

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

COMPARACION CONCENTRADA DE LOS HIERROS MALEABLE Y NODULAR (SAE-M-3210 Y D-4512)

217

T E S I S
Que para obtener el título de:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
p r e s e n t a
ROGELIO MACIAS HUERTA

México, D. F.

1 9 7 5



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.

CLAS tem
AÑO 1925
FECHA 1925
PROC Nº 208



QUIMICA

Jurado asignado originalmente según el tema

PRESIDENTE	<u>MANUEL F. GUERRERO F.</u>
V O C A L	<u>FERNANDO MALDONADO M.</u>
SECRETARIO	<u>KURT H. NADLER G.</u>
1er. SUPLENTE	<u>MA. EUGENIA NOGUEZ</u>
2do. SUPLENTE	<u>HUMBERTO MALAGON R.</u>

Sitio donde se desarrolló el tema:

Co. Fundidora del Norte,
S. A.

Nombre completo y firma del sustentante:


Rogelio Macías Huerta

Nombre completo y firma del asesor del tema:

Kurt H. Nadler G.

COMPARACION CONCENTRADA DE LOS HIERROS

MALEABLE Y NODULAR

(SAE-M-3210 Y D-4512)

- I. INTRODUCCION
- II. CARACTERISTICAS DE LOS HIERROS COLADOS
- III. EFECTO DE LOS ALEANTES EN ESTE TIPO DE HIERROS
- IIIa. INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA FORMACION DE GRAFITO
- IIIb. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA FORMACION DE GRAFITO
- IIIc. EFECTOS DEL AZUFRE SOBRE LOS HIERROS COLADOS
- IV. RELACION ENTRE LA COMPOSICION DE LAS FUNDICIONES SU MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA.
- V. LA INOCULACION Y SUS EFECTOS SOBRE LOS HIERROS COLADOS
- VI. CONSIDERACIONES TERMODINAMICAS SOBRE LA CRISTALIZACION DEL GRAFITO EN LOS HIERROS FUNDIDOS.
- VII. COMPARACION DE PROPIEDADES FISICAS ENTRE EL HIERRO MALEABLE Y NODULAR
- VIII. CONCLUSIONES
- IX. BIBLIOGRAFIA

Vo. Bo.

19-VIII-75



KURT H. NADLER

1.- INTRODUCCION

Existe un tema que en el presente momento está mereciendo la atención de los departamentos de ingeniería en las plantas de fundición, acabado y plantas armadoras (automotrices), lo que se estima por demás atractivo.

Esta cuestión se relaciona esencialmente con la eventual substitución del hierro maleable por el hierro nodular, en la fabricación de algunas partes automotrices.

En qué consiste éste cambio?, y el porqué de su trascendencia?. Antes que nada, se debe indicar que no se trata de substituir todas las partes que se fabrican actualmente de maleable; sino que sólo aquellas que, desde el punto de vista técnico y económico, los cambios resultan además de positivos, recomendables.

En realidad, el interés de quienes impulsan este cambio está enfocado primordialmente hacia la substitución del hierro maleable llamado standard ó sea el grado SAE-M-3210 (ferrítico), por el hierro nodular grado SAE-D-4512, (ferrítico).

La trascendencia de la substitución consiste en el hecho, por todos conocido, de que la escala media de materiales

por unidad o sea por vehículo (automóvil), el hierro maleable ocupa el tercer lugar, después del acero y el hierro gris.

Veremos ahora como se justifica el cambio. En realidad, sabemos que un cambio de tal trascendencia debe de justificarse desde los puntos de vista técnico y económicos.

Habiéndonos llamado la atención el desenvolvimiento que ha conservado el hierro nodular en los últimos años, nos pusimos a considerar las necesidades que están "palpando" las industrias automotrices (Americanas) en cuanto al uso de ambos hierros y debido a lo mismo nos inclinamos a los puntos de vista antes mencionados, esperando puedan ser de utilidad para la industria de el ramo y para los compañeros que nos siguen en la carrera de Ingeniero Químico Metalúrgico.

II.- CARACTERISTICAS DE LOS HIERROS COLADOS.

a) Fundición.

El término fundición de hierro designa una familia entera de metales con una amplia variedad de propiedades. Se define la fundición de hierro como una aleación de fierro, carbono y silicio (Sistema ternario), conteniendo además, generalmente manganeso, fósforo, azufre, etc. En esta aleación el contenido de carbono teóricamente y de acuerdo al diagrama Hierro-Carbono, sería de 1.7 a 6.67, sin embargo, prácticamente el contenido varía de 2.0 a 4.5%, implicando mayor control el que oscile de 2.75 a 3.50%. El contenido de silicio irá de 0.50 a 3.50 y en algunas ocasiones hasta 4%, el manganeso puede ir desde 0.4 a 2.0%, el azufre oscilará entre 0.01 a 0.20%, por último, el fósforo estará entre 0.04 y 0.08%.

Las fundiciones de hierro se caracterizan porque adquieren su forma definitiva directamente por colada, no siendo sometidas nunca las fundiciones a proceso de deformación plástica, ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.

b) Clasificación.

Por su microestructura, la clasificación de las fundiciones

convertirse en tres grupos:

1. Fundiciones en las cuales todo el carbono presente se encuentre combinado químicamente formando carburo de hierro (Fe_3C), en ellas la fractura presenta un aspecto blanco cristalino.

2. Fundiciones en las que todo el carbono se encuentra en estado libre, formando grafito; es muy difícil que en la práctica se presente este de fundición y reciben el nombre de fundiciones grises ferríticas.

3. Fundiciones en las que parte del carbono se encuentra combinado químicamente como carburo de hierro y parte está libre, formando grafito. A este grupo que es el más importante de los tres pertenecen las fundiciones grises, atruchadas, perlíticas, nodulares, etc.

b)1. Fundición Blanca

Si el análisis de la fundición es el apropiado y la velocidad de enfriamiento del metal durante su solidificación es infinitamente rápida, el carbono disuelto en el hierro permanecerá químicamente combinado con él y formará colonias de carburo de hierro, un constituyente duro y quebradizo. Entonces el Fe_3C (cementita) dominará la microestructura. Esta fundición nos dá una muy alta resistencia a la compresión, excelente resistencia al desgaste y conserva su dureza a altas temperaturas. Las propiedades de las fundiciones blancas pueden

variar dentro de un rango de acuerdo con la cantidad de carburo de hierro o cementita en la estructura y la naturaleza de la estructura de la matriz que rodea este carburo.

El proceso de solidificación y transformación de la fundición blanca que es una aleación hierro-carbono, se realiza de acuerdo a las leyes correspondientes al diagrama hierro carbono metaestable y básicamente está constituida por perlita y cementita. La microestructura de la fundición blanca presenta grupos de grandes cristales negros de perlita derivados de la austenita primaria. Cuando estos núcleos negros están rodeados por agrupaciones pseudoeutécticas, derivados de la Ledeburita y formando así perlita y cementita, recibirán el nombre de fundición blanca hipoeutéctica, la fundición hipereutéctica es de poca importancia industrial. Estas dos clases de fundición junto con la fundición blanca eutéctica presentan fractura blanca y brillante.

b) 2. Fundición Maleable.

Este tipo de fundición de hierro se caracteriza por tener la mayor parte de su contenido de carbono en forma de nódulos irregulares de grafito. El hierro en esta fundición

tiene el mismo análisis que la fundición blanca, pero se obtiene al sufrir ésta un tratamiento térmico posterior arriba de 870°C, el carburo de hierro es disociado y el grafito se precipita dentro de la fundición. La forma del grafito ha sido llamada carbono recocido, formado por un tratamiento térmico, en el estado sólido. La solidificación rápida que es necesaria para la formación primaria de la fundición blanca, limita el espesor práctico de la pieza que más tarde se convertirá en hierro maleable.

Puede ser obtenido un amplio rango de propiedades mecánicas en el hierro maleable a base de contar con diferentes matrices alrededor de el grafito.

b) 3. Fundición Gris.

En esta fundición durante la etapa de solidificación, la cementita tiende a desdoblarse en grafito y austenita o ferrita, esta tendencia se ve incrementada si se tiene un control adecuado en la composición de la aleación y de la velocidad de enfriamiento. La mayoría de este tipo de fundiciones son aleaciones hipoeutécticas cuyo contenido de carbono combinado al realizarse la reacción eutéctica a 1130°C, La grafitización se realiza con mayor facilidad si el conte-

nido de carbono es elevado, lo mismo que las temperaturas y si la cantidad de elementos que favorecen la grafitización, como el silicio es la adecuada.

Teniendo un control adecuado de los factores citados anteriormente, se logra que la aleación obedezca al diagrama, hierro-carbono estable; formándose durante el periodo de enfriamiento a la temperatura eutéctica de 1130°C austenita y grafito. La cementita que se forma grafitizará rápidamente, - el grafito adopta la forma de numerosas laminillas curvas y generalmente alargadas, que son las que proporcionan a la fundición gris su fractura característica, grisácea o negruzca.

En el enfriamiento continuo, al disminuir la solubilidad del carbono en la austenita, se produce una nueva precipitación de carbono, el cual lo hace en forma de grafito o de cementita proeutectoide, que grafitiza rápidamente.

La resistencia a la tracción de las fundiciones grises, es función casi por completo de la estructura de la matriz en la cual se encuentre el grafito, dependiendo dicha estructura en gran parte de la condición de cementita eutectoide. Si la composición y la velocidad de enfriamiento son tales que

la cementita eutectoide también se grafitice, la matriz presentará entonces una estructura totalmente ferrítica.

Por lo contrario, si se impide la grafitización de cementita eutectoide la matriz será totalmente perlítica. La constitución de la matriz puede variar de perlita pura a ferrita prácticamente pura, también pasando por una serie de mezclas de perlita y ferrita en distintas proporciones. La resistencia a la tracción y la dureza aumentan de acuerdo con la cantidad de carbono combinado que existe, alcanzando un valor máximo en la fundición gris perlítica.

b) 4. Hierro Nodular.

