

48



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

LA INOCULACION EN LOS HIERROS COLADOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
EFRAIN LOPEZ BARBOSA

ASESOR: ING. SAMUEL PEREZ DIAZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

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

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

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

La inoculación de los hierros colados

que presenta el pasante: Araceli López Barco
con número de cuenta: 11111111 para obtener el título de:
Ingeniero Técnico Electricista

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 3 de diciembre de 2001

PRESIDENTE	<u>Ing. Samuel Pérez Díaz</u>	
VOCAL	<u>Ing. Víctor Hugo Lanza Crocco</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Eusebio Reyes Carranza</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. José Castillo Sánchez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. José Frías Flores</u>	

AGRADECIMIENTOS

DOY GRACIAS :

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
"FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES-CUAUTITLÁN", por
consentirme, enseñarme y prepararme.

A mi asesor Ingeniero Samuel Pérez Díaz, por brindarme su tiempo y
su grandeza.

A mis compañeros, amigos y familiares. Ya que siempre están a mi
lado en todo momento.

A DIOS, por darme todo y por que todavía lo sigue siendo. Y me
dio el regalo de conocerlos a ustedes. GRACIAS.

LA INOCULACIÓN EN LOS HIERROS COLADOS

OBJETIVOS DE LA TESIS:

- Efectuar un estudio e investigación acerca de la inoculación de los hierros colados, tema sobre el cual se tiene muy poca información en los libros de texto referentes al estudio de los metales.
- Que estos conocimientos presentados en el trabajo de tesis puedan servir a la comunidad estudiantil, que se interese por aprender acerca del tema mencionado.

Í N D I C E

1. INTRODUCCIÓN

2. EL DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

3. LOS HIERROS COLADOS O FUNDICIONES

- 3.1 Historia de hierro colado o fundiciones
 - 3.1.1 Tipos de mineral de hierro
 - 3.1.2 Tratamiento de prebeneficiado de los minerales
 - 3.1.3 Operación de beneficiado
- 3.2 Definición de los hierros colados
- 3.3 Hierro fundido gris
- 3.4 Tamaño y distribución de las hojuelas de gráfito
- 3.5 Propiedades mecánicas y aplicaciones del hierro fundido gris
- 3.6 Hierro fundido nodular
- 3.7 Hierro fundido blanco
- 3.8 Hierro fundido maleable

4. LA INOCULACIÓN DEL HIERRO

- 4.1 Definición de inoculación
- 4.2 Generalidades de inoculación
- 4.3 Sensibilidad al temple
- 4.4 Factores que determinan la sensibilidad de temple
- 4.5 Algunos aspectos básicos de la solidificación
- 4.6 Factores metalúrgicos
 - 4.6.1 Tamaño de las células eutécticas
 - 4.6.2 El grado de sobrefusión
 - 4.6.3 El efecto del metal oxidado
- 4.7 El proceso de inoculación
- 4.8 Cualidades de un hierro inoculado
- 4.9 Efectos sobre el hierro
- 4.10 Efectos de la inoculación sobre las características mecánicas
- 4.11 Relación de temperatura tiempo
- 4.12 Resumen de los requisitos prácticos de un inoculante
 - 4.12.1 Composición de un inoculante
- 4.13 Algunas definiciones

5. PROCEDIMIENTOS DE INOCULACIÓN

- 5.1 Inoculación en cuchara
 - 5.1.1 Materiales para inoculación en cuchara
 - 5.1.2 Elección de inoculación para cuchara
 - 5.1.3 Cantidad de adiciones para cuchara
- 5.2 Inoculación en el molde (tardía)
 - 5.2.1 Materiales disponibles para la inoculación tardía.
 - 5.2.2 ¿Qué proceso y cuanto?
 - 5.2.3 Características del fundamento de la inoculación en el chorro del metal
 - 5.2.4 Problemas con alto volumen
- 5.3 Inoculación en el hierro dúctil
 - 5.3.1 Prácticas de inoculación utilizadas en la producción de hierro dúctil
 - 5.3.2 Método preferible y cantidad
 - 5.3.3 Inoculación en el molde para hierros nodulares

6. PRODUCTOS INOCULANTES COMERCIALES

- 6.1 Inoculin 10
 - 6.1.1 Modo de empleo del inoculin 10
 - 6.1.2 Ventajas del inoculin 10
- 6.2 Inoculante 63
 - 6.2.1 Ventajas del inoculin 10
- 6.3 Inotab (para inoculación en el molde)
 - 6.3.1 Recomendación de uso
 - 6.3.2 Instrucciones de empleo
- 6.4 Inotab 6
 - 6.4.1 Tabletas para inocular instantes antes de la solidificación en el mismo molde
 - 6.4.2 Ventajas del inotab 6
- 6.5 El inoculante SMZ
 - 6.5.1 Propiedades de un inoculante efectivo
 - 6.5.2 Efectividad del SMZ

7. CONCLUSIONES

8. BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

Los hierros colados son el grupo de metales mas utilizados en el mundo para producir piezas por medio de los diversos procesos de fundición. Es por ello que éstas aleaciones son de gran importancia para el Ingeniero.

Las aleaciones hierro-carbono tienen una característica muy especial: cuando se enfrían rápidamente desde el estado líquido como en el caso de la fundición, durante la solidificación y enfriamiento se forman constituyentes que les proporcionan a la pieza una dureza sumamente alta que prácticamente las imposibilitan para aprovecharlas en la mayoría de los casos. Esta alta dureza entre otras cosas dificultan o hacen imposible su mecanizado para darles el acabado superficial y dimensiones finales ó las hacen tan quebradizas que ya no funcionarían para muchos usos.

Con éste rápido enfriamiento, se pueden formar varios constituyentes como la martensita, en caso de los aceros para nombrar solo uno, y en el caso de los hierros colados se forma cementita o sea carburo de hierro.

Es una ventaja que el hierro y el acero no se cuecen en moldes permanentes o sea metálicos, ya que a causa de su buena conductividad térmica las piezas coladas se enfriarían mas rápidamente, y los problemas señalados serían un dolor de cabeza para los ingenieros dedicados a los procesos de fundición.

Debido a su alto punto de fusión, el hierro y el acero suelen colarse principalmente en moldes de arena de sílice que por otra parte es el material de moldeo mas económico que existe.

La arena de sílice tiene la ventaja de que conserva la pieza colada caliente durante mas tiempo ya que es un material refractario y por lo tanto de menor conductividad térmica. Así el tiempo de enfriamiento de la pieza resulta mayor.

Aún con ésta ventaja que proporciona el molde de arena y ya refiriéndose en particular a los hierros colados, si se le dá poco tiempo a la pieza antes de romper el molde y extraerla, puede resultar la dureza perjudicial antes mencionada. Otras piezas por ser pequeñas o las grandes pero con paredes de espesores muy bajos como; $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{4}$ de pulgada por ejemplo, enfrían muy rápido aunque se dejen enfriar totalmente dentro del molde. Así la ya repetida aparición de la dureza resulta en estas piezas aunque se cuelen en molde de arena.

Una de las soluciones para evitar éste problema por parte de los fundidores, ha sido manejar adecuadamente la composición química de las piezas coladas, para obtener las propiedades físicas y mecánicas que le han dado preferencia al hierro colado como son; su gran maquinabilidad, absorción de vibraciones, facilidad de fabricación, una resistencia suficiente, etc.

Aún así, dichos problemas de dureza suelen presentarse por ejemplo, porque las piezas tienen al mismo tiempo espesores gruesos y delgados que enfrían a diferentes gradientes o velocidades. La solución final para casi eliminar tales problemas ha sido la INOCULACIÓN, que es el tema estudiado en el presente trabajo. La inoculación es una pequeña adición de varios materiales, hecha en los últimos momentos antes de colar el metal líquido, con lo cual se modifica sensiblemente la manera en que solidificará la pieza de hierro colado; adición que no tiene el mismo efecto si se agrega al horno o a la olla de vaciado mucho tiempo antes de colarlo en el molde.

Este mecanismo de inoculación es el que será analizado en el presente trabajo.

2. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

2.1 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO

Como ya sabemos, el hierro es el constituyente principal de todos los aceros, del hierro colado, del hierro maleable y de otras muchas aleaciones ferrosas. El estudio del hierro puro por medio del microscopio ha llevado a la conclusión de que sus átomos, al solidificarse, se colocan de tal manera que forman una estructura cristalina cúbica. Se entiende que el hierro puro es hierro comercial, tal como el electrolítico o el de lingote, que solamente tiene trazas de impurezas.

Haciendo estudios térmicos del hierro puro se ha encontrado que presenta puntos de transformación o críticos a dos temperaturas diferentes: 910°C y 1390°C . Esto nos indica que existen tres formas diferentes de hierro dentro de períodos sucesivos de temperatura. Con ayuda de los rayos X se determinó que a la temperatura de 910°C el hierro posee una estructura cristalina centrada, en la cual los átomos del cubo unidad del hierro están colocados en cada una de sus esquinas, con un átomo adicional en el centro del cubo.

De los 920°C a los 1390° la estructura es diferente y tiene una estructura cristalina centrada en las caras, los átomos del cubo unidad del hierro se encuentran en cada esquina y en el centro de cada una de las caras de cubo. Esta estructura se transforma en la primera entre los 1390°C y los 1525°C . Estas modificaciones del hierro, llamadas alotrópicas se conocen como alfa, gamma y delta, de acuerdo con el orden en que aparecen durante su calentamiento. Como cada una de estas modificaciones alotrópicas aparece al calentar o enfriar, a las temperaturas críticas habrá una recrystalización completa a la forma cristalina que es estable dentro de ese período de temperatura.

Hay otro cambio en las propiedades físicas dentro de un pequeño período a los 770°C ., en el que el hierro alfa pierde o gana su propiedad magnética, de acuerdo con que si se calienta o si se enfría. Es decir, el hierro alfa es magnético, en tanto que el gamma y el

delta no son magnéticos. Este cambio de propiedad no es acompañado por un cambio de estructura cristalina.

El diagrama de constitución o equilibrio del sistema hierro-carbono que se encuentra en la figura 2.1, trata solamente de la constitución del sistema, o sea que fases están presentes y en qué cantidad, y no de su estructura. La composición se encuentra anotada horizontalmente y la temperatura, verticalmente, así que cualquier punto del diagrama representa una composición y temperatura definidas: cada valor se encuentra refiriéndose al eje apropiado.

La línea A-B-C-D es la del líquidus, arriba de la cual todas las aleaciones están fundidas, y de abajo de ella las aleaciones están parcial o totalmente sólidas. La línea A-H-J-E-C-F es la del sólidus y debajo de ella las aleaciones están completamente sólidas. El punto C es el eutéctico del sistema. El área A-B-J-N muestra que tiene lugar una reacción peritética. Si prolongamos la línea J-E hasta el punto A, eliminaríamos el área A-B-J-N, y entonces la línea A-E-S-K-F-D-C correspondería a un diagrama eutéctico con solubilidad parcial al estado sólido, siendo E-S la línea de solubilidad parcial. Prolongando la línea J-E hasta A, se forma el diagrama simple de solución sólida, presentando recristalización al estado sólido, y un punto eutectoide S.

Con respecto a los valores correspondientes a las temperaturas de las líneas E-C-F y P-S-K se pueden encontrar datos que varían, respectivamente, desde 1130°C, hasta 1152°C., y desde 720° C, hasta 725° C., de acuerdo con diferentes autores.

Lo mencionado anteriormente ocurre también con las concentraciones de los puntos S y C; para el primero se tienen valores desde 0.8% de carbono hasta 0.9% de carbono y para el segundo desde 4.1% de carbono hasta 4.3% de carbono.

El diagrama indica que el hierro disolverá carbono con la formación de una solución sólida, que se satura con un contenido de 1.7% de carbono a 1130° C. (punto E). Si la solución sólida pudiera mantenerse sin cambio total por medio de un enfriamiento

suficiente rápido, encontraríamos el componente llamado Austenita. En la práctica, el enfriamiento produce una descomposición de la solución sólida, cuyo primer paso recibe el nombre de Martensita, es decir, es el primer producto de la descomposición de la austenita. En un enfriamiento más lento o en la práctica, un recalentamiento, nos conduce al segundo paso de la descomposición, formándose la Troostita, cuya descomposición nos da la Sorbita. Finalmente, un enfriamiento muy lento del acero nos produce el último paso de la descomposición de la solución sólida, que es el eutectoide llamado Perlita.

Resumiendo, la descomposición de la austenita es como sigue:

Austenita – Martensita – Troostita – Sorbita – Perlita.

En los aceros no se encuentran generalmente el grafito ni el eutéctico C o Leodeburita.

Definiremos ahora las fases estables en las áreas representadas en la figura No.1.

Ferrita.

Se define como el hierro alfa o hierro delta que contiene cualquier otro elemento en solución sólida. El hierro alfa que existe de una temperatura de 910°C para abajo, es capaz de retener en solución a elementos tales como el C, Ni, Si y P. Tiene una solubilidad máxima de 0.035% para el carbono a una temperatura de 725°C , la cual decrece según la línea de solubilidad al estado sólido P-Q llegando a ser menor de 0.01% a la temperatura ambiente.

Austenita.

Como ya hemos visto, la estructura del hierro gamma es estable entre los 910° C y los 1390° C, la cual, como se aprecia en el diagrama, comprende en la línea de 0% de carbono una unión del área en la cual existe una solución sólida llamada austenita.

La austenita, como otros constituyentes del diagrama, tiene ciertas relaciones definidas de solubilidad que dependen de la temperatura y de la composición del área N-J-E-S-G en la cual es estable. La austenita se comporta como una solución líquida y posee muchas de las mismas propiedades, sus componentes originales se combinan como una entidad, dando una composición indefinida, poseyendo características completamente nuevas. Como la austenita es uno de los constituyentes de diagrama hierro-carbono y tiene una unión con el hierro gamma, puede definirse como una solución sólida de carbono en hierro gamma.

Con respecto a sus características de solubilidad, la austenita es capaz de retener en solución sólida a 1.7% de carbono, a 1,130° C. Sin embargo, la austenita puede retener en solución sólida cualquier cantidad de carbono entre 0 y 1.7% dependiendo de la temperatura y composición como se aprecian en el área N-J-E-S-G.

Veamos ahora los productos de descomposición de la austenita, para después continuar con las fases estables del diagrama.

Martensita

Representa el primer paso de la descomposición de la solución sólida. Se obtienen enfriando bruscamente piezas pequeñas de hierro a alta temperatura. Se caracteriza por su estructura en forma de agujas, que se interceptan casi a 60 grados, produciendo una apariencia triangular característica de la estructura martensítica. Si el enfriamiento de la solución sólida tiene lugar a una velocidad un poco menor, se produce el siguiente paso en

la descomposición de la solución sólida, y entonces encontramos la martensita asociada con la troostita. La martensita posee la dureza máxima de todos los productos de descomposición de la austenita.

Troostita

Se considera como el producto de un enfriamiento algo más lento que el necesitado para producir la martensita. En la práctica industrial la troostita se forma casi siempre por revenido o recalentado del acero martensítico a una temperatura menor de 400°C. Se colorea rápidamente con los reactivos de corrosión. Mientras más cercana está la temperatura de recalentamiento a 400°C, mayor será la cantidad relativa de troostita y el material será más suave, comparado con la martensita. Es decir, que regulando la temperatura puede alterarse dentro de límites bastante amplios la cantidad de troostita formada y por consiguiente la dureza o suavidad del material.

Sorbita

Puede considerarse como troostita parcialmente descompuesta o como perlita imperfectamente formada. Su relación con la troostita se puede mostrar por el calentamiento de una pieza que contienen troostita a una temperatura entre 400° y 700°C.; por otra parte, su cercanía con la perlita puede ser demostrada por el enfriamiento de un acero, calentado, a tal velocidad que se forme perlita. Su estructura es semejante a aquella constituida por cristales pequeños. La sorbita constituye otro paso en la descomposición de la austenita hacia la perlita. La sorbita es más dúctil que la troostita.

Perlita.

Es el último paso de la descomposición de la austenita y constituye una fase estable en el diagrama. Con un enfriamiento moderadamente lento, la descomposición de la austenita conteniendo 0.85% de carbono, resulta en la formación de un constituyente conocido como perlita, a una temperatura de 725°C. La perlita está compuesta de placas o láminas alternadas de ferrita y cementita. Se ha dado este nombre debido a la semejanza que tiene en ciertas condiciones, con la madre perla.

La perlita se define como un agregado laminar de ferrita y cementita, que es, químicamente y estructuralmente, de composición eutectoide. Su composición está en proporción de 7 de ferrita libre a uno de cementita, aproximadamente. Esta proporción puede considerarse como la estructura normal que es producida durante el enfriamiento lento del horno.

La ferrita que no está incluida en la perlita se designa frecuentemente como libre, masiva, pro-eutectoide o no eutectoide. Con la cementita que no está incluida en la perlita, se usan estos mismos términos. Se designa generalmente con los términos libre y, algunas veces, pro-eutectoide.

Cementita.

El diagrama hierro-carbono no incluye el período usual de composiciones, pues las aleaciones con más de 5% de carbono no tienen importancia comercial. Actualmente los límites varían entre 0 y 6.67% de carbono. La razón de estos límites es que el hierro y el carbono se combinan para formar un compuesto intermetálico, que contiene 6.67% de carbono y cuya fórmula es Fe_3C o cementita. Se ha encontrado que en las aleaciones hierro-carbono, incluyendo aceros y fundición blanca, la reacción se verifica como si los componentes fueran hierro y cementita, más bien que hierro y carbono.

A pesar de que la cementita es uno de los constituyentes de los aceros y hierro vaciados, es imposible producir el compuesto puro en la práctica. Esto se debe al efecto modificante de los elementos, ya sean agregados especialmente o contenidos en las composiciones comerciales. A altas temperaturas, la cementita se descompone en hierro y carbono, y, por lo tanto, no tiene un punto de fusión definido.

Ledeburita.

Es el eutéctico del sistema hierro-carbono y la temperatura eutéctica es de 1130°C .; es una mezcla mecánica de 52% de cementita, aproximadamente, y 48% de austenita saturada.

En el período de hierro colado, o sea arriba de 1.7% de carbono, los constituyentes metalográficos característicos son las dos formas de grafito y el eutéctico. Una de ellas es de agujas o venas, y es el grafito cristalino. La otra forma es el carbón grafitico de temple, que se produce en la manufactura del hierro maleable; químicamente se compone de carbono tan cristalino como el grafito, pero físicamente es bastante diferente con respecto a sus propiedades. Se encuentra como manchas negras irregulares.

Conocidas las fases podemos dividir nuevamente al diagrama en regiones, basándonos en el contenido de carbono.

No.	%Carbono	Nombre
1	0.00	Ferrita
2	0.0 – 0.85	Aceros hipoeutéctoides
3	0.85 aprox.	Aceros eutéctoides
4	0.85 – 1.70	Aceros hipereutéctoides
5	1.70 – 4.30	Hierros colados hipoeutéctoides
6	4.30	Hierro colado. Eutéctico Ledeburita
7	4.30 – 6.67	Hierros colados hipereutécticos
8	6.67	Cementita

Como se ha dicho, la transformación de hierro gamma a hierro alfa sucede a la temperatura de 910° C en el hierro puro.

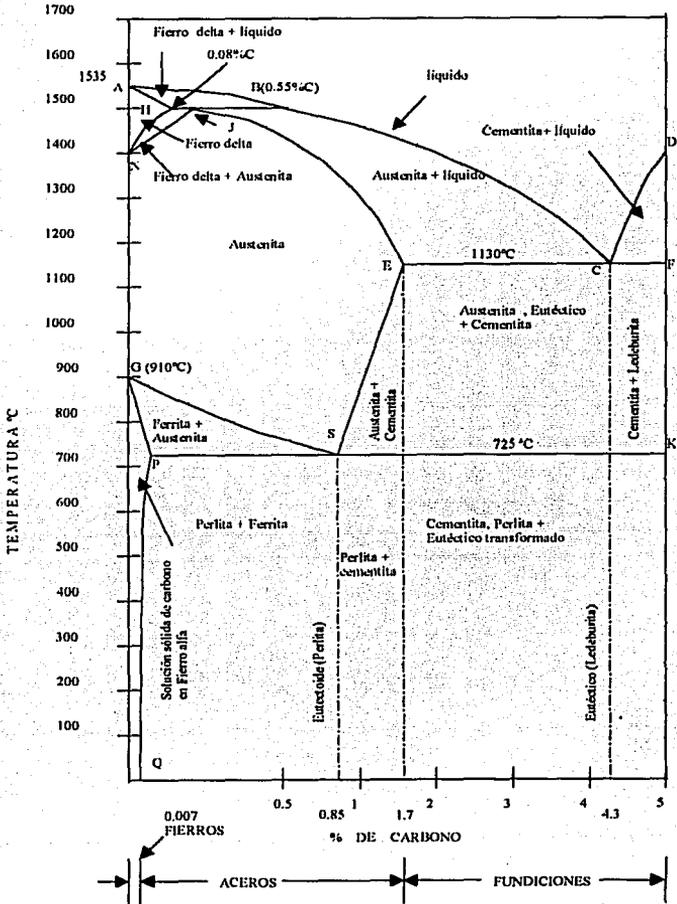
Si al hierro gamma se le agregan cantidades variables de carbono de 0 a 0.85%, la temperatura a la cual se forma ferrita o hierro alfa del hierro gamma, disminuye de 910 a 725° C. Esto queda indicado en el diagrama por la línea G-S que muestra la solubilidad de la ferrita en la austenita, y que se conoce como curva de solubilidad de la ferrita.

