

**TESIS DONADA POR
D. G. B. - UNAM**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

T E S I S

**"CARACTERIZACION DE INOCULANTES NACIONALES
PARA HIERRO GRIS".**

**Que para obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

p r e s e n t a

GUILLERMO MIRELES ARREOLA

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

SINOPSIS.

El efecto de la Inoculación del Hierro Gris fué investigado en relación al efecto del porcentaje de adición, tamaño de la Partícula Inoculante y los diferentes Inoculantes empleados. Los Inoculantes usados fueron Inoculante A 77-M3, Inoculoy 63, SMZ, Funco No.2 Vulcano, No.3 - Vulcano y el Inoculante No.4 Vulcano, los cuales fueron tratados en la Olla. Se usó una composición estandar de Hierro Hipoeutéctico. Se establecieron Parametros tales como temperatura de sobrecalentamiento, de colada, de Inoculación etc., para evaluar el efecto Inoculante. Se produjo un estandar de blanqueo para tomarlo como referencia en la Inoculación de las piezas coladas. El modelo para producir estas piezas fué diseñado particularmente para este propósito. Las Microestructuras y las Células Eutécticas fueron evaluadas por exámenes Metalográficos y de comparación respectivamente.

Los resultados muestran que la Nucleación de Hojuelas de Grafito son sensibles a un gran número de variables, particularmente tres de las cuales fueron estudiadas: tamaño de Partícula, porcentaje de Adición y los tipos de Inoculantes usados en la promoción de Grafito fué relativamente similar en todos los materiales. La cantidad de Células Eutécticas fueron afectadas de una forma parecida.

SINOPSIS

INDICE

1	INTRODUCCION	1
2	REVISION DE TRABAJOS PREVIOS	
2.1.-	Solidificación de Hierro Gris (Higo e Higereu- tético).	2
2.2.-	Nucleación Homogenea y Heterogenea.	7
2.3.-	Fenómeno de la nucleación en Hierro Gris.	9
2.4.-	Fenómeno de crecimiento en Hierro Gris.	13
2.5.-	Teorías de Nucleación en Hierro Gris.	16
2.5.1.-	Teoría del Núcleo de Grafito.	16
2.5.2.-	Teoría de la Desgacificación.	17
2.5.3.-	Teoría de los Silicatos.	17
2.5.4.-	Teoría del Subenfriamiento.	18
2.5.5.-	Teoría de la Estabilidad del Carburo.	18
2.5.6.-	Teoría de la tensión superficial e Energía de Superficie.	18
2.6.-	Inoculación.	20
2.6.1.-	Teoría de la Inoculación.	21
2.6.2.-	Factores que influyen en la Inoculación.	22
2.6.3.-	Supresión de Carburos.	24
2.6.4.-	Mejora del mecanizado y características mecánicas.	25
2.6.5.-	Acción sobre el tamaño de Grano.	25
2.7.-	Metodos de Inoculación.	27
2.8.-	Clasificación de Inoculantes.	29
2.8.1.-	Tipos de Inoculantes y Componentes de estos.	29

2.8.2.- Efecto de varios materiales Inoculantes.	30
2.9.- Decaimiento del poder nucleante de las Partículas Inoculantes.	40
2.10.- Influencia del tamaño de Partícula y la cantidad de Inoculante.	44
2.11.- Influencia de Parametros Térmicos en la efectividad de los Inoculantes.	47
2.12.- Influencia de la composición de la aleación en la efectividad de los Inoculantes.	53
2.12.1.- Influencia del Carbón equivalente.	53
2.12.2.- Influencia del contenido de Azufre.	54
2.12.3.- Influencia del contenido de Manganeso.	55
2.12.4.- Influencia del contenido de fósforo y Titanio.	55
2.12.5.- Influencia del contenido de Cromo y Silicio.	56
2.12.6.- Influencia de los Gases disueltos.	56
2.12.7.- Influencia de las Inclusiones no Metálicas.	57
2.13.- Influencia del método de adición y tiempo de reposo en la efectividad del inoculante.	58
2.14.- Métodos para la evaluación del efecto Inoculante.	60
2.15.- Evaluación de formas, tipos y distribución del Grafito y tipos de matrices.	63
2.15.1.- Tipos de Hojuelas de Grafito.	63
2.15.2.- Tipo A. distribución uniforme y orientación al azar.	63
2.15.3.- Tipo B. Rosetas agrupadas, con orientación al azar.	64
2.15.4.- Tipo C. Hojuelas de tamaños superpuestos y orientación al azar.	66
2.15.5.- Tipo D. segregación Interdendrítica, orientación al azar.	67
2.15.6.- Tipo E. segregación Interdendrítica, orientación preferente.	68

3 MATERIALES Y METODOS.

3.1.- Composición Química de la Carga Metálica.	69
3.1.1.-Balance de la Carga Metálica.	69
3.1.2.-Composición Química de las piezas Coladas.	70
3.2.- Selección de Inoculantes.	72
3.2.1.-Composición Química de los Inoculantes.	72
3.3.- Variables seleccionadas.	74
3.3.1.-Determinación de la cantidad de Inoculantes.	74
3.3.2.-Determinación del tamaño de partícula del - Inoculante.	75
3.3.2.1.-Análisis Granulometrico de los Inoculantes.	77
3.4.- Método de moldeo y preparación de la Arena.	80
3.5.- Olla de Colada, preparación y uso.	81
3.6.- Unidad de fusión y manufactura del revesti - miento refractario.	82
3.7.- Método de operación del horno.	83
3.8.- Método de colada e Inoculación.	84
3.9.- Metalografía.	87
3.9.1.-Corte y desbaste de la Probeta Metalográfica.	87
3.9.2.-Método de desbaste fino y pulido.	87
3.10.- Reactivos de ataque.	89
3.11.- Método de evaluación mediante la Cuña- de temple.	91
3.12.- Método de evaluación de Células Eutécticas.	98

4 DESCRIPCION DE RESULTADOS.

4.1.- Variables y Parametros.	100
4.1.1.-Patrón de Blanqueo.	100
4.1.2.-Determinación de la cantidad de Inoculante.	100

4.1.3.-	Determinación del tamaño de Partícula.	100
4.1.4.-	Tipos de Inoculante.	104
4.2.-	Penetración del blanqueo en la Cufia de Temple.	106
4.3.-	Relación entre la cantidad de Inoculante y la penetración del blanqueo en la Cufia de Temple.	112
4.4.-	Relación entre el tamaño de Partícula y la penetración del blanqueo en la Cufia de Temple.	113
4.5.-	Relación entre el tipo de Inoculante y la penetración del blanqueo en la Cufia de Temple.	114
4.6.-	Forma y distribución del Grafito y tipo de matriz .	115
4.7.-	Método comparativo de Células Eutécticas.	121
4.7.1.-	Relación entre el tipo de Inoculante y la cantidad de Células Eutécticas.	122

5 DISCUSION.

5.1.-	Introducción.	123
5.2.-	Descripción de las variables de proceso.	123
5.3.-	EL modelo de prueba.	124
5.4.-	Sistema de moldeo.	125
5.5.-	Inoculación.	125
5.6.-	Obtención del estandar.	126
5.7.-	Cantidad de Inoculante.	126
5.7.1.-	Profundidad de blanqueo.	127
5.8.-	Tamaño de Partícula.	127
5.8.1.-	Profundidad de blanqueo.	128

5.9.- Eficiencia de los Inoculantes usados en base a su composición.	128
5.9.1.- Forma y distribución del Grafito.	129
5.9.2.- Matriz.	130
5.9.3.- Profundidad de Blanqueo.	130
5.9.4.- Células Eutécticas.	132
5.9.4.1.- Introducción.	132
5.9.4.2.- Inoculante A77-M3.	132
5.9.4.3.- Inoculante Inoculoy 63.	132
5.9.4.4.- Inoculante SMZ.	133
5.9.4.5.- Inoculante FUNCO.	133
5.9.4.6.- Inoculante No.2 VUICANO.	134
5.9.4.7.- Inoculante No.3 VUICANO.	134
5.9.4.8.- Inoculante No.4 VUICANO.	134
5.10.- Discusión Global.	135
6 CONCLUSIONES.	138
7 BIBLIOGRAFIA.	140
AGRADECIMIENTOS.	

1- INTRODUCCION.

Los hierros de fundición son únicos entre las aleaciones coladas en un extenso rango de propiedades y estructuras y tambien como una respuesta estructural compleja a las variables procesales.

Las propiedades de los Hierros de fundición son extensamente determinados por la forma, el patrón y la cantidad de Grafito presente, por el número de Células Eutéticas, por el subenfriamiento ocurrido durante la solidificación del Eutético estable Grafito-Austenita y por la profundidad de blanqueo de Cuñas especialmente diseñadas.

A menudo el Hierro Colado que debiera solidificar como blanco, debe ser inducido a solidificar como Gris aplicando el proceso llamado Inoculación. Los Inoculantes o materiales usados para este proposito son, en la mayoría de los casos, manufacturados de elementos preparados en forma de aleaciones.

El uso de Inoculantes para controlar la estructura del Hierro Gris esta basado en la promoción del Eutético estable Grafito-Austenita, elevando la temperatura del arresto mediante el abastecimiento de Partículas que sirviran como Núcleos en la promoción de la Nucleación.

El objetivo de este trabajo es determinar las cualidades de los materiales inoculantes mas comunmente distribuidos en el mercado de los Inoculantes.

Para este propósito se ha determinado su correlación con variables tales como el porcentaje de adición, tamaño de la Partícula, y los diferentes tipos de Inoculantes. Microestructuras, Células Eutéticas, y la zona templada producida, son tomados como base para tal correlación.

2.-REVISION DE TRABAJOS PREVIOS

2.1.- SOLIDIFICACION DE HIERRO GRIS
(HIPO E HIPEREUTECTICO)

SOLIDIFICACION DE HIERROS GRISES HIPOEUTECTICOS E HIPEREUTECTICOS

La solidificación de esta clase de hierro presenta dos etapas.

Etapas de Nucleación y Crecimiento; algunos investigadores han estudiado la solidificación progresiva de los Hierros Grises Ordinarios.

Howe⁽¹⁾ y Hillert⁽⁵⁾ usando el concepto general de equilibrio Estable y Metaestable en la solidificación de las fases, describen con claridad la secuencia de los eventos que ocurren durante el enfriamiento de estas aleaciones. Estos describen la formación de Dendritas de Austenita Primaria en aleaciones Hipoeutécticas; seguidas de la solidificación del Eutéctico en los espacios intermedios además de estudiar la estructura del Hierro-Blanco formado. Las diferencias estructurales entre la fundición blanca y gris fue interpretada por Howe⁽¹⁾ en términos del concepto de equilibrio Estable y Metaestable sin una explicación clara de la manera en que se forman las hojuelas de grafito.

Boyles⁽²⁾ estudió la solidificación de los hierros grises usando el método de temple, enfriando desde varias temperaturas. En un enfriamiento lento muestra que cuando la fundición de hierro es enfriada bajo la temperatura de líquidos, las Dendritas de Austenita Primaria comienzan a nuclearse en el líquido y crecen continuamente conforme la temperatura decrece. Porque el carbono que poseen estas dendritas es mucho mas bajo que el contenido de carbono en el líquido, su crecimiento esta -

-acompañado por un enriquecimiento progresivo en carbono a partir del líquido remanente.

Quando el metal es enfriado bajo la temperatura de equilibrio eutéctica, la transformación o reacción eutéctica está lista para comenzar, a este fenómeno se le llama subenfriamiento.

Ha sido establecido por muchos autores que la cantidad de subenfriamiento depende del grado de nucleación, del metal y la velocidad de enfriamiento.

De aquí que los hierros mas comerciales son los Hipoeutécticos, con Dendritas de Austenita enfriadas antes del punto eutéctico (4.3% C en el diagrama Hierro-Carbono). Un hierro Hipereutéctico es un hierro en el cual lleva un porcentaje de Carbono mayor que el 4.3% eutéctico.

Si un hierro excede del 2% de Carbono⁽³⁾ el Carbono, ~~no necesariamente tiene que nuclearse a partir de la descomposición de la Austenita~~, este se puede formar directamente del metal líquido por medio de una reacción eutéctica.

En el enfriamiento rápido de una sección delgada de la pieza moldeada en arena, como la aleación se enfría bajo la línea de líquidos, las Dendritas de Austenita se forman y crecen hasta que la temperatura eutéctica es alcanzada. En el eutéctico la formación de grafito es suprimida pero la Austenita y Cementita precipitan en forma de ledeburita⁽⁴⁾ la cual es una forma del eutéctico-el cual consiste de esferas de Austenita embebidas en Cementita.

-La Ledeburita se forma en el sistema Fe-Fe₃C Eutéctico ver fig. 2.1.

Sobre la línea sólida "N-M", a un enfriamiento adicional la Cementita crece en cuanto la Austenita decrece en el contenido de Carbono a través de la línea sólida "N-O". En "O" la reacción eutécticoide transforma la Austenita remanente a Perlita. Las microestructuras que ilustran la solidificación y enfriamiento se muestran en la fig. 2.1.B. A la temperatura ambiente esta estructura es dura y quebradiza y comúnmente se le llama Hierro-Blanco, porque la superficie de una pieza fracturada de este hierro es blanca y brillante.

En el caso de tener un enfriamiento lento, lo que se forma primero es Austenita, a partir del líquido. Pero el enfriamiento Eutéctico es ahora mas lento, tal es esto que los productos de la reacción Eutéctica son Austenita y Grafito (La reacción se encuentra sobre la línea punteada "N-M").

El Grafito Eutéctico tiende a formarse como hojuelas rodeadas por Austenita Eutéctica. Sobre el enfriamiento continuo la Austenita decrece en el contenido de Carbono a través de la línea punteada "N-O" y las hojuelas de Grafito crecen. A la temperatura Eutécticoide "O-P", la Austenita se transforma a Perlita como anteriormente se mencionó.

Los cambios de fase en un enfriamiento muy lento en el cual una aleación será exactamente como el caso anterior excepto que en el Eutécticoide el enfriamiento será suficientemente lento para permitir que el Grafito precipite sobre algo de Perlita. Actualmente (13) las -

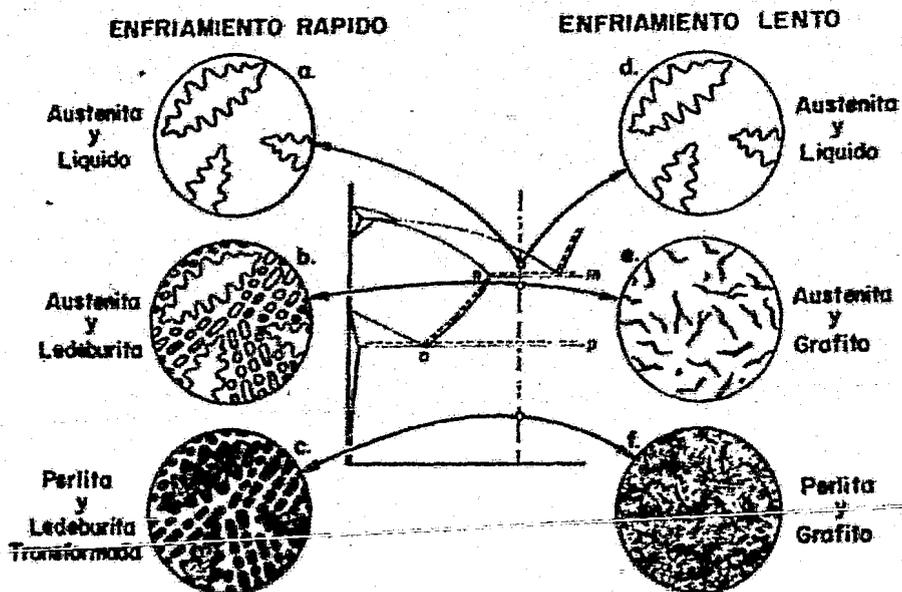


FIG. 2.1 MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA SOLIDIFICACION DE HIERRO COLADO. IZQUIERDA, HIERRO BLANCO. DE-RECHA, HIERRO GRIS.

-hojuelas de Grafito nuevas, no seran formadas pero las presentes se incrementaran en tamaño, en este caso la estructura final será unicamente hojuelas de Grafito embebidas en una matriz ferritica, y este es el llamado Hierro Gris.

Algunas veces ⁽⁵⁾ la velocidad de enfriamiento de porciones de alguna fundición puede ser intermedia entre Hierro Blanco y Hierro Gris, entonces la estructura contiene a la vez partes de Hierro Blanco y Hierro Gris, a este material obtenido se le llama Hierro Moteado o Atruchado ⁽¹⁴⁾.

Si hubiesemos considerado una aleación Hipereutéctica solidificada a diferentes velocidades de enfriamiento, se tendria que por enfriamiento a una velocidad moderada o a velocidad lenta de enfriamiento la reacción Eutéctica y Eutectoide son la misma, como los encontrados en la consideración de las aleaciones Hipoeutéticas, siempre y cuando el sólido inicial que se forma, tendria hojuelas de Grafito de acuerdo al diagrama de estabilidad Fe-C, con cantidades relativas de Austenita; de aqui que el Grafito puede nuclearse facilmente del hierro fundido. Un enfriamiento extremadamente rápido será requerido para obtener Ledeburita en una aleación Hipereutéctica.

2.2.- NUCLEACION HOMOGENEA Y HETEROGENEA

NUCLEACION HETEROGENEA CONTRA HOMOGENEA

La Nucleación es a menudo clasificada como Homogénea o Heterogénea ⁽⁶⁾ cuando un sólido se forma a partir de su propio líquido sin la ayuda de materiales extraños se dice entonces que se trata de una nucleación Homogénea. De otra manera cuando en los metales y en la mayoría de los otros líquidos la cristalización comienza sobre partículas de impurezas o sobre las paredes del molde la nucleación se dice que es Heterogénea.

La nucleación Homogénea ⁽²⁾ por otra parte, es la formación espontánea de núcleos a través de las fluctuaciones de composición del soluto.

Como se discutió antes la solidificación de los metales ocurre por nucleación y crecimiento. Lo mismo es cierto también de la fusión, pero hay una diferencia importante. La nucleación de la fase sólida durante la solidificación es un proceso mucho más difícil que la formación de núcleos en la fase líquida durante la fusión. Como resultado, los metales no se sobrecalientan en cualquier extensión apreciable cuando se licúan, en tanto que cada vez que un metal solidifica ocurre algún sobreenfriamiento. Además, si las condiciones durante la solidificación son tales que la nucleación es Homogénea, los metales líquidos pueden ser enfriados a temperaturas muy por debajo de sus puntos de solidificación de equilibrio antes de que comience la solidificación.

Sin embargo durante la nucleación Heterogénea, cuando se forman los cristales sobre partículas de impureza,

debe reducir la magnitud del sobreenfriamiento observado y podemos concluir que el sobreenfriamiento correspondiente a la nucleación Homogénea debe ser mucho más grande.

La dificultad asociada con la formación de núcleos homogéneos a partir de la fase líquida no es típica solamente de los metales puros, sino que se observa también en aleaciones.

La facilidad con la cual la nucleación Heterogénea⁽⁷⁾ tiene lugar, es relativamente grande comparada con la nucleación Homogénea que tiene barreras termodinámicas por vencer, y una temperatura de subenfriamiento mucho mayor.

La efectividad de un sustrato de nucleación depende de algunos factores incluyendo tamaño de partícula y su geometría; energía de superficie, estructura de la red y relaciones epitaxiales, estabilidad térmica y química y el grado de equilibrio bajo el cual la nucleación tiene lugar.

2.3.- FENOMENO DE LA NUCLEACION EN HIERRO GRIS

FENOMENO DE LA NUCLEACION EN HIERROS GRISES

Siempre que por enfriamiento o por concentración⁽⁸⁾ 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 de él, se produzca la nucleación dará lugar a un cristallito. Este tamaño crítico es función del grado de sobreenfriamiento y, por tanto, de la velocidad de solidificación.

Cuando no hay vestigios de materia sólida presente⁽⁹⁾ el líquido tiene alguna dificultad para comenzar a cristalizar; pero si hay alguna partícula sólida en el líquido-esta actúa como un núcleo sobre el cual los primeros cristales son depositados. El núcleo es más efectivo cuando-este es de la misma sustancia que los cristales.

Esta exposición contiene la esencia de la teoría de nucleación de Grafito por inoculación.

Por eso el líquido subenfriado baja considerablemente, la temperatura de equilibrio y cuando la solidificación comienza se acelera la velocidad de avance de las interfaces sólido-líquido de los alrededores de las hojuelas de Grafito, esto físicamente es igual a incrementar la velocidad de enfriamiento. La velocidad de nucleación de las hojuelas de Grafito individualmente es acelerada, comparada con su velocidad de crecimiento y como resultado el tamaño de las hojuelas de Grafito se ha disminuido.

Si ahora algún material inoculante o material promotor de núcleos es agregado en el líquido activan la solidificación de acuerdo al sistema estable, el líquido Eutéctico experimenta menor dificultad en comenzar a solidificar. El grado de subenfriamiento bajo la temperatura del líquido es menor, y consecuentemente, la velocidad de avance de la interfase sólido-líquido alrededor de cada colonia de Grafito no es tan rápido. Las hojuelas de Grafito tienen gran oportunidad de crecer y por consiguiente su tamaño promedio se ve incrementado.

Hay varias hipótesis o teorías, para describir el efecto de la inoculación, entre las cuales puede ser mencionado la teoría de nucleación del Grafito^(5,12) y la teoría de la acción inoculante de los gases.

Aún no se ha podido realizar observaciones directas⁽¹⁰⁾ sobre la naturaleza de los gérmenes que inician la cristalización del Grafito Eutéctico. Existen dos teorías; según una, los gérmenes serían partículas sólidas muy finas (compuestos definidos como óxidos, especialmente el de silicio, sulfuros, carburos, etc.) en el caso de un baño inoculado con Ferrosilicio Industrial o con calcio, este podrá ser el Carburo de Calcio⁽¹¹⁾ según la otra teoría, los gérmenes serían partículas finas de Grafito. Estas podrían resultar de la disolución de los cristales de Carburo de Silicio que según se ha podido demostrar se forman local y transitoriamente en la inoculación con Ferrosilicio^(12,13).

Basado en los estudios de la influencia de la inoculación con metales puros en la estructura de aleaciones

de Fe-C y Fe-C-Si, ha sido posible mostrar que una adición de elementos capaces de formar Carburos "Saltlike" (una estructura cristalina parecida a la de granos de sales) aumentan el número de núcleos para llevar a cabo la cristalización del Grafito en el Hierro Gris. De los elementos en los grupos II y III del sistema periódico, el calcio metálico mostró el efecto mas marcado de la inoculación. La hipótesis establece que en los Carburos "Saltlike" los cuales son formados a partir de las impurezas en los inoculantes, representa la nucleación efectiva para la cristalización del Grafito Eutéctico.

La precipitación del Grafito durante la cristalización Eutéctica en el hierro fundido, probablemente depende de la presencia de núcleos Heterogeneos.

Partiendo de ciertas consideraciones termodinámicas E. Sheil⁽¹¹⁾ dedujo que la nucleación homogénea del Grafito Eutéctico se vio que era difícil de lograr, pues esta consideraba grandes temperaturas de subenfriamiento durante la cristalización Eutéctica. Basados en resultados experimentales y consideraciones teóricas, se mostró como era el efecto de la inoculación en la nucleación del Grafito Eutéctico en Hierro Gris fundido y podía ser explicado como por medio de núcleos Heterogeneos apropiados que contenían agregados de Carbono, la formación del Grafito podría llevarse a cabo a partir de los átomos de Carbono disueltos en el metal fundido.