Este tipo de fundición denominada también fundición dúctil, fundición con grafito esferoidal y fundición esferulítica, se caracteriza por que en ella el grafito aparece en forma esferoidal ó de glóbulos minúsculos. Al encontrarse el carbono en forma esferoidal, la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar, ésto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. Además los nódulos presentan una forma más esférica que los aglomerados de carbono de recocido, más o menos irregulares que aparecen en la fundición maleable.

El contenido total de carbono de la fundición nodular es igual al de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación, debido a la presencia de pequeñas cantidades de algunos elementos de aleación formadores de nódulos, normalmente son Magnesio y Cerio, los cuales se adicionan a la olla de tratamiento inmediatamente antes de pasar el metal a los moldes. Como estos elementos presentan una gran afinidad por el azufre el contenido de este elemento en la fundición debe de ser inferior a 0.015% para que el tratamiento sea efectivo desde los puntos de vista metalúrgico como económico.

La cantidad de ferrita presente en la matriz en bruto de colada depende de la composición y de la velocidad de enfriamiento. Las fundiciones nodulares; cuya matriz presenta como máximo 10% perlita, se denominan fundiciones ferríticas. Esta estructura viene a ser la que presenta máxima ductibilidad, tenacidad y maquinabilidad.

En fundiciones, bien en bruto de fundición o tras de haber sufrido un normalizado, pueden presentar también una matriz constituida en gran parte de perlita. El tratamiento se puede realizar a una temperatura comprendida entre 870-898°C

y enfriar al aire; el tiempo de permanencia variará en función de el espesor de las piezas a tratar. Las fundiciones nodulares perlíticas presentan mayor resistencia a la tracción y menos ductilidad que las ferríticas.

La fundición nodular al igual que la maleable se utilizan ampliamente en las diversas ramas de la industria y entre sus aplicaciones más importantes podemos citar: en la industria de maquinaria agrícola, automotriz, en la Siderúrgica (fabricación de cilindros de laminar perfiles y chapas), etc.

Los hierros presentes en estudio se analizarán con mayor amplitud posteriormente.

III. EFFECTO DE LOS ALEANTES EN ESTE TIPO DE HIERROS

1. Carbono

Los rangos comerciales de carbono en el hierro maleable y nodular son los siguientes:

Maleable - 2.40 - 2.60%

Nodular - 3.55 - 3.70%

Desde luego, en Nodular, cuando se procede a vaciar piezas cuyos cambios de sección sean mayores de 1.50 cm. es recomendable incrementar el contenido de carbono. En el grado ferrítico el carbono ocupa aproximadamente el 9% como grafito esferoidal, así es, que incrementando el contenido de carbono se promueven nódulos de mayor tamaño, este es el caso de contar con una concentración hipereutéctica; con ello se logra también incrementar la fluidéz del metal y una disminución a la tendencia de rechupes.

El contenido de carbono influye muy poco en las propiedades físicas del hierro nodular, ya que por cada variación de 0.10T C, tiene una variación aproximada de 25 Kg/cm^2 en el valor del último esfuerzo, la dureza Brinell decrece en 5 unidades por cad incremento de 0.15%, incrementando el % de alargamiento se relaciona con el incremento del porcentaje de carbono. Se recomienda controlar el carbono equivalente para secciones como sigue:

- a) Secciones ligeras de 1.5 cm - ceq. = 4.50
- b) Secciones entre los 4 a 5 cm - ceq. = 4.30
- c) Secciones mayores - ceq. = 4.30

Por lo contrario, el hierro maleable se ve influenciado poderosamente por el contenido de carbono, ya que por comportarse al diagrama de fases metaestable sus características de solidificación son inversamente proporcionales a las del hierro nodular (S. Estable).

2. Silicio

El silicio tiene una influencia primaria en los hierros en estudio, dado que es un poderoso grafitizante, incrementa el número de nódulos de grafito así como reduce los carburos primarios, incrementa la aparición de ferrita y a la vez reduce la perlita, el silicio que se encuentra en el hierro base no tiene influencia grafitizante.

Este elemento tiene una gran influencia en las propiedades físicas de los hierros en estudio, así en Nodular por ejemplo, 0.25% de silicio aumenta la resistencia a la tracción en 210 Kg/cm^2 , así también en el hierro maleable un 0.20% de silicio aumenta la aparición de nódulos de mayor resistencia en caliente e incrementa la resistencia al impacto, cabe mencionar que con porcentos de silicio altos aunados con los de carbono inducen al problema de fundición conocido como moteado, (carbono primario = grafito libre).

En el hierro nodular se recomienda operar con un rango de silicio del 1.30 - 2.0% y para el hierro maleable con un rango de 1.45 - 1.60%.

Los inoculantes más comunmente usados son ferrosilicio de 75 - 85 - 90% y se recomienda que las adiciones sean de 0.40 a 1.20%, esto contribuye a la eliminación de carburos primarios.

3. Azufre

Para el caso de los hierros en estudio el azufre involucra una Técnica más apropiada para controlar el azufre residual lo más bajo posible siendo esta una de las principales condiciones en el proceso nodularizante.

Así, la reacción del azufre con el magnesio en el nodular origina un sulfuro de magnesio, compuesto bastante estable, así también, la economía y el control de calidad inquieren que las materias primas de este proceso se vean lo más exentas de este elemento. El azufre presente afecta a la cantidad de magnesio libre para promover la nodularización, este fenomeno es independiente del azufre final obtenido.

Se ha observado en la práctica que con un contenido de Mg de 0.018% se obtiene una excelente nodularidad siempre y cuando el contenido de azufre en el hierro base sea de 0.008 a 0.0.010%, estos niveles de S, es posible obtenerlos cuando la fusión se lleva a cabo en hornos eléctricos altamente básicos, en hornos no básicos el nivel de azufre, oscila entre 0.025 a 0.035%

y en estos casos la nodularización correcta se logra con un magnesio libre de 0.04%, en caso de que la fusión se lleve a cabo en un cubilote ácido y el nivel de azufre se localice en un 0.085%, requiere un magnesio libre aproximado de 0.055, para poder obtener una buena nodularización.

En el hierro maleable el azufre induce efectos similares y su control involucra un exhaustivo estudio de los materiales empleados en su producción.

4. Fósforo

En los hierros colados forma fosfuros que se transforman en una malla muy quebradiza, produciendo efectos adversos a la ductilidad, tenacidad, reduce también la tendencia al impacto en las piezas fundidas, es por ello que los niveles de los fósforos deben de mantenerse lo más bajo posible sobre todo si la pieza ha de ser usada tal y como coló, ya que también aumenta la dureza estabilizando la perlita y la esteadita.

El fósforo a niveles superiores al 0.08% aumenta la fragilidad a la temperatura de transición, incrementa los valores del límite elástico, la resistencia a la tracción y la resistencia en caliente; los valores de la dureza aumentan proporcionalmente al contenido de azufre acentuándose cuando la producción sufra un tratamiento térmico desuniforme.

5. Manganeso

En ausencia del azufre el manganeso funciona como un elemento que estabiliza

y refina la perlita, disminuyendo la cantidad de ferrita, la característica de promover la perlita, es semejante a la que tiene el silicio en la promoción de ferrita, por lo que es necesario que estos dos elementos sean balanceados para obtener los tipos de matriz deseados.

En el caso de nodular, cuando los porcentajes de manganeso rebasan el 0.07% se encontrarán carburos intercelulares en las piezas; para el hierro maleable se considera apropiado controlar el manganeso en los 0.30% Mn, ya que, se tiende a mantener su relación con el azufre.

El magnesio es aproximadamente 5 veces más poderoso en la formación de perlita los incrementos de los porcentajes de manganeso van incrementados directamente con la resistencia a la tracción y el límite elástico, siendo estos efectos amortizados ligeramente por medio de los tratamientos térmicos.

La adición de manganeso equivale a la forma más barata de incrementar la dureza cuando las piezas sufrirán un normalizado; cuando se cuelean piezas con 1.0% de manganeso y 1.0% de níquel posterior normalizado no será raro encontrarnos en la pieza durezas de 300 BHN. El magnesio tiene una influencia primordial en la producción de matrices ferríticas por medio de un recocido.

6. Magnesio

El magnesio es un magnífico desoxidante, cuando se tiene en *hierros sin tratar*

con 0.0135% de O_2 , después del tratamiento el oxígeno descenderá a 0.003%, cabe hacer notar, que la desoxidación del metal es una parte muy importante de los procesos en estudio cuando se trata con magnesio en el momento de reacción se desprende un polvo blanco que es óxido de magnesio, éste polvo flota y tiene poca solubilidad en el metal; así el óxido de magnesio puede ser eliminado de la superficie del metal.

La combinación del azufre con el magnesio forma sulfuro de magnesio, es de mencionarse que 1 1/3 de azufre es removido por el magnesio, el necesidad de contar con rangos de azufre bastante bajos esta en función de lo mencionado anteriormente; el $Mg S$ flota también, debe de ser eliminado del baño debido a que resulta ser soluble en el metal.

La función nodulizante del magnesio puede ser aminorada por algunos elementos que tienden a formar compuestos y hasta ser destruida por otros elementos que tienden a formar laminas de grafito, para evitar este último efecto se puede reforzar el magnesio con otro elemento nodulizante como cerio.

7. Cerio

Este elemento fue usado en la producción de hierro nodular cuando no se podía contar con un hierro base tan puro como se utiliza en la actualidad, hoy en día se utiliza para amortiguar los efectos de los elementos nocivos tales como el plomo, aluminio, titanio, etc.

El cerio cuando se encuentra en presencia del calcio y magnesio es un potente estabilizador de carburos, por lo que es necesario tener un cuidado excesivo en el uso de este elemento dado que un sobre tratamiento con cerio y o magnesio pueden ocasionar que al nódulo de grafito se le formen "colas", o si el tratamiento es más fuerte pueden producir una explosión de los nódulos, esto también puede ocurrir cuando se tiene un metal base de una alta pureza, este defecto también ocurre cuando se produce un hierro hipereutéctico en horno de cubilote básico.

ELEMENTOS PROMOTORES DE PERLITA Y CARBUROS

8. Cromo

El cromo es un carburígeno y un estabilizador de perlita y esto va en detrimento de las piezas que serán usadas sin un tratamiento térmico.

