de caja individual o contínuas. Sin embargo, es frecuente encontrar para la determinación de tamaño y área de las Toberas el término "relación de Toberas" que se emplea para denotar la relación de la suma del área de las Toberas al área de la sección transversal del cubilote.

En operaciones reales se puede encontrar que las Toberas varían entre $1/10$ y $1/3$ del área del Cubilote.

La colocación de las toberas es suficientemente alta para proporcionar una mayor capacidad del Crisol.

PICOS PARA SANGRIA Y ESCORIADO

Estos se encuentran en la porción del Cubilote que está ocupada por el Crisol. Como se ve en la Figura:



ABERTURAS DE ADMISION DE LA CARGA

Cuando el Cubilote es cargado en forma mecánica, la abertura de carga se encuentra a un nivel bastante alto, para permitir una absorción más eficiente del calor de los gases de escape que ascienden.

EQUIPO MECANICO PARA CARGA

Actualmente hay una gran variedad de equipo de carga. Entonces se hace necesaria la selección del equipo que mejor se adapte a las condiciones de cada fundición en particular.

Las operaciones de carga mecánica debemos considerarlas desde el momento en que recibimos la materia prima (chatarra, fundentes, etc.) hasta la entrega final de ésta en el Horno.

Las ventajas que obtenemos al tener un sistema mecánico para descarga, almacenamiento, movimiento y carga de materiales son las siguientes:

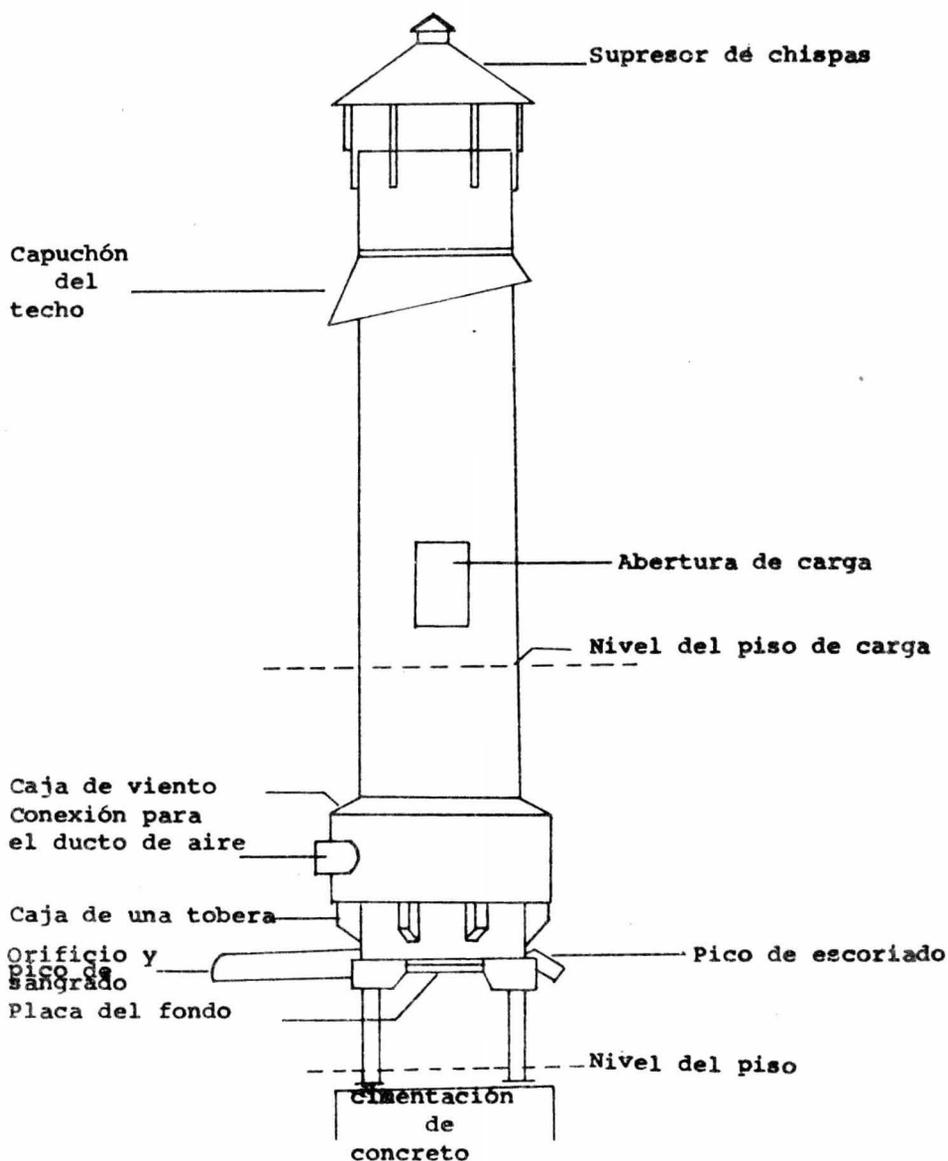
- a) Reducción de la mano de obra.
- b) Mejoramiento en las condiciones de trabajo.
- c) Proporciona mejores condiciones para efectuar una mayor supervisión de las operaciones.
- d) Eliminación de un piso de carga.
- e) Por medio de cargas preparadas con uniformidad y precisión, tendremos una operación más eficiente en el Cubilote.

SUPRESOR DE CHISPAS

Este es un dispositivo de doble cono formado de placa de acero gruesa y perforada, soportada por bases de hierro colado durables. Este supresor de chispas tiene la finalidad de reducir el peligro de incendio a causa de las chispas del Cubilote, pero no ejerce ninguna acción anticontaminante en los gases de escape.]

Hay equipo para la limpieza de los gases de escape, pero éstos no forman parte del equipo standard del Cubilote.

En la parte de abajo se presenta un esquema de un Horno de Cubilote convencional.



A continuación se hará una breve descripción de los equipos y accesorios mecánicos más comúnmente utilizados, así como sus principales características.

GRUA

El tipo más empleado es el de una grúa viajera equipada con un cucharón para descargar coque y piedra caliza y un electroimán para descargar metal y formar las cargas de metal para el Cubilote. En cubilotes pequeños que operan un tonelaje bajo, puede emplearse una grúa de claro entre rieles relativamente corto.

PESO DE LOS MATERIALES

Para este propósito existe por lo general en las grúas una báscula que sirve de guía al operador para saber el peso de la carga que lleva. O bien en fundiciones pequeñas se cuenta con básculas del tipo de tolva suspendida.

ELECTROIMANES DE LEVANTE

Estos electroimanes están disponibles en formas redondas o rectangulares y en diversas capacidades de levante. Al seleccionar un electroimán se debe tomar en cuenta el ciclo de operación y el tamaño de la abertura de la tolva de pesado o de la canasta de carga.

EQUIPO PARA MANEJO DE COQUE Y PIEDRA CALIZA

El equipo mecánico para el manejo de Coque será el mismo que el utilizado para caliza.

Debido a que el Coque es un material más delicado que la Caliza, es necesario contar con un sistema más o menos apropiado para evitar causar el mayor daño al Coque, esto es, evitar que se desmorone.

Frecuentemente se emplea una grúa de patio equipada con un cucharón de quijadas, para descargar un carro de Coque.

Cuando el Coque se puede recibir en Carros-góndola y es entregado directamente a las Tolvas de almacenamiento y formación de cargas por medio de una grúa viajera, los riesgos de desmoronamiento se mantienen dentro de un mínimo.

También se puede usar transportadores de banda e incluso elevadores de cangilones.

HERRAMIENTAS PARA EL CORTE DE CHATARRA

Es necesario su uso para una preparación adecuada de la chatarra.

Normalmente el equipo consiste de:

- a) Bola rompedora manejada por medio del electroimán de la grúa para romper piezas grandes de chatarra.
- b) Una cizalla o un equipo de oxiacetileno para dar el tamaño adecuado a la chatarra que se va a cargar.

CARGA DE MATERIALES

Todos los materiales que van a ser cargados, deberán estar seleccionados en cuanto a tamaño y análisis. De una manera general podemos decir que todos los materiales deben ir en una canasta de carga para su entrega en el Cubilote, a través de la abertura de carga.

TIPOS DE CANASTA PARA CARGA

La selección de una canasta de carga es muy importante para obtener el manejo de materiales, como para obtener el mejor control metalúrgico posible sobre el proceso de fusión en el Cubilote.

Los tipos de canasta más usados son:

- a) Canasta tipo cajón, para vuelco lateral.
- b) Canasta de fondo embisagrado, de una sola pieza.
- c) Canasta de fondo embisagrado, de dos piezas.
- d) Canasta de fondo Cónico.

EQUIPO DE CARGA MECANICA

Fue necesario desarrollar este tipo de equipo, debido a las demandas de producción, y se encuentra clasificado en 2 grupos generales:

- A. Cargadores del tipo de cajón guiado en rieles y operado por malacates.
- B. Cargadores del tipo de grúa.

Los del grupo A se pueden subdividir en :

- 1) Rieles verticales con canasta de descarga lateral
- 2) Rieles inclinados con canasta de descarga lateral
- 3) Rieles inclinados estacionarios.
- 4) Rieles inclinados giratorios.
- 5) Rieles de servicio pesado con carros de carga.

La instalación de cualquiera de estos sistemas de carga, va a estar en función de las necesidades de operación, espacio y del sistema de fusión que se tenga, esto es, tamaño del Horno, número de Hornos trabajando simultáneamente, etc.

En las figuras 1, 2 y 3, se presentan los esquemas correspondientes a los sistemas de carga mencionados anteriormente.

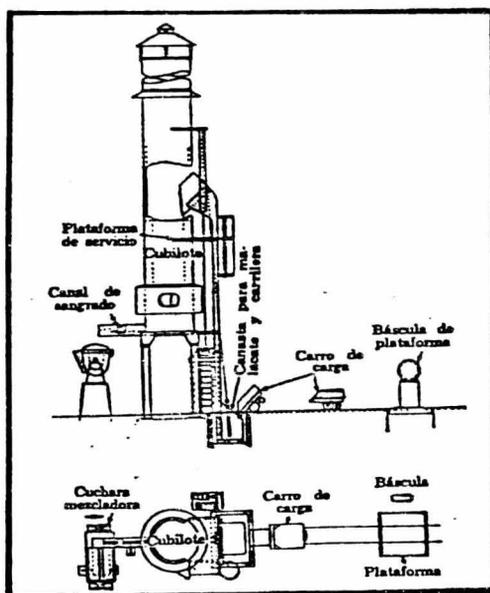


FIG 1

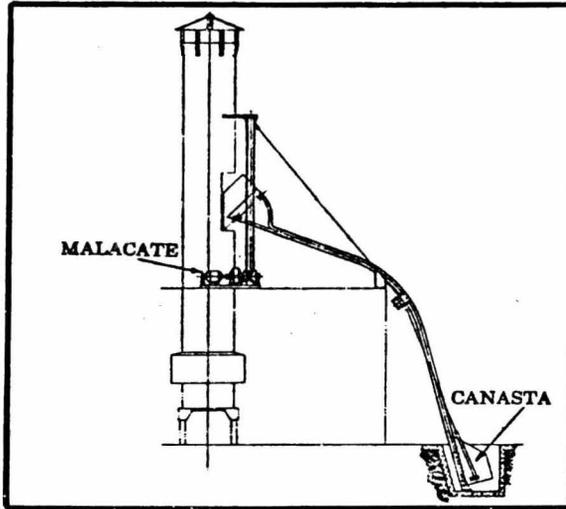


FIG 2

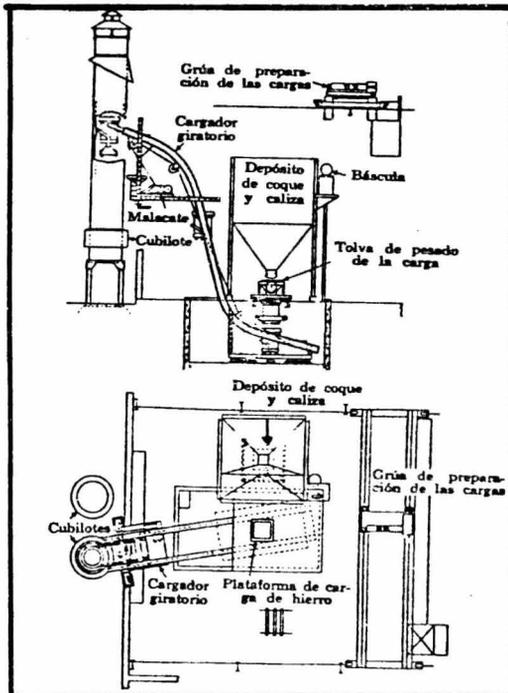


FIG 3

En el grupo B que corresponde a los cargadores del tipo de grúa, éstos pueden obtenerse para cumplir con casi cualquier condición existente.

En general, se pueden clasificar en:

- 1) Tipo colgante o suspendido.
- 2) Tipo monorriel.
- 3) Tipo Herradura.
- 4) Tipo pórtico o caballete.
- 5) Tipo grúa de brazo.
- 6) Tipo volado o de suspensión superior.

ANTECRISOLES Y CUCHARAS

Antecrisoles.- Podemos definirlos como cualquier recipiente interpuesto entre el pico del Cubilote y la cuchara de vaciado.

FUNCIONES DEL ANTECRISOL:

Se considera que las funciones del antecrisol son:

- a) Servir como medio de afinado de la composición del metal.
- b) Servir de almacenamiento temporal del metal.
- c) Permitir un tratamiento intermedio del metal (desulfuración).

CUCHARAS.- Sirven para transportar metal fundido, ya sea para distribuirlo a otras cucharas, o bien para vaciarlo en moldes, o lingotes.

La cuchara de vaciado recibe el metal fundido directamente del cubilote o del antecrisol.

Existen 3 tipos básicos de cucharas:

- 1) Cucharas de costados rectos (Fig. 4).
- 2) Cucharas de costados inclinados (Fig. 5).
- 3) Cucharas cilíndricas (Fig. 6).

La cuchara de vaciado o de distribución deberá tener una buena conservación del calor, ya que las pérdidas de temperatura que ocurren en la cuchara son por absorción de calor por el revestimiento y pérdidas por radiación.

Para reducir las pérdidas de calor en las cucharas, el revestimiento refractario deberá ser precalentado, ésto se logra mediante quemadores de calentamiento, además las cucharas deberán tener cubiertas o tapas reduciendo las pérdidas de temperatura de la superficie del metal, y como una consideración aparte las tapas en las cucharas de vaciado protegen hasta cierto punto a los trabajadores del calor intenso, permitiéndoles desarrollarse con mayor eficiencia.

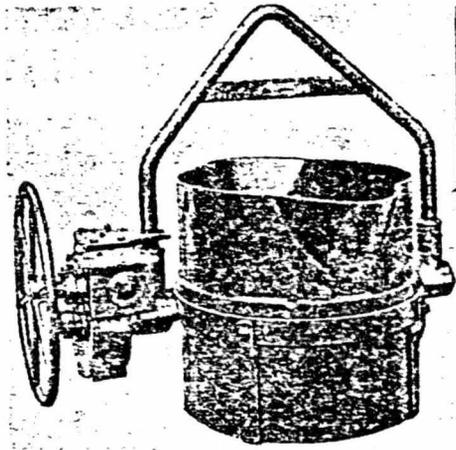


FIG 4

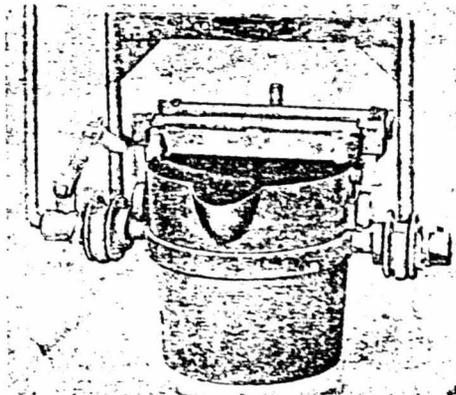


FIG 5

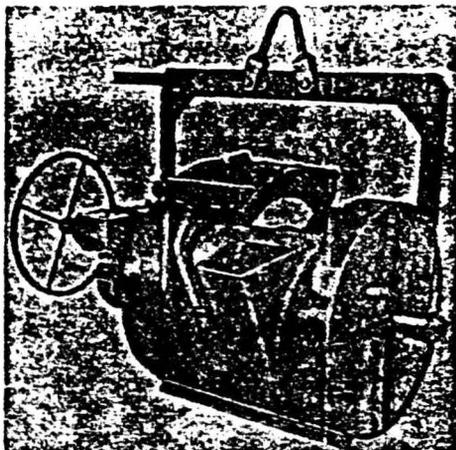


FIG 6

EQUIPO DE SOPLADO Y SU CONTROL

EQUIPO DE SOPLADO

El equipo de soplado va a estar en función de una serie de factores, que nos proporcionan las condiciones adecuadas de operación.

a) FACTORES QUE DETERMINAN EL VOLUMEN Y PRESION DEL AIRE.

- 1). Tipo y tamaño del cubilote.
- 2). Régimen de fusión.
- 3). Relación hierro/coque en las cargas.
- 4). Tipo de hierro deseado.
- 5). Temperatura del hierro en el pico.
- 6). Altura de la cama de coque y de las cargas arriba de las toberas.
- 7). Tamaño y calidad del coque.

b) FACTORES PARA LA ELECCION DEL EQUIPO DE SOPLADO.

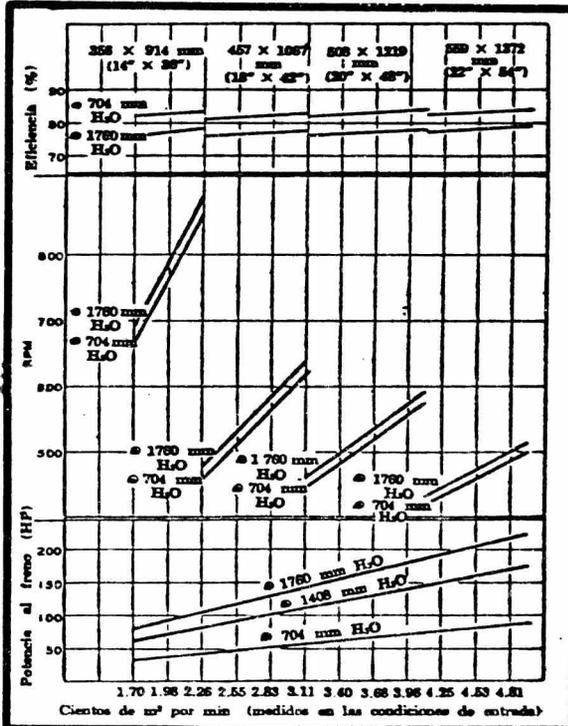
- 1). Volumen y presión máximos para condiciones de fusión óptimas.
- 2). Costo inicial y de operación.
- 3). Localización del soplador con referencia al cubilote.
- 4). Temperatura máxima del aire a la entrada del soplador.
- 5). Método de impulsión.
- 6). Altitud de la instalación.

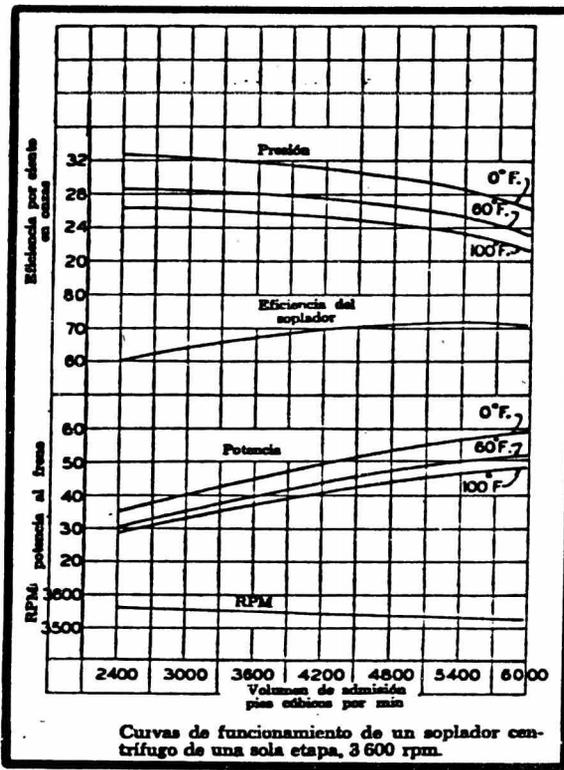
Los sopladores empleados para el servicio en los cubilotes son de 3 tipos:

- a) De desplazamiento positivo.
- b) Centrífugo.
- c) Del tipo ventilador.

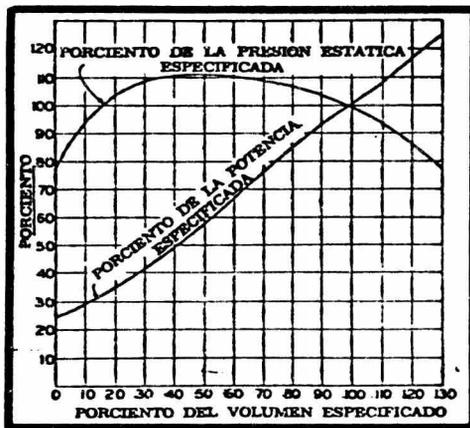
Se presentan curvas características de funcionamiento de cada tipo para poder apreciar sus características y de esta manera, seleccionar el más adecuado.

(a)





(b)

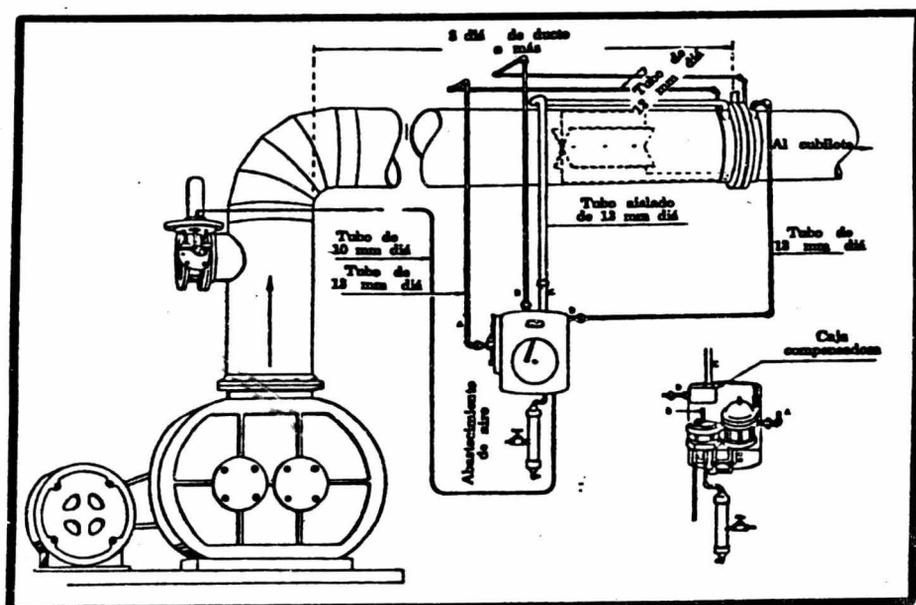


(c)

EQUIPO DE CONTROL DE SOPLADO

Por medio de las placas de orificio o el tubo Venturi se mide el flujo de aire colocando cualquiera de estos 2 mecanismos en el ducto que va al cubilote; y el instrumento principal de control recibe la presión diferencial del orificio o del tubo venturi, resultante del flujo de aire a través del ducto. Esta presión diferencial es transmitida a gráficas de registro que emplean una plumilla trazadora. En la transferencia se hacen correcciones por temperatura y presión del aire en el orificio, quedando grabado el registro del flujo en m^3 de aire o en Kg de aire.

En la figura se puede apreciar la instalación de un controlador de aire.



Existe otro tipo de equipo de control que emplea la demanda de corriente de motor como una medida del volumen estandar o peso de aire que está siendo entregado al cubilote por el soplador. Las curvas de diseño del compresor deberán adaptarse a las características del motor, o cualquier otro medio mecánico para asegurar la precisión en las lecturas eléctricas traducidas a kilogramos de aire por los medidores eléctricos que miden la demanda del motor impulsor.

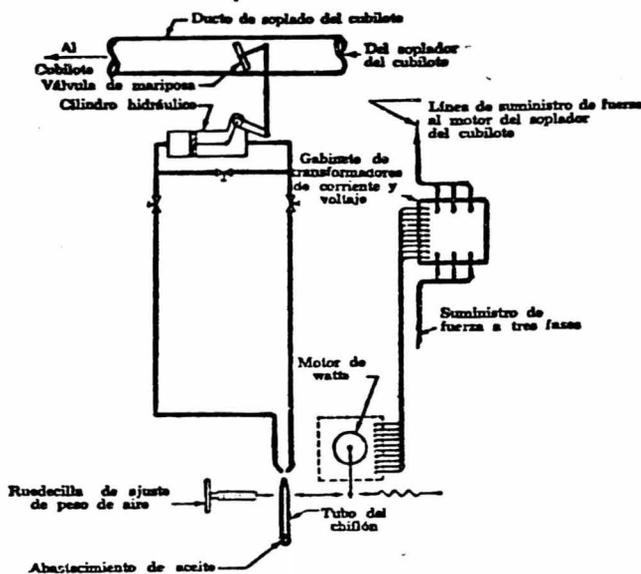


Diagrama esquemático del método de medir el volumen o el peso del aire entregado al cubilote por el soplador, por medio de la demanda eléctrica del motor del soplador.

ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO

Básicamente en este punto nos referiremos al precalentamiento de soplado del aire al cubilote, lo que trae como consecuencia un aumento en la eficiencia y en la velocidad de combustión.

En la actualidad, se ha encontrado que el precalentamiento del aire soplado al cubilote, da por resultado un considerable ahorro de coque (20-25%) usando temperaturas de soplado entre 148 y 260°C., en comparación a la práctica convencional de "soplado frío" que produzca la misma cantidad de hierro a la misma temperatura.

Otra de las ventajas que se tienen es una menor absorción de azufre, menores pérdidas por oxidación de Si, Mn, Fe, y aleaciones oxidables, ahorro en el refractario y en el empleo de fundentes.

Los métodos empleados para el precalentamiento del aire soplado para la combustión en el cubilote son: 1) Sistema recuperativo de soplado caliente, éste es, emplea el calor sensible y potencial de los gases que escapan del cubilote; y 2) Sistemas de Precalentamiento del aire de soplado por medios externos, como puede ser un calentador independiente que emplea carbón, gas o petróleo.

EQUIPO PARA MEDIR LA TEMPERATURA DEL METAL

La temperatura del metal fundido en un horno de cubilote está en función de la relación hierro/coque y por el volumen de aire suministrado.

La medición de la temperatura de la superficie del metal puede determinarse por medio de la energía radiante emitida, la cual varía según la diferencia entre la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante y la cuarta potencia de la temperatura absoluta del medio que lo rodea. Esto es, la energía radiante emitida por unidad de área y unidad de tiempo depende de la temperatura y las características de la superficie del cuerpo.

El equipo para efectuar las mediciones de temperatura del hierro fundido puede ser: un pirómetro óptico, un pirómetro de radiación o por medio de un termopar de inmersión.

CONTROL DE EMISIONES EN EL H. DE CUBILOTE

Este aspecto tiene mucha importancia, sobre todo hoy en día, que se han establecido normas para controlar la contaminación atmosférica, y en este punto el horno de cubilote juega un papel importante, ya que de la operación de fusión los gases que se desprenden de la combustión a altas temperaturas y en grandes volúmenes, contienen partículas de polvo y vapores, lo que puede interferir con la comodidad, seguridad y salud del hombre. Entonces ante este problema el establecimiento de un equipo para el control de las condiciones topográficas y meteorológicas, esto como primer punto, y lo que traerá como consecuencia la decisión de instalar un sistema de colección de polvos de mediano costo y eficiencia mediana, o bien un sistema de alto costo y eficiencia elevada.

Existen numerosos sistemas de colección de polvos, los cuales tienen diversos mecanismos de operación y el tratar de explicarlos llevaría bastante espacio y además no nos correspondería hacerlo, aquí sólo se enumerarán los diversos tipos de sistemas que hay:

- 1) Colectores de polvo de alta eficiencia.
- 2) Filtros en forma de bolsa.
- 3) Precipitadores eléctricos.
- 4) Jaula de Malla.
- 5) Colectores del tipo ciclónico.
- 6) Colectores de cono metálico.
- 7) Lavadoras por rocío simple.
- 8) Lavador de gases del cubilote de tipo mejorado.
- 9) Depurador centrífugo.
- 10) Cubilote de insuflación calentada y colector del tipo vórtice.
- 11) Eliminación de gases por el uso del sistema de calefacción del aire soplado.