Los Carburos formados son el resultado de la inoculación y se supone que son los núcleos efectivos. De hecho los diferentes efectos de algunos elementos pueden

-explicarse por diferencias en las estructuras de sus -
respectivos Carburos. Por lo que estos son probablemente
insolubles en el hierro fundido y posiblemente formen par
tículas sólidas en el mismo.

2.4.- FENOMENO DE CRECIMIENTO EN HIERROS GRISES

FENOMENO DE CRECIMIENTO EN LA FUNDICION DE HIERRO

El proceso de crecimiento es controlado por una serie de variables interdependientes las cuales se alteran con el estado de no-equilibrio ⁽⁶⁾.

Muchos factores afectan el proceso de crecimiento - en ambas fundiciones eutécticas Estables y Metaestables.

Los cambios en la Morfología del Eutéctico está controlada por un numero de variables incluyendo la estructura de las superficies de las fases, forma y distribución del núcleo, subenfriamiento del líquido, velocidad de extracción de calor, temperatura y gradientes de concentración en la interfase sólido-líquido, difusión de impurezas en las fases que estan creciendo, energías interfaciales y el relativo subenfriamiento de las fases - en el frente de crecimiento.

El crecimiento ^(15,16) de las células Eutécticas en Hierros Grises tiene lugar en dos frentes, el límite de la Austenita y el líquido y aquél entre el Grafito y la Austenita. En el Hierro Gris hay un frente de crecimiento adicional al límite entre el Grafito y el líquido. La velocidad de crecimiento ⁽¹⁷⁾ del Grafito Eutéctico es una función de la temperatura y la velocidad de enfriamiento a través de la temperatura Eutéctica.

El crecimiento actual depende ^(17,18) de la velocidad de difusión del Carbono y Hierro dentro de la célula dentro del metal líquido.

El Grafito ⁽¹⁹⁾ tiene una estructura cristalográfica Hexagonal con vértices de átomos de Carbono rodeando de otros enlazándose covalentemente.

La Microscopia Electrónica (20,21) ha revelado de - defectos en las hojuelas de Grafito y demuestra que las fa - llas de rotación permite a la hojuela ramificarse dentro del plano de deslizamiento.

La forma de hojuela de las partículas de Grafito es indudablemente un resultado (9) del hábito cristalino, del Grafito.

Las variaciones (10) en la forma del Grafito que - ocurren en la célula Eutéctica estan determinados por la velocidad a la cual ocurre el crecimiento. En general - el Grafito tipo "A" solidifica a un subenfriamiento muy limitado. El grado de subenfriamiento se incrementa para el tipo "B" un aumento en el subenfriamiento produce el tipo "D". La velocidad de crecimiento de estos diferen - tes tipos de Grafito estan determinados directamente por la cantidad de subenfriamiento asumiendo un crecimiento - no adicional. Con el subenfriamiento limitado, el Grafi - to tipo "A" crece lento relativamente. De otro modo, la velocidad de crecimiento es mucho mas rápido para el Gra - fito tipo "D" de aqui que el Hierro líquido es subenfria - do suficientemente debido a la extracción de calor de fu - sión absorbido por el líquido remanente. El Grafito ti - po "B" crece rápidamente como el Grafito tipo "D", en la porción central de la célula pero el subenfriamiento es menor y el calor de fusión eleva la temperatura del lí - quido remanente a la temperatura Eutéctica en equilibrio. Entonces el crecimiento procede mas lentamente dando un - aumento del Grafito tipo "A" en las porciones exteriores de las células del tipo "B".

El crecimiento puede estar influido por factores -
términos tales como velocidad de enfriamiento, y todas -
las variables incluidas en el historial térmico del cal-
do, las cuales incluyen variables tales como temperatura
de sobrecalentamiento, temperatura de estabilización e-
incremento y decremento de la temperatura de colada.

2.5.- TEORIAS DE NUCLEACION EN HIERROS GRISES

2.5.- TEORIAS DE NUCLEACION EN HIERROS GRISES.

Generalmente se cree que los Inoculantes⁽²³⁾ promueven la formación de Hierro Gris por el incremento en el número de núcleos para la solidificación Eutéctica, pero el mecanismo por el cual estos incrementan la nucleación del líquido aún no se conoce a ciencia cierta.

Los investigadores enuncian mas adelante las diferentes teorías para explicar los mecanismos de inoculación.

La mayoría de las explicaciones, estan por esto, basadas en los mecanismos de nucleación, pero aún en el presente no hay suficiente evidencia que haya sido obtenida para establecer cualquier teoría.

Existen por lo menos seis teorías acerca de lo que realmente se quiere definir como el fenomeno de nucleación, la teoría generalmente aceptada es aquella que dice que la nucleación son pequeñas partículas de grafito en el Hierro fundido que no llegaron a disolverse durante la fusión las que sirven como centros de nucleación en donde se inicia la depositación del grafito que se encuentra en solución. Esta depositación del grafito dará origen a la formación del grafito laminar conocido metalográficamente como grafito tipo "A".

2.5.1.- TEORIA DEL NUCLEO DE GRAFITO.

De acuerdo a esta teoría, las partículas de grafito actúan como núcleos para iniciar el fenómeno de grafitización. Tales núcleos pueden imaginarse como partículas sólidas-

de Grafito extremadamente pequeñas en el hierro líquido. En el soporte de esta idea, se reclama que adiciones directas de Grafito servirá para inocular al hierro. Los efectos inoculantes de los materiales que contienen Silicio son explicados como debido a una lluvia de núcleos finos de Grafito, resultando en el caldo, concentraciones locales de Silicio. La pérdida del efecto inoculante debido al subenfriamiento se explica, que es debido a la destrucción de los núcleos de Grafito a altas temperaturas.

2.5.2.- TEORIA DE LA DESGASIFICACION

La teoría de desgasificación intenta explicar el mecanismo de inoculación en base a las reacciones que ocurren entre el inoculante y los gases disueltos o químicamente combinados, tales como el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, etc.

De aquí que el Silicio y la mayoría de los inoculantes efectivos son agentes desoxidantes, esto argumenta que la reducción del contenido de oxígeno producido por la adición de estos afecta en el cambio de la microestructura. El decaimiento en el efecto inoculante se atribuye a la reabsorción de los gases los cuales fueron eliminados en el tratamiento de inoculación.

2.5.3.- TEORIA DE LOS SILICATOS

De acuerdo a esta teoría, las adiciones de Silicio en el metal líquido produce una pulpa microscópica de inclusiones de Silicato Ferroso el cual actúa como núcleo

para la formación de las hojuelas de Grafito. Esta teoría se sustenta en el hecho de que una escoria en la cual se remueve el Silicio y Oxido Ferroso ayuda a promover la formación del Grafito fino.

2.5.4.- TEORIA DEL SUBENFRIAMIENTO

Esta es una extensión de la teoría de nucleación la cual argumenta que el Grafito tipo "D" y "E" es un resultado del subenfriamiento durante la solidificación y que la nucleación resultante de la adición tardía, previene este subenfriamiento y produce el Grafito deseable tipo-"A" ordenado al azar.

2.5.5.- TEORIA DE LA ESTABILIDAD DEL CARBURO.

De acuerdo a esta teoría los cambios en la estabilidad del Carburo afecta a la disponibilidad del Carbón para formar las hojuelas de Grafito y por lo tanto influye en la forma y tamaño de las hojuelas de Grafito. Esta teoría se basa en el hecho de que la inoculación es acompañada en la reducción de la tendencia a la formación de la zona templada.

2.5.6.- TEORIA DE LA TENSION SUPERFICIAL O ENERGIA DE SUPERFICIE

Esta teoría indica que los agentes inoculantes influyen en el tamaño y forma de las partículas de Grafito por proveer o remover una sustancia absorbida por la in-

-terfase Metal-Grafito, con lo cual, favorece la formación de ciertas formas de Grafito debido a los cambios de energía de superficie.

2.6.- INOCULACION

INOCULACION.

En la demanda de los últimos años ⁽²⁴⁾ para obtener mejor calidad en las fundiciones ha habido necesidad de desarrollar y mejorar los métodos de producción y control de calidad. La producción de Hierro Gris, de piezas que tienen secciones delgadas libres de zona blanca, ha sido el reto por siempre del fundidor. Se sabe que la tendencia al blanqueo de los Hierros colados puede ser reducida por la adición, inmediatamente después de vaciar a la olla de colada, de compuestos ricos en Silicio, tales como el Ferrosilicio, Calcio-Silicio o materiales más complejos que contienen Silicio.

No se conoce el momento exacto en que se usó por primera vez la palabra inoculación para describir la adición de materiales en la cuchara para controlar la estructura de la fundición de hierro. De cualquier modo fue en la década de 1930. Merica ⁽²⁵⁾ establece que la teoría del residuo de Grafito era también probablemente, la base del razonamiento que condujo al desarrollo de la llamada "Inoculación" o métodos de la Grafitización en la cuchara.

Durante la década de 1930 avanzó rápidamente en el desarrollo de nuevos y mejores inoculantes, debido a la creciente producción de fundición de alta resistencia.

Burgess ⁽²⁶⁾ indica asimismo, que una cantidad dada de un Aditivo Complejo no solo es más efectivo que la cantidad comparable de Ferrosilicio 75% sino que el efecto inoculante dura más tiempo.

2.6.1.- TEORIA DE LA INOCULACION

Inoculación se llama al hecho de agregar al hierro-fundido pequeñas cantidades de elementos o compuestos químicos cuyos principales componentes regularmente son el Silicio y/o Grafito. Esto se hace con el objeto de :

- a) Modificar o canalizar durante la solidificación, aumentando el grado de nucleación, la formación de microestructuras de la matriz y el tipo de Grafito deseado.
- b) Eliminar o reducir el Oxígeno que se encuentra disuelto en el baño, ya que probablemente destruye los centros de nucleación original, y esto a su vez, causa un subenfriamiento para una velocidad de enfriamiento dada, lo que incrementa notablemente la tendencia al temple. De esta forma podemos obtener las propiedades tanto físicas como mecánicas ideales de un Hierro Gris.
- c) En una palabra, la inoculación es una forma de reducir o controlar la sensibilidad al temple, o sea la formación de Carburos, en las diferentes secciones, que una misma pieza pueda presentar a través de su diseño.
- d) Aunque la inoculación no compensa una composición química inadecuada en el metal base se favorece la estructura cuando existen pequeñas variaciones en el análisis.

2.6.2.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA INOCULACION⁽²⁷⁾

I Composición química del metal.

- a) Carbón equivalente.
- b) Contenido de azufre.

II Materiales de carga.

- a) Arrabio.
- b) Chatarra y retornos.

III Unidades de fusión y temperatura.

- a) Cubilote.
- b) Horno de inducción.
- c) Sobrecalentamiento.

IV Tipo de inoculante e influencia de sus componentes.

- a) Grafitizantes.
- b) Estabilizadores, perlíticos.
- c) Silicio, Calcio, Cromo, Estroncio, Zirconio, Manganeso, etc.

V Solidificación.

- a) Velocidad de enfriamiento.
- b) Subenfriamiento.

VI Sección de la pieza.

- a) Sensibilidad por sección.

VII Dosis.

- a) Faltante.
- b) Sobre-inoculación.

VIII Pérdida de potencia inoculativa.

- a) Decaimiento natural.

Los resultados de la inoculación dependen especialmente de:

- 1.- Tipo de inoculante.
- 2.- Cantidad agregada.
- 3.- Hierro base (los hierros de menor carbón - equivalente son los mas afectados por la - inoculación).
- 4.- Tiempo después de la adición-el efecto del inoculante decae con el tiempo, el efecto - se pierde totalmente despues de 10-20 minutos.

Todas las fundiciones grises⁽²⁸⁾ pueden ser inoculadas, sin embargo en la practica la inoculación resulta solamente de interés y utilizable con bastante exito en el caso de - aleaciones Hipoeutécticas; no obstante, en las aleaciones - Hipereutécticas fosforosas, la adición de 0.8 a 0.12% de un inoculante con 5% de bario, conteniendo 65% de Silicio puede sustituir con ventajas técnicas y económicas al Fe-si 75% , pues con una adición menor de 75% Fe-Si se logra el mismo - efecto con la notable ventaja de poder añadir menor cantidad de "Cuerpo frio" a la fundición líquida, menos gastos de -

transporte al aprovisionamiento y almacenaje con la interesante desaparición de masas de Fósforo Eutéctico. Este último queda homogéneamente disperso; representando una gran ventaja para la vida útil de los utensilios de corte.

2.6.3.- SUPRESION DE CARBUROS

Es decir la disminución de la aptitud al temple. Esta característica se aprecia generalmente por la colada de una probeta de temple. Es el medio mas rápido y el mas utilizado para apreciar el rendimiento de la inoculación.

No obstante no proporciona todos los factores.

La inoculación en la fundición Gris se reserva exclusivamente para la cristalización Eutéctica Gris. Sin embargo, el aumento del Potencial de Germinación Grafítica, incluirá rechazo, la tendencia de la fundición a templar, es decir, a solidificarse en el sistema de Carburos Metaestables.

Esta tendencia al temple, en condiciones dadas de enfriamiento, depende además de la composición global de la fundición (proporción de los elementos C, Si, Cr, Mn, etc.), se hablará entonces del efecto de la aleación para designar la influencia de estos elementos sobre la tendencia al temple⁽²⁹⁾ .

2.6.4.- MEJORA DEL MECANIZADO, Y CARACTERÍSTICAS MECANICAS.

Esta característica, existe sin embargo, y se puede conocer mediante un ensayo de mecanizado. No obstante, esta aptitud es apreciada por el mecánico, generalmente por la comparación del tiempo empleado para un mismo trabajo. El mecanizado esta inmediatamente ligado a la estructura (Grafito y Carburos) y principalmente a la homogeneidad de esta estructura.

En la fundición Gris, la inoculación parece ser el unico medio para obtener características mecánicas (tracción y dureza) elevadas sin comprometer al mecanizado. Esta facultad de mejora permite a menudo disminuir los espesores de las piezas moldeadas o utilizar materias primas menos nobles, y por lo tanto menos caras.

En la influencia sobre las características mecánicas se observa que la eficiencia máxima se obtiene inmediatamente después de la inoculación y que existe siempre una disminución o pérdida de la eficiencia (el tambien llamado Fading). Sin embargo se obtiene una mejora práctica de características relativamente importantes sin un aumento significativo de la dureza.

2.6.5.- ACCION SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO⁽³⁰⁾

Un inoculante complejo da un grano notablemente mas fino, lo que corresponde a un aumento en el número de células Eutécticas. Por otra parte, la estructura se ha transformado en un 98%, lo que implica un mejoramiento -

-importante sobre las características mecánicas, donde -
se observaron notables incrementos en los ensayos de fle
xión como se ha mencionado antes, el cambio observado -
por la inoculación actúa sobre las hojuelas de Grafito -
las cuales pueden resultar largas y gruesas, finas y del
gadas o hasta puede quedar completamente ausente de es -
tas, dependiendo de las condiciones de colada e inocula
ción.

2.7.- METODOS DE INOCULACION

METODOS DE INOCULACION

Las aplicaciones de inoculante mas comunmente usadas son las siguientes ^(31,32); estos tambien muestran brevemente el modo de evolucion de estas técnicas ocurridas durante las últimas décadas.

- a) Inoculación en la olla: es el método mas común de la inoculación del Hierro Gris; esta dada por la introducción del inoculante a la olla mientras esta se llena.
- b) Doble o triple inoculación: por la adición de pequeñas cantidades de inoculante a cada revaciado.
- c) Agitación de el inoculante agregado en la superficie del metal.
- d) Inoculación instantanea en la olla ⁽³³⁾: en la cual ~~una varilla sólida de inoculante descansa sobre el labio de la olla de colada y es disuelto y arrastrado por el chorro líquido.~~ Moore ⁽³⁴⁾ clasificó las adiciones tardias del inoculante en dos grupos: inoculación en el chorro e inoculación en el molde.
- e) Inoculación en el chorro ⁽³⁵⁾. como su nombre lo indica este método de inoculación tardía involucra la adición de un inoculante al chorro del metal durante la colada; han sido observadas marcadas diferencias en el comportamiento de la inoculación entre adiciones hechas en la olla y adiciones hechas al chorro del metal.

-Esto es aparente, por lo tanto la inoculación en el chorro puede alcanzar niveles de inoculación los cuales son difíciles de lograr por un método convencional de adición.

f) Inoculación en el molde ^(31,36) : la técnica de inoculación en el molde está diseñada para ser un método suplementario a la práctica común de inoculación en la olla, y no un sustituto de este.

Ferro-Silicio o trozos de inoculante, finos o Briquetas están dispuestos en el sistema de alimentación del molde o en la base del canal principal. Ha sido demostrado que muchas potentes inoculaciones pueden ser logradas en algunos casos pero sus efectos no son fácilmente reproducibles.

Dado que este trabajo está basado en la prueba de inoculantes, solo se hará referencia la inoculación en la olla, en los apartados siguientes.

2.8.- CLASIFICACION DE INOCULANTES

Cualquier material granular⁽²⁷⁾ hasta un puñado de polvo, agregado en la olla de hierro fundido, se sabe que afecta a la penetración del blanqueo; pequeñas cantidades de Ferro-Cromo pulverizado, es un poderoso estabilizador de Carburos, y crece la penetración del blanqueo perceptiblemente. Algunos materiales son mas efectivos que otros y muchas combinaciones de elementos han sido desarrollados los cuales dan un balance de los efectos bajo un buen control.

Los inoculantes o las aleaciones inoculantes son agregados al hierro fundido en la olla con el propósito de inocular al metal.

2.8.1.- TIPOS DE INOCULANTES Y COMPONENTES DE ESTOS⁽²³⁾

Existen dos tipos de inoculantes para los hierros que son los llamados Grafitizantes y los estabilizadores. Pudiendose usar ambos en el Hierro Gris.

Como su nombre lo indica los inoculantes Grafitizantes promueven la precipitación de carbón libre durante la solidificación, lo cual minimiza la formación de Carburos duros o aristas templadas en la pieza; es decir, los inoculantes de este tipo tienen la única función de producir efectos inoculantes (tales como un cambio en la distribución de Grafito y reducción de la zona chill), a un grado considerablemente mayor que puede ser explicado en base a un cambio en la composición. Estos inoculantes usualmente contienen uno o mas de los siguientes elementos: Carbono, Silicio, Calcio, Titanio, Circonio y Aluminio.

Los inoculantes estabilizadores por su parte, no solo promueven la Grafitización durante la solidificación, sino que favorece la formación de Perlita, durante el enfriamiento. Su propósito principal es la de producir piezas de alta resistencia, con una mínima cantidad de temple. Se agregan para producir también un efecto suplementario explicable únicamente por la variación en la composición. Con la adición de uno o más de los elementos listados anteriormente, estos inoculantes no son esenciales para ejercer efectos secundarios considerados deseables en algunas aplicaciones. Los elementos adicionales más comunes contenidos en tales inoculantes son el Cromo para la estabilización de carburos (Perlita) como anteriormente se mencionó, el níquel para promover la descomposición del Carburo.

2.8.2.- EFECTO DE VARIOS MATERIALES INOCULANTES

El Grafito y los materiales que lo contienen son bien conocidos como potentes removedores de la tendencia al blanqueo para los Hierros Grises. La efectividad de inoculación del Grafito en los Hierros Grafitamineros se desarrolla con el incremento de la pureza del Grafito.

La disponibilidad de Grafito puro grado reactivo en los últimos años presenta un gran avance en el uso de estos inoculantes.

Un gran número de aleaciones de Silicio ⁽⁹⁴⁾ de composición ampliamente diferente han sido recomendados como inoculantes en los inoculantes que contienen Silicio, su potencia depende del contenido de elementos menores.

El Ferrosilicio tiene muy poco poder inoculante y el inoculante Grado Ferrosilicio usado normalmente en fundiciones depende de su contenido de Aluminio y Calcio para estimular su efecto inoculante.

Algunas marcas comerciales de Ferrosilicio contienen combinaciones de magnesio y circonio.

Del estudio en el comportamiento con el uso del Ferrosilicio y otros agentes inoculantes se observa lo siguiente, aunque mas adelante se hablará explícitamente de estos.

- 1.- El Silicio por si mismo no es efectivo como un agente inoculante.
- 2.- El Si-Mn, relativamente libre de Calcio y Aluminio, no es efectivo como un agente inoculante.
- 3.- El Fe-Si comercial que contiene Aluminio y Calcio es un inoculante muy poderoso. La presencia de los dos elementos simultaneamente es mas efectiva que uno solo.

El Calcio igualmente que el Aluminio no evacúa al Hidrógeno a la superficie del caldo, sino que resulta en poros. De todos los inoculantes el Fe-Si que contiene 75-80% es el mas ampliamente usado y tiene potencia inoculante la cual es proporcional a su contenido de Aluminio⁽³⁷⁾ la presencia de trazas de Aluminio en el Hierro-colado causa serias acumulaciones de burbujas bajo la superficie y a este defecto se le conoce como porosidad⁽³⁸⁾ y por ende, el Fe-Si, el cual producirá su inoculación, sin causar porosidad como es deseable.

- 4.- La efectividad de la Inoculación por el Fe-Si normal decrece con el incremento en carbón equivalente del metal fundido.
- 5.- Si-Mn-Zr que contiene algo mas de calcio que el encontrado en el mercado es mas efectivo que el Fe-Si.
- 6.- Las aleaciones de Calcio-Silicio con 30 % de Ca aproximadamente es un Inoculante efectivo para el propósito de impartir propiedades mecánicas. Esto es bueno para piezas de secciones gruesas, pero surgen dudas analizando su desempeño relativo en secciones delgadas.
- 7.- El Calcio metálico es un buen agente inoculante pero es ligeramente menos efectivo que el Calcio-Silicio. Tanto en los inoculantes grafitizantes como en los perlitizantes, el silicio es el elemento inoculante por excelencia. Ahora según lo requerido serán los elementos que lo deberán acompañar en la realización de una buena Inoculación.

ALUMINIO (95,96)..- Es un buen grafitizante y gran reductor de la tendencia al templado con la desventaja de ser el causante generalmente de las sopladuras en las piezas, al absorber Hidrogeno.

CAICIO.- Es un enérgico desoxidante y desgacificante, sin embargo, un exceso de este elemento pudiera incrementar la cantidad de escoria y por lo tanto la posibilidad de que esta quede atrapada en el metal en forma de inclusiones.

CRONO Es un energético perlitizante, su adición debe ser cuidadosamente controlada puesto que simultáneamente proporciona Carburos.

MANGANESO-Es un buen estabilizador de Austenita y es parcialmente perlitizante y combinandose con el Azufre neutraliza su acción, formando MnS. y Si el contenido de este elemento es muy elevado o hay baja temperatura de vaciado, el Sulfuro de Manganeso puede quedar ocluido en el metal sólido.

CIRCONIO-Desoxida al metal y aumenta su resistencia a la tensión, controlando el crecimiento del Grafito, además de reducir la tendencia al blanqueo y abate la formación de Ferrita en la estructura.

ESTAÑO Aunque generalmente no se usa como inoculante, es un gran estabilizador de Perlita, con la desventaja de su alto costo de adquisición.

En estudios efectuados anteriormente ⁽³⁹⁾ se probó que la inoculación con metales del grupo II y con Aluminio, había una disminución en el subenfriamiento durante la solidificación del Eutéctico y aumentaba el número de núcleos efectivos, ayudando esto para el crecimiento del Grafito - Eutéctico, al contrario de lo anterior, la inoculación con elementos del grupo IV del sistema periódico causa un marcado subenfriamiento del metal fundido y no aumenta el número de células Eutécticas.