Como sabemos, el cromo retarda la ferritización por recocido, pero cuando se tiene un contenido mayor de 0.10% Cr, los hierros en estudio no responden al recocido.

El cromo es generalmente introducido en el hierro base por la chatarra de acero, el cromo incrementa la resistencia a la corrosión; incrementará la resistencia a la tracción límite elástico, reduce el alargamiento.

9. Nitrogeno

El nitrógeno gaseoso seco es empleado para la inyección dentro del horno, como removedor de gases ó también para inyectar al magnesio y en estos casos el porcentaje

de nitrógeno no aumenta sino muy poco, dado que solo es absorbido el poco gas que se disocia.

El nitrógeno es conocido como estabilizador de carburos, concentraciones de 0.008 a 0.0175% N_2 producen efectos drásticos, afortunadamente en la producción de hierros de matriz ferrítica el N_2 es eliminado al tratarse con magnesio aunque su solubilidad en el metal sea muy poca si tenemos 0.015% de nitrógeno antes del tratamiento tendremos \pm 0.001%.

El carbono y el silicio reducen la solubilidad del nitrógeno residual es expulsado del metal poco antes de la solidificación.

III.a

INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA FORMACION DE GRAFITO

Las leyes que rigen la formación de los constituyentes en las fundiciones maleables y nodulares, son algo diferentes de las que se estudian en el diagrama hierro-carbono correspondiente a los aceros. Las diferencias que existen entre éstas y aquéllas son debidas principalmente a la presencia de silicio en cantidades bastante elevadas, generalmente variables de 1 a 4%. El silicio se presenta normalmente en las fundiciones en forma de siliciuro de hierro disuelto en la ferrita o hierro alfa, no pudiendo observarse por lo tanto directamente su presencia por medio del examen microscópico. Cuando se halla presente en pequeñas cantidades, variables de 0.1 a 0.6%, no ejerce influencia importante. En cambio cuando el silicio se halla presente en cantidades de variables de 0.6 a 3.5%, ejerce indirectamente una acción muy destacada y contribuye a la formación de grafito, que modifica notablemente (completamente) el carácter y las propiedades de las aleaciones hierro-carbono. En el siguiente ejemplo que se refiere a dos piezas de fundición del mismo tamaño (25 mm de diámetro y 50 cm de longitud), se aprecia perfectamente su influencia. La composición de la

primera pieza es la siguiente:

C = 3.0%

Si = 0.50%

Mn = 0.45%

P = 0.05%

S = 0.070%

La segunda tiene la misma composición, excepto el contenido de silicio, que es de 2.5% en lugar de 0.5%. Esta diferencia en el porcentaje de silicio hace que las microestructuras y propiedades de las dos piezas sean completamente distintas.

Fractura
BLANCA.



Si = 0.50%



Fractura
GRIS

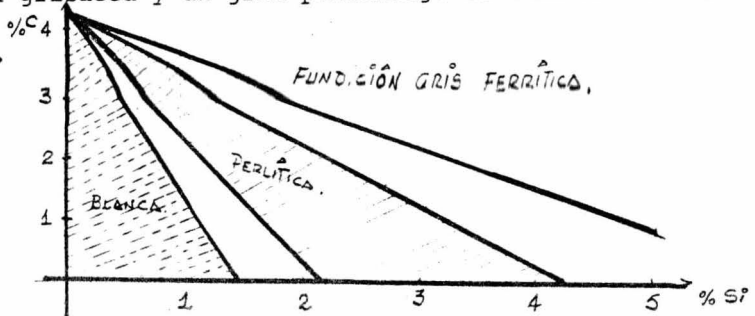


Si = 2.50%



La primera se refiere a la fractura de una fundición blanca, muy dura, frágil, tiene la fractura blanca, encontrándose el carbono en toda ella en forma de carburo de hierro (Fe_3C).

La segunda es una fundición gris relativamente blanda, tiene fractura grisácea y un gran porcentaje de carbono en forma de grafito.



Antiguo diagrama de Maureer que señala los contenidos de carbono y silicio correspondientes a distintos tipos de fundiciones en piezas de 30 mm de espesor coladas en arena.

En la figura anterior se puede ver el diagrama de MAURER, que fue uno de los primeros que señalaron de una forma clara la relación que hay entre los porcentajes de carbono y silicio y la clase de fundición que se obtiene en cada caso. Este diagrama que es muy sencillo y claro ha sido perfeccionado y modificado por otros investigadores, siendo en la actualidad el de NORBURY uno de los más aceptados:

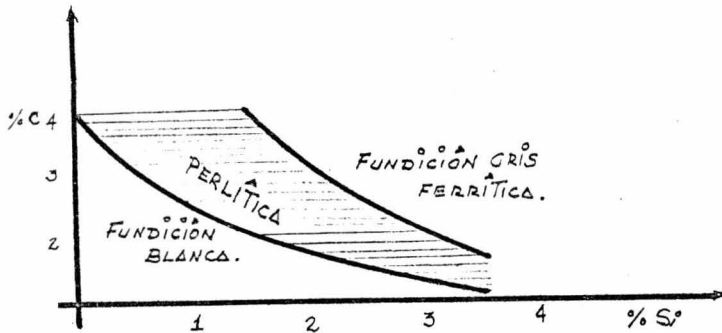


Diagrama de NORBURY que señala los contenidos de carbono y silicio correspondientes a los distintos tipos de fundiciones en piezas de 25 mm de espesor coladas en arena.

Estos diagramas se refieren a un determinado espesor y una clase de molde y no se destaca en ella la velocidad de enfriamiento.

En las fundiciones, además del silicio y la velocidad de enfriamiento, también tiene gran influencia en la formación de grafito los contenidos de carbono, azufre y manganeso. El carbono, como se explica más adelante y como se desprende (los diagramas anteriores), tiene una influencia tan importante como la del silicio. En efecto, muy pequeñas variaciones de carbono, hacen que en determinadas circunstancias la fundición pase de gris a blanca. Pero como en la fabricación normal de fundiciones en cubilote, por estar en todos los casos la fundición en contacto con el coque, esas variaciones de carbono son muy pequeñas (suelen oscilar entre 3 y 3,5%) en la práctica normal a esa influencia debida a la acción del carbono se suele dar mucho menos importancia a la del silicio, aunque en realidad la tenga muy importante. El carbono favorece la formación de grafito, (La acción) y cuanto mayor sea el porcentaje de carbono más fácil es la formación de grafito. La acción del azufre y del manganeso es, en general, contraria a la grafitización.

III.b INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO -
EN LA FORMACION DE GRAFITO.

La velocidad de enfriamiento, que depende del espesor de la pieza y de la clase de molde empleado, es otro factor que también ejerce una influencia decisiva en la calidad y microestructura de las fundiciones. Los enfriamientos rápidos tienden a producir fundiciones blancas; los enfriamientos lentos favorecen la formación de grafito y, por lo tanto, la formación de fundiciones tales como las grises, maleables o nodulares (dúctiles). Esta influencia es tan marcada que con una misma composición y al variarse la velocidad de enfriamiento se obtienen diferentes calidades con distintas durezas y microestructuras. La velocidad de enfriamiento que suele variar principalmente con el espesor de las piezas, también se modifica con la naturaleza de los moldes. Los pequeños espesores se enfrían mucha más rápido que los espesores grandes. Un molde metálico, enfría mucho más rápidamente que un molde de arena. En los moldes metálicos el enfriamiento de la fundición será más o menos rápido según sea el espesor del molde. En algunos casos, para alcanzar las mayores velocidades de enfriamiento, los moldes metálicos se enfrían por agua (refrigerados.)

Estos diagramas se refieren a un determinado espesor y una clase de molde y no se destaca en ella la velocidad de enfriamiento.

En las fundiciones, además del silicio y la velocidad de enfriamiento, también tiene gran influencia en la formación de grafito los contenidos de carbono, azufre y manganeso. El carbono, como se explica más adelante y como se desprende (los diagramas anteriores), tiene una influencia tan importante como la del silicio. En efecto, muy pequeñas variaciones de carbono, hacen que en determinadas circunstancias la fundición pase de gris a blanca. Pero como en la fabricación normal de fundiciones en cubilote, por estar en todos los casos la fundición en contacto con el coque, esas variaciones de carbono son muy pequeñas (suelen oscilar entre 3 y 3.5%) en la práctica normal a esa influencia debida a la acción del carbono se suele dar mucho menos importancia a la del silicio, aunque en realidad la tenga muy importante. El carbono favorece la formación de grafito, (La acción) y cuanto mayor sea el porcentaje de carbono más fácil es la formación de grafito. La acción del azufre y del manganeso es, en general, contraria a la grafitización.

III.c

DESULFURIZACION

I.- Azúfre en los Hierros Colados.

El fabricante de hierros siempre ha tenido problemas de azufre en el hierro. En tiempos recientes ha sido probado que el exceso de azufre causa defectos bien conocidos en los hierros.

De el acero se sabe que el exceso de azufre causa uno de los principales defectos siendo este el de ruptura en caliente, esto se refleja en la fractura de lingotes durante la laminación o forjado. El azufre en los hierros se combina en forma de Fierro-manganeso-azufre (FeMnS), éstos se encuentran distribuidos a través de toda la pieza en forma de inclusiones. Estos sulfuros tienen un punto de fusión mucho más bajo que el de los hierros (800-900°C).

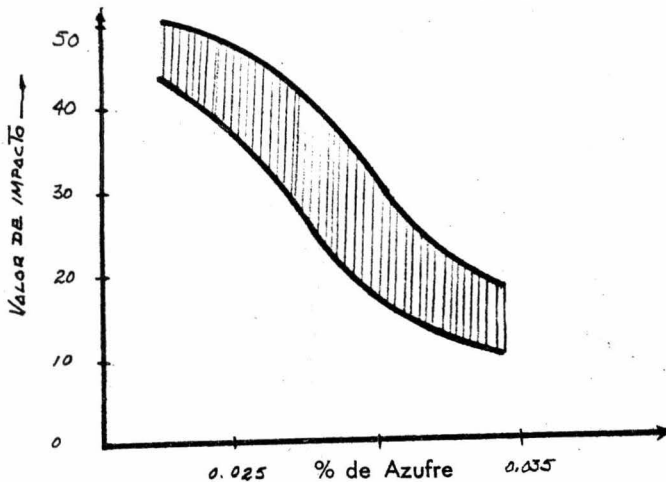
En el caso de los aceros, cuando el lingote es recalentado para el procesamiento en caliente, los sulfuros son fundidos. Las porciones de sulfuros líquidos tienen pequeña resistencia, así las fuerzas de laminado o forjado son suficientes para quebrar la parte más debilitada de ese lingote. Para prevenir las rupturas durante el trabajo en caliente es necesario producir todos los aceros y en nuestro caso, los hierros con porcentos de azufre lo más bajo posibles.