Estos son los principales sistemas para evitar la contaminación atmosférica, y la instalación de cualesquiera de ellos, es una decisión que tiene que pensarse mucho, y como opinión, diremos que no se debe hacer una inversión muy costosa de instalaciones, ya que ésta puede ser eliminada, al comprar equipo más eficiente.

CUBILOTES CON ACCESORIOS

- 1.- Inyección de oxígeno al cubilote.
- 2.- Cubilote con enfriamiento de agua con refractario.
- 3.- Cubilote con tobers primarias y secundarias.

INYECCION DE OXIGENO AL CUBILOTE

En la práctica se ha encontrado que mediante el uso de oxígeno se han obtenido las siguientes ventajas:

- a) Ahorro en las materias primas (coque, ferroaleaciones, etc).
- b) Aumento en las toneladas fundidas.
- c) Usando oxígeno intermitentemente, se obtendrá un inicio de operación rápida y correcciones en la operación cuando se quiera.

APLICACION DEL OXIGENO

El equipo, la instalación y la operación, para el uso del oxígeno es sencilla y no muy costosa.

EQUIPO: Se compone de un tanque de almacenamiento especial, proporcionado por el proveedor de oxígeno. Una línea de conducción especial del tanque de almacenamiento al cubilote. Un grupo de aditamentos simples de regulación, seguridad e indicación, instalados en la línea de conducción, que proporcionan una simplicidad extraordinaria al uso del oxígeno.

INSTALACION: Es simple y requiere de normas de seguridad, por ser el oxígeno tan excelente combustible, lo cual no implica un gran problema.

El tanque requiere una base firme, tiende la línea, instalan aditamentos, se verifica ausencia de fugas.

OPERACION: Se recomienda no excederse del 4% de oxígeno con respecto al soplo, debido a que se obtiene un gran desequilibrio en la operación del cubilote.

CUBILOTE CON ENFRIAMIENTO DE AGUA CON REFRACTARIO

INSTLACION: Principalmente consta de una bomba, un recipiente y un tubo. Se hace la instalación, se fijan los ajustes necesarios y se funden más toneladas de hierro, sin problemas de áreas

calientes en la coraza. De esta manera se evita usar más refractario lo que ocasionaría una disminución en la capacidad. Algunas veces se recomienda el utilizar refractario de mejor calidad, pero es más conveniente revisar los costos de refractarios y compararlos con la inversión y mantenimiento de la chiqueta de agua y así poder tomar la decisión más conveniente.

CUBILOTES CON TOBERAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS

Las ventajas que obtenemos al instalar dos líneas de toberas son las siguientes:

La temperatura de sangrado se aumenta entre 80 a 90 °F.

El consumo de coque puede reducirse de 20 a 32% .

La capacidad de fusión puede aumentar de 11 a 23%.

3.2 MATERIAS PRIMAS

Como el objetivo del Horno de Cubilote es fundir hierro ya metálico y el combustible tradicional es el coque, el cual también actúa como carburante y como soporte de la carga metálica, las materias primas utilizadas en la fusión de un horno son muy importantes, tanto metalúrgica como económicamente.

En lo referente a los materiales metálicos utilizados, tanto la pedacera de hierro, como la de acero, son componentes importantes de la mayoría de las mezclas de metal fundidas en el cubilote.

La chatarra empleada en la fusión en un cubilote se puede dividir en 3 grupos:

- ✓ 1) Chatarra de Retorno (Scrap) o coladas.
- ✓ 2) Chatarra de hierro gris.
- ✓ 3) Chatarra de acero.

A excepción de la chatarra de retorno, los otros tipos de chatarra, varían en análisis químico, tamaño y forma.



Entonces como requisito para seleccionar la chatarra, es el conocimiento de su análisis y su ajuste a ciertos límites; esto es saber en términos generales el análisis promedio de un lote dado de chatarra. Un factor también muy importante, es el tamaño y espesor de cada pieza de chatarra, ya que el tamaño de las piezas que pueden ser usadas en la carga, depende del tamaño del cubilote, el uso de cucharas mezcladoras y de otras peculiaridades, características de una operación de fundición.

Resumiendo, si se quieren obtener buenos resultados de fusión, la chatarra empleada deberá estar apropiadamente seleccionada, limpia, de buen tamaño y libre de materiales extraños (contaminantes).

FERROALEACIONES

Se considera una ferroaleación, cualquier material que sea usado para la introducción de un elemento diferente al hierro.

Las ferroaleaciones se pueden añadir al hierro colado de 2 maneras diferentes:

- ✓ a) Por inclusión en la carga del cubilote, de tal manera que el material se mezcle con el resto de la carga durante la fusión, esto es, para lograr el ajuste químico deseado.

b) Por adición en la cuchara.

Por lo tanto, el uso de las ferroaleaciones es para obtener el análisis químico adecuado y por otro lado las usadas en la cuchara que reciben el nombre de "inoculantes" son para ejercer una acción física que mejore la estructura y propiedades del hierro gris.

COMBUSTIBLE

El más común es el coque, y como tal, se utiliza en la industria de la fundición y en la siderúrgica.

El coque procede de la combustión incompleta del carbón, y de esta manera, el coque ya no contiene los cuerpos volátiles que el carbón encerraba.

En México se producen 2 tipos de coque:

Imperial.

Metalúrgico.

El Imperial que es el de mejor calidad que se produce en México y cuyo análisis químico es el siguiente:

Humedad:	1.00 - 2.50%
Materia volátil:	0.60 - 0.75%
Carbón fijo:	85.00 - 86.50%
Ceniza:	12.50 - 14.50%
Azufre:	0.93 - 1.00%
Porosidad:	63.42%

Shatter o prueba de requebrajamiento 2" 85.39. El grado metalúrgico que es de inferior calidad al anterior, también se le llama de Alto Horno. Su análisis químico es el siguiente:

Humedad:	2.00 - 2.50%
Materia volátil:	0.75 - 0.90%
Carbón fijo:	80.00 - 81.00%

Ceniza: 18.00 - 19.25%

Azufre: 0.95 - 1.00%

Porosidad: 52.34%

Shatter o prueba de requetrajamiento: 2" 72.43

Existe un tercer tipo de coque que se utiliza en la industria de fundición, aunque éste es de importación y de una calidad superior al coque mexicano, es el llamado Grado Americano, cuyo análisis químico es:

Humedad: 1.95 - 3.5%

Materia Volátil: 0.50 - 0.60%

Carbón fijo: 90.00 - 93.00%

Ceniza: 7.00 - 8.5 %

Azufre: 0.50 - 0.60%

Porosidad: 50.00 - 53.00%

Shatter o prueba de requetrajamiento: 2" 97.00 .

FUNDENTES

La función de un fundente es bajar el punto de fusión y mejorar la fluidez de la escoria producida durante la operación de fusión. La importancia física de una adición de fundentes adecuada y de tener una buena fluidez en la escoria es necesaria para mantener un cubilote limpio, operando eficientemente. Ya que si tenemos una escoria espesa e insuficientemente fluidificada, tiende a cerrar los intersticios entre el material y forma una concha contra las paredes del cubilote. Estos dos efectos reducen el área efectiva de la chimenea y la superficie efectiva del coque, lo que trae por resultado una temperatura del hierro más baja, un régimen de fusión retardado, menor contenido de carbono, y mayor oxidación.

Los fundentes mayormente usados podemos listarlos así:

Piedra caliza (carbonato de calcio) CaCO_3

Dolomita (Carbonato de Ca y Mg) CaCO_3 y MgCO_3

Sosa Calcinada (Carbonato de Sodio)

Espato fluor (Fluoruro de Calcio) CaF_2

Carburo (Carburo de Calcio) CaC_2

Muchos de los fundentes, son materiales naturales y relativamente baratos. Pueden obtenerse resultados satisfactorios con cualquiera de los diversos fundentes o sus combinaciones. La mayoría de los cubilotes se pueden escoriar de una manera aceptable con fundentes en una cantidad de 2%-7% del peso de la carga del metal.

REVESTIMIENTO REFRACTARIO

La selección e instalación del refractario es una consideración muy importante, ya que los refractarios del horno de cubilote, están entre los requerimientos más severos encontrados en la práctica metalúrgica. Como la función principal de estos materiales refractarios es la resistencia a la alta temperatura en el cubilote, abrasión, presión, ataque químico y a los cambios bruscos de temperatura, es por lo tanto claro el por qué la selección de los refractarios sea importante.

La calidad y la uniformidad del refractario son necesarias para proteger los componentes estructurales del horno, para asegurar un trabajo de dimensiones consistentes, y para ayudar a un descenso suave de la carga con una mínima contaminación del hierro fundido.

Bajo el punto de vista de condiciones de servicio, el cubilote se puede dividir en cuatro zonas:

- ✓ 1) Zona de Fusión.
- ✓ 2) Crisol o Soleira.
- ✓ 3) Zona de Carga.
- ✓ 4) Zona arriba de la Puerta de Carga.

ZONA DE FUSION

En esta zona, es donde se encuentran las condiciones más severas, ya que aquí tiene lugar la oxidación del hierro y otros elementos, y los óxidos reaccionan con escoria que ya ha sido formada por la acción fundente de la caliza de la carga sobre las cenizas del coque, arena, y, en cierto grado

el revestimiento refractario. Como esta zona es la de mayor temperatura, existen las condiciones favorables para una mayor acción química y erosión mecánica.

Los refractarios de esta zona se agrietan o se rompen, pero quizá esto no ocurra durante el período de fusión, sino cuando se tira el fondo, que es cuando el aire frío pasa rozando el refractario extremadamente caliente, lo que establece una condición de severo choque térmico. En algunas partes donde utilizan chorros de agua para enfriar las paredes del horno más rápidamente, el choque térmico es más severo, esto debe considerarse con cuidado, ya que el ahorro de tiempo puede resultar contraproducente, debido al costo de los refractarios destruidos.

CRISOL O SOLERA

Aquí la temperatura es entre 150° a 200°C más baja que en la zona de fusión. En esta parte, el refractario no está sujeto a condiciones tan severas como en la zona anterior, ya que aquí el refractario sólo está en contacto con el metal fundido, la escoria, y coque relativamente estático, de modo que los efectos de la temperatura y de la abrasión no son tan serios. El rompimiento del refractario ocurre cuando se tira el fondo, pero éste es menor que el refractario de zonas superiores del cubilote.

ZONA DE CARGA

En esta zona, los factores que afectan al refractario, son principalmente debido a la abrasión, ya sea por los impactos de la operación de carga como por la fricción de la carga al moverse hacia abajo.

ZONA ARRIBA DE LA PUERTA DE CARGA

La función del refractario en esta zona, no es más que la de proteger a la coraza del calor de los gases de escape del cubilote.

El mantenimiento del refractario es más crítico en la zona de fusión, así como en el orificio de sangrado, ya que son los que se consumen más rápidamente que en otras secciones. Por lo general, estas partes necesitan mantenimiento del refractario después de cada hornada.

Los equipos auxiliares importantes que necesitan revestimientos refractarios, son los picos de sangrado, antecrisoles, cucharas de transferencia, y horno de almacenamiento, siendo el refractario del mismo tipo que el usado en el cubilote, exceptuando al antecrisol, ya que el tipo de refractario que se use dependerá de la función que el antecrisol tenga (almacenamiento de

metal o bien para tener metal caliente o para desulfurar).

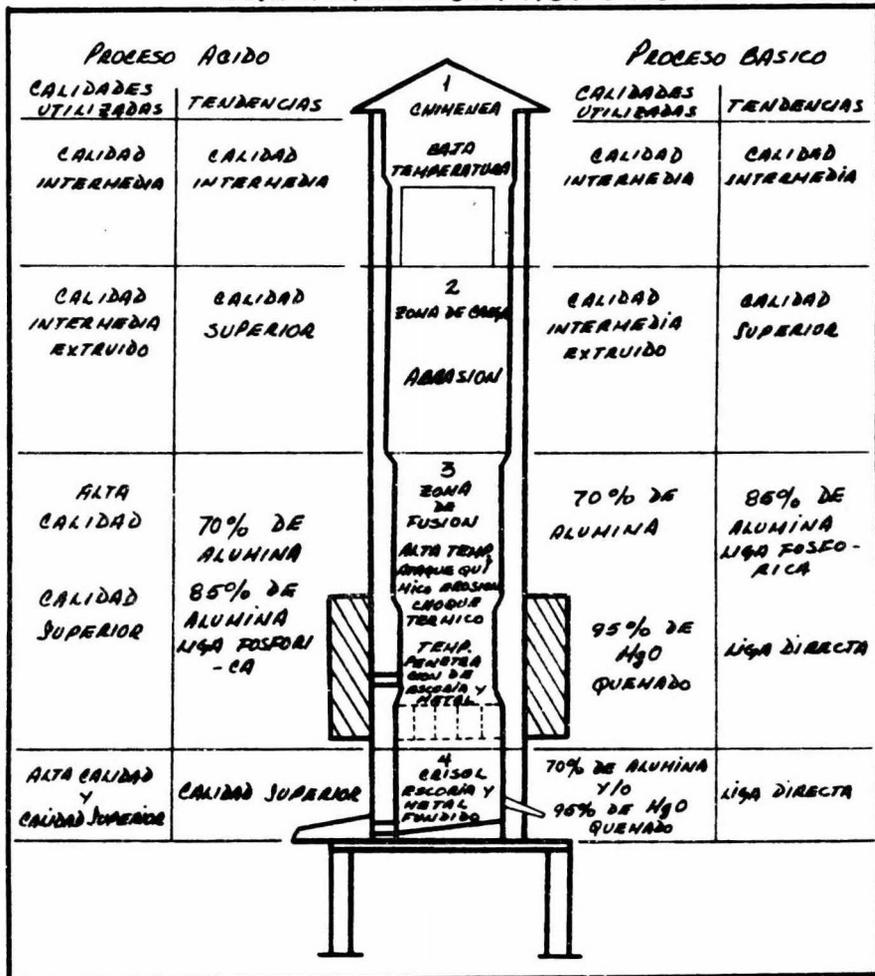
La clasificación de los refractarios en cuanto a sus características químicas, es como sigue: Ácidos, Básicos y Neutros.

En los ácidos están los refractarios de sílice, sílico aluminoso, de óxido y silicato de zirconio.

Los refractarios básicos se encuentran formados a base de magnesita y dolomita, (algunos consideran dentro de este grupo a los refractarios de cromo).

Los refractarios neutros, son los fabricados a base de: alto contenido de alúmina, cromo, carbón, carburo de silicio y mullita.

REVESTIMIENTO DE TRABAJO EN H. DE CUBILOTE



3-3 PROCESO DEL HORNO DEL CUBILOTE

Podemos definir a un H. de Cubilote como un Horno de torre vertical, diseñado para operar bajo el principio de transferencia de calor a contracorriente. El coque es el combustible cargado en el cubilote, cerca del final del mismo, junto con la carga metálica en una proporción predeterminada conocida como la relación hierro-coque.

El aire impulsado que proporciona el oxígeno para la combustión del coque, es introducido a través de las toberas dentro del cubilote hasta el extremo de la sección del ∇ , esto es, a una distancia colocada arriba de la base plana.

Las toberas están distribuidas alrededor de la periferia del Horno de Cubilote, y el calor es producido por el aire insuflado, combinándose el oxígeno con el coque (carbón). Los productos gaseosos resultantes de la combustión surgen a través del espacio que hay entre la cama de coque y la carga, intercambiando calor en el proceso. La uniformidad del coque y el tamaño apropiado de los materiales de carga, son necesarios para que exista un flujo uniforme de gases, requisito indispensable para una buena eficiencia de fusión.

Como sabemos, la carga metálica en un horno de cubilote va descendiendo hacia la zona de máxima temperatura y los materiales son calentados arriba de su punto de fusión. Entonces tenemos que ocurre el cambio del estado sólido al líquido y el metal fundido cae gota a gota a través de los espacios de la cama de coque y se va juntando en el fondo del cubilote. El espacio ocupado anteriormente por el coque y que ha sido consumido junto con el sólido metálico fundido, son repuestos otra vez con el descenso de materiales de carga y coque. Esto hace que el proceso en un horno de cubilote sea continuo.

La combustión en el horno de cubilote es fuertemente dinámica, debido al contraflujo de los reactantes (carbón en el coque y oxígeno en el aire soplado), y al continuo cambio en la calidad y cantidad del área de contacto de coque que está expuesto al aire.

Las propiedades físicas que debe tener el coque para una buena fusión en el cubilote deben ser tales que el coque sea duro, denso, de combustión lenta y suficiente fuerza para que permita una manipulación razonable.

El tamaño del coque es importante, así como la uniformidad en éste. Se ha encontrado que la forma ideal del coque es aquella que se acerca a la de una esfera. El tamaño del coque deberá ser una función del diámetro del cubilote (se considera adecuado de 10% a 12% del diámetro más pequeño del cubilote y de 6% para el diámetro más grande).

Las especificaciones termo-químicas del coque para tener una fusión adecuada son:

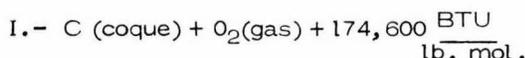
Contenido de carbón fijo: 92-94%

Materia volátil menor de: 0-50%

Azufre menor de: 0-60%

Contenido de cenizas: 5%

Las principales reacciones termo-químicas que ocurren entre el coque (carbón) y el oxígeno del aire son:

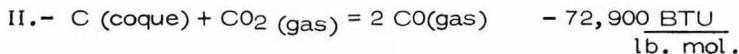


La relación de calor por libra de carbón es:

$$\frac{174,600 \text{ BTU}}{12 \text{ lbs.}} = 14,550 \text{ BTU.}$$

Esta cantidad de calor es desprendida cuando el carbón es oxidado a CO_2 . Esta es la reacción productora de calor del proceso. Aún a las temperaturas máximas que ocurran en el cubilote, la constante de equilibrio es tal que, en el equilibrio, la reacción es esencialmente completa en el sentido hacia la derecha. La reacción es muy rápida a las temperaturas que hay en el cubilote y sólo está controlada por la transferencia de la masa de oxígeno, contenida en el aire soplado o la superficie externa o aerodinámica del combustible.

La segunda reacción que ocurre es endotérmica, esto es, una reacción absorbente de calor:



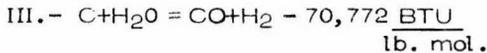
La relación de calor por libra de carbón es:

$$\frac{72,900}{12} = 6,075 \text{ BTU}$$

cuando una libra de carbón es consumida para reducir el CO_2 a CO . Como hemos dicho anteriormente ésta reacción es absorbente de calor y además extrae calor del cubilote. A las temperaturas existentes en la cama, la constante de equilibrio es tal que la reacción ocurre hacia la derecha; sin embargo, a temperaturas más bajas, la reacción se puede llevar a cabo en sentido contrario. Esta reacción depende de la temperatura y el mecanismo de la misma, la

cual cambia de la transferencia de masa a temperaturas arriba de unos 1480°C al control químico abajo de unos 1093°C. En la zona de transición entre 1093 y 1480°C el régimen es controlado probablemente por el régimen de difusión del reaccionante entrante, y producto salientes del sistema capilar del combustible.

La tercera reacción es entre el gas y el agua, la cual es una reacción absorbente de calor.



Esta reacción es importante en la operación del cubilote solamente en proporción a la cantidad de vapor de agua acarreado al cubilote por el aire soplado.

Antes de evaluar la combustión en el cubilote en un sentido práctico, es necesario conocer el volumen de aire requerido para oxidar una libra de carbón a CO_2 .

De la reacción I, nosotros conocemos que una lb. mol. de oxígeno reacciona con una lb. mol. de carbón produciéndonos una lb. mol. de CO_2 . De esto podemos calcular que una lb. mol. de oxígeno 32°F y 29.92 in Hg ocupa:

$$453.6 \frac{\text{gr}}{\text{lb}} \times 22.4 \frac{\text{lt}}{\text{gramo mol}} \times \frac{1}{28.32 \frac{\text{lt}}{\text{ft}^3}} = 358.6 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb. mol.}}$$

La desviación por aire también proporciona un volumen de 358.6 ft³. Del contenido de oxígeno del aire (21%) podemos ver que una lb. mol. de carbón reacciona con:

$$\frac{358.6 \text{ ft}^3}{0.21} = [170.6 \text{ ft}^3 \text{ de aire}] \quad 1704.6 = \frac{\text{ft}^3 \text{ aire}}{\text{lb mol O}_2} \quad \frac{\text{ft}^3 \text{ aire}}{\text{lb mol C}}$$

o bien una lb. de carbón oxidada a CO_2 requerirá: $\frac{358.6}{(12)(0.21)} = 142.3 \text{ ft}^3 \text{ de aire}$ a 32°F y 29.92 in Hg.

De lo anterior, podemos concluir que la combustión en el cubilote es medida por el grado de oxidación o por la relación $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$. Un exceso de oxígeno por unidad de carbón promoverá una alta liberación de calor, altas pérdidas de metal o de elementos debido a la oxidación, por el contrario, una cantidad insuficiente de oxígeno traerá como consecuencia bajas temperaturas, pero no promoverá altas pérdidas de metal o de elementos.

Cuando hay una baja relación hierro-coque, deberemos tener una mayor unidad de carbón por oxígeno disponible en el aire soplado. Esto deberá promover la formación de CO.

Un decremento de la cantidad de coque acompañando una carga metálica, o bien en esencia incrementando la proporción hierro-coque, proporcionará una menor unidad de carburo por oxígeno disponible en el aire soplado, esto deberá minimizar la formación de CO por el decremento de la cantidad de superficie disponible de carbón para reducir CO₂ a CO.

Si la relación $\frac{CO}{CO_2}$ es mayor de 1, se dice que hay una reducción. Si esta relación es menor de 1, la combustión se considera como oxidación. Sin embargo, hablando estrictamente, toda combustión en el cubilote sufre un cierto grado de oxidación.

De lo dicho hasta este momento, se puede deducir que la temperatura óptima de la combustión del cubilote no se consigue simplemente con un incremento del uso de coque.

ZONAS EN EL CUBILOTE

Las etapas de combustión en el cubilote dependerán de la zona que se trate. Los gases del cubilote, a diversos niveles, consisten principalmente de CO₂, CO, O₂ y N₂, con cantidades variables de H₂O y H₂, dependiendo de la humedad del aire soplado. El CO₂, O₂ y el vapor de H₂O, son gases oxidantes, mientras que el CO y el H₂ son gases reductores. El nitrógeno es un gas inerte, y su principal papel es el de ser un medio de transferencia de calor.

Es importante el controlar las reacciones que ocurren en las zonas más o menos definidas para obtener una operación satisfactoria y eficiente.

Las zonas son las siguientes:

Zona de Oxidación o de Combustión.

Zona de Reducción de la Cama.

Zona de Fusión.

Zona de Precalentamiento.

LA ZONA DE OXIDACION O DE COMBUSTION

Como su nombre lo indica, es alta en CO_2 de 14 al 18%, la principal reacción que se lleva a cabo es la combinación de oxígeno con combustible. La porción más elevada de la zona de oxidación es la zona de máxima temperatura con un máximo de CO_2 y un mínimo de O_2 .

Todas las reacciones en esta zona están controladas por el transporte de masa, por lo tanto son, independientes de la reactividad, combustibilidad, superficie interna, o habilidad de ignición del combustible y arriba de 1093°C es dependiente de la temperatura sólo ligeramente.

ZONA DE REDUCCION DE LA CAMA

Esta zona comienza donde el coque incandescente empieza a reducir al dióxido de carbono a monóxido de carbón (CO_2 a CO).

Esta reacción reductiva es dependiente de la temperatura como puede verse de las curvas de equilibrio para $\text{CO}-\text{CO}_2$. Como ocurre una reducción, la temperatura desciende y como consecuencia tendremos en la región más alta de esta zona una menor reducción.

Uno de los factores que más influyen sobre la profundidad de la zona de reducción de la cama, es el régimen de transferencia de calor entre los gases y el combustible en esta zona. La transferencia de calor es directamente proporcional a la superficie del combustible y al tiempo de contacto entre el gas y el combustible.

La relación metal/combustible es importante para la extracción de calor en el sobrecalentamiento del metal sobre su temperatura de fusión, siendo entonces esta relación un factor muy significativo en el descenso de la temperatura de la zona de reducción, y por lo tanto, en la disminución de la profundidad de esta zona en el cubilote.

La profundidad de esta zona dependerá de los siguientes factores:

- 1) El aumento en el tamaño del combustible aumentará la profundidad de la zona hasta un punto un tanto menor que la relación directa de los diámetros de los trazos.
- 2) La disminución de la superficie por trazo aumentará la profundidad de la zona.
- 3) El aumento en la superficie interna del combustible (aproximadamente una función de la reactividad) disminuirá la profundidad de la zona.

4) El aumento en la relación metal/combustible disminuirá la profundidad de la zona.

5) El aumento en el volumen de escoria disminuirá la profundidad de la zona.

6) El aumento en el régimen de soplado aumentará la profundidad de la zona, debido al aumento en el límite de baja temperatura de la zona, pero resultará en más metal a sobrecalentar y más pobre transferencia de calor, lo que, en parte, contrarrestará el aumento.

ZONA DE FUSION

Esta zona está definida como el punto donde la fusión tiene principio hasta el punto más bajo donde el metal sólido desciende en el montón. O sea, cuando el metal llega a esta zona deberá estar precalentado hasta una temperatura cerca de la temperatura de fusión. La reacción principal es el cambio de fase sólido a líquido (metal sólido a metal fundido). Esto extrae calor adicional, cuya cantidad exacta es función del calor de fusión del metal fundido (47 Kcal/kg para lingote de arrabio, 23 Kcal/Kg para hierro gris y 100 Kcal/Kg para pedacerfa de acero) y de la relación metal/combustible empleada. Es posible que exista en esta zona absorción de carbono por parte de los metales deficientes en este elemento.

La reacción es: $3 \text{Fe} + 2\text{CO} = \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$

ZONA DE PRECALENTAMIENTO

Esta zona se extiende desde el extremo de la carga al punto donde da principio la fusión. El diseño del cubilote, la temperatura del aire soplado, la proporción de aire, el material de carga y las técnicas de operación tienen efectos considerables sobre la relación y magnitud de esta zona en el cubilote.

La función principal de esta zona es la de servir como cambiador de calor en el que se recupera el calor sobrante por un cambio de calor directo entre los gases que viajan hacia arriba y las cargas que descienden junto con el combustible.

FACTORES FISICOS QUE EJERCEN INFLUENCIA SOBRE LAS ZONAS DEL CUBILOTE.

Penetración del Aire Soplado.

Precalentamiento del Aire de Soplado.

Soplado Equilibrado.

Resistencia de la Cama de Combustible.

Efecto de las Paredes.

1) PENETRACION DEL AIRE DE SOPLADO

La distribución del aire soplado es muy crítica, tanto para la combustión del cubilote, como para una buena operación del mismo. La combustión de carbón con el oxígeno del aire es casi una reacción instantánea a la temperatura existente en la cama de coque de un cubilote en operación.

La alta relación de reacción del oxígeno y el carbón sobre la superficie del coque, reduce la concentración de oxígeno. Oxígeno adicional está disponible por difusión a través de una película protectora alrededor del coque. El espesor de esta película decrece con un incremento en la velocidad del gas que pasa por el coque. Es conocido que la proporción de todas las reacciones químicas se incrementa aumentando la temperatura de los reactivos. De esto podemos concluir que incrementando la temperatura del aire soplado obtenemos una mayor velocidad en el desgaste de la superficie del coque. Un aumento de la velocidad en las toberas es deseable para la efectiva penetración del aire soplado para promover la combustión del coque en el centro del cubilote, tan bajo como sea posible en la cama de coque.

2) PRECALENTAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO

El precalentamiento del aire de soplado, aumenta la temperatura de la zona de oxidación en proporción directa al calor sensible abastecido en el aire, mientras que al mismo tiempo decrece ligeramente la profundidad de esta zona.

El efecto general del precalentamiento del aire de soplado, resulta en un mayor volumen de la porción del fondo de la cama, estando a una temperatura más alta y constituyendo una mínima parte de este volumen una atmósfera oxidante.

