

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE INGENIERIA**  
*Facultad de Ingeniería Geológica,  
Minera y Metalúrgica*



**Inoculación y Evaluación del Compor-  
tamiento de los Principales Inoculantes  
en el Hierro Fundido Gris**

**TESIS**

*Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Metalurgista*

**William Walter Castro Paredes**

PROMOCION 1984-2

**Lima-Perú  
1988**

Dedico el presente trabajo  
a mis padres y hermanos  
quienes con sus nobles sa  
crificios y sabios consejos  
me brindarán todo su apoyo  
y esfuerzo en bien de mi  
profesión.

A la memoria de mi hermano  
Hermenegildo.

A mi esposa e hijo que  
fuerón el incentivo ne-  
cesario y permanente ,  
para lograr la meta  
trazada .

## AGRADECIMIENTO

A los Ings. Rigoberto Sandoval S. y Alberto Landauro quienes me brindarán su asesoría en el presente trabajo.

Asi mismo agradezco profundamente a mis profesores universitarios de la especialidad de Ingeniería Metalúrgica, que establecieron las bases de mi formación académica para desarrollarme eficientemente en el campo profesional .



## INDICE

### " INOCULACION Y EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PRINCIPALES INOCULANTES EN EL HIERRO FUNDIDO GRIS "

PROLOGO.

#### CAPITULO I.

Pag.

INTRODUCCION.

1

#### CAPITULO II.

PROCESO DE FABRICACION DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO GRIS.

A.- INTRODUCCION.

5

B.- MODELOS.

6

C.- MOLDEO.

7

1.- Arena de sílice, Aglutinante y Aditivos.

a.- Arena silícea.

7

b.- Aglutinante.

9

c.- Aditivos.

14

2.- Preparación de las arenas para moldes.

19

a.- Arena de relleno.

20

b.- Arena de contacto.

23

3.- Preparación de las arenas para almas.

25

a.- Componentes de la arena para almas.

27



a.9.- Cálculo de la capacidad del Horno Rotatorio.	60
b.- Cuchara o callana.	64
c.- Materias primas.	74
d.- Control químico.	77
e.- Operación del Horno Rotatorio.	78
2.- Colada.	80
E.- PRODUCTO FINAL Y CONTROL DE CALIDAD.	
a.- Producto final.	82
a.1.- Enfriamiento y desmoldeo.	82
a.2.- Limpieza y acabado.	83
b.- Control de calidad.	84

### CAPITULO III.

#### INOCULACION Y EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PRINCIPALES INOCULANTES EN EL HIERRO FUNDIDO GRIS.

A.- GENERALIDADES.	87
B.- SOLIDIFICACION DEL HIERRO FUNDIDO.	89
1.- Mecanismo de la solidificación.	89
2.- Tendencia a la grafitización de un hierro fundido.	93
C.- MECANISMO DE LA INOCULACION.	100
1.- El grafito como inoculante.	101
2.- Función del ferrosilicio en la inoculación.	103

3.- Tipos de germenés.	105
a.- Carburos.	107
b.- Nitruros.	110
c.- Oxidos.	111
d.- Sulfuros.	112
4.- Disminución de la eficiencia del inoculante.	117
5.- Condiciones que deben tener el metal y el inoculante.	120
D.- EFECTOS DE LA INOCULACION EN HIERROS FUNDIDOS GRISES.	121
E.- FACTORES QUE INTERFIEREN EN EL RENDIMIENTO DE LA INOCULACION.	127
a.- Factores enlazados al inoculante.	128
b.- Factores no enlazados al inoculante.	131
F.- INOCULANTES Y SU USO EN LA FUNDICION GRIS.	134
G.- TECNICAS DE LA INOCULACION.	139
H.- TRABAJO EXPERIMENTAL.	142
1.- Trabajos preliminares.	142
2.- Trabajos realizados.	143
3.- Materias primas y equipos empleados.	145
4.- Productos empleados como inoculantes.	147
4.1.- Inoculantes.	148
4.2.- Uso de los inoculantes.	158

5.-	Proceso realizado para obtener las muestras.	158
5.1.-	Material utilizado.	158
5.2.-	Obtención de las muestras.	162
6.-	Ensayos realizados.	163
7.-	Resultados experimentales.	166
7.1.-	Introducción.	166
7.2.-	Discusión de resultados.	167
7.2.1.-	Ferrosilicio 75% e Inoculín - 25	175
7.2.2.-	Ferrocromo.	177
7.2.3.-	Cobre.	178
7.2.4.-	Bismuto.	179
8.-	Aplicación de algunos de los inoculantes en las piezas fundidas de hierro gris.	181
I.-	BREVES DATOS ECONOMICOS.	192
<u>CAPITULO IV.</u>		
	CONCLUSIONES.	195
	BIBLIOGRAFIA.	203
	ANEXOS.	