A continuación se describen los efectos de alto azufre en las propiedades físicas de los hierros en cuestión:

a).- Propiedades de Impacto

La presencia de sulfuros reduce seriamente la ductilidad de los hierros estudiados. Esto significa que la resistencia del acero se reduce. Esto es mucho más serio cuando los hierros van a ser usados en conexiones, puentes, partes automotrices, etc. Las investigaciones metalúrgicas indican que la presencia de contenidos no controlados en la relación azufre-manganeso; pueden reducir la ductilidad en hasta un 50%.

El efecto del contenido de azufre sobre las pruebas de impacto de aceros nos indican su relación con los hierros colados y así se indica lo siguiente:



Efecto del azufre sobre probetas charpy V para impacto en aceros Cr,Ni-Mo.

b).- Propiedades de Soldadura

Los sulfuros en los hierros tienen efectos dañinos sobre las propiedades de las soldaduras. Durante el enfriamiento de una parte soldada las inclusiones de sulfuros permanecen líquidas posteriormente que el hierro se ha solidificado. Los rechupes en hierros solidificados, durante el enfriamiento dejan esfuerzos en la región soldada. La soldadura por ello, puede quebrarse en la región líquida, lo que abate seriamente la fuerza mecánica de la soldadura.

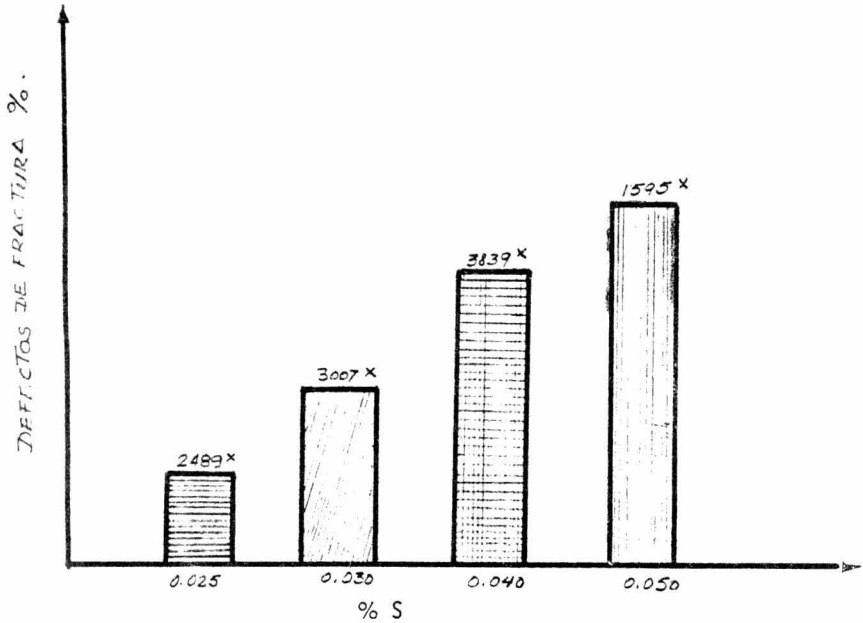
En algunos casos las inclusiones de sulfuros segregados reaccionan, con violencia explosiva durante la soldadura y crean bolsas de gas en la zona de fusión.

c).- Propiedades de Corrosión

En la superficie de los hierros la corrosión se ve acelerada por la presencia de inclusiones. La región que se encuentra alrededor de una inclusión es más rápidamente atacada que el resto de la superficie del hierro. Reduciendo el contenido de azufre en el hierro a los rangos normales se induce la disminución de inclusiones, por lo tanto, se reduce así el grado de corrosión.

A continuación se transcribe una tabla que relaciona el contenido de azufre y el índice en % de fracturas, en los aceros.

(*) No. de piezas examinadas.



Fracturas en pruebas de piezas de Hierro Maleable.

d).- Prácticas de Desulfurización Existentes

Las prácticas más comunes para la desulfurización de el arrabio y los hierros en estudio son las siguientes:

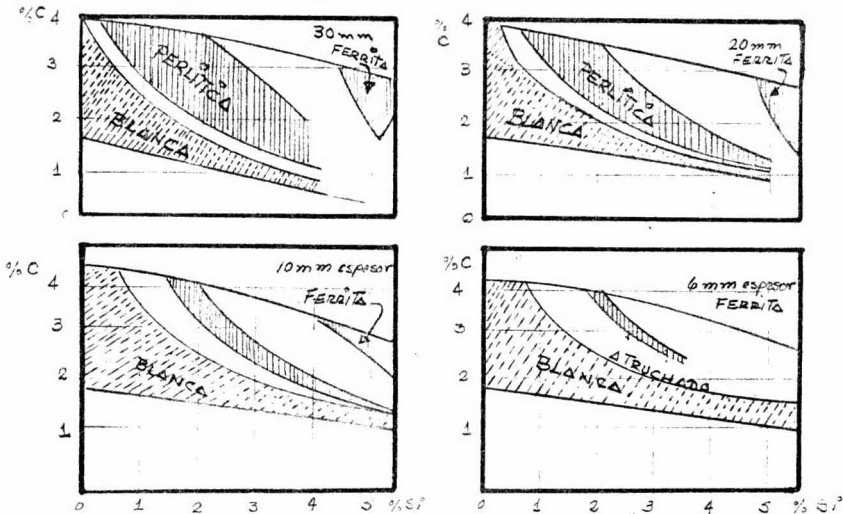
- 1).- Inyección Polysius - Carburos de Calcio
- 2).- Inyección CLYDE - Cal + NaOH
- 3).- Paletas - $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- 4).- Inmersión - Mg-Coque
- 5).- Sosa Cáustica - NaOH
- 6).- Rheinstahl - Ca_2C .

FACTORES TECNICOS DE LOS PROCESOS DE DESULFURIZACION EXTERNA

FACTORES TECNICOS	Inyección Polysius	Inyección Clyde	Paletas	Inmersión	Galag	Sosa Caustica	Rheinstahl Quirl
Depósito Empleado Para El Tratamiento	Ollas y Torpedos	Ollas y Torpedos	Ollas	Ollas	Torpedos	Ollas	Piletas
Reactivo Desulfurante empleado: "A"	100% Ca ₂ C + N ₂	90% Cal 10% NaOH	100% Cal + Metano	45% Magnesio 55% Coke	45% Magnesio 55% Coke	100% NaOH	100% Ca ₂ C
"B"	75% Ca ₂ C 25% Cal Carbón + N ₂	20% Ca ₂ C 70% Cal 10% NaOH					
"C"		100% Cal + Propano + N ₂					
Sistema de Adición del Reactivo	Inyección con: Aire Nitrógeno	Inyección con: Aire Nitrógeno N ₂ +gas natural	Adición manual ó Mecánica con pa- letas y soplado superficial de metano.	Inmersión de una campana	Inmersión de una campana	Adición manual ó mecánica	Agitación mecáni- ca con paletas
Aditamento usado	Dispensador y lanza	Dispensador y lanza	Tolvas y paletas	Grúa y campana	Grúa y campana	Tolva	Tolva y pileta
Tipo de Reacción Obtenida	Salpicaduras	Salpicaduras	Incontrolable	Efervescencia	Efervescencia	Incontrolable	Incontrolable
Cantidad de humos Producida	Regular	Regular	Gran cantidad	Poca	Poca	Excesiva	Gran cantidad
El uso de un sistema depurador es:	Recomendable	Recomendable	Necesario	Recomendable	Recomendable	Necesario	Necesario
Tipo de escoria producida:	Granular seca	Pegajosa	Pegajosa	Costrosa seca	Costrosa seca	Pegajosa	Granular seca
Tiempo total de tratamiento (min)	15 - 20	15 - 20	40	10 - 15	10 - 15	15 - 20	15
Pérdida de temperatura	15°	15°	15°	25°	20°	15°	10°
Rangos de desulfurización posible empleando los diferentes métodos (% S)	"A" 0.005-0.070 "B" "C"	0.020 - 0.040 0.010 - 0.040 0.005 - 0.070	0.030 - 0.100	0.004 - 0.070	0.0040 - 0.070	0.020 - 0.070	0.010 - 0.050
Consumo de reactivos por tonelada de arrabio tratada para:	"A" "B"	"A" "B" "C"		Agitación (min)			
1.- 0.050-0.015% S final (ton)	0.0070 0.009	0.035 0.021 0.016	0.009	00:15	0.00092	0.00092	0.0070
2.- 0.050-0.025% S final (ton)	0.0048 0.005	0.020 0.015 0.011	0.009	00:08	0.00065	0.00065	0.0048
3.- 0.060-0.025% S final (ton)	0.0060 0.006	0.028 0.019 0.013	0.009	00:10	0.00090	0.00090	0.0060
Eficiencia de 0.05% S inicial a 0.015 % S final	0.245 0.315	0.420 0.735 0.560	0.3150		0.0315	0.0315	0.315
	Inyección Polysius	Inyección Clyde	-	-	Inmersión Mag-Coke	-	-

IV.- RELACION ENTRE LA COMPOSICION DE LAS FUNDICIONES: SU MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA

Para conocer la clase de fundición que se puede obtener en piezas de diferentes espesores, coladas en arena, al variar los contenidos de carbono y silicio, es muy interesante el estudio de las gráficas que a continuación se indican:



Influencia de los contenidos de carbono y silicio y del espesor de las piezas coladas en arena, en la microestructura de las fundiciones.