De estos resultados experimentales se concluye que la inoculación con elementos del grupo II y con Aluminio, obviamente aumenta el número de núcleos, para la formación del Grafito durante la solidificación Eutéctica.

Como se mencionó anteriormente los inoculantes Grafitizantes hacen un hierro mas uniforme, mejora y facilita la maquinabilidad, la resistencia a la tracción y a la flexión, muy especialmente a los hierros de bajo Carbono y siempre que sea usado bajo un cuidadoso control.

Los inoculantes estabilizantes, no solamente promueven la Grafitización durante la solidificación, sino tambien son promotores de la Perlita durante el enfriamiento al estado sólido; estos inoculantes se emplean en pequeñas cantidades acompañados con inoculantes Grafitizantes. Con el objeto de producir altas resistencias, con un mínimo en la tendencia al blanqueo.

Los inoculantes Grafitizantes se dividen en dos grupos o categorías:

- 1.- Estandar
- 2.- Patentados.

La siguiente tabla muestra las composiciones de los inoculantes Grafitizantes estandar mas típicos:

TABLA 21.-INOCULANTES GRAFITIZANTES

INOCULANTE	% Si	% Ca	% Al
50% Fe-Si	47.5	0.20	1.30
75% Fe-Si	76.5	0.75	1.30
85% Fe-Si	85.0	0.75	1.30
Ca-Si	62.5	32.0	1.10

El Fe-Si 50% no se usa ampliamente para controlar la estructura del Grafito; pero con cantidades apropiadas de Calcio y Aluminio puede funcionar efectivamente para tal proposito, para esto el Calcio debe estar entre 0.80 y 1.25% y el Aluminio entre 1.0 y 1.50%

Los inoculantes de Fe-Si con 75% y 85% usualmente disponen de cantidades de Calcio entre 0.50 y 1.50% mini mo.

Un cierto número de inoculantes patentados Grafitizantes se disponen para tratar al Hierro Gris, algunos de ellos se enlistan en la siguiente tabla.

TABLA 2.2.-INOCULANTES PATENTADOS

INOCULANTE	% Si	% Ca	% Al	% OTROS
Ca-Si	57.5	14.0	1.0	—
Ca-Si-Ti	52.5	6.0	1.1	Ti 10.0
Si-Mn-Zr	62.5	3.5	1.0	Mn 6.0, Zr 6.0
Si-Mn-Zr-Ba	62.5	2.1	1.5	Mn 6.0, Zr 6.0, Ba 2.5
Si-Mn-Ca-Ba	62.5	2.1	1.3	Mn 10.0, Ba 5.0
Si-Sr	77.5	—	0.5 Max	Sr 1.0
Ce-Si	38.0	0.5	0.5	Ce 10.0, T.R. 3.0
Si exotermico	61.0	0.5	1.1	NaNO ₃ 10.0, Mg 2.5

El primero de estos inoculantes con alto contenido de Calcio es bastante efectivo para reducir el templeado.

El inoculante Ca-Si-Ti es un excelente reductor del templeado y promotor de laminillas de Grafito tipo "A", este inoculante parece ser que trabaja con mayor efectividad en fundiciones de secciones delgadas.

El inoculante Si-Mn-Zr, es bastante útil en la reducción del blanqueo y en la desoxidación del hierro.

En la aleación Si-Mn-Zr-Ba con Ca, el bario actúa de una manera parecida al Calcio, es decir como un agente nucleante bastante fuerte. Sin embargo, el bario para que funcione efectivamente durante la inoculación debe trabajarse en un amplio rango de temperaturas.

El Si-Mn-Ca-Ba, actúa en forma parecida que la aleación Si-Mn-Zr-Ba, pero el mayor contenido de Manganeso en el material Si-Mn-Ca-Ba mejora la solubilidad en el-

hierro fundido, y el alto contenido de Bario mejora el poder de permanencia del inoculante.

El Estroncio en la aleación Si-Sr, es un buen agente reductor de la tendencia al blanqueo se ha observado también que la resistencia al efecto inoculante es bajo, por lo que es necesario agregarlo lo mas pronto posible cuando se inocula al metal. Este inoculante reduce el tamaño de las celdas Eutécticas a un grado menor que otros inoculantes.

La aleacion Ce-Si es relativamente nueva como inoculante para el Hierro Gris. Contiene poco Calcio y Aluminio; el Cerio actua en forma parecida al Estroncio en cuanto a sus características de agente nucleante.

El Silicio exotérmico mostrado en la tabla 2.2 contiene una pequeña cantidad de Magnesio que mejora la acción de la nucleación de los inoculantes. Este producto se disuelve rápidamente en el hierro, aunque la temperatura sea menor que 1250°C en el tiempo de la adición.

Para los Hierros Grises los inoculantes Grafitizantes patentados tienen diversas ventajas sobre los inoculantes estandar de Fe-Si y estas son las siguientes:

- 1.- Menos aditivos se necesitan en el caso de inoculantes patentados, para obtener los resultados deseados. Generalmente de 1-2 Kg/Ton, de productos patentados, no así para los Fe-Si 75% u 85% que requieren de 3-5 Kg/Ton.
- 2.- El costo de la inoculación es considerablemente menor en los inoculantes patentados que en los inoculantes de Fe-Si.

3.- Menos cambios en la composición química tiene lugar en el uso de inoculantes patentados, por la pequeña cantidad requerida para su aplicación.

Algunos de los inoculantes estabilizadores se muestran en la tabla 2.3

TABLA 2.3 INOCULANTES ESTABILIZADORES

INOCULANTE	% Si	% Ca	% Al	% OTROS
Cr-Si-Mn	18.0	0.50	0.20	Mn 10.0, Cr, 40.0, Ti 0.75
Cr-Si	15.0	—	—	Cr 60.0, Co.50
Siliciuro de Cr.	40.0	—	0.10	Co.05 Max, Cr 43.3
Cr-Si-Mn	10.0	—	—	Mn 6.5, Cr 54.0, Co5.5.

El principal elemento estabilizador es el cromo. Se nota en el primer inoculante de la tabla 3 la presencia de una pequeña cantidad de Manganeso, este elemento junto con el Silicio, hacen que esta aleación sea rápidamente soluble en el metal fundido. El Titanio, Calcio y Aluminio ayudan a prevenir la formación de Carburos "AS-CAST" en la fundición.

El inoculante estabilizador Cr-Si, debe usarse con precaución, como por ejemplo cuando se trata a hierros de secciones delgadas. La aleación Cr-Si se usa de 1.5-2 Kg/Ton. como inoculante estabilizador.

El Siliciuro de Cromo tiene menos tendencia a la formación de Carburos que el inoculante Cr-Si, se disuelve rápidamente. Si el contenido de Silicio total es importante, es necesario tener precaución con el uso de este.

Excepto en caso de fundiciones con secciones gruesas de 2" o mas.

El inoculante Cr-Si-Mn, contiene menor porcentaje - de Manganeso por lo que tiene características de solubilidad similares al primer inoculante estabilizador.

2.9.-DECAIMIENTO DEL PODER NUCLEANTE

-DE LAS PARTICULAS INOCULANTES-

**DECAIMIENTO DEL PODER NUCLEANTE
-DE LAS PARTICULAS INOCULANTES-**

El efecto de la inoculación⁽⁴⁰⁾ se encuentra en un máximo inmediatamente después de la adición de los inoculantes y entonces decae. La velocidad de decaimiento depende de la composición del inoculante y del hierro al cual se adiciona.

A pesar de la relativa demanda de la resistencia a decaer de algunos inoculantes, hay muy poca información sobre el tema. La idea presente es que el decaimiento es más rápido inmediatamente después de hecha la adición y este decae gradualmente hasta que el efecto desaparece por completo después de 20 minutos o más⁽⁴⁶⁾. Y también se creía que el metal se encuentra sobre-inoculado justamente después de la adición⁽²³⁾.

El decaimiento de un inoculante implica una disminución en el número de núcleos disponibles y un incremento en el subenfriamiento. Ver fig. 2.2

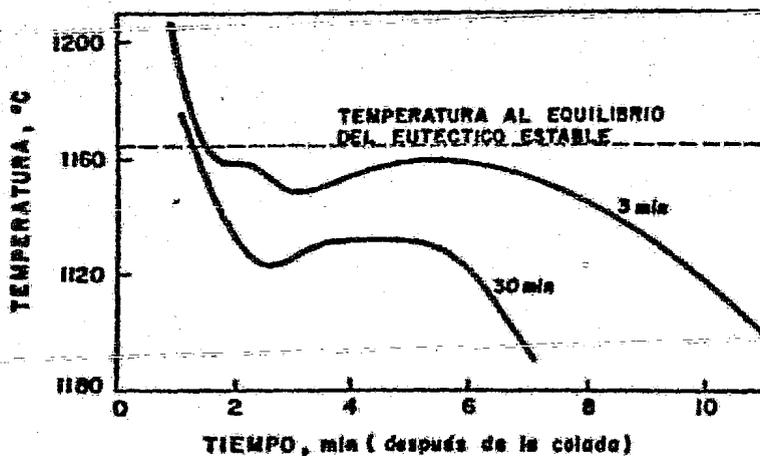


FIG. 2.2 Curvas de enfriamiento de 3 y 30 min. después de la inoculación de un Hierro con 0.5% grado Ferrosilicio.

Los inoculantes basados en Silicio pero que contienen Estroncio, Cerio o ambos reducen la zona chill con un pequeño incremento en el número de células Eutécticas en comparación con otros inoculantes y tienen mucho mejor resistencia al decaimiento.

Los principales efectos del decaimiento son:

- 1.- Causa gran subenfriamiento que tiene lugar durante la solidificación Eutéctica y da una gran tendencia al blanqueo, particularmente en secciones delgadas.
- 2.- Reduce el número de células Eutécticas que crecen en hojuelas de Grafito, resultando en una menor uniformidad del tamaño de Grafito en fundiciones de hierro gris; una tendencia para afinar mas frecuentemente las hojuelas que se forman y una pequeña reducción en las propiedades mecánicas comparadas con las obtenidas en los Hierros Grises bien inoculados.

Algunos factores que afectan a los inoculantes son los siguientes:

- a) La temperatura del metal al tiempo de inocular; entre mas alta sea esta, mayor sera la velocidad de reversión.
- b) El grado de oxidación del metal es determinante.

- c) El periodo transcurrido entre la inoculación y el colado, conforme se incrementa, mayor será el decaimiento. El hierro inoculado deberá ser vaciado tan pronto sea posible cuando se trate de inoculación en la olla.
- d) La composición del inoculante ^(41,42,43,44,46); el control químico es definitivo. Además de proporcionar un inoculante adecuado, prolongan la vida útil del metal líquido inoculado por lo menos un 20% más que utilizando Fe-Si 75% únicamente.
- e) El método de adición de un inoculante tiene un marcado efecto sobre la eficiencia del mismo.

Con todos los inoculantes las células Eutécticas crecen inmediatamente después de la adición y después el efecto del decaimiento se deja sentir.

La máxima reducción de la tendencia al blanqueo se obtiene también inmediatamente después que el inoculante fué agregado y el efecto decae con el incremento en el tiempo de reposo.

No obstante la falta de detalle en el conocimiento del mecanismo de inoculación y decaimiento en los Hierros Grises, hay algunos factores mejor establecidos que concuerdan al decaimiento, los cuales son de gran significado práctico:

- 1.- Todos los inoculantes decaen.
- 2.- No hay un periodo después de la inoculación durante el cual el decaimiento no ocurra.

- 3.- Los efectos de algunos inoculantes pueden variar de acuerdo a la composición del hierro particularmente si es de bajo contenido de Azufre.
- 4.- Un inoculante, el cual da un alto número de células Eutécticas no es necesariamente el mas efectivo en la reducción de la zona blanca.
- 5.- Los efectos de algunos inoculantes decaen mas despacio que otros.

2.10.- INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTICULA
Y LA CANTIDAD DE INOCULANTE

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTICULA Y LA CANTIDAD DE INOCULANTE.

Para obtener una máxima eficiencia⁽⁶⁾ del inoculante una optima cantidad debe ser usada; cantidades pequeñas o grandes son poco efectivas. La medida de la partícula inoculante debe ser considerada para una rápida y uniforme velocidad de solución, de acuerdo a los medios de introducción y el volumen de hierro que va a ser tratado, particularmente en el caso de inoculación en el molde⁽⁴⁶⁾. Tamaños de inoculantes pobremente distribuidos son desventajosos: La Granulometria⁽¹⁰⁾ de los inoculantes tiene una cierta influencia sobre la marcha del procedimiento; los trozos demasiado grandes son difíciles de disolver completamente, y los finos y el polvo tienden a flotar sobre el baño y oxidarse; normalmente los granos se presentan de 4 a 10mm.

El tamaño del inoculante⁽⁴⁷⁾ en consecuencia debe estar de acuerdo a la temperatura de tratamiento y la velocidad de disolución.

La cantidad de inoculante usado⁽²³⁾ debe ser suficiente para garantizar una inoculación completa. La mayoría de los inoculantes, con ciertas excepciones permiten el uso de algún exceso sin efectos nocivos, puesto que si es menor que la cantidad necesaria, el efecto no puede ser necesariamente en proporción a la cantidad usada.

La cantidad⁽²⁷⁾ definitivamente dependerá del metal base, pero como una guía podemos decir que a mayor carbón equivalente menor será la cantidad de inoculante requerida, y viceversa.

Las cantidades de material inoculante que se debe usar en un tratamiento está ligado íntimamente a los siguientes puntos:

- 1.- Al tipo y composición del material que se va a inocular.
- 2.- El equivalente o porcentaje del Carbono total que se va a tratar.
- 3.- La sección de la pieza que se va a vaciar.

El efecto de la inoculación produce pocos cambios en la composición química, excepto en el caso cuando se usa Grafito, ya que este produce un potente efecto en el aumento de Carbono (del orden de 0.5%).

El material inoculante quebrado entre 0.317 y 1.27-cm. libre de finos y polvos, es recomendado por Francis⁽⁴⁸⁾ pero⁽⁴⁹⁾ los inoculantes comerciales disponibles, son más comúnmente usados en la forma de gránulos medidos para dar una rápida y uniforme velocidad de solución.

Un estudio comparativo⁽⁴⁶⁾ de inoculación mostró que el efecto de la inoculación 0.13% de Ferrosilicio agregado al chorro del metal se encontró que es tan eficiente como la adición de 0.4% de inoculante en la olla. Moore⁽³³⁾ y Dawson⁽⁵⁰⁾ recomendaron una cantidad de inoculante usualmente en el rango de 0.05% a 0.1% en peso; Remondino⁽⁵¹⁾ recomendó el uso de cantidades desde 0.04% a 0.8% de adición, con el mejor tamaño escogido de partículas inoculantes dadas entre 5 y 18 mallas. Hay algún desacuerdo en la literatura acerca de los efectos del tamaño de partícula en los resultados de la inoculación. Dawson⁽⁵²⁾ encontró -

que aunque alguna reducción en el grado de inoculación - ocurrida como el tamaño de partícula fue reducida de 100 a 250 Mallas; hasta el grado de 100 Mallas fue un inoculante muy potente.

Lux y Tannen-Berger⁽⁵³⁾ usaron 0.27% en peso de - gránulos metálicos durante la inoculación de Fe-C y Fe-C-Si.

**2.11.- INFLUENCIA DE PARAMETROS TERMICOS
EN LA EFECTIVIDAD DE LOS INOCULANTES**

INFLUENCIA DE PARAMETROS TERMICOS EN LA EFECTIVIDAD DE LOS INOCULANTES

La temperatura del hierro al tiempo de inocular es importante ya que a mayor temperatura será mayor la cantidad de inoculante a usar, esto está condicionado por el tiempo requerido para vaciar el metal. Ahora no por utilizar más inoculante se tenga que usar una temperatura muy baja, de tal modo que este hecho nos cause problemas con fluidez y el consiguiente llenado del molde.

El mantenimiento del metal líquido⁽¹⁰⁾ tras el tratamiento a una temperatura demasiado elevada (1500-1550°C) tiende a limitar el efecto inoculante. Una temperatura demasiado baja además de provocar una falta de fluidez, facilita la formación de una estructura Heterogenea y sopladuras.

Los modos alternativos⁽⁵⁴⁾ de solidificación de hierros colados a partir del Eutéctico estable del Hierro - Gris, consistiendo de Grafito y Austenita o como el hierro Blanco Metaestable que consiste de Carburos de hierro y Austenita, puede ser representado por el diagrama de doble como se muestra en la figura 2.3.

Hultgren⁽⁴⁾ demostró la solidificación de los Hierros Grises usando un análisis térmico, estudiando las curvas de enfriamiento durante la solidificación de Hierro Gris, tal que la formación indirecta de Grafito en las fundiciones ordinarias de hierro no ocurre.

Morrogh⁽¹³⁾ demostró que los tipos conocidos de formas de Grafito "A, B, C, D, E", se forman directamente del metal líquido.

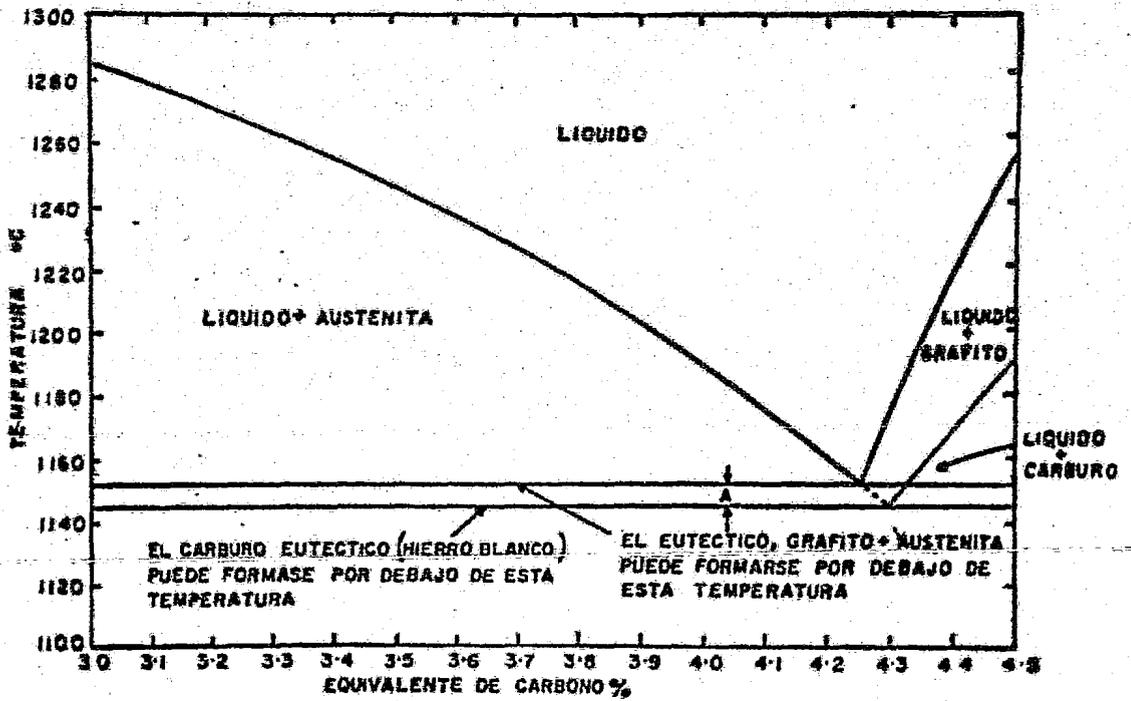


FIG. 2.3 Doble diagrama Fe-C para Hierros Colados.

Una forma típica de enfriamiento es como la que se muestra en la figura 2.4 donde el punto "A" ocurre a la temperatura de líquidus y está marcado por la formación de las Dendritas de Austenita en Hierros Hipoeutécticos- y por la separación del Grafito en Hierros Hipereutécticos.

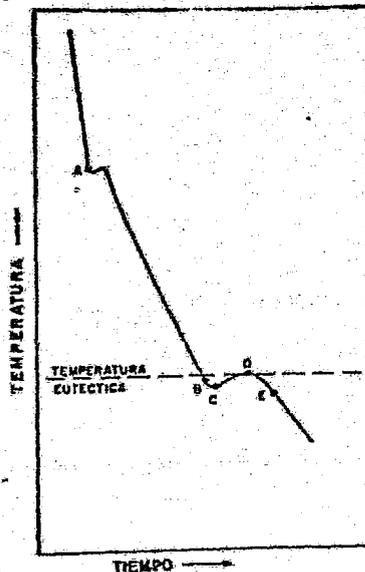


FIG. 2.4 Curva de enfriamiento para un Hierro Colado.

El primer estado de solidificación continúa al punto B. El Subenfriamiento continúa y termina en C.

El efecto de la velocidad de enfriamiento y el grado de nucleación de las estructuras formadas durante la solidificación del Hierro Gris se ilustra en la fig. 2.5

Hay muchos medios (6) de reducir el número de núcleos disponibles para el crecimiento. Es ampliamente usado considerar que el núcleo es de varios tamaños y composición y que algunos son relativamente inestables, siendo

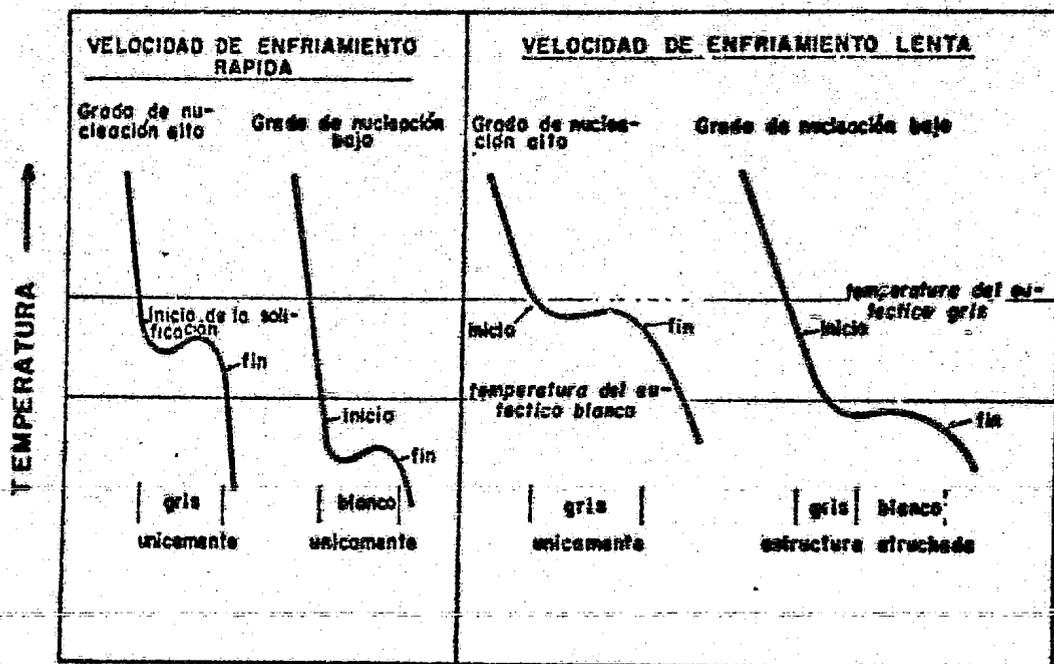


FIG. 2.5 Influencia de la velocidad de enfriamiento y el grado de inoculación sobre la estructura.

destruidos o fraccionados por el sobrecalentamiento del líquido o por mantenerlo a altas temperaturas.