## PROLOGO

La presente tesis, es un trabajo de investigación sobre el uso de inoculantes en un hierro fundido gris, cuyo objetivo es de mejorar las propiedades mecánicas y físicas.

Este trabajo se realizó, debido a que existen piezas que deben cumplir regular y rigurosamente las especificaciones cada vez más ajustadas que marcan las normas. Dichas especificaciones están relacionados sobre la composición química, microestructura y propiedades mecánicas.

El presente trabajo se realizó en la empresa " FUNDICION MALEABLE, S.A. " ; esta fundición utiliza el Horne Rotatorio para fundir la materia prima y fabricar piezas de hierro gris, el cual se obtienen en moldes de arena.

El trabajo experimental no fue posible realizarlo a nivel de laboratorio, debido a que la fundición no cuenta con los equipos necesarios. Realizándose de esta manera, directamente en planta.

Quiero expresar mi agradecimiento al Gerente de Planta Ing. Carlos Crespo Peña y al personal que labora en la empresa, de hacer posible que se realice el presente trabajo.

Tambien quiero manifestar mi agradecimiento al Ing. Rigoberto Sandoval S. , de permitir hacer uso de las instalaciones del laboratorio de Metalúrgia Física.

WILLIAM CASTRO PAREDES.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo es de mejorar las propiedades mecánicas y físicas del hierro fundido gris, por medio de inoculantes.

La inoculación es un tratamiento que consiste en añadir pequeñas cantidades de ciertas sustancias a un metal líquido, provocando modificaciones físico - químicas distintas de las que producirían estas mismas sustancias como elemento de aleación. Los estudios referentes a efectos de inoculantes en una estructura y propiedades de hierros fundidos ha sido constante en la literatura técnica y los conocimientos adquiridos ha dado oportunidad a obtener no sólo mejores propiedades, sino también de facilitar el proceso productivo.

En el caso de hierros fundidos grises, ha sido usado el inoculante solo o combinado y muchas son las opciones existentes.

La ingeniería moderna exige un mejoramiento continuo en las propiedades mecánicas y físicas de los hierros fundidos, lo que conlleva al uso de inoculantes, que esencialmente es un método de controlar la forma y distribución del carbono depositado como grafito durante la solidificación y que afecta a la dureza y resistencia a la tracción.

La mayor parte de las fundiciones grises pueden ser mejoradas

con la inoculación. De ellas son especialmente las fundiciones hipoeutécticas, o sea, las que tienen un carbono equivalente entre 3.3 y 3.9 , las que responden mejor al tratamiento de inoculación.

Los hierros fundidos de alto carbono 3.9 a 4.3 , requieren normalmente una buena y consistente maquinabilidad. Esto es asegurado con la inoculación , así como el mantenimiento de óptimas propiedades mecánicas, en particular de la tenacidad; resultado que se van consiguiendo fusión tras fusión. Como que el volumen de grafito presente es mayor, la mejora en las propiedades mecánicas no será tan señalada como en los hierros de bajo carbono equivalente.

El uso combinado de inoculantes permite que actuen sobre los factores esenciales que caracterizan la calidad de un hierro fundido. Estos factores son:

a.- Grafito : Las dimensiones y la distribución de las láminas corresponden a la micrografías con grafito del tipo A .

b.- Microestructura : Eliminación de carburos y de ferrita secundaria. Grafito laminar orientado al azar en una matriz perlítica.

c.- Disminución de la profundidad de temple. Homogeneidad y aumento de la dureza. Resistencia a la tracción mejorada.



El presente trabajo experimental se hizo con la finalidad de evaluar el comportamiento de cada uno de los inoculantes solo o combinados y ver el efecto que tienen en la pieza metálica, sobre cada una de las propiedades.

Todo lo referente al estudio de los inoculantes se detalla en el capítulo III .

En el capítulo II , se detallan el uso de la arena de moldeo y su preparación mecánica, así también el uso de aglomerantes. Además la materia prima que se utiliza para la fusión en el Horno Rotatorio, y el proceso de fabricación de piezas.