3) SOPLADO EQUILIBRADO

Esto es necesario, debido a que la cantidad de CO adyacente a las toberas no es, probablemente, suficiente para consumir todo el oxígeno antes de que reaccione con el combustible sólido.

4) RESISTENCIA DE LA CAMA DE COMBUSTIBLE

Este es un factor importante en la operación del cubilote. El tratar de operar el cubilote a capacidades apreciablemente más altas que las diseñadas, o a usar combustible de menor tamaño y de calidad pobre, que se despedazan apreciablemente debido al choque térmico o al mecánico, producen una mayor resistencia de la cama de combustible, causando problemas de presión.

5) EFEECTO DE LAS PAREDES

Debido a la relación entre el tamaño del combustible y el contorno de la pared del cubilote, el combustible cercano a las paredes no puede apretarse de una manera normal, y el volumen de espacios vacíos en esta región de la periferia es, por lo tanto, mayor que en el cuerpo principal del cubilote. Este aumento en volumen vacío causa una menor resistencia al flujo del gas y, por tanto, una tendencia de los gases a canalizarse.

El "Factor de efecto de las Paredes" es una función de la relación del diámetro promedio de los trozos al diámetro del recipiente.

PERDIDAS DEL METAL

Estas están en función de la atmósfera oxidante a que se expone el metal, y el medio de control de las pérdidas del metal se encuentra en la zona de combustión.

PERDIDAS DE ELEMENTOS TALES COMO HIERRO, SILICE Y MANGANESO

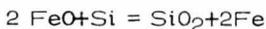
También están relacionados al potencial de oxidación de la atmósfera a la cual el metal fundido es expuesto. Porque de esto, la etapa de combustión es un medio efectivo para relacionar las pérdidas por oxidación de Si, Mn, Fe, etc., al contenido de CO_2 en los gases del cubilote.

Un control efectivo de estas pérdidas frecuentemente está relacionado con la cantidad de coque y con los tipos de materiales cargados. Una mayor eficiencia de combustión como una medida para el incremento de CO_2 es acompañada por pérdidas mayores de Si y Mn que las normales. Aquí cabe mencionar que para este aspecto, la economía total dependerá sobre el costo del coque residual (o no gastado) comparado con el costo del elemento perdido, o sea:

Incremento del costo de coque U.S. reducción de costos de pérdidas de elementos.

El silicio fácilmente se combina con el oxígeno y esto trae como consecuencia que una pequeña cantidad de silicio se pierda debido a que éste reduce

al FeO que se forma en el proceso de fusión.



Cuando los volúmenes de aire soplado y las presiones varían considerablemente, el agua de enfriamiento de la zona de fusión en el refractario, sube y baja. Esto promueve un alto contenido de FeO en la escoria y consecuentemente altas pérdidas de silicio. También el material cargado con considerables cantidades de óxidos, contribuye a las pérdidas de silicio.

El silicio elemental puede reducirse del estado SiO_2 a altas temperaturas y en presencia de un agente reductor.



El cambio en silicio ocurrido en el proceso de fusión, se puede considerar como la diferencia en las reacciones de oxidación y reducción que involucran silicio. Las pérdidas en manganeso son el resultado de la combinación directa con oxígeno. Teóricamente, el manganeso elemental puede ser reducido desde MnO , sin embargo, la cantidad de MnO en la escoria, es pequeña y esta raramente se incrementa.

RESUMEN DEL CONTROL DE SILICIO

Las pérdidas de silicio se deben a:

Coque insuficiente de lo que resulta una baja cama de coque.

Retorno altamente oxidado.

Acero con 1/16" de espesor con área de superficie grande.

Un incremento en la proporción de aire promueve un aumento de agua de enfriamiento en la zona de fusión.

Una humedad alta sin la compensación de coque.

Debido a un tamaño muy grande del canal que conduce el aire soplado o a una pobre distribución del material de carga.

Un nivel bajo en la altura de la carga ocasionando una pérdida en la presión a una relación constante de aire.

Baja temperatura del metal.

Exceso de CaO para formar CaO-SiO_2 .

La variación de silicio en el metal fundido frecuentemente se debe a una variación en el contenido de silicio de los materiales de carga y a la variación en peso de los mismos, así como a la variación en peso de silicio en la aleación.

Con la práctica en el horno de cubilote, se ha visto que las pérdidas de silicio son de 10% y las de manganeso de 20%.

CONTROL DE CARBON

Está relacionada a la combustión en el cubilote, debido a que es dependiente del combustible (coque) como una fuente de carbón.

Se ha llegado a establecer que el contenido de carbón en la fusión del cubilote depende de:

- a) Condiciones en el cubilote.
- b) Composición del metal de carga.
- c) Características del coque.

Cada una de estas condiciones se pueden dividir en los siguientes factores:

a) CONDICIONES EN EL CUBILOTE

Temperatura del hierro.

Temperatura del aire soplado, temperatura de combustión.

Tiempo de contacto de la relación de fusión entre el hierro y la altura de la cama de coque.

Química de la escoria.

b) COMPOSICION DEL METAL DE CARGA

Tipo de hierro que está siendo fundido.

Contenido de carbón del hierro.

Clase y cantidad de otros constituyentes en el hierro, tales como silicio, manganeso, azufre, etc.

c) CARACTERISTICAS DEL COQUE

Contenido de carbón del coque.

Contenido de cenizas del coque.

Reactividad del coque.

Firmeza del coque.

La cantidad de carbón absorbida por el hierro es fuertemente dependiente de la temperatura de fusión; a mayor temperatura, la cantidad de carbón disuelta en el hierro es mayor. La temperatura obtenida por el hierro en el cubilote es afectada por las condiciones de la cama, las características del coque, mezcla en el aire de soplado, temperatura del aire, diseño del horno, etc.

Las propiedades físicas más que las propiedades químicas del coque son las que nos explican la alta temperatura desarrollada, así como el alto carbón absorbido. La baja reactividad en el coque es necesaria para lograr la alta temperatura.

El coque que tiene la habilidad de proporcionar la alta absorción de carbón tiene baja reactividad. El carbón absorbido desde el coque está relacionado al contenido de cenizas. Las cenizas sobre la superficie del coque proporcionan un buen contacto de carbón a hierro fundido y resulta una menor absorción de carbón. Este contacto es una función de la química de la escoria. La fundición de coque deberá ser lo más bajo posible en cenizas y también estas cenizas deberán tener una temperatura de fusión baja.

CARGA DE MATERIAL EN EL CUBILOTE

Ya que la transferencia de calor en el cubilote es una función del tiempo, temperatura y densidad, hay un tamaño óptimo, densidad y un área de superficie para el material de carga en el cubilote. Un material con sección delgada requiere menor calor para elevar el punto de fusión a uno mayor que el deseado, lo que trae como consecuencia una temperatura del metal baja.

Contrariamente un material con secciones gruesas y alta densidad con un mínimo de área de superficie desciende hasta la cama de coque donde la oxidación excesiva puede ocurrir, y la absorción de carbón por el metal será mínima.

Los tipos de productos que se pueden fabricar en un horno de cubilote varían en el contenido químico, dependiendo del material de carga, así como de otros factores. La cantidad de cada uno se determina por la especificación

química del producto y los cambios en la cantidad de los elementos que ocurren en el proceso de fusión; la calidad y cantidad del material de carga es muy importante para obtener una buena calidad en el metal fundido. Así como el peso deseado del material de carga y de las ferroaleaciones es también crítico para obtener una buena calidad del producto.

El espesor de los materiales cargados en el horno deberán estar limitados por el tamaño de sección máxima de la pieza producida. Un excesivo espesor y una alta densidad del material necesitará una cantidad considerable de calor para completar la fusión, y esto para operaciones normales en la práctica no se cuenta con el tiempo suficiente para absorber este calor. El metal desciende hasta los puntos más bajos en el horno, de tal manera, que puede ser visto enfrente de las toberas. Cuando esto pasa, el oxígeno en el aire soplado desgasta la superficie del metal y el hierro es altamente oxidado. Cuando esto ocurre, el metal en crisol del horno es "Chilled" y la temperatura baja. El control del carbón es difícil porque la absorción del carbón por el metal se incrementa con la temperatura. También, una mayor cantidad de metal sólido desciende en el horno así como la cantidad mínima de coque disponible para la fusión del metal.

CONTROL DEL PROCESO

Una vez conociendo qué hacer y cuándo hacerlo para tener una operación eficiente y continua en el cubilote.

Los valores de las pruebas "Chill" y de cuña son de gran ayuda para controlar la calidad del hierro fundido. Sin embargo, la interpretación de la información proporcionada por la prueba de "Chill" requiere conocimientos y experiencia. Un control real de la calidad es prácticamente imposible debido a que no se tiene un buen programa para realizar esta prueba (Chill). El uso de la prueba de "Chill" da al operador un medio para detectar los cambios en las condiciones del metal, el cual refleja cambios en la ejecución del horno. Estos cambios están casi siempre asociados con la combustión.

Una prueba de "Chill" se hace vaciando una pequeña cantidad de metal en un diseño apropiado para esta prueba en la cual vamos a tener 3 partes: una parte de hierro blanco con un enfriamiento rápido, hierro gris con un enfriamiento más lento y una parte intermedia entre estas dos de un hierro de apariencia moteada.

La prueba de "Chill" nos establece un método rápido de integración de los efectos combinados de carbón y silicio; por ejemplo, hierros con alta cantidad de silicio y carbón con una sección muy delgada, nos indica que son hierros suaves, por otro lado, el tener el metal con secciones gruesas, corresponde a hierros más duros. Sin embargo, la prueba "Chill" no es un sustituto para los análisis químicos.

Aunque la cantidad de "Chill" en la pieza probada es la parte más fácilmente medible, la porción gris de la fractura también da una indicación de las propiedades del metal y en muchos casos es completamente importante, ya que un alto contenido de carbón en el hierro, desarrolla una estructura de grano oscura y burda con una fractura (opaca), en tanto que un hierro con un contenido bajo de carbón desarrolla una estructura de grano cerrada y luminosa.

La porción de "Chill" de la pieza de prueba refleja primeramente la tendencia a la formación de carburos así como la estabilidad de los carburos en el hierro.

Un incremento en la profundidad de la porción de "Chill" se obtiene haciendo la fusión bajo condiciones más oxidantes por el sobrecalentamiento del hierro, disminución de silicio y de carbón.

Cualquier desviación en apariencia de la profundidad estandar de "Chill" indica un cambio en el hierro. Este cambio en el "Chill" se puede deber a un cambio en la composición química, o bien a efectos sobre la composición química por la influencia de la oxidación durante la fusión, un contenido de mezcla alto en el aire soplado o a un cambio en la temperatura de fusión. Otro medio importante de control del "Chill" y de la distribución de grafito, es la adición de inoculantes en la cuchara u olla de vaciado. Los inoculantes más comunes llamados grafitizantes son: grafito y los diversos grados de Fe-Si conteniendo diversas cantidades de calcio y aluminio.

Otro tipo de inoculantes conteniendo carburos estabilizadores son elementos tales como cromo, manganeso y zirconio y se les llama estabilizadores.

A continuación se hace la discusión de una serie de ilustraciones, que se presentan al final del capítulo.

La Figura 1 muestra un balance de calor simplificado para un cubilote estandar y se relaciona a la operación normal del cubilote.

El Calor latente en el gas se muestra como un 35%. Este calor es proporcional al análisis de los gases, esto es, el calor latente es proporcional al CO y a otros gases de combustión.

El Calor sensible en los gases es aproximadamente 12.5%. Esto está en relación directa a la temperatura de los gases. Si la combustión de los gases está tomando lugar en el comienzo de la carga, el calor latente deberá ser reducido en proporción al incremento del calor sensible.

Las pérdidas de calor a través del revestimiento y de la coraza, son aproximadamente de 7.5%. Estas pérdidas están en función de la calidad y espesor del refractario.

El contenido de calor de la escoria es de 2.5%. Esta cantidad varía dependiendo de la basicidad de la escoria.

El contenido de calor del hierro es de 42.5%. Está directamente relacionado a la temperatura. Si tenemos una eficiencia reducida aunque incrementemos la temperatura, el resultado será un menor porcentaje de calor absorbido por el hierro.

La Figura 2 muestra la sección vertical a través de la cama de coque simulando una operación del cubilote.

La Figura 3 es una ilustración de la vista superior de la cama de coque (después de que ésta ha sido cargada).

La Figura 4 es un diagrama de equilibrio de CO_2 a CO . Donde se aprecia que esta reacción depende de la temperatura. Se aprecia que el CO_2 está a un 21% y como la temperatura se empieza a incrementar levemente a más de 800°F, el CO_2 es reducido por el carbón en el coque y esto continúa en una proporción acelerada hasta aproximadamente 1200°F donde la reacción empieza a disminuir gradualmente. El contenido de CO se incrementa al irse agotando el CO_2 . Este diagrama de equilibrio es muy útil para entender la combustión en el cubilote.

La Figura 5 se refiere a una familia de curvas que ilustran la temperatura relativa de combustión en las diversas etapas de combustión y el grado de temperatura del aire caliente.

La Figura 6 Es una tabla que nos da los requerimientos de aire para la combustión de carbón y la relativa eficiencia de combustión.

La Figura 7 se muestra una boquilla con su proporción teórica, para que proporcione una mayor velocidad del aire, cuando se opera con una relación baja de aire.

La Figura 8 En esta figura encontramos la tendencia hoy en día de precalentar el aire de soplado. Nosotros sabemos que incrementando la temperatura de los reactantes se incrementa la proporción de la reacción. Por ejemplo, podemos ver en la gráfica que calentando el aire a 1400°F, se incrementa la temperatura del metal, así como el silicio y el carbón, en tanto que el Azufre disminuye, debido a la composición de la escoria moviéndose en la dirección básica en virtud de que está siendo formado menos SiO_2 .

La relación CO_2/CO también disminuye debido a las altas temperaturas de combustión, esto lo podemos apreciar con la Figura 4.

Figura 9 Muestra la relación entre la composición química de la escoria, temperatura del metal, y el efecto resultante de contenido de silicio.

Figura 10 Nos muestra la relación de pérdidas de Manganeso y Silicio con el óxido de hierro contenido en la escoria.

Figura 11 Nos presenta la relación carbón y azufre en el metal con la temperatura.

Figura 12 Pertenece a la calidad de coque y carbón en el hierro. La absorción de carbón por el metal disminuye si se aumenta el porcentaje de cenizas en el coque. La mayor absorción de carbón por el hierro es favorecida mediante un tiempo de permanencia grande con el coque.

Figura 13 Nos muestra la apariencia que presenta la fractura de una escoria de un Horno de Cubilote. El lustre de la fractura se indica como opaco para una escoria básica con 24-30% de SiO_2 y un lustre vidrioso con contenido de SiO_2 de 48-55%. El calor de la superficie antes de la fractura es gris oscuro sobre el lado básico y verdoso a negro brillante sobre el lado ácido. Una escoria básica deberá tener un contenido bajo de óxido de hierro.

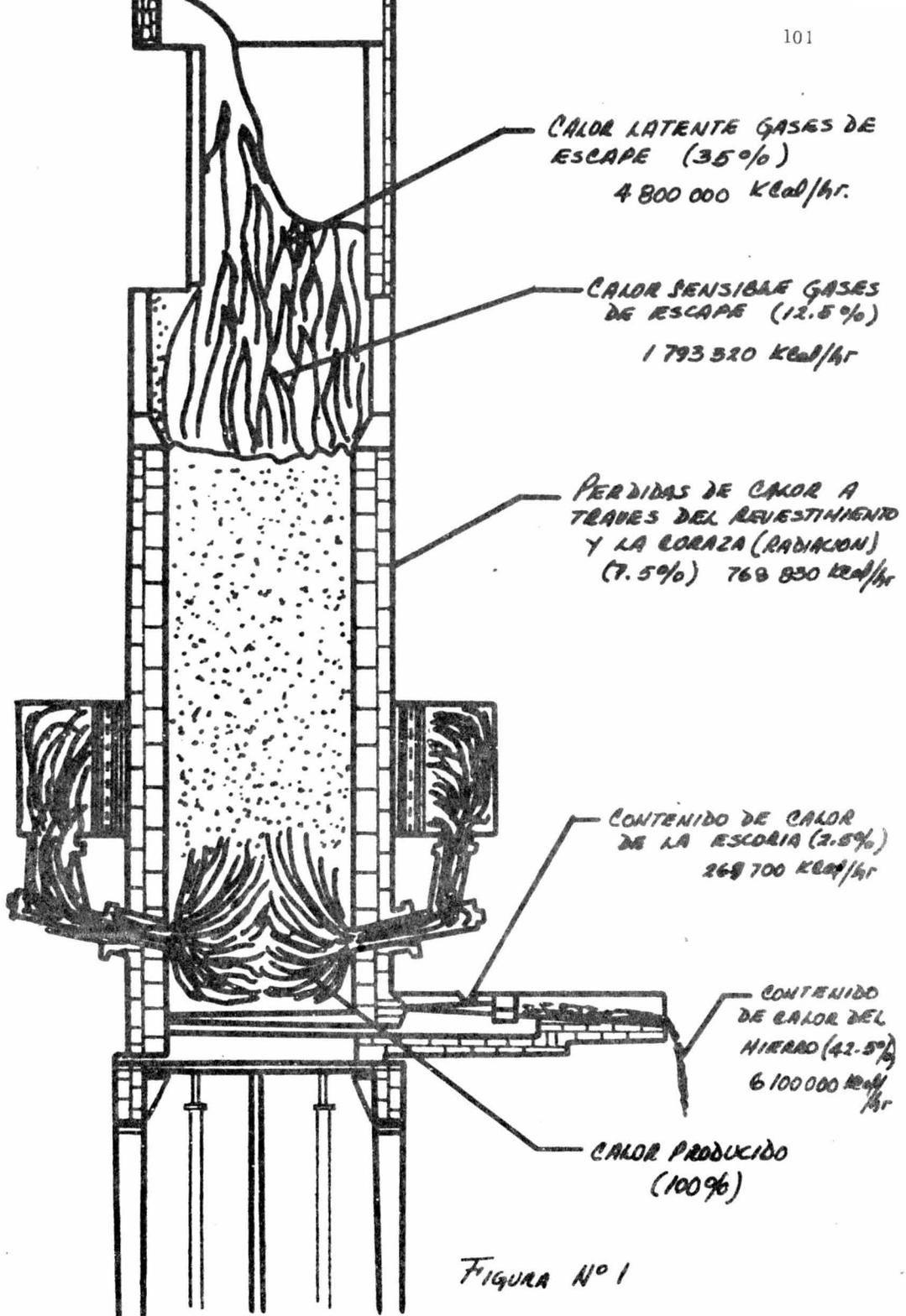
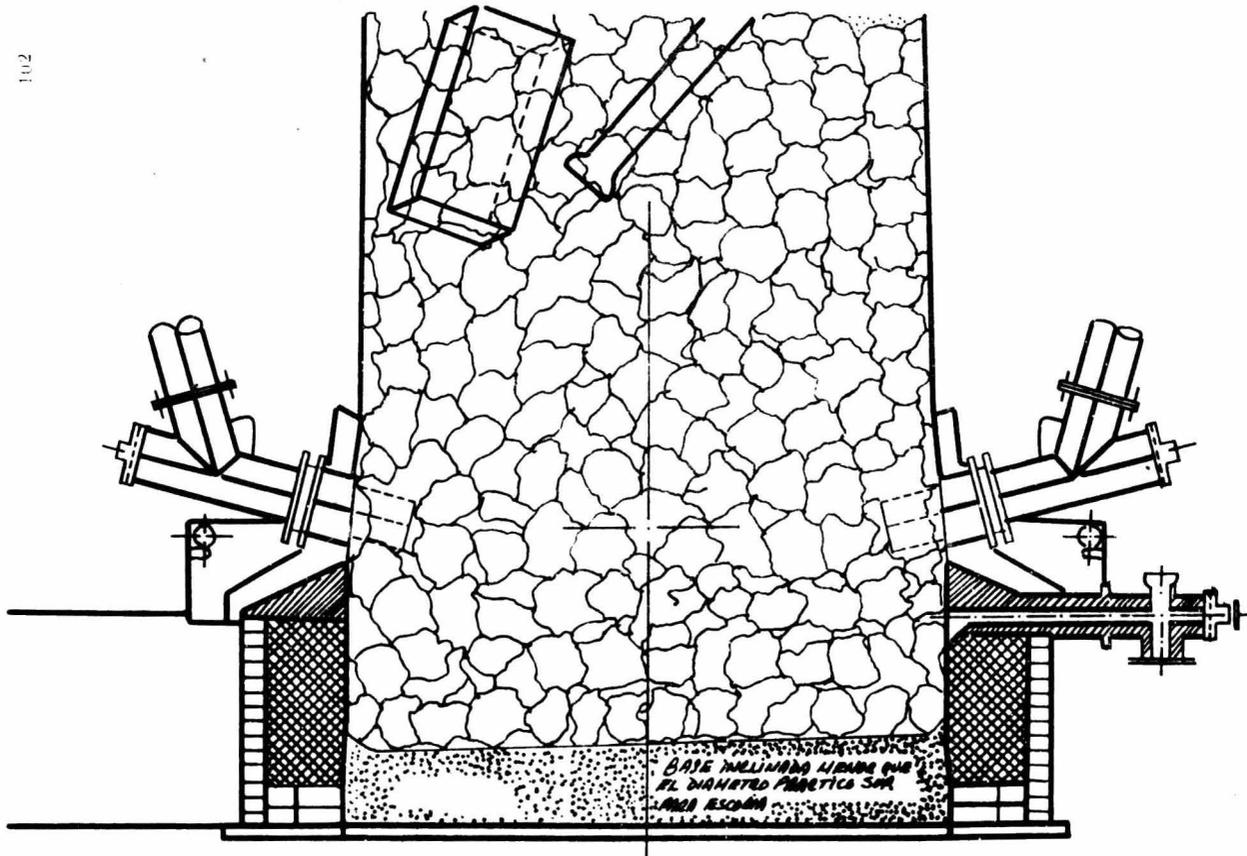


FIGURA N° 1



SECCION VERTICAL A TRAVES DE LA CAMA DE COQUE

FIGURA N° 2

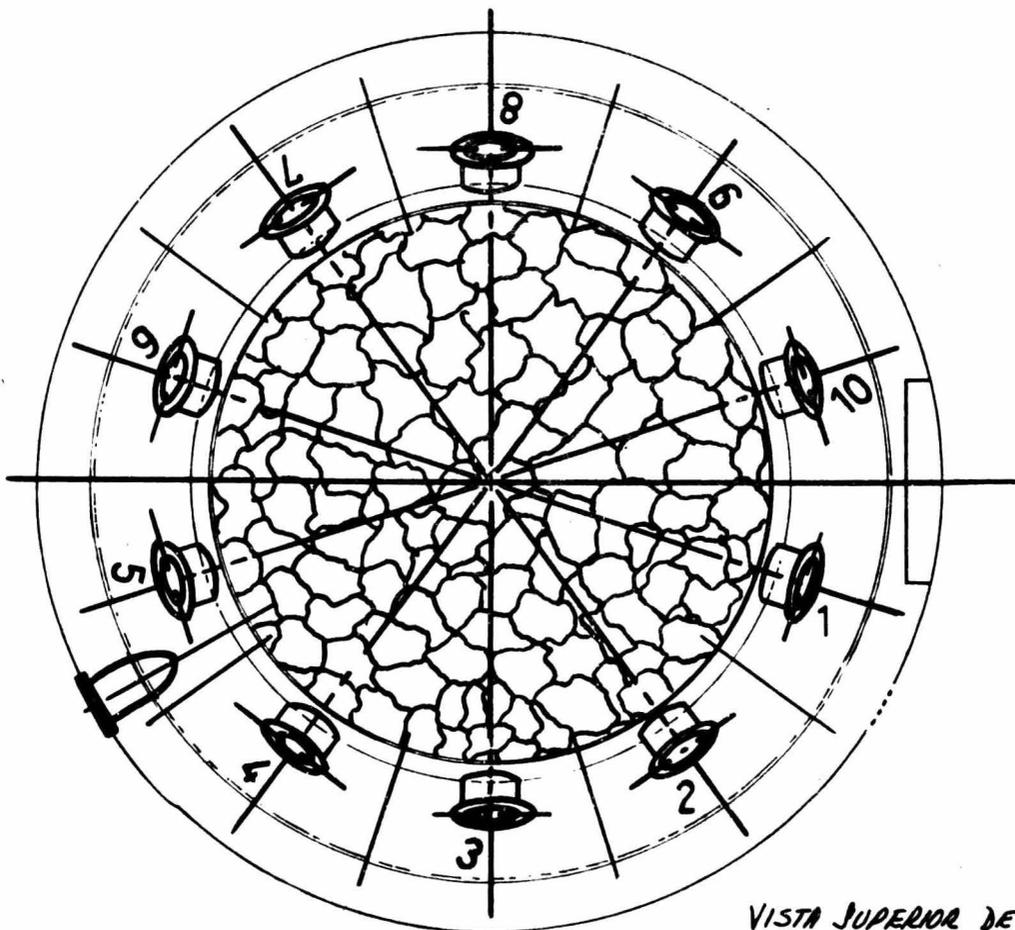
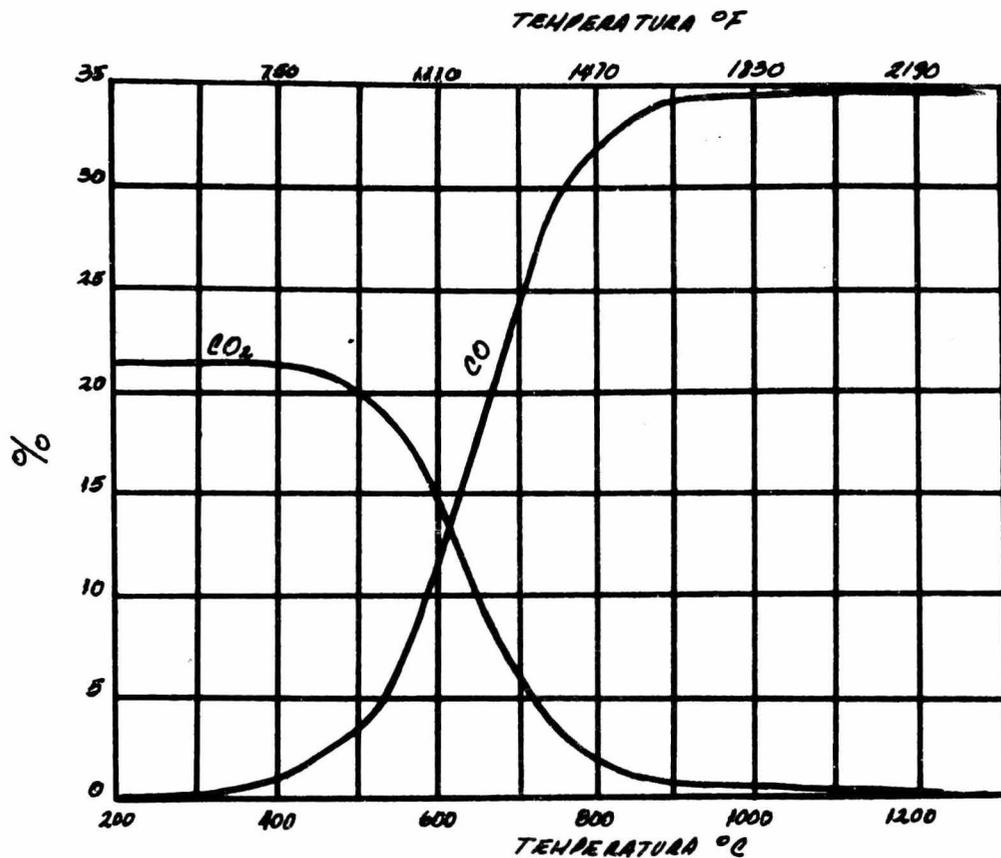