Morrogh⁽⁵⁶⁾ mostró que manteniendo un líquido a temperatura constante por 7 minutos, el cambio de composición fué muy ligero y aún hasta después de un tiempo más corto que este había un pronunciado descenso en la nucleación del metal líquido. El sobrecalentamiento tiene un efecto similar pero cuando el sobrecalentamiento se lleva a cabo es difícil diferenciar entre el efecto de la temperatura del metal y los cambios de composición pero Patterson y Amman⁽⁵⁷⁾ han mostrado que la relación entre el sobrecalentamiento y el subenfriamiento máximo en el Hierro Gris no es una constante. Algunos pasos son observados en la relación, sugiriendo que varios núcleos extraños son inefectivos mientras el sobrecalentamiento es incrementado.

El subenfriamiento al cual ocurre la nucleación efectiva también depende de la velocidad de extracción de calor.

De acuerdo con Piwowarsky⁽⁵⁷⁾ el sobrecalentamiento causa la remoción de núcleos de el líquido y permite subenfriarse con la consecuente precipitación de Grafito fino.

Massary⁽⁵⁸⁾ sugirió que un incremento en la temperatura máxima del hierro fundido, causa una solución progresiva de los núcleos de Grafito, pero que la nucleación se incrementa con una baja temperatura de colada a un subenfriamiento dado. Esto está reafirmado por Oldfield⁽⁵⁹⁾.

quien dijo que para un metal líquido de una composición y grado de nucleación dados, la magnitud de la temperatura de coladas, controla el número de núcleos. Esta conclusión es rechazada por Williams⁽⁶⁰⁾ y Rickard⁽⁶¹⁾ - estuvo de acuerdo con este argumento pero penso que esto debe estar considerado como un efecto combinado de temperatura de sobrecalentamiento y el tiempo de reposo.

**2.12.- INFLUENCIA DE LA COMPOSICION DE LA ALEACION
EN LA EFECTIVIDAD DE LOS INOCULANTES.**

INFLUENCIA DE LA COMPOSICION DE LA ALEACION EN LA EFECTIVIDAD DE LOS INOCULANTES.

Kitchener⁽¹⁸⁾ muestra que la velocidad de solución de Grafito en los hierros colados, esta al máximo en hierros de bajo azufre y disminuye la velocidad de solución del Grafito con el aumento en el contenido de Azufre en el hierro. Hasta ahora el efecto de inoculación con Grafito en Hierros Grises, la diferencia en las características de decaimiento particularmente pueden ser explicadas por cambios en la Cinética de solución del Grafito en el hierro.

2.12.1.- INFLUENCIA DEL CARBON EQUIVALENTE.

La influencia del Silicio en el porcentaje de Carbono Eutéctico⁽⁶²⁾ ha sido ampliamente investigado y varias fórmulas empíricas han sido organizadas para tal relación.

Una de las mas ampliamente aplicadas es:

$C.E. = \%C + 1/3 (\% Si + \% P + \% S)$ a esta relación se le da el nombre de Carbón Equivalente.

La influencia total del Grafito formado durante la solidificación es directamente proporcional al Carbón total presente en la aleación.

La resistencia mecánica de un hierro inoculado varia con relación al Carbón equivalente y los elementos que se encuentran en solución en el hierro. A mayor carbón equivalente menor será la resistencia a la tensión. Varias-

investigaciones han demostrado, y lo confirma la práctica, que la relación C/ Si es un factor sumamente importante. Un hierro con bajo Carbono y Silicio alto, conserva mejor sus propiedades en grandes espesores, que un hierro del mismo carbón equivalente pero con alto carbón y bajo Silicio. También está claro que un contenido alto de Silicio producirá después de la inoculación un hierro con menor sensibilidad al temple.

2.12.2.- INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AZUFRE

Aunque el Grafito es un potente inoculante para los Hierros Grises⁽⁶²⁾, la adición de 0.1% de carbón Grafítico y Grafito, sobre hierros Grises que contienen niveles de Azufre de 0.023%, 0.050% y 0.12% es probado para observar su efectividad con respecto al Azufre.

Un índice del efecto de la composición fue observado por Fuller⁽⁶⁹⁾ quien encontró que un incremento en el contenido de Azufre incrementa el número de células crecientes en muestras coladas a temperatura constante.

Oldfield⁽⁵⁹⁾ ha determinado la relación de subenfriamiento/células Eutécticas para varios contenidos de Azufre. Demostró que el número de células Eutécticas se incrementan a la vez que se incrementa el contenido de Azufre a un nivel constante de subenfriamiento. Esto debe inferirse a partir de estos resultados, que el Azufre incrementa la nucleación del metal⁽⁷⁰⁾.

Oldfield ha demostrado también que un incremento en el contenido de Azufre incrementa la cantidad de subenfriamiento.

Al mismo tiempo dedujo que el Azufre incrementa velocidad de crecimiento de las células Eutécticas. Esta deducción esta de acuerdo con muchas observaciones hechas sobre el Azufre en las fundiciones promueve la formación de hojuelas de Grafito gruesas ⁽⁷¹⁾.

El contenido de Azufre normalmente varia entre 0.05% y 0.12%. Este punto es interesante, puesto que se pensaba que al fundir en horno de inducción, el bajo contenido de Azufre será una ventaja; sin embargo ahora sabe que el Hierro Gris con un contenido de Azufre inferior a 0.05% - en realidad no responde a la inoculación.

2.12.3.- INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE MANGANESO.

El Manganeso ^(69,72) aparece para tener un efecto opuesto al mostrado por el Azufre.

En el hierro líquido, el Manganeso reacciona con el Azufre:



Esta reacción es reversible y procede de izquierda a derecha conforme la temperatura decae. A cualquier contenido de Manganeso puede asumirse que algunas pequeñas cantidades de Azufre se mantienen sin combinar en la temperatura de arresto del Eutéctico. La cantidad actual de crece con el incremento del contenido de Manganeso.

2.12.4.- INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE FOSFORO Y TITANIO.

Gilbert ⁽⁷³⁾ ha mostrado que el incremento en el -

fósforo incrementa el número de células Eutécticas. El detalle de mecanismo por el cual el fósforo tiene este efecto aun no ha sido estudiado, pero evidencias circunstanciales tienden a indicar que el fósforo incrementa la nucleación del líquido⁽⁵⁹⁾.

El efecto⁽⁷³⁾ del Titanio es similar al del Manganeso ya que la estructura del Grafito la cual se forma en hierros conteniendo Titanio son del tipo encontrado en hierros de extremadamente bajo Azufre.

2.12.5.- INFLUENCIA DEL SILICIO Y EL CROMO.

La acción del Silicio y el Cromo no se les puede atribuir a la variación en la nucleación pero un poco al mas normal efecto de la aleación. Algunas determinaciones muestran que tales elementos cambian el intervalo de temperatura entre el equilibrio Hierro-Grafito y el Hierro Blanco Eutéctico.

El Silicio⁽⁷⁴⁾ aumenta el equilibrio de la temperatura de subenfriamiento del Hierro Grafito Eutéctico y el Cromo⁽⁷⁵⁾ tiene el efecto opuesto.

Dawson⁽⁷⁶⁾ citó que el grado de nucleación del líquido no incrementa consistentemente con el incremento del carbón equivalente.

2.12.6.- INFLUENCIA DE LOS GASES DISUELTOS

Hay evidencia que la solución de ciertos Gases, tales como, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno, etc.⁽⁶³⁾ pueden

ser responsables de la reducción de la velocidad de nucleación durante la solidificación, con lo cual se induce al subenfriamiento. La disolución de estos gases puede ser responsable directamente sobre el cambio del Carburo estable y por ende, afectar al tamaño y distribución de las hojuelas de Grafito.

El Hidrógeno⁽⁷³⁾ le ha sido atribuido tener un efecto en el decrecimiento de la velocidad de crecimiento del Eutéctico y engruesar al Grafito de una manera similar al Azufre.

2.12.7.- INFLUENCIA DE LAS INCLUSIONES NO METÁLICAS^(64,65)

Este fenómeno ocurre durante el tratamiento de inoculación; las partículas grandes no disueltas en el metal se presentan como inclusiones no metálicas y actúan como núcleos exógenos para la cristalización del Grafito. El efecto del tratamiento de inoculación en las inclusiones no metálicas es de especial interés, en cuestión de que si estas inclusiones se toman como núcleos de Grafito o no^(65,66,67,68).

**2.13.- INFLUENCIA DEL METODO DE ADICION Y TIEMPO
DE REPOSO EN LA EFECTIVIDAD DEL INOCULANTE**

INFLUENCIA DEL METODO DE ADICION Y TIEMPO DE REPOSO.

Trabajos recientes ⁽²³⁾ sobre la inoculación de Hierros Grises han sido desarrollados en el conocimiento de inoculantes nuevos y mas efectivos en vista de mejores métodos para su adición, básicamente dirigidos a vencer el decaimiento de la inoculación.

El número de núcleos disponibles ⁽⁵⁹⁾ para crecer a un grado de subenfriamiento dado, varía de acuerdo al tratamiento del caldo. Núcleos que no son estables en el material líquido pueden ser destruidos o disminuidos de tamaño. El método simple para disminuir el número de núcleos disponibles es por medio de una permanencia del metal líquido por un apreciable período de tiempo.

La efectividad de un inoculante esta determinado por su potencia inicial y su habilidad para mantener este efecto durante el tiempo en el cual el metal es reposado el cual después será colado.

Varios autores ^(77,59,79,80,81,78) han estudiado los efectos que tiene el método de la adición del inoculante, procurando que los inoculantes y las variables que rodean esta observación sean las mejor controladas posibles.

De esta manera coinciden en que los resultados obtenidos por un inoculante dado es específico para el método de adición practicado, es decir, este inoculante dará resultados diferentes para dos tecnicas de inoculación diferentes.

De las observaciones anteriores, todos los autores coinciden con inocular al metal líquido lo mas tarde posible, para evitar que algún tiempo de reposo tenga lugar

-y así mismo, disminuir la destrucción de los núcleos.

Este tipo de inoculación recomendada puede practicar se de la manera que mas convenga al productor de Hierro - Gris, ya sea que pueda usar inoculación instantanea, inoculación en el molde, en la olla, etc.

2.14.- METODOS PARA LA EVALUACION DEL EFECTO
DEL INOCULANTE.

METODOS PARA LA EVALUACION DEL EFECTO DEL INOCULANTE.

La evaluación⁽⁸²⁾ de un inoculante no debe ser hecha unicamente en cuanto a sus efectos en la célula Eutéctica. No hay una relación común para todos los inoculantes entre células Eutécticas y la tendencia al blanqueo. Algunos - inoculantes producen menor zona templada con un pequeño incremento en el número de células Eutécticas, que la cantidad que producen otros inoculantes.

La ventaja de usar inoculantes es el aumento en el número de células Eutécticas por una reducción a la tendencia del efecto de blanqueo, dado que su uso reduce el riesgo - de obtener piezas defectuosas en los Hierros Grises colados causados por el alto grado de nucleación^(82,45).

Las pruebas para evaluar el efecto de los inoculantes deben ser cuidadosamente planeadas.

Existen tres métodos para la evaluación del poder inoculante, los cuales pueden ser usados para evaluar la potencia y efecto de estos.

- 1.- La medida del sobreenfriamiento a diferentes velocidades de enfriamiento, por medio de las curvas de enfriamiento.
- 2.- Prueba de la zona blanca mediante la cuña de temple y medidas de dureza.
- 3.- Conteo de células Eutécticas formadas durante la solidificación.

Estos métodos son complementarios unos con otros; el primero tiene la ventaja de que cuando es combinado con los otros dos, puede dar gran información del modo por el cual un inoculante causa sus efectos.

Se puede evaluar rápidamente⁽⁸³⁾ la eficiencia de la inoculación con la ayuda del ensayo de temple; si la inoculación ha sido eficaz la profundidad del temple se habrá reducido apreciablemente en relación con la de la fundición base; esta es la técnica conocida como la doble probeta de temple, (antes y después del tratamiento).

Las pruebas de colada desarrolladas por B.C.I.R.A. (10) son convenientes para este propósito. Son comparaciones de la conducta inoculada, por medio de la medida de la tendencia al blanqueo y conteo de células Eutécticas en secciones similares, las cuales tendrán que enfriarse a la misma velocidad. Todas las pruebas de colada usadas para esta finalidad deben ser hechas en moldes similares y vaciadas a la misma temperatura.

Las secciones para el conteo de células Eutécticas deben ser cortadas en posiciones similares en las probetas de fundición. Las secciones para la evaluación de las células Eutécticas deben ser cortados a la misma longitud. Deben localizarse en una posición media entre la arista y el centro de la barra.

El borde de ataque de la sección plana de la cuña de temple puede ser quebrada o fracturada en la sección media de la superficie y de esta manera mostrará la zona blanca en el Hierro Gris.

En los Hierros Grises las hojuelas pueden ser mostradas por un ataque adecuado y observando en el microscopio con aumentos de baja y mediana resolución.

**2.15.-EVALUACION DE FORMAS, TIPOS Y DISTRIBUCION
DE GRAFITO Y TIPOS DE MATRICES.**

2.15.1.- TIPOS DE HOJUELAS DE GRAFITO⁽⁸⁴⁾

Antes de entrar por completo a la discusión de factores que afectan a la estructura del hierro fundido sería conveniente describir los diferentes tipos de Grafito que se encuentran en el Hierro Gris comercial; las cartas propuestas por la A.S.T.M. fueron editadas en 1941 como parte de una práctica tentativa para evaluar la Microestructura en Hierros Grises. Esto representa un intento para clasificar las características de los patrones de Grafito que se encuentran en estos hierros, los cuales se muestran como una serie de micrografías designadas como tipo A, B, C, D, ó E. Tales tipos están sujetos a variaciones considerables, como puede ser en cualquier sistema de clasificación.

2.15.2.- TIPO A. DISTRIBUCION UNIFORME Y ORIENTACION AL AZAR.

Este es tal vez el tipo más común de estructura encontrada en Hierros Grises. Puede ser observada en un simple plano pulido; la distribución es enteramente desordenada y no existen trazas de cualquier estructura Dendrita Primaria, visible. Esta estructura se observa en el experimento de temple, (ver fig. 2.6).

Las Hojuelas de Grafito son largas y sinuosas, no tiene relación aparente con el patrón de Dendrita Primaria.

La observación a bajo aumento, revela a veces trazas de las Dendritas Primarias, y por esta razón se recomienda un examen preliminar a bajos aumentos en cualquier estudio-

de la distribución de Grafito en Hierro Gris.



FIG. 2.6 Grafito tipo A.

**2.15.3.- TIPO B. ROSETAS AGRUPADAS, CON ORIENTACION
AL AZAR**

Cada Roseta representa un centro de cristalización en el líquido Eutéctico, y el patrón es un resultado del crecimiento natural y radial de las colonias Eutécticas de Grafito y Austenita.

Trazas de la Dendrita Primaria se puede observar especialmente cerca del centro de cada Roseta donde las hojuelas de Grafito son pequeñas. Cerca de la superficie de una fundición de Grafito tipo "B" puede ser desarrollado completamente en tanto que en el centro de la pieza, donde la velocidad de enfriamiento es mas lenta, el tipo "A" puede ser predominante. (ver fig. 2.7).

Esto es simplemente un efecto de la velocidad de enfriamiento, un desarrollo de las Hojuelas de Grafito en las colonias iniciales de los centros preferentes de cristalización en líquido Eutéctico.

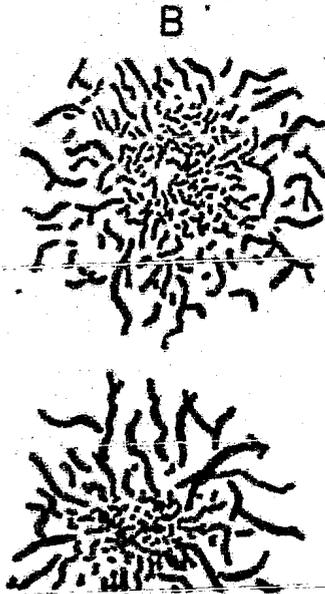


FIG. 2.7 Grafito tipo B.

2.15.4.- TIPO C. HOJUELAS DE TAMAÑO SUPERPUESTOS Y ORIENTACION AL AZAR.

El material que muestra estas características es fuertemente Hipereutético; Las aleaciones Hipereutéticas no enfrían de la misma manera como las aleaciones Hipoeutéticas.

La consideración mas importante que hay que hacer es que el metal existe previo al enfriamiento del Eutéctico y que cualquier Grafito formado durante la solidificación Eutéctica es confinado necesariamente a los espacios libres entre ellos. Como resultado las grandes Hojuelas de Grafito proeutético se sobreponen en la estructura, el modo de solidificación del Eutéctico en tales aleaciones no se sabe, (ver fig. 2.8).

La estructura del tipo C rara vez se encuentra en un Hierro Gris ordinario, el cual debe ser menor en composición que el Eutéctico.

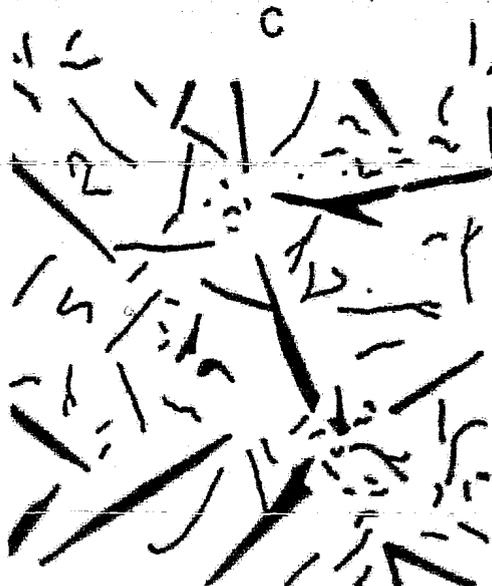


FIG. 2.8 Grafito tipo C.

2.15.5.- TIPO D. SEGREGACION INTERDENDRITICA,
ORIENTACION AL AZAR.

Todas las Hojuelas de Grafito son completamente pequeñas sin orientación y sin tipo de crecimiento radial.

Las Dendritas Primarias son preferentemente trazadas por la mezcla de Grafito y Hierro, los cuales fueron formados durante el enfriamiento del Eutéctico y a su vez fueron confinados entre los espacios entre las Dendritas. Estructuras de este tipo son raramente encontradas sobre toda la sección transversal de una fundición. Hay usualmente mezclas con ciertas cantidades de Grafito tipo "B" o tipo "A". El grafito tipo "D" no requiere de una velocidad rápida de enfriamiento para su solidificación.

Una adición de Azufre convierte el Grafito tipo "D" al tipo "A". Pero los experimentos de temple indican que el mecanismo de enfriamiento fue el mismo en ambos casos.

(ver fig. 2.9).

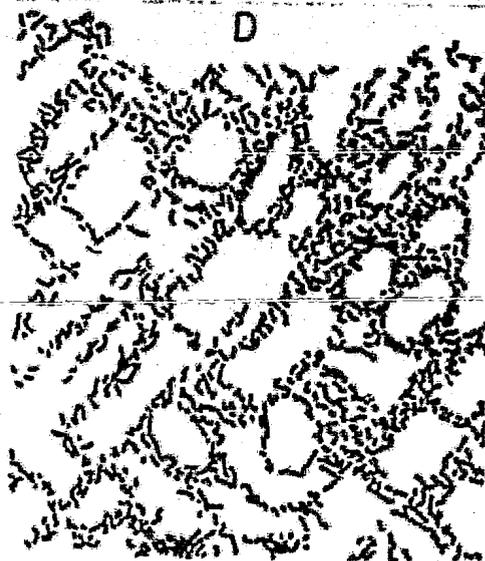


FIG. 2.9 Grafito tipo D.

2.15.6.-TIPO E. SEGREGACION INTERDENDRITICA, ORIENTACION
PREFERENTE.

El material por las Micrografias es fuertemente Hipo eutéctico y las Dendritas Primarias estan muy juntas. Las Hojuelas de Grafito que se forman durante el enfriamiento del Eutéctico, son forzados a desarrollarse en los espacios estrechos entre las ramas de las Dendritas y son entonces orientadas preferentemente. (ver fig. 2.10).

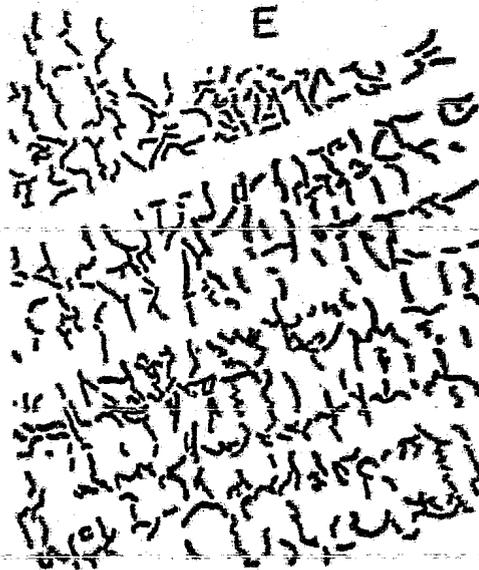


FIG. 2.10 Grafito tipo E.

3.- MATERIALES Y METODOS.

3.1.- COMPOSICION QUIMICA DE LA CARGA METALICA

3.1.- COMPOSICION QUIMICA DE LA CARGA METALICA.

La materia prima que se utiliza generalmente para obtener Hierro Gris consiste principalmente de una carga mixta de Arrabio, Retornos de Hierro Gris y chatarra de acero. La obtención de Hierro Gris en este trabajo utiliza una carga de Arrabio balanceada con Acero de bajo Carbono. El Arrabio que se empleó es el de uso común en la Industria con la composición que muestra la tabla 3.1.

TABLA 3.1 COMPOSICION QUIMICA DEL ARRABIO

% C	% Si	% Mn	% P	% S
3.884	2.944	0.699	0.094	0.063

Balanceado con barras de acero al Carbono (1020) - del tipo Cold-Rolled comercial con una composición química de:

TABLA 3.2 COMPOSICION QUIMICA DEL ACERO

% C	% Si	% Mn	% P	% S
0.222	0.114	0.983	0.021	0.019

3.1.1.- BALANCE DE LA CARGA METALICA.

Para encontrar resultados notables durante la inoculación, la composición química del hierro que va a someterse al tratamiento debe estar dentro de las especificaciones de un Hierro Hipoeutéctico ya que este tipo de hierros tiene un Carbono equivalente que va desde 3.3% hasta 4.3%.

Para este fin se ha seleccionado un hierro con un carbon equivalente aproximadamente igual a 3.6% que se desea tenga una composición química de:

TABLA 3.3 COMPOSICION QUIMICA DEL HIERRO GRIS

% C	% Si	% Mn	% P	% B
2.9	2.183	0.775	0.074	0.051

$$C.E. = 2.9 + 1/3 (2.183 + 0.074 + 0.051) = 3.67 \%$$

El cálculo de la concentración de los elementos del Hierro Gris fué obtenido por un balance simple de materia con las especificaciones de composición química dada por la carga metálica y el metal líquido requerido para la cantidad de piezas coladas deseadas.

El balance de los componentes del Hierro Gris fueron hechos basandose en el carbón que se fijó para esta finalidad igual a 2.9%

3.1.2.- COMPOSICION QUIMICA DE LAS PIEZAS COLADAS.

El análisis químico de estas piezas se practicó solamente a tres probetas representativas de la masa global de hierro esencialmente para asegurar que la composición química calculada sea similar a la que se obtiene experimentalmente, y los resultados son los siguientes.

TABLA 3.4 ANALISIS QUIMICO PRACTICADO A LAS PIEZAS COLADAS.