A una temperatura de 1130° C, o sea la eutéctica, la austenita retiene en solución sólida a 1.7% de carbono. Si la austenita de esta composición se enfría lentamente, precipitará la cementita de la solución sólida. Con esta precipitación de la cementita que contiene 6.67% de carbono, el contenido de este elemento en la austenita restante disminuye y, por lo tanto, la temperatura a la cual se segrega la cementita, baja también. El enfriamiento lento de un acero es acompañado por una precipitación constante de cementita hasta que se alcanza la temperatura de 725° C, donde la austenita restante contiene 0.85% de carbono. La solubilidad de la cementita en la austenita a diferentes temperaturas se aprecia en la curva E-S en la figura No. 2.1, y se conoce como curva de solubilidad de la cementita, debido a que a lo largo de ella se precipita la cementita.

Sin tener en cuenta el contenido original de carbono de la austenita, se ha visto que a 725°C , el contenido de carbono llega a ser de 0.85%. A esta temperatura la austenita de esta composición recristaliza formando una mezcla de cementita y ferrita, o sea el eutectoide perlita representado por el punto S en el diagrama, que es la intersección de la curva de solubilidad de la ferrita G-S, y de la curva de solubilidad de la cementita E-S.

DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

Figura 2.1



3. LOS HIERROS COLADOS Ó FUNDICIONES

3.1 HISTORIA DEL HIERRO COLADO Ó FUNDICIONES

El hierro se descubrió en algún momento de la edad de bronce. Probablemente se sacó de entre las cenizas de fuegos encendidos cerca de los depósitos de minerales de hierro. La utilización del metal creció, sobrepasando finalmente al bronce en importancia. La edad del hierro se ubica generalmente alrededor del año 1200 a.C., mediante hallazgos de artefactos hechos de hierro en la gran pirámide de Gizeh en Egipto, que data del 2900 a.C.

En Israel se han descubierto hornos para el beneficio del hierro que datan del 1300 a.C. En Asiria (al norte de Irak) se fabricaron por el año 1000 a.C. carros de hierro, espadas y herramientas. Los romanos heredaron el trabajo del hierro de sus provincias, principalmente de Grecia, y desarrollaron la tecnología a nuevas alturas y la difundieron a través de Europa. Las antiguas civilizaciones aprendieron que hierro era más duro que el bronce y que adquiriría un mayor filo y más fuerte.

La invención del cañón en Europa durante la Edad Media creó la primera demanda real de hierro; sólo hasta entonces el uso del hierro sobrepasó finalmente al del cobre y del bronce. También la estufa de fundición del hierro, como artículo doméstico de los siglos XVII y XVIII, contribuyó a incrementar significativamente la demanda del hierro.

Durante el siglo XIX, industrias como la construcción, los ferrocarriles, la construcción de barcos, la maquinaria y la industria militar, crearon un dramático crecimiento en la demanda de hierro y acero en Europa y en América. No obstante que fue posible producir grandes cantidades de arrabio (crudo) en los altos hornos, los procesos subsiguientes para producir hierro forjado y acero eran lentos. La necesidad de incrementar la productividad de estos metales básicos fue la "madre de la invención", Henry Bessemer desarrolló en Inglaterra el proceso para soplar aire a través de hierro fundido que condujo a

la invención del convertidor Bessemer (patentado en 1856). Los hermanos Pierre y Emilie Martín construyeron en Francia el primer Horno de hogar abierto en 1864. Estos métodos permitieron producir hasta 15 toneladas de acero en un solo lote (hornada), un adelanto significativo sobre los métodos anteriores.

La expansión de los ferrocarriles en Estados Unidos después de la Guerra Civil creó una enorme demanda de acero. Entre 1880 y 1890 se empezaron a usar vigas de acero para la construcción en cantidades significativas. La construcción de rascacielos empezó a depender de este acero estructural.

Hacia el final del siglo XIX, fue posible disponer de electricidad en cantidades suficientes, se usó esta fuente de energía para producir acero. El primer horno eléctrico comercial para la producción de acero se puso en operación en Francia en 1899. Para 1920 éste se había convertido en el principal proceso para fabricar aceros de aleación.

El uso de oxígeno puro en la producción de acero se inició un poco antes de la Segunda Guerra Mundial en varios países Europeos y en Estados Unidos. Los trabajos en Austria después de la guerra culminaron con el desarrollo del horno básico de oxígeno (BOF, por sus siglas en inglés de basic oxygen furnace). Éste se ha convertido en la tecnología moderna para producir acero. Alrededor de 1970 sobrepasó al método de hogar abierto. El convertidor Bessemer había sido superado en 1920 por el método de hogar abierto, y dejó de ser un método de producción comercial de acero en 1971.

Antes de que el hombre primitivo aprendiera a obtener metales de los compuestos químicos minerales, el único hierro empleado era el que se presenta naturalmente en forma "libre" o sin combinar. Este era siempre hierro meteórico, y parece ser que los meteoritos fueron una fuente de hierro para los egipcios antiguos, que llamaban al hierro "el metal del cielo". Aún en 1894, cuando el comandante Peary exploraba Groenlandia, un esquimal le mostró los restos de un enorme meteorito (con un peso aproximado de 40 toneladas) que, probablemente había suministrado durante 100 años a los cazadores esquimales, las armas para su actividad.

Sin embargo, nos ocupamos solamente del hierro, tal como se presenta combinado con otros elementos (oxígeno principalmente) en la corteza terrestre, ya que estos minerales constituyen nuestra fuente actual de suministro y no es ya necesario esperar el descenso de un meteoro.

Los minerales más importantes del hierro, son los óxidos. Estos son compuestos en los cuales el hierro está combinado con el oxígeno; pero también se emplean minerales menos ricos en carbonatos y en hidróxidos. Además de los elementos oxígeno, carbono e hidrógeno, que se combinan químicamente con el hierro, el mineral contiene también una gran cantidad de material terroso o “ganga”, que se encuentra simplemente mezclado con el mineral que contiene al hierro. Puesto que las cantidades de ganga varían, se considera que el contenido de hierro en los minerales varía también y, mientras que en algunas partes del mundo se obtienen minerales que contienen cerca del 70% de hierro, en Inglaterra se trabaja con minerales que tienen proporciones tan bajas como el 20% de hierro. Estos minerales pobres necesitan enriquecerse con mineral extranjero de mayor grado, para aumentar el rendimiento del alto horno, por tonelada de coque empleada.

3.1.1 Tipos de mineral del hierro

Las variedades de mineral de hierro más importantes son:

- a) Magnetita (Fe_3O_4), que contiene 72.4% de hierro cuando se encuentra pura pero generalmente es menor el contenido al extraerlo de la mina.
- b) Hematita (Fe_2O_3), que constituye la mayor parte de los minerales que hay en el mundo y que se presenta en varias formas –roja, marrón o negra. Contiene del 40 al 65% de hierro.
- c) Limonita y otros tipos de mineral del hidróxido, y cuyas composiciones varían de $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ y que contienen del 20 al 55% de hierro.
- d) Siderita (FeCO_3) y otros tipos de carbonatos minerales, generalmente bajo contenido de hierro.

3.1.2 Tratamientos de prebeneficio de los minerales

Antes de que pueda cargarse un mineral al alto horno, puede ser necesario un tratamiento de mineral con objeto de aumentar la eficiencia de la fundición. Este tratamiento puede incluir los siguientes procesos:

Concentración. Es la remoción de la mayor cantidad posible de desperdicio téreo o ganga, que de otra manera ocuparía espacio útil en el alto horno, reduciendo así el rendimiento. Los minerales magnéticos, por ejemplo la magnetita, pueden concentrarse en un separador magnético mientras que los minerales de hematita se tratan por lavado, lo que elimina gran parte de la ganga más ligera.

La calcinación. Esta se efectúa en un horno y se aplica a aquellos minerales que contienen una gran cantidad de humedad o de bióxido de carbono. Estas sustancias pueden causar un trabajo irregular en el alto horno y se eliminan mejor antes de beneficiar el mineral. La calcinación ayuda también a eliminar el azufre por oxidación, convirtiéndolo en bióxido de azufre. El mineral se mezcla con carbón y se carga al horno, que trabaja con tiro natural, dando así una temperatura suficientemente alta para expulsar el agua y el bióxido de carbono.

La intemperización. Es posible llevarla a cabo si el contenido de azufre es alto. El proceso consiste en amontonar el mineral extraído, a la intemperie, de manera que gran parte del azufre presente, pueda oxidarse y lavarse por la acción de la lluvia.

La sinterización. Los procesos anteriores pueden resultar en la formación de una cierta cantidad de polvo. Este polvo es rico en hierro y en consecuencia debe beneficiarse. No puede cargarse al alto horno en la forma en que se encuentra, ya que tendería a llenar los espacios entre las piedras de la carga (impidiendo así el flujo ascendente de los gases) o bien podría ser expulsado del horno. Por lo tanto, el polvo se mezcla generalmente con asfalto o con polvo de carbón, y tratado en una máquina de sinterización que produce ladrillos de "sinter".

3.1.3 Operación de beneficiado

Una vez que se ha convertido a una condición adecuada, el mineral se carga con coque y piedra caliza, al alto horno, en donde tiene lugar el beneficio. El beneficio es una operación que presenta dos aspectos:

- a) La reducción del óxido de hierro por el coque al rojo blanco y el gas monóxido de carbono que se produce.
- b) La fusión de la ganga por medio de un fundente (caliza) para formar una escoria fusible, que fluya fuera del horno.

El alto horno consiste en un tubo vertical de lámina de acero, recubierto con material refractario y con un dispositivo de carga en la parte superior y un medio para extraer el hierro y la escoria en el fondo. El aire se insufla cerca de la parte inferior del horno, y este tiro forzado aumenta la velocidad de la combustión manteniendo la alta temperatura necesaria. Una estructura completa se alza unos 30 metros y con frecuencia a más.

Durante la producción de lingote de hierro llamado arrabio, se producen grandes cantidades de gas. Este gas tiene un valor calorífico considerable, debido al monóxido de carbono que contiene y gran parte de él se queda en estufas de cuadros alternados, con objeto de precalentar el aire que se insulfá al horno. Estas estufas trabajan en forma muy similar a los regeneradores que se emplean con el horno de acero. El precalentamiento del aire insuflado, naturalmente, significa que se requerirá menos combustible; hay además otras ventajas, de las cuales son importantes los siguientes:

- a) Puesto que el combustible utiliza menos espacio, puede aumentarse el rendimiento del horno.
- b) Se introducirá menos azufre puesto que el coque contiene siempre algo de este material.

3.2 DEFINICIÓN DE LOS HIERROS COLADOS

Los hierros fundidos son aleaciones de hierro y carbono. En relación con el diagrama hierro-carburo de hierro, los hierros fundidos contienen más cantidad de carbono que la necesaria para saturar austenita a la temperatura eutéctica; por tanto, contienen entre 2 y 6.67% de carbono. Como el alto contenido de carbono tiende a hacer muy frágil al hierro fundido, la mayoría de los tipos manufacturados comercialmente están en el intervalo de 2.5 a 4% de carbono.

La ductilidad del hierro fundido es muy baja y éste no puede laminarse, estirarse o trabajarse a temperatura ambiente. La mayoría de los hierros fundidos no son maleables a cualquier temperatura; sin embargo, se funden fácilmente y pueden vaciarse o moldearse en formas complicadas que generalmente se maquinan a dimensiones finales. Como la fundición de piezas es el único proceso aplicado a estas aleaciones, se conocen como hierros fundidos.

Aunque los hierros fundidos comunes son frágiles y tienen más bajas propiedades de resistencia que la mayoría de los aceros, son baratos, pueden fundirse más fácilmente que el acero y tienen otras propiedades útiles. Además, mediante una aleación apropiada, buen control de la fundición y un tratamiento térmico adecuado, las propiedades de cualquier tipo de hierro fundido pueden variar ampliamente. Los significativos desarrollos en el control de la fundición han dado lugar a la producción de grandes tonelajes de hierros fundidos, cuyas propiedades suelen ser consistentes.

TIPOS DE HIERRO FUNDIDO. El mejor método para clasificar el hierro fundido es de acuerdo con su estructura metalográfica. Las variables a considerar que dan lugar a los diferentes tipos de hierro fundido son: el contenido de carbono, el contenido de aleación y de impurezas, la rapidez de enfriamiento durante o después del congelamiento, y el tratamiento térmico después de fundirse. Estas variables controlan la condición del carbono y también su forma física. El carbono puede estar combinado en forma de carburo de hierro o cementita, o existir como carbono sin combinar (o libre) en forma de grafito. La

forma y distribución de las partículas de carbono sin combinar influirá grandemente en las propiedades físicas del hierro fundido. Los tipos de hierro se pueden clasificar como sigue:

Hierros fundidos blancos, en los cuales todo el carbono está en la forma combinada como cementita.

Hierros fundidos maleables, en los cuales la mayoría o todo el carbono está sin combinar en la forma de partículas redondas irregulares, conocidas como carbono revenido, el cual se obtiene mediante tratamiento térmico del hierro fundido blanco.

Hierros fundidos grises, en los cuales la mayoría o todo el carbono está sin combinar en la forma de escamas de grafito.

Hierros fundidos enfriados rápidamente, en los cuales una capa superficial de hierro fundido blanco está combinada con una interior de hierro gris.

Hierros fundidos nodulares, en los cuales, mediante adiciones de aleaciones especiales, el carbono está grandemente sin combinar en la forma de esferoides compactas. Esta estructura difiere del hierro maleable en que se obtiene directamente desde la solidificación y las partículas de carbono redondas son de forma regular.

Hierros fundidos aleados, en los cuales las propiedades o la estructura de cualquiera de los tipos mencionados se modifican mediante la adición de elementos de aleación.

3.3 HIERRO FUNDIDO GRIS

Este grupo constituye una de las aleaciones de hierro más ampliamente utilizadas. En la manufactura de hierros fundidos grises, la tendencia de la cementita a separarse en grafito y austenita o ferrita favorecida controlando la composición de la aleación y las rapidezces de enfriamiento. La mayoría de los hierros fundidos grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2.5 y 4% de carbono.

Estas aleaciones solidifican formando primero austenita primaria. La apariencia inicial de carbono combinado está en la cementita que resulta de la reacción eutéctica a 2065 °F. El proceso de grafitización es ayudado por el alto contenido de carbono, la alta temperatura y la adecuada cantidad de elementos de grafitización, sobre todo el silicio.

Se ha demostrado experimentalmente que, con el adecuado control de los factores mencionados, la aleación seguirá el diagrama de equilibrio estable hierro-grafito, formando austenita y grafito a la temperatura eutéctica de 2075 °F. En cualquier caso, cualquier cementita que se forme se grafitizará con rapidez. El grafito aparece como muchas placas irregulares, generalmente alargadas y curvas, las cuales dan al hierro fundido gris su característica fractura de color grisáceo o negruzco. Se debe destacar que mientras la microestructura representa su apariencia sobre una superficie plana, las hojuelas son partículas tridimensionales; en efecto, son placas curvas algunas veces enlazadas.

Durante el enfriamiento continuado, hay precipitación adicional de carbono debido al decremento en solubilidad de carbono en austenita, el cual se precipita como grafito o como cementita proeutectoide que grafitiza rápidamente.

La resistencia del hierro gris depende casi por completo de la matriz en que está incrustado el grafito, la cual es determinada por la condición de la cementita eutectoide. Si la composición y rapidez de enfriamiento son tales que la cementita eutectoide también grafitiza, entonces la matriz será completamente ferrítica; por otro lado, si la grafitización de la cementita eutectoide se evita, la matriz será completamente perlítica. La constitución

de la matriz puede variarse desde perlita, pasando por mezclas de perlita y ferrita en diferentes proporciones, hasta llegar a la ferrita prácticamente pura. La mezcla grafito-ferrita es el hierro gris más suave y débil; la resistencia y la dureza aumentan al incrementarse el carbono combinado, alcanzando un máximo con el hierro perlítico gris.

3.4 TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS HOJUELAS DE GRAFITO

Las hojuelas grandes de grafito interrumpen en mayor grado la continuidad de la matriz perlítica, reduciendo de esta manera la resistencia y ductilidad del hierro gris. Las pequeñas hojuelas de grafito son menos dañinas y, por tanto, generalmente se prefieren.

Los tamaños de las hojuelas de grafito generalmente se determinan por comparación de los tamaños estándar preparados conjuntamente por el AFS (American Foundrymen's Society) y la ASTM (American Society for Testing Materials). El procedimiento para preparar y medir el tamaño de las hojuelas está dado en el ASTM Designation A247-47, 1971 Book of ASTM Standards, Part 31. La medición de las longitudes se hace de las más grandes hojuelas en una sección no atacada químicamente del hierro gris a 100x.

La figura 3.1 muestra las longitudes de las hojuelas mediante campos típicos lo más cercanamente posible a los diversos tamaños.

El enfriamiento lento de los hierros hipoeutécticos para favorecer la grafitización también produce grandes cristales de austenita primaria, lo cual limita la mezcla eutéctica o el grafito a las fronteras de grano y da como resultado pocas y gruesas hojuelas de grafito.

Aumentar el contenido de carbono para incrementar la cantidad de eutéctico hace que sea mayor la cantidad de grafito formado, lo cual puede debilitar el hierro fundido en mayor medida que una hojuela de menor tamaño pudiera fortalecerlo.

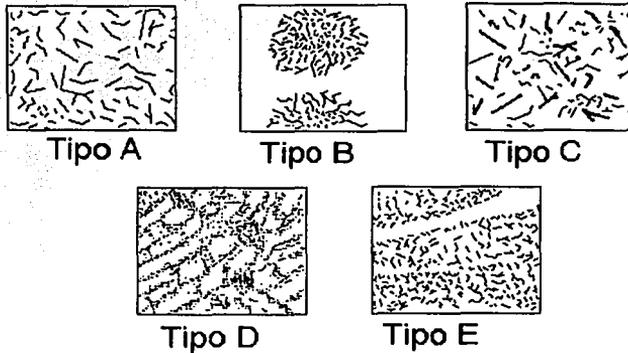


Fig 3.1. Tipos de hojuelas de grafito. Tipo A: distribución uniforme, orientación al azar; tipo B: agrupamientos en roseta, orientación al azar; tipo C: tamaños sobrepuestos de hojuela, orientación al azar; tipo D: segregación interdendrítica, orientación al azar; tipo E: segregación interdendrítica.

Aumentar el contenido de silicio hace que se incremente la cantidad de eutéctico formado, reduciendo así el tamaño de la hojuela; sin embargo, como el alto contenido de silicio tiene fuerte influencia sobre la grafitización, la matriz probablemente será ferrítica y dará como resultado una pieza de fundición débil.

El mejor método para reducir el tamaño y mejorar la distribución de las hojuelas de grafito parece ser mediante la adición de una pequeña cantidad de material, conocido como inoculante, el cual se estudia en el presente trabajo. Los agentes de inoculación utilizados satisfactoriamente son el silicio, manganeso, grafito, calcio metálico, aluminio, titanio, zirconio, carburo de silicio, siliciuro de calcio o combinaciones de éstos. El mecanismo exacto por medio del cual operan no se ha entendido en plenitud, probablemente causan la

nucleación de austenita primaria, originando pequeños granos, lo cual reduce el tamaño y mejora la distribución de las hojuelas de grafito.

La forma en que las hojuelas de grafito están ordenadas en la microestructura de hierro fundido gris generalmente se indica como uno o más tipos preparados conjuntamente por la AFS y la ASTM. La figura 3.2 muestra los ocho tamaños de hojuela.

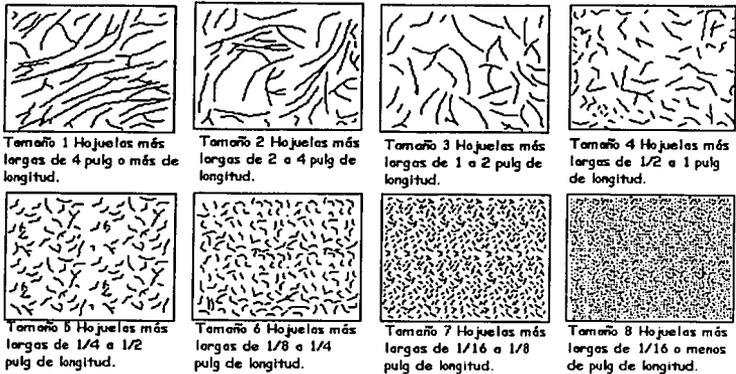


Fig 3.2. Longitudes de las hojuelas de grafito mediante campos típicos lo más cercanamente posible a los diversos tamaños.

Los dibujos de las hojuelas tipos D y E resultan de la grafitización de una estructura eutéctica normal. Tales tipos aparecen en los hierros colados de muy alta pureza o en hierros comerciales enfriados rápidamente durante la solidificación. Aunque el tamaño de la hojuela grafitica es pequeño, la conformación interdendrítica y el alto contenido de grafito debilitan el material; por tanto, las conformaciones de hojuelas tipos D y E son indeseables en hierros grises.

El tipo de hojuela más deseable en hierro gris se representa por la distribución uniforme orientación al azar del tipo A, lo cual resulta de una estructura eutéctica completamente separada. Como se ve inicialmente, el tamaño de las hojuelas individuales de grafito está determinado por el de los cristales de austenita alrededor del cual se forman.

La conformación en roseta de las hojuelas de grafito del tipo B es común sólo en la región intermedia de un hierro fundido vaciado en "molde frío". Esta región se conoce como región manchada y consiste en una mezcla de hierro fundido gris y blanco. La rapidez de enfriamiento en esta región es la máxima que permitiría el proceso de grafitización.