En ella se señalan los contenidos de silicio y de carbono recomendables para la obtención de fundiciones grises, blancas y atruchadas en piezas de diferente espesor. Fácilmente se comprende que estos diagramas, muy parecidos al diagrama de NORBURY,

son una modificación del clásico diagrama de MAURER. En la actualidad estos gráficos se consideran más exactos que el de MAURER y son más utilizados que aquel.

Con ayuda de estos gráficos se puede tener una idea bastante aproximada de las combinaciones de composición que conviene utilizar, según los casos para obtener diferentes resultados.

Recientemente, a pesar de su interés, se ha abonado algo el uso de los gráficos anteriores, por que con frecuencia se desea más saber la resistencia que presentan las fundiciones, que saber si son blancas, atruchadas ó grises.

Por ello, desde hace bastantes años, se ha venido estudiando diversas combinaciones para que con solo una cifra se pueda tener en cada caso, una idea de la clase de fundición a que se hace referencia.

Animados por este propósito se comenzó primero a calificar las fundiciones por el valor de la suma de carbono más silicio (C + Si) y se vio que, con cierta aproximación, conociendo ese valor era posible conocer la resistencia que se puede obtener en redondos los diferentes diámetros.

Recientemente numerosos autores sobre todo los americanos consideran que es más representativo del carácter de una fundición el valor del:

$$C + \frac{Si}{3} \text{ ó aún más el } : C + \frac{Si}{3} + \frac{P}{3} \text{ que recibe el nombre de } \underline{\text{CARBONO EQUIVALENTE.}}$$

Finalmente en Alemania se tiende a valorar el carácter de las fundiciones de acuerdo con el INDICE DE SATURACION que se determina por la fórmula:

$$Is = \frac{C}{4.3 - (\frac{Si}{3})} \quad \text{ó también} \quad Is = \frac{C}{4.3 - (\frac{Si}{3} + \frac{P}{3})}$$

Criterio que en cierto modo, es parecido al del carbono equivalente pero expresada con diferente coeficiente.

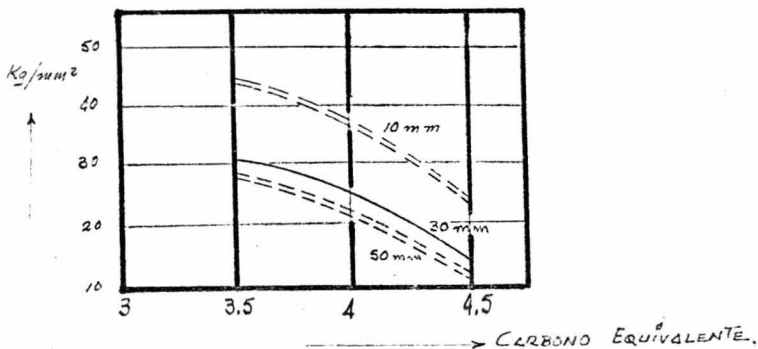
Una fundición hipoeutéctica es, si el carbono equivalente es inferior a 4.3, eutéctica si su valor es 4.3, hipereutéctica si es superior a 4.3. Considerando los valores del índice de saturación, también se puede conocer el carácter de las fundiciones. Serán hipoeutécticas cuando ese valor es inferior a 1 (uno), eutécticas cuando el $Is = 1$ é hipereutécticas cuando es superior a 1.

De acuerdo con estos métodos de calificación, se ha encontrado experimentalmente que conociendo para cada fundición el va-

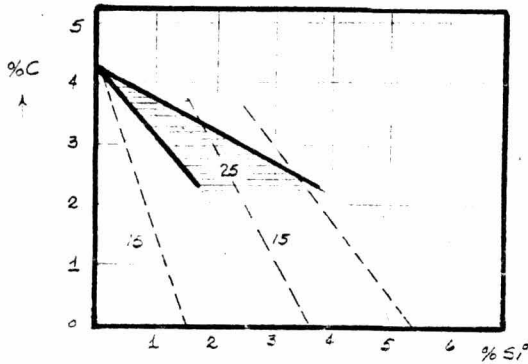
lor de algunos de esas índices, se puede determinar con bastante aproximación el posible comportamiento de las fundiciones en piezas de diferentes espesores, obteniéndose valores bastante parecidos, aunque en algunos casos aparecen algunas diferencias entre ellos.

Como se muestra en la siguiente figura con ayuda de las curvas se puede conocer para diferentes espesores la resistencia a la tracción que se obtiene con fundiciones teniendo diversos valores de carbono equivalente.

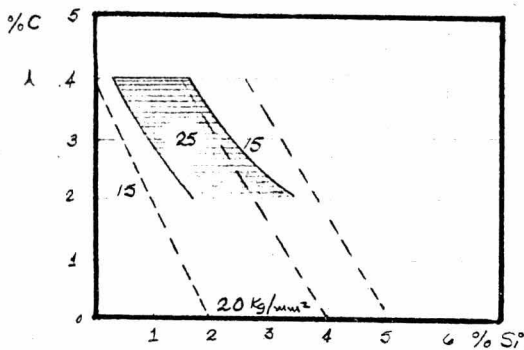
Finalmente se señalan en las siguientes gráficas la resistencia que aproximadamente, se pueden obtener con diferentes composiciones empleando los ya conocidos diagramas de MAURER y NORBURY, sobre los que se han representado en zonas las fundiciones de igual resistencia.



Influencia del carbono equivalente en las resistencias que se obtienen en las piezas de fundición de diferentes espesores.



Situación de las fundiciones de 15, 20, 25 Kg sobre mm^2 de resistencia a la tracción en el diagrama de Maurer.



Situaciones de las fundiciones de 15, 20 y 25 Kg/ mm^2 de resistencia a la tracción en el diagrama de NORBURN correspondiente a piezas con 25 mm de espesor.

Hasta aquí hemos señalado en repetidas ocasiones que hay fundiciones con resistencias con 15, 20, 25, 30, 35, 40 y más Kg/mm². Conviene advertir que en la práctica normal es difícil conseguir con las fundiciones al carbono ordinarias resistencias superiores a 30 Kg/mm², si no se emplean técnicas especiales. En general, las fundiciones con resistencias mayores de 30 Kg/mm² deben considerarse fundiciones en cierto modo especiales. Los principales métodos para obtener esas altas resistencias son el empleo de inoculantes o de elementos de aleación.

En la actualidad se sigue empleando con bastante frecuencia el valor de C + Si en las fundiciones, porque es un índice, que a veces es más fácil de recordar que los valores de los contenidos en carbono y en silicio.

V LA INOCULACION Y SUS EFECTOS SOBRE LOS
HIERROS COLADOS.

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 dicho más correctamente, 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 mediante variaciones en la composición química del hierro fundido.

Resulta 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 diferentes espesores partiendo de una misma aleación de hierro fundido.

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

Las piezas de hierro que no han sido inoculadas, presentan frecuentemente estructuras blancas y atruchadas, particularmente

en zonas delgadas y en las superficies de la pieza, lo que es debido a la formación de grafito del tipo E y D. Grafito muy fino en una distribución interdentrítica con carburos libres, y en algunos casos rodeado por grandes zonas de ferrita.

FACTORES METALURGICOS. - Esta notación se refiere principalmente a la práctica diaria, y así a continuación se enuncian los factores que son los que determinan si un hierro solidificará o no con una estructura carburizada.

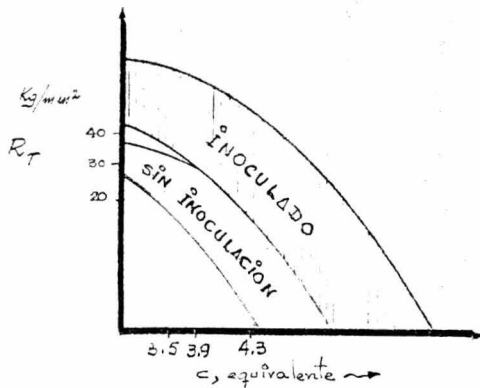
1. Velocidad de Enfriamiento.
2. Composición química, particularmente el contenido de Si.
3. El grado de nucleación, o sea, el número de células eutécticas.
4. El grado de sobre-fusión.
5. El grado de oxidación del hierro.

EFFECTOS DE LA INOCULACION SOBRE LAS CARACTERISTICAS MECANICAS.

En el caso de emplear la inoculación adecuadamente, esta mejora la mayoría de las propiedades mecánicas de la fundición. El grado de mejoría está en función del tipo de inoculante empleado y de la estructura propia del hierro base, es decir, los hierros que normalmente contendrían elevados porcentajes de grafito tipo D y E, serán mejorados con respecto a otros

tipos de hierro; debido a la reducción de fluctuaciones de los tipos de grafito y distribución que se logran mediante la inoculación.

Es notorio el aumento en la resistencia a la tracción, particularmente si el hierro base tiende a contener ferrita primaria. En muchos casos y particularmente en hierros de bajo carbono equivalente al incremento de la resistencia a la tracción, debido al cambio de 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 R . Tracción en aquellos casos en los que se forma grafito tipo D

Únicamente en la superficie de la probeta de prueba .
Para determinar la resistencia a la tracción, la superficie de la probeta es maquinada, así parte del efecto de inoculación no puede observarse en el ensayo, sin embargo, la R. transversal está directamente influenciada por la estructura de la superficie de la probeta y por lo tanto el efecto de la inoculación nos viene reflejando 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 el medirla cuantitativamente.

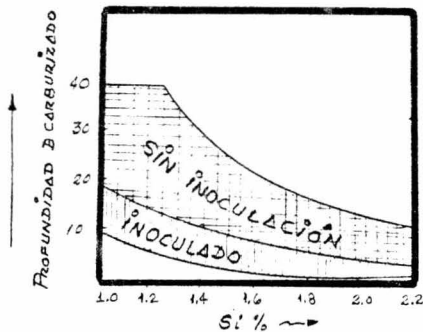
En cuanto al ensayo de choque, existe el hecho de que la fundición inoculada soporta una altura de caída mayor que la fundición no inoculada de la misma composición.

La resistencia al choque de una fundición es directamente proporcional al número de células eutécticas por unidad de superficie, así en cuanto mayor sea el número de éstas en la microestructura normal de fundición, mayor será la resistencia al impacto.