Para la fabricación de piezas de fundición gris no utilizaban inoculantes, obteniendo como consecuencia piezas, cuyas propiedades no eran satisfactorios, y es a este motivo que se propuso para hacer el presente trabajo sobre el empleo de inoculantes.

Respecto a este capítulo II, debido a las demandas cada vez más exigentes en aplicaciones de la ingeniería y usos industriales, que requieren piezas mejor terminadas y de mayor precisión dimensional, es importante utilizar y conocer la información sobre la preparación de las arenas de moldeo, para obtener moldes cuyas propiedades y características requeridas soporten cualquier cambio físico y químico que ocurre como consecuencia de la rápida presencia del metal fundido durante la colada. Evitando así, la obtención de piezas inutilizadas o rechazadas con formaciones de rechupes, porosidades, sopladuras, darts, desprendimiento de arena, etc.

Las ventajas que las fundiciones ofrecen estan en parte seña  
ladas por sus propiedades físicas y mecánicas que son muy so  
licitadas en la industria; sin embargo, son igualmente impor  
tantes las ventajas inherentes a su fabricación. Es bien re  
conocida la capacidad de las fundiciones para ser producidas  
en cualquier número deseado con alta calidad y a un bajo pre  
cio.

CAPITULO IIPROCESO DE FABRICACION DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDOGRISA.- INTRODUCCION

En este capítulo, se trata de dar de una forma general, el proceso de fabricación de piezas de hierro gris que produce esta fundición.

Para terminar una pieza hace falta, como en todo los demás procedimientos industriales, someter las materias primas (que en este caso es el metal en bruto fundido en lingotes y la chatarra) y las materias auxiliares (esto es, el combustible, las arenas, los aglutinantes, etc.) a una serie ordenada de operaciones sucesivas.

Para la fabricación de piezas fundidas se emplearán el método de fundición en molde de arena.

El moldeo que se emplea es manual y mecánico (en su gran parte), y es de colada simple. Para la fusión se emplea el Horno Rotatorio. En el anexo hay un plano sobre el Horno Rotatorio.

El fundidor, para emplear los modelos contruidos según las normas descritas, ha de disponer de materiales a propósito para el moldeo y en primer lugar de arenas.

En este capítulo, se detalla las especificaciones del equipo de producción a utilizarse, así como el control del material que sale al final del proceso (acabado de la pieza metálica).

**B.- MODELOS.**

Para obtener el molde hay que emplear un modelo, que es por regla general, una fiel reproducción de la pieza (modelo al natural).

El modelo es un factor de mucha importancia en el proceso de fabricación y transmite sus caracteres al producto final, por esta razón debe poseer unas propiedades determinadas.

Los modelos son las principales herramientas utilizadas por el fundidor para producir las fundiciones requeridas por sus clientes. Debe tenerse mucho cuidado con la fabricación de los modelos, ya que estos van a determinar la forma y exactitud de las dimensiones deseadas en las piezas producidas.

Los modelos se fabrican de madera, pero en su mayoría son metálicas debido a que la cantidad a producir es relativamente grande.

Los modelos van fijados a una placa-modelo, esta placa a su vez sostiene al modelo, lo preserva de las deformaciones, de los deterioros en la fundición o en el almacén y evita que queden al arbitrio del moldeador la disposición del modelo en el molde y la disposición y dimensiones de los elementos de colada. Las placas modelos son de una sola cara; los modelos son de madera y otras son de aluminio.

Las placas son de planchas de hierro, cuando son piezas grandes, pero para piezas chicas la placa es de aluminio.

En cuanto a los servicios que se requería de la fundición, los clientes entregaban los diseños bien detallados y debidamente acotados.

En colaboración con la fundición, el modelista tenía que realizar la importantísima tarea de dar cuerpo a la pieza diseñada en el plano, confeccionando el modelo más resistente y duradero, del modo más económico y mas apto para la fundición. Si la pieza tenía algún hueco interior, el modelista hacía la correspondiente caja de machos, almas, núcleos o noyos.

Las cajas de machos son de madera, que consistían de dos o más partes, cuyo acoplamiento se aseguran con clavijas metálicas, colocadas de manera que eviten todo posible desajuste de las partes.

Las cajas de machos tienen las mismas exigencias que los modelos, pero pueden ser más fuertes y están menos sujetas a las acciones de los agentes externos.