Las pocas hojuelas de grafito grandes y rectas en el tipo C siempre indican que el hierro es hipereutéctico en contenido de carbono. El silicio y otros elementos de aleación reducen el contenido de carbono del eutéctico y, si están presentes en cantidades suficientes, la composición eutéctica puede reducirse hasta menos del 3.5% de carbono.

3.5 PROPIEDADES MECÁNICAS Y APLICACIONES DEL HIERRO FUNDIDO GRIS

La más importante clasificación de los hierros grises, desde el punto de vista de la Ingeniería, es la utilizada en la ASTM Specification A48. Las piezas fundidas de hierro gris se clasifican en siete clases (números 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60) que dan la mínima resistencia tensil de las barras de prueba en miles de lb/pulg²; por ejemplo, el hierro gris clase 20 tendría una resistencia tensil mínima de 20 000 lb/pulg²; los de la clase 30, 30 000 lb/pulg², etc. La tabla 1 muestra la propiedades mecánicas típicas de las barras de prueba de hierro gris estándar, en el fundido.

La resistencia tensil es importante al seleccionar un hierro gris para piezas sometidas a cargas estáticas indirectas de tensión o flexión. Tales piezas incluyen recipientes para soportar grandes presiones, cajas, válvulas, accesorios y palancas. Los hierros superiores a 40 000 lb/pulg² en resistencia tensil generalmente se consideran hierros de alta resistencia y son un poco más caros de producir y más difíciles de maquinarse. Los hierros grises no exhiben un punto de cedencia bien definido como lo hacen la mayoría de los aceros dulces. La curva esfuerzo-deformación no muestra una porción rectilínea, lo cual impide determinar un modelo de elasticidad definido. El porcentaje de elongación es pequeño para todos los hierros fundidos, excediendo rara vez de 3 a 4%, y la reducción de área es demasiado pequeña para ser apreciable.

TABLA 1 Propiedades típicas mecánicas de las barras de prueba estándar de hierro gris, en la condición de fundido

CLASE ASTM	RESISTENCIA TENSIL LB/PULG ²	RESISTENCIA COMPRESIVA LB/PULG ²	RESISTENCIA TORSIONAL DE CORTE, LB/PULG ²	MÓDULO DE ELASTICIDAD, MILLONES DE LB/PULG ²		LÍMITE A LA FATIGA INVERTIDA POR FLEXIÓN LB/PULG ²	RESISTENCIA TRANSVERSAL DE UNA BARRA DE 1.2 PULG DE DIÁMETRO Y 18 PULG DE LONGITUD LB/PULG ²	B II N
				TENSIÓN	TORSIÓN			
20	22 000	83 000	26 000	9.6 - 14.0	3.9 - 5.6	10 000	1 850	156
25	26 000	97 000	32 000	11.5 - 14.8	4.6 - 6.0	11 500	2 175	174
30	31 000	109 000	40 000	13.0 - 16.4	5.2 - 6.6	14 000	2 525	201
35	36 500	124 000	48 500	14.5 - 17.2	5.8 - 6.9	16 000	2 850	212
40	42 500	140 000	57 000	16.0 - 20.0	6.4 - 7.8	18 500	3 175	235
50	52 500	164 000	73 000	18.8 - 22.8	7.2 - 8.0	21 500	3 600	262
60	62 500	187 500	88 500	20.4 - 23.5	7.8 - 8.5	24 500	3 700	302

La resistencia compresiva es importante cuando el hierro gris se utiliza para cimentaciones o soportes de maquinaria. Como todos los materiales frágiles, la resistencia compresiva del hierro gris es mucho más grande que su resistencia tensil y, en gran parte, es una función de la resistencia del corte. La falla de compresión generalmente ocurre a lo largo de un plano oblicuo, a menos que la muestra sea suficientemente larga para permitir la falla por flexión.

Muchos de los grados de hierro gris tienen mayor resistencia al corte torsional que algunos grados de acero. Esta característica, junto con la baja sensibilidad de muesca (concentración de esfuerzos en un punto o defecto), hace del hierro gris un material adecuado para varios tipos de flechas o ejes.

La dureza del hierro gris es resultado promedio del grafito suave en el hierro y la matriz metálica. La variación en tamaño y distribución de grafito causará amplias variaciones en dureza (particularmente dureza Rockwell). El medidor de dureza Brinell, que cubre un área mayor, tiende a dar un valor de dureza más preciso que el medidor de dureza Rockwell.

La figura 3.3 muestra la correlación general entre la dureza Brinell y la resistencia compresiva. Esta correlación es mucho mejor que la existencia entre resistencia tensil y dureza, porque la resistencia compresiva suele aumentar con el incremento de dureza y no

es influida grandemente por las variaciones microestructurales como lo es la resistencia tensil.

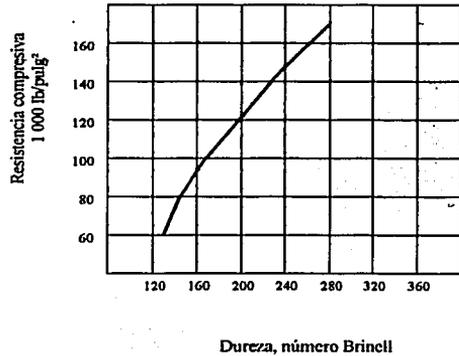


Fig. 3.3 Correlación general entre dureza Brinell y resistencia compresiva.

La microestructura es el factor principal para determinar la dureza del hierro gris. La tabla 2 indica el amplio intervalo de números de dureza Brinell obtenibles con varias estructuras de hierro. La composición también ejerce un considerable efecto sobre la dureza. Aumentar los contenidos de carbono y silicio dará como resultado una disminución de la dureza, aunque el efecto no es tan marcado sobre la dureza como lo es sobre la resistencia tensil.

**TABLA 2 Dureza Brinell de las piezas fundidas de hierro clasificadas
Por microestructura general**

TIPO	BHN
Hierro gris ferrítico (recocido)	110 - 140
Hierros austeníticos	140 - 160
Hierro gris suave	140 - 180
Hierros perlíticos	160 - 220
Hierros perlíticos aleados con bajo contenido aleado	200 - 250
Hierros revenidos martensíticos	260 - 350
Hierro blanco, sin alea (de acuerdo con el contenido de carbono)	280 - 500
Hierro aleado blanco	450 - 550
Hierro martensítico blanco	550 - 700
Hierro nitruado (sólo superficie)	900 - 1000

Debido a que el hierro gris es el tipo de pieza de fundición menos costoso, siempre debe considerarse primero cuando se va a seleccionar un metal fundido. Otro metal debe escogerse sólo cuando las propiedades mecánicas y físicas del hierro gris sean inadecuadas. Ejemplos de aplicaciones que requieren un mínimo de propiedades de piezas fundidas y el mínimo costo posible son contrapesos para elevadores y para puertas de hornos industriales. El hierro gris se utiliza ampliamente para guarniciones y marcos alrededor de maquinaria peligrosa. Muchos tipos de cajas para engranes, recintos para equipo eléctrico, cajas para bombas y cajas para turbinas de vapor se funden en hierro gris, debido a su bajo costo. Otras piezas fundidas de hierro gris similares se emplean en monobloques para motor, bocas de incendios y cubiertas para alcantarillas.

3.6 HIERRO FUNDIDO NODULAR

Este hierro, también conocido como hierro dúctil, hierro de grafito esferoidal o hierro esferulítico, es hierro fundido en el que el grafito está presente como pequeñas bolas o esferoides. Las esferoides compactas interrumpen la continuidad de la matriz mucho menos que las hojuelas de grafito, lo cual da como resultado mayor resistencia y tenacidad, comparada con una estructura semejante a la del hierro gris. El hierro fundido nodular

diffiere del maleable en que generalmente se obtiene como resultado de la solidificación y no requiere tratamiento térmico. Los esferoides son más redondas que los agregados irregulares de carbono revenido encontrados en el hierro maleable.

El contenido total de carbono en el hierro nodular es el mismo que en el hierro fundido gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación debido a la presencia de una pequeña cantidad de ciertos elementos de aleación. La adición del elemento formador de nódulos, generalmente magnesio o cerio, se efectúa en el cucharón antes del vaciado. Como estos elementos tienen una estrecha afinidad para el azufre, el contenido de azufre de la aleación de base hierro debe ser inferior al 0.015% para que el tratamiento sea efectivo, y las aleaciones se describen como “desulfurizadas”.

La cantidad de ferrita en la matriz de la pieza sin tratamiento térmico depende de la composición y de la rapidez de enfriamiento. Los hierros nodulares con una matriz que tiene un máximo de 10% de perlita se conocen como hierros ferríticos. Esta estructura proporciona máxima ductilidad, tenacidad y maquinabilidad. Una matriz cuya estructura sea grandemente perlítica puede producirse por fundido o mediante normalización. La normalización se lleva a cabo por enfriamiento en aire desde una temperatura de 1 600 hasta una de 1 650°F. Los hierros perlíticos dúctiles son más fuertes pero menos dúctiles que los de ferrita. Una matriz martensítica puede obtenerse templando en aceite o en agua desde 1 600 hasta 1 700°F. Las estructuras templadas generalmente se revienen después del endurecimiento, a los niveles de resistencia y dureza deseados.

Los hierros austeníticos dúctiles son tipos altamente aleados que retienen su estructura austenítica hasta por lo menos 75°F. Estos hierros son interesantes debido a sus propiedades de relativa alta resistencia a la corrosión y buena fluencia a elevadas temperaturas.

Algunas aplicaciones típicas del hierro nodular son piezas para tractores y herramientas agrícolas; cigüeñales, pistones y cabezas de cilindros para automóviles y motores diesel; accesorios eléctricos, cajas para interruptor, cubiertas para motor y piezas

para interruptores de circuitos en la minería: tambores de grúas, poleas de transmisión, volantes de motor y ménsulas para elevador; en acería: rodillos de trabajo, puertas para horno, rodets de mesa y cojinetes; en herramientas y troqueles: llaves de tuercas, palancas, manivelas, marcos de sujeción, platos sujetadores y troqueles diversos para dar forma al acero, aluminio, bronce, latón y titanio.

3.7 HIERRO FUNDIDO BLANCO

Los cambios que tienen lugar en este hierro durante la solidificación y el enfriamiento subsecuente son determinados por el diagrama hierro-carburo de hierro. Todos los hierros fundidos blancos son aleaciones hipoeutécticas y ahora se describirá el enfriamiento de una aleación al 2.50% de carbono.

Desde el estado líquido, la austenita primaria continúa su solidificación. El líquido incluye el $(2.5 - 2.0) / (4.3 - 2.0)$, o sea 22% de la aleación por peso. Este líquido ahora sufre la reacción eutéctica isotérmicamente para formar la mezcla eutéctica y cementita conocida como *ledeburita*. Como la reacción tiene lugar a una temperatura relativamente alta, la ledeburita tiende a aparecer como una mezcla gruesa, en vez de una fina, típica de muchos eutécticos. No está fuera de lo común que la ledeburita esté completamente libre, con la austenita eutéctica agregada a las principales dendritas de austenita, dejando atrás capas macizas de cementita como constituyente libre.

Conforme la temperatura disminuye, la solubilidad del carbono en austenita decrece, lo cual da lugar a la precipitación de cementita proeutectoide, la mayoría de la cual se deposita de la cementita presente. A la temperatura eutectoide, 1333 °F, la austenita restante, con 0.8% de carbono y constituyendo $(6.67-2.5) / (6.67-0.8)$ o 70% de la aleación, sufre la reacción eutectoide para formar perlita. Durante el enfriamiento subsecuente a temperatura ambiente, la estructura permanece invariable.

La microestructura típica de hierro fundido blanco, consiste en dendritas de austenita transformada (perlita) en una red de cementita blanca interdendrítica.

La cementita es un compuesto intersticial duro y frágil. Como el hierro fundido blanco contiene una cantidad de cementita relativamente grande como una red interdendrítica continua, hace al hierro fundido duro y resistente al desgaste, pero extremadamente frágil y difícil de maquinar. Los hierros fundidos “completamente blancos” tienen pocas aplicaciones en Ingeniería debido a esta fragilidad y falta de maquinabilidad; más bien se utilizan en casos en que la resistencia al desgaste es lo más importante y el servicio no requiere ductilidad, como camisas para mezcladores de cemento, bolas de trituración para acería, ciertos tipos de dados para estiramiento, y boquillas de extrusión. Un gran tonelaje de hierro fundido blanco se emplea como material de inicio para manufacturas de hierro fundido maleable.

3.8 HIERRO FUNDIDO MALEABLE

La cementita (carburo de hierro) es realmente una fase metaestable. Hay una tendencia a que la cementita se descomponga en hierro y carbono, pero en condiciones normales tiende a persistir indefinidamente en su forma original. Hasta este punto, la cementita se ha tratado como una fase estable; sin embargo, esta tendencia a formar grafito sin combinar es la base para manufacturar hierro fundido maleable.

La reacción $\text{Fe}_3\text{C} \leftrightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ es favorecida por altas temperaturas, la existencia de impurezas sólidas no metálicas, mayores contenidos de carbono y la presencia de elementos que ayudan a descomponer Fe_3C , como el silicio.

El propósito de la maleabilización es convertir todo el carbono combinado presente en el hierro blanco en nódulos irregulares de carbono revenido (grafito) y ferrita. Comercialmente, este proceso se efectúa en dos etapas conocidas como la *primera* y la *segunda etapas de recocido*.

En la primera etapa de recocido, la fundición del hierro blanco, se recalienta lentamente a una temperatura entre 1 650 y 1750°F. Durante el calentamiento, la perlita se convierte a austenita en la línea inferior crítica. La austenita así formada disuelve alguna cementita adicional conforme se calienta a la temperatura de recocido, la austenita del sistema metaestable puede disolver más carbono de lo que puede hacerlo la austenita del sistema estable; por tanto, existe una fuerza de impulso para que el carbono precipite fuera de la austenita como grafito libre. Esta grafitización empieza a la temperatura de maleabilización. La precipitación inicial de un núcleo de grafito agota el carbono de la austenita, y de esta manera se disuelve más de la cementita adyacente, causando un depósito de carbono sobre el núcleo original de grafito. Los núcleos de grafito crecen a rapidezces aproximadamente iguales en todas direcciones y por último aparecen como nódulos o esferoides irregulares, generalmente llamados *carbono revenido*. El carbono grafitico revenido se forma en la superficie de contacto entre el carburo primario y la austenita a la temperatura de la primera etapa de recocido, con crecimiento alrededor de los núcleos mediante una reacción que incluye difusión y descomposición de carburo.

Los altos contenidos de silicio y carbono promueven la nucleación y la grafitización, pero estos elementos deben restringirse a ciertos niveles máximos, ya que el hierro debe solidificar como hierro blanco. Por tanto, un adecuado proceso de recocido proporciona más eficazmente los núcleos de grafitización. La rapidez de recocido depende de la composición química, la tendencia a la nucleación y la temperatura de recocido. La temperatura de la primera etapa de recocido ejerce considerable influencia sobre el número producido de partículas de carbono revenido. Al aumentar la temperatura de recocido, se acelera la rapidez de descomposición del carburo primario y se producen más partículas de grafito por unidad de área; sin embargo, las altas temperaturas de la primera etapa de recocido dan como resultado una deformación excesiva de las piezas fundidas durante el recocido y la necesidad de que haya operaciones de enderezamiento después del tratamiento térmico. Las temperaturas de recocido están ajustadas para proporcionar máximas y prácticas rapidezces de recocido y una mínima deformación y, por tanto, se encuentran controladas entre 1 650 y 1 750°F. La pieza fundida de hierro blanco se mantiene a la temperatura de la primera etapa de recocido hasta que se han descompuesto

todos los carburos macizos. Como la gratificación es un proceso relativamente lento, la pieza fundida debe de ser calentada totalmente a la temperatura indicada por lo menos durante 20 hr y las piezas grandes pueden requerir tanto como 72 hr. La estructura al término de la primera etapa de gratificación consta de nódulos de carbono revenido, distribuido por la matriz de austenita saturada.

Después de la primera etapa de recocido, las piezas fundidas se enfrían tan rápido como sea práctico hasta unos 1400°F en preparación para la segunda etapa del tratamiento de reconocido. El rápido ciclo de enfriamiento generalmente requiere de 2 a 6 hr, dependiendo del equipo utilizado.

En la segunda etapa de recocido, las piezas se enfrían lentamente a una rapidez de 5 a 15°F/hr a través del intervalo crítico en el cual tendría lugar la reacción eutéctode. Durante el lento enfriamiento, el carbono disuelto en la austenita se convierte en grafito en las partículas de carbono revenido existente, y la austenita restante se transforma en ferrita. Una vez que la grafitización está completa, ningún cambio estructural ulterior tiene lugar durante el enfriamiento a temperatura ambiente, y la estructura consta de nódulos de carbono revenido en una matriz de ferrita. Este tipo se conoce como hierro ferrítico maleable o estándar.

En la forma de nódulos compactos, el carbono revenido o libre no rompe la continuidad de la matriz ferrítica tenaz, pero da como resultado mayor resistencia y ductilidad que la exhibida por el hierro fundido gris. Los nódulos de grafito también sirven para lubricar herramientas de corte, lo cual explica la muy alta maquinabilidad del hierro maleable. El hierro ferrítico maleable se ha utilizado ampliamente para equipo automotriz, agrícola y ferroviario; juntas de expansión y piezas fundidas para barandales de puentes; ensambles de grúas de cadena, y rolletes industriales; conexiones para tubería; y muchas aplicaciones en ferretería general.

Los hierros aleados maleables son aquellos cuyas propiedades resultan de la adición de elementos de aleación no presentes normalmente en cantidades significativas en hierro

ferrítico maleable. Como esos hierros aleados maleables están completamente maleabilizados, su influencia es grande sobre la matriz ferrítica. Las principales clases son hierro aleado maleable al cobre y hierro aleado maleable al cobre molibdeno. El efecto del cobre es aumentar la resistencia a la corrosión, la resistencia tensil y el punto de cedencia a costa de una muy ligera reducción en ductilidad. La adición de cobre y molibdeno en combinación produce un hierro maleable de resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas superiores.

4. LA INOCULACIÓN EN EL HIERRO

4.1 DEFINICIÓN DE INOCULACIÓN

El "Diccionario Internacional de Fundición" define la inoculación como "Operación consistente en añadir pequeñas cantidades de ciertas sustancias a un metal líquido, provocando modificaciones físico-químicas distintas de las que producirían estas mismas sustancias como elementos de aleación".

Esta definición, que hoy en día puede parecerse incompleta, tiene la virtud de señalar que es un tratamiento específico e irreversible de metal líquido. Por tanto, podemos suponer que la inoculación consistirá en la interacción entre los inoculantes y algunos elementos presentes en el baño metálico, dando lugar a productos de vida efímera, cuya misión será promover la solidificación según el diagrama estable hierro-grafito y que, una vez solidificado el metal, no ejerce ninguna acción aunque se vuelva al estado líquido.

Siempre que por enfriamiento o por concentración se pasa del estado líquido al sólido, es necesaria la formación de un germen que pueda crecer y dar lugar a un cristal. En la mayoría de los casos se "ceba" o inocula el líquido para que pueda formarse este germen.

Si el germen tiene el tamaño crítico para que sobre él se produzca la nucleación, dará lugar a un cristalito. Este tamaño crítico es función del grado de subenfriamiento y, por tanto, de la velocidad de solidificación. En consecuencia, el tamaño final de los cristales dependerá de la estabilidad de los cebos y de la velocidad de enfriamiento.

La inoculación, que no es más que una nucleación heterogénea, debe cumplir en principio las mismas leyes generales de la solidificación. Esto es, el substrato sobre el cual cristalizará el líquido debe formarse a temperatura superior a la de solidificación, ser estable a esta temperatura y presentar cierta coherencia cristalina con el metal.

En las fundiciones, la coexistencia de los diagramas hierro-grafito y hierro-cementita, la pequeña diferencia entre las líneas de sólidos de ambos diagramas, las disparidad química, cristalográfica y cinética entre las dos fases que solidifican, austenita y grafito, con hábitos de cristalización muy distintos y que pueden crecer “divorciadas” o “acopladas”, complican notablemente el proceso.

En consecuencia, las condiciones impuestas para la formación de gérmenes serán mucho más rigurosas que en cualquier otro tipo de cristalización. Ello justifica no sólo los numerosos trabajos de investigación dedicados al tema, sino también los resultados, a menudo contradictorios, que han dado origen a las diversas teorías sobre la inoculación.

También se define como inoculación la adición retardada de ciertas aleaciones de silicio al metal líquido para producir cambios en el aumento y la distribución de grafito, con el objeto de reducir la tendencia a la formación de zonas chill y mejorar las propiedades mecánicas. Dos hierros con la misma composición química tienen diferentes microestructuras y propiedades mecánicas, si uno de ellos es inoculado y otro no. La inoculación tiene las siguientes finalidades:

- Crear centros para la nucleación de grafito.
- Controlar la estructura del grafito.
- Reducir o eliminar la tendencia a la formación de hierro blanco (zona chill).
- Mejorar las propiedades mecánicas.
- Mejorar la maquinabilidad.

4.2 GENERALIDADES DE LA INOCULACIÓN

Siendo la inoculación una práctica común en fundición, es la llave para controlar las características estructurales y las propiedades físicas de las piezas fundidas de hierro gris.