PROBETA	% C	% Si	% Mn	% P	% S	C.E.
0101	2.908	1.965	0.399	0.075	0.050	3.60
0107 *	2.508	1.965	0.399	0.048	0.052	3.20
0108 *	2.204	1.358	0.661	0.060	0.048	2.69

* Las probetas 0107 y 0108 tienen un carbón equivalente mucho mas bajo debido a que estos metales tuvieron un tiempo de residencia en el horno mas prolongado a la temperatura de sobrecalentamiento y esto hizo que gran parte del -- carbono se oxidara, y los elementos aleantes reaccionaran -- con la escoria.

3.2.- SELECCION DE INOCULANTES.

3.2.- SELECCION DE INOCULANTES.

La Industria de la fundición de Hierro Gris Grafilaminar utiliza una variedad relativamente reducida de inoculantes - los cuales varían sensiblemente en su composición química.

Para el propósito de este trabajo se han seleccionado algunos de los materiales más comunes que las compañías distribuidoras expenden.

3.2.1.- COMPOSICION QUIMICA DE LOS INOCULANTES.

La composición química estandar de estos agregados es la que muestra en detalle la tabla 3.5.

La sección 5.9.4. se ocupa de discutir ampliamente la - relación existente entre los elementos constituyentes y sus efectos.

TABLA 3.5. COMPOSICION QUIMICA DE LOS INOCULANTES USADOS.

INOCULANTE	% C	% Si	% Mn	% Ca	% Zr	% AL	% OTROS	% Fe
INOCULIN A77-M3		65.5	3	4	4	1	5% CARBONATOS	17.5
INOCULOY 63		62.5	10.5	2.25		1.25	5% Ba	19
INOCULANTE SMZ		62.5	6		6			20
INOCULANTE FUNGO	36	39			0.75			24.25
INOCULANTE VULCANO-2	12.67	20.85	0.32	0.56		0.80	0.18% S	64.62
INOCULANTE VULCANO-3	7.29	45.31	0.37	2.99		0.94	0.16% S	42.94
INOCULANTE VULCANO-4	46.64	30.26	6.20	0.72		0.86	0.27% S	15.05

3.3.- VARIABLES SELECCIONADAS.

3.3.- VARIABLES SELECCIONADAS.

El efecto inoculante puede evaluarse de distintas maneras, algunas de estas pueden ser tardadas y/o costosas para fines Industriales; en el capítulo 2 de la sección de "Métodos para la Evaluación del Efecto Inoculante" se enuncia mas ampliamente para evaluar los inoculantes que se usaron en este trabajo, se van a determinar tres variables manteniendo estables otros Parametros.

Las variables a medir son la cantidad de inoculante, tamaño de partícula óptimo para la inoculación y el tipo de inoculante empleado. Al mismo tiempo quedan fijos los siguientes parametros: temperatura de sobrecalentamiento, composición química del metal base, temperatura de colada, temperatura de inoculación, tiempo de residencia del líquido en el horno, velocidad de colada, y el tipo de la arena de moldeo.

La primera fundición sirvió para fijar todos estos parametros excepto la temperatura de inoculación; y a la vez para obtener el patron de blanqueo, es decir, esta fundición no fue inoculada para obtener una pieza totalmente blanca, como los resultados lo demuestran.

3.3.1.- DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE INOCULANTE.

La segunda, tercera y cuarta fundición, sirven para encontrar la cantidad de inoculante que deba usar, en esta etapa se utiliza un solo inoculante con el mismo -

-tamaño de partícula recomendado en la Literatura⁽¹⁰⁾ y manteniendo constantes los parámetros antes mencionados.

La segunda fundición determina asimismo la temperatura del tratamiento de inoculación.

La cantidad de inoculante usada fué de 1% en peso, 0.5% en peso y 0.25% donde el porcentaje menor se usó para las pruebas subsiguientes.

3.3.2.- DETERMINACION DEL TAMAÑO DE PARTICULA DEL INOCULANTE.

Las fundiciones No. 5,6 y 7 fueron las que determinaron esta variable; haciendo uso del mismo inoculante y los parámetros previamente establecidos, se procedió entonces a probar el tamaño de partícula del inoculante.

Los materiales inoculantes fueron analizados granulométricamente y retenidos en las mallas como lo muestra la tabla 3.6. Las partículas retenidas en las mallas #4 y -30 se han descartado por ser demasiado grandes y muy finas respectivamente.

TABLA 3.6. TAMAÑO DE PARTICULA QUE SON RETENIDAS
EN LAS MALLAS

MALLAS	TAMAÑO DE PARTICULA
+4	4.76 (mm)
- 4+8	2.38 - 4.76
- 8+18	0.96 - 2.38
-18+30	0.59 - 0.96
-30	0.59

3.3.2.1.- ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS INOCULANTES.

A los inoculantes se les practicó un análisis de mallas para determinar su distribución granulométrica y así utilizar tamaños diferentes para el mismo propósito.

FIG. 3.1 DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LOS INOCULANTES.

FIG. 3.1.A Inoculante A 77-M3.

FIG. 3.1.B Inoculante INOCULOY 63

FIG. 3.1.C Inoculante SMZ.

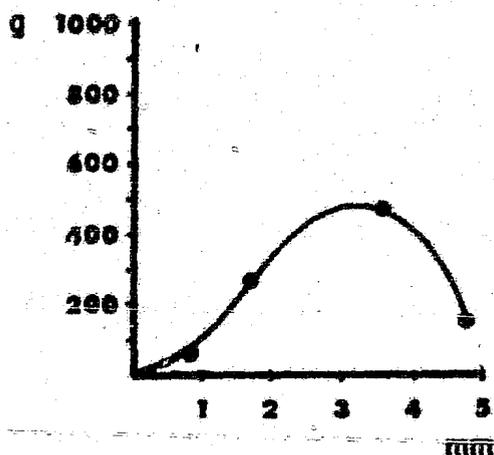


FIG. 3.1. A

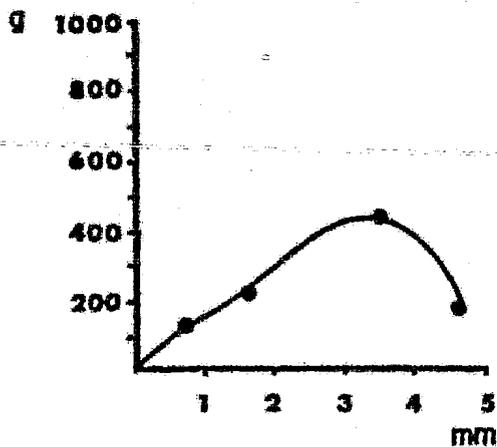


FIG. 3.1. B

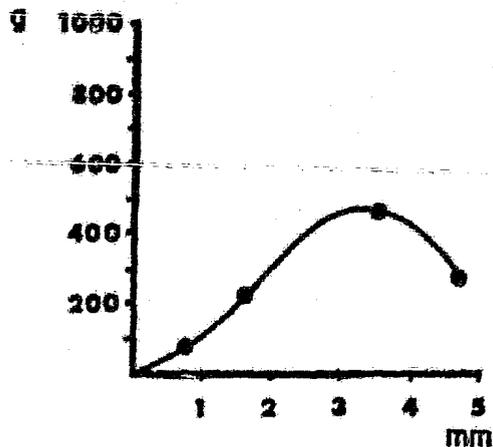


FIG. 3.1. C

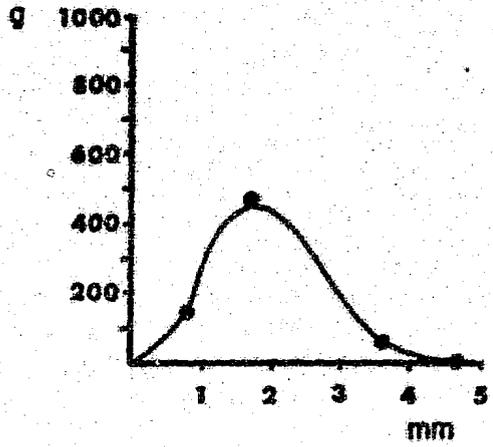


FIG. 3.1.D

Inoculante FUNCO.

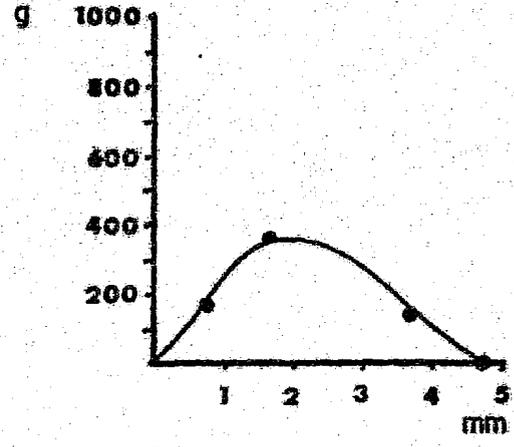


FIG. 3.1.E

Inoculante Vulcano-2

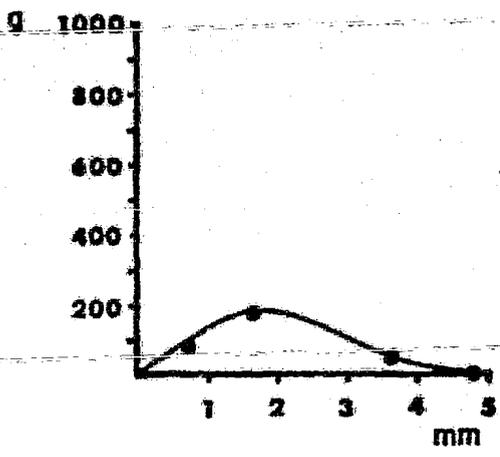


FIG. 3.1.F

Inoculante Vulcano-3.

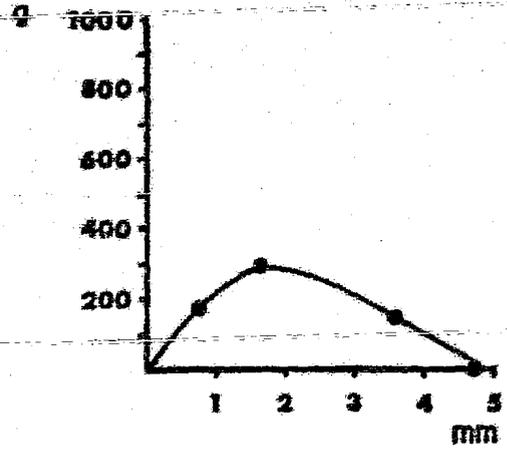


FIG. 3.1.G

Inoculante Vulcano-4.

Cada una de estas gráficas representa la cantidad de material retenido en cada tamiz, siendo la base de cálculo 1 Kg. de inoculante.

Las ordenadas indican los gramos de material que se acumuló en cada malla, y las abscisas representan el tamaño de partícula promedio retenido por cada tamiz (para mayor información ver tabla 2.6).

3.4.- METODO DE MOLDEO Y PREPARACION DE LA ARENA.

3.4.- METODO DE MOLDEO Y PREPARACION DE LA ARENA.

La arena disponible para la manufactura de los moldes es Arena Sílica con una granulometria de 50-60 relativa al estandar A.f.S. (American Foundrymen's Society).

Para que esta arena mejorara sus propiedades se balanceó con 10% en peso, de Bentonita Cálcica y 5% en peso de agua como aglutinante. Estas tres componentes se mezclan en un molino mecánico hasta que se detectan buenas propiedades al tacto. Cuando esto se observa entonces ya está lista para moldearse.

El método de moldeo es el método común que se utiliza industrialmente cuando se trata de moldeo manual. El molde terminado es como el que muestra la foto 3.1.

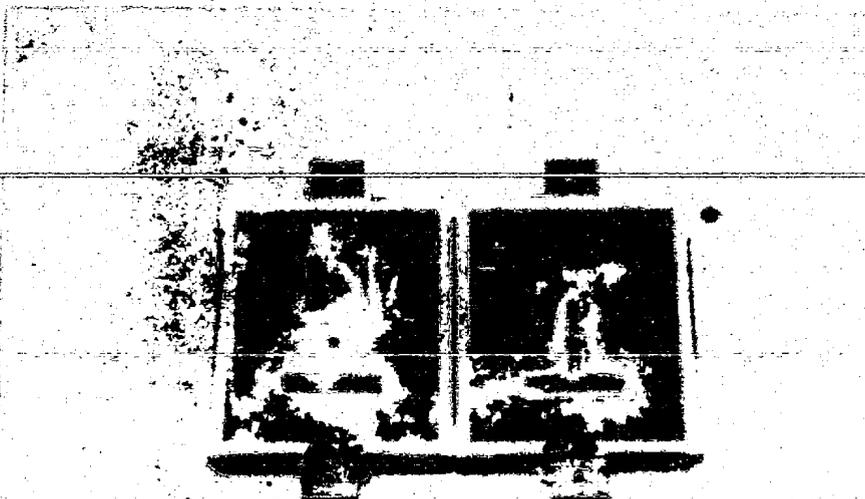


Foto 3.1. MOLDE EN ARENA LISTO PARA
SER USADO EN EL COLADO DE
HIERRO GRIS.

3.5.- OLLA DE COLADA, PREPARACION Y USO.

3.5- OLLA DE COLADA, PREPARACION Y USO.

La Olla de Colada, tambien llamada Cuchara, utiliza da para lograr esta práctica, sufrió algunas transforma ciones con respecto al diseño y material refractario de pendiendo fundamentalmente de las condiciones de opera ción dispuesta, Y a los materiales refractarios disponi bles en el mercado.

La Cuchara en un principio fué diseñada para mante ner 6 Kg. de hierro, mas tarde se amplió para contener - 10 Kg. como aparece en la foto 3.2., la superficie exte rior es un contenedor de lámina de Acero al Carbono. El material refractario es un material plástico llamado - "Carboplast" de la Compañía Barrromex, el cual resulto - ser un material muy apropiado para este trabajo.

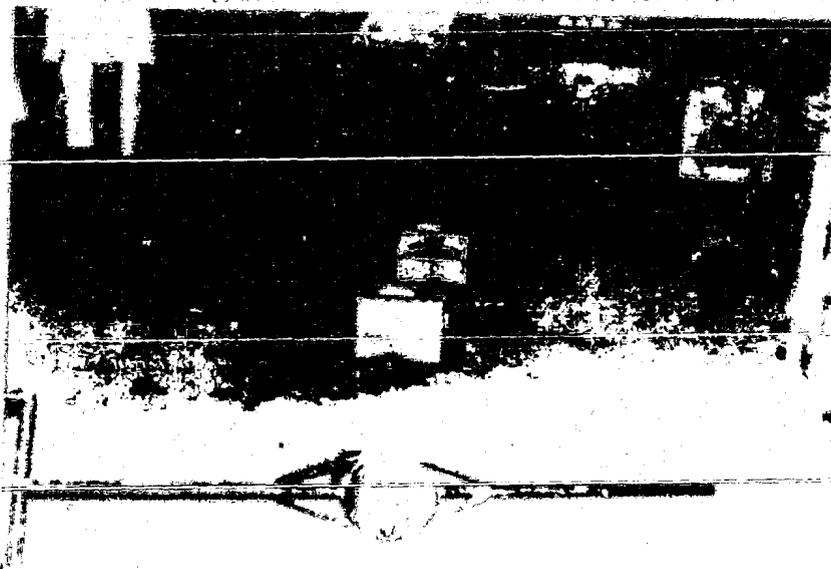


Foto 3.2. OLLA DE COLADA UTILIZADA EN EL TRANSPORTE DE HIERRO GRIS.

**3.6.- UNIDAD DE FUSION Y MANUFACTURA DEL REVESTIMIENTO
REFRACTARIO.**

3.6.- UNIDAD DE FUSION Y MANUFACTURA DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO.

La unidad de fusión que se ha utilizado para este trabajo es la que muestra la foto 3.3 el cual es un horno de inducción sin canal de alta frecuencia (4200 HZ) - con 30 Kg. de capacidad, de 400V y 30 KW de potencia, marca Ajax Magnethermic; que se encuentra instalado en el laboratorio de conformado de materiales anexo a la facultad de Ingeniería de U.N.A.M.

El Crisol del horno fué preparado con refractario - apisonable Taylor Zircon 717-D, que es a base de Circonio con el procedimiento recomendado ⁽⁸⁵⁾ para este tipo de refractario.



Foto 3.3 HORNO DE INDUCCION QUE SE USO EN LA ELABORACION DE HIERRO GRIS.
MOMENTO EN QUE LA CUCHARA ES LLENADA.

3.7.- METODO DE OPERACION DEL HORNO.

3.7.- METODO DE OPERACION DEL HORNO.

Este es un método cronológico muy particular para el horno utilizado; para mayor explicación acudir a la literatura especializada al respecto (86) .

3.8.- METODO DE COLADA E INOCULACION.

3.8.- METODO DE COLADA E INOCULACION.

Cuando el metal ha recidido en el Crisol del horno- el tiempo suficiente para alcanzar la temperatura deseada de sobrecalentamiento, entonces se procede a vaciar - el líquido metálico del horno sobre la Olla de Colada - (ver foto ^(3.3)) la cual ha sido precalentada a una temperatura tal que las paredes dan una apariencia rojiza, para disminuir al máximo el choque térmico entre la aleación y las paredes de la Olla. Y este pueda bajar demasiado la temperatura del metal o en el peor de los casos fracturarse y causar algún accidente.

Cuando el metal ya se encuentra confinado en la Gu- chara se verifica nuevamente la temperatura y dependiendo de la lectura se espera algún tiempo para que esta baje y pueda colarse a la temperatura de colada, en el caso de que esta lectura haya sido muy alta; de lo contrario colar de inmediato el primer molde (patrón de referencia). Inmediatamente después se toma otra medida de temperatura y esta debe determinar la temperatura de inoculación, a esta temperatura se agrega la cantidad determinada de inoculante con las siguientes precauciones previas:

- 1.- Verificar el análisis y los efectos de los inoculantes de un lote u otro.
- 2.- Usar unicamente inoculantes secos. Las aleaciones-humedas no dan una inoculación satisfactoria y pueden causar picaduras u otros defectos.

- 3.- Usar materiales de tamaño estandar. Porque como se precisó en apartados anteriores, los trozos grandes no se disuelven efectivamente en Ollas pequeñas y - un exceso de finos puede oxidar la carga.
- 4.- Cuidar que el metal líquido esté exento de escoria - o este reaccionará con el inoculante y el efecto se perderá.
- 5.- No tomar muestras del metal en la superficie de la Olla despues de la adición de inoculantes porque - puede haber segregación.
- 6.- No cambiar el tipo de inoculante sin antes evaluar sus efectos y determinar las cantidades propias de adición.
- 7.- Por medio del modo de adición se puede tener tendencia mayor o menor a la contracción, defectos y picaduras e inclusiones de escoria.

Una vez agregado el inoculante se homogeniza con una barra de Acero de bajo Carbono previamente calentada. inmediatamente después se cuela el metal en el segundo molde, el cual mostrará el resultado de la inocu-lación tal como se muestra en la foto 3.4

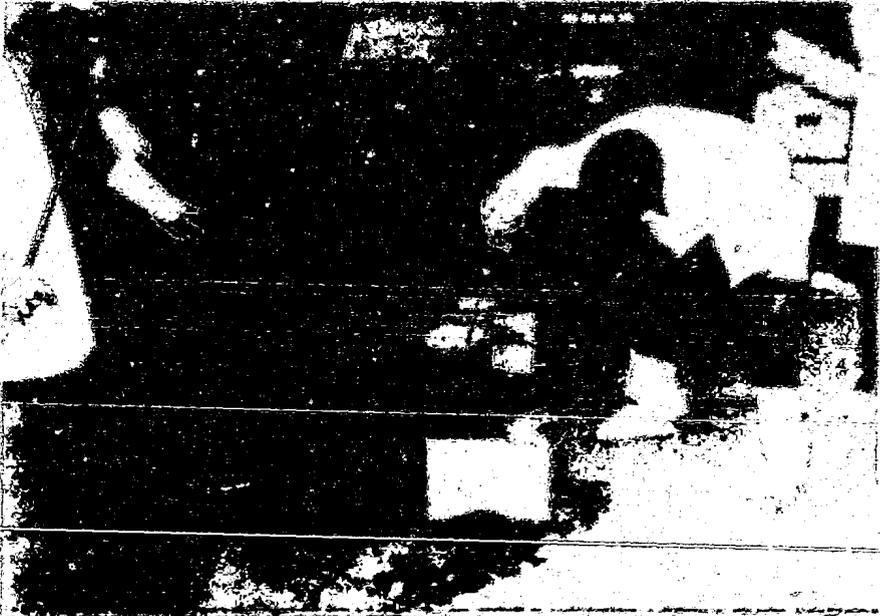


FOTO 3.4. LA FOTO MUESTRA EL MOMENTO
DE INOCULAR EL METAL EN LA
OLLA DESPUES DE HABER COLA
DO EL ESPECIMEN ESTANDAR.

3.9.- METALOGRAFIA

3.9.- METALOGRAFIA⁽⁸⁷⁾

3.9.1.- CORTE Y DESBASTE DE LA PROBETA METALOGRAFICA.

Los especímenes de Hierro Colado se pueden obtener a partir de fundiciones usando técnicas convencionales - de corte tales como Sierra Manual, Sierra Mecánica, o - para materiales duros, un Cortador Abrasivo.

Cuando se cortan materiales duros, tales, con Hierro Blanco, es necesario el uso de una máquina cortadora empleando discos delgados de Carburo de Silicio u Oxido de Aluminio y debe prevenirse el sobrecalentamiento por medio de un flujo de fluido refrigerante.

DESBASTE.- La lubricación del material abrasivo no siempre es necesario. El agua puede ser usada - como enfriante si se desea.

3.9.2.- METODO DE DESBASTE FINO Y PULIDO.

DESBASTE FINO.- La secuencia correcta para obtener óptimos resultados es pasar por papel de lija - No. 280, 400 y 600. El agua es usada como - lubricante y para remover los despojos de papel y Hierro, el desbaste final (lija 600) es el paso mas importante en la preparación, porque es aquí donde la fase de Grafito puede ser dañada.

Para los Hierros con Hojuelas grandes deben tener - una abrasión final en seco para asegurar la retención - del Grafito.

Después de la abrasión, se le debe dar un ligero ataque previo al pulido en Picral para Hierros Perliticos y Nital para Hierros Ferriticos.

PULIDO.- Para estos hierros el pulido con pastas de Diamante se ha encontrado que son las más satisfactorias.

Para pulir adecuadamente los Hierros Grises y remover el metal distorsionado y quemado, debe practicarse un método alternativo de pulido y ataque.

El espécimen recién desbastado es pasado a través de una etapa de limpieza, por el ataque en Picral 4% o Nital 5% según sea el caso, y después son secados.

Después del pulido debe removerse el lubricante de la superficie de la probeta, por medio de un chorro de alcohol dado por una piseta. Entonces el espécimen se seca con acetona y se evapora bajo el flujo de aire caliente de un secador de probeta.

Después del pulido y ataque el espécimen debe ser secado rápidamente para prevenir la oxidación.

La presencia de cavidades en el espécimen, agrava el problema porque las soluciones de pulido y ataque quedan retenidas dentro, y cuando es secado estas emergen y manchan la superficie pulida.

3.10.- REACTIVOS DE ATAQUE.

La observación de algunas estructuras importantes en detalle, solamente pueden ser observadas después que la probeta ha sido atacada adecuadamente (37,88).

A continuación en la tabla 3.7 enlistan los reactivos utilizados para revelar las estructuras deseadas de Grafito, matrices, y Células Eutécticas.