### C.- MOLDEO.

#### 1.- Arena de sílice, Aglutinante y Aditivos.

##### a.- Arena silícea.

De una manera general se define a la arena como un mineral refractario cuyo tamaño de granos varían entre 0.05 y 2.0 mm. Pueden estar acompañados de minerales arcillosos en proporciones variables y de impurezas consideradas como perjudiciales para su empleo en fundición.

Cuando una arena de sílice tiene arcillas e impurezas normalmente inferiores al 2.0% se le llama silícea.

Hay dos tipos de arenas silíceas empleadas corrientemente:

- Arena silíceas natural. Tal como se encuentra en

el yacimiento (arena de lago, lecho del río, etc.).

- Arena lavada. Obtenida al eliminar por lavado, minerales arcillosos y parte de las impurezas.

En la formulación de las mezclas de la arena empleadas en la fabricación de moldes y almas, la arena silícea lavada se usa casi exclusivamente en la mayoría de las fundiciones.

El tamaño y la distribución del mismo (granulometría), en la arena silícea es una de las propiedades que más influyen en las características de un molde.

El fundidor no puede actuar sobre las propiedades mineralógicas ni morfológicas de arena pero sí, sobre sus propiedades granulométricas. Con una clasificación adecuadas por tamaños, se pueden obtener mezclas de arenas silíceas que satisfagan determinadas exigencias granulométricas impuestas por el fundidor.

A continuación se describe las características de utilización que deben poseer las arenas silíceas para su empleo en fundición:

- Refractariedad.-

La cual depende de la pureza en su composición química y de otros factores tales como la forma y tamaño de su grano.

- Durabilidad o Vitalidad.-

Una arena debe soportar los choques térmicos sin fragmentarse, lo cual depende de la estructura de los

granos de esta arena (granos enteros, granos agrietados o fragmentados, formas irregulares, etc.) o sea de sus características mineralógicas.

- Distribución granulométrica adecuada.-

La distribución granulométrica, que puede seleccionarse previamente, es la característica que más influencia tiene en el comportamiento de las arenas cuando se las mezcla con aglutinantes o aglomerantes.

Las características de suministro que normalmente se exigen a las arenas son las siguientes:

- Humedad.
- Análisis granulométrico y porcentaje de im palpables.
- Uniformidad de característica en diferentes muestras de una misma partida.

Normalmente no se exige ni análisis químico determinado, ni se efectúan ensayos de refractariedad aunque se vigila la forma del grano y su posible agrietamiento de origen.

b.- Aglutinante. (Bentonita)

De una manera general, se puede definir a los a glutinantes como productos capaces de conferir cohesión y plasticidad a una mezcla en determinadas proporciones de éstos, con arena y agua. El poder conseguir estas dos características en las mezclas, presupone que los granos de arena han quedado envueltos y ligados entre sí por películas for

madas con la mezcla agua-aglutinante. La adhesión es una característica de los aglutinantes ya que forman películas al rededor de cuerpos extraños (arena) y se adhieren a ellos cuando son mezclados con una cantidad de agua en proporciones bien definidas.

Las mezclas así formadas, (aglutinantes-arena-agua) permitirán una buena compresión contra el modelo, consiguiéndose un molde de adecuada resistencia que soportará los esfuerzos del metal o aleación en estado líquido sin deformarse prácticamente, lo que permite mantener una estabilidad dimensional en la pieza obtenida.

Existen dos grandes grupos de aglutinantes:

- Aglutinantes arcillosos (inorgánicos).
- Aglutinantes orgánicos (dextrina, mogul, cereales, etc.).

Los aglutinantes arcillosos son la base para la formulación de las mezclas empleadas en la fabricación de moldes de arena cualquiera sea el método de empleo a aplicarse (moldeo manual, a máquina o por inyección).

Las propiedades de los diferentes tipos de arcilla dependerán de la estructura de los cristales del constituyente principal de las mismas.

Existen tres grupos de minerales arcillosos en los que predomina un constituyente sobre los demás. En estos grupos, los constituyentes base son:

Grupo : Caolinita.

- Grupo : Montmorillonita.

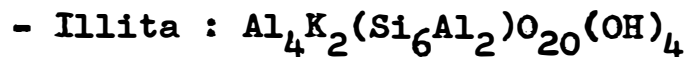
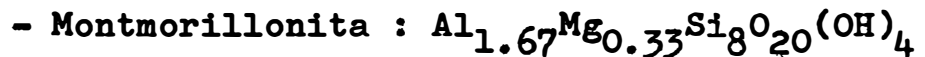


- Grupo : Illita.