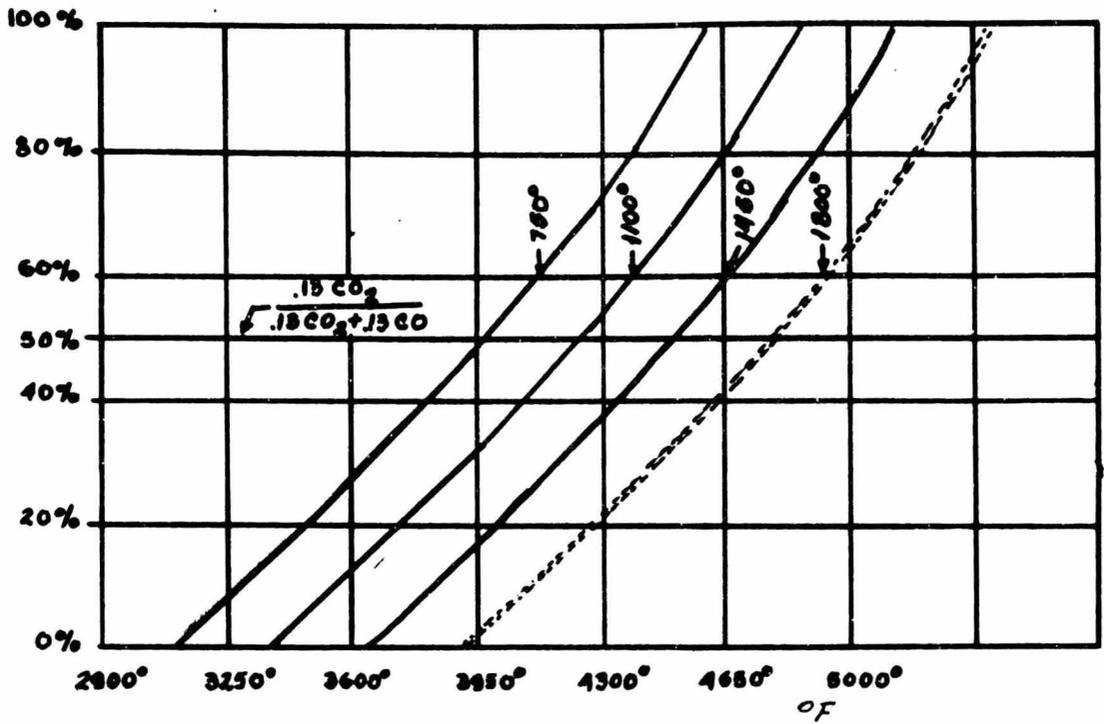
FIGURA N° 3

VISTA SUPERIOR DE LA
CAÑA DE COKE



AUMENTO EN LA REDUCCION DE CO₂ AL INCREMENTAR
LA TEMPERATURA

FIGURA N° 4



TEMPERATURA TEORICA DE COMBUSTION CON DIVERSAS ETAPAS DE COMBUSTION

FIGURA N° 5

REQUERIMIENTOS DE AIRE PARA LA COMBUSTION DE CARBON

Effluent Gases			Fraction of 1 lb Carbon Burned to		Air Requirements, lb per 1 lb Carbon			Gases Produced, lb per lb Carbon				Heat Developed, Btu per lb Carbon			Efficiency of Combustion, %	lb/lb C	cu ft/lb C	cu ft per ton Iron 90% Coke 10:1 Ratio	54 in. Copied M. R. 12 hr. cu ft/min	
CO ₂ %	CO %	N ₂ %	A CO ₂	B CO	O ₂	N ₂	Air	CO ₂	CO	N ₂	Total	CO ₂	CO	Total					thea	4.5%
0	34.7	65.3	0.000	1.000	1.33	4.41	5.77	0.09	2.53	4.14	6.77	600	4350	4750	29.9	5.77	75.4	15000	2120	2800
1	33.0	66.0	0.029	0.971	1.37	4.57	5.94	0.11	2.26	4.57	6.91	422	4274	4696	31.9	5.94	77.7	14800	2310	2700
2	31.4	66.6	0.050	0.950	1.41	4.70	6.11	0.22	2.19	4.70	7.11	675	4090	4762	34.1	6.11	79.9	14400	2890	3000
3	29.7	67.3	0.092	0.908	1.45	4.85	6.30	0.34	2.11	4.85	7.50	1538	3950	5288	36.3	6.30	82.1	14000	2960	3110
4	28.1	67.9	0.125	0.875	1.50	4.99	6.49	0.46	2.04	4.99	7.49	1819	3806	5625	38.6	6.49	84.8	13500	3090	3200
5	26.1	68.6	0.150	0.850	1.51	5.14	6.68	0.58	1.96	5.14	7.69	2711	3658	6022	41.1	6.68	87.1	13000	3100	3200
6	24.7	69.3	0.195	0.805	1.59	5.30	6.89	0.71	1.88	5.30	7.89	2837	3502	6379	43.5	6.89	90.0	12500	3210	3400
7	23.1	69.9	0.232	0.768	1.64	5.47	7.11	0.85	1.79	5.47	8.11	3376	3310	6716	46.2	7.11	92.9	12000	3240	3500
8	21.5	70.5	0.271	0.729	1.69	5.64	7.33	0.99	1.70	5.64	8.33	3913	3141	7114	48.8	7.33	95.8	11500	3110	3600
9	19.8	71.2	0.312	0.688	1.75	5.82	7.57	1.15	1.60	5.82	8.57	4540	2995	7533	51.7	7.57	99.0	11000	3560	3600
10	18.2	71.8	0.354	0.646	1.80	6.01	7.81	1.30	1.51	6.01	8.82	5151	2840	7941	54.7	7.81	102.1	10500	3690	3700
11	16.5	72.5	0.400	0.600	1.82	6.21	8.08	1.47	1.40	6.21	9.08	5820	2640	8451	57.6	8.08	105.6	10000	3800	4000
12	14.8	73.2	0.447	0.553	1.93	6.42	8.35	1.64	1.29	6.42	9.35	6504	2466	8910	61.2	8.35	109.1	9500	3910	4100
13	13.2	73.8	0.496	0.504	1.99	6.64	8.63	1.82	1.17	6.64	9.63	7212	2302	9402	64.7	8.63	112.8	9000	4060	4200
14	11.6	74.4	0.547	0.453	2.07	6.86	8.93	2.01	1.06	6.86	9.93	7959	1971	9950	68.3	8.93	116.8	8500	4200	4300
15	9.9	75.1	0.602	0.398	2.13	7.11	9.24	2.21	0.92	7.11	10.24	8759	1731	10490	72.1	9.24	120.8	8000	4360	4400
16	8.3	75.7	0.658	0.342	2.21	7.35	9.57	2.42	0.80	7.35	10.57	9576	1488	11064	76.0	9.57	125.1	7500	4520	4500
17	6.6	76.4	0.729	0.271	2.29	7.61	9.92	2.61	0.65	7.61	10.92	10426	1213	11693	80.1	9.92	129.7	7000	4690	4600
18	5.0	77.0	0.783	0.217	2.38	7.91	10.29	2.87	0.51	7.91	11.29	11303	944	12337	84.8	10.29	134.5	6500	4870	4700
19	3.3	77.7	0.852	0.148	2.47	8.21	10.68	3.13	0.34	8.21	11.68	12197	644	13011	89.6	10.62	141.2	6000	5070	4800
20	1.7	78.3	0.922	0.078	2.57	8.52	11.09	3.39	0.18	8.52	12.09	13110	339	13710	94.5	11.09	145.0	5500	5210	4900
21	0.0	79.0	1.000	0.000	2.67	8.87	11.51	3.67	0.00	8.87	12.51	14150	0.00	14550	100.0	11.51	151.0	5000	5400	5000

FIGURA 6.

PARA "D=8"

d	b	R	L
5	6½	1½	12
5½	6¾	1¼	10
6	7	1	8

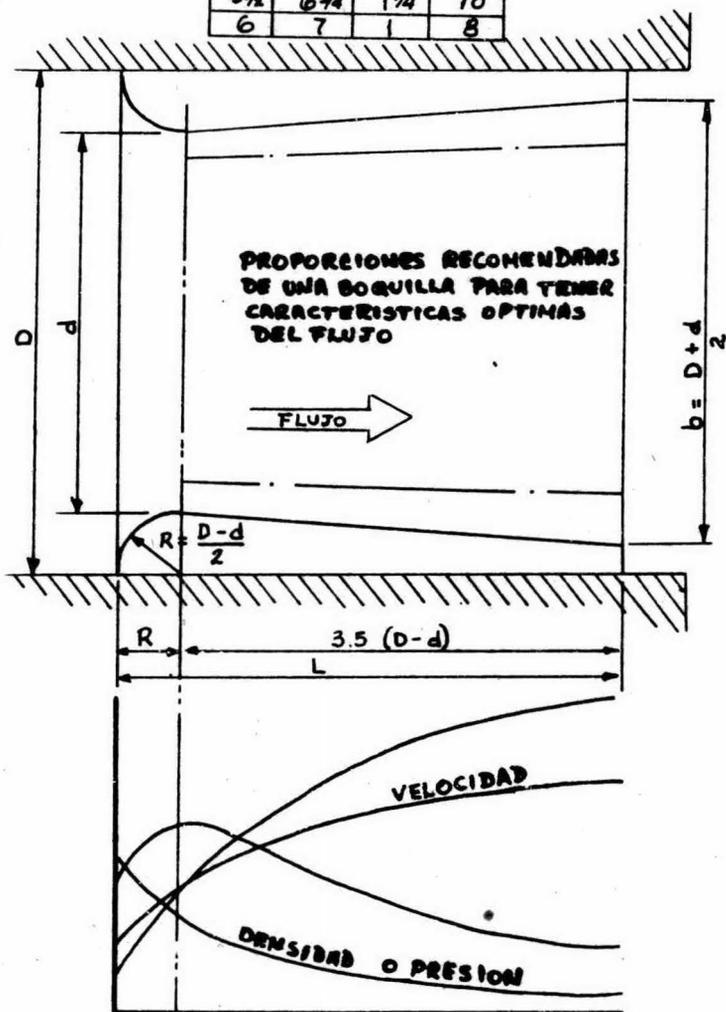
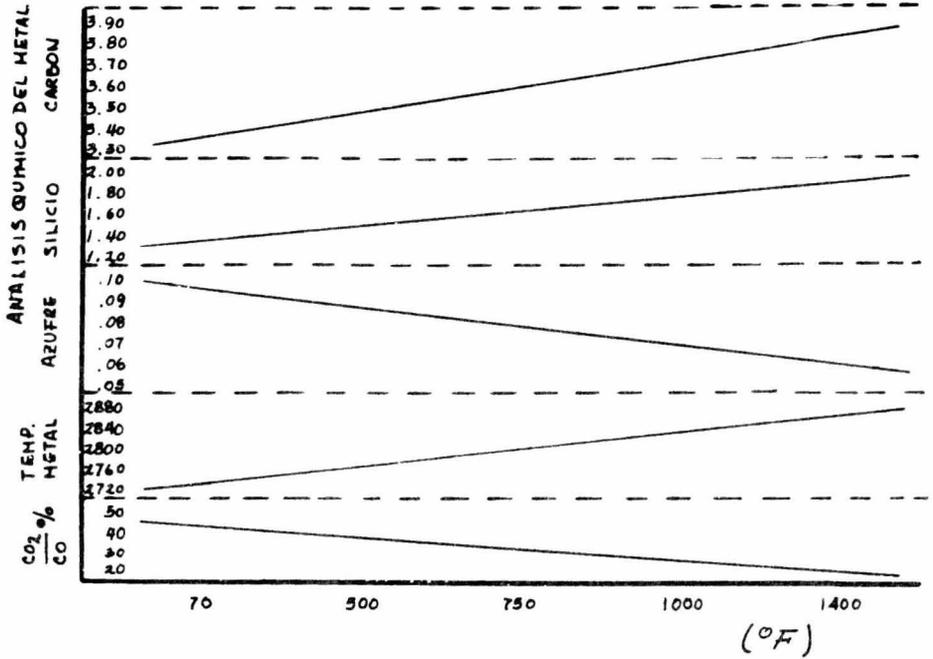
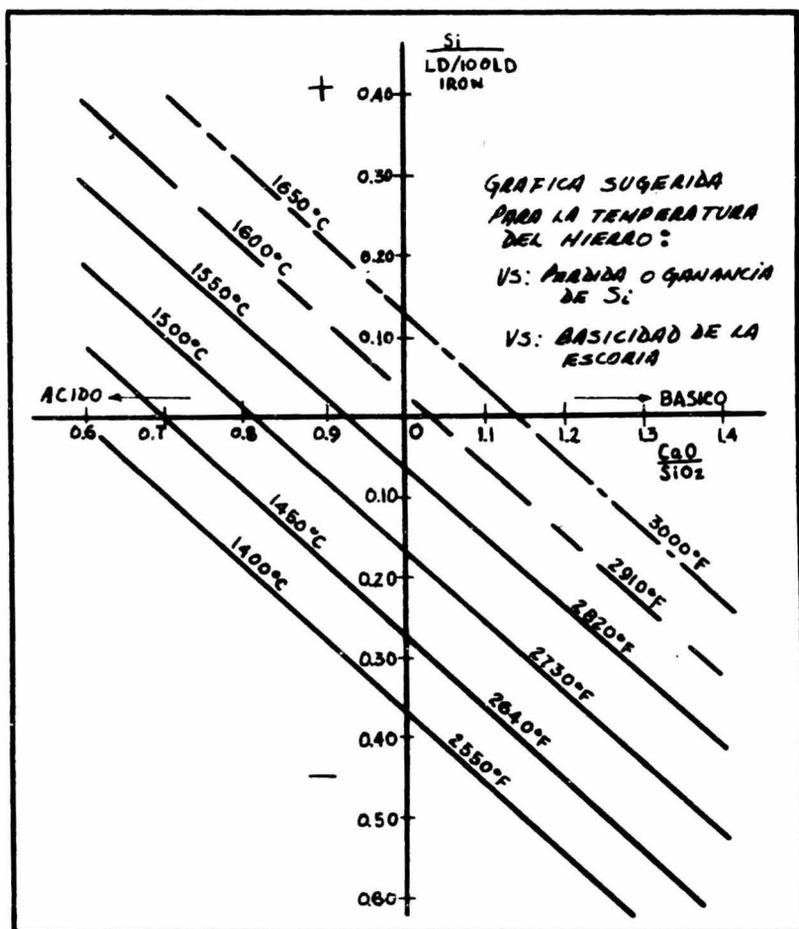


FIGURA N° 7



EFECTO QUE SE OBTIENE EN LA OPERACION
DE UN CUBILOTE AL INCREMENTAR LA
TEMPERATURA DEL AIRE DE
SOPLADO.

FIGURA N° 8



RELACION ENTRE EL CONTENIDO QUIMICO DE SILICIO EN LA ESCORIA
Y LA TEMPERATURA.

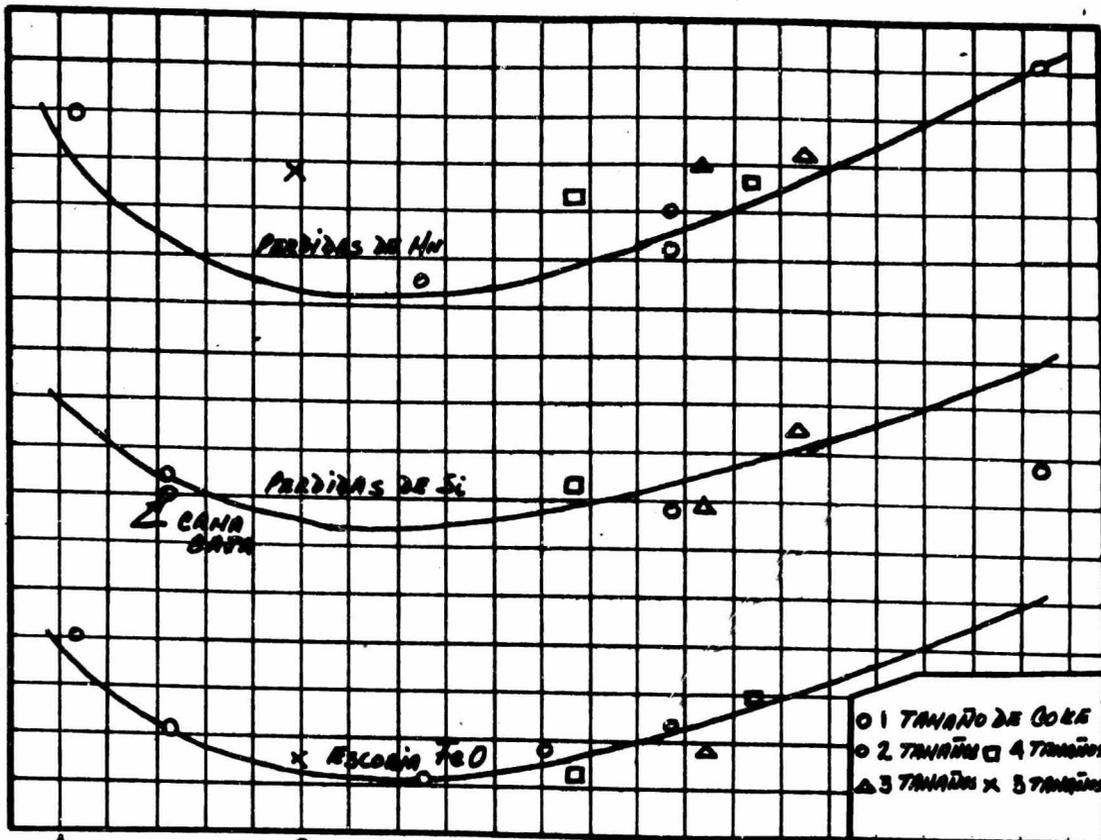
FIGURA N° 9

Escoria FeO%

Perdidas de Mn %

Perdidas de Si %

Escoria FeO %



.05

.10

PORCENTAJE DEL TAMAÑO DE CORE (PULGADAS)

RELACION DEL TAMAÑO DE CORE AL DIAMETRO DEL CUBIOTE

FIGURA Nº 10

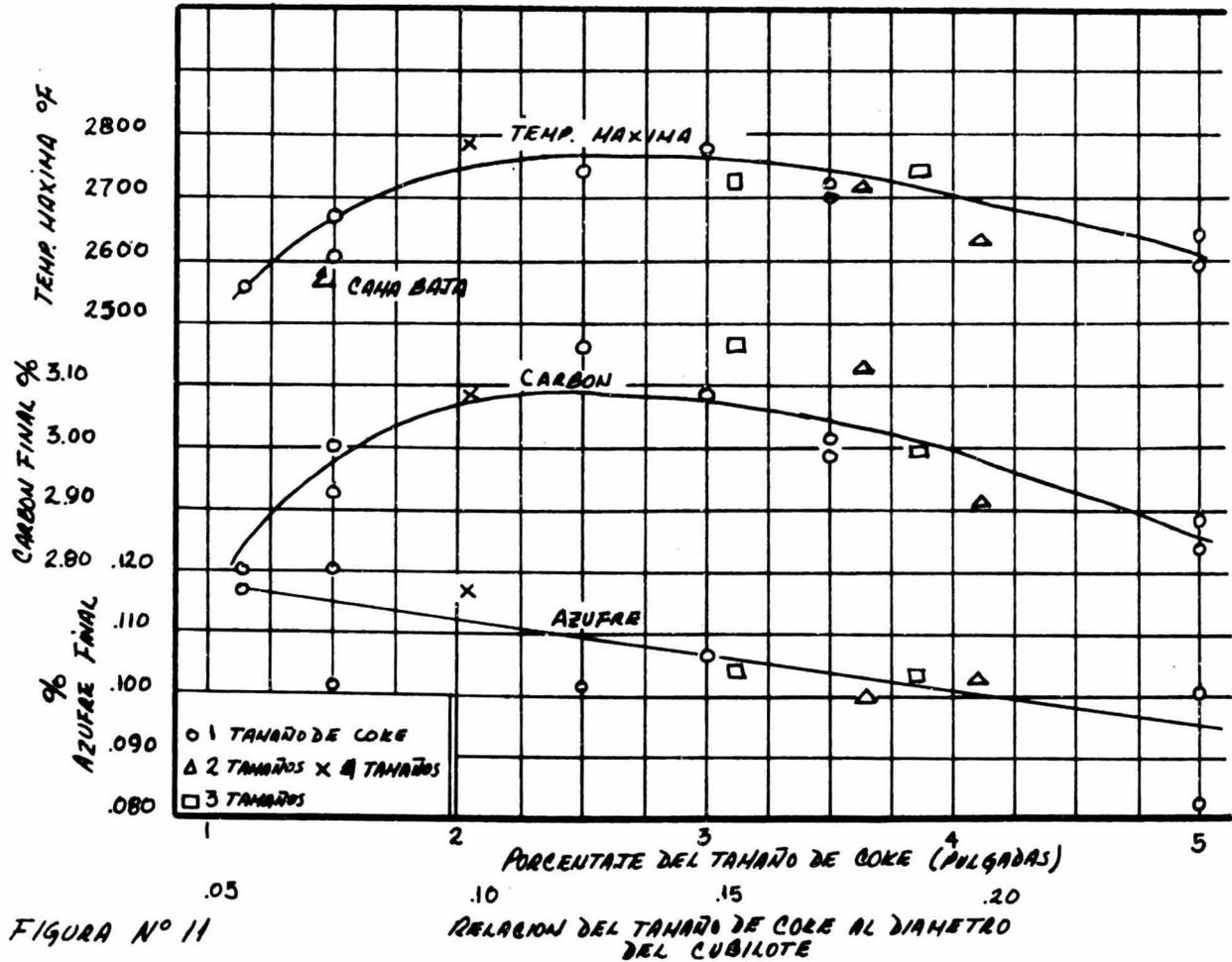
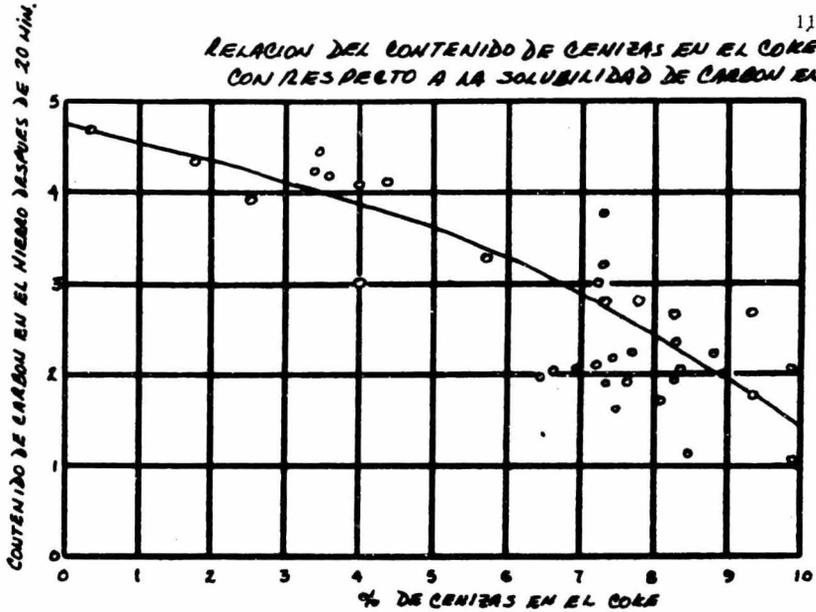


FIGURA N° 11

RELACION DEL CONTENIDO DE CENIZAS EN EL CORE CON RESPECTO A LA SOLUBILIDAD DE CARBON EN HIERRO



EFFECTO DEL TIEMPO SOBRE LA SOLUBILIDAD DEL CORE EN EL HIERRO

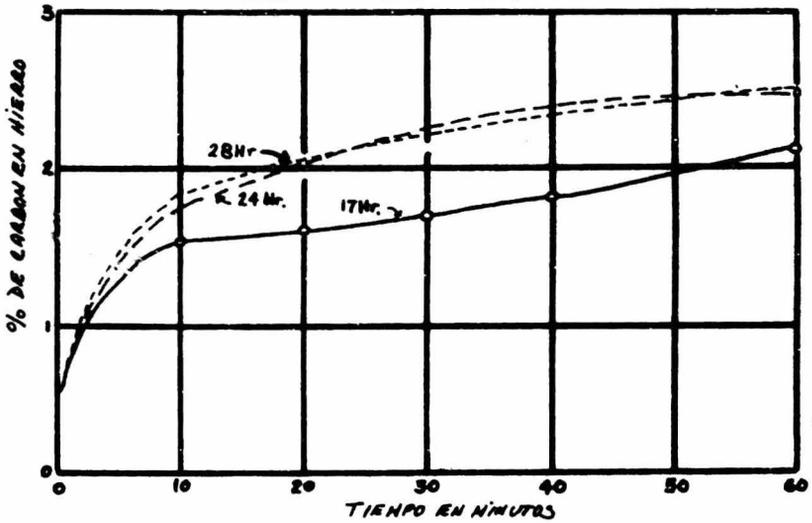


FIGURA N° 12

APARIENCIA DE LA ESCORIA
DE UN H. DE CUBILOTE

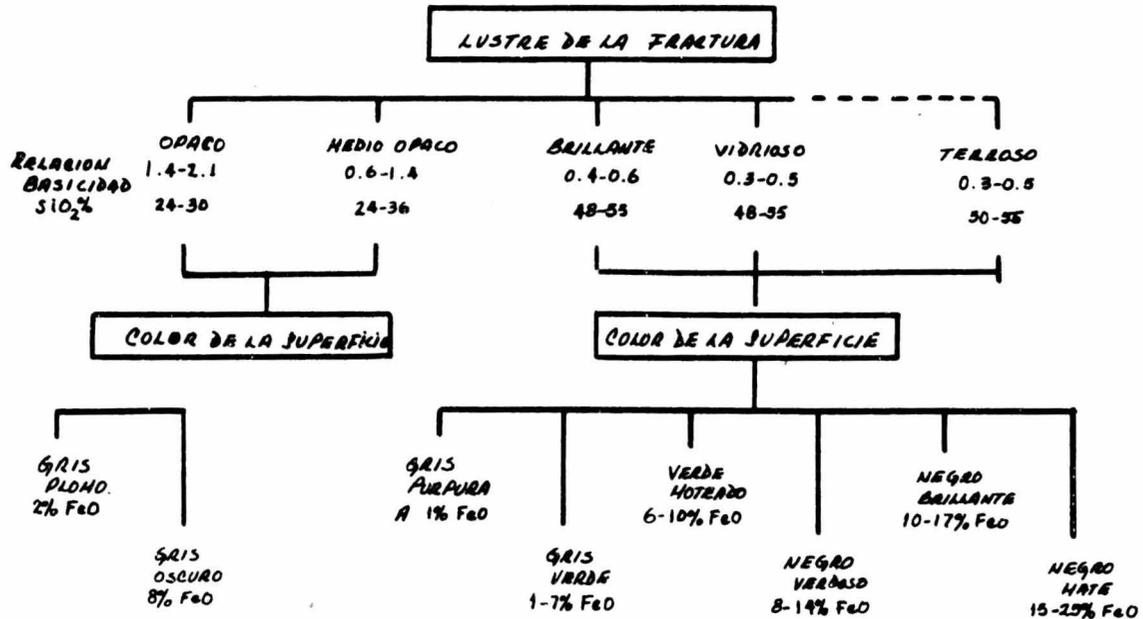


FIGURA N° 13

Sólo al inicio de nuestro siglo se pudo plantear el principio de la utilización de la energía eléctrica para generar calor en forma costeable, limitado sólo por la disponibilidad de potencia eléctrica y energía. La idea de transformar energía eléctrica en energía térmica fue dada por el conocimiento del arco voltaico que dió pié a la creación del horno de arco directo.

Se hicieron varios intentos que condujeron a la realización de este horno, como se sabe, la deficiente calidad de los materiales de construcción, la escasez de transmisores eléctricos disponibles, la falta de aparatos reasadores y la carestía de energía eléctrica es decir en suma, una tecnología adecuada retardó la aplicación de estos hornos en forma industrial.

Para evaluar correcta y analíticamente el trabajo de un horno de arco eléctrico se debe considerar por igual toda su instalación tales como sus elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos, químicos, hidráulicos y neumáticos ya que de ello dependerá la correcta aceptación de este medio de fusión con respecto a los otros dos medios de fusión que aquí se analizan, pues se tomarán en cuenta los factores tecnológicos, económicos, metalúrgicos y sociales.

Metalúrgicamente las elevadas temperaturas, su regulación, transformación, reducción y homogenización, así como carburización, decarburización y otros problemas se pueden resolver obteniéndose metales y aleaciones más afinadas, más homogéneas y con menores pérdidas de tiempo y metal, además de una reducción apreciable de rechazos partiendo de -- cargas poco valiosas en comparación con el horno de cubilote y en horno de inducción únicamente sabiendo aprovechar las ventajas de fusión que presenta el horno de arco directo.