TABLA 3.7 REACTIVOS DE ATAQUE

REACTIVO	COMPOSICION	ATAQUE	ESTRUCTURA
PICRAL 4%	4% ACIDO PICRICO 96% ETANOL	ATAQUE PROFUNDO DE 2 A 10 SEG.	A
NITAL 5%	5% ACIDO NITRICO 95% ETANOL	ATAQUE PROFUNDO DE 2 A 10 SEG.	B
PERSULFATO DE AMONIO	10g. PERSULFATO DE AMONIO 100 ml AGUA UNAS GOTAS DE H_2SO_4	INMERSION Y LAVADO	C
REACTIVO DE SFEAD	10g. CLORURO CUPRICO 40g. CLORURO DE MAGNESIO 20 ml. ACIDO CLORHIDRICO 1000 ml. ETANOL	INMERSION POR MAS DE 3 hr.	D

- ESTRUCTURA A.- Para la mayoría de los hierros predominantemente Perlíticos. También se utiliza para revelar células Eutécticas con un ataque profundo.
- ESTRUCTURA B.- Es recomendable para hierros predominantemente Ferríticos cuando el límite de grano necesita ser observado.
- ESTRUCTURA C.- Las muestras preparadas ⁽⁸⁹⁾ se sumergen en la solución unos pocos minutos para hacer emerger las células Eutécticas.
- ESTRUCTURA D.- Es el reactivo más comunmente usado para revelar las células Eutécticas es aplicable para la mayoría de los hierros. Oscurece selectivamente las regiones de bajo fósforo dejando las regiones de alto fósforo (generalmente segregadas en el límite de grano) inatacadas.

**3.11. METODO DE EVALUACION MEDIANTE LA CUÑA
DE TEMPLE.**

3.11.- METODO DE EVALUACION MEDIANTE LA CUÑA DE TEMPLE.

El efecto de la reducción⁽⁸⁹⁾ al blanqueo forma la base de la mayoría de las pruebas de control de la inoculación.

Las secciones mas delgadas en una pieza normal de fundición requiere de un inoculante mas enérgico, o bien, de mayor cantidad. en piezas de secciones variadas la inoculación debe estar siempre considerada en base a la sección mas angosta de la pieza.

Una cuña moldeada en arena o un pequeño bloque moldeado en arena se puede manufacturar antes y después de la inoculación. Entonces las piezas de prueba se fracturan y el cambio en la cantidad de la zona blanca es una medida de la distribución, en el éxito del tratamiento.

Estos métodos de la prueba de templeado se aplican a hierros Grises que se desean libres de zona templada en la solidificación y para hierros templados que van a tener una penetración de temple específica.

Existen varios modelos para obtener cuñas moldeadas en arena. Las plantas de fundición adquieren alguna basándose principalmente en sus condiciones de operación, tipo de hierro que se produce, capacidad de la planta, entre otras condiciones que limitan al modelo.

Para este trabajo se ha diseñado un modelo nuevo que posiblemente en algun futuro pueda ser adoptado por la Industria.

El diseño de este modelo se tomó como base el criterio de tener dos piezas con objetivos diferentes.

Una que sería para extraer análisis químico y metalográfico y la otra es la cuña de temple, que deberán obtenerse a partir del mismo metal líquido para evitar variaciones en la composición química y condiciones de colada.

La probeta que revela el análisis químico y metalográfico es un cilindro como muestra la figura 3.2 .

La cuña de temple es un prisma triangular como muestra la figura 3.2, a esta se le ha agregado un paralelepípedo que servirá como un proveedor de metal líquido durante la solidificación de la cuña de temple.

Las dimensiones de cada una de las piezas fueron consideradas con el propósito de obtener una relación entre sus volúmenes aproximadamente iguales. Esta consideración se tomó para asegurar que las dos masas solidifiquen con la misma velocidad, dadas las condiciones de extracción de calor de la arena. Y de esta manera poder predecir en un momento dado, que la estructura observada y la composición química en la probeta cilíndrica va a ser igual a la obtenida en la cuña de temple.

El sistema de alimentación se procuró hacer lo más simple posible donde solo existe un solo corredor y un canal principal de alimentación, con su respectivo vertedero.

Las dimensiones de estos componentes están dadas por las relaciones $A_1 > A_2 > A_3$ donde A_1 es el área mayor del canal principal de alimentación, A_2 es el área menor del canal principal, haciéndolo de esta manera ligeramente cónico y A_3 es el área del corredor. La relación asignada a estas áreas son 2:1.75: 1 respectivamente. Además que los componentes del modelo tienen la consideración de un ángulo de salida de 3° .

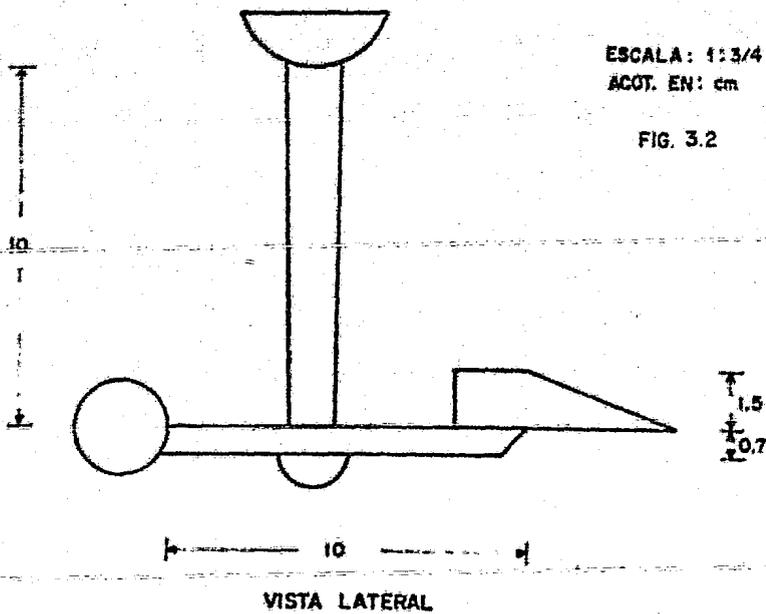
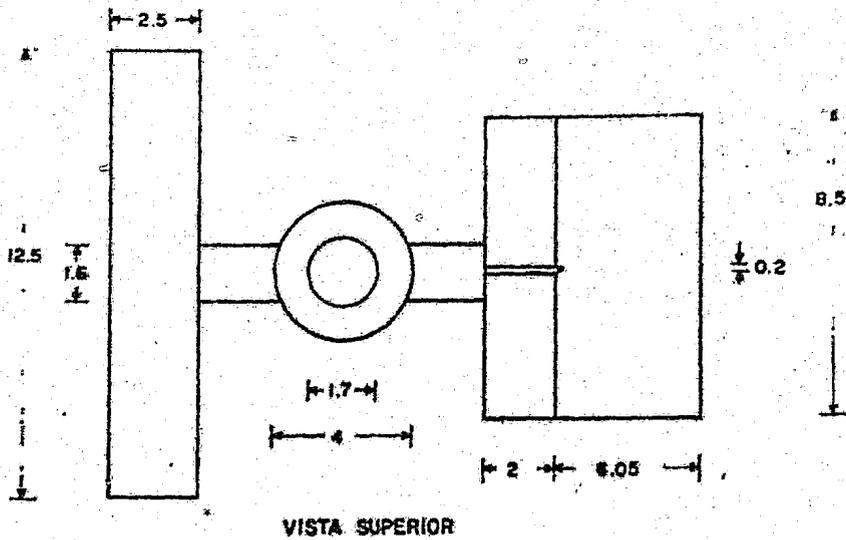


FIG. 3.2 MODELO DISEÑADO PARA LA OBTENCIÓN DE HIERRO GRIS.

Los moldes en arena se obtienen a partir de este modelo donde es vertido el metal líquido.

De este modo se obtienen dos moldes donde se cuela el patrón de blanqueo y el hierro inoculado posteriormente.

De modo que se obtienen dos cuñas de temple las cuales se fracturan y se obtiene un marco de referencia entre la pieza inoculada y la no inoculada.

Como antes se hizo mención, existen diferentes tipos de cuñas para la evaluación de la eficiencia de los inoculantes, a continuación se describen dos de los métodos⁽⁹⁰⁾ mas usados Industrialmente.

Método "A" se refiere al uso de la cuña de temple; en la cual la selección de un espécimen con dimensiones apropiadas dará medidas de la tendencia al temple de toda una variedad de Hierros Grises. Con la excepción de aquellos que contienen Silicio mucho mayor al 2.5% junto con un contenido mayor de 3.5% de Carbono.

Los patrones para los especímenes de prueba deben ser metálicos con las dimensiones que muestra la figura 3.3.

El patrón debe ser montado en una caja que se llena con arena hasta que el núcleo se encuentra completamente rodeada por ella. En tal posición que su longitud sea vertical. Los núcleos pueden ser simples o un juego de varias piezas.

La arena base será de tal fineza que la pieza obtenida sea lisa. Una arena satisfactoria puede ser alrededor de 70 A.F.S. (American Foundryman's Society).⁽⁹¹⁾

El espécimen debe ser colado a una temperatura uniforme.

Y tener cuidado para obtener piezas representativas del hierro líquido total.

Si el tiempo es un factor importante de aplicaciones de control, el espécimen puede ser templado en agua tan pronto como ha solidificado completamente.

Si la velocidad de la prueba no es importante el espécimen de prueba puede ser enfriado en el molde o en el aire. Inmediatamente después, quebrar la cuña golpeando con un martillo de tal manera que la fractura se obtenga a lo largo de su longitud.

Si la cuña es medida en la unión de la fractura gris con la primera apariencia de la zona blanca. La medida se designa como temple total.

Para propósitos de control de estructuras es generalmente satisfactorio medir la cuña donde la estructura es aproximadamente el 50% blanco y 50% Hierro Gris.

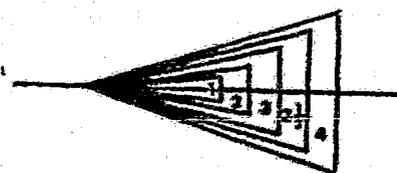
El método "B" habla de la prueba de temple de una palanquilla. Este método esta mejor adaptado que el método "A" para hierros que contienen Silicio de 2.5% o mas y 3.5% de Carbono o mas. Este método tambien es ampliamente usado para propósitos de control en la fundición de alta producción.

Los patrones deben ser metálicos conforme a las dimensiones que muestra la figura 3.4 .

Si se desea que la prueba sea rápida, el espécimen puede ser templado en agua. Comenzando por el lado más alejado del borde delgado.

DIMENSIONES DE LAS CUÑAS

CUÑA Nº	B mm	H mm	A. grad.	long. mm
W 1	5.1	25.4	11.5	101.6
W 2	10.2	31.8	18	101.6
W 3	19.1	38.1	28	101.6
W 3 1/2	25.4	44.4	32	127.0
W. 4	31.8	50.8	34.5	152.4



SECCION TRANSVERSAL DE LAS CUÑAS

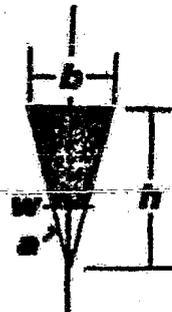
W NO DEBE EXCEDER DE $B/2$ 

FIG. 3.3

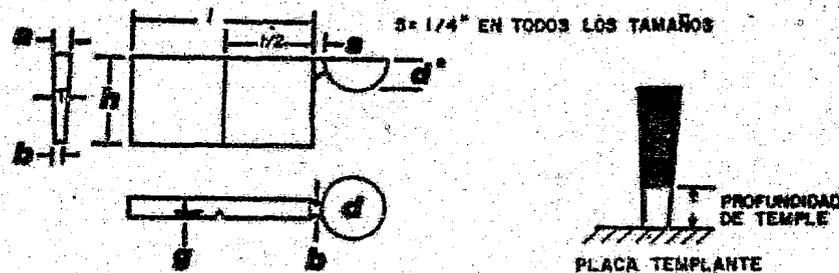


FIG. 3.4

DIMENSIONES RECOMENDADAS

PRUEBA No.	T (mm)	A (mm)	B (mm)	H (mm)	L (mm)	D (mm)	D ^o (mm)	G (mm)	※
1 C	4.8	6.4	3.2	31.8	63.5	19.0	12.7	0.8	3.3-13.3
2 C	6.4	7.9	4.8	38.1	76.2	22.2	12.7	0.8	4.4-17.7
3 C	9.5	12.1	7.9	44.4	88.9	22.2	12.7	1.6	6.6-26.5
4 C	12.7	14.3	12.1	50.8	101.6	25.4	15.9	1.6	8.8-35.3
5 C	19.0	20.6	17.5	63.5	127.0	25.4	15.9	2.4	13.3-53.0

※ RANGO RECOMENDADO DE PROFUNDIDAD DE TEMPLE

※※ T / 2 a 2 T.

3.12.- METODO DE:

EVALUACION DE CELULAS EUPECTICAS

3.12.- EVALUACION DE CELULAS EUTECTICAS.

En los últimos años ⁽⁹³⁾ el grado de nucleación y el número de células Eutécticas por unidad de volumen de una fundición han sido demostradas por la influencia de un número de propiedades de los Hierros Grafilaminares y de aquí, se ha generado un interés en la evaluación de las células Eutécticas en representación de la calidad de la fundición y para propósitos de control.

En los hierros con suficiente fósforo, el fosforo Eutéctico (esteadita) se precipita en el evolvente, y este incrementa el espesor de la malla en una banda.

Muchas de las variaciones pueden ser adscritas a las variaciones en el grado de nucleación del líquido. Tales propiedades han sido encontradas, incluyendo propiedades mecánicas, tendencia al blanqueo, picaduras y porosidad.

El número de núcleos por unidad de volumen del hierro, del cual las células crecen, ha sido denominado como el grado de nucleación.

Un método ideal debe incluir el número de células Eutécticas por unidad de volumen de la muestra examinada.

Esto no puede darse directamente pero existen métodos para calcular este número del conocimiento del número en una área unitaria de la superficie de corte.

Tres métodos ⁽⁸⁸⁾ son usados comunmente, llamados conteo de área ⁽⁹²⁾, conteo lineal y cartas de comparación ⁽⁹³⁾.

De estos, las cartas de comparación es obviamente el método mas simple y rápido, de aquí que este método no involucra ningún proceso de conteo.

El conteo por área consiste en superponer una hoja -

transparente previamente delineada con una área cuadrada lado, sobre la pantalla del microscópio; midiendo cada área unitaria una pulgada por lado (fig. 3.5) el conteo se calcula de la siguiente manera

$$\frac{\text{No. de células}}{\text{Pulgada cuadrada}} = \frac{\text{Número de células en el cuadro}}{(\text{Longitud aparente de un lado del cuadro en pulg.})^2}$$

El conteo lineal involucra el conteo del número de células cortadas por la líneas del trazo de una rejilla en la superficie de la pantalla del microscópio.

$$\frac{\text{Células}}{\text{Pulgada}} = \frac{\text{No. total de células contadas.}}{\text{No. de líneas} \times \text{longitud aparente de cada línea (pulg.)}}$$

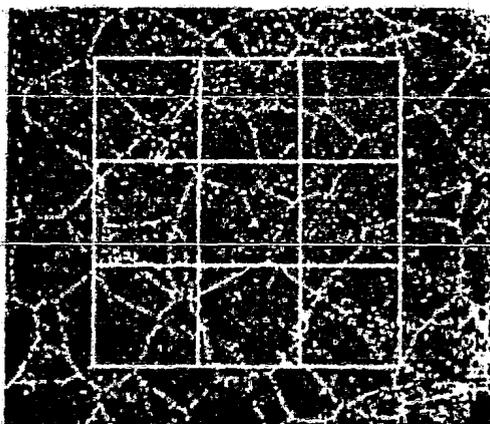


FIG. 3.5. Rejilla para el conteo de células eutécticas - superpuesto en una muestra que tiene un promedio de 18.5 células/pulg. lineal o 168 células/pulg.².

4.- RESULTADOS.

4.1.-- VARIABLES Y PARAMETROS.

4.1.- VARIABLES Y PARAMETROS.

El desarrollo de este trabajo incluye el control de algunos Parametros y la atención en el uso de las variables que se determinaron en la sección 2 de métodos y materiales. Para obtener una relación objetiva y poder mostrar la manera en que fué planeada la práctica de fundición e inoculación, las coladas se han ordenado de la manera como lo indican los siguientes puntos.

4.1.1.- PATRON DE BLANQUEO.

En estas fundiciones se logró obtener una cufia completamente blanca en toda su extensión, a partir de la carga metálica antes determinada, y bajo las condiciones que muestra la tabla 4.1.

4.1.2.- DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE INOCULANTE.

Las siguientes fundiciones determinan la cantidad optima de inoculante para obtener buenos resultados de inoculación, (ver tabla 4.2.).

4.1.3.- DETERMINACION DEL TAMAÑO DE PARTICULA.

Las siguientes fundiciones determinan el tamaño de partícula que debe ser usado para las fundiciones posteriores, (ver tabla 4.3.).

TABLA 4.1 PATRON DE BLANQUEO

No. Colada	Inoculante	Cantidad %	Tamaño de Partícula	Temp. de Sobre calentamiento	Temp. de Co lada	Temp. de Ino culación
0101	—	—	—	1612°C	1477°C	—
0102	—	—	—	1612°C	1477°C	—

TABLA 4.2. DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE INOCULANTE.

No. Colada	Inoculante	Cantidad %	Tamaño de Partícula	Temp. de Sobre calentamiento	Temp. de Co lado	Temp. de Ino culación
0102	_____	_____	_____	1612° C	1496° C	_____
0202	A77-M3	1%	-8+18 Mallas	1612° C	1439° C	1439° C
0103	_____	_____	_____	1612° C	1496° C	_____
0203	A77-M3	0.5%	-8+18 Mallas	1612° C	1439° C	1439° C
0104	_____	_____	_____	1612° C	1496° C	_____
0204	A77-M3	0.25%	-8+18 Mallas	1612° C	1439° C	1439° C

TABLA 4.3. DETERMINACION DEL TAMAÑO DE PARTICULA.

No. Colada	Inoculante	Cantidad %	Tamaño de Partícula	Temp. de Sobre calentamiento	Temp. de Co lado	Temp. de Ino culación.
0105	_____	_____	_____	1612° C	1496° C	_____
0205	477-M3	0.25%	- 8+18	1612° C	1439° C	1439° C
0106	_____	_____	_____	1612° C	1496° C	_____
0206	477-M3	0.25%	-18+30	1612° C	1439° C	1439° C
0107	_____	_____	_____	1612° C	1496° C	_____
0207	477-M3	0.25%	4+8	1612° C	1439° C	1439° C

4.1.4. TIPOS DE INOCULANTE.

Las siguientes fundiciones muestran el uso de los diferentes inoculantes probados y sus condiciones de co-
lada, como se especifica en la tabla 4.4.

No. Colada	Inoculante	Cantidad %	Tamaño de Partícula	Temp. de Sobre calentamiento	Temp. de Co lada	Temp. de Ino culacion
0107	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0207	A77-M3	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C
0108	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0208	Inoculoy-63	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C
0109	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0209	SMZ	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C
0110	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0210	Funco	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C
0111	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0211	Vulcano 2	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C
0112	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0212	Vulcano 3	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C
0113	_____	_____	_____	1612°C	1496°C	_____
0213	Vulcano 4	0.25%	-4+8	1612°C	1439°C	1439°C

TABLA 4.4. TIPOS DE INOCULANTES

4.2.- PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA
CUÑA DE TEMPLE.

4.2.- PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE TEMPLE.

Como se describe en el capítulo 2 de métodos y materiales, las cuñas son fracturadas y se observa el aspecto de las mismas, para conocer la cantidad de la zona templada, en esta cuña se ha tomado como punto de referencia específicamente el extremo mas delgado, de tal modo que la medida del temple se hará a partir de este punto.

La zona templada se tomará entonces, como la zona -- blanca, brillante hasta el area donde aparece la zona de transición o atruchada. Las medidas obtenidas por las cuñas de temple son las que enlista la tabla 4.5.

TABLA 4.5. PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE TEMPLE.

Fundición Nº.	0101	0201	0102	0202	0103	0203
Penetración (cm)	6	6	6	0	6	0
Fundición Nº.	0104	0204	0105	0205	0106	0206
Penetración (cm)	6	0	6	0	6	0
Fundición Nº.	0107	0207	0108	0208	0109	0209
Penetración (cm)	6	0	6	0.3	6	0.3
Fundición Nº.	0110	0210	0111	0211	0112	0212
Penetración (cm)	6	1.8	6	1.8	6	1.0
Fundición Nº.	0113	0213				
Penetración (cm)	6	4.0				

A CONTINUACION SE MUESTRAN ALGUNAS CUÑAS REPRESENTATIVAS
DE LAS FUNDICIONES EFECTUADAS:



FOTO 4.1 . ESTANDAR DE
BLANQUEO.

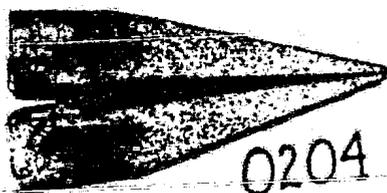


FOTO 4.2 VARIACION EN LA
CANTIDAD DE INOCULANTE.



FOTO 4.3 VARIACION EN EL
TAMAÑO DE PARTICULA.

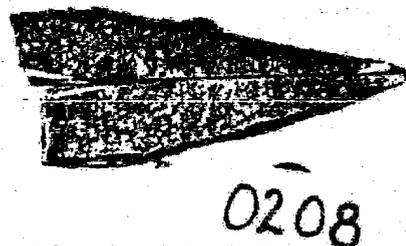


FOTO 4.4. EFECTO DEL INOCULANTE
INOCULLOY 63.

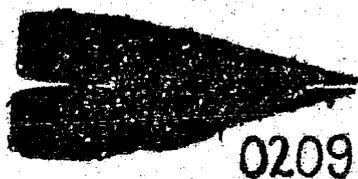


FOTO 4.5 EFECTO DEL INOCULANTE
SMZ.

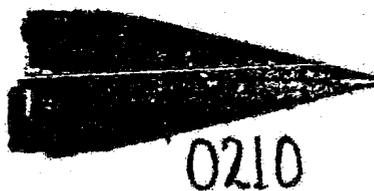


FOTO 4.6 EFECTO DEL INOCULANTE
FUNCO.

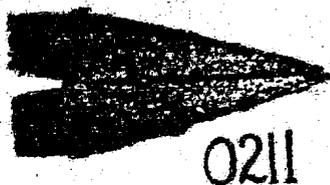


FOTO 4.7 EFECTO DEL INOCULANTE
VULCANO -2.



FOTO 4.8 EFECTO DEL INOCULANTE
VULCANO-3.

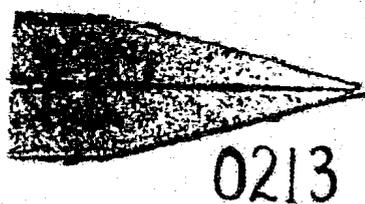


FOTO 4.9 EFECTO DEL INOCULANTE
VULCANO 4.

4.3.- RELACION ENTRE LA CANTIDAD DE INOCULANTE Y
LA PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE-
TEMPLE.

4.3.- RELACION ENTRE LA CANTIDAD DE INOCULANTE Y LA PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE TEMPLE.

La interacción entre estas dos variables nos permite conocer que las tres cantidades probadas favorecen notablemente a la reducción del blanqueo, por tal motivo y por razones de economía se optó por el uso de menor cantidad. La figura 4.1 lo demuestra.