Normalmente, las arcillas de estos grupos van acompañados de impurezas de otros minerales tales como el cuarzo, sílice, feldespato, óxido de hierro, carbonatos, sulfatos, materia orgánica, etc.

Estos constituyentes tienen una composición química determinada y en las fórmulas que representan su composición, no figuran elementos existentes en muy pequeñas proporciones, a veces su presencia cambia las propiedades físicas del constituyente.

R. E. Gyrin indica las siguientes representaciones de la composición química:



Normalmente, de los tres tipos de arcillas, las bentonitas son las más usadas corrientemente.

Las arcillas montmorilloníticas o sea las vulgarmente llamadas bentonitas, se tiene que en las unidades elementales, se enfrentan átomos de oxígeno con los átomos de oxígeno de otra unidad, que motiva que las atracciones entre unidades estructurales sean muy débiles y que el agua puede introducirse fácilmente entre las plaquillas, desarrollándose de esta manera la plasticidad. Esta facilidad de introducción de agua entre las unidades estructurales, hace que éstas se separen fácilmente y que produzca el fenómeno

de hinchabilidad de estas arcillas. En las montmorillonitas con cationes  $\text{Na}^+$  el hinchamiento es muy grande. Si tienen cationes  $\text{Ca}^{+2}$  es mucho menor.

Con esto se quiere decir que las propiedades aglutinantes y adhesivas de una arcilla son función de su capacidad de retener agua la cual depende de la calidad y número de cationes retenidos entre las hojas de los cristales y del tipo de constituyente.

A continuación se muestra las propiedades físicas:

	Tamaño Partícula	Intervalo de Fusión
Bentonita Sódica	0.1	1250 - 1350°C
Bentonita Cálcica	0.1	1250 - 1350°C

Excepto algunos excelentes yacimientos naturales de sódica y cálcica generalmente muchas de las bentonitas existentes son una mezcla de las dos anteriores, además de otros minerales arcillosos e impurezas.

No debemos de confundir los métodos de identificación de las arcillas (estudio bien rigurosos), con los clásicos ensayos de rutina empleados, para certificar la calidad de una arcilla comercial. Cuando decimos arcilla, nos referimos a un producto que contiene más del 75% de caolinita, montmorillonita, Illita, y que además no contiene minerales extraños en elevadas proporciones que lo hagan inadecuado para su empleo en fundición.

En el cuadro siguiente indicamos los resultados medios que deben de dar estos ensayos para las bentonitas :

Ensayos	Bentonitas		
	Sódica Na	Cálcica Ca	Activada Na
1.- Humedad a 105-110°C	Entre 6 y 12 %		
2.- Hinchabilidad.	20 - 30	6 - 10	15 - 20
3.- Sedimentación.	25	10	20
4.- Azul de metileno	Por comparación con una muestra patrón de c/tipo.		
5.- % de Carbonatos.	Inferior al 0.5% expresado como $CO_3Ca$ .		
6.- Durabilidad.	Por comparación con una muestra sin calentar.		
7.- Ph.	8.20-10.20	7.0-8.20	8.50-10.50
8.- Límite líquido.	500	120-160	350
9.- Finura.	Rechaza en tamiz 0.18 ; 2.0% máximo, tamiz 0.063 mm 75% .		
10.- %Montmorillonita	70	70	70
11.- Bases intercambiables. +	60-120	60-120	60-120

+ En miliequivalentes por 100 gramos de arcilla.

La montmorillonita (bentonita) para que pueda

desarrollar su propiedad como aglutinante de las arenas, debe tener la siguiente característica:

I.- Estructura cristalina determinada. (forma y tamaño de la partícula).

II.- Distribución granulométrica adecuada.

III.- Intervalo de fusión definido.

IV.- Capacidad de hinchamiento.

V.- Capacidad de intercambio de bases.

VI.- Ph determinado.

**c.- Aditivos.**

Aditivos o mejoradores son productos que añadidos a las mezclas de arena (moldeo y almas) en pequeñas proporciones, impiden la aparición de determinados defectos en las piezas, mejoran su calidad y facilitan su desmoldeo y limpieza.

El empleo de uno u otro aditivo depende fundamentalmente de la composición del caldo, temperatura de colada, dimensiones de la pieza y altura metalostática.