4.2 PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

En este tipo de horno la fuente de energía se localiza fuera de él y se transmite a la carga por medio de electrodos que al entrar en contacto con la carga provocan la formación de un arco directo generando calor y que se transmite por radiación a la superficie del baño de metal fundido y por convección a toda la carga que se encuentra en el interior.

La energía eléctrica se transforma en energía térmica según la ley de Joule:

$$W = I^2 R$$

Dónde W se refiere a las pérdidas de calor y que absorbe la carga en el horno dependiendo de la intensidad (I) favorecidas porque toda intensidad quedará al cuadrado y multiplicado por la resistencia que ofrece el material al paso de la corriente.

La cantidad de calor que se disipa por esta transformación se expresa como sigue:

$$Q = 0.24 \frac{V^2}{R} t$$

Siendo 0.24 una constante, V la tensión en las terminales del horno en volts, y R la resistencia del circuito interno del horno en ohms, y el tiempo T en segundos.

Con esto se calcula la potencia del horno en función de la calidad del metal a fundir, de su cantidad y del tiempo necesario para fundir la carga.

Este circuito es para una resistencia ohmica donde:

$$I = \frac{V}{R}$$

y

$$W = VI = \frac{V^2}{R}$$

Cuando la corriente I, está en fase con la tensión V, se dice que tanto la corriente como la potencia alcanzan los valores máximos positivos, negativos y el cero en el mismo instante. Por lo tanto, el ángulo de defasamiento entre tensión y corriente es 0° y el coseno será igual a 1, así se tiene un factor de potencia con el cual se tendrá el aprovechamiento máximo de la energía.

Pero la temperatura está limitada por el equilibrio térmico entre la energía absorbida y el calor disipado, dependiendo por lo tanto de las pérdidas térmicas del horno, de su construcción y de la resistencia al calor de los materiales refractarios que contengan al metal fundido, de esta manera los hornos de arco trabajan por término medio, con un factor de potencia que va de 0.70 a 0.90.

4.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El horno de arco se divide en dos partes, la parte mecánica y la parte eléctrica.

Fundamentalmente la parte mecánica del horno es un recipiente cilíndrico que se hace de placa de acero reforzada de acuerdo a las altas temperaturas de trabajo siendo más ancho que alto e indicando el diámetro, la capacidad del mismo, como se ilustra en la figura 1 tiene un fondo abombado y que sirve para contener la carga y en la parte superior una bóveda en forma de cúpula que cierra la parte superior a través de la cual se introducen los electrodos generalmente dispuestos en triángulo equilátero y tiene

además los brazos portaelectrodos a un lado y los cuales son manejados por cilindros hidráulicos.

Para llevar a cabo rápidamente las operaciones de carga, se cuenta con un cilindro hidráulico colocado a ras del horno que sube y gira la tapa, utilizando una olla para cargar dicho horno.

Toda la coraza debe quedar libre para permitir la expansión y contracción del refractario debido a los cambios de temperatura.

Los electrodos se utilizan para formar el arco eléctrico con la carga y los hay en todos los tamaños para los transportes de corriente necesaria en las capacidades utilizadas en la fusión de hierro.

Los electrodos como se ve en la figura 2 van colocados como se dijo, en forma de triángulo equilátero pues así cubren una área mayor de contacto con la carga. Los brazos portaelectrodos son un sistema sencillo y permite controlar el movimiento de los electrodos sin vibraciones, las pinzas que sujetan a los electrodos permiten que estos no se resbalen cuando se aceleran y desaceleran los brazos. (Para disminuir el desgaste de electrodos - tanto las pinzas como el anillo de los electrodos se enfrían con agua)

Los electrodos que se introducen en forma vertical a través de la bóveda constituyen los polos entre los que se genera el arco voltaico y la carga metálica debiendo responder a los siguientes requerimientos para fundir hierro:

- Buena conductividad eléctrica.
- Buena resistencia mecánica.
- Baja conductividad del calor.
- Alta resistencia al calor (refractoriedad)
- Buena resistencia a las variaciones de temperatura.
- Bajo coeficiente de dilatación.

Debido a estas características especiales los electrodos que mejor resultado han dado para fundir hierro son los electrodos de carbón amorfo o grafito.

Además todo el horno cuenta con dispositivos hidráulicos para bascular en dos sentidos, sirviendo un lado para vaciar la carga ya fundida y que se encuentra dentro de análisis y el otro para escoriar.

* SISTEMA ELECTRICO

El fin del sistema eléctrico es tomar la potencia eléctrica de la red y llevarla al baño con valores adecuados de corriente y voltaje, para que el consumo de energía y desgaste de las paredes sean mínimos durante la fusión a máxima potencia. El sistema eléctrico consiste de un interruptor de alto voltaje, un transformador regulador de potencia, conductores de alta corriente y controles.

El interruptor para horno de arco, dependiendo del tamaño del horno, del programa de fusión y de otros factores de operación, efectúa diariamente de 10 a 100 operaciones. Para este alto número de operaciones se utilizan aparatos especiales, tales como:

- a) Contactores de vacío
- b) Interruptores de aire comprimido.

Los contactores de vacío permiten alcanzar un alto número de operaciones sin necesidad de revisión, pero tiene una potencia interruptiva pequeña, entonces para la protección contra corto circuito se debe agregar un interruptor o fusibles. Este tipo de contactor se utiliza para voltajes de hasta 34 KV. Debido a que el circuito eléctrico se abre inmediatamente después de haber recibido la señal de apertura, sin la creación de un arco, se pueden producir altos voltajes transitorios que podían ser muy peligrosos para el transformador. Para evitar estos daños al transformador se instalan apartarays de precisión en el lado de alta del transformador regulador.

Existen en el mercado interruptores de aire comprimido, diseñados especialmente para alto número de operaciones y de potencia interruptiva adecuada para conectarse diariamente a la red, para voltajes de hasta 220 KV; el uso de estos interruptores permite la conexión del transformador regulador, directamente a la red de muy alto voltaje; así se ahorra un transformador reductor de voltaje y sus pérdidas.

Un reactor que se instala entre el transformador y el interruptor disminuye las corrientes de corto circuito que pueden aparecer durante la fase de fusión inicial, cuando los electrodos tocan la chatarra. La reactancia de este reactor está seleccionada de tal manera que el arco sea estable durante la primera fase de fusión. Una vez existiendo el baño líquido abajo de los electrodos, se puentea la bobina de reactancia.

Refiriéndose ahora al transformador, la potencia máxima del horno determina el tiempo de fusión y la máxima potencia aparente del transformador se determina por:

$$\frac{Q \cdot t}{\cos \varphi_m \cdot f \cdot t_e} = S_{\max}$$

Donde: S_{max} es igual a la máxima potencia aparente del transformador en KVA.

Q = al consumo de energía para fundir la carga metálica en Kwh/ton.

t = carga metálica en toneladas.

$\cos \phi_m$ = factor de potencia medio durante el tiempo de fusión.

f = factor de corrección.

t_e = tiempo de fusión deseado en horas.

Los transformadores para horno de arco están dimensionados de tal manera que se pueden sobrecargar en un 20% durante la fase de fusión, sin dañar los devanados.

Entonces la potencia nominal del transformador es:

$$S_m = \frac{S_{max}}{1.2}$$

Al utilizar la fórmula para determinar la potencia del transformador se debe considerar lo siguiente:

El consumo de energía específica depende, de la entalpía del material, de la temperatura de vaciado y de las pérdidas de calor del horno. Para propósitos de planeación son útiles los valores dados en la figura 6 basados sobre un tiempo de fusión de 1.25 Hrs.

Debido a que el transformador es la parte más cara del equipo debe de seleccionarse con sumo cuidado a la vez que protegerlo como se ha mencionado anteriormente y que influye además primordialmente en el desgaste de las paredes. En el uso de alta potencia el producto del voltaje del arco y la potencia del arco, dan un valor indicativo de la radiación y por consecuencia del desgaste de las paredes. Consecuentemente se ha establecido que el desgaste máximo, aparece con un $\cos \phi = 0.86$, otra ventaja de trabajar con $\cos \phi$ bajos es que el arco es más estable.

El factor de corrección f considera la utilización de la potencia máxima durante la fase de fusión.

Las potencias típicas de los transformadores para varios tamaños de horno se muestran en la tabla de la figura 7. El valor máximo se utiliza para procesos que requieren muy poca afinación, el valor más bajo, para las aplicaciones que requieren más afinación. Un estudio detallado del proceso permite establecer la potencia del transformador o sea la que resulte más económica. La potencia del transformador debe ser ajustable

de un máximo para la fusión, a un valor intermedio para afinación y a un valor mínimo para el mantenimiento de temperatura.

→ Para una mayor utilización de la potencia eléctrica instalada, en instalaciones grandes, se utilizan cambiadores de derivación bajo carga en lugar de sin carga. En instalaciones de muy alta potencia se utilizan cambiadores rápidos, que pueden hacer millones de operaciones sin necesitar revisión y que hacen un cambio de derivación en 0.4 segundos. Con este tipo de cambiador hay un menor desgaste de las paredes durante la fusión y una mayor utilización de la potencia contratada con la compañía suministradora de energía.

Las conexiones flexibles de alta corriente entre el secundario del transformador y el horno son enfriados por aire y por agua para potencias de más de 14 MVA.

El sistema de control de los electrodos es muy importante para una operación eficiente de un horno de arco. El objeto de este sistema es controlar cada electrodo en su contacto con la chatarra fría y luego con el baño fundido para mantener un arco de impedancia constante. Para una buena regulación el dispositivo de control debe tener un tiempo de respuesta muy corto. Existen diferentes sistemas de control de electrodos, que se dividen principalmente en dos grupos:

- a) Cables y motores.
- b) Hidráulicos.

En los primeros, los brazos corta electrodos se ponen en funcionamiento por cables cuya posición está dada por motores controlados por generador "amplydine" o por amplificadores magnéticos o electrónicos.

En el segundo grupo, los electrodos son manejados por medio de cilindros hidráulicos controlados por reguladores electro-hidráulicos. Un sistema típico de este control y que más se usa en México se ilustra en la -- figura 3. Este sistema permite ajustar la velocidad del movimiento de los electrodos de 40 a 120 mm/seg., con tiempo de respuesta del orden de 80 ms. ↗

★ En el diseño de una instalación de hornos de arco hay que considerar la potencia interruptiva de la red que debe ser relacionada a la potencia de los hornos. Durante el período de fusión se crean fluctuaciones de potencia reactiva que producen fluctuaciones del voltaje de la red que pueden provocar gastos adicionales de potencia. ↘

→ Un estudio detallado de la red nos permite establecer la relación que debe haber entre la potencia de los hornos y la potencia interruptiva de la red.

Cuando la red es débil, es necesario instalar fuentes de potencia reactiva en la sub-estación, así como capacitores estáticos. La selección de estos equipos es delicada y debe hacerse en colaboración con la compañía suministradora de energía eléctrica y de esta manera tener una sustancial economía en el costo de la energía.

Para una primera estimación se puede decir que la potencia interruptiva de la red al punto de conexión debe ser:

$$P_{int} = 80 P_{ah}$$

Donde P_{int} = Potencia interruptiva de la red.

P_{ah} = Potencia aparente nominal del transformador del horno. 

Se tiene de la información de tablas que cuando se conectan un grupo de hornos a las mismas barras primarias hay que incrementar la potencia interruptiva de acuerdo a los siguientes factores:

No. de hornos idénticos:	1	2	3	4	5
Factor del incremento de potencia interruptiva necesaria de la red:	1.0	1.18	1.3	1.4	1.5

Si el tamaño del horno es más grande que las necesidades de producción para abastecer las líneas de moldeo, el capital fijo se incrementa considerablemente, además los costos de operación tienen un aumento considerable cuando hornos muy grandes en comparación a la carga, funden a baja potencia de la normal de entrada. Es mejor tener un horno de arco pequeño y cambiarlo por uno mayor conforme a las necesidades futuras.

CARACTERISTICAS METALURGICAS EN LA FUSION EN HORNO DE ARCO

Los efectos metalúrgicos en el proceso de fusión provienen principalmente de la interacción entre la carga de materiales escogidos pues dicho material que entrará con una cierta composición, sufrirá cambios debido a la alta temperatura y a las adiciones y entregará otro material con la composición deseada debiéndose controlar el ciclo de fusión al máximo pues de ello dependerá el éxito de la operación tanto económica como de calidad óptima. Hay que tomar en cuenta el tiempo de fusión, y el tiempo para lograr la homogenización del baño así como el tiempo de permanencia del metal en el horno.

Las principales ventajas del horno de arco para fundir hierro son las que se derivan de usar chatarra de bajo costo y casi de cualquier dimensión.

Desde el punto de vista metalúrgico hay que controlar los cambios en escoria y cuidar la inclusión de los elementos de aleación a su debido tiempo pues siendo elementos de baja densidad como el carbón, el silicio, se volatizarán al entrar al baño fundido el cual contiene cierta cantidad de escoria, además el baño también se ve afectado por las diferencias de temperatura que se presentan por el sobrecalentamiento local por la ignición del arco.

El factor de más significado para poder evaluar la fusión del hierro en el horno de arco es saber los cambios en la escoria. Como se sabe la estructura del grafito se ve afectada por las condiciones de la escoria ya sea ácida o básica.

Una escoria ácida tiene la ventaja de que reduce la actividad de la carga pero hace inestable el arco y además ocurre que se lleva una gran cantidad de silicio porque el carbón reduce al silicio en el hierro fundido.

Por otra parte, una escoria básica favorece la desulfuración pero si no se trabaja con una chatarra oxidada se puede alterar el contenido de carbón en el baño fundido.

Cuando se carga chatarra fría se prefiere usar revestimiento básico para minimizar la erosión de la escoria y si se carga hierro líquido se reducen los cambios provocados por la escoria pudiéndose usar revestimiento ácido o básico de acuerdo a los requerimientos del hierro a producir.

Es por esto que la mayoría de arco directo se usan en forma duplex cuando se cuenta con un horno de cubilote pues ya se recibe el metal líquido y se hacen ahí los ajustes necesarios y se lleva a la temperatura indicada para colar.

La carburización del hierro fundido es una relación que depende de la reacción, del tiempo y la temperatura que para su mayor eficacia debe existir un contacto íntimo entre el carburante de baja densidad y la alta densidad del hierro fundido. Para el control de la composición del hierro las adiciones de las ferroaleaciones se deben hacer con anticipación es decir, antes de empezar a fundir para que no haya gran pérdida de ellas y así poder lograr una buena homogenización.

La nucleación se verá afectada por las adiciones de inopulantes ya sea en forma uniforme o desequilibrada pues proporcionan una variación en

los centros de nucleación que harán que crezcan las celdas eutécticas del hierro durante su solidificación por lo que se debe lograr esto cuando se tenga la mayor agitación del baño y buscar una temperatura uniforme para una buena nucleación.

Para controlar metalúrgicamente la operación de un horno de arco se depende fundamentalmente de una relación llevada a rangos muy exactos de tiempo de fusión y temperatura, utilizando medidores de temperatura y analizadores de carbón equivalente relativamente baratos y que favorecerán grandemente la obtención de piezas dentro de las características deseadas ayudándose también con una carga de materiales aproximadamente conocida en su análisis para reducir aún más el tiempo de permanencia de la carga en el horno.

VOLUMEN DEL HORNO

El volumen del horno tiene como común denominador en su diseño el diámetro. La relación volumen del horno en función del diámetro del recipiente se ve en la figura 4.

Por el diámetro del recipiente, dado el espesor de las paredes, se determina la capacidad del horno. La tendencia es utilizar paredes más delgadas, debido a que el consumo de refractarios depende entre otros factores del flujo de calor a través de ellos; siendo más importante finalmente, el costo por tonelada de hierro producido que la vida útil de los refractarios.

REFRACTARIOS

La selección del refractario va a depender del diseño del horno, la temperatura de operación más frecuente, la continuidad del horno en operación, del método de carga, la composición de la escoria, la del metal, el voltaje apropiado y el control del arco pues la alimentación del electrodo minimiza la cantidad de calor radiado a las paredes y cuidar que el nivel del baño no pase de los límites establecidos y además que la viscosidad de la escoria no sea alta pues sujetan a los revestimientos a trabajos extras que reducen su vida útil.

El comportamiento del refractario va a depender de:

- a) Selección del refractario.- Hay que considerar los cambios ambientales, térmicos, químicos y físicos que se presentan durante el ciclo de fusión además de que el refractario escogido debe servir en un amplio rango de las condiciones de trabajo.

- b) **Práctica de instalación.**- El comportamiento varia considerablemente debido a la forma en que se instale el refractario y a las condiciones prevalecientes en el área cuando se efectua el cambio o reparación de cualquier refractario ya que la instalación adecuada de este forzosamente alargará su vida y evitará problemas posteriores.
- c) **Procedimiento de sinterizado .-** La mejor forma es lograr que se disipe al máximo la humedad para evitar una gran contracción al estar ya en operación y que se presenten grietas.
- d) **Mantenimiento.**- Puesto que todo refractario está sujeto a un abuso mecánico, ataque químico, etc., se hace necesario tener un buen mantenimiento usando materiales con características similares de expansión-contracción a la masa total del refractario para tener una compactabilidad semejante.

En México los hornos de arco directo dentro de la industria de la fundición se usan básicamente en sistemas duplex ya sea como fuente primaria para fundir la carga o bien para afinar el metal, dado pues, el empleo que se le da se puede hacer una clasificación de refractarios con diferentes características y aplicaciones en diferentes etapas del proceso de fusión del hierro y es la siguiente:

- a) Mezclas de relleno
- b) Refractarios plásticos
- c) Refractarios de mantenimiento o parchado
- d) Refractarios de sellado por lavado

Principalmente cuando se trabaja a altas temperaturas y las escorias son químicamente muy activas se deben usar refractarios con alta alúmina en los llamados puntos calientes que son las partes del revestimiento que están más cerca de los electrodos.

Generalmente se utiliza dolomita y magnesita, la dolomita tiene como ventaja su corto tiempo necesario para instalación y su menor precio. La magnesita demuestra una vida de utilidad mayor debido a que se pueden instalar paredes más delgadas lo que hace la capacidad del horno más elevada. La figura 5 ilustra las dimensiones de un horno de 3900 mm de diámetro con refractarios de dolomita y magnesita.

4.4 OPERACION

La preparación del horno para empezar a fundir solo depende de que el refractario instalado esté ya seco. La operación del horno se puede dividir en cuatro etapas:

- 1) Carga.
- 2) Fusión.
- 3) Comprobación de temperatura y ajuste de análisis, incluyendo el escoriado.
- 4) Vaciado, adiciones y reparaciones.

Carga. - La carga se lleva a cabo introduciendo el material a fundir en una olla de carga que suelta el material junto con los aleantes para evitar grandes pérdidas. Por cada ciclo normalmente se necesitan una o dos recargas para cargar el horno se deben llevar a cabo las siguientes operaciones: retirar los electrodos, abrir la bóveda, poner la olla en posición, abrir y retirar la olla de carga, cerrar la tapa y bajar los electrodos. Estas maniobras tardan alrededor de cuatro o cinco minutos. Un ciclo de fusión que requiere tres cargas, necesita de doce a quince minutos de interrupción para cargar.

Debe buscarse siempre conocer el análisis aproximadamente de la chatarra a cargar para que el rango de tolerancia de análisis químico sea lo más estrecho posible y que sean mínimos los ajustes necesarios.

El material más denso se debe cargar primero para que vaya en el fondo del horno y el material menos denso en la parte superior para que absorba más calor al iniciarse la operación y la fusión sea más rápida además de que sirve de escudo a la bóveda del horno para que no reciba de golpe todo el calor disipado.

Fusión. - Cuando el horno se encuentra ya cargado al nivel deseado se regresa la bóveda y se introducen los electrodos hasta cerca de la coraza, esto es cerca de la carga misma a fin de cerrar el circuito. La fase de fusión es el tiempo transcurrido desde el momento de conectar el horno hasta que la carga está líquida. Este tiempo está determinado por la potencia del transformador y de la composición de la chatarra, además, si hay chatarra muy densa se crean cortos circuitos que extinguen el arco, interrumpiéndose el proceso. Por lo tanto, la temperatura de fusión del metal dependerá del análisis requerido.

La corriente que pasa por los electrodos actúa sobre el regulador automático, el cual interviene para estabilizar la altura de los electrodos y

la carga, en función de la potencia absorbida por el horno. De esta manera cada electrodo entra en contacto con la carga y las fases quedan balanceadas pues se usan tres electrodos, uno para cada fase, así se ponen fuera de contacto y luego abriendo el circuito, por lo tanto, uno y otro actúan sobre la carga haciendo las veces de barreno. El calor radiado de los arcos directamente y reflejados por la superficie del grupo de electrodos pasa a la chatarra menos caliente y de esta manera se sigue fundiendo la carga.

Si las condiciones de la red lo permiten, se puede planear un tiempo de fusión de 1 a 1.5 Hrs.

Ajuste de temperatura y análisis.- Cuando ya se tiene la carga fundida se ajusta el voltaje de derivación y se puede tomar una muestra para análisis químico. A estas alturas el baño puede ser escoriado y la temperatura comprobada.

La fase de afinación está determinada por el proceso metalúrgico que se debe llevar a cabo; esta fase puede tardar de 0.5 Hrs. hasta 2.5 Hrs. Para escoriar se necesita aproximadamente de 10 a 15 minutos.

El tiempo para tomar una muestra y esperar los resultados depende mucho del equipo de laboratorio y de la habilidad de los operarios. Normalmente se necesitan de 15 a 10 minutos para obtener un análisis, dependiendo del equipo a disposición y del número de elementos a determinar.

Siempre el laboratorio después de analizar la primera muestra reportará la cantidad de carbón adicional que sea requerido o bien, remover el exceso del mismo según sea el caso y aquí cabe decir que el medio más rápido para alcanzar el contenido de carbón deseado en un horno de arco directo para que las pérdidas sean mínimas, es inyectar el carbón bajo la superficie del hierro fundido ya que es poco el movimiento del baño dentro del horno y no es posible homogenizarlo por medio de corrientes, pero entonces inyectándolo es posible obtener el contenido de carbón deseado, únicamente calculado cual será la cantidad que se perderá en la operación.

El equipo necesario para inyectar el carbón consta de un tanque de presión el cual contiene el carbón, siendo el tanque presurizado con gas inerte comprimido, así el carbón se suministra por medio de una manguera a una lanza de grafito, el cual es descargado bajo la superficie del hierro fundido.

Vaciado y reparaciones.- Ya que se tiene la carga dentro de análisis y con la temperatura requerida se procede a vaciar la carga a una olla de transferencia o bien directamente a cucharas de vaciado para colar el hierro en los moldes correspondientes.

Después de haber vaciado el horno, sigue la reparación del refractario. Este trabajo puede ser manual o mecanizado, no debiendo tardar más de 10 minutos.

A ciertos intervalos, es necesario ajustar los electrodos o atornillar un nuevo electrodo o una sección, así solo se deslizará el electrodo de la abrazadera con la sección añadida y se pone al nivel de los otros dos.

Cuando se a terminado todo lo anterior se vuelve a comenzar la operación en la misma secuencia descrita anteriormente, debiendo vaciar completamente el horno para evitar aumentar el costo de la tonelada de -- hierro fundido pues si se mantuviera en el horno sería necesario una cantidad adicional de energía para volver a subir su temperatura así como una pérdida de tiempo en estas operaciones que es irreparable.

Para ilustrar un ciclo de fusión típico, consideraremos un horno utilizado en la producción del hierro y que se carga tres veces con ollas, utilizando para la determinación del análisis un espectrógrafo.

Como tiempo de fusión neto se suponen 75 minutos.

La afinación con corrección de análisis y de temperatura puede hacerse en 50 minutos.

Como tiempo improductivo se tiene:

Cargar (3 veces empleado 4 minutos/carga)	12 min.
Desescoriar	10 min.
Analizar	6 min.
Vaciar	5 min.
Reparar	10 min.
Bajar electrodos	4 min.

La suma de estos tiempos es de 172 minutos o sea 2.86 Hrs., si se agrega un 5% para imprevistos se llega a tres horas esto es logramos vaciar el horno 8 veces por día en 3 turnos.

Esto nos señala la importancia de una planeación cuidadosa de las condiciones de operación del horno que se esté usando o se piense utilizar.

El mejor empleo del horno de arco directo se ha obtenido en el llamado proceso duplex, ya sea primero fundiendo en un horno de cubilote y luego afinando en el horno de arco o bien fundiendo en un horno de arco y afinando después en un horno de inducción.

Se dice que el horno de arco es más económico en proceso duplex, puesto que para una buena calidad en el hierro colado se reducen los gastos de

energía al no tener que mantener la temperatura del baño dentro de un rango muy estricto así como también sirve para bajar el consumo de energía al no usar el horno a toda su capacidad ya que recibe el metal líquido para su afinación o bien mandar el metal líquido para su afinación y mantenimiento de temperatura en un horno de inducción.

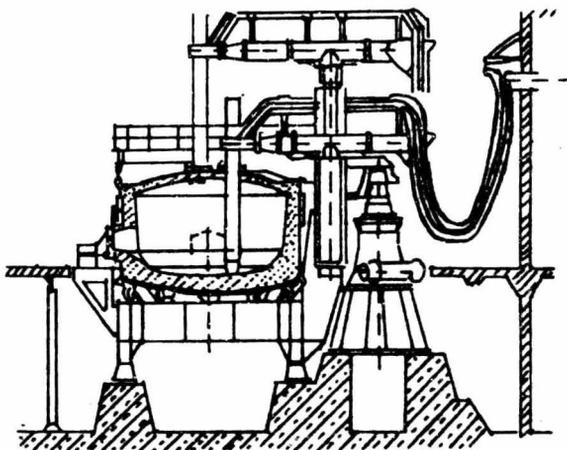
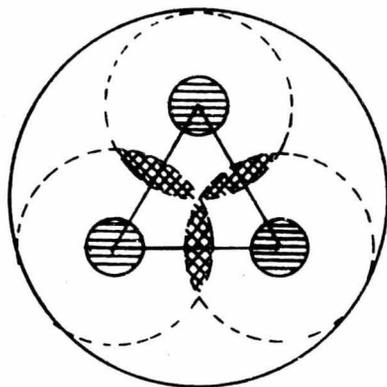
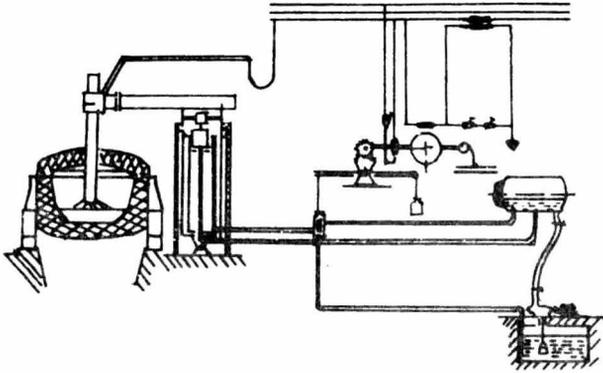


DIAGRAMA DE UN HORNO DE ARCO
DIRECTO TRIFASICO
FIGURA 1



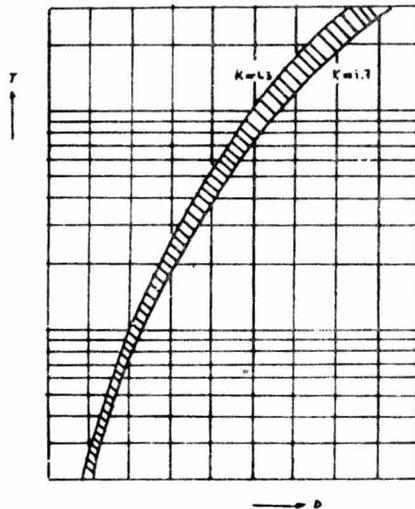
ZONA OPTIMA DE ACCION
DE LOS ELECTRODOS

FIGURA 2



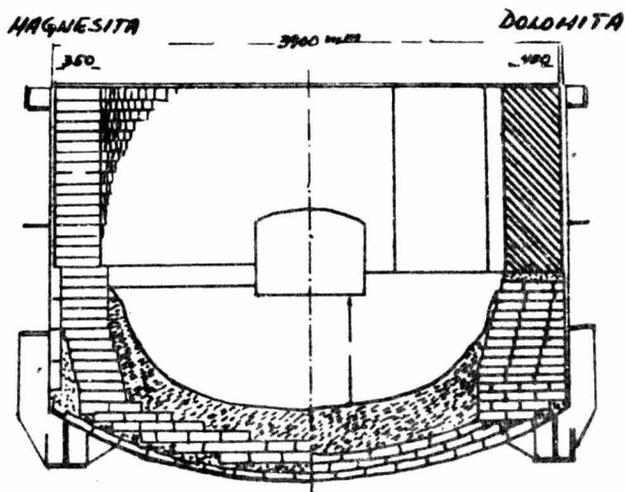
CONTROL HIDRAULICO DE
ELECTRODOS

FIGURA 3



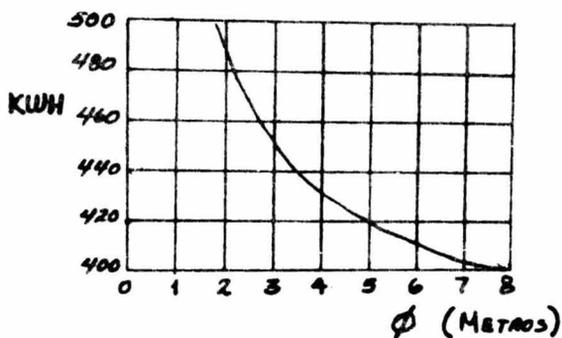
RELACION DE LA CAPACIDAD
DEL HORNO CON EL
DIAMETRO DEL RECIPIENTE

FIGURA 4



DISPOSICION DE LOS REFRACTARIOS
EN UN HORNO DE ARCO

FIGURA 5



ENERGIA ESPECIFICA DE HORNOS
DE ARCO

FIGURA 6

SERIE TIPICA DE HORNOS DE ARCO

Capacidad normal (ton)	Capacidad máxima (ton)	Diámetro (m)	Potencia normal de fusión (MVA)
1.5	2.5	2.0	1.5
3.0	4.0	2.2	1.8
4.0	5.0	2.4	2.4
5.0	6.0	2.6	2.8
6.0	8.0	2.8	3.3
8.0	10.0	3.0	4.5
10.0	12.0	3.2	5.0
12.0	14.0	3.4	6.3
14.0	18.0	3.6	7.2
18.0	24.0	3.9	8.5
25.0	33.0	4.2	11.0
30.0	40.0	4.5	14.0
40.0	50.0	4.8	18.0
50.0	60.0	5.0	20.0
70.0	80.0	5.5	28.0
90.0	110.0	6.0	36.0
120.0	135.0	6.5	44.0

5.1 PRINCIPIOS DEL HORNO DE INDUCCION

El calentamiento por inducción es un proceso de calentamiento directo en el cuál la energía es transferida de una bobina al cuerpo a calentar, por medio de un campo magnético.