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, pues ésta está directamente relacionada con la resistencia transversal y deformación.

EFFECTO SOBRE LA MAQUINABILIDAD Y PROFUNDIDAD DE TEMPLE EN LAS FUNDICIONES.

Cuando el hierro contiene grafito del tipo D y E y ferrita primaria, tiene una tendencia muy señalada a la "carburización" en las zonas de enfriamiento rápido, tales como ángulos salientes espesores delgados, etc. Con el empleo de inoculantes decrece la tendencia a la carburización de la fundición. Esta es una de las más importantes funciones de los inoculantes.



El efecto de la inoculación sobre la reducción de la carburización o profundidad de temple está directamente relacionada con la maquinabilidad. Los inoculantes mejoran generalmente la maquinabilidad del hierro, debido a una mayor uniformidad

en la estructura, a la eliminación de ferrita primaria, a la disminución de dureza superficial y al transformar en los espesores delgados los carburos de hierro en perlita y grafito.

COMPOSICION DE UN INOCULANTE.

El inoculante consisten en la acción combinado de los siguientes elementos:

1. Ferro-silicio: es el inoculante para esferoidización más usado, los grados con los que se cuenta el mercado son, 85%, 75% y 50% de silicio.

2. Siliciuro cálcico: produce una escoria fluída muy difícil de eliminar, lo que involucra el peligro de que ésta pase a los moldes si es que no se toman grandes precauciones. Además el calcio suele contribuir a la retención de carburos eutécticos cuando se agrega en combinación con el magnesio y en una forma excesiva.

3. Silicio-Zirconio:permite obtener características elevadas pero, en espesores masivos tiende a dar una estructura ferrítica.

Frecuentemente se prolonga la acción de estas mezclas mediante la adición de aluminio, pero en este caso, su empleo sistemático puede dar origen a porosidades.

4. Grafito.- es un inoculante bastante débil desde el punto de vista de homogeneización en el baño fundido. Sin embargo, este tipo de inoculante es, sin duda el más eficaz de todos los reductores de temple además de proporcionar por ello una mejor maquinabilidad.

CONTROL CON LA CUÑA DE TEMPLE.

La sección triangular de la cuña hace que el metal solidifique en un campo de velocidades de enfriamiento progresivamente decrecientes desde el vértice hacia la base. El temple se mide a través de la cuña, es decir, paralelo a la base. La cuña de 12.5 mm de base es lo suficientemente grande para determinar los valores de temple de la mayoría de los hierros colados después de la inoculación.

Medidas de tamaño de Cuña.

A	12.5	19	25	37.5	50
B	25	40	57	91	114
α	28.5°	26.75°	25°	24.25°	23.5°

CONSIDERACIONES TERMODINAMICAS SOBRE LA CRISTALIZACION
DEL GRAFITO EN HIERROS FUNDIDOS.

Los nódulos de grafito son, de acuerdo con Cottrell, Vishnevskij y otros, construcciones de un número de cristales de grafito que crecen radialmente hacia afuera de un centro común con sus planes basales perpendiculares al eje radial de crecimiento donde el grafito laminar es principalmente de una naturaleza cristalina singular.

Para la solidificación de grafito laminar en una fundición de hierro vaciado el cambio de energía libre durante el crecimiento esta expresado como sigue:

$$\Delta G_F = \Delta V \cdot \Delta G_V + \Delta A_F \cdot \sigma_{sl} \dots (1)$$

donde ΔG_F = Cambio de energía libre acompañada del crecimiento de grafito laminar.

ΔV = Volúmen de la solución fundida.

ΔG_V = Volúmen del cambio de energía libre durante la solidificación del grafito.

ΔA_F = Area interfacial entre el grafito laminar y fundición.

σ_{sl} = Energía superficial específica de la interfase y grafito/fundición.

La superficie/radio de volumen de el grafito laminar ha sido determinado por el método de absorción de gas, descrito por HAUL y R. JOHNE. Las investigaciones al respecto fueron llevadas a cabo por el grupo de Ingeniería Química del Instituto Nacional de Investigación Química de la CIS R.

La relación siguiente mide la separación de laminillas de grafito en hierro gris; siendo esta:

$$A_F / V = 13.2$$

Para el grafito laminar la energía de superficie necesaria para desarrollar esta interfase es:

$$E_F = (13.2) (V) (\sigma_{si} \dots (2)$$

$$\text{ó } E_F = K_F f (V) \quad K_F = \text{Constante}$$

En este caso en donde los nódulos de grafito solidifican en términos de energía adicional ($\sum \Delta a_N \cdot \sigma_{ss}$) tiene que ser incluida en la ecuación anterior para tomar en cuenta la energía requerida para desarrollar las interfases entre los cristales individuales de grafito en el nódulo. Para nódulos la ecuación se reduce a:

$$\Delta G_N = \Delta V \cdot \Delta G_V + \Delta A_N \sigma_{si} + \Delta A_N \cdot \sigma_{ss} \dots (3)$$

donde: ΔG_N = Cambio de energía libre acompañado del crecimiento de grafito nodular.

$\Sigma \Delta a_N$ = Área interfacial entre los cristales individuales en nódulo.

σ_{ss} = Energía específica interfacial entre cristales individuales en el nódulo.

Δ_{AN} = Área interfacial entre el grafito nodular y la fundición.

Un nódulo de volumen V tiene un área interfacial externa de:

$$N = (4.83) (V^{2/3}).$$

El área interfacial Σa entre los cristales individuales en el grafito nodular puede ser calculado observando que el número promedio de cristales individuales en la sección hacia el centro del nódulo es ~ 50 .^{18, 19}.

$$\text{Por lo tanto } \Sigma a_N = 38.48 V^{2/3}$$

La energía necesaria para el desarrollo de las superficies interfaciales de un nódulo de grafito de volumen V es entonces:

$$(4) \dots E_N = (4.83) (V^{2/3}) (\sigma_{sl}) + 38.48 V^{2/3} \sigma_{ss}$$

$$6 \quad E_N = K_N f (V^{2/3}), \text{ donde } K_N = \text{Constante}$$

Donde la energía de superficie requerida para los nódulos esta en función de los $2/3$ de poder del volumen de el grafito la energía de superficie requerida por las laminillas es una función lineal de el volumen de grafito (ecuación No. 2). Directamente después la nucleación de un

embrión estable de grafito requiere de menos energía para el crecimiento de la lámina que para la del nódulo. Termodinámicamente el crecimiento del nódulo será estable sólo y cuando:

$$\frac{dE_N}{dV} > \frac{dE_F}{dV} \quad \text{ó} \quad \frac{2}{3} K_N V^{-1/3} > K_F$$

Los valores de $\frac{dE_N}{dV}$ y $\frac{dE_F}{dV}$ se muestran esquemáticamente en la siguiente figura:

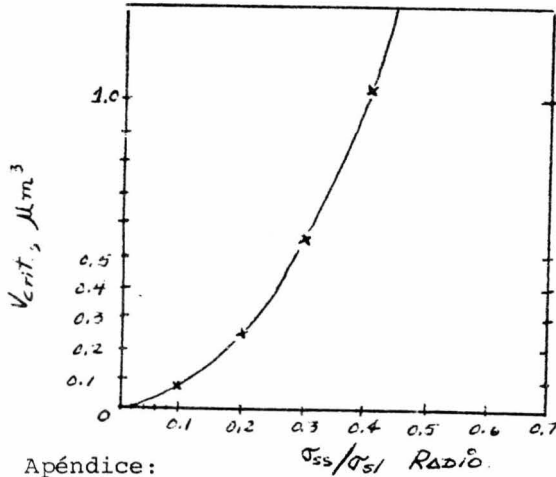
El volumen Crítico $V_{crit.}$, puede ser definido cuando el crecimiento del nódulo de grafito es posible.

donde: $\frac{dE_N}{dV} = \frac{dE_F}{dV}$
ó $(3.22 \sigma_{sl} + 25.65 \sigma_{ss}) V_{crit.}^{-1/3} = 13.2 \text{ sl}$

$$\text{ó } V_{crit.} = 0.0145 + 7.4 \left(\frac{\sigma_{ss}}{\sigma_{sl}} \right)^3 \mu\text{m}^3$$

Termodinámicamente el nódulo de grafito es estable solo cuando su volúmen excede el volumen crítico. La transformación de un laminar por un nódulo será cuando el volumen de crecimiento laminar alcance el volumen crítico, esto sin embargo no es posible debido a las consideraciones de crecimiento. Una vez que el grafito laminar ha empezado su crecimiento este no puede cambiar a nodular ya que esto requiere de la nucleación de un gran número adicional de cristales. El grafito nodular puede por lo tanto ser esperado solo en caso de nucleación heterogénea cuando

el volumen de la partícula nucleante más el volumen adicional del núcleo de grafito cubriendo la partícula nucleante es mayor que el volumen crítico.



Apéndice:

(A) Cálculo de la superficie externa A de una esfera de su volumen V :

$$V = \frac{d^3 \pi}{6} ; d = 3 \sqrt{\frac{6V}{\pi}}$$

$$A = d^2 \pi ; A = (3 \sqrt{\frac{6V}{\pi}})^2 \cdot \pi$$

$$A = (4.83) (V^{2/3})$$

(B) El cálculo del área de contacto entre los cristales individuales en un nódulo Σa :

El promedio del número de cristales en la sección central del nódulo es 50: 24, 25. De esta manera un cincuentavo del área de la sección transversal de esta sección central representa el área de un cristal individual.

$$a = \frac{\pi r^2}{50}$$

El número promedio de cristales individuales en un nódulo puede ser calculado por la división de la superficie externa de un nódulo ($4 \pi r^2$) por la superficie externa de un cristal individual ($\frac{(\pi r)^2}{50}$).

$$N = 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot 50^2 / 4\pi^2 r^2 = 2500/\pi$$

En un nódulo cada cristal individual esta en contacto con otros cuatro cristales individuales. De esta manera el área de contacto por nódulo es:

$$4a = 4\pi r^2/50$$

La superficie de contacto completa Σa entre cristales individuales en un nódulo puede ser calculada por la multiplicación de las áreas de superficie de contacto de un cristal individual (4a) por el número de cristales (N) y dividiendo por dos, debido a que dos cristales siempre tienen una superficie de contacto común.:

$$\Sigma a = \frac{4aN}{2} = 4\pi r^2 \cdot 2500/50\pi \cdot 2 =$$

$$\Sigma a = 100 r^2$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = 0.62035 v^{1/3}$$

$$\Sigma a = 38.48 \cdot v^{2/3}$$

VII.- COMPARACION DE PROPIEDADES FISICAS ENTRE EL
HIERRO MALEABLE Y NODULAR

A continuación se describen los resultados obtenidos que sobre las propiedades físicas arrojaron los especímenes de cada tipo de hierro estudiados.