La fundición de hierro colado, estuvo durante mucho tiempo considerada como un pariente pobre del acero y rodeada de misterios. La calidad del hierro fundido estaba dejada muchas veces, al arte y habilidad del operador del cubilote. Gracias a los rápidos progresos de la Metalurgia de la fundición el fundidor se encuentra hoy día con ciertos tipos de fundiciones ordinarias para satisfacer las demandas de la industria, la cual exige normalmente características elevadas y una calidad constante.

Como es sabido, el hierro colado es sensible a los cambios de espesor, es decir, las propiedades mecánicas y físicas de una fundición variarán según el espesor o más correctamente dicho, con la velocidad de enfriamiento. La forma clásica de conseguir mejores propiedades físicas y estructura determinada en el hierro colado, de acuerdo con el espesor de la pieza, ha sido y en gran manera continúa siéndolo, mediante variaciones en la composición química del hierro fundido.

Es prácticamente imposible ajustar la composición química a fin de obtener las propiedades óptimas en cada pieza de hierro colado, y más todavía, cuando se tienen que obtener piezas de distintos espesores, partiendo de una misma aleación de hierro fundido. Se llega, pues, a soluciones de compromiso.

Las propiedades físicas del hierro fundido están estrechamente ligadas con su microestructura. Para una aleación de composición dada es posible, sin modificación sensible del análisis, mejorar las propiedades físicas interviniendo sobre la microestructura, que es esencialmente el principio de la inoculación.

4.3 SENSIBILIDAD AL TEMPLE

La estructura blanca, o templada, es cementita (carburo de hierro Fe_3C). Cualquier hierro solidificará blanco si la velocidad de enfriamiento durante la solidificación es lo suficiente rápida. El fundidor necesita conocer cuál es la velocidad crítica de enfriamiento del hierro que fabrica, pues ello le determina no sólo el espesor mínimo de la pieza que puede colar con seguridad, sino también ejercer una influencia muy considerable sobre las características de maquinabilidad del hierro.

En la práctica, el fundidor utiliza un ensayo que origina una solidificación del hierro fundido en distintas velocidades de enfriamiento. Aparte de utilizar un ensayo de cuña o de temple forzado, en la pieza de ensayo se obtiene estructuras blancas y estructuras grises. Según el ensayo que se utilice, se mide la profundidad o la anchura de temple, y dicho valor da una indicación de la tendencia al temple del hierro. Este valor numérico se refiere frecuentemente como valor de temple. Con experiencia, dichos valores pueden relacionarse con las exigencias o requerimientos de las piezas producidas.

4.4 FACTORES QUE DETERMINAN LA SENSIBILIDAD DE TEMPLE

La composición química y, en particular, el contenido de silicio, tienen una influencia importante sobre la sensibilidad de temple. No obstante, no es éste el único factor significativo. Generalmente se sabe que hierros de composición química similar pueden variar en su sensibilidad al espesor entre una y otra fundición e incluso en la misma fundición.

Estas diferencias tienen su origen en los constituyentes de la carga, condiciones de fusión, características del coque, volumen de soplado, humedad del aire, etcétera. Incluso cuando se conocen los efectos de estos varios factores y se hace lo posible para controlarlos, su influencia no puede eliminarse totalmente. En muchas fundiciones, no se

les tiene en cuenta y, por consiguiente, la sensibilidad de temple puede variar considerablemente.

El objeto de la inoculación es contrarrestar el efecto de dichos factores, a fin de que, para la mayoría de las composiciones de hierro gris, sea el contenido de silicio el que controle la sensibilidad de temple. El hierro será siempre menos sensible al temple después de inocular, pero la verdadera reducción en los valores de temple dependerá del predominio de los varios factores anteriormente mencionados.

4.5 ALGUNOS ASPECTOS BÁSICOS DE LA SOLIDIFICACIÓN

Al enfriar un metal fundido a su temperatura de congelamiento, la solidificación se inicia en la región de las temperaturas más bajas. Cristalitos metálicos submicroscópicos, llamados núcleos, primero se forman y después crecen, generalmente en forma de pino o dendrítica. Las dendritas de cada núcleo crecen hasta que la masa se convierta totalmente en sólida. Cada núcleo, entonces, produce un grano o cristal.

Durante la solidificación, los átomos metálicos se adhieren a las dendritas en columnas y líneas espaciadas en forma pareja a fin de que la estructura final pueda verse como muchas células individuales colocadas una sobre la otra. Bajo condiciones de equilibrio (ideales), los metales puros se funden y se congelan a una única temperatura; arriba de esa temperatura, son totalmente líquidas; abajo de esa temperatura, son totalmente sólidas. La curva de enfriamiento de un metal puro deberá presentar el metal enfriándose lentamente a su punto de congelamiento y después nivelándose a una temperatura constante, en tanto el metal pierde el calor de la fusión. Sólo después de que el metal se solidifica completamente puede ocurrir un mayor enfriamiento.

Cuando un metal puro se enfría rápidamente, la formación de cristales a veces se demora y la temperatura de congelamiento cae por debajo del punto de congelamiento. En un punto inferior a la temperatura líquido/sólido, se inicia repentinamente la nucleación del

sólido y la eliminación del calor de la fusión puede elevar la temperatura a la temperatura de solidificación se denomina subenfriamiento y sobreenfriamiento. En las fundiciones comerciales que producen una amplia variedad de aleaciones, el subenfriamiento es mucho más común y los problemas que puede causar a los productores de hierros grises y dúctiles tiene una influencia directa sobre las estructuras metalúrgicas de las aleaciones. Estos problemas hacen del proceso de inoculación algo esencial para la mayoría de las operaciones de fundiciones de hierro gris (figura 4.1).



*Fig 4.1. Hierro gris inoculado
demostrando tres
centro de inoculación*



*Hierro gris sin inocular
demostrando un centro
de nucleación*

Los hierros fundidos son aleaciones hechas de tres elementos básicos -hierro, carbón y silicio- de los cuales el carbón tiene el mayor efecto general sobre las propiedades físicas del hierro. Estos elementos, a su vez, se componen de átomos. La disposición geométrica tridimensional del átomo de hierro se denomina una red espacial cúbica. En tanto los átomos de hierro se acumulan, forman un cristal; en tanto se forman más cristales, éstos resultan en una pieza fundida.

De igual manera cuándo los átomos de carbón se acomodan en una red y estas redes se combinan para formar un cristal, el resultado es un grafito cristalino del tipo que se forma durante la solidificación del hierro fundido. Los átomos se acomodan para formar

una red y después se reúnen en un conjunto atómico. Sin embargo, en cualquier red atómica, no todo el espacio entre los átomos se ocupa. Los espacios vacíos, llamados intersticios son parte de cada red. Por lo tanto, los intersticios o espacios dentro del átomo de hierro, por ejemplo, están disponibles para acomodar otros átomos, tales como los átomos de carbón que son más pequeños y más ligeros.

Cuando estos átomos de carbón se acomodan dentro de la red del átomo de hierro, se dice que están en una solución sólida, pero los espacios en las redes de hierro están limitadas. Solo ciertas cantidades de átomos de carbón pueden contenerse en la red cristalina de un átomo de hierro. Al elevarse la temperatura del hierro, sin embargo, el porcentaje de carbono soluble que aceptará la red de hierro también se incrementa.

Durante la primera fase de solidificación de un hierro con menos de 4.3% de carbón equivalente, los primeros cristales de hierro que se forman son llamados austenita. En esta fase, hasta el 2.0% del carbono puede detenerse (o disolverse) en la solución austenita al final de la solidificación (comparado con el 0.025% disueltos a temperatura ambiente en la forma cristalina llamada ferrita).

Un ejemplo de este tipo de saturación puede ilustrarse adicionando azúcar a un vaso con agua. A temperatura ambiente, el agua disolverá el azúcar hasta que el agua se sature y no exista más espacio entre las moléculas (átomo de oxígeno combinados con átomos de hidrógeno) para más moléculas de azúcar. El azúcar excedente se sentará (precipitará) en el fondo del vaso.

Caliente el agua, y es posible disolver una cantidad aún mayor de azúcar. Esto es porque el calor adicionado (energía) hace que las moléculas del agua se muevan con mayor rapidez, debilitando las uniones que las mantienen juntas y creando más espacios para las moléculas del azúcar. En tanto el agua se enfría, sin embargo, las moléculas del agua se aletargan y comienzan a asumir su red de fusión original. Esto restringe el número de moléculas de azúcar que puedan acomodarse entre las moléculas del agua en enfriamiento.

Como resultado, el azúcar en exceso se forza fuera de la solución en el fondo del vaso nuevamente. Esta antología también se aplica al carbón en solución con hierro fundido de más del 4.3% de carbón equivalente. Al enfriarse el hierro fundido, el carbón excedente se precipita en forma de grafito.

4.6 FACTORES METALURGICOS

Conociendo algo el fondo metalúrgico, es posible apreciar el significado de los distintos factores prácticos y si es necesario, explicar por qué se recalca sobre la importancia de los mismos. Los siguientes factores son los que determinan si un hierro solidificará o no blanco.

1. La velocidad de enfriamiento.
2. La composición química, particularmente el contenido de silicio.
3. El grado de nucleación, o sea, el número de células eutécticas.
4. El grado de sobrefusión.
5. El grado de oxidación del hierro.

La velocidad de enfriamiento viene determinada por el espesor de la pieza, siendo un objetivo de la inoculación el de reducir la sensibilidad de temple al menor nivel posible para la composición química utilizada. La composición química, especialmente en lo que a los elementos principales se refiere, tales como silicio, cromo, etc., es una cuestión de control físico y por consiguiente, se aparta del campo de la inoculación.

La inoculación controla la sensibilidad al espesor actuando sobre los puntos 3, 4 y 5 anteriormente mencionados.

En el hierro colado fundido todo el carbono está en solución. A temperatura ambiente solamente permanece en solución un máximo de 0.8 % de carbono aproximadamente si el hierro colado es gris. La diferencia entre este carbono combinado y el carbono total es precipitado como grafito. La mayor parte del grafito se forma durante la solidificación a la temperatura eutéctica o a temperatura ligeramente inferior. Está asociado con otro constituyente (austenita) que todavía contiene alrededor de 1.7 % de carbono. Parte de este carbono se precipita sobre las ya existentes láminas de grafito a medida que el hierro va enfriando hasta aproximadamente 760° C, a cuya temperatura, la austenita se transforma en perlita.

El carbono que está en solución en el metal líquido requiere cierto tiempo para precipitarse como grafito junto a una lámina creciente de grafito. Si la velocidad de enfriamiento es demasiado rápida, la temperatura del líquido continúa descendiendo y llega a sobresaturarse de carbono hasta que a cierta temperatura ocurre una segunda solidificación eutéctica que contiene carburo de hierro. Ello proporciona una estructura blanca o atruchada.

La inoculación no puede cambiar la velocidad de enfriamiento, así que tiene que reducir por consiguiente la velocidad crítica de enfriamiento sobre la cual se forma carburo de hierro. Esto se realiza actuando sobre los puntos 3, 4 y 5 anteriormente mencionados.

4.6.1 Tamaño de las células eutécticas

La inoculación aumenta el número de células eutécticas. El grafito en una célula eutéctica, que tiene una forma groseramente esférica, está interconectado. Está compuesto de hojas serpenteantes y deformadas radiando todas de un centro común y dando la estructura normal de grafito en láminas. Aumentando el número de células eutécticas y con ello, aumentando los centros de solidificación, el carbono en solución se puede separar a mayor velocidad y, por consiguiente, facilita la obtención de estructuras grises a mayores velocidades de enfriamiento. (La migración del carbono en el líquido hacia una lámina de

grafito creciente requiere cierto tiempo. Aumentando el número de células eutécticas, se reduce la distancia que tiene que recorrer el carbono.)

Está bastante extendida la creencia de que el aumento de células eutécticas es el único factor que controla la sensibilidad de temple. Esto no es cierto, y cualquier intento que se haga para evaluar la efectividad relativa de un inoculante, que se base solamente en el número de células eutécticas producidas, no es un ensayo válido. Un ensayo de cuña de temple de forma adecuada, es todavía el mejor sistema práctico de evaluar la efectividad de un inoculante.

4.6.2 El grado de sobrefusión

Los hierros colados solidifican eventualmente como un eutéctico de austenita-grafito o austenita-carburo de hierro. La composición a la que esto ocurre viene expresada por la relación entre el carbono, silicio y fósforo.

$$Ct + \frac{Si + P}{3} = 4.3 = \text{comp. Eutéctica.}$$

En hierros hipoeutécticos o sea

$$Ct + \frac{Si + P}{3} = \text{menos de 4.3}$$

se forma primeramente en el líquido dendritas de austenita. Estas dendritas continúan creciendo hasta que el líquido remanente alcanza la composición eutéctica. (Como que la austenita contiene solamente 1.7 % de C, el líquido remanente va enriqueciéndose progresivamente en carbono.) Bajo condiciones de equilibrio la composición eutéctica

solidifica a determinada temperatura conocida. Se forman los núcleos de grafito y posteriormente crecen juntas las láminas de grafito y la austenita.

Mientras esto va ocurriendo, la temperatura permanece constante o puede incluso aumentar ligeramente hasta que todo el hierro ha solidificado completamente.

Cuando la velocidad de enfriamiento excede de un valor crítico, el grafito no puede nuclearse hasta que se alcanza una temperatura más baja, o en casos extremos no puede nuclearse en absoluto. En las etapas intermedias, la grafitización es retardada y el líquido llega a sobresaturarse de carbono. Esto se conoce como sobrefusión. Bajo condiciones ideales, el calor desprendido como resultado de la solidificación del eutéctico puede interrumpir el descenso de temperatura, pero cuando el calor es perdido por la pieza a una velocidad bastante rápida esto no ocurre. Como el metal sigue enfriándose, se alcanza cierta temperatura a la que el hierro solidifica como carburo de hierro o hierro blanco. De este modo, entorpeciendo la formación del eutéctico, el tiempo disponible para la precipitación del carbono como grafito queda reducido y, al mismo tiempo, la concentración de carbono en el líquido remanente queda incrementada.

El propósito de la inoculación es la nucleación artificial de los centros de solidificación, evitando la sobrefusión y por consiguiente la formación de grafito tipo D o E, y favorecer la formación de estructuras perlíticas que contengan solamente láminas de grafito no orientadas.

4.6.3 El efecto del metal oxidado

Es un hecho bien conocido que el metal producido bajo condiciones de fusión oxidantes es más sensible al temple. Se ha apuntado que el oxígeno, probablemente disuelto en el baño en forma de FeO, destruye los núcleos de grafito inicialmente formados y, por tanto, causa mayor sobrefusión para una velocidad de enfriamiento dada, lo que favorece el temple. Otros investigadores han sugerido que la velocidad de crecimiento de

las láminas de grafito es adversamente afectada, lo que incrementa el tiempo necesario para que el carbono salga de solución. De este modo, la velocidad de enfriamiento crítica por encima de la cual se forma carburo de hierro, queda grandemente reducida.

Sea cual sea la explicación, el hecho práctico existe. Incluso en los cubilotes mejor regulados, siempre hay irregularidades en las condiciones de fusión. (Pequeñas irregularidades en el descenso de la carga, variaciones en la calidad del coque, falta de control del volumen de aire, etc.) Esta es una razón importante para que cualquier fundición que trate de fabricar piezas de calidad constante, tenga que inocular.

4.7 EL PROCESO DE INOCULACIÓN

Como se dijo, los metales puros se funden y se congelan a una misma temperatura. Las aleaciones, generalmente, no lo hacen. Para una aleación específica, existe una temperatura en particular al llegar a la cual es líquida (la temperatura de líquidos) y otra temperatura, inferior, en la cual es sólido (la temperatura de sólidos). Entre una y otra, hay una zona en donde cohabitan. Existe el material sólido con poca o ninguna fuerza y el líquido interdispersado con el sólido en lo que se llama la zona pastosa.

Los elementos de aleación frecuentemente se adicionan a los metales puros para mejorar las características de fundición del metal; por ejemplo, disminuir el punto de fusión o alterar a su modo de solidificación. La inoculación es un método de controlar las características químicas de las aleaciones de hierro fundido.

El hierro gris se compone principalmente de hierro, carbón y silicio. El carbono libre o sin combinación en el hierro fundido se denomina grafito. El grado al que el crecimiento de grafito se controla durante la solidificación de hierro fundido determina las cualidades finales predecibles de las piezas fundidas. El tiempo de solidificación, la temperatura y la química de la inoculación determinan la forma y la distribución del grafito en las piezas fundidas de hierro gris y hierro dúctil.

La inoculación estimula la formación de pequeñas hojas o copos de grafito Tipo A uniformemente dispersos que son las características del hierro gris. Esto lo hace a través proporcionar más áreas de nucleación microscópica para que se formen células eutécticas en el hierro fundido. Al acercarse a la temperatura de congelamiento eutéctico, estas áreas se convierten en puntos de precipitación para la formación de grafito (carbón libre o sin combinar), y minimizar cualquier tendencia del hierro fundido a formar carburos o tipos de grafitos indeseables.

Cada vez que se forma una célula eutéctica, despiden una pequeña cantidad de calor al metal líquido que lo rodea. Este calor adicional disminuye la pérdida de calor de la colada y la subsecuente velocidad de solidificación de la colada. Entre más células eutécticas se formen, mayor es la cantidad de calor generado y menor la velocidad de solidificación del hierro. La velocidad retrasada de congelamiento ayuda al hierro a solidificarse a su temperatura de equilibrio. También asegura que el grafito Tipo A se precipitará en el hierro fundido.

La inoculación también reduce la tendencia del hierro a solidificarse como hierro blanco (templado) en secciones de la pieza fundida que fue enfriada rápidamente o influye en las características de encoque del hierro, eliminando, o significativamente disminuyendo, la formación de carburos. Al proporcionar más áreas de nucleación y, por lo tanto, más calor de cristalización durante la solidificación, el subenfriamiento se minimiza y se ayuda al equilibrio de la solidificación.

4.8 CUALIDADES DE UN HIERRO INOCULADO

Para mejores resultados al ser inoculada, una fundición debe ser preferentemente hipocutética. Esta técnica permite la utilización de hierro de carbono equivalente muy bajo para colar las piezas de altas características y de espesores bajos que, sin inoculación, presentarían una elevada proporción de cementita.

Con relación a un hierro no tratado, un hierro inoculado presenta las propiedades siguientes:

- Composición química prácticamente inalterada.
- Mayor homogeneidad de la estructura cristalina entre los distintos espesores, así como entre la superficie y la parte interior de una misma pieza; esto corresponde a una menor sensibilidad de temple.
- Mejora la maquinabilidad, es decir, mayor homogeneidad de las durezas superficiales de las piezas.
- Mejores características mecánicas, o sea, una modificación de las estructuras metalográficas.
- Neutralización de la influencia de las variaciones de análisis del hierro base, y con ello, obtención de características más constantes.

4.9 EFECTOS SOBRE EL HIERRO

Las estructuras del grafito de hierros fundidos grises y dúctiles significativamente afectan las propiedades físicas de estos metales. Sus propiedades mecánicas también dependen de sus microestructuras. Básicamente, la matriz del metal proporciona la resistencia: entre más dura y resistente es la matriz, más duro y resistente será el hierro, figura 4.2.

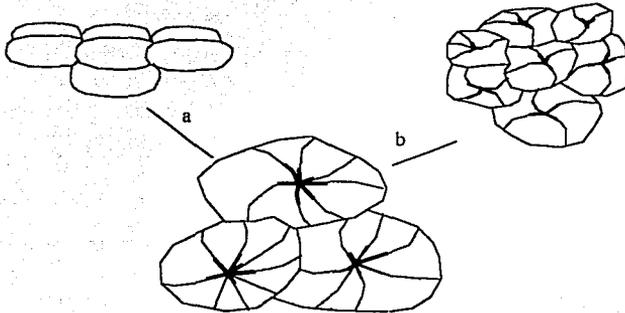


Fig 4.2. La estructura de hojas o copos del grafito se cambia por inoculación (a) como resultado de un tratamiento de magnesio para producir hierro dúctil y (b) reduciendo el tamaño de la hoja o copo, pero incrementando su número para mejorar la maquinabilidad y las propiedades mecánicas de hierro gris.

Las hojas de grafito tienen un efecto debilitante sobre la resistencia del hierro. Entre más cantidad y más toscas sean las hojas de grafito presentes, mayor será la disminución de la resistencia del hierro. El tamaño, la forma y la distribución de las hojas y los nódulos

de grafito se desarrollan durante la solidificación. Una distribución al azar de hojas en hierro gris, tales como el Tipo A en tamaños pequeños No. 5 ó 6, se considera deseable.

Las hojas pequeñas de grafito Tipo A se precipitarán uniformemente si la velocidad de solidificación es lo suficientemente lenta. Una velocidad de solidificación demasiado rápida en enfriamiento resulta en la formación de carburos de hierro y/o en grafito menos deseable (Tipos B, D y E). La inoculación evita la formación de grafito del Tipo B y C (generalmente asociados con áreas de ferrita) y promueve una matriz de fundición perlítica que tiene una maquinabilidad superior.

El grafito, hasta este punto de precipitación, ha sido disuelto en el hierro gris fundido como carbón elemental, pero la introducción del inoculante facilita que el carbón salga de la solución como grafito cuando se llega al punto eutéctico de congelamiento, al enfriarse el metal. Al salir de la solución, las hojas de grafito constituyen áreas de nucleación en tanto continúa la solidificación.

Una inoculación apropiada asegura que se formen suficientes áreas de nucleación para precipitar hojas de grafito del tamaño y configuración que satisfagan los requerimientos metalúrgicos de la aleación de hierro grises como los dúctiles de inoculación para controlar la estructura de las piezas fundidas de metal ferroso.