A veces su empleo o selección se hacen incorrectamente ya que estos productos deben de poseer determinadas características que han de ser controladas si se quiere conseguir resultados correctos.

Entre los aditivos corrientemente empleados fueron:

c.1.- Polvo de carbón.

c.2.- Dextrina.

c.3.- Carbonato de sodio.

c.1.- Polvo de carbón.

El polvo de carbón es un aditivo que sirve para mejorar la calidad superficial de las piezas; cuando han alcanzado temperaturas del orden de los 100°C comienza a desprender gas (debido a la alta proporción de volátiles) hasta llegar a la temperatura de reblandecimiento del negro. Seguidamente se coquifica parte, lo cual da origen a un aumento de su volumen (aproximadamente 3 veces) y los espacios vacíos entre los granos de arena son ocupados por el coque, impidiendo así la penetración del caldo. El efecto conjunto, del gas desprendido, de las materias viscosas formadas por destilación y de la coquificación del material carbonoso impiden la penetración del caldo en las piezas y como consecuencia se pueden obtener calidades superficiales adecuadas.

La adición de productos carbonosos a las arenas, se hace principalmente cuando se fabrican piezas de fundición gris, maleable y nodular.

El polvo de carbón, sirve para reducir la resistencia retenida y facilitar el desmoldeo; como también tiene gran influencia en el pH final de las mezclas.

A continuación se dan las características exigidas para su empleo en fundición:

- El pH del polvo de carbón varía de 5.8 - 6.2
- Se prefiere una granulometría fina sin que haya finos superiores a las 200 mallas. A veces se emplea

polvos de carbón en granos.

- Humedad : 2 - 4 %
- Materias volátiles : superior al 30 %
- Cenizas : inferior al 10 %
- Carbono fijo : 55 - 60 %
- Azufre : inferior al 1.0 %

El polvo de carbón influye sobre las características técnicas, la cohesión en verde aumenta de modo sensible mientras que la permeabilidad, por efecto de la dilatación de la arena queda disminuida. Es necesario, por lo tanto, dosificar cuidadosamente el polvo de carbón para no alterar de un modo nocivo las características de la arena.

#### c.2.- Dextrina.

Se obtienen generalmente por tratamiento con ácidos minerales del almidón de maíz u otros almidones. La solubilidad de estas dextrinas en agua es variable dependiendo del tratamiento efectuado al almidón.

Como aditivos se emplean en proporciones que varían del 0.5 al 1.5% normalmente.

Sus efectos principales son:

- Aumento de la permeabilidad durante la colada.
- Aumento de la tenacidad de la arena (Indice Shatter).
- Aumento de la resistencia en verde y seco.
- Mejora de la calidad superficial de las piezas.

- Disminución de la resistencia retenida.

Son fuertes estabilizadores de la humedad permitiendo emplear un porcentaje de agua más alto. Su alto poder estabilizador hace que las aristas de los moldes o de las almas no se vuelvan " Friables " . Su empleo exige disponer de buenos elementos de mezclado.

A continuación se dan las características exigidas para su empleo en fundición:

- Materias solubles : Las materias solubles se debe encontrar entre los siguientes límites : 90 - 95% .

- Ph ; varía en los siguientes límites :

4.2 - 4.5 .

- Pérdida por calcinación : El residuo no debe de pasar del 1.0% . Debe calcinarse hasta que desaparezca la materia carbonosa. Cuando sobrepasa el 1.0% indica que ha sido adulterada con arcilla u otros productos.

La Dextrina se emplea generalmente para impedir que la superficie del molde pierda demasiado rápidamente su humedad. A elevadas temperaturas arden rápidamente, pero ello disminuye la resistencia de la arena, que resulta más fácilmente disgregable.

Por otra parte, presentan el inconveniente de obstruir los huecos de la arena, disminuyendo de este modo su permeabilidad, este defecto viene agravado por el hecho de que, al arder, dan origen a productos gaseosos en mayor cantidad de los que producen, en proporciones iguales, la arcilla o la bentonita (lo cual es evidente si se tiene en

cuenta que, en esta última, el único material que da origen a la formación de gases es el agua).

### c.3.- Carbonato de sodio.

Es un aditivo corrector del pH de las mezclas, es de uso reciente y su aparición coincidió con el uso de nuevos materiales en la fabricación de moldes.