Una aplicación típica del uso de un campo magnético alterno para transferir energía, la constituye el transformador en el cuál una bobina "secundaria" está colocada en el campo magnético de una bobina "primaria". En el horno de inducción el "primario" es el inductor y el "secundario" es el material a calentar o a fundir.

La figura 3 muestra esquemáticamente el arreglo de una bobina de inducción, el paso del campo magnético y carga en un transformador y en 3 alternativas de diseño.

- a) Se muestra el arreglo de un transformador típico
- b) Se ilustra el principio de un horno de crisol a frecuencia de la red.
- c) Se ilustra el principio de un horno de crisol a media frecuencia
- d) Se muestra el principio de un horno de canal.

La "profundidad de penetración" nos demuestra que si hay un número de barras metálicas de diversos diámetros dentro de una bobina de inducción, se demuestra que no en todas se tiene la misma temperatura.

Este fenómeno se puede explicar de la manera siguiente:

La corriente creada en el material a calentar por el voltaje inducido genera un campo magnético propio en sentido contrario al campo primario, este provoca que la corriente esté más concentrada en la superficie del material que en el interior (EFECTO DE PIEL). Este fenómeno se puede apreciar mejor cuando la frecuencia es más alta.

La distribución de la corriente dentro del material es exponencial. El espesor de penetración se define con el espesor de una corriente constante equivalente a la distribución exponencial. figura 1

El espesor de penetración se puede obtener por medio de la siguiente fórmula:

$$S = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot F}}$$

Donde: ρ = Resistencia específica
 μ = Permeabilidad magnética
 f = Frecuencia

A continuación, se muestra una serie de datos donde podemos apreciar el espesor de penetración para el acero a 1000° C y a diferentes frecuencias:

50 Hz	78.0 mm
500 Hz	24.7 mm
1000 Hz	17.5 mm
2000 Hz	12.3 mm
4000 Hz	8.8 mm
10 000 Hz	5.5 mm

Una vez que el metal es líquido, el baño se sujeta a fuerzas que crean una fuerte circulación de éste, debido a la presión electromagnética que es ejercida sobre el baño líquido por la existencia simultánea de una corriente eléctrica en un campo magnético, la cual hace posible la circulación del baño. Fig. (2).

Debido a la agitación que hay en el horno de inducción, se logra la homogenización del baño, logrando así una mejor absorción de las aleaciones y distribución de temperatura.

Para la creación de un campo magnético, la potencia reactiva es necesaria, esto es debido a la inductancia de la bobina.

La relación de la potencia activa a la potencia reactiva, se expresa por el factor de potencia, que es igual al $\text{Cos } \varphi$.

El factor de potencia, se puede conocer por la siguiente relación:

$$\text{Cos } \varphi = 9.7 \sqrt{\rho/f} \cdot \sqrt{\pi/4\mu} \cdot \sigma$$

Donde σ es un factor que depende principalmente del acoplamiento de la bobina con el material; es decir, en hornos de fusión, el espesor de la pared. Este factor depende también, tanto del diseño de la bobina, como de la distancia entre espiras y las proporciones geométricas de la misma.

La eficiencia eléctrica del horno, está dada por:

$$\eta_{el} = \frac{\text{Potencia del Horno}}{\text{Potencia Inducida}} = \frac{\text{Potencia del Horno}}{\text{Potencia del Horno} - \text{Pérdida de Cu.}}$$

$$\eta_{el} = \frac{1}{1 + 0.1325 \times \sqrt{\rho/f} \times K}$$

K es un factor que depende de los mismos parámetros que σ . Las pérdidas en el cobre son debidas a la corriente circulante en la bobina que consiste principalmente en la corriente de magnetización necesaria para establecer el campo magnético.

5.2 DESCRIPCION DE EQUIPO

Este tipo de hornos pueden ser a la frecuencia de la red o de media frecuencia.

El material que se quiere fundir, se encuentra contenido en un crisol refractario, alrededor del cual se coloca una bobina de inducción enfriada por agua. La corriente circulante en la bobina, crea un campo magnético que induce en el material un voltaje y por consiguiente una corriente. La magnitud de la potencia inducida depende de la frecuencia, de la resistencia y de las dimensiones del material, los cuales afectan la profundidad de penetración. En un horno de crisol con material refractario, toda la potencia se induce en el material.

Los hornos de crisol se dividen en dos clases, dependiendo del diseño del circuito magnético:

Hornos con circuito magnético abierto.

Hornos con circuito magnético cerrado.

El diseño de este horno es sencillo, la bobina con sus soportes está contenida en una estructura de aluminio o de acero antimagnético cerrada por placas de asbesto.

Un horno de crisol a frecuencia de la red, está compuesto de lo siguiente:

Cuerpo del horno.

Estructura con cilindros de volteo.

Marco de volteo, con cilindro activador de la tapa.

Tapa.

Cables y Mangueras.

Crisol refractario.

La estructura es abierta para facilitar el acceso y el mantenimiento, contiene la bobina con sus soportes y yugos magnéticos. La bobina se hace de perfil de cobre hueco. El calor transferido del crisol a la bobina, así como las pérdidas I^2R generadas por la corriente que circula en la bobina, se eliminan con agua bombeada a través del centro hueco del perfil. Cada

vuelta está separada por un aislamiento segmentado, permitiendo a la humedad escapar cuando se sinteriza un nuevo crisol.

Los yugos además de conducir el flujo magnético, también dan un soporte radial a la bobina y al crisol.

El volteo y apertura de la tapa se lleva a cabo hidráulicamente. El horno se puede voltear hasta un ángulo de casi 100° , lo que nos permite el vaciado completo del crisol. El eje de las chumaceras de volteo, pasa por el pico de colado asegurando así una trayectoria del metal casi constante para cualquier posición de volteo.

* SISTEMA ELECTRICO

Por medio del sistema eléctrico, podemos hacer la conexión del horno a la red y si esto es necesario, la conversión de la frecuencia de la red a una más adecuada para la operación del horno.

* SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA

Para lograr un eficiente sistema de fusión, el horno de inducción debe estar equipado con un sistema de potencia eléctrica y de control adecuado. Este sistema permite corregir el factor de potencia de la instalación, regular la potencia aplicada al horno y proteger la instalación. Debido a que el horno es un aparato monofásico, es frecuentemente necesario incluir un sistema de balanceo de fases para distribuir igualmente la carga entre las tres fases de la línea.

El sistema de potencia eléctrica consiste en lo siguiente:

- Banco de capacitores, para corregir el factor de potencia.
- Sistema de balanceo de fases.
- Equipo de arranque.
- Transformador de regulación.
- Protección primaria.

Este sistema lo podemos apreciar en la Fig. No. 5

BANCO DE CAPACITORES

Debido al bajo factor de potencia que tiene el horno de inducción, es necesario corregir éste utilizando un banco de capacitores. Como el

factor de potencia varía con el nivel del metal y el espesor de la pared, una parte importante de los capacitores es conectable en pasos.

SISTEMA DE BALANCEO DE FASES

Como el horno de inducción es monofásico, es necesario conectar el horno de tal manera que la carga se distribuya igualmente entre las tres fases de la línea que suministra la potencia eléctrica.

El balanceo de fases se logra con un reactor y un banco de capacitores, las tres fases están balanceadas cuando el factor de potencia del horno es 100% y con crisol nuevo. Una medida para saber si existe la necesidad de cambiar el crisol, es que cualquier cambio en el espesor de la pared se reflejará en la corriente de las tres fases.

EQUIPO DE ARRANQUE

Cuando se conecta el horno a la línea, es necesario reducir el voltaje del sistema, a fin de evitar una corriente excesiva; ya que para este momento el equipo automático de control del factor de potencia, aún no ha tenido la oportunidad de ajustar el banco de capacitores a las condiciones del horno.

Esta reducción de voltaje inicial, se hace comúnmente con resistencias que se sacan del circuito cuando el banco de capacitores está propiamente ajustado.

TRANSFORMADOR DE REGULACION

Sirve para ajustar el voltaje a las condiciones del horno y potencia deseada. La selección de voltaje se hace con un cambiador de derivaciones en el secundario del transformador. Normalmente el cambiador es del tipo de operación sin carga.

PROTECCION PRIMARIA

Se utilizan contactores en vacío de alto voltaje con fusibles, o bien interruptores de aire comprimido.

CONVERSION DE FRECUENCIA

Cuando la magnitud de movimiento del metal líquido o la duración

del tiempo de fusión obligan a utilizar frecuencias más altas que la de la red se hace necesaria la conversión de la frecuencia.

En la práctica, se utilizan principalmente los siguientes sistemas:

- a) Conversión directa de la frecuencia de la red a la frecuencia del horno.
- b) Conversión de la frecuencia de la red a corriente directa y de corriente directa a la frecuencia del horno.
- c) Conversión de la energía eléctrica en energía mecánica y de energía mecánica en energía eléctrica a la frecuencia deseada por el horno.

SISTEMAS AUXILIARES

Estos son de suma importancia, ya que de ellos dependerá el buen funcionamiento del horno.

Los principales servicios auxiliares que se encuentran en un sistema de hornos son:

- a) Sistema hidráulico.
- b) Sistema de enfriamiento de agua.
- c) Ventilación.

a. SISTEMA HIDRAULICO

La mayoría de los hornos utilizados en la fundición son volteados por cilindros hidráulicos y cuentan con una tapa para reducir las pérdidas de calor, debido a la radiación. La tapa también es activada hidráulicamente. En la figura 4 se muestra un circuito hidráulico típico.

El volteo del horno es la función más importante del sistema hidráulico, se utilizan cilindros para trabajo pesado diseñados para trabajar en el ambiente de la fundición. Una válvula manual de control de flujo, asegura el suave control de la velocidad de volteo.

Para casos de fallas eléctricas prolongadas, un sistema de volteo de emergencia, tiene que estar disponible para voltear el horno antes de que el metal se solidifique. Esto puede hacerse por medio de un equipo Generador de emergencia, o con una bomba hidráulica manual o de motor de gasolina.

Los sistemas hidráulicos operan con aceites minerales o con fluidos sintéticos resistentes al fuego. Cuando se utilizan fluidos sintéticos, se deberá dar una atención especial a los empaques utilizados en el sistema para que éstos sean compatibles con el fluido. Se pueden también utilizar emulsiones de aceite en agua, pero sólo en aplicaciones de baja presión.

b. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

Debido a la elevada densidad de corriente en la bobina de un horno de inducción y al calor que atraviesa las paredes del crisol, la bobina se enfría por medio de agua; en algunas instalaciones, ciertos equipos eléctricos son enfriados por agua, como los capacitores, el transformador y el reactor.

El sistema de agua en circuito cerrado, es el más común y más confiable, la ventaja principal de este sistema, es que permite controlar la calidad del agua que circula.

La calidad requerida de agua circulante para un horno de inducción es:

PH 6.5 a 7.5

Sólidos disueltos menos de 250 p. p. m.

Sólidos en suspensión menos de 10 p. p. m.

La figura 6 muestra un esquema típico de un sistema de agua.

Se recomienda que el sistema incluya dos bombas de plena capacidad una sirviendo de reserva. El circuito se debe conectar a una fuente de emergencia por medio de una válvula automática. Esta fuente puede ser un tanque elevado o un pozo con motor-bomba de gasolina. Para evitar contaminación al sistema, cuando se utilice el agua de emergencia, debe procurarse que sea de la misma calidad que el agua del circuito cerrado.

Los sistemas para enfriar el agua, son por medio de un intercambiador de calor del tipo agua-agua o bien del tipo agua-aire.

c. VENTILACION

Este equipo es necesario para disipar las pérdidas de calor generadas por el equipo eléctrico.

El mecanismo es soplar aire filtrado en el cuarto eléctrico para mantener una sobrepresión para evitar que el aire de la fundición entre.

VOLUMEN Y POTENCIA DEL HORNO

La selección del volúmen se hace bajo las siguientes consideraciones:

- a) El vaciado más pesado.
- b) Velocidad de fusión.

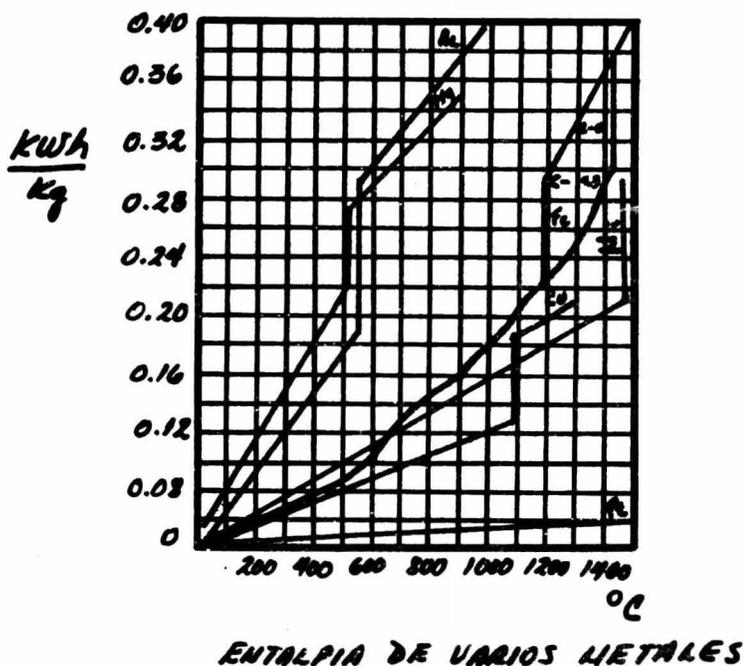
Dependiendo de la velocidad de fusión, se calcula la potencia requerida. Ya que el metal sólo se funde cuando la potencia eléctrica está conectada. Todos los tiempos en los cuales el horno no está conectado están considerados como tiempos muertos (cargar, desescoriar, medir la temperatura, vaciar y los tiempos de espera por los resultados del análisis). La suma de los tiempos muertos con el tiempo de fusión dá el ciclo de fusión.

Mediante una cuidadosa planeación del sistema de manejo de materiales, que implicaría que el horno no esperará por la carga, o bien utilizando grandes cargas, mejoraría la utilización de la instalación por reducción de la relación del tiempo muerto con el tiempo de fusión.

Como con frecuencia, no es posible lograr una buena sincronización de la operación con los sistemas de manejo de materiales, entonces los tiempos muertos son elevados, debido a que los hornos deben esperar. Por lo tanto, una solución recomendable es, conectar dos hornos a una fuente de potencia común. Los dos hornos fundirán alternativamente, así que entonces, todo el tiempo de fusión de un horno está disponible en el otro para las actividades que se hacen durante los tiempos muertos.

Para fundir o sobrecalentar una cierta cantidad de metal, se ne-

cesita una cierta energía específica como podemos apreciar en la figura:



Una vez que se ha establecido el programa de fusión del horno, el consumo de energía eléctrica se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$e_p = \frac{P_{tm} \cdot i + Z \cdot [t_m \cdot N_{hl} + T_h \cdot N_{hl}]}{\eta_{el} \cdot \eta_{tr} \cdot P_{tm}}$$

e_p = Consumo de energía promedio Kwh/t .

P_{tm} = Producción mensual .

i = Entalpia Kwh/t .

Z = Número de hornos .

t_m = Número de horas en las cuales se funde .

t_h = Número de horas en las cuales se mantenga la temperatura .

N_{hl} = Pérdidas de calor del crisol .

η_{el} = Eficiencia eléctrica del horno .

η_{tr} = Eficiencia de transmisión (95%): se toma en cuenta las pérdidas en barras, transformador, reactor y capacitores .

REFRACTARIOS

Como en términos generales, el horno de inducción, no es un horno de proceso, lo que limita las reacciones químicas que se llevan a cabo en él. Como es el caso de las escorias que por su comportamiento químico pueden provocar algunos efectos de reacción sobre el refractario (el óxido del metal se mezcla con partículas del refractario).

Por otra parte, las ondas electromagnéticas inducidas a la carga provocan un cierto movimiento del metal fundido que alcanza un desplazamiento continuo en los hornos de baja frecuencia, lo cual tiene un fuerte efecto de abrasión en el refractario.

En los hornos de crisol, el revestimiento refractario que forma el crisol debe ser lo más delgado posible para permitir el mejor aprovechamiento de la energía eléctrica. Como el crisol contiene al metal fundido, el refractario trabaja a compresión y deberá tener una expansión controlada. Debido a que el material refractario se encuentra entre el metal fundido y la bobina, es imperativo que además de un alto poder refractario brinde un buen aislamiento eléctrico y térmico.

Para el caso específico de la fundición de hierro, generalmente se tiene una escoria ácida, una relativa abrasión por la carga y una abrasión mayor por el metal líquido si se trata de baja frecuencia. Para estas condiciones, existe en el mercado una amplia gama de productos refractarios que cubren los requisitos físicos y reducen la selección al ataque químico y el costo.

En México se fabrican 3 tipos de granulares básicos para hornos de inducción:

- a) 84% MgO y 9% SiO₂ para temperaturas entre 1400 y 1600° C.
- b) 95% MgO y 3% SiO₂ para temperaturas entre 1550 y 1700° C.
- c) 98% MgO y 1% SiO₂ para temperaturas arriba de 1600° C.

El primero se prefiere para fundir hierro, el segundo para aceros normales y el tercero para aceros especiales.

En el caso que se tenga una escoria ácida, especialmente si se trata de un proceso duplex o por el uso de retornos contaminados con arenas de moldes, esto nos lleva a usar un revestimiento neutro de alta alú-

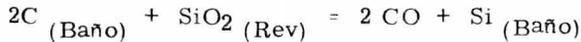
mina o uno de sílice.

Dado que la temperatura de fusión de la sílice pura es de 1700°C y cualquier impureza abate este punto. En general los requisitos para un revestimiento ácido son las siguientes:

98.5% SiO_2
 Menos de 0.5% de Fe_2O_3
 Alcalies - Trazas.

En estas condiciones el material necesita un agregado que le permita desarrollar su liga cerámica sin detrimento de sus propiedades. El material más usado es el ácido bórico, que se mezcla íntimamente en una proporción variable dependiendo de la temperatura a que se va a operar el horno. Como se muestra en la figura. 8

El principal problema de un revestimiento ácido es que cuando se funde hierro, el carbono presente en el baño reduce a la sílice del revestimiento que pasa al metal como silicio de acuerdo con la siguiente ecuación.



Esta reacción se fomenta con el aumento de carbono y con la temperatura.

El desgaste provocado por la reacción anterior es una de las principales razones para limitar la vida útil de estos revestimientos, aunque su costo es aproximadamente la mitad del costo de un revestimiento básico.

5.3 OPERACION

Dado que hoy en día existe en la Industria de la fundición grandes demandas de producción, éstas se han abastecido de máquinas de moldeo automáticas las cuales producen moldeo continuamente con un cierto número de moldes por hora, por lo que, el suministro de metal a la línea de moldeo debe ser también contínuo. Este requerimiento es una ventaja para la operación del horno de inducción. Ya que en el horno de inducción se puede cargar casi continuamente y calcular los intervalos de carga de tal manera que las pérdidas sean mínimas.

Con el procedimiento de fusión casi contínua las tolerancias en el análisis de las cargas se alcanzan fácil y rápidamente pues se tiene controlado el baño tanto en temperatura como en composición.

El material se puede ir cargando conforme se va sacando metal fundido esto según lo requiera la línea de moldeo, lográndose hacer el proceso en forma casi contínua. La carga del horno de inducción corresponde aproximadamente del 10-15% del volumen del horno. Con cargas más grandes, el baño se enfriará demasiado debido a la carga y el material no será absorbido rápidamente.

Hay que tener en cuenta la temperatura necesaria para vaciar y además cubrir las pérdidas de calor si se carga material frío, y ajustar rápidamente el análisis lo que se puede lograr sobre la marcha, sin perder tiempo ni energía. Una vez que se tiene el metal dentro de análisis y temperatura, el metal fundido se vacía en una cuchara que lo transporta directamente a las líneas de moldeo. El horno de inducción permite una gran flexibilidad para adaptarse a los requerimientos de la producción.

ADICION DE ALEACIONES

Debido al efecto de mezclado que hay en el horno de inducción, se logra una absorción de los elementos agregados a la superficie del baño, lo que permite aprovechar al máximo las aleaciones para lograr el análisis requerido. Las correcciones de análisis se llevan a cabo rápidamente y con precisión.

MANTENIMIENTO DE LA TEMPERATURA

El metal líquido en un horno de inducción se puede mantener por largos lapsos de tiempo. Para evitar la erosión de los refractarios se recomienda mantener el metal líquido a la temperatura de equilibrio, la cual es dada por los isotermas C-Si (fig 7).

Debido a que la energía calorífica se genera en el baño, la escoria se encuentra a una temperatura menor que el metal por lo que se debe evitar la agregación de flujos en la escoria que pueden ser muy agresivos para los refractarios. La erosión de los refractarios en un horno de inducción no es más grande que en un horno de arco pero si más peligrosa, debido a que las paredes son más delgadas, y una penetración de metal por la pared del refractario hacia la bobina ocasionaría graves daños económicos.

GASES

Frecuentemente el uso de chatarra muy oxidada trae como consecuencia la acumulación de gases dentro del metal (hidrógeno, nitrógeno, etc), lo que causa porosidades en él y otros defectos que fueron explicados anteriormente. Pero este exceso de elementos que se encuentran en la chatarra oxidada al ser introducida en el horno de inducción, se disolverán parcialmente debido a que no hay sobrecalentamiento local, como es el caso en un horno de arco donde la absorción de gas es menor. Un hecho muy importante es que de las pruebas realizadas en un horno de inducción respecto a el contenido de hidrógeno y nitrógeno se ha visto que éste decrece inmediatamente cuando la fusión está terminada. Esto quiere decir que la fusión del metal conduce a la desgasificación, la cuál es acelerada por el movimiento del baño.

Ahora en el caso de que se necesite una evacuación de los gases del horno de inducción, un anillo de succión en la tapa se ha comprobado que da resultados satisfactorios.

Los gases se mezclan con suficiente aire fresco para obtener una temperatura de 100-170 °C. El sistema de evacuación de gases es solamente efectivo cuando la tapa está cerrada. En la actualidad no se ha desarrollado un sistema efectivo que sirva para evacuar los gases cuando se vacía el horno.

METODOS DE OPERACION

El horno de inducción así como el horno de arco eléctrico pueden operar de cuatro distintas formas:

- 1) Para fusión (proceso simplex)
- 2) Proceso duplex
- 3) Para almacenamiento
- 4) Para dosificar

FUSION

Los requerimientos de un horno de fusión son:

- a) Fusión de cierta cantidad de metal
- b) El análisis requerido debe ser mantenido
- c) Mantenimiento de la temperatura adecuada.

PROCESO DUPLEX Y ALMACENAMIENTO

Por proceso duplex, debemos entender la instalación de otro horno después del equipo de fusión, la utilización de este proceso ofrece las siguientes ventajas:

- a) Incrementar la temperatura del metal
- b) La homogenización del análisis
- c) Variación en el análisis.

La instalación de un proceso duplex depende grandemente del flujo de metal requerido.

En lo referente a almacenamiento del metal, la potencia y el volumen del horno estarán en función del efecto de inercia deseado en el proceso.

DOSIFICACION

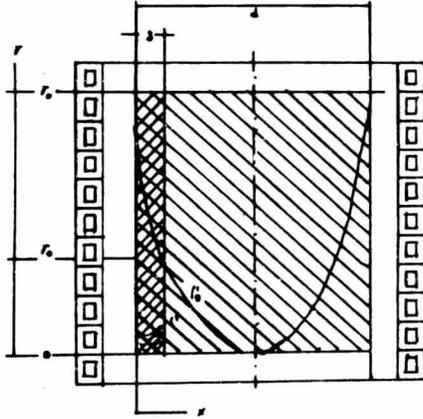
Este tipo de operación de un horno se debe principalmente a que, para la obtención de una pieza colada, se debe vaciar el metal en el molde a la temperatura y análisis adecuado, así como en una cantidad determinada.

Generalmente existen dos formas de llenar los requerimientos de vaciado en el molde:

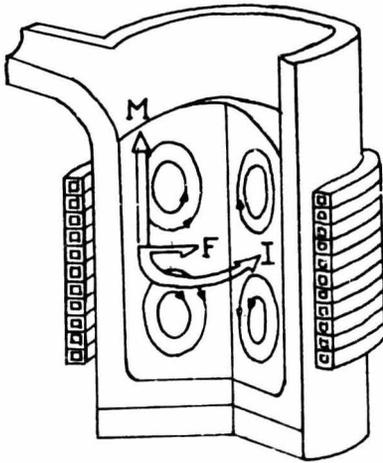
1) El análisis y temperatura del metal que sale del horno de fusión están determinados para considerar los efectos del transporte del metal al molde. El transporte está previsto para que su influencia no vaya en detrimento en la calidad de la pieza.

2) El análisis y temperatura final son establecidos por un horno especial de dosificación, localizado cerca de la línea de moldeo.

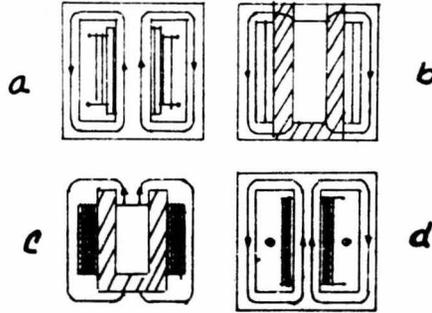
La instalación de cualquiera de estos métodos dependerá entre otras cosas de los requerimientos de cada fundición.