Típicamente, el grafito en el hierro gris se forma como hojas distribuidas uniformemente a través de la matriz del metal. En hierro dúctil, el grafito se forma como esferas individuales, o nódulos, dispersos a través de la matriz.

Aún después de la solidificación, el grafito puede continuar su crecimiento ligeramente en volumen. El número de centros de nucleación formados antes del enfriamiento determina las características físicas de la pieza fundida en hierro gris o dúctil.

Entre menor sea la temperatura del hierro fundido en el momento del vaciado al molde, ya sea inoculado o no inoculado, mayor serán las características de templeado del

hierro. Al congelarse el hierro, se presenta algo de subenfriamiento, permitiendo la formación de menos áreas de nucleación.

La inoculación disminuye la sensibilidad de la sección, una condición que resulta de las diferencias estructurales entre secciones gruesas y delgadas dentro de la misma pieza fundida. Esta sensibilidad se causa por distintas velocidades de solidificación en estas secciones. La inoculación compensa esto al proporcionar hojas de grafito de una forma y tamaño más uniforme a través de la pieza fundida.

El tipo de hierro que se produce se establece en gran parte cuando se solidifica el hierro. A causa de que las propiedades del hierro gris son influenciadas de manera importante con los cambios térmicos y químicos que ocurren desde su etapa de fusión hasta llegar a la pieza fundida enfriada, más áreas de nucleación y más calor de cristalización limitan el subenfriamiento y promueven el equilibrio o una solidificación más lenta.

El hierro gris es altamente sensible a la velocidad a la que el metal se enfria o a lo largo del rango de congelamiento eutéctico. El enfriamiento lento permite que la aleación se encuentre en el rango eutéctico durante mayor tiempo de lo que lo permite un enfriamiento rápido. El periodo más largo estimula la nucleación del grafito y el crecimiento de las hojas del mismo. En contraste, el enfriamiento rápido no permite suficiente tiempo al hierro en el rango eutéctico y se presenta un subenfriamiento que, por lo tanto, limita la formación del grafito.

4.10 EFECTOS DE LA INOCULACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Si se emplea adecuadamente, la inoculación mejora la mayoría de las propiedades mecánicas de la fundición. El grado de mejoría depende esencialmente del tipo de inoculante empleado y de la propia estructura del hierro base, es decir, los hierros que

normalmente contendrían elevados porcentajes de grafito tipo D y E, serán mucho más mejorados que otros tipos de hierro. Como que dichos hierros tendrían unas propiedades mecánicas muy bajas si no estuvieran inoculados, el uso de inoculantes promueve un nivel uniforme de altas propiedades mecánicas para cualquier composición dada y reduce las fluctuaciones en dichas propiedades, que son originadas por variaciones en el tipo de grafito y su distribución.

Es notorio el aumento en la resistencia a la tracción, particularmente si el hierro base tiene tendencia a contener ferrita primaria. En muchos casos y particularmente en hierros de bajo carbono equivalente el incremento de la resistencia a la tracción, debido al cambio en la estructura de grafito tipo D a grafito normal en láminas, es destacadísimo teniendo en cuenta el ligero aumento en el contenido de elementos grafitizantes.

En cuanto a la resistencia transversal se refiere, puede aplicarse idénticamente como la resistencia a la tracción. Sin embargo, el efecto de la inoculación sobre la resistencia transversal puede ser todavía más marcado que en la resistencia a la tracción en aquellos casos en los cuales se forma grafito de tipo D únicamente en la superficie de la barreta de prueba. Como que para determinar la resistencia a la tracción la superficie de la barreta es mecanizada, parte del efecto de inoculación no puede observarse en el ensayo, sin embargo, la resistencia transversal está directamente influenciada por la estructura de la superficie de la barreta y por tanto el efecto de la inoculación aquí sí viene reflejado en el resultado del ensayo.

La tenacidad de las fundiciones está notablemente mejorada en las fundiciones inoculadas, a pesar de que dicha propiedad es difícil de definir y aún más difícil de medirla cuantitativamente.

Industrialmente y de un modo más sistemático se utiliza el ensayo de choque y aunque no se pueda definir con exactitud qué propiedad o combinación de propiedades se ponen en evidencia con dicho ensayo, el hecho es que la fundición inoculada soporta una altura de caída mayor que la fundición no inoculada de la misma composición.

La resistencia al choque de una fundición es directamente proporcional al número de células eutécticas, o dicho de otro modo, cuanto mayor es el número de células eutécticas por unidad de superficie en los límites compatibles con la microestructura normal de la fundición más grande es la resistencia al choque.

Precisamos una vez más que este ensayo de choque, así como las propiedades reales que ponen en evidencia, son objeto de controversias. Sin embargo, si se admite la idea de que una mejora en la resistencia al choque indica una mejora de la tenacidad, una fundición inoculada es desde este punto de vista superior a la fundición no inoculada de idéntico análisis.

Con la inoculación también se obtiene de forma constante una deformación más acentuada, que junto al aumento de la resistencia transversal, nos indica también un aumento de la tenacidad, figura 4.3, pues ésta está directamente relacionada con la resistencia transversal y deformación.

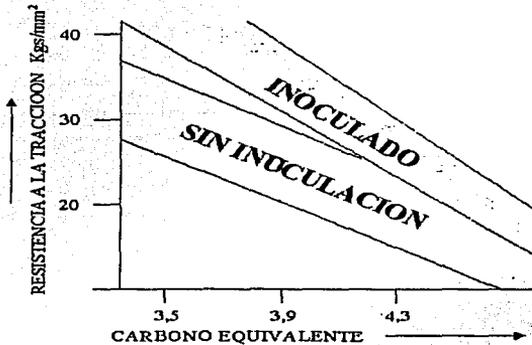


Fig 4.3. Se muestra como el hierro al ser inoculado, aumenta su resistencia a la tracción.

El efecto de la inoculación sobre la reducción del “blanqueo” o profundidad de temple está directamente relacionado con la maquinabilidad (figura 4.4). Los inoculantes mejoran generalmente la maquinabilidad del hierro, debido a una mayor uniformidad en la estructura, a la eliminación de la ferrita primaria, a la disminución de la dureza superficial y al transformar en los espesores delgados los carburos de hierro en perlita y grafito.

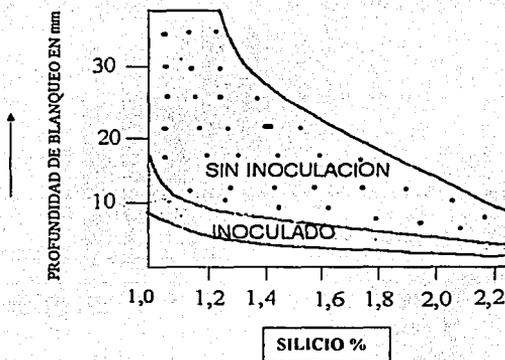


Fig 4.4. El hierro al ser inoculado disminuye la tendencia al “blanqueo” o profundidad de temple.

4.11 RELACIÓN DE TEMPERATURA TIEMPO

Ya que el efecto de nucleación del inoculante llega a su cima rápidamente y después se desvanece rápidamente (estimado a una velocidad de desvanecimiento del 50% para cada cinco minutos después de la inoculación), el inoculante preferentemente se añade inmediatamente antes o durante la operación de vaciado al molde. Para demorar más la

introducción del inoculante al flujo de metal el mayor tiempo posible, otra opción es inocular en el molde mismo.

La fusión, cuyo tiempo ha sido cuidadosamente calculado, de los elementos inoculantes, asegura que las características metalográficas predeterminadas se cumplan ya que la forma y estructura del grafito son una función de la química del metal, la temperatura, la velocidad de enfriamiento y la efectividad del inoculante. El grado al que la formación del grafito se controla durante la solidificación determina piezas fundidas predecibles. El grafito que se forma al solidificarse el hierro gris puede asumir un número de formas dependiendo del tiempo de congelamiento y la temperatura. En la figura 4.5 podemos apreciar los efectos de la inoculación.

A. Células toscas
enfriamiento calor.

B. Células muy finas
menor enfriamiento.

C. Células intermedias
mayor enfriamiento.

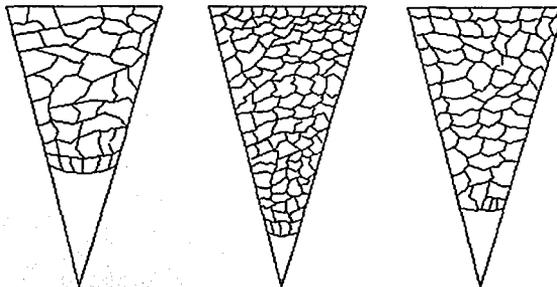


Fig 4.5. Los efectos de la inoculación sobre el tamaño de la célula eutéctica y la profundidad de enfriamiento en muestras de cuña (a) antes de la inoculación, (b) inmediatamente después de la inoculación y (c) manteniendo después de la inoculación.

El metalurgista busca grafito en una matriz de hierro gris colocado de tal manera que las piezas fundidas resultantes logren los niveles de resistencia de tensión, dureza y maquinabilidad prescrita por las especificaciones del comprador de la pieza fundida. El trabajo del fundidor es causar la cristalización de grafito en la forma y tamaño deseado durante la solidificación en las áreas de nucleación inducidas por el inoculante.

Una prueba definitiva para medir la relación entre el tiempo de vaciado y la temperatura y el efecto de la inoculación, una colada de hierro gris inoculado fue vertida a una olla receptora y transferido a tres ollas de vaciado sin el beneficio de otra inoculación.

La primera olla, vaciada inmediatamente a 2750°F presentó básicamente grafito Tipo A del tamaño 4-5 en un molde perlítico de espacio medio, teniendo una resistencia de tensión de 34,000 psi y una dureza Brinell promedio del No. 190.

La segunda olla de vaciado fue llenada cinco minutos después, pero a 2680°F. Presentó algo de grafito Tipo A, cantidad considerable de grafito B y cerca de la superficie de la pieza fundida, algo de grafito Tipo D. La estructura matriz era perlita tosca y cantidades considerables de ferrita, una matriz generalmente asociada con grafito del tipo B y D. La resistencia de tensión había bajado a 28,000 psi y la dureza Brinell promedio No. 170.

Las diferencias en la estructura y las propiedades mecánicas entre el primer juego y el segundo juego de coladas vaciadas involucraron pérdidas de temperatura y desvanecimiento del inoculante. La temperatura inferior causó que las piezas fundidas se solidificaran más rápidamente, resultando en algo de subenfriamiento. El desvanecimiento del inoculante redujo la formación de áreas de nucleación de grafito en el metal que se enfriaba. La adición de más inoculantes, aún a la temperatura reducida, hubiese reducido el grado de subenfriamiento y la pérdida subsecuente de áreas de nucleación.

La tercera olla de hierro, vaciada a 2500°F y veinte minutos después de la transferencia original, presentó un deterioro del grafito por pérdida de la temperatura en el

metal fundido. Algo de grafito Tipo B se encontró pero la mayoría era del Tipo D, y hubo evidencia de la presencia de carburos, o enfriamiento, en las orillas exteriores de las piezas fundidas de prueba. No hubo grafito del Tipo A presente. Las propiedades mecánicas de las piezas fundidas fueron pobres en comparación con los dos vaciados anteriores: 24,000 psi, 140 de dureza Brinell (BHN) mezclado con una dureza de la superficie de 330 BHN a causa del enfriamiento.

Las malas microestructuras y las propiedades físicas inferiores de las piezas fundidas de la tercera olla fueron causadas principalmente por metal frío, por el desvanecimiento y la oxidación del hierro, éste último causado por la exposición al aire antes del vaciado.

4.12 RESUMEN DE LOS REQUISITOS PRÁCTICOS DE UN INOCULANTE

Para que un inoculante cumpla satisfactoriamente su misión como tal, debe reunir las condiciones siguientes:

- Reducir al mínimo el valor de temple, en función de la composición química del hierro.
- Dar resultados con una adición predeterminada idéntica para cada tipo de composición de carga del cubilote.
- No tener influencia sobre la composición química.
- Prolongar su acción el tiempo suficiente para permitir el llenado de los moldes en condiciones normales. Por tanto, no tienen que ser muy sensibles a un efecto de decaimiento (fading).
- Mejorar las características mecánicas.

➤ **No tienen que haber efectos adversos al añadir más inoculante (accidentalmente o a voluntad) que el mínimo necesario.**

➤ **Ser económico.**

4.12.1 Composición de un inoculante

Uno de los principales factores que afectan la inoculación es la composición de los inoculantes. Para los hierros grises se emplean inoculantes que contienen carbono y silicio. Se ha encontrado que el silicio puro no es efectivo, sin embargo, aleaciones de ferrosilicio con cantidades pequeñas de aluminio y calcio son muy efectivas, otros inoculantes pueden contener pequeñas cantidades de cerio, estroncio, bario, magnesio, zirconio. Los efectos de estos inoculantes podemos describirlos respectivamente de normales, buenos y excelentes como lo indica la figura 4.6.

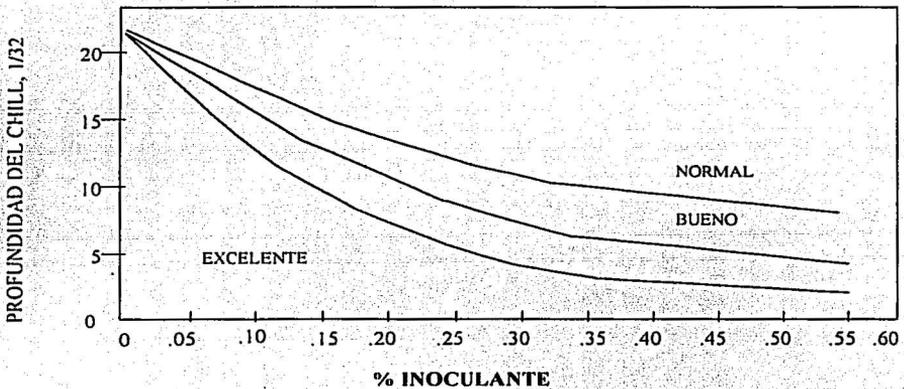


Fig 4.6. Efectos de diferentes inoculantes en las fundiciones grises.

Los inoculantes en hierros grises no reducen la tendencia a la formación de hierros blancos a menos que contengan fuerte desoxidantes tales como: Al, Ca, Zr, Ba, Ti, B. Sin

embargo, el efecto de la temperatura de inoculación no debe ignorarse. Los inoculantes con 85% Si como Fe – Si que contiene de 1- 1.5% Al- Ca y otros elementos desoxidantes tienen un efecto mayor en reducir la zona chill cuando se hace la inoculación en el rango de temperaturas de 1532 a 1565°C, que cuando se utilizan temperaturas elevadas superiores a 1648°C. Otro hecho importante es que el aluminio pierde potencia como desoxidante cuando se adiciona a temperaturas elevadas, otra característica es que la inoculación es más efectiva cuando se adiciona en los bebederos, esto se debe quizá a la caída de la temperatura del metal.

En efecto, si se examinan separadamente los principales productos que permiten una inoculación y que son reconocidos como eficaces, tenemos que:

Ferro-silicio: Producto ampliamente utilizado, se requiere un elevado porcentaje de utilización (0.3 a 0.5%) y tiene un efecto de decaimiento muy rápido si se utiliza en estado puro. Frecuentemente se prolonga su acción mediante la adición de aluminio pero, en este caso, su empleo sistemático puede ser origen de porosidades. En espesores importantes tienen tendencia a formar una estructura ferrítica. En realidad, al modificar sensiblemente la composición química del hierro tratado, puede decirse que su adición es más bien una simple adición.

Zirconio: Generalmente utilizado en forma de aleación (por ejemplo ferro-silicio-zirconio) permite obtener características elevadas pero, en espesores masivos tiende a dar una estructura ferrítica.

Siliciuro cálcico: produce una escoria fluida muy difícil de eliminar y que se introduce muy fácilmente en los moldes si no se toman grandes precauciones, su acción como reductor de temple está muy influenciada por la temperatura del metal tratado; no obstante metalúrgicamente hablando, está reconocido como la aleación simple que proporciona una inoculación más eficaz:

Grafito: En sí mismo es un inoculante bastante débil pero, utilizado como base con otros inoculantes metálicos ofrece cierto número de ventajas. En efecto este tipo de inoculante es, sin duda, el más eficaz de todos los reductores de temple. Muchos fundidores lo utilizan principalmente porque obtienen una ausencia total de temple, y una maquinabilidad excelente. Además, el grafito no disuelto forma sobre la superficie del metal tratado una cubierta seca que minimiza el efecto de decaimiento. Dicha cubierta reúne los óxidos y las eventuales inclusiones de escoria.

Estos pocos elementos o compuestos están lejos de formar una lista exhaustiva de todos los inoculantes conocidos y posibles pero ponen en evidencia las dificultades que existen en la composición de un producto que incremente las ventajas y reduzca los inconvenientes de cada uno de los constituyentes.

4.13 ALGUNAS DEFINICIONES

Varios términos actuales entre fundidores respecto a la producción de hierro gris incluyen los siguientes:

- **Equilibrio.** Este es un término utilizado para describir la condición de solidificación del hierro gris. Representa un balance entre la temperatura y el tiempo durante el cual el hierro fundido pasa a través de varias fases de congelamiento desde hierro fundido hasta hierro totalmente enfriado en el periodo más corto posible de manera práctica. El equilibrio existe cuando la velocidad de solidificación es lo suficientemente lenta para que el carbón en la solución se precipite en forma de grafito del tipo A.

Entre menor sea la temperatura del metal fundido, mayor será la velocidad de la solidificación. El subenfriamiento puede resultar en piezas fundidas de hierro gris que contendrán ya sea carburos que causen problemas de maquinabilidad o grafitos del tipo B y D que generalmente son indeseables porque están rodeados por una matriz ferrítica y normalmente son más suaves y más débiles que aquellos que contienen grafito Tipo A.

- *Subenfriamiento.* Esta condición que resulta cuando un metal fundido se solidifica por debajo de su temperatura normal de congelamiento. La inoculación ayuda a prevenir esto. El subenfriamiento se causa por el enfriamiento de hierro demasiado rápido para que suficientes áreas de nucleación se formen. La nucleación ocurre en la primera etapa de la solidificación de líquidos. Sin suficientes núcleos presentes a la temperatura de equilibrio de solidificación, el hierro fundido se subenfriará antes de que se empiece a congelar.

El subenfriamiento tiene un importante efecto sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del hierro fundido. Una velocidad de enfriamiento demasiado rápida estorba la salida del carbón excedente de la solución y su llegada a las áreas de nucleación. Tanto el hierro como el carbón se mantendrán dentro de la solución después del punto eutéctico. Eventualmente, el hierro se congelará, sacando el carbón libre, el cual entonces se adherirá a los átomos de hierro para formar un Fe₃C (carburo de hierro) indeseable.

Si el hierro eutéctico o hipoeutéctico se solidifica bajo condiciones de equilibrio, resultará un grafito de tipo A. Si la velocidad de congelamiento disminuye con demasiada rapidez, los tipos de grafito progresivamente cambiarán de A a B y D menos deseables. Un incremento adicional en la velocidad de solidificación resultará en la formación de carburos. Si la velocidad de solidificación es lo suficientemente rápida, se formará un hierro blanco.

- *Desvanecimiento del inoculante.* Los efectos de la inoculación están en la cima de su potencia inmediatamente después de que se añade el inoculante al metal fundido y después inicia su desvanecimiento rápidamente. La velocidad del desvanecimiento depende de la composición del inoculante y del hierro al que se adiciona.

Los efectos de la inoculación pueden durar sólo cuestión de minutos y, por ese motivo, muchas fundiciones imponen un límite en el tiempo en que el hierro puede ser

retenido en la olla después de la inoculación. Existen sistemas que añaden inoculantes al último momento posible antes del vaciado, y la inoculación del molde es otra alternativa.

- *Estructura de la matriz.* El metal que rodea al carbón libre en el hierro fundido establece las propiedades del hierro. Este metal se denomina matriz y su forma depende del análisis del metal, la estructura que resulta durante la solidificación y de la velocidad de enfriamiento de la pieza fundida después que el metal se ha solidificado.

5. PROCEDIMIENTOS DE INOCULACIÓN

Los procedimientos de inoculación corrientemente disponibles pueden dividirse en dos métodos principales "Inoculación en cuchara" e "Inoculación Tardía". La "Inoculación en Cuchara" incluye todos los procedimientos en los que el material inoculante se adiciona al metal ya sea mientras entra en la cuchara o mientras está en ella, mientras que la "Inoculación Tardía" incluye aquellos procedimientos en los que el inoculante se adiciona ya sea mientras el metal se está vaciando en el molde o dentro del propio molde. Los requerimientos para cada categoría se discuten separadamente.

5.1 INOCULACION EN CUCHARA

El máximo efecto producido por cualquier adición de inoculante está en el máximo más o menos al momento que el material se disuelve en el hierro. Sin embargo, los efectos son relativamente de corta vida y el desvanecimiento comienza inmediatamente después de completar la solución del inoculante en el hierro fundido. La velocidad a la que este desvanecimiento ocurre puede variar, dependiendo en la composición del inoculante, pero todos los inoculantes se desvanecen. Se estima que generalmente el 50% del efecto inoculante es probable que se pierda a unos cinco minutos después de hecha la adición y ciertamente no hay período de tiempo después de la inoculación durante el cual el nivel de inoculación permanezca constante. Por estas razones, siempre es deseable hacer la adición de inoculante en la última etapa posible antes del vaciado de los moldes.