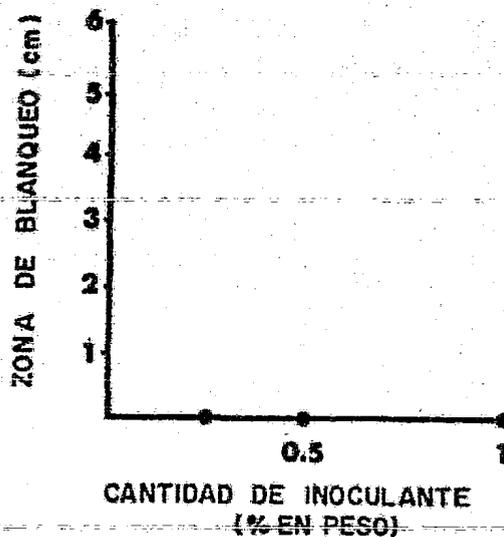


FIG. 4.1

4.4.- RELACION ENTRE EL TAMAÑO DE PARTICULA Y LA PENETRACION
DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE TEMPLE.

4.4.- RELACION ENTRE EL TAMAÑO DE PARTICULA Y LA PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE TEMPLE.

La relación que existe entre la granulometría de un inoculante y la eficiencia del mismo, es determinante en la mayoría de los casos ya que como se ha estudiado, ciertos tamaños específicos pierden su efecto en los instantes en que se trata el metal o por el contrario su efecto es tan lento que el resultado no se aprecia después de algún tiempo de su adición.

La figura 4.2 muestra la penetración del temple que produjo cada tamaño de partícula.

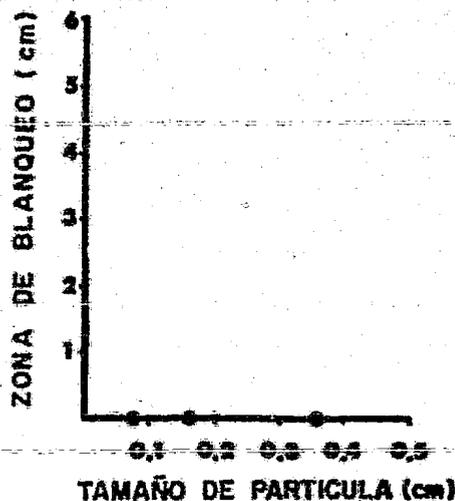


FIG. 4.2

4.5.- RELACION ENTRE EL TIPO DE INOCULANTE Y LA
PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE
TEMPLE.

4.5.- RELACION ENTRE EL TIPO DE INOCULANTE Y LA PENETRACION DEL BLANQUEO EN LA CUÑA DE TEMPLS.

La tabla 4.6 muestra la descripción y nomenclatura usada para distinguir a los inoculantes empleados. La gráfica de la figura 4.3 muestra el resultado de la longitud de la zona templada después de haber sido inoculados con los materiales inoculantes.

TABLA 4.6 NOMENCLATURA DE INOCULANTES

No.	No. DE COLADA	INOCULANTE.
1	0207	A77-M3
2	0208	INOCULLOY 63
3	0209	SMZ
4	0210	FUNCO
5	0211	VULCANO-2
6	0212	VULCANO-3
7	0213	VULCANO-4

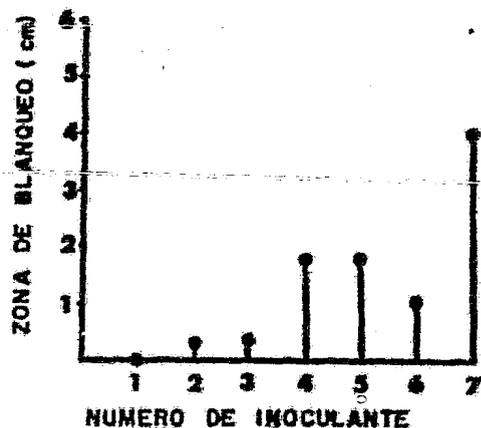


FIG. 4.3

4.6.- FORMA Y DISTRIBUCION DEL GRAFICO
Y TIPO DE MATRIZ.

4.6.- FORMA Y DISTRIBUCION DEL GRAFITO Y TIPO DE MATRIZ (93)

Las siguientes fotografias son representativas de las fundiciones efectuadas, mostrando a su vez la distribucion del Grafito y la matriz en que este se desarrolla.



FOTO 4.10 PROBETA 0207, X100, SIN ATAQUE, EN EL CENTRO. GRAFITO TIPO B Y EN ALGUNOS LUGARES TIPO A.

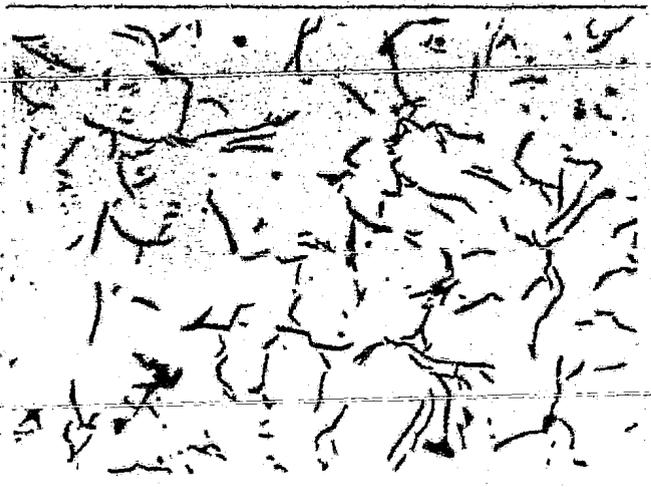


FOTO 4.11 PROBETA 0208, X100, SIN ATAQUE, EN EL CENTRO. GRAFITO TIPO A Y ALGUNOS LUGARES CERCA DE LA SUPERFICIE CON TIPO E.



FOTO 4.12 PROBETA 0209, X100, SIN ATAQUE, EN EL CENTRO. GRAFITO TIPO A Y GRANDES ZONAS CON UNA FORMA DE GRAFITO INTERMEDIA ENTRE "A" Y "B".

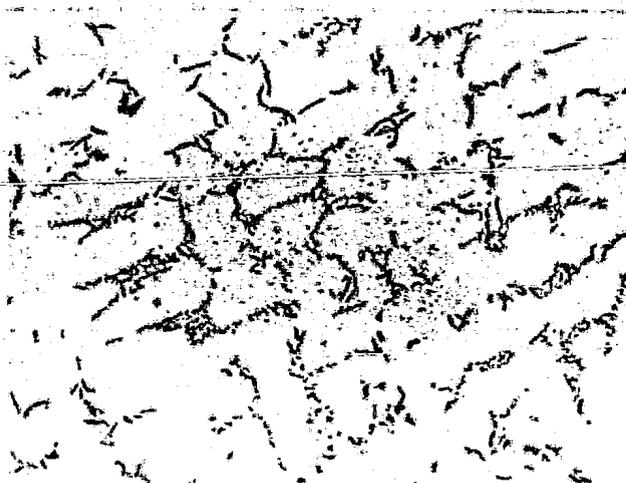


FOTO 4.13 PROBETA 0210, X100, SIN ATAQUE, EN EL BORDE, GRAFITO TIPO D, Y ZONAS MEZCLADAS B-D.

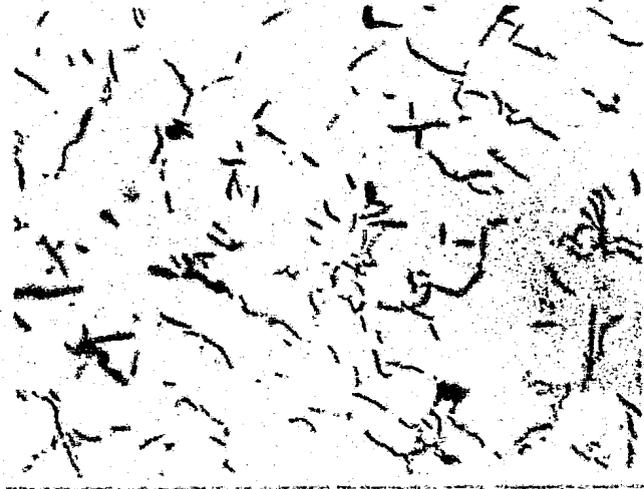


FOTO 4.14 PROBETA 0211, X100, SIN ATAQUE, EN EL CENTRO, GRAFITO TIPO B Y ZONAS ESCASAS DEL TIPO A.



FOTO 4.15 PROBETA 0212, X100, SIN ATAQUE, EN EL BORDE, GRAFITO TIPO B CON ZONAS DE GRAFITO INTERMEDIO A-B .



FOTO 4.16 PROBETA 0213, X100, SIN ATAQUE, EN EL CENTRO, GRAFITO INTERMEDIO A. B Y - TIPO INTERMEDIO ENTRE B Y D.

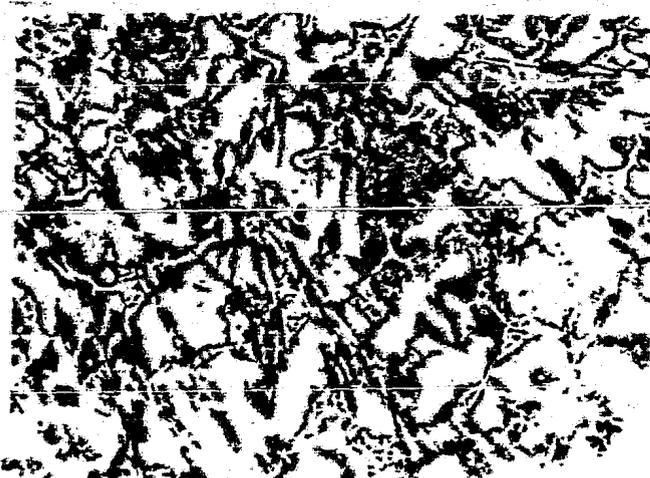


FOTO 4.17 PROBETA 0101, X100, ATAQUE PICRAL 4%, EN EL CENTRO, HIERRO BLANCO, MATRIZ PERLITICA, AUSTENITA (BLANCO), Y ALGUNOS LUGARES DE CEMENTITA (ZONA - BLANCA DELINEADA).



FOTO 4.18 PROBETA 0208, X100, PIGRAL 4%, EN EL MEDIO, GRAFITO MEZCLADO A - E, SOBRE UNA MATRIZ DE PERLITA FINA Y ALGUNOS PUNTOS DONDE ESTA ES GRANDE .



FOTO 4.19 PROBETA 0209, X100, PIGRAL 4%, EN EL MEDIO, GRAFITO TIPO A, MATRIZ DE PERLITA FINA.

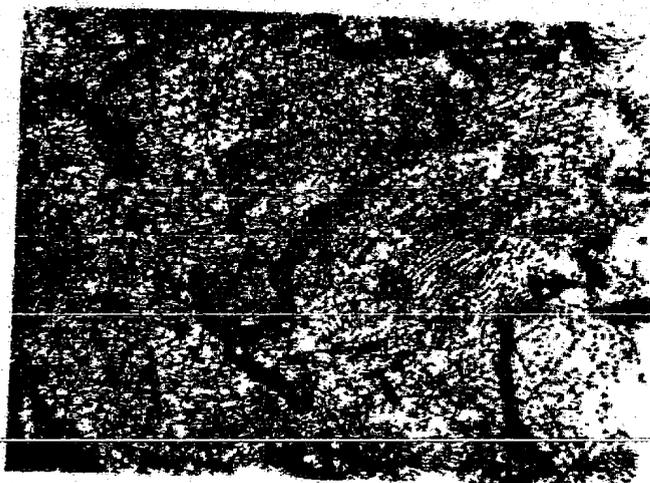


FOTO 4.20. PROBETA 0209, X400, PIGRAL 4%, EN EL CENTRO, GRAFITO TIPO A, MATRIZ DE PERLITA FINA.

4.7.- METODO COMPARATIVO DE CELULAS EUTECTICAS.

4.7.- METODO COMPARATIVO DE CELULAS EUTECTICAS.

Como se describió con detenimiento en capítulos anteriores, el conteo de células Eutecticas puede efectuarse de diferentes maneras.

En este estudio se utilizó solamente el método de comparación de cartas para encontrar la relación entre el inoculante usado y las células Eutecticas que es capaz de desarrollar, como un método práctico, utilizado industrialmente.

A continuación se observan algunas fotografías representativas, del total de especímenes tratados por este método.

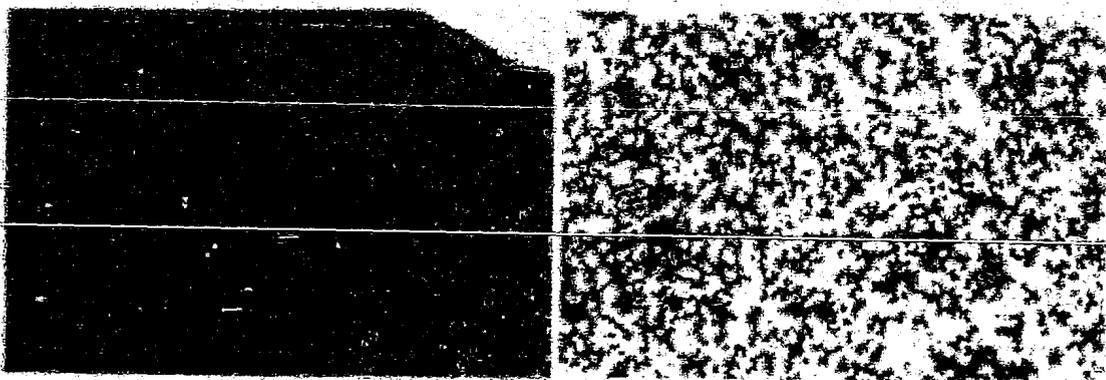


FOTO 4.21. Inoc. VILCANO-3 FOTO 4.22. Inoc. INOCUIOY 63

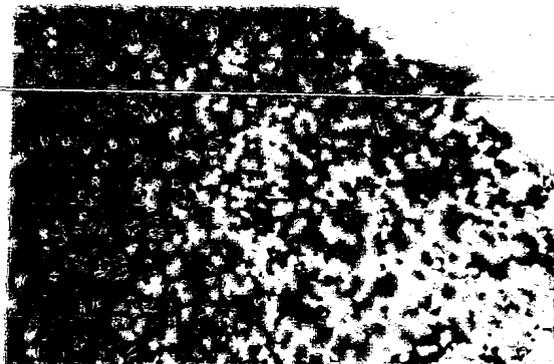


FOTO 4.23. Inoc. SMZ.

4.7.1.- RELACION ENTRE EL TIPO DE INOCULANTE Y LA CANTIDAD DE CELULAS EUTECTICAS.

Las células Eutécticas que se pueden desarrollar en la fundición de Hierro Gris está determinada por la eficiencia de inoculación que proveen los materiales inoculantes como se enuncia en el capítulo 2.

De esta manera podemos observar en la figura 4.4 la potencia inoculativa de tales materiales, pudiéndose comparar entre si su efecto dado por el desarrollo de células Eutécticas.

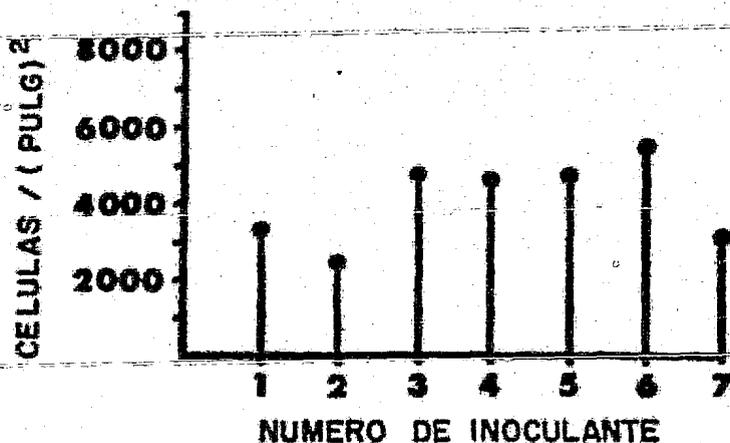


FIG. 4.4

5 DISCUSION .

5.1.- INTRODUCCION.

El proceso experimental de este trabajo está diseñado para extraer datos fieles del comportamiento de los Inoculantes seleccionados.

Con el propósito de que sean medidas comparativas para que el productor de Hierro Gris seleccione tales materiales en virtud de sus alcances macro y microestructurales y por ende mecánicos.

Este argumento es uno de los objetivos principales que este trabajo pretende, pero sin descuidar los métodos de evaluación que han sido usados, además del control de variables que industrialmente son limitantes.

Como es fácil observar, el experimento ha sido subdividido secuencialmente en cuatro etapas principales, como son: Obtención de la pieza estandar de blanqueo, efecto de la cantidad de Inoculante, efecto del tamaño de partícula y evaluación del efecto Inoculante.

5.2.- DESCRIPCION DE LAS VARIABLES DE PROCESO

En la sección 3.3 se establecen claramente las variables que se determinan en este trabajo.

En el apartado anterior se menciona que las variables a determinar son extremas, ya que por experiencia se ha decidido que sea de esta manera, dadas las condiciones de operación del horno y método de colada; los resultados dependen directamente de los Parametros determinados.

La temperatura de sobrecalentamiento⁽¹⁰⁾ se ha fijado alta, deliberadamente para que durante el tiempo -

transcurrido entre el fin de la fusión y el momento de la colada mantenga una temperatura apropiada para la Inoculación dado que el tiempo transcurrido entre estas etapas es relativamente largo.

En la Industria se obtiene el metal base a partir de chatarra de Hierro Gris de diferentes calidades, Arrabio, Acero, Ferroleaciones y carga no metálica, las concentraciones de cada elemento de carga es función de tipo de horno al que estos se agragan.

Para lograr la composición química que en el capítulo 3 se describe, se ha utilizado simplemente Arrabio y Acero de bajo Carbono, limitados así por las condiciones de diseño y operación del horno ⁽⁸⁵⁾ por ser un método simple de obtener Hierro Gris elaborado en un horno eléctrico.

Con respecto al horno de fusión se sabe que en el horno eléctrico se pierden con mayor facilidad los centros de nucleación ⁽²⁷⁾. De aquí que el resultado está en función de la manera en que el hierro es elaborado, por lo tanto obtenemos un hierro con mayor sensibilidad al temple ⁽¹⁰⁾ si este proviene de un horno eléctrico.

5.3.- EL MODELO DE PRUEBA.

La sección 3.11. habla ampliamente de las diferencias de diseño entre el modelo ideado para este experimento y los dos modelos principales adoptados por la Industria de la fundición de Hierro Gris. Pero hay que hacer notar que este modelo es lo suficientemente completo como para obtener diferentes datos que determinan la calidad del Hierro tratado bajo la Inoculación.

La Cúña de Temple da una extensión mas amplia del blanqueo el cual en el proceso de producción es mas facilmente perceptible a simple vista que los modelos propuestos, y una probeta metalográfica, sobre la cual puede practicarse los ensayos deseados, ya sean pulido y ataque, dureza, Células Eutécticas y tambien el desarrollo de pruebas mecánicas.

5.4.- SISTEMA DE MOLDEO.

La arena que se ha utilizado para lograr el buen desempeño del trabajo, es como menciona el capítulo 3. debido a que la manufactura de las piezas de prueba no exige un acabado estricto, estas se han elaborado con una arena solamente con Bentonita y agua en la proporción ya mencionada. Al hablar de los contenedores del molde hacemos referencia a las cajas de moldeo que han sido hechas de madera ya que de haberse utilizado otro material mas resistente implica que estas deben soportar una cantidad de producción mas alta y al mismo tiempo un tratamiento severo; se ha preferido la madera por ser un material barato y principalmente porque se utiliza en una muy baja producción de piezas.

El método que se adopta para obtener los moldes no es especial, sino es el que se usa a diario en fundiciones pequeñas o en otras, donde el trabajo de moldeo es manual.

5.5.- INOCULACION.

Como en un principio se menciona, el modo de Inoculación es en la Cuchara, pero el tratamiento que se le -

-ha hecho al metal líquido obtenido por nuestro método - ha sido modificado ligeramente, dado el procedimiento de obtención de piezas inoculadas y no tratadas. El método tradicional del tratamiento en la Olla hace referencia a la inoculación del baño metálico mientras el recipiente se va llenando ⁽³⁰⁾.

Tal modificación consiste en que el metal es inoculado después que el estandar ha sido llenado, en este momento se agrega, agitandolo para homogenizar la aleación líquida.

5.6.- OBTENCION DEL ESTANDAR.

La pieza no inoculada proporciona un marco de referencia para notar el efecto inoculante logrado en las piezas sometidas al tratamiento. Esta muestra el aspecto blanco en toda el area fracturada, la que metalográficamente esta constituida por Cementita, Austenita y lugares perliticos (ver fig. 2.1).

5.7.- CANTIDAD DE INOCULANTE.

Moore y Dawson ^(33,50) recomiendan usar cantidades de adición dentro del intervalo de 0.05% a 0.1% en peso. A la vez Remondino ⁽⁵¹⁾ recomendó usarlos desde 0.04% hasta 0.8%, estos puntos de vista estan basados en el tamaño de la partícula, el Inoculante que va a emplearse y sus condiciones de proceso.

Uno de los objetos principales de este trabajo es encontrar la cantidad optima de adición, teniendo presente la economía de este, dadas las condiciones de operación y los Parametros dispuestos.

De tal manera, al estudiar los resultados al respecto podemos afirmar que los datos obtenidos están de acuerdo con lo encontrado por los autores arriba mencionados.

5.7.1.- PROFUNDIDAD DE BLANQUEO.

Estudiando la figura 4.1 nos damos cuenta que practicando con tres cantidades diferentes de adición, estas nos llevan a obtener la misma cantidad de la zona templada, esto quiere decir que el Inoculante usado con un tamaño de Partícula dado, (2.38-4.76 mm) es tan eficiente usando 0.25% en peso que usando 1% en peso o una cantidad intermedia, por lo que la cantidad mínima experimentada fue la seleccionada para las operaciones subsiguientes.

Para evaluar esta variable es suficiente hacerlo por el método de la cuña de temple ya que este es un método confiable y al mismo tiempo la evaluación por algún otro método resulta tardado y redundante.

5.8.- TAMAÑO DE PARTICULA.

Tomando en cuenta la distribución granulométrica que se observa en los inoculantes probados, nos damos cuenta que el Inoculante que usa la Industria de la fundición no está uniformemente distribuido, es decir, existe una gran cantidad de finos los cuales son perjudiciales para la Inoculación, tal punto está confirmado por la teoría⁽¹⁰⁾, por lo que debería existir un control más apropiado al respecto.

La experiencia de inoculación con agregados sin seleccionar granulométricamente debe implicar un ligero exceso en cantidad, para contrarrestar el efecto nocivo de los finos.

5.8.1.- PROFUNDIDAD DE BLANQUEO.

Para saber como depende la extensión de la zona blanqueada en la Cuña de temple con respecto al tamaño de la Partícula del Inoculante, basta con observar la figura 4.2 donde se graficó tal relación.

En tal característica se reconoce la efectividad de algunos tamaños seleccionados dentro de la gama Granulométrica de los Inoculantes. Su efectividad radica en que los tres tamaños seleccionados conducen a una reducción máxima de la tendencia a templar. Dada esta efectividad mostrada por las Partículas, podemos concluir que cualquier tamaño seleccionado entre 0.59 a 4.76 mm darán una máxima reducción de la zona templada sobre la Cuña de Temple.

5.9.- EFICIENCIA DE LOS INOCULANTES USADO, EN BASE A SU COMPOSICION.

La sección 2.12 habla de la existencia de dos tipos de Inoculantes limitadas por su comportamiento⁽²³⁾ ya sean Grafitizantes o Estabilizadores de Carburos; esta característica es función de su composición química, de tal manera que los elementos constituyentes son los que proporcionan la habilidad de esta tendencia.