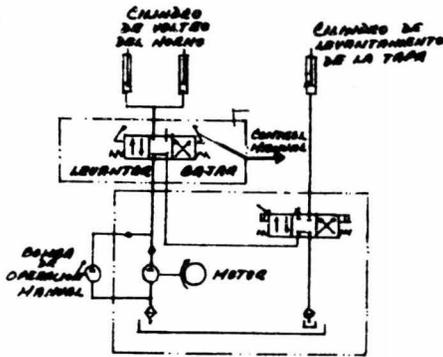
EFEECTO DE PIEL
FIGURA 1



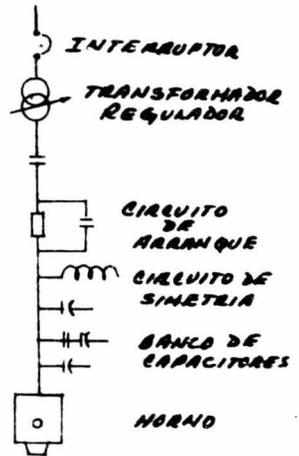
MOVIMIENTO DEL BAÑO EN EL HORNO
FIGURA 2



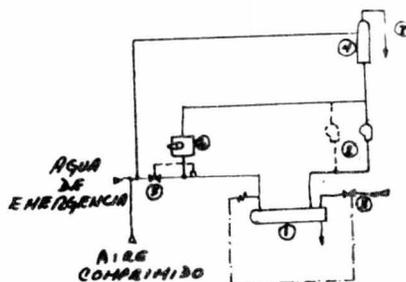
ARREGLOS DE CIRCUITOS MAGNETICOS
FIGURA 3.



SISTEMA HIDRAULICO
FIGURA 4



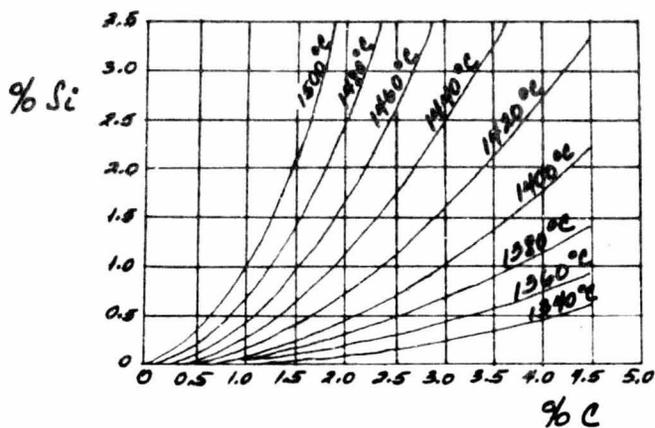
ESQUEMA ELECTRICO DE UN HORNO A FRECUENCIA DE LA RED.
FIGURA 5



SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

- 1.- CAMBIADOR DE CALOR
- 2.- BOMBAS
- 3.- VALVULA DE CONTROL DE TEMPERATURA
- 4.- TANQUE DE EXPANSION
- 5.- VALVULA DE EMERGENCIA
- 6.- HORNO
- 7.- DRENAJE

FIGURA 6



ISOTERNAS C-Si

FIGURA 7

% DE ACIDO BORICO

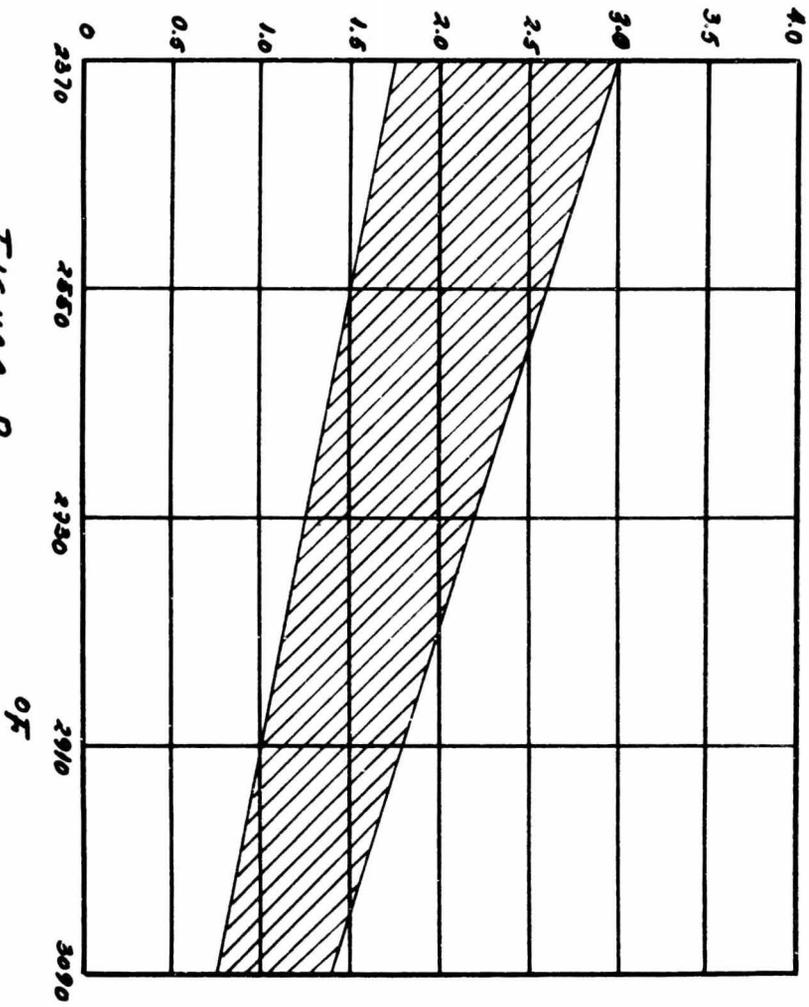


FIGURA 8

6.1 COMPARACION TECNICA METALURGICA DE LOS 3 PROCESOS DE FUSION EN ESTUDIO

INTRODUCCION

Basándonos en las conclusiones obtenidas en el capítulo referente a "TEORIA DE FUNDICION" sobre los requisitos que tiene que satisfacer un método de fusión para hierro:

- a) Se deben fundir principalmente cargas con materiales metálicos como chatarra, arrabio, material de retorno (Scrap), estos materiales deben cumplir ciertas características y además para su uso se debe tomar en consideración el tamaño y forma para cada uno de los hornos, además absorción de ferroaleaciones y carburantes tales como coque, grafito, FeMn FeSi y otros semejantes, partiendo de la base de que sea fácilmente controlable la transferencia de energía y posiblemente cargar hierro esponja.
- b) Un exacto y buen control de la fusión para ajustes precisos de las condiciones requeridas en cantidad, temperatura, análisis y nucleación, aparte que esto se debe alcanzar en un tiempo razonable y ser de fácil corrección las características mencionadas.
- c) Buena flexibilidad con respecto al balance de la operación de fusión que se basa en la extracción de hierro por fusión, el cual muchas veces varía en cantidad y calidad necesariamente en relación con el tiempo y la temperatura de la permanencia prevista del metal en el horno.
- d) Buena protección ambiental, cuidando tanto los aspectos económicos, como de eficiencia de los mismos, desde el punto de vista de la tecnología, los procesos característicos concernientes a estos requerimientos para los tres diferentes tipos de hornos se ilustran en la Fig. 1, 2 y 3

A continuación se hace una breve descripción de los principios en los que se basa cada proceso con características metalúrgicas.

CUBILOTE

La cantidad de calor requerido para la fusión, se transfiere a los materiales cargados que descienden a través del horno, tal como el hie-

rro, coque, caliza, a contracorriente por el flujo de los gases que ascienden a través del cubilote. Esta transferencia de calor principalmente ocurre por conexión en la parte media y alta del cubilote, mientras que en el fondo se lleva a cabo por radiación. La utilidad del contenido de calor de la combustión de los gases es una función del área de contacto (de la carga de material, flujo de gas uniforme) del tiempo (velocidad de gas, altura del cubilote) y de la temperatura diferencial entre el medio de intercambio de calor.

La fuente de energía son los gases calientes producidos por la combustión del coque con el oxígeno del aire que se inyecta por las toberas. Esto hace que sea más difícil determinar y controlar esta energía, como se ve en la figura 1. Además de que en corto tiempo, se debe controlar; también se presentan dificultades debido a las correcciones de las características mencionadas.

Los más importantes factores de diseño, son precisamente el volumen de aire de combustión por unidad de tiempo y la preparación de coque para la combustión. Dentro de la llamada zona de fusión, el hierro líquido y la escoria caen encima del coque incandescente y aquí el operador debe tener la experiencia para saber cuándo el cubilote está listo para desescoriar o desangrar, ahí donde caen se colectan en la parte baja del cubilote y se descargan continuamente después de la separación de ellos mismos. El hierro se junta más al fondo que la escoria. Debido al contacto directo del hierro con el coque incandescente que es su fuente de energía y a la vez aleante, el cubilote sólo se usa para fusiones que tengan aleaciones con alto carbón teniendo un límite que va aproximadamente de 2.5 a 3% de carbón.

HORNO DE ARCO DIRECTO

La transferencia de energía principalmente se lleva a cabo por la radiación del arco producido por la transferencia de corriente de los tres electrodos de grafito a la carga de material y al baño fundido. Sólo el 5 ó el 10% de la energía transferida se atribuye al paso de la corriente directa. Para este método de fusión, la gran temperatura que se alcanza no es muy adecuada, ya que no es uniforme pues la radiación ocurre alrededor del arco.

La porción del horno que se lleva con el baño fundido, forma una superficie plana, ofreciendo comparativamente una proporción alta de o/v como se ve en la figura 4. La cual por un lado, desde el punto de vista metalúrgico, debe crear el arco de intercambio necesario para las operaciones de la escoria que deben suceder, pues el baño se agita en este tipo de horno como se ve en la figura 5; y por el otro

lado, desde el punto de vista del diseño, ésta alta proporción se debe al tipo de arreglo de los electrodos, de acuerdo a la radiación en función de la carga dentro de las paredes. La fuente de energía se localiza fuera del horno, en la fuente de potencia, siendo función de la energía eléctrica - introducida por unidad de tiempo y también de la capacidad en términos de KW los cuales también son la base de diseño en este tipo de hornos.

La total utilización de la capacidad del horno refiriéndose a la carga, sólo es posible durante el período de baja fusión, como se aprecia en la figura 2, porque de otra forma, se podría suscitar un exceso de calor debido a la radiación, la cual tendería a destruir el revestimiento del horno, provocando sobrecalentamientos locales como se explicó en el estudio del horno de arco directo, que darían valores inadmisibles dentro del baño. Por lo tanto es obligatorio regular la energía y este consumo total de energía es de aproximadamente 520-580 KWh/ ton, y en forma parecida es la misma cantidad que se usa para el horno de inducción. El principal riesgo en la utilización de este método de fusión, desde el punto de vista metalúrgico, es no saber prevenir la evaporación de los aleantes debido al sobrecalentamiento en la vecindad del arco.

HORNO DE INDUCCION

Similarmente al funcionamiento del transformador, se tiene la fuente de energía en el horno de inducción. La corriente alterna del primario que en este caso es el arrollamiento de cobre que rodea al horno, se induce por medio de un campo magnético montado en el baño fundido al secundario que es la carga, el cual se transforma en calor de acuerdo con la ley de Joule. Así la fuente de energía se localiza en la parte externa del horno, de esta manera la transferencia de calor es fácil y exactamente controlable. La transferencia de energía creada radialmente por fuerzas mecánicas contribuye a un intenso movimiento del baño.

Este tipo de horno es de forma cilíndrica, teniendo comparativamente una baja relación de o/v como se ve en la figura 4, pero presenta la ventaja de tipo metalúrgico de que el proceso de difusión uniforme de las ferroaleaciones se lleva a cabo casi completamente debido a la circulación del baño.

Lo mismo que para el horno de arco directo, el material final está determinado por la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo, lo cual también gobierna el diseño del horno. El consumo de energía es de aproximadamente 545 KWh/ton, como se ve en la figura 3. En comparación con el horno de arco directo, si es posible su total utilización de la

capacidad del horno refiriéndose a la carga debido a que hay también un 15% de ciclos de tiempos muertos.

A continuación, después de todo esto, se hace la comparación y recomendación desde el punto de vista técnico del aspecto metalúrgico de cada uno de los métodos de fusión de acuerdo con sus puntos similares de proceso.

CARGA DE MATERIALES

Los materiales a cargar, no sólo se deben considerar desde el punto de vista económico, sino que tienen una influencia directa en el análisis y calidad del metal fundido. La tendencia de carburización en el proceso de fusión del cubilote, es inevitable por un lado, pero por otra parte depende principalmente de las condiciones de operación existentes; se debe tomar en cuenta esto cuando se seleccionen los materiales a cargar.

Dependiendo de las condiciones de fusión que prevalezcan, se tendrá una cierta proporción de arrabio y retorno de acero, las cuales andan entre 30% de acero y de 10 a 20% de arrabio.

Una carga total de retorno de acero propiciará defectos debido a los gases y afectará por lo tanto a las propiedades del material fundido, además de que el aumento de la proporción de retorno de acero hace inestable al sistema. Esta inestabilidad puede ser suplido incrementando la cantidad de coque, pero es menos preferida por razones de costos de energía.

Respecto a los efectos metalúrgicos, se conoce por experiencia que mientras que el baño de metal no sea calentado excesivamente, el arrabio es un material de carga que promueve la grafitización, mientras que el retorno de acero actúa en forma contraria. Pero a veces el retorno de acero incluye elementos que estabilizan el carbón y que comparado con el arrabio, tienen estructuras más homogéneas, las cuales influyen finalmente como se dijo al principio en la fusión de los metales, en las condiciones de nucleación y de aquí el grado de grafitización.

En el caso del horno de inducción para nuestro estudio con el hierro, aparte de los requerimientos de calidad, no se tienen restricciones con el tipo de material de carga. El rango se puede variar desde 100% de retorno de acero más los agentes carburizantes y las ferroaleaciones; pero por razones de costeabilidad, una alta proporción de retorno de acero no debe ser usada. Solo hay que cuidar, si es que se va a usar este tipo de carga, que no haya un excesivo calentamiento, pues puede afectar la nucleación al usar este material de carga.

Cuando se carga un 80% de arrabio, el material que sale es blando y sólo con un sobrecalentamiento se incrementa la dureza.

Los mismo se aplica para el caso del horno de arco directo, pero se ve esto mejorado por el sobrecalentamiento local del arco y de la absorción de nitrógeno en el arco y así se puede incrementar la estabilización del material en este proceso de fusión.

Los elementos de aleación introducidos en la carga metálica, tales como el Co, Ni, P, difunden casi completamente en los tres hornos que se están analizando, mientras que el Cr, Ti, V entrarán parcialmente a la escoria y el Mn, Si y Al se pierden en gran cantidad y se deben usar en forma de FeSi y FeMn, sin embargo, aún así es notable la pérdida si se añaden al final del baño fundido cuando ya está casi listo para ser vaciado.

Las pérdidas involucradas en el proceso del horno de inducción son muy bajas, lo cual redundará en una exactitud de análisis y disminución de pérdidas de tiempo. Por esta razón no hay problema en adicionar FeSi y FeMn, pues el baño es movido fuertemente difundándose completamente las adiciones de esta forma, el material a cargar sólo se analiza por el lado del costo.

El comportamiento de las ferroaleaciones dentro del horno de arco directo, se puede establecer en la parte intermedia entre el horno de cubilote y el horno de inducción porque el metal fundido disuelve las ferroaleaciones mucho más rápidamente que el cubilote, pero sin embargo, lo hace más lentamente que el horno de inducción. Además de que en el horno de arco directo si se debe tomar en cuenta la evaporación de las ferroaleaciones, debida a la creación del arco en este sistema.

Como se mencionó al principio, la absorción de carbón en el cubilote es función del contacto del coque y el hierro aplicándose también esto al azufre en un proceso ácido, de aquí que muchas veces se tengan contenidos de azufre arriba del .15% siendo inadmisibles, pues afectan las propiedades del metal fundido en la mayoría de los casos.

Cuando se usa chatarra, hay menos problemas en el cubilote y en el horno de arco directo, no habiendo ninguno en el horno de inducción, sólo hay que cuidar cuando se use chatarra que no traiga grandes cantidades de óxidos, pues se requieren tratamientos especiales. lo cual se verá reflejado por supuesto en el consumo de energía y por las pérdidas de oxidación especialmente de Si y Mn.

Las grasas adheridas o el aceite se deben expulsar en el cubilote esto se menciona debido al hecho de que las grasas y aceites incrementan el contenido de grasas disueltos parecidos al hidrógeno, las cuales pueden

ocasionar porosidad en la pieza.

En el horno de arto, también existe, debido a la alimentación discontinua de los materiales a cargar, una adhesión de impurezas que deben ser removidas antes de la fase de baja fusión.

También existe el riesgo del ingreso de grasas y aceites en el horno de inducción, por lo que se recomienda separarlos del retorno y chatarra posiblemente por medio de un precalentamiento.

Control de proceso de fusión e interacción metalúrgica con respecto a la exactitud del análisis, temperatura y calidad.

La fusión en el cubilote es particularmente desfavorable con respecto a la exactitud y flexibilidad del proceso de fusión. Una razón muy clara es la interacción tan grande entre la producción de energía y la transmisión de la misma. Los parámetros aplicables a la producción de energía, tal como el volumen de aire, temperatura del aire, proporción de coque y calidad de coque, tienen una decisiva influencia en el proceso metalúrgico. Esto es evidente como se ve en la figura 6 del sistema, se ve en la representación la influencia del tamaño del coque con la temperatura en la figura 7 y la relación de los diagramas 8, 9 y 10 con el segundo, indicando los efectos de variación de la temperatura en el análisis de carbón, silicio y azufre con respecto a la escoria. Estas interacciones son obligatorias y en el caso del cubilote deben ser controladas, por ejemplo, debido a la interacción del volumen de aire, figura 6. Se iniciará una reacción en cadena que se refleja en los diagramas. Además de que se debe buscar la óptima utilización del calor de combustión (temperatura máxima figura 6) porque cualquier uso arriba o abajo de este óptimo, no sólo baja la eficiencia, sino también provocará la aparición del fenómeno de oxidación, figura 11. También se debe considerar una desventaja: el paso de la carga en el cubilote, pues se lleva un gran tiempo de permanencia, evitándose con aire enriquecido con oxígeno siendo una ventaja en el cubilote, pues entrega un gran volumen de metal líquido.

A pesar de los numerosos problemas, no se puede negar que bajo condiciones de un cuidadoso control del proceso de fusión, es posible fundir el hierro que se está comparando en los tres sistemas de fusión dentro de límites aceptables de tolerancia, y como ya se dijo, en grandes cantidades.

Esto requiere, sin embargo, que el horno pueda ser operado uniformemente en grandes períodos de tiempo, lográndose alcanzar esto programando bien los tiempos de permanencia del metal en el horno.

Además de que de acuerdo con la calidad de metal requerida, se analicen las fluctuaciones y se estudie si se les pueden hacer frente o no.

El horno de inducción ofrece sustancialmente mejores posibilidades con respecto a un más exacto control de fusión. Este metal fundido es fácilmente controlable con respecto a la temperatura y proporcionará un buen análisis en un corto tiempo por la virtual ausencia de las interacciones entre el recubrimiento y la escoria y la poca pérdida de metal involucrada. La escoria en este proceso está relativamente fría porque comparativamente es una pequeña cantidad y tiene una mínima influencia en las reacciones metalúrgicas. Finalmente, debido al hecho de que se adicionan pequeñas cantidades de aleantes, se pueden tener óptimos resultados, aunque el factor decisivo en todo esto es el intenso movimiento del baño que rápidamente incorpora las ferroaleaciones y además la protección de que casi no hay oxidación.

Comparando con el horno de inducción, el horno de arco directo, aunque considerablemente más flexible desde el punto de vista metalúrgico en cantidad se caracteriza por la ausencia de un efecto intenso de movimiento del baño, lo que provoca que sea más lenta la incorporación y homogenización de las adiciones con el metal, además de que en el horno de arco si se debe tomar muy en cuenta el tipo de revestimiento, pues la escoria obtenida en la producción de hierro si ataca al revestimiento, en tanto que para el horno de inducción la única dificultad es encontrar el espesor óptimo para tener la máxima eficiencia eléctrica.

Debido al pobre movimiento del baño dentro del horno de arco directo se está pensando cada día más, en usarlo sólo para fundir la carga y obtener las reacciones metalúrgicas en otro horno.

Así también para remover los elementos que acompañan a la fusión tal como el hidrógeno y el nitrógeno que en un baño quieto como en el horno de arco directo tienden a estabilizar el efecto de carburización, a su vez ellos son la causa de que la porosidad en el metal vaciado llegue a puntos críticos.

Se han hecho estudios y se ha encontrado que la desgasificación, figura 13 ocurre dentro del horno de inducción, cuando el baño está en intenso movimiento. Lográndose establecer que el horno de inducción si es útil y puede ser operado como horno de vacío, pues se incrementa notablemente la desgasificación por este medio.

Finalmente se hace un análisis de uno de los aspectos del efecto metalúrgico en este tipo de hornos en el control de la fusión, que es la condición de nucleación del baño que es uno de los más importantes, pues afecta directamente las propiedades del metal colado.

Con referencia a los materiales de carga, se sabe que el arrabio se caracteriza por tener una alta condición de nucleación, debido a su estructura heterogénea. Esta nucleación promueve suspensiones compuestas de

grafito, SiO_2 en otras inclusiones que han sido encontradas en los aleantes heterogéneos y que se ponen en la fusión, sin embargo, ellos sólo tienen un límite de duración, porque después pueden coagular, dependiendo de la temperatura y entrar entonces en la escoria. A medida que el grado de sobrecalentamiento se incrementa, este proceso se acelera bastante y los óxidos parcialmente pueden ser descompuestos similarmente por reducción. A bajas temperaturas se puede satisfacer la condición de nucleación, pero existe la incertidumbre de que debido a las variaciones de las condiciones de operación, tal como un gran período en el tiempo de permanencia en el horno o a la variación de la calidad de los materiales de carga, se hace dudoso que las condiciones puedan ser reproducidas en forma continua.

En el horno de inducción, si se logra promoviendo moderados sobrecalentamientos en un estado de trabajo continuo y de esta manera el baño se puede considerar constantemente homogéneo. El horno de inducción se basa en la nucleación heterogénea, con la nucleación de óxidos.

Por lo tanto, para el control del metal fundido, se presenta una gráfica y se toma como referencia las líneas isotermas del C-Si. En un rango de aproximadamente 80° de sobrecalentamiento, el metal fundido presenta un incremento en la absorción de oxígeno por razones termodinámicas y cinéticas como se hizo hincapié al principio en la teoría de la fusión de los metales y se muestra en la figura (14).

Esta absorción de oxígeno hace más favorable un subsecuente tratamiento de metal fundido, el cual debe ser adaptado para las condiciones de fundición en cada caso particular, tal como la calidad de la fundición y las condiciones de operación, como el tiempo empleado en el transporte, temperatura de fusión, etc.

Para el horno de cubilote, se han hecho investigaciones respecto a la condición de nucleación y se ha descubierto que las correlaciones metalúrgicas entre el control del metal fundido y/o el proceso de fusión con las propiedades de fundición tienen una solución similar a las del horno de inducción, pero es imposible alcanzar esta meta, debido a las múltiples interacciones involucradas en las reacciones que tienen lugar dentro del cubilote. Se puede decir también que la temperatura de sobrecalentamiento se ve también afectada en su correcto logro por el operador que debe ser capaz de elevar la temperatura a la deseada, lentamente y esto sólo se logra mediante un gran esfuerzo, mientras que en el horno de inducción esto se resuelve fácilmente por medio de un solo botón, pero debe de cuidarse también su operación, pues las fallas del operador se reflejarán en los costos de energía, por lo que se hace en la mayoría de los casos, uso de interruptores automáticos que cortan instantáneamente la corriente cuando se alcanza el sobrecalentamiento deseado.

Los estudios que se han hecho sobre las condiciones de nucleación, no se ha podido aplicar ni estudiar en el horno de arco directo, debido a que existe un sobrecalentamiento en la cercanía del arco y conforme se quiera aumentar para tenerlo en todo el baño fundido, siempre existirá una diferencia de sobrecalentamiento mayor en la vecindad del arco, lo cual es sumamente peligroso y por lo tanto no se puede recomendar aún nada en firme con respecto al camino que se debe seguir en el comportamiento de la oxidación, ni con la distribución de los contenidos de oxígeno en relación con el sobrecalentamiento y sus interacciones con el carbón y el silicio.

Otro tema muy importante con respecto al aspecto metalúrgico, es la flexibilidad de las capacidades, coordinación y adopciones en la fundición y sus operaciones que se describirá brevemente.

El término "Flexibilidad" se debe entender aquí como la adaptabilidad de la operación de fusión al programa de fundición, tomando en cuenta la variación en la extracción de volúmenes de material y sus variaciones en la calidad.

En lo que se refiere al cubilote debido a las interacciones metalúrgicas involucradas y a la gran variedad de cubilotes de diferentes diámetros, complican el control del metal y con tales fluctuaciones no es posible hacer flexible el uso del proceso desde un punto de vista técnico y económico, pues no es posible en la mayoría de los casos adaptar la capacidad del cubilote ya establecida a la capacidad deseada de producción, o la capacidad de producción al tamaño del cubilote.

Presentándose en la actualidad la alternativa del horno de inducción es posible lograr un 100% de adaptabilidad por este medio.

Con el horno de arco tampoco se logra una completa adaptabilidad pues tiene que ser operado, para obtener hierro en forma absolutamente discontinua, es decir, que todo lo que se ha fundido se tiene que vaciar y colar, pero se puede resolver este problema de capacidad y además surtir metal en forma continua si se vacía el metal en otro horno, operando así en forma duplex. Aunque trabajándose en esta forma surgen otros problemas y se resuelven otros como ya se analizó en la parte correspondiente al horno de arco directo. Además se recomienda tener un horno que cubra la producción deseada y si se proyecta aumentar dicha capacidad, hay que tener un horno de mayor tamaño pero nunca sin excederse, pues si se tiene un horno más grande que el de la capacidad deseada, se estará desperdiciando constantemente la energía.

PROTECCION AMBIENTAL

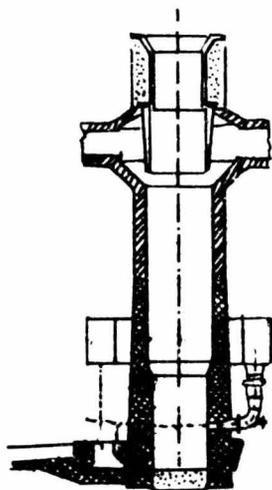
El cubilote necesariamente produce por la combustión del coque

un gran volumen de gases de combustión, el cual depende de la proporción de consumo de coque y que puede variar de $750 \text{ Nm}^3/\text{ton.}$, debido a que los gases de combustión pasan a través del cubilote; ellos arrastran una gran cantidad de polvo, lo cual requiere la instalación de un sistema de extracción de polvos y que muchas veces llega a costar lo mismo que el cubilote instalado si éste no es muy sofisticado. Pero esto se puede reducir introduciendo aire enriquecido con oxígeno o por medio de las inyecciones de gas natural pero obteniéndose con ello sólo resultados parciales.

Cuando se use agua como cortina para el enfriamiento de los gases, hay que tener cuidado con el contenido de azufre, pues influye en la acidez de esta agua haciéndola continuamente neutra. Además, hay que tomar en cuenta la molestia del ruido ocasionado al requerirse grandes cantidades de aire que entren al cubilote. De esta forma, debe buscarse instalar el cubilote en lugares de población reducida.

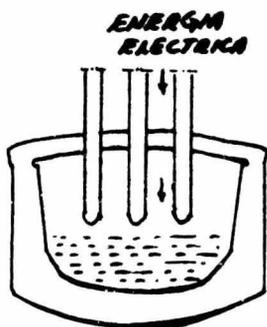
El horno de inducción ofrece una mejor protección del ambiente, ya que la contaminación ambiental es escasa, pero cuando en un futuro se quisiera controlar ese poco volumen de contaminación, se han ensayado instalaciones de extracción de polvos los cuales son menos caros que los usados para cubilote.

A este respecto, el horno de arco directo se encuentra entre el horno de cubilote y el horno de inducción, pues su sistema de extracción de humos y polvos si es eficiente y relativamente barato, la dificultad en este proceso es la molestia del ruido causado por el arco formado entre los electrodos y el material que se está fundiendo llegando muchas veces a rebasar los límites de decibeles aceptables para el oído humano, por lo que se debe proteger a todo el personal que labore cerca del área de fusión.