Para hierros de grafito escamoso, la etapa más conveniente en la cual se puede hacer una adición es normalmente mientras el metal se vacía del horno, preferentemente rociando la aleación en el chorro del metal más que descargarla en el fondo de la cuchara

antes del sangrado, ya que esto puede dar como resultado varias pérdidas debidas a la oxidación y parte que se queda atorada entre la escoria.

Un desvanecimiento excesivo del efecto inoculante probablemente aparezca si el metal se sostiene por un tiempo mucho mayor que cinco minutos y ocurrirán amplias variaciones si las piezas se vierten después de un tiempo indebidamente largo. Bajo algunas circunstancias, es posible superar este problema utilizando ollas mas pequeñas. En situaciones cuando esto no es posible, como cuando se vacía una pieza grande, puede ser necesario adoptar uno de los procesos de inoculación tardía descritos en siguiente sección, si se requiere de un alto nivel de inoculación.

En la producción de hierro nodular, es esencial que el inoculante se adicione después de que él relampagueó de la adición del magnesio ha cesado. La inoculación es relativamente simple si el metal se transfiere de la cuchara para tratamiento con magnesio a una o más cucharas de fundición, pero debe tenerse cuidado de obtener una buena mezcla si el inoculante tiene que agitarse en el metal dentro de la cuchara de tratamiento. En ese último caso es importante quitar la escoria de la reacción de magnesio antes de adicionar el inoculante. Como con los hierros grises, el tiempo es el factor más importante a controlar y se deben hacer todos los esfuerzos para asegurar que el metal se vierta en el tiempo mas corto posible después de la inoculación.

5.1.1 Materiales para inoculación en cuchara

Inoculantes carbonáceos:

El posible uso de "grafito" para inocular hierros fundidos de grafito escamoso en la cuchara, se ha reconocido por mas de 50 años pero generalmente fue considerado como un inoculante inconsistente. Esto fue debido probablemente a la falla de apreciar que el término "grafito" puede incluir un amplio rango de materiales que, no obstante carbonáceos, ciertamente no están compuestos por grafito verdaderamente cristalino. Para

que el carbón produzca un efecto inoculante útil cuando se adiciona al hierro gris en la cuchara, debe consistir primordialmente de grafito altamente cristalino.

En términos modernos, la palabra "carbón" generalmente se refiere a materiales carbonizables cocidos o secados en hornos, que se han calentado a unos 1,250°C. Tales materiales no son amorfos sino que consisten de cristallitos extremadamente pequeños orientados casualmente y en los que la estructura cristalina característica del grafito puede no estar bien desarrollada. No es posible mostrar ninguna evidencia de cristalinidad por técnicas de microscopia convencional no obstante los resultados del trabajo mecánico pueden verse frecuentemente.

Por comparación, el grafito es un material altamente cristalino que ocurre naturalmente y que se puede producir sintéticamente al calentar ciertos carbonos a temperaturas alrededor de los 2,500°C. Esto provoca que los cristales individuales aumenten considerablemente en tamaño y los planos basales se orienten para dar la bien conocida estructura cristalina hexagonal del grafito. Al mismo tiempo, la mayoría de las impurezas salen del grafito dando un material de relativamente alta pureza.

De esta evidencia, tal vez no es sorprendente que el grafito verdadero con su bien desarrollada estructura cristalina pueda proveer sitios para la nucleación del grafito eutéctico cuando se adiciona al hierro gris en la cuchara mientras que el carbón sin esta estructura bien desarrollada no puede ser capaz de funcionar como nucleante.

El alto nivel de cristalinidad requerido para un efecto inoculante, pone una considerable restricción a los materiales carbonáceos que son apropiados para inocular hierro gris en la cuchara. En la práctica, los materiales apropiados consisten en la mayoría de los grafitos naturales o, alternativamente, fragmentos de materiales altamente grafiticos como electrodos de grafito. Los carbonos tales como coque de petróleo, coque metalúrgico o fragmentos de electrodo de carbón amorfo no son apropiados para la inoculación en cuchara aunque son frecuentemente usados como convenientes fuentes de adición de carbón al hierro fundido como, por ejemplo, durante la fusión eléctrica.

El grafito cristalino es inoculante efectivo para hierros fundidos de grafito escamoso en ambos aspectos de evitar el "chill" (sensibilidad al temple) y aumentar el número de celdas eutécticas. Sin embargo, como el grafito es material de baja densidad, muy finamente dividido y las cantidades requeridas de adición son pequeñas, es difícil obtener un buen control del proceso de inoculación y, en la práctica, raramente se usa solo. Además, la adición de grafito eleva el contenido de carbón de hierro ligeramente, lo que puede tender a reducir la resistencia a la tensión.

Varios inoculantes consisten de grafito de alta pureza mezclado con ferrosilicio triturado, por lo que los beneficios de la remoción, del "chill" (sensibilidad al temple) por el grafito y el ferrosilicio se combinan en una sola adición. Para propósitos especiales, pequeñas cantidades de aleación de titanio/silicio o zirconio/silicio se incluyen a veces para minimizar el riesgo de la formación de fisuras por nitrógeno en hierros de alto contenido de nitrógeno.

Inoculantes de alto silicio:

Una gran cantidad de inoculantes con alto contenido de silicio están disponibles para la inoculación en cuchara de hierro gris y nodular. Con excepción del siliciuro de calcio, todos se basan en aleaciones de ferrosilicio contenido 70 a 80% de silicio u, ocasionalmente, 45, 50% de silicio. El ferrosilicio de alta pureza tiene un efecto inoculante muy pequeño cuando se adiciona en la cuchara. Hablando históricamente, fue tal vez muy afortunado que los ferrosilicios empleados primeramente para ensayos de inoculación fueron casi ciertamente contaminados con aluminio y calcio, de otra manera el potencial del ferrosilicio para la inoculación pudo no haberse conocido por muchos años.

Todos los inoculantes para cuchara basados en ferrosilicio dependen de su contenido de uno o más de los elementos minoritarios aluminio, calcio, estroncio, bario, titanio, magnesio, zirconio, cerio, u otro elemento de las tierras raras para estimular sus efectos inoculantes. El manganeso se incluye a veces para disminuir el punto de fusión de ferrosilicio y así facilitar la solución.

El inoculante base silicio más comúnmente usado para inoculación en cuchara es ferrosilicio al 75% silicio nominal que contienen entre 1 y 2% de aluminio y 0.2 a 1.0% de calcio. Estos elementos generalmente están presentes en las materias primas usadas para producir el ferrosilicio y variaciones considerables en las cantidades presentes pueden ocurrir entre diferentes cargas de ferrosilicio para inoculación. Los fabricantes controlan los niveles de estos elementos en sus productos generalmente por selección de las cargas más apropiadas.

Para producir una inoculación más efectiva y más consistente, los inoculantes contienen cantidades controladas de los otros elementos.

El bario, titanio, magnesio, manganeso y zirconio se usan en adición a las cantidades de aluminio y calcio normalmente presentes y tal vez es cuestionable si los inoculantes fuesen tan efectivos si estos dos elementos no estuvieran presentes. El ferrosilicio estroncio es un caso especial en que es necesario reducir los contenidos de calcio y aluminio a niveles muy bajos para obtener todos los beneficios del estroncio. Este imparte valiosas propiedades especiales al inoculante. Por las diferentes relaciones de materiales de carga requeridas, el ferrosilicio 45% silicio generalmente tiene menores niveles de aluminio y calcio que la aleación 75% silicio y es menos caro de producir. El ferrosilicio cerio, y otras aleaciones basadas en la aleación 45% silicio, generalmente tienen menores niveles de aluminio y calcio que los inoculantes de más alto silicio. Otros inoculantes basados en la aleación 45% silicio contienen calcio y, a veces, magnesio para dar contenidos de 0.6 a 0.9 y 1.0 a 1.5% respectivamente. Los inoculantes especialmente formulados son todos generalmente más efectivos y más consistentes que el ferrosilicio normal. La mayoría de los inoculantes tienen alguna característica particular que hace su elección especialmente favorable para una situación o procedimiento de fundición en particular.

5.1.2 Elección del inoculante para cuchara

El ferrosilicio de grado inoculante normal es de bajo precio y frecuentemente da una adecuada inoculación para satisfacer los requerimientos de las fundiciones de hierro gris o nodular. Si las piezas se hacen de hierro gris, unos inoculantes alternativos para cuchara que pueden dar niveles de inoculación más o menos similares son el ferrosilicio 45% silicio con un contenido más alto de calcio o uno de los inoculantes que contienen grafito. Los materiales de 45% silicio darán un incremento en el contenido de silicio más pequeño que puede ser ventajoso en algunas circunstancias. Las mezclas inoculantes grafiticas también dan sólo pequeños aumentos en el contenido de silicio y a veces dan notablemente mayor remoción de "chill" (sensibilidad al temple). La cantidad de aluminio adicionada con un inoculante base grafito es usualmente muy pequeña, lo que reduce la tendencia a que ocurra la porosidad por hidrógeno. Sin embargo, los inoculantes grafiticos requieren una adición más cuidadosa y temperaturas del metal relativamente altas para obtener una solución completa. En adición pueden promover un número muy alto de celdas eutécticas que a veces dan problemas de aumentar la porosidad por contracción en los grises. Los grafitos son generalmente inoculantes no muy efectivos para hierros nodulares.

Si la formación de "chill" (sensibilidad al temple) persiste aún cuando se use uno de estos inoculantes en la cuchara, se debe hacer la elección de los inoculantes especiales más efectivos, que contiene mayor cantidad de elementos minoritarios. Todo los inoculantes especiales darán mejor remoción de "chill" (sensibilidad al temple) que el ferrosilicio normal y, en los hierros grises, es posible que se obtenga la máxima supresión de "chill" (sensibilidad al temple) en las secciones delgadas con el ferrosilicio estroncio. Este inoculante tiene la ventaja adicional de dar menor número de celdas eutécticas que la mayoría de los otros inoculantes para el mismo nivel de remoción de "chill" (sensibilidad al temple), dando así menor tendencia a la porosidad por contracción. Además, tiene un contenido muy bajo de aluminio que reduce al riesgo de agujeros por hidrógeno.

La inoculación efectiva que puede obtenerse con ferrosilicio titanio se debe probablemente al alto contenido de calcio que contiene. No obstante, la aleación es

particularmente útil cuando se necesita adicionar titanio para prevenir fisuras por nitrógeno en hierros de alto contenido de nitrógeno.

Cuando se inoculan cucharas más grandes de metal, uno de los mayores problemas que se presentan es la desaparición gradual del efecto inoculante durante el tiempo que se maneja el metal. Se ha pretendido que los inoculantes que contienen bario decaen más lentamente que los otros inoculantes y del 10 al 11% de los inoculantes que contienen bario están disponibles para el usuario.

Ocasionalmente, es necesario inocular el metal a una temperatura relativamente baja que puede dar problemas de solución. Bajo estas circunstancias, el uso de un inoculante ferrosilicio con manganeso y zirconio, que se dice que bajan el punto de fusión de inoculante, puede ser valioso. Los inoculantes que contienen grafito deben evitarse bajo estas circunstancias.

La inoculación del hierro gris de muy bajo contenido de azufre es a veces necesaria. A bajos niveles de azufre, los inoculantes grafiticos y ferrosilicos con un bajo contenido total de elementos minoritarios se vuelven menos efectivos. Los inoculantes especiales de silicio que contienen mayor contenido total de elementos minoritarios siguen siendo efectivos a menores niveles de azufre por debajo de 0.02%. Aunque son efectivos a bajos niveles de azufre, los inoculantes de alto cerio deben evitarse bajo estas condiciones por el peligro de sobretatamiento con cerio que puede resultar en la formación masiva de carburos eutécticos. La elección de materiales para la inoculación en cuchara de hierros nodulares está más restringida. Por los bajos contenidos de azufre en estos hierros, el grafito es casi completamente inefectivo como inoculante. Esto significa que los inoculantes que contienen grandes proporciones de grafito generalmente solo tienen un moderado efecto inoculante. El ferrosilicio grado inoculante es efectivo en el hierro nodular y frecuentemente se obtienen niveles de inoculación suficientemente altos al hacer relativamente grandes adiciones de este inoculante en la cuchara después de que cese el chisporroteo del magnesio.

La mayoría de los inoculantes especiales que son altamente efectivos en el hierro gris también son muy efectivos en el hierro nodular. Sin embargo, los inoculantes con un alto contenido de cerio o de tierras raras deben usarse con cuidado por el peligro de excesivos contenidos de cerio que se presenten en el metal por sobre el 0.02%. Altos niveles de cerio promueven la formación de "chill" (sensibilidad al temple) en secciones delgadas y estructuras de grafito nodular inferior en secciones gruesas.

El ferrosilicio con un alto contenido de titanio no se recomienda para el hierro nodular por el peligro de la interferencia del titanio con la formación del grafito nodular. Sin embargo, es particularmente adecuado para hierros de grafito compactado donde el titanio se usa para inhibir la formación de esferas de grafito. El ferrosilicio estroncio es extremadamente efectivo en hierros de grafito nodular que no tienen una adición de cerio para controlar los elementos nocivos. Sin embargo, la presencia de suficiente cerio para controlar estos elementos tiene una tendencia a reducir la eficiencia del ferrosilicio estroncio en el hierro nodular.

Cuando el hierro nodular se ha mantenido por un tiempo relativamente largo después de la inoculación, a veces es necesario reinocular antes de la colada. El ferrosilicio 45% silicio que contiene calcio y un 1.5% de magnesio es particularmente útil para este propósito, ya que inocula efectivamente y, además, el magnesio en el inoculante tiende a compensar cualquier pequeña cantidad perdida de magnesio que pudo ocurrir mientras el metal se detenía.

5.1.3 Cantidad de adiciones para la cuchara

Todas las adiciones de inoculante aumentan el costo total de la producción de metal y por lo tanto es lógico mantener las adiciones a un nivel bajo. Es raro técnicamente que en la práctica o en lo económico se use más del 0.2% de adición total de un inoculante grafitico al hierro gris. Las adiciones sobre este nivel son difíciles de disolver completamente y así tienden a dejar restos en las cucharas. También está el riesgo de que

la sobreinoculación con el grafito pueda dar innecesariamente un alto número de celdas eutécticas, resultando así en una elevada tendencia para la porosidad por contracción.

En los hierros grises, un total de adiciones en cuchara de más del 0.4% de cualquiera de los inoculantes ferrosilicos es raramente necesario y, en la mayoría de los casos, menos de esta cantidad es adecuado. El grado de inoculación producido no aumenta en proporción a la cantidad de adición y la inoculación extra producida por mayores adiciones raramente justifica su costo o el riesgo de que se presenten otras desventajas. A veces es económico usar una adición más pequeña de uno de los inoculantes especiales más efectivos en lugar de una mayor adición de ferrosilicio. Esto también tiene ventajas técnicas desde el punto de vista de las adiciones más pequeñas de aluminio y otros elementos minoritarios que reducen la tendencia a la porosidad por hidrógeno y frecuentemente minimiza la formación de escoria.

En hierros nodulares, la adición de cantidades de inoculantes base ferrosilicio son generalmente mayores que para hierros grises y adiciones de hasta 0.8% no son raras para piezas de sección delgada. Como con los hierros grises, puede ser técnica y económicamente ventajoso usar una cantidad más pequeña de un inoculante especialmente poderoso más que una cantidad grande de ferrosilicio normal, particularmente cuando la cantidad total de silicio adicionada debe mantenerse al mínimo. En casos extremos, es posible obtener una inoculación en cuchara muy efectiva usando grandes adiciones de uno de los inoculantes especiales, suministrado el metal puede verterse muy rápidamente después de la inoculación para reducir la desaparición gradual.

Una regla de oro para la inoculación en cuchara es seleccionar el inoculante más adecuado para el propósito y entonces usar la mínima cantidad posible para obtener el resultado requerido. En cuanto sea posible, la operación de vaciado debe diseñarse para que no sea necesario adicionar más inoculante que el requerido "sólo porque" puede no siempre trabajar apropiadamente, o "solo porque" una cuchara de metal puede detenerse más tiempo de lo usual.

5.2 INOCULACIÓN EN EL MOLDE (TARDÍA)

El término inoculación incluye cualquier método de adición del inoculante al chorro de metal ya sea mientras se cuele o dentro de la cavidad del molde en sí. Es posible producir mayores niveles de inoculación por estos métodos con mucho menor adición de inoculante, que por inoculación en cuchara. Con la inoculación tardía, el problema principal es obtener una distribución uniforme en todas las piezas más que seleccionar el material inoculante más efectivo. Los mayores desarrollos, por lo tanto, han sido en los métodos de adición más que en el material inoculante en sí.

-Inoculación dentro del Molde: Los métodos de inoculación en el molde implican la colocación del inoculante en alguna forma ya sea dentro del sistema de alimentación, o en el revestimiento de la colada. Casi todos los métodos comunes implican el uso de inoculantes sólidos, ya sea polvo, comprimidos en pellets, o como pedazos premoldeados o bloques.

Los pellets y los pedazos premoldeados de menor tamaño se colocan usualmente en unas bolsas especialmente formadas en los sistemas de alimentación de piezas de pequeño a medio tamaño. Es ventajoso tener una cámara mezcladora en el sistema de alimentación en seguida del punto de inoculación para favorecer la dispersión del inoculante a través del metal antes de entrar a la cavidad del molde efectiva. Las recomendaciones para los sistemas de alimentación apropiados frecuentemente están disponibles por los productores de inoculantes.

Sin embargo, bajo algunas circunstancias, se pueden obtener altos niveles de inoculación por este método sin una inoculación previa en la cuchara, en la práctica el método generalmente se usa en adición a la inoculación en cuchara como un “seguro” contra los niveles variables de inoculación en la cuchara. Una razón para esto es que, en la mayoría de los casos, es imposible checar que los pellets o pedazos acomodados queden en su lugar una vez cerrados los moldes. Los resultados de la omisión del inoculante de uno o

dos moldes en la producción de un día podría ser mucho menos serio si el metal no se hubiera inoculado en la cuchara.

Para grandes piezas individuales que pesen hasta varias toneladas, están disponibles bloques premoldeados de inoculante y éstos se ponen en el depósito de vaciado que se puede agrandar para sostener varios cientos de kilogramos de metal. Los bebederos se taponan y se coloca un dique o puente entre el (los) bebedero (s) y el inoculante para retener cualquier impureza o escoria que puede formarse. El depósito de vaciado casi se llena antes de levantar los tapones para que así los bloques de inoculante se calienten y empiecen a disolverse en el hierro antes que algo de metal entre a la cavidad del molde. Por los largos tiempos empleados en llenar y manejar cucharas de gran tonelaje, este método se usa frecuentemente como la única fuente de inoculación para piezas grandes.

-Inoculación en el Chorro de Colada: El momento más lógico para adicionar un inoculante para evitar la desaparición gradual y además asegurar una mezcla uniforme es mientras el metal se vacía de la cuchara a los moldes. Lo más importante es que todo el metal reciba la dosis correcta de inoculante y que la adición sea continua a través de todo el periodo de colada. Se han desarrollado varios métodos de obtener este objetivo, incluyendo la distribución directa de inoculante en polvo y la alimentación del inoculante contenido en tubos de acero delgados o alambre hueco, ya sea por gravedad o mecánicamente, dentro del chorro de colada.

Sin embargo, en años recientes, con mucho el método usado más popular es el sistema de alimentación de inoculante triturado y clasificado en el chorro de metal, desarrollado por Foseco Foundries International. Están disponibles varias versiones del equipo y recientemente el rango se ha extendido para incluir un simple sistema mecánico que está ligado a la cuchara de colada, venciendo así el problema de usar el método con moldes móviles en bandas de paleta. Una versión computalizada también se ha desarrollado, la cual se acoplará con las plantas multimoldes, con moldeo y vaciado controlados por computadora. Todos los sistemas, a excepción de la cuchara montada,

están adaptados con señales de alarma para dar una indicación inmediata de cualquier falla del equipo y, si es necesario, al grado de detener la planta hasta que se corrija el problema.

5.2.1 Materiales disponibles para la inoculación tardía

Sólo una pequeña cantidad de materiales está disponible comercialmente para la inoculación tardía y están basados todos en el ferrosilicio. La composición del ferrosilicio es importante, aunque aún el ferrosilicio de alta pureza ha mostrado ser efectivo cuando se adiciona al chorro de metal. Sin embargo, es probable que al menos algunas de las ventajas, tales como facilidad de solución, que se presentan por la presencia de varios elementos menores en los ferrosilicios, aún son patentes cuando se usan para la inoculación tardía.

-Inoculación en el Molde: El procedimiento original de "inoculación en el molde" implicaba colocar una pequeña cantidad de ferrosilicio triturado en el fondo del bebedero. Sin embargo, este método resultó poco confiable. La mayoría de los materiales corrientemente usados para inoculación en el molde consisten ya sea de ferrosilicio en polvo, aglomerado en pellets, o de pedazos premoldeados o bloque de ferrosilicio especialmente formulado. La liga orgánica usada para los pellets se rompe progresivamente mientras el metal pasa sobre ellos, liberando así gradualmente el inoculante en el metal.

Los pedazos premoldeados y bloques están hechos en un rango de pesos de 20g., hasta unos 5kg., y están disponibles en dos composiciones, una diseñada para hierros grises y otra para hierros nodulares. La característica más importante de ambas composiciones, sin embargo, es que están diseñadas para minimizar el agrietamiento por choque térmico cuando se inundan con el hierro fundido. Esto reduce el riesgo de que queden pedazos de inoculante parcialmente disueltos en la pieza sólida.