Cuando en las mezclas arena-bentonita-agua , se emplea bentonita sódica activada principalmente, la presencia de determinados sales, ácidos y materia orgánica en la mezcla puede llegar a transformar las bentonitas sódicas y destruir las propiedades de empleo de las mismas (poder aglutinante, poder de intercambio de bases, etc.). Trabajando con tierras artificiales a base de bentonita, durante la colada se forman una serie de productos colaterales derivados de los polvos de carbón y de las otras sustancias orgánicas e inorgánicas usadas en las mezclas.

Entre los productos formados durante la colada y que pueden reaccionar con la bentonita podemos citar:

- Anhidrido carbónico ( $CO_2$ ).
- Anhidrido sulfuroso ( $SO_2$ ).
- Amoníaco y sales de amonio.
- Acido fosfórico.

Estos productos que se han mencionado, formados durante la colada pueden reaccionar con la bentonita provocando una rápida desactivación o neutralización de la misma, a la vez que aumenta el contenido de sales en las mezclas . Aparece también una disminución del pH de las arenas,



el cual debe ser mantenido ligeramente alcalino si se quiere evitar la total destrucción de las propiedades de la bentonita. El empleo de sales sódicas principalmente Carbonato de Sodio, en las mezclas es la solución recomendada.

## 2.- Preparación de las arenas para moldes.

La arena de moldeo es una mezcla preparada en base a una arena, generalmente silícea, aglutinante y agua.

Las arenas de moldeo son sometidos a un proceso de preparación, antes de ser usados en la fabricación de moldes ó machos, de tal manera que satisfaga una serie de propiedades que hagan a la mezcla de arena apta para unas óptimas condiciones de colada, tanto si se trata de arenas sintéticas como las naturales, ya que estas últimas al usarse tal como son obtenidas y al utilizarlas repetidamente pierden sus propiedades.

La arena es un mineral que generalmente se encuentra en proporciones superiores al 90% en las mezclas empleadas en la fabricación de los moldes (partes de molde y almas o noyos). Resalta de inmediato el caracter refractario que debe de poseer, ya que en estas se cuegan metales o aleaciones líquidas cuyas temperaturas pueden llegar cerca de 1700°C . Las partes de molde y las almas forman una cavidad que tiene la forma de la pieza que queremos obtener. Esta cavidad debe de permanecer estable durante la colada y el posterior enfriamiento, por lo tanto el molde debe resistir, las condiciones térmicas, mecánicas, químicas, etc. que se producen hasta que la pieza ha solidificado totalmente. Se comprende

fácilmente que del comportamiento de la arena (porción mayoritaria del molde), dependerán en gran parte las características exigidas al molde, permitiendo la obtención de una pieza de alta calidad.

La finalidad de la preparación de la arena para moldes es la de obtener una masa homogénea sin terrones, cuerpos extraños o polvo, compuesta solamente de granos de sílice separados unos de otros y recubiertos de una capa suficiente de arcilla humedecida u otro aglutinante, y en ciertos casos la adición de negro mineral (polvo de carbón).

Las arenas de moldeo para usarlas directamente se llaman arenas en verde , la cual se emplea en esta fundición.

Generalmente se preparan dos tipos de arenas de moldeo:

a.- Arena de Relleno.

b.- Arena de Contacto.

a.- Arena de Relleno.

Son las formuladas en base a la arena que proviene del desmoldeo. Esta arena de relleno se emplea en su mayor parte, tanto para el moldeo manual, como para el moldeo mecánico.

La arena de desmoldeo o retorno provienen después de romper los moldes utilizados, las arenas así obtenidas se enfrían y se reacondiciona para su uso.

Esta arena usada, como consecuencia del apisonado sufrido durante la elaboración de moldes y el calor desarro

llado durante la colada, queda apelotonado en forma de terrones y es desintegrado por un vibrador (zaranda).

La arena usada será regenerado, para su preparación y se convertirá en arena de relleno con la adición de un aglutinante arcilloso y en ciertos casos de arena nueva.

**a.1.- Componentes de la arena de relleno.**

Los componentes son:

- Arena usada.
- Arena nueva.
- Bentonita.
- Agua.

A continuación se muestran los componentes, con sus respectivos porcentajes, la cual varían uno del otro; dichas muestras han sido tomados de los que generalmente se usan en la preparación de moldeo.