TABLA DE RESULTADOS FISICOS PARA 5 PROBETAS DE HIERRO
NODULAR FERRITICO

Elementos de aleación	P r o b e t a s				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
C	3.44	3.37	3.38	3.32	3.30
Si	1.90	2.45	2.60	2.22	2.18
Mn	0.01	0.01	0.01	0.03	0.30
Ni	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Mg	0.050	0.059	0.069	0.06	0.06
Cu	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P	0.030	0.028	0.028	0.03	0.017
S	0.015	0.017	0.015	0.015	0.015

Los análisis anteriores observaron variación en cuanto al % Si, y se lograron las siguientes propiedades físicas:

SIN TRATAMIENTO TERMICO

Propiedades Mecánicas	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
% Ferrita	95	95	95	90	90
% Perlita	5	5	5	10	10
Resistencia a la Tracción lb/in ²	64 243	63 532	67 341	67 200	66 900 Psi
Límite elástico a 0.02% lb/in ²	37 812	42 516	46 821	46 800	44 900 Psi
% Alargamiento	22.6	23.9	18.5	18.5	12
Dureza Brinell	152	152	156	179	203

Llevando a cabo un tratamiento térmico convencional se obtuvieron los siguientes resultados.

CON TRATAMIENTO TERMICO (RECOCIDO)

Propiedades Mecánicas	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Resistencia a la Tracción lb/in ²	53 287	58 630	63 234	58 787	47 134
Límite elástico a 0.02% lb/in ²	37 812	42 502	46 822	46 800	36 230
Alargamiento %	25,9	25,1	25,3	22,1	25,4
Dureza Brinell	121	143	149	149	128

Así mismo si agregamos fósforo e incrementamos el contenido de carbono en el baño en las proporciones indicadas tendremos:

Fósforo Probeta	No. 1	No. 2	No. 3
C	3.60	3.60	3.60
Si	2.22	2.29	2.32
Mn	0.08	0.09	0.11
P	0.03	0.06	0.225
S	0.01	0.01	0.01
Ni	0.03	0.07	0.035
Mg	0.023	0.051	0.058

Resistencia a la Tracción lb/in ²	71 248	71 945	78 041
Límite elástico lb/in ²	47 432	47 532	61 642
% de Alargamiento	20,2	11,5	3,00
Dureza Brinell	159	167	229

De acuerdo a la tabla anterior resulta fácil el apreciar como afecta el fósforo aunado con el carbono los porcentajes de elasticidad, los valores de la dureza aumentan proporcionalmente también, más aún, cuando esta producción no sufra tratamiento térmico adecuado.

Comparación de los efectos del manganeso en las

Propiedades Físicas

Análisis	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
C	3.44	3.65	3.48	3.50	3.50
Si	1.90	1.87	1.98	2.50	2.50
Mn	0.01	0.18	0.38	0.27	0.76
Ni	0.01	0.01	0.04	1.03	1.03
Cr	0.025	0.027	0.021		
Mg	0.059	0.033	0.04	0.053	0.053
Cu	0.01	0.01	0.01		
P	0.028	0.03	0.033	0.034	0.034
S	0.017	0.015	0.011	0.012	0.012

SIN TRATAMIENTO TERMICO

% Ferrita	95	60	20		
% Perlita	5	40	80		
Resistencia a la tracción lb/in ²	64 243	74 446	90 062	94 922	106 361
Límite elástico lb/in ²	41 422	50 431	53 031	58 928	66 715
% Alargamiento to	22.6	12.1	13.3	10.5	5.0
Dureza Brinell	152	163	197	196	241

De acuerdo a los resultados anteriores con sus diferentes variaciones obtendremos los siguientes resultados para el grado ferrítico estudiado.

	D - 4512
a) Resistencia a la Tensión	65000 Psi
b) Punto de cedencia (0.2%)	45000 Psi
c) Alargamiento (% en 2 pulgadas)	12
d) Módulo de elasticidad (106 Psi)	22
e) Dureza Máxima (BHN)	217

REPORTE DUREZAS

FECHA: 11-XI-72

No. de PRUEBA _____

MATERIAL: HIERRO NODULAR

OPERACION: BRINELL

PIEZA No. M-875 y M-1063

CARGA 3,000 KGS.

FECHA DE PRODUCCION _____

BOLA DE 10 MM.

DIAMETRO	B.H.N.	TOTAL	
		M-875	M-1063
3.55	293		
3.60	285		
3.65	277		
3.70	269		
3.75	252		
3.80	255		
3.85	248	✓	✓
3.90	241	✓✓✓✓	✓✓
3.95	235		
4.00	229	✓✓	✓✓✓✓✓
4.05	223	✓✓	
4.10	217		
4.15	212		✓✓✓✓
4.20	207		
4.25	201		✓✓
4.30	197		
4.35	192		
4.40	187		
4.45	183		
4.50	179		
4.55	174		
4.60	170		
4.65	167		
4.70	163		
4.75	159		
4.80	155		
4.85	152		
4.90	149		
4.95	146		
5.00	143		
5.05	140		
5.10	137		
5.15	134		
5.20	131		
5.25	128		
5.30	125		
5.35	123		
5.40	121		
5.45	118		
5.50	116		
5.55	114		
5.60	111		

RANGO.

REPORTE DUREZAS

FECHA: 11-XI-1972

No. de PRUEBA _____

MATERIAL: HIERRO NODULAR.

OPERACION: BRINELL

PIEZA No. M-876, M-877

CARGA 3,000 KGS.

FECHA DE PRODUCCION _____

BOLA DE 10 MM.

DIAMETRO	B.H.N.	TOTAL	
		M-877	M-876
3.55	293		
3.60	285		
3.65	277		
3.70	269		
3.75	262		
3.80	255		
3.85	248		
3.90	241		
3.95	235		
4.00	229	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
4.05	223		✓✓✓
4.10	217	✓✓✓✓✓✓	
4.15	212		
4.20	207	✓✓	✓✓✓
4.25	201		
4.30	197		✓✓✓✓✓
4.35	192		
4.40	187		
4.45	183		
4.50	179		
4.55	174		
4.60	170		
4.65	167		
4.70	163		
4.75	159		
4.80	155		
4.85	152		
4.90	149		
4.95	146		
5.00	143		
5.05	140		
5.10	137		
5.15	134		
5.20	131		
5.25	128		
5.30	126		
5.35	123		
5.40	121		
5.45	118		
5.50	116		
5.55	114		
5.60	111		

REPORTE DUREZAS

FECHA: 11-XI-72

No. de PRUEBA _____

MATERIAL: HIERRO NODULAR

OPERACION: BRINELL

PIEZA No. M-879 y M-771

CARGA 3,000 KGS.

FECHA DE PRODUCCION N-2°-11-XI-72

BOLA DE 10 MM.

DIAMETRO	B.H.N.	TOTAL
		<i>M-879</i>
		<i>M-771</i>
3.55	293	
3.60	285	
3.65	277	
3.70	269	
3.75	262	
3.80	255	
3.85	248	
3.90	241	<i>✓✓✓</i>
3.95	235	
4.00	229	<i>✓✓✓✓</i>
4.05	223	
4.10	217	<i>✓✓✓✓✓</i>
4.15	212	
4.20	207	<i>✓✓✓✓✓</i>
4.25	201	
4.30	197	
4.35	192	
4.40	187	
4.45	183	
4.50	179	
4.55	174	
4.60	170	
4.65	167	
4.70	163	
4.75	159	
4.80	155	
4.85	152	
4.90	149	
4.95	146	
5.00	143	
5.05	140	
5.10	137	
5.15	134	
5.20	131	
5.25	128	
5.30	125	
5.35	123	
5.40	121	
5.45	118	
5.50	116	
5.55	114	
5.60	111	

RANGO

PRUEBA DE TENSION

Material: Hierro Maleable
 Procedencia: Horno Recocido Continuo
 Grado: Ferritico

Máquina de Pruebas: TINIUS OLSEN
 Pieza: Barras de Tensión

Fecha de Vac.	No. de Barra	Diam. en mm	Area en mm ²	Carga Kg	Límite Elástico		Carga Kg	Ruptura		Alarga miento	% Alarga miento	Frac-tura
					Kg/mm ²	lb/in ²		Kg/mm ²	lb/in ²			
30/XI/74	1	16.35	210.0	6.500	30.9	43950	8.100	38.5	54,700	240	12.0	OK
30/XI/74	2	16.32	209.2	6.800	32.5	46220	8.660	36.6	52,060	300	15.0	OK
31/XI/74	1	16.35	210.0	6.600	31.4	44600	8.280	39.4	56,040	220	11.0	Ligro antilo perlitico
31/XI/74	2	16.30	208.7	7.000	33.6	47790	8.600	41.2	58,600	230	11.5	OK
2/1/75	6	16.42	211.8	6.400	30.2	42950	8.160	38.5	54,700	250	12.5	OK
2/1/75	7	16.38	210.7	6.500	30.8	43810	8.100	38.4	54,620	210	10.5	OK
3/1/75	4	16.34	209.7	5.900	28.1	39970	7.700	36.7	52,200	340	17.0	OK
3/1/75	5	16.35	210.0	6.200	29.5	41960	8.160	38.8	55,100	320	16.0	OK
4/1/75	2	16.40	211.7	6.000	28.5	40530	7.400	35.0	49,780	200	10.0	OK
4/1/75	8	16.34	209.7	6.000	28.5	40530	8.100	38.5	54,760	320	16.0	OK
4/1/75	10	16.40	211.2	6.000	28.4	40390	7.184	37.3	53,050	240	12.0	OK