-Inoculante en el Chorro de Colada: Todos los inoculantes que se usan para adición en el chorro de colada se basan en el ferrosilicio y uno de los requerimientos más importantes es el tamaño de partícula que se disolverá rápidamente. Los inoculantes se trituran y clasifican cuidadosamente por los proveedores entre límites de tamaño relativamente cercanos para obtener estos requerimientos. Es necesario el almacenamiento en contenedores sellados en condiciones secas para mantener estas propiedades y evitar la pérdida de efectividad debida a la oxidación.

El ferrosilicio grado inoculante normal, triturado, puede dar a veces resultados satisfactorios pero, generalmente, se usa un ferrosilicio grado especial, que contiene manganeso y zirconio para bajar su punto de fusión. El ferrosilicio que lleva estroncio, triturado, también está encontrando aceptación debido a su muy bajo contenido de aluminio, su poderoso efecto inoculante y baja tendencia a formar escoria.

5.2.2 Proceso y cantidad

La mayoría de los procesos de inoculación tardía son muy efectivos tanto para hierros gris como para hierro nodular. La elección, por eso, depende usualmente más en la selección del proceso más conveniente que puede usarse que en la cantidad del efecto inoculante requerido. Los procesos que dispensan cantidades controladas de inoculante en el chorro de colada son particularmente aplicables a operaciones que usan posiciones de vaciado fijas o señaladas tales como sistemas automáticos de moldeo y vaciado, pero también es posible aplicarlos a cucharas de vaciado móviles. Se anticipa que este desarrollo ampliará el uso de inoculación en el chorro de metal considerablemente.

La cantidades de inoculante usadas para inoculación en el chorro de metal varían de un 0.02 a 0.1% del total de la adición, obteniéndose una inoculación adecuada con ninguna otra adición. En efecto, los rangos de adición más grandes usualmente dan niveles de inoculación más altos que los obtenidos por inoculación en cuchara, facilitando así que las piezas más delgadas se produzcan libres de "chill" (sensibilidad al temple).

5.2.3 Características del fundamento de la inoculación en el chorro del metal.

Las características del fundamento de la inoculación en el chorro de metal son:

- a) *Operación automática* – El surtidor se activa por el comienzo del flujo de metal y cesa sólo cuando la colada para.
- b) *Inoculación uniforme* – El diseño asegura que el primer metal que entra en el molde sea inoculado y la velocidad de inoculación sea constante con las velocidades uniformes de colada.
- c) *Independencia del tamaño de la pieza* – El surtidor sólo necesita ajuste para cambios en la velocidad de colada y no de cantidad. En la práctica el efecto inoculante es generalmente tan poderoso que aún estos ajustes no son necesarios.
- d) *Flexibilidad* – El inoculante puede operarse a una posición fija o montado en una cuña señaladora a la cual la cuchara está unida. La reciente introducción de la unidad de cuchara montada amplía la flexibilidad considerablemente.
- e) *Usar inoculantes comercialmente disponibles* – La mayoría de los inoculantes finamente granulados, libres de polvo, base ferrosilicio, pueden usarse.
- f) *Advertencias automáticas de falla para inoculantes* – Advertencias inmediatas de falla del provisionamiento de inoculante por cualquier razón pueden dar se por luces intermitentes, alarmas sonoras o aún el paro total del sistema de moldeo y colada.

5.2.4 Problemas con alto volumen

En unidades de alto volumen de producción en masa es posible que se puedan desarrollar sistemas individualmente diseñados para colocar los pellets o pedazos de inoculante en el sistema de alimentación del molde y usar sensores para checar su presencia antes de cerrar los moldes. Sin embargo, en la práctica, los pedazos o pellets casi siempre los posicionan los moldeadores mientras se hacen los moldes. Por eso el proceso recae grandemente en la diligencia y confianza de estos operadores. Por esta razón la inoculación en cuchara usualmente se lleva a cabo en adición a la inoculación en el molde para minimizar el riesgo de piezas completamente sin inocular en el caso de que pedazos o pellets se omitan en un molde.

Este problema no se presenta con la inoculación en el molde de grandes piezas donde los bloques de inoculante pueden verse en el revestimiento de colada y muchos operadores piensan en éste como el único método efectivo de inoculación para piezas de varias toneladas de peso.

La cantidad de inoculante usado es otra vez muy pequeña, variando de 0.05 a 0.2% de la adición total. En algunos casos la velocidad de colada tanto como la cantidad de metal vaciado deben tomarse en consideración. Por ejemplo, una pieza de una tonelada colada en 25 seg, puede requerir un kg., de inoculante dividido en tres o cuatro bloques, mientras que el mismo peso de metal colado en un minuto puede requerir un solo bloque de inoculante de un kg., para asegurar que durará a través de toda la colada.

El uso de alguna forma de inoculación tardía ha aumentado muy considerablemente en los últimos años y hay muy poca duda que esta tendencia continuará. Virtualmente es una práctica standard incorporar la inoculación en el chorro de metal a unidades automáticas de moldeo y colada y la disponibilidad de surtidores de inoculación que pueden montarse en cucharas viajeras extenderá su uso a plantas pequeñas y fundiciones intermedias.

Para piezas más pequeñas, la inoculación en el molde es probable que continúe considerándose más como un seguro contra variaciones que ocurran en el nivel de inoculación obtenido por inoculación en cuchara. El uso de bloques de inoculante en el recubrimiento de colada es fácilmente el método más práctico y económico de inoculación para grandes piezas individuales.

5.3 INOCULACIÓN EN EL HIERRO DÚCTIL

5.3.1 Prácticas de inoculación utilizadas en la producción de hierro dúctil

La inoculación es un paso necesario en la producción de hierro dúctil. Los hierros tratados a base de magnesio sin inoculación tienen un alto contenido de carburos (blancos), y el grafito que posiblemente se haya formado de nucleación residual se encuentra en forma compactada pero no necesariamente en forma esférica. El paso de inoculación por consiguiente, es uno muy importante en la producción de grafito esférico y debe ser efectuado con el mismo cuidado y precisión que el tratamiento de magnesio.

En el caso de hierro dúctil, la inoculación es un medio de promover la cristalización o la formación de esferoides de grafito, como impedir la formación de grafito laminar y para fomentar el número de celdas eutécticas.

Una teoría del mecanismo de inoculación es que se precipitan pequeñas partículas de grafito en el metal por la adición de un fuerte grafitizante como el ferrosilicio. Esta teoría mantiene que el trozo de ferrosilicio que se está disolviendo momentáneamente aumenta el contenido de silicio en el metal en contacto a un nivel tan alto que esta zona se encuentra super-saturada con respecto al carbón y entonces las partículas de grafito que forman los núcleos se precipitan. En base a esta teoría se puede entender claramente que una muy pequeña partícula de silicio no logrará producir suficiente concentración local de

silicio antes de que sea disipada. En otras palabras hay un tamaño crítico del ferrosilicio o inoculante que producirá una efectividad óptima. Es también lógico entonces que la temperatura del ferrosilicio, en el momento de su adición a hierro líquido, tiene un efecto importante en su habilidad para proveer concentración elevada de silicio. La temperatura mínima para una máxima eficiencia de inoculación es de 1425°C.

El inoculante, grafitizante más ampliamente utilizado es ferrosilicio al 75% con calcio. El grado que contiene calcio se prefiere por su mayor capacidad de reducir enfriamiento. Un tamaño de aleación de 10mm x 2mm es más efectiva para inoculación en tinas.

Los inoculantes conteniendo tanto aluminio como calcio son mas efectivos que los que contienen solamente un elemento. Sin embargo, el aluminio aumenta la tendencia del hierro dúctil a absorber hidrogeno y por lo tanto causa micro-porosidad (pin holing). Por lo tanto, el contenido de aluminio en el ferrosilicio 75% deberá ser entre 0.80% y un 1.00% y los niveles de calcio deberán ser de aproximadamente 1.50%.

5.3.2 Método preferible y cantidad

El mejor método de inoculación de hierro conteniendo magnesio, consiste en añadir el inoculante uniformemente al chorro durante la transferencia de tina, de tal forma que mientras sea posible cada partícula del inoculante caiga en contacto con el nuevo metal líquido. Un método menos deseable consiste en localizar el inoculante en el fondo de la tina en la cual se transferirá el hierro conteniendo magnesio.

En este caso la temperatura del ferrosilicio puede ser elevada hasta el punto que pierde una parte considerable de su habilidad para inocular.

Esto ha sido claramente demostrado por el hecho de que el ferrosilicio fundido no tiene efectos inoculantes. Otros métodos indeseables de inocular son los siguientes:

1. Añadir inoculantes con el material de tratamiento.
2. Añadir inoculante en la superficie de la tina y pretender agitarlos dentro del metal. Esto puede resultar en la inoculación de la parte superior en la tina solamente.

Se da considerable atención a la mecánica del procedimiento de inoculación y hay muchos ejemplos para indicar su importancia. En un caso una fundición de secciones ligeras vaciada en arena verde, resultaba altamente carbídico, en donde el inoculante se añadía al fondo de la tina de transferencia. Sin embargo, añadiendo el inoculante en el chorro durante transferencia sin cambio en el tamaño de la adición se lograban fundiciones libres de carburo.

La cantidad de inoculación requerida depende de la composición del hierro, del espesor de las piezas y velocidades de solidificación de la pieza, el tipo de horno de fusión y composición del inoculante utilizada. Generalmente se usa 0.5% de silicio como ferrosilicio o 7.5 Kgs de ferrosilicio al 75% por tonelada métrica para piezas con secciones en el rango de 15 a 50mm. En piezas con secciones más ligeras se usan adiciones de ferrosilicio hasta del 1% para minimizar la formación de carburos.

5.3.3 Inoculación en el molde para hierros nodulares

La inoculación en el molde se desarrolló originalmente como un medio para eliminar carburos centrales y la formación de carburos en secciones menores a 10mm.

Es un procedimiento relativamente simple. Un gramo de ferrosilicio al 75%, conteniendo un 1.25% de aluminio y un 1.0% de calcio se coloca en el molde en la base de la bajada y el molde se vacía en forma acostumbrada. El ferrosilicio debe tamizarse através de una malla número 30, o sea con aberturas de 0.0232". El material más grueso no se disuelve completamente y el más fino se oxida en contacto con el hierro, resultando una

grafitización mediocre. El ferrosilicio debe añadirse a cada molde al cerrar lo por medio de una cuchara controlada en tamaño para un gramo. Adiciones de un gramo trabajan bien en piezas que pesan hasta 50 Kgs.

Además de contrarrestar la tendencia del efecto de inoculante a reducirse, esta adición extremadamente pequeña aparentemente provoca nucleación formando más y más pequeños nódulos y más ferrita. Este tratamiento elimina el costoso y tardado tratamiento térmico para grafitizar los pequeños carburos del centro, (centerline).

La inoculación en el molde tiene una deficiencia seria. El vaciado de baja temperatura tiende a flotar las partículas no disueltas en las superficies de las fundiciones, han llegado hasta romper herramientas de maquinado.

6. PRODUCTOS INOCULANTES COMERCIALES

6.1 INOCULIN 10

La compañía FOSECO ha realizado numerosas investigaciones en el campo de la inoculación encaminadas a la obtención de un inoculante lo más completo posible. Después de laboriosos trabajos en los que se han valorado concienzudamente todos los factores interrelacionados, se ha obtenido el producto INOCULIN 10 el cual, ha dado resultados más regulares y mejores sobre una amplia gama de aleaciones de hierro, comparándola con otros inoculantes existentes en el mercado.

Como se ha visto en la teoría de la inoculación, las propiedades del hierro a través de las distintas secciones de una pieza, varían desde una superficie endurecida, que puede presentar problemas de mecanizado, hasta un centro blando con baja resistencia a la tracción.

Dichas variaciones de propiedades, son resultado de distintos modos de enfriamiento (la superficie se enfría rápidamente mientras el centro mantiene su calor durante mucho más tiempo). Se ha hallado que mediante la inoculación del hierro con INOCULIN 10, las variaciones son minimizadas considerablemente. Los gráficos muestran como pueden variar las propiedades entre secciones de 3 mm. a 25 mm.

La inoculación con INOCULIN 10 reduce fuertemente la tendencia al "blanqueo" de las capas superficiales, incrementa el número de células, por unidad de volumen, y, por encima de los 6 mm. mantiene constante el tamaño de grafito.

Parece extraño que hierros de la misma composición, que se han fabricado al mismo tiempo y en el mismo horno, puedan variar tanto en sus propiedades. El motivo no es más que el CARBONO.

El hierro colado tiene un contenido en carbono entre 2,5 al 3,6 %. Las características finales de una pieza dependen más que nada, de cómo se ha depositado dicho carbono en el hierro.

Sin inoculación el carbono puede combinarse con el hierro formando carburo de hierro (cementita Fe_3C) y dar hierro blanco, muy frágil. Inoculando con INOCULIN 10 se asegura que el carbono sea depositado en el hierro en forma de grafito, lo que significa que será hierro gris.

La solidificación de un hierro inoculado es un proceso de nucleación y crecimiento. El inoculante suministra innumerables núcleos mediante los cuales las láminas de grafito van creciendo en el metal líquido hasta que el metal se ha solidificado por completo.

Se informa que el papel del INOCULIN 10 es doble:

1. Suministra los núcleos (la clave del mecanismo) para el comienzo de la solidificación.
2. Controla la forma final de las láminas de grafito.

Se ha encontrado que la microestructura óptima es aquella en la que el tamaño de la célula eutéctica es pequeña y en la que las láminas de grafito son cortas y de orientación al azar (tipo A). EL INOCULIN 10 suministra los núcleos suficientes para asegurar que sea pequeño el tamaño de la célula, y también asegurar que el tamaño de las láminas de grafito, no sean mayor que el tamaño 5, el óptimo señalado por la A. S. T. M. (American Society of Testing Materials).

Las gráficas de la figura 6.1 señalan el efecto que tiene el INOCULIN 10 en modificar la estructura del metal.

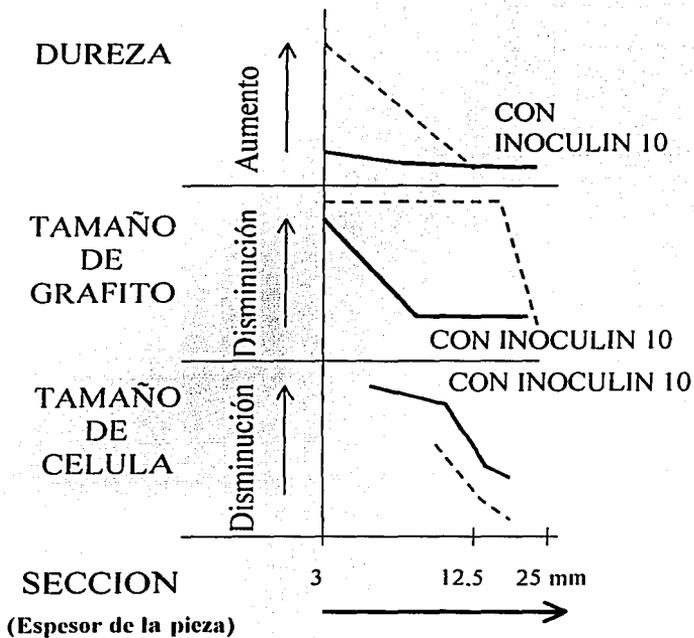


Fig 6.1.1. La variación de las propiedades del hierro al ser inoculado con inoculin 10.

Desde el punto de vista del fabricante Foseco, el inoculin 10 ha probado ser un inoculante eficiente para mejorar la calidad de las piezas de hierro fundido.

6.1.1 Modo de empleo del inoculin 10

El INOCULIN 10 siempre tiene que añadirse de tal manera que se mezcle lo mejor posible con el metal líquido para evitar que las partículas floten en la superficie del metal fundido pues, de ser así la efectividad del inoculante se vería mermada en gran parte.

El INOCULIN 10 desarrolla la máxima eficacia cuando se adiciona en el punto en que está más caliente el metal, es decir, en el canal de colada cerca del agujero de sangría, debiendo durar la adición durante el 50-75% del tiempo de sangrado, cuando se funde en el cubilote, o en el chorro de metal hablando de cualquier tipo de horno.

La cantidad de inoculante que se ha de emplear variará según el carbono equivalente del hierro, el espesor de la pieza y la disminución de temple que se desee conseguir. Además de las variables citadas que pueden controlarse fácilmente, hay también las condiciones prácticas de fusión (funcionamiento del horno, combustible empleado, etc.), que puede tener una influencia considerable. Como sea que estas últimas son muy difíciles de controlar, los fundidores necesitan un ensayo práctico que les facilite una base cuantitativa para determinar la sensibilidad al temple del hierro antes de ser colado en los moldes. Además, después de la correspondiente inoculación con INOCULIN 10, el ensayo tiene que ser confiable a fin de poder establecer una relación entre los valores de temple obtenidos y los requisitos de las piezas que se fabriquen. Dicho sistema de control es llamado *cuña de temple*.

Como las adiciones del inoculante, son pequeñas, no afectan a la composición química del hierro, por lo que no es necesario tomarlo en cuenta en el cálculo de la carga.

6.1.2 Ventajas del inoculin 10

- Sólo se necesitan pequeñas adiciones, por tanto, se reducen los costos.

- **Da estructuras perlíticas en grandes espesores, al mismo tiempo que los espesores pequeños están libres de temple.**
- **Reduce la sensibilidad al espesor.**
- **Se mejoran las propiedades mecánicas, especialmente la maquinabilidad**
- **Escoria fácil de quitar de la superficie de metal.**
- **Se obtienen propiedades físicas que de otro modo serían necesarios elementos de aleación.**

6.2 INOCULANTE 63

Desde que se introdujo el inoculante 63 que fue en 1963, la compañía Foote Mineral Company que es quien lo produce sigue dando excelentes resultados en la inoculación del hierro gris. Este producto de extensas investigaciones y desarrollos nos muestra que las propiedades del bario-calcio-manganeso y ferrosilicio mejoran la reducción del chill de una manera mayor que como lo hacen otros inoculantes en la actualidad.

El uso de inoculante 63 mejora la estructura del grafito en los hierros colados, y minimiza la tendencia de formación de carburos. Como resultado las propiedades mecánicas son superiores, reduce la sensibilidad al espesor y mejora las características de maquinabilidad. Todo esto se logra con un bajo precio, lo cual lo convierte en un inoculante verdaderamente atractivo.

6.2.1 Descripción del producto

Composición química típica.

Si	Mn	Ca	Ba	Al	Fe
60-65%	9-12%	1.5-3.0%	4-6%	1.0-1.5%	Balance

Tamaños estandar: De malla 65 a 3/8 pulg. De malla 32 a 1/4 pulg.

Rango de fusión: liquidus $-2200^{\circ} F \pm 20^{\circ}$

Sólidos $-2000^{\circ} F \pm 20^{\circ}$

Solubilidad: El inoculante 63 tiene un rápido porcentaje de solubilidad en el hierro, incluso en temperaturas tan bajas como $2350^{\circ} F$.

Densidad a Granel: 115 libras/pie cúbico.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Paquetes: Existen bolsas, tambores de 500 lb, y también hay grandes sacos.

Almacenaje: Es recomendable que se mantenga en un lugar seco y cubierto.

Propiedades magnéticas: No tiene propiedades magnéticas.

INFORMACIÓN DE APLICACIÓN

El inoculante 63 debe ser agregado en el chorro de hierro cuando se está transfiriendo del horno a la cuchara. La adición deberá ser hecha uniformemente después de que haya 2 o 3 pulgadas de metal en el fondo del cucharón. El tratamiento es más efectivo si esto se realiza en menos de 15 minutos, antes de que se realice el vaciado en el molde.

El tamaño óptimo de la partícula de inoculante 63 depende de la temperatura del hierro al momento de la inoculación, de la cantidad de metal que está siendo tratado, y del intervalo de tiempo entre el tratamiento y el vaciado en el molde.

Las propiedades mejoradas y las características del hierro tratado con inoculante 63 han sido determinadas por pruebas de La Planta Piloto del fabricante y ha sido usado en producción comercial.

6.2.2 VENTAJAS

Elimina o reduce la tendencia a la formación de zonas chill. La observación del grado en que se reduce el chill en las probetas es quizás el índice más utilizado para determinar la eficiencia del inoculante. Pruebas de laboratorio han demostrado que el inoculante 63 es más efectivo por unidad agregada, y es el más capaz de causar grandemente la reducción del chill, por esta razón lo convierte en un producto muy competitivo.

Las siguientes ilustraciones presentan datos de las pruebas del hierro registrados por su Planta Piloto. Es evidente que en la figura 6.2 y 6.3 la adición de 2 libras/tonelada

de inoculante 63 , es equivalente a 3 ó 4 libras/tonelada de inoculante de ferrosilicio, también esto depende de la composición del hierro. Las curvas también indican que es mucho mas grande el grado de reducción del chill con inoculante 63. El ferrosilicio usado en estas pruebas fue de composición estandar y este es generalmente considerado como un buen inoculante.

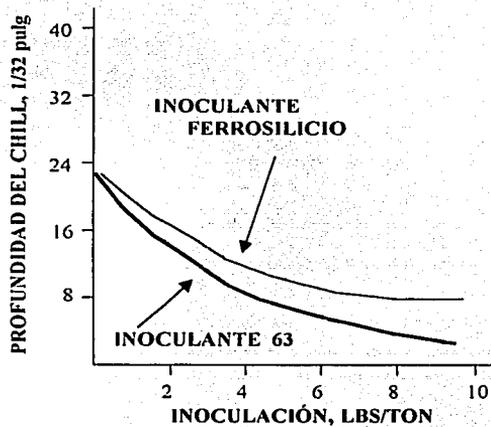


Fig 6.2. Profundidad del chill en hierro fundido por inoculación, inoculado con INOCULANTE 63 contra inoculado con FeSi : 3.5%C y 2.2%Si.