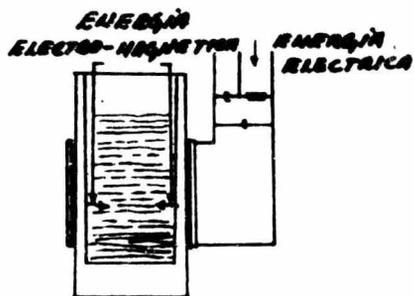
**HORNO DE CUBILOTE MODERNO
CON ELIMINACION TOTAL DE
GASOS**

FIGURA 1



HORNO DE ARCO

FIGURA 2



HORNO DE INDUCCION

FIGURA 3

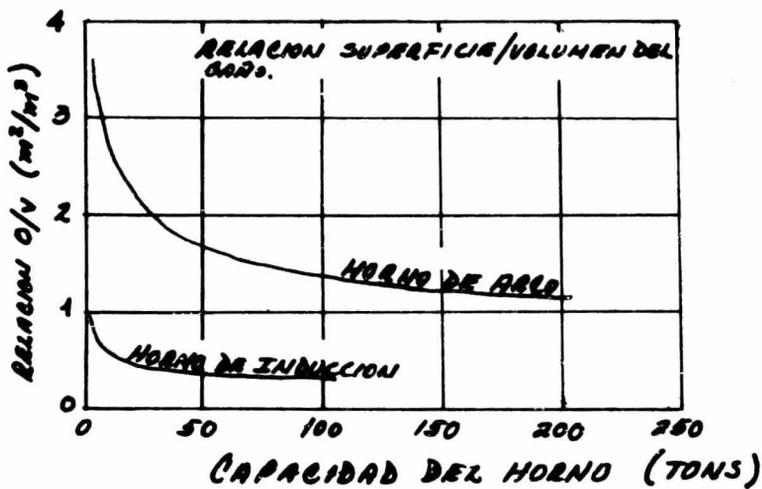


FIGURA 4

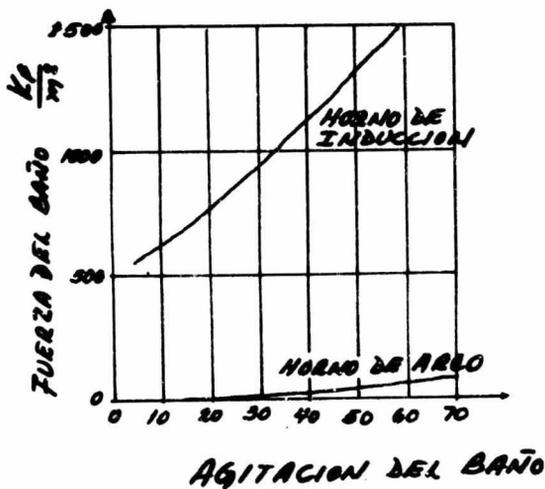


FIGURA 5

RELACION ENTRE LA TEMPERATURA DE COLADA,
EFICIENCIA DE FUSION, CARBONO APORTADO Y
CANTIDAD DE AIRE PARA UN HORNO DE
CUBILOTE.

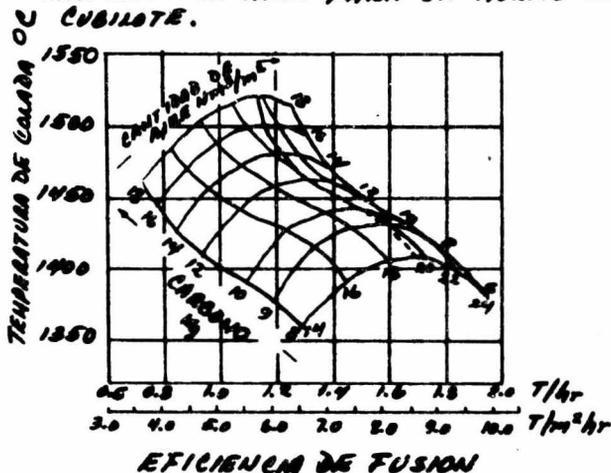
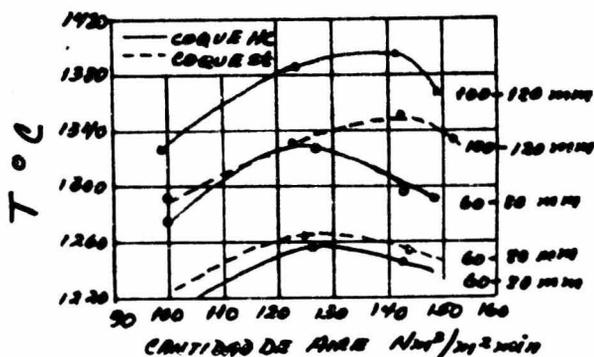


FIGURA 6



RELACION ENTRE LA TEMPERATURA,
CANTIDAD DE AIRE Y EL TAMAÑO DE
COQUE.

FIGURA 7

INFLUENCIA DE LA BASICIDAD DE LA ESCORIA Y DE LA TEMPERATURA DE COLADA EN EL CONTENIDO DE CARBON.

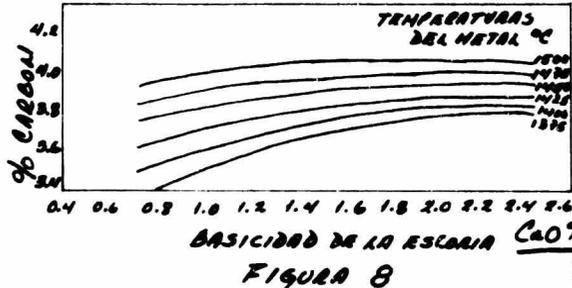


FIGURA 8

INFLUENCIA DE LA BASICIDAD DE LA ESCORIA Y DE LA TEMPERATURA DE COLADA EN EL CONTENIDO DE SILICIO

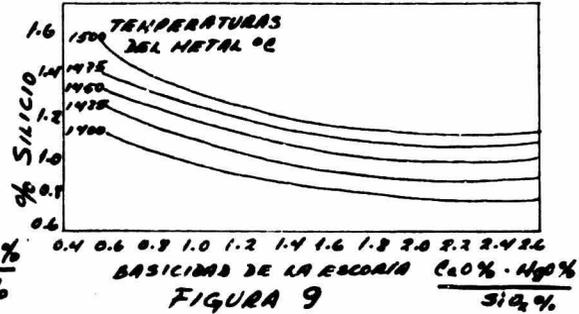
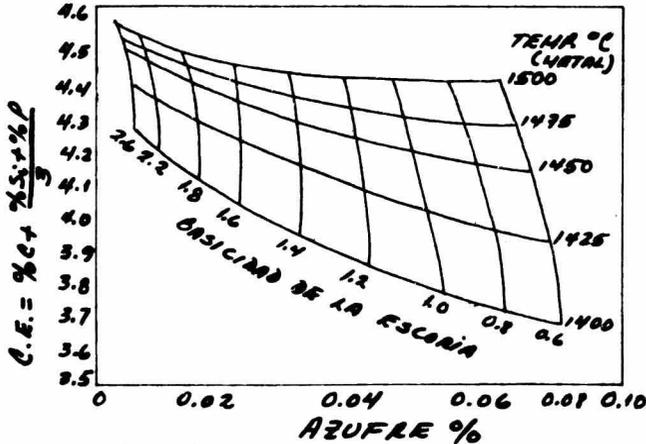


FIGURA 9



RELACION ENTRE EL C.E. Y EL CONTENIDO DE S EN EL FE, LA BASICIDAD DE LA ESCORIA Y LA TEMPERATURA DE COLADA

FIGURA 10

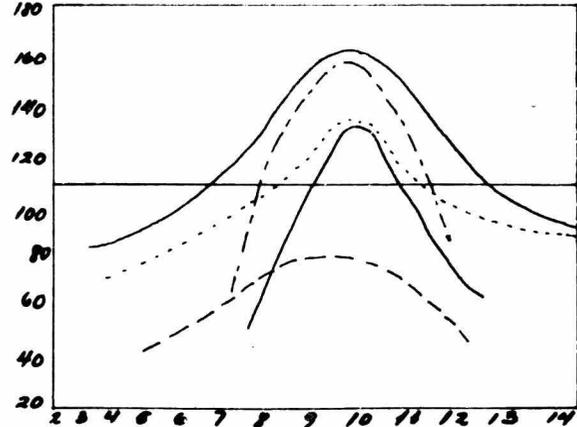
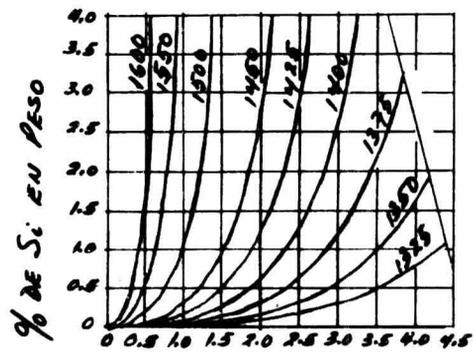


FIGURA 11



ISOTERMAS C-Si

FIGURA 12

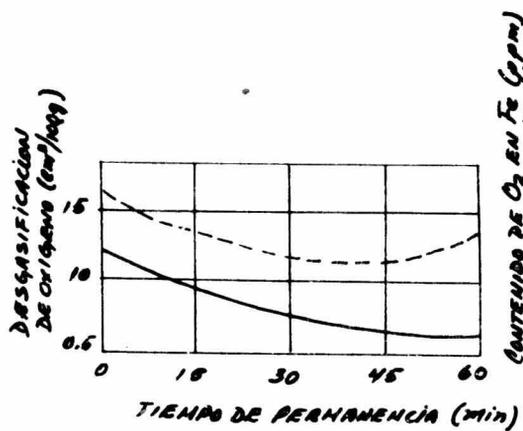


FIGURA 13

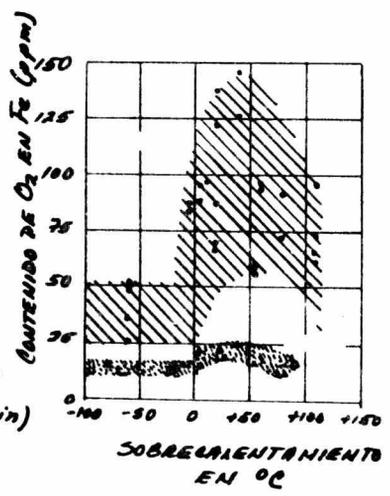


FIGURA 14

6.2 COMPARACION ECONOMICA DE LOS 3 METODOS DE FUSION

INTRODUCCION :

Por costo de fusión se debe entender el gasto correspondiente a la transformación de la carga metálica sólida en líquida a la temperatura deseada de colada teniendo en cuenta los siguientes elementos que entran en juego durante esta fase, o sea:

- Energía Térmica.
- Mano de Obra.
- Pérdidas de Fusión (metal fuera de especificación o temperatura, etc.).
- Mantenimiento del Horno.
- Amortización de Capital.
- Varios (agua refrigerante, ventiladores, bombas, etc.).

Examinando estos elementos resulta que en los costos de fusión en general, tanto en el horno de cubilote, como en el horno de arco eléctrico y el horno de inducción los diversos conceptos inciden con los porcentajes indicados a continuación:

<u>CONCEPTOS</u>	<u>FUNDICION (%)</u>
Energía Térmica.	48
Mano de Obra.	20
Pérdidas de Fusión.	8
Mantenimiento.	8
Amortización y Varios.	16

Sería erróneo, sin embargo extender dichos valores, que intervienen en la determinación del costo de fusión a todas las fundiciones en general; cada una tiene su método de fusión propio, un trabajo distinto de la otra, personal equipo y medios de operación diversos; además de que están situados en lugares y condiciones diferentes y disponen de fuentes energéticas distintas.

Con el fin de establecer la comparación económica hay que tomar en cuenta que la energía requerida, para alcanzar una temperatura dada de vaciado, es una cantidad específica y constante para todos los métodos de fusión. En la figura (15) se muestra el contenido de energía en el hierro como una función de la temperatura. Para suministrar los requerimientos específicos de energía en el metal, se tendrán diferentes eficiencias dependiendo del tipo de horno de que se trate.

Con el objeto de obtener resultados representativos de el consumo de energía en los 3 tipos de Hornos de fusión se establecerá un balance de energía¹, tomando como base 1 ton. de metal fundido por hora.

Balance de Energía para la Fusión de Hierro colado en un Horno de Cubilote.

ecuación:

$$\Delta H_{Fe(^{\circ}C)} = \left[Hu_{(C)} \cdot 10 \cdot \frac{k.k}{100} + \Delta H_{(w)} + \Delta H_{(o)} \right] \cdot \eta_{TOTAL}$$

donde:

$$\Delta H_{Fe(^{\circ}C)} = \text{Contenido de calor del Fe en } \frac{\text{Kcal}}{\text{Ton.}}$$

$$Hu_{(c)} = \text{Calor de combustión del coque}$$

$$\frac{K.K}{100} = \text{Carbono disponible } \frac{\text{Kg Carbono}}{100 \text{ Kg Fe}}$$

$$\Delta H_w = \text{Contenido de calor del gas de combustión } \frac{\text{K Cal}}{\text{Ton Fe.}}$$

$$\Delta H_{(o)} = \text{Calor de Combustión debido a la oxidación. } \frac{\text{K Cal}}{\text{Ton Fe.}}$$

$$\eta_{\text{(Total Calor)}} = \eta_{\text{(Transmitida)}} \cdot \eta_{\text{(Gastada)}}$$

Entonces tomando como base 1 tonelada se tiene lo siguiente:

$$\text{Coque total relación } 7.75 - 1 = \frac{775 \text{ kg Coque}}{100 \text{ Kg Fe}}$$

$$\text{Contenido de Carbono} = 92\% \eta$$

(En Coque Americano).

$$\begin{aligned} \text{Consumo de aire} &= 750 \text{ Nm}^3/\text{Ton Fe.} \\ \text{Calor específico} &= 0.32 \text{ KCal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{Nm}^3 \end{aligned}$$

Temperatura del aire de soplado	=	500°C
Calor de Oxidación	=	40000 K Cal/Ton Fe
η (Total de Calor)	=	34.5% y es F (Aire soplado, coque total y ϕ del Horno).

OPERACIONES

$$\Delta H_{Fe(1500^{\circ}C)} = [7944 \times 10 \times 7.13 + 750 \times 0.32 \times 500 + 40000] \cdot 34.5\%$$

$$1 \text{ KWH} = 860 \text{ K Cal. } \Delta H_{Fe(1500^{\circ}C)} = 250.6 \times 10^3 \text{ K Cal/Ton}$$

$$\Delta H_{Fe(1500^{\circ}C)} = 291.4 \text{ KWH/Ton.}$$

Balance de Energía para la fusión de Hierro Colado en un Horno de Arco

$$\Delta H_{Fe(0^{\circ}C)} + \Delta H_{escoria} = \left[\frac{P_{\text{Horno}}}{G} \times \eta_{el} - \frac{P_{\text{Térmicas}}}{G} \right] = \frac{\text{KWH}}{\text{Ton}}$$

Como la Potencia del Horno está en función de los ciclos de fusión nos queda:

$$P_{\text{Horno}} = P_1 + P_2 + (P_3)$$

Por lo tanto sustituyendo en la ecuación original e introduciendo un nuevo término (J) que es la duración de los ciclos en horas.

$$\Delta H_{Fe(0^{\circ}C)} + \Delta H_{esc(0^{\circ}C)} = \left[\frac{P_1}{G} \eta_{el} - \frac{P_t}{G} \right] \cdot J_1 + \left[\frac{P_2}{G} \eta_{el} - \frac{P_t}{G} \right] \cdot J_2 + \left[\frac{P_3}{G} \eta_{el} - \frac{P_t}{G} \right] \cdot J_3$$

Donde:

$$\Delta H_{Fe(0^{\circ}C)} = \text{Contenido de calor del Fe en } \frac{\text{KWH}}{\text{Ton.}}$$

$$\Delta H_{escoria(0^{\circ}C)} = \text{Contenido de calor de la escoria } \frac{\text{KWH}}{\text{Ton.}}$$

$$P_1 + P_2 + (P_3) = \text{Potencia del Horno en KW.}$$

$$P_t = \text{Pérdidas Térmicas.}$$

$$G = \text{Toneladas a fundir.}$$

$$J = \text{Duración de los ciclos en horas.}$$

$$\eta_{el} = \text{Factor de potencia.}$$

Haciendo el balance de energía para 1 tonelada tenemos:

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia} &= 438 \text{ KVA} && \text{con } \cos \varphi = 0.8 \\
 G &= 1 \text{ Tonelada.} \\
 T_1 &= 15 \text{ minutos (Fusión)} = .25 \text{ hr.} \\
 T_2 &= 5 \text{ minutos (incluye maniobras, desescorias y cualquier} \\
 &\quad \text{imprevisto)} = .083 \text{ hr.}
 \end{aligned}$$

$$\eta_{el} = 0.92$$

$$P_t = 46.2 \text{ KW}$$

Período (1) Para temp. de fusión.

$$\left[\frac{350.4}{1} \times 0.92 - \frac{46.12}{1} \right] \times 25 = \dots$$

$$(276.16) \cdot 25 = 69.04 \text{ KWH/Ton a } 1350^\circ\text{C}$$

Período (2) Para temp. de colada.

$$P_2 = \text{es el } 70\% \text{ de } P_1 \therefore P_2 = 0.7 \times P_1$$

$$P_2 = 245.2$$

$$\left[\frac{245.2}{1} \times 0.92 - \frac{46.2}{1} \right] \times (0.083) = \dots$$

$$(179.38) (0.083) = 14.88 \text{ KWH/Ton para sobrecalentar de } 1350^\circ\text{C a } 1500^\circ\text{C.}$$

Gasto de Energía Total:

$$\frac{350.4}{1} \times (.25) + \frac{245.2}{1} (0.083) = \dots$$

$$87.5 + 20.35 = 107.85 \text{ KWH/Ton.}$$

$$\Delta H_{Fe} = 107.85 \text{ KWH/Ton.}$$

Balance de energía para la fusión de Hierro Colado en un Horno de Inducción

$$\Delta H_{Fe} (^{\circ}\text{C}) + \Delta H_{escoria} (^{\circ}\text{C}) = \left[\frac{P_{real}}{G} \times \eta_{el} - \frac{P_t}{G} \right] T = \text{KWH/Ton}$$

$$\Delta H_{Fe} = \text{Contenido de calor del Hierro a } 1500^\circ\text{C} = 387 \text{ KWH/Ton}$$

$$\Delta H_{escoria} = \text{Contenido de calor de la escoria a } 1500^\circ\text{C} = 500 \frac{\text{KWH}}{\text{Ton.}}$$

P_{real} = Potencia del Horno en KW

P_t = Pérdidas térmicas en KW

γP_t = F (Tamaño del horno, maniobras, eficiencia específicas).

G = Toneladas a fundir.

T = Ciclos de Fusión.

$$\eta_{el(\text{total})} = \eta_{\text{transmitido}} \times \eta_{\text{de inducción}} = 0.95 \times 0.8 = 0.76$$

y $\eta_{\text{de inducción}} = F$ (espesor de la pared de refractario y del tamaño del horno).

Haciendo el balance de energía tenemos:

$$P_{\text{real}} = 251 \text{ KW.}$$

$$P_t = 17.5 \text{ KW.}$$

$$G = 1 \text{ Tonelada de Fe fundido.}$$

$$\eta_{el(\text{total})} = 0.76$$

$$T = .29 \text{ hr. (contando tiempos muertos)}$$

OPERACIONES

$$\left[\frac{251}{1} \times 0.76 - \frac{17.5}{1} \right] \times 0.29 = 50.24 \text{ KWH/ Ton.}$$

GASTO DE ENERGIA

$$\left[\frac{251}{1} \times 0.29 \right] = 72.79 \text{ KWH/ Ton.}$$

$$H_{\text{Fe}} (1500 \text{ }^\circ\text{C}) = 50.24 \text{ KWH/ Ton} + 72.79 \text{ KWH/Ton.}$$

$$H_{\text{Fe}} (1500 \text{ }^\circ\text{C}) = 123 \text{ KWH/Ton}$$

Resumiendo los gastos de energía por tonelada de hierro colado fundido son:

Horno de Cubilote ----- 291.4 KWH/Ton.

Horno de Arco ----- 107.8 KWH/Ton.

Horno de Inducción ----- 123 KWH/Ton.

Comparación de costos de Fusión de 1 tonelada de Hierro producido en Horno de Cubilote, Horno de Arco y Horno de inducción.

Materias Primas	Horno Cubilote	Horno Arco COSTO (\$)	Horno Inducción
Chatarra de Acero.	260.00	624.00	624.00
Chatarra de Hierro.	690.00	--	184.00
Retorno.	--	330.00	165.00
Arrabio.	--	173.00	86.50
Coque.	385.00	354.25	323.50
Fundentes.	10.00	37.50	--
Ferroaleaciones.	248.20	190.00	130.8
Electrodos.	--	37.50	--
Refractario.	50.00	12.50	22.8
Energía Eléctrica.	87.60	32.3	37.0
MANO DE OBRA:			
Labor Directa.	234.00	35.7	40.3
Mantenimiento.	10.00	13.50	13.0
Servicios Auxiliares.	1.50	3.75	2.5
Costos Estimado por la Tonelada de Hierro Fundido:	1976.50	1844.00	1628.9
Diferencia en el costo de fusión respecto al Horno de Inducción.	+ 21%	+ 13.2%	0

6.3 CONCLUSIONES

Debido a la elevación en los precios de la materia prima para la fusión, las exigencias cada vez más fuertes de piezas de alta calidad, las dificultades en la consecución de mano de obra calificada y la creación de leyes contra la contaminación ambiental, se requiere de un equipo de fusión que satisfaga los requerimientos de un fundición, en lo que respecta a suministro de metal de buena calidad, así como ventajas económicas.

De los tres equipos de fusión que se han estudiado, el Horno de Inducción es el que mejores ventajas tiene hasta el momento.

A) Costo de materias primas.

El bajo costo de la carga para un horno de inducción debe considerarse en primer lugar ya que representa la mayor recuperación posible de la inversión.

B) Control de Temperatura.

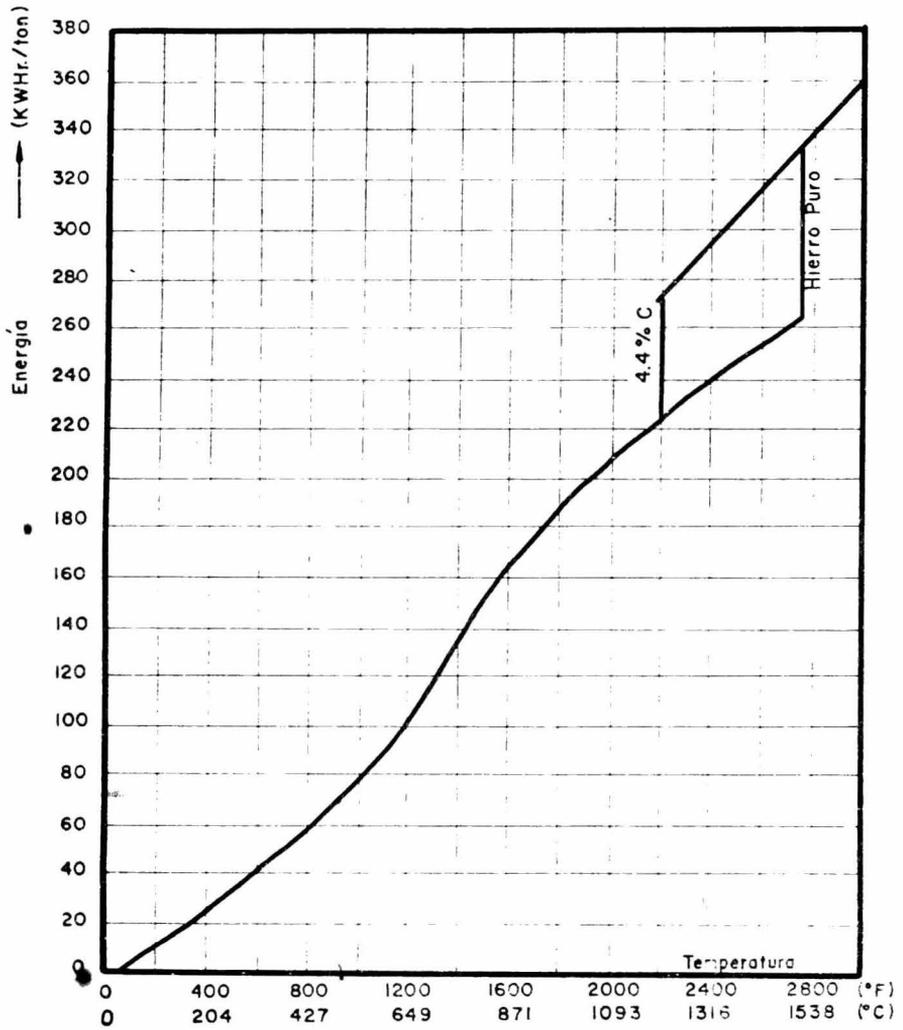
El horno de inducción tiene la habilidad para corregir y mantener la temperatura dentro de los límites deseados.

C) Control de aleación.

El horno de inducción proporciona la habilidad para producir el análisis exacto de metal fundido.

D) Condiciones de trabajo.

Con el equipo de fusión del horno de inducción se tienen mejores condiciones de trabajo ya que no hay tanto ruido, polvo y humo. Esto trae como consecuencia menor número de accidentes, menos piezas rechazadas, menor desperdicio de metal y más ganancias.



Contenido de Energía del Hierro como una Función de la Temperatura

FIG 15

7.0 BIBLIOGRAFIA

- 1.- V. Kondic, Ph. D.
Metallurgical Principles of Founding.
Ed. Edward Arnold
1968.
- 2.- H. D. Pantke
Process Metallurgical
Thyssen Purofer, Düsseldorf
1970.
- 3.- Flemings M. C.
Solidification Processing
1a. Edición, Mc. Graw Hill
1974.
- 4.- H. D. Merchant and Mitar Beiter
Solidification of cast iron
Ed. Verlag, New York.
1968
- 5.- Hayden H. W., W. G. Moffat y John Wulff
Propiedades Mecánicas
Tomo III de Ciencia de Materiales
Ed. Limusa-Wiley, S.A.
1968
- 6.- Davis H. E., G. E. Troxel and C.T. Wiskocil
The Testing and Inspection of Engineering Materials
2nd. ed. Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New York.
1958
- 7.- Neumann V. F.
Verfahrenstechnische und metallurgische gegenüberstellung beim
schmelzen von Gubeisen in Kupolofen und Induktionstiegelofen.
Sonderdruck aus Elektrowärme International
1971.
- 8.- Neumann V. F.
Metallurgische Schmelzföhrung
Brown, Boveri & Cie. Germany
1972.
- 9.- "AFS"
El Cubilote y su Operación ✓
3a. Edición.

10. - Grover C. Arrnwine
Cupola Melting Facts
British Cast Iron Research Association
1974
11. - Love A. L. & Ruprecht D. R.
Determining the economic Feasibility of enrichment of the Cupola
Wind
Modern Casting March 1974
12. - Leyshon H. J.
The Divided Blast Cupola
Modern Casting February 1974.
13. - Velasco H.
Materiales refractarios en hornos de Cubilote
Cía. A. P. Green, S.A.
14. - Charles D. Schmidt
The Direct Arc Furnace in the Cast Iron Industry
1st. AFS Electric Ironmelting Conference.
1969.
15. - Dell W. J.
Melting Cast Irons in Arc Electric Furnaces
1st. AFS Electric Ironmelting Conference
1969.
16. - Calamari Elio
Hornos Electricos de Fusión.
2a. Edición Editecna- Madrid
1970.
17. - Troell P. T.
Refractory Brick for Electric Arc
1st. AFS Electric Ironmelting Conference
1969.
19. - Heine H.G.
Induction Furnaces
1st. AFS Electric Ironmelting Conference
1969.
20. - Heine H.G. Y Hasler B. A.
Fusión por inducción. Su comparación con otros métodos.
4o. Congreso de la Industria de la Fundición.
Brown Boveri, U.S.A.

- 21.- Maldonado J.M.
El horno de Inducción moderno, características y funcionamiento
Inductomex, S.A. de C.V.
- 22.- Araujo T.R.
Refractarios para hornos de Inducción ,
Harbison Walker flir, S.A.