Observaciones.- Las probetas fueron vaciadas a diferentes horas en los días indicados.
 El horno de recocido cuenta con atmósfera reductora (inyección de H₂)

METALOGRAFÍAS DE HIERRO MALEABLE

FERRÍTICO

F e c h a	P i e z a	D u r e z a	N o d u l o s mm ² o s	T a m a ñ o	F o r m a	D i s t r i b u c i ó n	C	Si	Mn	S	Cr	Matriz
30/XI/74	# 1	121	80	2	3 y 4	2	2.44	1.50	0.24	0.057	0.025	Ferrítica, OK
30/XII/74	# 2	131	90	2	3 y 4	2	2.46	1.47	0.25	0.050	0.025	Ferrítica, OK
31/XII/74	1	128	90	2	3 y 4	2	2.48	1.50	0.30	0.060	0.035	Anillo perlítico irregular hasta de 0.020". Area OK
31/XII/74	2	131	100	2	3 y 4	2	2.48	1.50	0.30	0.050	0.025	Ferrítica, OK
31/XI/74	14	137	80	2	3 y 4	2	2.48	1.52	0.25	0.052	0.030	Ferrítica, OK

METALOGRAFIAS DE HIERRO MALEABLE
FERRITICO

Fecha	Pieza	Dureza	Nodos mm ² ulos	Tamaño	Forma	Distribución	C	Si	Mn	S	Cr	Matriz
2/1/75	#6	134	80	2	3 y 4	2	2.45	1.43	0.31	0.061	0.025	Ferrítica Area OK
2/1/75	#7	128	80	2	3 y 4	2	2.49	1.45	0.31	0.059	0.025	Ferrítica Area OK
3/1/75	#4	128	80	2	3 y 4	2	2.51	1.45	0.31	0.060	0.030	Ferrítica Area OK
3/1/75	#5	137	90	2	3 y 4	2	2.44	1.48	0.31	0.060	0.025	Ferrítica Area OK
4/1/75	#2	131	100	2	3 y 4	2	2.46	1.50	0.29	0.055	0.027	Ferrítica Area OK
4/1/75	#8	126	90	2	3 y 4	2	2.52	1.51	0.30	0.052	0.025	Ferrítica Area OK

RESUMEN SOBRE LAS CARACTERISTICAS DE LOS CONSTITUYENTES EN HIERROS COLADOS

Constituyente	Dureza	Resistencia a la tracción	Alargamiento (en 2 pulg)	Fragilidad	Resistencia (impacto)	Plasticidad	Solubilidad de carbono (en peso)	Maquinabilidad	Sistema Cristalino
Ferrita (α)	90 Brinell	28 kg/mm ²	40%	Muy baja	Muy alta	Muy buena	0.03%	Muy buena	Cúbico centrado en el cuerpo
Perlita ($\alpha + Fe_3C$) (Eutectoide)	240 Brinell	80 kg/mm ²	20%	Muy alta	Regular	Muy mala	0.80%	Buena	Ortorrombico
Austenita (γ)	40 Rc	105 kg/mm ²	10%	Baja	Muy alta	Muy buena	2.0%	Regular	Cúbico centrado en las caras
Cementita (Fe_3C)	68 Rc	Baja	Nula	Muy alta	Muy baja	Nula	6.67%	Nula	Ortorrombico
Ledeburita $\alpha + Fe_3C$							4.3%		

VIII CONCLUSIONES FINALES.

La eventual substitución del hierro maleable por el hierro nodular, en la fabricación de algunas partes automotrices, esta enfocado primordialmente hacia la substitución del hierro maleable, llamado tambien standard, o sea el grado SAE M-3210, por el hierro nodular grado SAE D-4512.

La justificación de un cambio como el que se analiza debe de satisfacer los puntos de vista técnico y económico.

I. ASPECTO TECNICO

Propiedades Mecánicas.

En la tabla A, se puede observar que las propiedades mecánicas del hierro nodular D-4512, encontramos que en lo que a resistencia a la ruptura se refiere, éste supera al maleable en 15,000 psi, o sea en un treinta por ciento.

El punto de cedencia del nodular es superior en 13,000 psi, o sea un cuarenta por ciento más alto.

El alargamiento que alcanza el nodular es mayor en un diez por ciento.

Como se puede observar el maleable sólo supera en apariencia al nodular en lo que al módulo de elasticidad se refiere.

TABLA A.

PROPIEDADES MECANICAS.

	M - 3210	D-4512	Diferencia
Resistencia a la tensión (psi)	50,000	65,000	15,000
Punto de Cedencia (0.2% psi)	32,000	45,000	13,000
Alargamiento (% en 2 pulg)	10	12	2
Módulo de elasticidad (10^6 psi)	25	22	(3)
Dureza Max. (Bhn)	156	217	61

En realidad, esta ventaja aparente del maleable sobre el nodular se debe a que el módulo de elasticidad no es otra cosa que la relación entre el esfuerzo aplicado a una parte y la deformación que este esfuerzo ocasiona, de modo que un módulo de elasticidad un poco menor significa una *mayor ductilidad, ya que a igual* esfuerzo la deformación es mayor cuando se trabaja dentro de los límites de proporcionalidad.

Por lo tanto, a menos que las condiciones de trabajo a que se vería sujeta la parte fueran tales que la resistencia a la tensión y el alargamiento superiores del nodular pudieran ser pasadas por alto para buscar un módulo de elasticidad mayor, entonces la decisión del proveedor debe inclinarse por el hierro maleable.

La dureza parece ser de hecho, la única desventaja real del nodular en comparación con el maleable, lo cual es cierto sólo en parte para aquellas piezas que requieren un mecanizado o maquinado importante.

II. PROCESO DE MANUFACTURA.

Analizadas ya las propiedades físicas de ambos materiales, se analizarán brevemente sus procesos de manufactura para llegar por último a la estimación comparativa de sus costos de fabricación.

Fundición.

A.- Fusión.- El hierro nodular puede ser producido utilizando el sistema duplex, o sea un *horno de cubilete* y un horno eléctrico (de arco ó de inducción), ó directamente en un horno eléctrico.

Ambos métodos de fusión son los usuales en la manufactura de maleable.

La única diferencia en esta parte del proceso es que, en tanto que la fabricación de maleable el hierro blanco pasa directamente del horno a la olla de vaciado, en el nodular es conveniente disponer de una olla de tipo especial para efectuar la inoculación del metal antes de vertir éste en las ollas de vaciado.

En relación con esta parte del proceso, es conveniente señalar que la selección de chatarra empleada como material de carga requiere controles aún más estrictos cuando se trata de producir nodular que maleable. Esto se debe a los efectos adversos que ejercen los contenidos de azufre y manganeso. En los casos en que no es posible conseguir contenidos de manganeso bajos, que es el caso de nuestro país, puede presentarse la necesidad de agregar lingotes de un tipo especial como el llamado Metal Sorel, cuyo costo es sumamente alto.

B. Tratamiento Térmico.- La gran mayoría de los tipos de hierro nodular conocidos requieren tratamiento térmico. Sin embargo, en el caso del grado SAE D-4512 esta parte del proceso, puede ser requerida o no, dependiendo básicamente del contenido de perlita admisible por el cliente en la matriz de las piezas.

También dependerá de la disponibilidad de chatarra con contenidos de azufre y manganeso bajos. En todo caso, cada fabricante debe de analizar su situación particular haciendo un estudio económico y dependiendo de éste, determinar que

es lo que más conviene.

Sin embargo, para quien tenga que maquina su producción, siempre es recomendable que trate térmicamente su material para abatir sus costos de maquinado, ya que mediante éste, se eliminan los carburos existentes y, como consecuencia se baja la dureza.

De cualquier forma, el tratamiento térmico del nodular es muchísimo más corto que el del hierro maleable. En los Estados Unidos y el Canadá es frecuente encontrar plantas donde se produce nodular del tipo D-4512 sin tratamiento térmico por tres razones:

1. Que el costo del gas natural es sumamente alto.
2. Que disponen de un mercado de chatarra muy amplio.
3. Que el costo del metal Sorel en esos países es muy bajo.

C. Acabado.- El equipo de limpieza y acabado de las piezas de nodular es básicamente el mismo que para el maleable. Sin embargo, es conveniente señalar lo siguiente:

Por no requerir las partes de nodular entradas de alimentación, tan amplias como las de maleable, el consumo de piedras de esmeril y de mano de obra en esta área es menor, aún tomando en cuenta la mayor dureza del nodular.

Además como aún en los casos que hubiera necesidad de tratar térmicamente las piezas, los ciclos son mucho más cortos que los del maleabilizado, las partes no

sufren deformaciones tan apreciables y, en consecuencia se elimina la operación de enderezado.

Lo anteriormente expuesto es resultado de un análisis rápido de las ventajas y desventajas de cada uno de los materiales, y que no pretende en lo absoluto afirmar, como quizá podría entenderse, que el hierro dúctil o nodular es la solución a cualquier caso en que se estuviera utilizando actualmente el hierro maleable.

Es de entenderse que para cada situación específica se deben de mediar estudios a fondo de las condiciones de trabajo a que esta sujeta la parte en cuestión y que la decisión final debe de tomar en cuenta la disponibilidad de un proveedor confiable, así como muchos otros factores que la experiencia dicta.

IX

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Stephen I. Karsay
Ductil Iron
Quebec Iron and Titanium Corporation
Canada, 1971

- 2.- Miller and Company
The Ductile Iron Process
Compendium III
Chicago, 1963

- 3.- José Apraiz Barreiro
Fundiciones
Editorial Dossat, 3a. Edición
Madrid, 1971

- 4.- L. Quievron y L. Oudine
Curso de Metalúrgia

- 5.- Fernando González Vargas, Ing.
Control Metalúrgico en la Producción de los Hierros Colados
III Congreso Nacional y Exposición de la Industria de la Fundición
México

- 6.- G. T. Van Rooyen and G. Paul
Interfacial Energies and The Graphite Crystallization in Cast Iron
Metal Science, 1974 Vol. 8