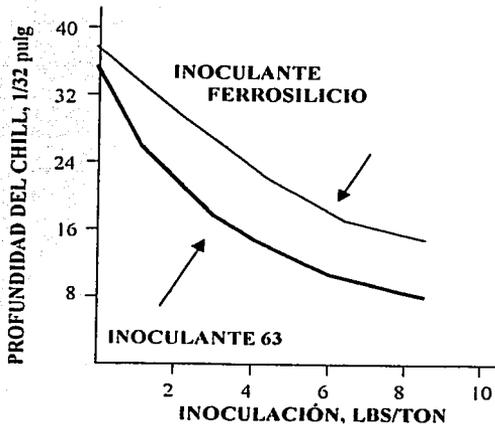


Fig 6.3. Profundidad del chill en hierro fundido por inoculación, inoculado con INOCULANTE 63 contra inoculado con FeSi : 3.20%C y 1.85%Si.

La superioridad del inoculante 63 sobre el amplio rango de carbón equivalente es mostrado en la figura 6.4. Por comparación, los resultados con inoculante ferrosilicio son también mostrados en esta gráfica.

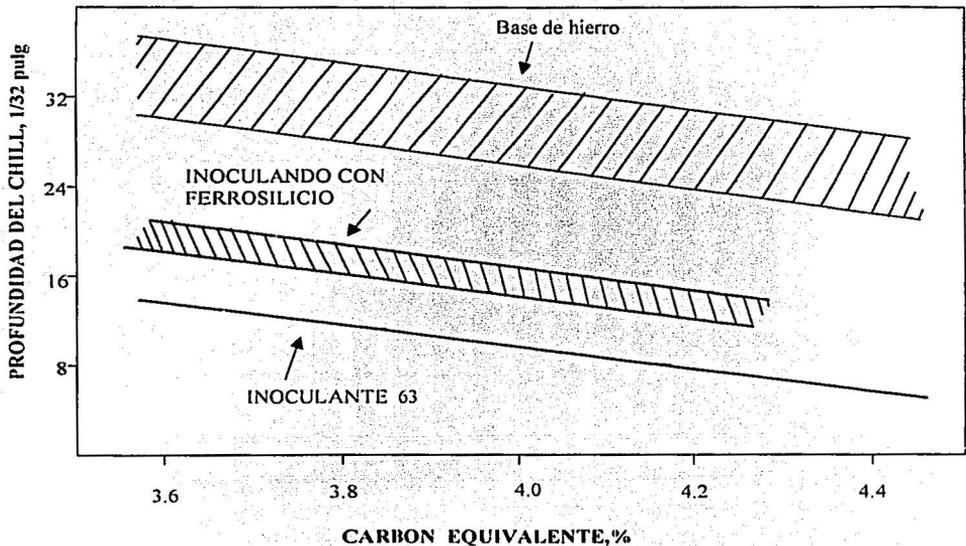


Fig 6.4. Profundidad del chill contra carbón equivalente para un hierro base y otro ya tratado con 4 libras/ton del inoculante.

Mejora las propiedades mecánicas. La extensión en la cual la inoculación mejora las propiedades mecánicas depende de la composición del hierro. La mejora mas alta se logra en hierros con carbón equivalente mas bajo pero también se mejoran un poco los hierros eutécticos (4.3%C) y los hipereutécticos. Estas mejoras se ilustran en las figuras 6.5, 6.6 y 6.7.

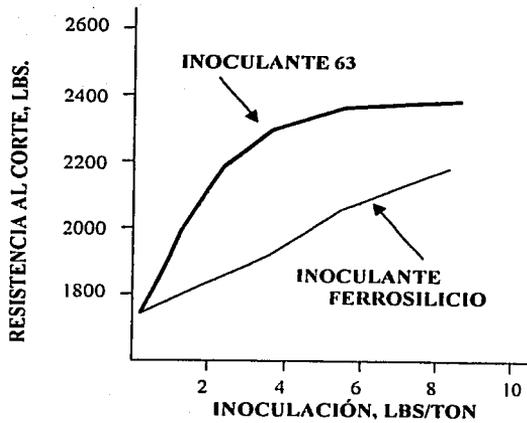


Fig 6.5. Resistencia al corte en hierro fundido por inoculación, inoculado con INOCULANTE 63 contra inoculado con FeSi.

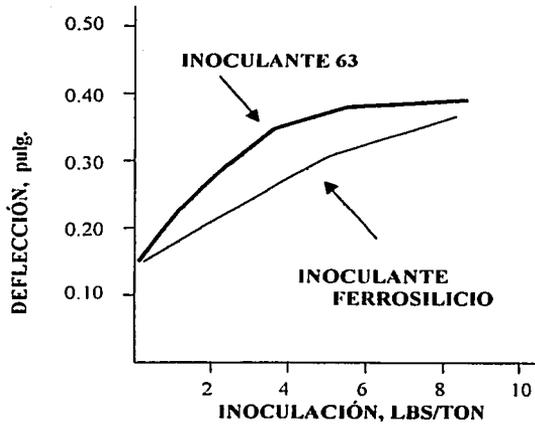


Fig 6.6. Deflección en hierro fundido por inoculación, inoculado con INOCULANTE 63 contra inoculado con FeSi.

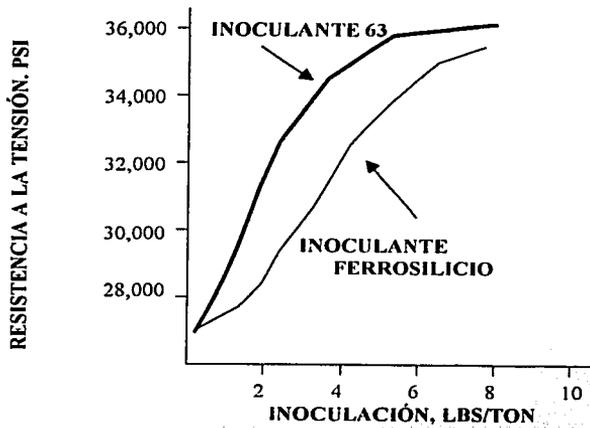


Fig 6.7. Resistencia a la tensión en hierro fundido por inoculación, inoculado con INOCULANTE 63 contra inoculado con FeSi.

Reduce la sensibilidad al espesor. El inoculante 63 minimiza los carburos en secciones de rápido enfriamiento de manera eficiente. Para comprobarlo, se hicieron pruebas colocando probetas en moldes de arena y los resultados se muestran en la figura 6.8. El hierro no inoculado mostró carburos en secciones tan pequeñas como 3/8 de pulgada, mientras que el hierro inoculado estuvo libre de carburos en secciones tan delgadas como 1/8 de pulgada, que tienden a enfriarse más rápidamente, las pruebas también muestran que por medio de la inoculación se obtuvieron durezas uniformes en espesores de 1/4 a 1 pulgada, lo cual también se observa en las curvas de la figura.

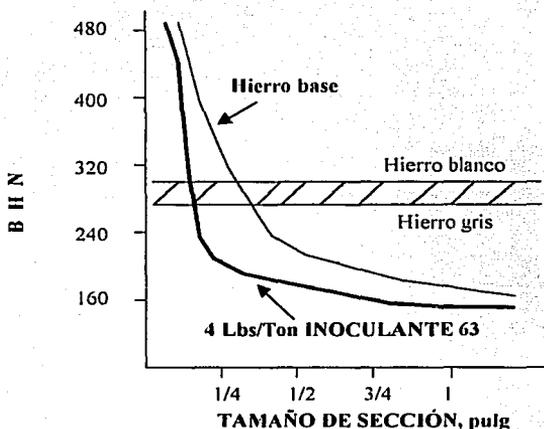


Fig 6.8. Dureza contra tamaño de sección inoculada y hierro gris sin inocular. C 3.10%, Si 2.00%.

Mejoras a la estructura. El hierro gris está constituido de celdas eutécticas, las cuales tienen una res de grafito. Las propiedades de este hierro están determinadas por la configuración del grafito, la estructura de la matriz y el tamaño de las celdas eutécticas. El inoculante 63 modifica estos constituyentes lo cual a su vez modifica las propiedades mecánicas.

Los hierro-base sin inocular tienen una estructura pobre con grafito tipo D y celdas eutécticas muy grandes. El inoculante 63 mejora el tipo de grafito y la estructura de la matriz, al aumentar el número de celdas por unidad de área lo cual es una medida directa de la nucleación obtenida y un índice de la calidad del hierro.

Maquinabilidad. Todo lo dicho, como reducción del chill, menor sensibilidad al espesor y mejores estructuras obtenidas, mejoran a su vez la maquinabilidad de las piezas.

EN SUMA LAS VENTAJAS SON:

1. Elimina el chill.
2. Mejora las propiedades mecánicas.
3. Reduce la sensibilidad al espesor.
4. Mejora la maquinabilidad.
5. Mejora la estructura.
6. Mejora la calidad de la superficie.
7. Tiene un menor costo de inoculación.

6.3 INOTAB (Para inoculación en el molde)

Tabletas inoculantes para hierro gris o nodular. Se aplican directamente en el molde; son de color gris oscuro y tienen un tamaño aproximado de 15 mm. ϕ por 15 mm. de altura.

La inoculación en la última etapa posible, es decir, en el molde de los hierros grises de alta resistencia y nodulares ya inoculados. Se utiliza normalmente como auxiliar de la inoculación convencional, pero también puede actuar como único inoculante, por ejemplo, cuando se utiliza en hierros fosfados u otros hierros grises a fin de contrarrestar los bordes duros, etc., en piezas de poco espesor.

LA ACCIÓN DEL INOTAB

El INOTAB contiene un inoculante especialmente gradificado y elementos fundamentales, aglutinados en tal forma que la tableta se descompone gradualmente en el flujo de metal, con lo que se asegura una inoculación continua y constante de toda la pieza. Utilizado tal como se recomienda en el último momento posible, la inoculación convencional recibe una ayuda final y se restablece el efecto inoculante que puede haber desaparecido en el transcurso de la colada.

LA IMPORTANCIA DE USAR INOTAB

Los siguientes datos son del fabricante:

1. Asegura una inoculación efectiva y positiva en el molde, con efectos precisos y resultados homogéneos especialmente en la producción en serie.
2. INOTAB permite un control más fácil en la operación del vaciado, puesto que las pastillas inoculantes son colocadas en la cantidad deseada y solo en los moldes deseados, evitando así que el operador pueda vaciar en los

los moldes deseados, evitando así que el operador pueda vaciar en los moldes que no requieran inoculación.

3. Es sabido que la efectividad de una inoculación depende del tiempo transcurrido desde ésta, hasta la solidificación; siendo decreciente el efecto con el tiempo; al colocar el inoculante dentro del molde se asegura que el tiempo comprendido entre la inoculación y la solidificación sea el mínimo, por lo que la acción del inoculante es más eficiente.
4. En comparación con otros métodos directos de inoculación (FeSi en polvo), el INOTAB al ser fabricado con materiales perfectamente seleccionados tanto en análisis como en granulometría; evita la posibilidad de inclusiones, estando estas inclusiones estrechamente relacionadas a zonas "circunvecinas" templadas o blanqueadas.
5. La efectividad del INOTAB como inoculante, elimina las zonas duras y disminuye la sensibilidad de las piezas vaciadas al cambio de la sección.
6. Estas dos últimas ventajas se manifiestan marcadamente en el aumento de la velocidad de maquinado así como en la duración de las herramientas. En los hierros de alto fósforo la maquinabilidad de estos, especialmente en el barrenado, es superior.
7. En el hierro nodular, el INOTAB reduce los carburos libres. En algunos casos, esta reducción ha sido de 60%. También favorece la formación de nódulos regulares, aumenta la cuantía de nódulos hasta en un 20% y promueve una dispersión uniforme de los mismos en toda la estructura.
8. El INOTAB puede aplicarse en el hierro gris, ya sea de alta resistencia o nodular.

6.3.1 INSTRUCCIONES DE EMPLEO

La proporción de adición estará regida en cierto grado por el tamaño de la pieza y disposición del molde.

Experiencias hechas demuestran que 2 a 3 pastillas son suficientes para inocular piezas de hasta 200 kilos, (en algunos casos se pueden obtener buenos resultados en piezas de 360 kilos con tres pastillas).

Usualmente una pastilla de INOTAB inocula eficientemente piezas que pesen entre 8 kilos y 40 kilos.

Cuando se quiera inocular piezas de peso inferior a 5 kilos éstas deberán vaciarse en un tiempo mínimo de 5 segundos. Si el tiempo es menor deben usarse fracciones de pastilla.

El uso de tabletas de INOTAB ha sido extensamente investigado, y se recomienda para piezas hasta de 360 kilos como máximo; en piezas mayores, no se ha notado diferencia con la inoculación de cuchara; esto último se debe probablemente a que el tiempo que transcurre entre la inoculación y la solidificación sigue siendo muy largo.

IMPORTANTE:

Para asegurar la perfecta dispersión de las tabletas de INOTAB, deberá existir en el fondo del tragadero o colada de vaciado una cavidad, que tenga cuando menos 19mm de diámetro por 15mm de altura; esto último se aplica a una pastilla, al usarse más pastillas la cavidad deberá hacerse mayor.

De no tomarse la precaución antes mencionada arriba, el metal puede pasar por debajo de la pastilla sin disolverla totalmente, causando además una posible reacción gaseosa que arroje fuera del molde a la tableta o pastilla de INOTAB.

Otro sistema consiste en colocar en INOTAB en la parte superior del sistema, lo más cerca posible de los ataques. Las tabletas se introducirán en la superficie del molde, presionando sobre ellas, aproximadamente un tercio de su altura (cuando se trate de arena en verde), o bien se estamparán (CO₂ o cualquier aglutinante endurecible), no obstante, se han obtenido resultados satisfactorios dejando caer la (s) tableta (s) en el bebedero o colocándolas en el "cajete" de colada.

6.4 INOTAB 6

6.4.1 Tablet as: Para inocular instantes antes de la solidificación en el mismo molde.

Como se ha mencionado, los problemas de hierro blanco, hierro endurecido, retención de carburos ó esquinas templadas, tienen los mismos resultados: piezas frágiles, a menudo rechazadas o, como mal menor, mayor tiempo de mecanizado y más desgaste de herramientas.

Estos defectos se reducen con una buena inoculación en la cuchara, pero su eficacia depende de si la granulometría es la adecuada, a posibles e inadvertidas variaciones de peso, si aquella se efectúa a su justo tiempo, si el inoculante sube a la superficie o si se mezcla con escoria, si sufre una parcial oxidación, o bien, si se tarda demasiado tiempo en vaciar la cuchara con la consiguiente disminución del efecto inoculante (fadding). Todo esto como se ha de comprender son demasiadas variables para poner en peligro las piezas fundidas.

De acuerdo con el fabricante todo esto se resuelve inoculando con la tableta INOTAB 6 en el mismo molde, que es donde el hierro más necesita el beneficioso efecto inoculante.

6.4.2 VENTAJAS DEL INOTAB 6

- a – formación de hierro gris en las esquinas o secciones delgadas.
- b – se elimina el problema del “fadding” o desaparición del efecto inoculante.
- c – tratamiento individual en cada molde.
- d – no hay que pesar ni medir.
- e – no hay pérdidas de material.
- f – resultados constantes.
- g – se puede usar con, o en lugar de la inoculación convencional.
- h – útil, tanto para hierro gris, como para hierro nodular.
- i – no afecta a la composición química del hierro.
- j – mínimo costo por pieza.
- k – comodísima de aplicar.

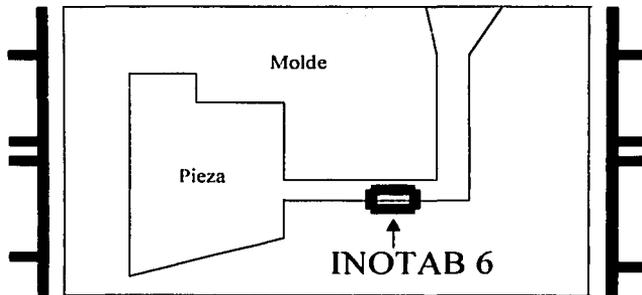


Fig.6.9. Colocación del inoculante en el canal de colada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.5 EL INOCULANTE SMZ

De acuerdo con información del fabricante por años, muchos fundidores han seleccionado la aleación SMZ, como el más efectivo grafitizante que puede ser usado al colar el hierro gris en el molde. Ellos han preferido este fuerte inoculante porque ayuda claramente a reducir el chill, y mejora la maquinabilidad de hierro colado en molde. Al mismo tiempo, la aleación mejora sus propiedades y uniformidad entre las secciones delgadas y gruesas.

Como un resultado de las constantes investigaciones, La División de Metales de Unión Caribe ahora ha hecho este inoculante aún mejor. Las pruebas de fundición han mostrado que el nuevo inoculante aleación de "SMZ", reduce en una forma considerable el Chill. La adición de este inoculante da una larga y duradera inoculación y forma una superficie más libre de escoria y más poderosa que cualquier otro inoculante.

6.5.1 Propiedades de un inoculante efectivo

Un efectivo inoculante de olla produce un hierro con estructura grafitica al azar en una MATRIZ PERLITICA UNIFORME. Semejante hierro tiene las siguientes propiedades deseables:

1. **MÍNIMO CHILL** en secciones delgadas, esquinas y filos. Así las piezas pueden ser maquinadas mas rápidamente con menos uso y rotura de herramientas. También puede ser especificado un hierro mas duro y mayor resistencia sin causar problemas al maquinado.
2. **EXELENTE PROPIEDADES AL USO O DESGASTE.**

3. ESTRUCTURA MAS UNIFORME así como las propiedades entre secciones gruesas y delgadas.
4. MAYOR FLUIDEZ

6.5.2 EFECTIVIDAD DEL SMZ.

Es la única combinación de calcio, manganeso, zirconio y silicio cada uno agregado en los porcentajes adecuados para dar máxima inoculación.

El calcio, uno de los elementos inoculantes mas fuertes conocidos, es la espina dorsal de la aleación. El está soportado por manganeso y zirconio, dos elementos menos fuertes que ayudan al desempeño de la aleación consistentemente.

Ahora, otro fuerte elemento inoculante –bario- ha sido agregado al SMZ. Investigaciones de Unión Caribe han encontrado que el Bario y Calcio actuando juntos dan inoculación mas fuerte que usando igual cantidad de otros elementos. La cantidad de Bario debe ser exacta. Un Bario extra solo oxidiza.

El nuevo “SMZ” forma escoria y es más fácil de limpiar. Cualquier poderoso inoculante forma escoria. Los elementos que inoculan efectivamente el hierro gris: calcio, bario, etc, reaccionan con el oxígeno, nitrógeno y carbono para formar insolubles componentes. Estos componentes flotan sobre la superficie del hierro, formando escoria. Dependiendo de lo complicado que sean estos elementos de los inoculantes, estos componentes pueden formar una escoria fluida que es muy dura de limpiar o un terrón árido de escoria que puede ser removido fácilmente.

Excesivo calcio, por ejemplo, produce una gran cantidad de semi-escoria fluida la cual se extiende y cubre totalmente la superficie del hierro en el cucharón. Esta escoria es difícil de limpiar y puede entrar en el molde formando inclusiones de escoria. El bario, es otro componente que produce menos escoria que el calcio pero forma otro tipo de escoria.

En la temperatura del hierro normal, el bario produce bastante y rápidamente una escoria cuagulante. Esta escoria coagulante puede ser removida fácilmente antes de vaciar en el molde.

7. CONCLUSIONES

La inoculación de los hierros colados es uno de los muchos temas que se tienen en cualquier rama de la industria y en cualquier proceso, en los cuales se cuenta con mucha información, pero a la cual sólo tienen acceso quienes trabajan directamente en tales empresas.

Por ello es muy común que los libros de texto no incluyan ampliamente estudios como el aquí presentado y en muchos casos ni siquiera se mencionan. Por otra parte, sería muy difícil incluir en los libros de texto tanta información como la que se tiene en la actualidad, época en que la tecnología se ha desarrollado grandemente.

Es por ellos que se espera que con el presente trabajo se haya aportado un granito de arena a la información existente en la UNAM y en particular en la FES-C, y que pudiera ser de utilidad para quienes se interesen en profundizar en el tema de la inoculación de los hierros colados.

BIBLIOGRAFÍA

ENGINEERING METALS

Samans C. H.

FABRICACIÓN DE HIERRO, ACEROS Y FUNDICIONES

Apraiz Barreiro.

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Mikell P. Groover.

HIERRO COLADO Y SU SOLDADURA

AGA de México.

INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA

Sydney H. Avner.

MECHANICAL PROPERTIES OF METALS

J. G. Tweeddale.

METALURGICA FÍSICA APLICADA

Raymond. A. Higgins.

PRODUCCIÓN DE HIERRO DÚCTIL

Miller and Company.

REVISTAS "FUNDICIÓN PRÁCTICA"

Foseco.

REVISTAS " FUNDICIÓN Y MOLDEO"

Sociedad Mexicana de fundidores.

TECNOLOGIA DE MATERIALES

Sordo G. Carlos.

THE INOCULATION OF GRAY CAST IRON

Elkem Metals Company.