Al revisar los resultados y al conocer la composición de los Inoculantes que fueron probados (tabla 3.5)

se puede inferir la tendencia o deslindar el grupo en el que puede pertenecer cada uno.

Como se acaba de decir, los elementos pueden ser clasificados como promotores de Grafito o Cementita^(23, 94) dependiendo de sus efectos sobre el intervalo de las temperaturas de equilibrio Eutéctico de Austenita-Grafito y el Eutéctico metaestable Austenita-Cementita. De esta manera podemos inferir que los elementos Si, Ca, Al y Sr deberían ser incluidos en el grupo de los promotores de Grafito y el S y Cr como estabilizador de Carburos. Esta conclusión está de acuerdo con la revisión de los trabajos previos con respecto al Si⁽⁹⁴⁾ y Al^(95,96) como promotores de Grafito.

Si estudiamos estos elementos en relación a su posición en la tabla periódica de acuerdo a la clasificación establecida por Grigorovich⁽⁹⁷⁾, el Ca y el Sr junto con el Al y Si, son incluidos en la categoría de Grafitizantes mientras que el Azufre es considerado como formador de Carburos.

5.9.1.- FORMA Y DISTRIBUCION DEL GRAFITO.

La variación en la forma del Grafito creciente en la Célula Eutéctica esta determinada principalmente por la velocidad de crecimiento.

Quando las Hojuelas de Grafito son gruesas y el esqueleto del Grafito es frecuentemente fracturado, el crecimiento radial es lento.

Son numerosos y extremadamente complejos en su interacción los factores que pueden variar la estructura del Hierro a través del líquido, durante la solidificación. La estructura final procreada en una situación dada esta determinada por el balance alcanzado entre muchas variables interdependientes.

Cualquier factor o grupo de factores influyen en la estructura final por el efecto de nucleación y crecimiento de los sistemas estable y metaestable. El proceso de fusión, composición de la aleación, velocidad de enfriamiento e inoculación están entre la mayoría de los factores que afectan la estructura del Hierro Colado.

Todos estos factores y su interacción condujeron a los diferentes tipos de los patrones de Grafito observados en los especímenes presentados en este trabajo.

Sobre todo son predominantes el tipo "A" o la Hojuela normal de Grafito, el tipo "B", el tipo "E" y estructuras intermedias, (fotos 4.10,11,12,13,14,15,16).

5.9.2.- MATRIZ.

La tendencia seguida por la Microestructura de los especímenes no inoculados, se describen en general como un patrón similar en todos los especímenes examinados.

La foto 4.17 presenta una estructura representativa de las piezas no inoculadas. Mostrando una estructura característica de Hierro Blanco, la cual está constituida por una matriz Perlítica, Austenita y Cementita. Esta experiencia coincide con lo encontrado en la revisión de los trabajos previos, respecto a la composición del Hierro Gris (1,2,4).

Por otro lado, la promoción de una matriz predominantemente Perlítica se observa con la misma frecuencia a todos los Inoculantes usados. (fotos 4.18,4.19,4.20).

5.9.3.- PROFUNDIDAD DE BLANQUEO.

Se ha manejado el concepto de tratamiento de inoculación -

-dado al Hierro Colado, como un procedimiento para promover un aumento en la cantidad de Carbón Libre en forma de Grafito y por ende un aumento del área gris en la fractura de la Cufia de Temple entre otras propiedades, tal de finición se discute en la sección 2.6.

Los resultados estudiados en la sección 4.2 ayudan a la comprensión de este concepto y como resultado, en este trabajo se propuso un patrón de referencia del Blanqueo, es decir, se obtuvieron piezas no tratadas (estandar) a partir del mismo metal líquido para encontrar la relativa mejoría en los puntos estructurales arriba tratados.

La proposición de la forma de obtener estos datos coincide ⁽²⁸⁾ con Reifersheid ⁽³⁰⁾ y con B.C.I.R.A. ⁽⁷⁷⁾.

Mas adelante se observa en los resultados la interacción que existe con respecto a la cantidad de Inoculante, el tamaño de Partícula y la influencia de algunos Inoculantes sobre la penetración de la zona templada. Algunos ~~autores~~ ⁽²⁷⁾ mencionan que la cantidad de inoculante está ligado intimamente a la sección de la pieza, es decir, que para las dimensiones de una pieza dada, diferentes cantidades de adición darán una profundidad de blanqueo-relativa a su concentración.

Con respecto a los Inoculantes probados en relación con el aumento del área Gris en la Cufia de temple, podríamos dar en orden decreciente la aptitud del inoculante a disminuir la zona templada: A77-M3, Inoculoy 63, SMZ, Vulcano 3, Fanco y Vulcano-2 en la misma proporción y Vulcano-4 es el que reduce en menor cantidad la zona templada.

5.9.4.- CELULAS EUTECTICAS.

5.9.4.1.- INTRODUCCION

El efecto de la Inoculación sobre la promoción del grado de nucleación, puede explicar el incremento en los centros de nucleación, y de aquí, el número de Células Eutecticas. La composición de la aleación Inoculante puede actuar como un medio en el cual la interacción entre sus elementos realiza el número de núcleos crecientes.

5.9.4.2.- INOCULANTE A77-M3.

Puede consultarse la tabla 3.5 para conocer la composición química de estos Inoculantes.

Este Inoculante resultó promover 3566 Células/pulg². lo cual puede ser explicado por su composición; tal material tiene semejanza con el Inoculante Si-Mn-Zr de la tabla 2.2 que fué estudiado por algunos autores (23). El Inoculante probado resultó estar enmarcado dentro de los materiales Grafitizantes como la teoría lo ha delimitado.

5.9.4.3.- INOCULANTE INOCULOY 63.

Este Inoculante también presenta gran similitud con el Inoculante Si-Mn-Ca-Ba que es a su vez un material dominantemente Grafitizante, ha sido enlistado en la tabla 2.2.

El Inoculoy 63 es semejante al material anterior, en cuanto a los elementos contenidos pero en cuanto a concentración no podría decirse lo mismo ya que el bario actúa de una manera parecida al calcio, y por tal razón es-

un agente nucleante bastante fuerte.

5.9.4.4.- INOCULANTES SMZ.

En vista de los resultados observados en la figura-4.4 el Inoculante "SMZ" produjo 4733 Células/pulg², es decir 1167 Células/pulg² mas que el Inoculante 477-M3 esta diferencia se puede explicar con respecto a su mayor contenido de Mn y Zr; ya que estos elementos son grandes promotores de núcleos ademas reducen considerablemente la tendencia al blanqueo.

Algunos autores⁽²³⁾ estan de acuerdo que un exceso en el contenido de Manganeso reacciona con el Azufre para producir MnS, existiendo el riesgo de quedar ocluido en el metal sólido.

Tomando en cuenta la cantidad de Mn ya existente en el Hierro^(69.72) este podría llegar a ser un problema de consideración.

5.9.4.5.- INOCULANTE FUNGO.

Este Inoculante no presenta una composición común a algún material de los grupos señalados por las investigaciones hechas por varios autores⁽²³⁾, pero dada su composición se puede decir que se trata una vez más de un Inoculante Grafitizante, porque como se puntualizó anteriormente, el Silicio es el elemento Grafitizante por excelencia y el Circonio por su parte es un buen promotor de núcleos, entre otras ventajas. La presencia de carbón libre asegura que este Inoculante debe ser deslindado de cualquier otro grupo.

5.9.4.6.- INOCULANTE No.2 VULCANO.

El número de Células Eutécticas producidas por este Inoculante no ha sido aumentado considerablemente con respecto a los Inoculantes anteriores, ya que haciendo referencia a su composición de una forma u otra este mantiene una relación paralela a los Inoculantes mencionados.

5.9.4.7.- INOCULANTE No. 3 VULCANO.

Tiene una semejanza aparente con el Inoculante estándar fe-Si 50% clasificado como Grafitizante, el cual muestra su composición en la tabla 2.1.

El Inoculante fe-Si 50% no se usa ampliamente para controlar la estructura del Grafito; la discrepancia en el contenido de Aluminio y Calcio, del Inoculante No.3 Vulcano, es para asegurar el efecto Grafitizante, tal característica esta de acuerdo por lo encontrado por la teoría^(95,96) donde se asegura que el Aluminio es un buen Grafitizante y gran reductor de la habilidad al templado y a la vez gran productor de núcleos para el crecimiento Eutéctico. se menciona también que el Calcio⁽³⁹⁾ es un enérgico desoxidante y desgasicante pero por el contrario un exceso de este elemento causa problemas por inclusión, por tal motivo este Inoculante debería contener de 0.80% a 1.25% de Ca.

5.9.4.8.- INOCULANTE No.4 VULCANO

El Inoculante No.4 Vulcano tiene una capacidad productora de Células Eutécticas semejante al Inoculante A77-M3 pero no de esta manera con respecto a la penetración de la zona templada; tal experiencia confirma lo-

-tiene lugar; por otro lado la Granulometría de las Partículas a su vez, tiene su influencia sobre la Grafitización del Hierro Colado, ya que como se ha estudiado, no toda la variedad de dimensiones de las Partículas existentes en una porción agregada actúa de la misma manera. En este trabajo se encontró la interacción que tiene este fenómeno con la posible reducción de la zona templada procurando dejar claro que las Partículas de 0.59 mm a 4.76 mm actúan eficazmente respecto a la promoción de núcleos de crecimiento Eutéctico, dada su velocidad de solución, dejando al margen las Partículas de tamaños menores o mayores de este intervalo.

Al encontrar el intervalo arriba mencionado y observando la Granulometría de la muestra de Inoculantes del mercado, podemos señalar que es necesario una reducción de finos y Partículas de difícil solución, aunque de manera adversa esta medida puede incrementar el precio de tal material.

La manera de Inocular al metal, sufrió ligeras modificaciones debido a la manera en que se obtuvieron las piezas. Este cambio resulta ser el mejor método por las condiciones necesarias para la obtención de las piezas. Para los requerimientos que esta experiencia exigía, el método resultó ser el más apropiado, pues así lo confirman los resultados. De tal manera que los Inoculantes pueden agregarse a la superficie del metal, homogenizarse y disolverse efectivamente, para realizar su cometido.

Por los resultados observados y por la composición química constituyente de la muestra de Inoculantes se puede llegar a la conclusión que los materiales usados en las fundiciones de producción de Hierro Gris son netamente Grafitizantes.

El fundidor tiene la libre opción de seleccionar el Inoculante más adecuado a sus necesidades internas por - el compromiso de obtener piezas de mejor calidad con una reducción en los costos de producción, el presente trabajo se dio a la tarea de obtener una clasificación de los Inoculantes representativos en la Industria de la fundición con bastante éxito por lo que en el futuro será un problema menos difícil de resolver.

6.- CONCLUSIONES

6.- CONCLUSIONES.

- a) Se logró un patrón de referencia completamente blanco en toda su extensión. Observando sus condiciones de colada se nota una alta temperatura de sobrecalentamiento ya que esto es un motivo para que los centros disponibles para la nucleación se pierdan, y la gran mayoría de la estructura solidifique en forma de Carburos.
- b) Al experimentar sobre la cantidad de Inoculante que debe agregarse se recomienda el uso de 0.15% A 0.30% en peso de la masa total de Hierro que va a tratarse. Observando que si se usa 1% 00.75% hay una sobreinoculación por lo que el mínimo debe ser usado.
- c) La Granulometría estandar de los Inoculantes es muy variada. En algunos la mayoría de las Partículas son finas y en otros gruesas, en los experimentos se ha demostrado que las Partículas finas y muy gruesas no son recomendables para una buena Inoculación. Se recomiendan Partículas dentro del intervalo 0.59mm-4.76mm intermedio al arriba mencionado.
- d) Al observar los resultados referentes a la acción que tienen los Inoculantes sobre la reducción de la tendencia al temple, nos damos cuenta que cada Inoculante actúa de diferente manera sobre la reducción del temple siendo el Inoculante "Runco" y el "SM2" los más efectivos en este aspecto.
- e) Todos los Inoculantes resultaron ser buenos promotores de la matriz Perlítica. Estos Inoculantes son buenos promotores de Grafito tipo "A" pero en la mayoría de las estructuras se presentan combinaciones de varios tipos (A-B, B-D, A-D).

- f) El resultado del conteo de Células Eutécticas de cada Inoculante demuestra que no existe relación con la cantidad del blanqueo producida por su propia Inoculación.

La capacidad productora de Células Eutécticas de los Inoculantes se describe decrecientemente como sigue: Inoculante Vulcano-3 > Vulcano-2 > SMZ = Funco > 477-M3 > Vulcano-4 > Inoculoy 63. Siendo el Inoculante Vulcano-3 el que produjo mayor número de Células Eutécticas.

- g) Se obtuvo un modelo adecuado para la evaluación de sustancias Inoculantes, tanto Macro como Microestructuralmente.
- h) La clasificación de los Inoculantes debido a sus efectos en los Parametros antes estudiados aportan un criterio mas estricto cuando se llegue el momento de escoger el Inoculante adecuado para un fin específico.

7.- BIBLIOGRAFIA

REFERENCIAS.

- 1.- Howe, H.M.- the Metallography of Steel and Cast Iron. 1916.
- 2.- Boyles, A.- American Society of Metals, 1947.
- 3.- Howard, F.T. Merton, G.F., Foundry Engineering. 97-100.
- 4.-Hultgren, A. and Lindblom, Y.- Journal of the Iron and Steel Institute, 1954, 176, 365.
- 5.-Hillert and Subba Rao, V.V.,- The Iron and Steel Institute 1967, 204.
- 6.-Quintero, H.M.- Tesis-"Nucleation of Cast Iron"-University of Birmingham, 1980, 10 .
- 7.-Red-Hill, R.E.- Principios de Metalúrgia Física, 2o.Ed, 1979, 331-332, 506-507.
- 8.-Mecanismos de la Inoculación en las fundiciones-COLADA vol.11, No.12, 1978, pp.324-331.
- 9.-Boyles, A.- United States Pipe and Foundry Company 68-69
- 10-Colada, vol.9, No.3, 1976, pp. 77-83
- 11-Iron Casting Handbook- Gray and Ductile Iron Founder's Society Inc., 1971
- 12.-Eash, J.T.- Transactions A.F.A. 1941, vol 49, 887-910.
- 13.-Morrogh, H.-Transaction of American Foundryman's Society, 1962, 70, 449.
- 14.-Hughes, I.C.H. British Cast Iron Research Association, 1957, 7, 10.
- 15.-Merchant, H.D.-Transactions of the American Foundrymen's Society, 1961, 69, 973.
- 16.-Oldfield, W. et Al "the Solidification of Metals".- Iron and Steel Institute, pub.No.10 1967, 256.

- 17.-Hillert, M.,-Recent Research on Cast Iron-Gordon and Breach, N.Y., 1968,1.
- 18.-Pelhan, G., Kudarsko Metalurski Zbornik, 1960, No. 3, 227.
- 19.-Weiser, D.F. et Al,-Malleable Founder's Society, Cleveland 1964,
- 20.-Double, D.D., and Hellawell, A., Acta Metallurgica, 1969,17,1071.
- 21.-Double, D.D. and Hellawell, A., Acta Metallurgica, 1971,19, 1303
- 22.-Boyles, A., American Society for Metals, 1974.
- 23.-Inoculation of Cast Iron-N.M.L., Technical Journal vol.13, No.1, 1971, 19-26.
- 24.-Moldeo y Fundición año 3, No.15, feb. 1981.
- 25.-Merica, P.D., AIME Transactions, vol.125, 1937, 13-15.
- 26.-Burgess, C.O., Union Carbide and Carbon Research Laboratories, INC. Niagara Falls. N.Y.
- 27.-Illanes, Campillo, B.F.- Estudio Bibliografico-La Inoculación como tratamiento Metalurgico en la obtención de Hierro Gris. Curso Panamericano de Metalurgia. 1974-75, México.
- 28.-Técnica Metalurgica, 1974, vol. 29, No. 202, 21-36.
- 29.-Charbonnier, J.Y. and Marcerie, J.C.,-Fonderie, No.174, abril 1958, 157.
- 30.-Reifersheid, K.-Gießerie, 1967, 54, 621.
- 31.-Golada, vol.9, No.3, 1967, 77-78.
- 32.-Nieman, J.R.,-Transactions of the American Foundrymen's Society, 1967, 84, 175.
- 33.-Moore, A.- The British Foundryman, 1974, 67, 59.

- 34.-Sergeant, G.F.,-B.C.I.R.A. Developments, 1979, feb 6-7.
- 35.-Dawson, J.W., and Matra, S.- the British Foundryman
1967, 60, 177.
- 36.-Dawson, J.V.- B.C.I.R.A. Journal, vol.7, 1957, 2.
- 37.-Dawson, J.V., and Smith, L.W.- B.C.I.R.A. Journal.
vol.6 1956, 226.
- 38.-Barlow, T.E., and Coring, C.H. Transactions of American
Foundrymen's Society, vol.54, 1946, 545.
- 39.-American Foundrymen's Society, feb. 6-7, 1979.
- 40.-Moore, A.-Transactions of American Foundrymen's Society,
1973, vol.81, 268, 271.
- 41.-Dawson, J.V.- B.C.I.R.A. Journal, 1961, vol.9, No.2, 199.
- 42.-Mickelson, R.L.-Foundry, 1967, vol.95, No.6, 145.
- 43.-Dawson, J.V.-Modern Casting, 1966, vol.49, No.5, 171.
- 44.-Burgess, G.O. and Bishop, R.W.,-Transactions of A.F.A.,
vol.52, 1944, 671.
- 45.-Fuller, A.G.-B.C.I.R.A. Journal, 1958, vol.7, No.4, 157.
- 46.-Izmailov, V.A., and Vertman, A.A., Russian Casting Produc-
tion 1971, 30.
- 47.-Colada, vol.11, No.12, 1978.
- 48.-Francis, J.L., Applied Science in the Casting of Metals.
R. Straus, 1970, 159.
- 49.-Hillner, G.Fr., Transactions, A.F.S., 1975, 83, 167.
- 50.-Dawson, J.W., and Matra, S., the B. F-man, 1967, 60, 117.
- 51.-Remondino, E., and Pelastro, F., Intern. Cast Metals.
1975, 1, 39.
- 52.-Dawson, J.V., J.R.D., B.C.I.R.A., 1961, 2, 199.
- 53.-Lux, B. and Tannenberger,-Transactions of A.F.S. 1962,
70, 57.
- 54.-American Foundrymen's Society, Rosemant Ill, 1979, 6-7.
- 55.-Hillert and Subba Rao, V.V.-the Iron and Steel Institu-
te 1967, 7, 10.

- 56.-Morrogh, H.- the British Foundryman, 1960, 50, 221.
- 57.-Piwowarsky, E.-Transactions of the A.F.A., 1926, 34, 914.
- 58.-Massary, S.C. and Lindsay, R.W.-Transactions of the American Foundrymen's Association, 1942, 49, 953.
- 59.-Oldfield, W.-British Cast Iron Research Association, 1960, 8, 177.
- 60.-Williams, W.J.-British Cast Iron Research Association, 1952, 4, 403.
- 61.-Rickard, J.-British Cast Iron Research Association, 1957, 7, 23.
- 62.-Shea, M.M.-Transactions of A.F.S., 1978, 23.
- 63.-Boyles, A.- A.S.T.M. Standards, 1944, A-247, part.1.
- 64.-Symposium on Metal of Cast Iron, Geneva, Switz, 1974, may 29-31, 147.
- 65.-Lux, B. and Tannenberger, H.- Giesserei Techn. 1962, No.4, 14, 193.
- 66.-O Von Keil, Miestsche, R., Cegat, A. and Trenkler, A. Eisenhüttenwess, 1933, 7, 579.
- 67.-Blanok, G. Tyszkio, Z. and Takenaka, Y.-International Foundry Congress, Warsaw, 1965, report No.7.
- 68.-Hurum, F.-Transaction of A.F.S., 1952, 60, 834.
- 69.-Fuller, A.G., -British Cast Iron Research Association, 1957, 7, 800.
- 70.-Fuller, A.G.-British Cast Iron Research Association, 1957, 7, 157.
- 71.-Boyles, A.-American Society for Metals, 1947.
- 72.-Fuller, A.G.-British Cast Iron Research Association, 1957, 7, 725.
- 73.-Gilbert, G. N.-British Cast Iron Research Association, 1957, 7, 692.
- 74.-Oldfield, W.-British Cast Iron Research Association, 1961, 7, 692.

- 75.-Oldfield, W.- British Cast Iron Research Association,
1961,9,506.
- 76.-Dawson, J.V.-B.C.I.R.A., Journal. 1961,9,506
- 77.-British Cast Iron Research Association-Broadsheet
No.5, 1963.
- 78.-Hillert, M., and Steinhauser, H.-Jerncont. Ann.
1960,144,520.
- 79.-Dell, W.J., and Christ, R.J.- Transactions of A.F.S.
1964, vol. 7, 408.
- 80.-Karsey, S.I.-Transactions of A.F.S.1965, vol.73,204.
- 81.-Modern Casting.-1965, vol.47,124.
- 82.-Clark, R.A. and McCluhan, T.K.-Modern Cating, 1966,
vol. 50, No.3,88.
- 83.-Colada, vol. 9, No.3, 1979, 77
- 84.-Boyles, A.- United States, Pipe and Foundry Company,
Burlington, N.J., 45.
- 85.-Olvera, J.R., Meneses, C.L., Arreola, V.J.-Tesis-
Puesta en marcha del Horna de Inducción de la Facul-
tad de Ingenieria, Fac. de Ingenieria, UNAM, 1978,
163,134.
- 86.-Moore, J.C.-Metals Handbook, A.S.M., vol. 8, 91.
- 87.-Dawson, J.V., and Oldfield, W.-British Cast Iron Re-
search Association Journal, 1960, Vol 8, 224.
- 88.-B.C.I.R.A. Broadshast, No.5,1963.
- 89.-Standard Methods of Chill Testing of Cast Iron,-
A.S.T.M., Ansi/ASTM, A 367-6,1978,183.
- 90.-Foundry Sand Handbook, American Foundrymen's Society
- 91.-B.C.I.R.A. Broadsheet,94-1,1974.
- 92.-B.C.I.R.A. Broadsheet, 94-2,1974.
- 93.-Mehl, R.F.,-Metals Handbook, A.S.M., vol. 7,81.

- 94.--Oldfield, W. British Cast Iron Research Association,
1962,17,10.
- 95.--Lux, B. and Kurz, W.,-- the Iron and Steel Institute,
1967.193.
- 96.--Girshovich, N.G.--Russian Casting Production, 1966,
226.
- 97.--Grigorovich, V.K., Russian Casting Production, 1964,
557.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco sinceramente al Dr. Margarito Quintero - Nuñez por su apoyo y aliento en la realización de este trabajo además de sus conocimientos y experiencias que me fueron de gran ayuda para lograrlo. Al mismo tiempo doy gracias por su valiosa amistad.

También agradezco la ayuda y cooperación del Ing. Hugo Salazar, por brindarme su amistad y su tiempo en el desempeño experimental de esta tesis.

De la misma manera agradezco al Ing. Candido Atlante Tlapanco por su valiosa cooperación e interés en el buen desarrollo de esta tesis.

Asimismo agradezco su invaluable colaboración e interés a las Compañías Fosco, S.A. de C.V., Foote Mineral Inc., Funco, S.A., Vulcano, S.A. y a la Cía. Barromex, S.A., por sus apreciable donaciones.

Con gratitud a todos los maestros que desinteresadamente dedicaron su paciencia y conocimientos .

A los investigadores del area de Metalúrgia, empleados y compañeros tesisistas del I.I.M. que de alguna manera contribuyeron en el desarrollo de esta tesis.