	Arena Usada	Arena Nueva	Bentonita
	(%)	(%)	(%)
Contenido I	89.88	9.77	0.35
Contenido II	90.40	9.00	0.60
Contenido III	99.40	—	0.60
Contenido IV	97.00	—	3.00

El tiempo de mezclado es de 3 a 5 minutos.

**a.2.- Principales controles de la arena de relleno.**

Antes de que la mezcla sea usado en el moldeo

se saca una muestra para los ensayos de arena en el laboratorio. Los controles que se realizan son:

- Compactabilidad. (Cm)
- Resistencia a la compresión. (Rcv)
- Fluidez. (Fd)
- Permeabilidad. (Pm)
- Dureza.
- Humedad. (H)

Los resultados de las muestras mencionadas en la parte a.1, se muestran a continuación:

	Cm	Rcv	Fd	Pm	H
	(%)	(PSI)	(%)		(%)
Contenido I	41.26	20.0	68.50	—	3.0
	41.92	21.0	72.44	—	3.38
	45.15	18.0	76.38	—	3.79
Contenido II	43.78	20.0	76.40	188	3.59
	42.50	20.5	74.41	188	3.25
	46.40	22.0	72.44	200	2.39
Contenido III	43.99	23.0	72.44	167	3.39
	41.26	23.0	72.44	200	2.91
	47.43	19.0	59.56	223	3.97
Contenido IV	40.85	27.0	78.40	167	3.15
	40.97	28.5	71.46	188	3.35
	49.13	26.0	60.63	143	4.53

Para un mismo contenido de la muestra, se hicieron varias pruebas (aquí muestro 3 ensayos por cada contenido), en diferentes días.

La dureza, se medía en el molde en la parte interior. Además se realizaba los ensayos de pérdida por calcinación y el porcentaje de bentonita, como verificación.

b.- Arena de Contacto.

La arena de contacto es una mezcla especial que sirve para colocar una pequeña capa sobre el modelo y, al formar la superficie del molde, sufrirá la acción directa del molde líquido.

Por lo tanto, exige una comprobación cuidadosa y una preparación perfecta para garantizar la refractariedad, permeabilidad y cohesión más elevadas.

b.1.- Componentes de la arena de contacto.

Los componentes de la arena de contacto a sido variable, debido a que se ha ido variando la adición de los aditivos.

Los componentes son:

- Arena nueva.
- Bentonita.
- Carbón en polvo.
- Dextrina.
- Carbonato de sodio.
- Agua.

A continuación se muestran los componentes, con sus respectivos porcentajes, la cual varían uno del otro, debido a las diversas modificaciones que se ha venido haciendo con los aditivos.

Estos resultados han sido tomados del control que se realizan en la preparación de arenas para moldeo.

	Arena Nueva	Bentonita	Dextrina	Carbón	CO <sub>3</sub> Na
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Contenido I	83.60	15.82	—	0.58	—
Contenido II	82.96	15.82	0.52	0.70	—
Contenido III	85.92	13.43	0.64	—	—
Contenido IV	85.74	13.33	0.29	—	0.64
Contenido V	83.86	15.83	—	—	0.31

El tiempo de mezclado es de 4 a 5 minutos.

**b.2.- Principales controles de la arena de contacto.**

Para los ensayos de laboratorio, se saca una muestra antes de que la arena de contacto sea utilizado en el moldeo.

Los controles que se realizan son:

- Compactabilidad. (Cm)
- Resistencia a la compresión. (Rcv)
- Fluidez. (Fd)
- Permeabilidad. (Pm)
- Humedad. (H)

Los resultados de las muestras que se mencionan en la parte b.1 , se muestran a continuación:

	Cm	Rcv	Fd	Pm	H
	(%)	(PSI)	(%)		(%)
Contenido I	44.74	19.0	76.38	—	2.85
	40.30	21.5	72.40	—	3.47
Contenido II	35.30	16.0	82.30	—	4.35
	37.30	17.5	80.30	—	3.54
	42.00	16.0	76.40	—	3.92
Contenido III	35.00	19.5	76.40	170	3.00
	35.00	20.0	76.00	200	3.98
	38.11	17.5	76.40	—	3.79
Contenido IV	40.60	17.0	68.60	138	4.61
	38.22	19.0	67.50	127	4.44
	38.50	21.0	68.51	143	4.67
Contenido V	45.40	26.5	63.60	104	4.27
	45.11	25.5	69.49	125	4.31
	40.93	28.0	70.47	116	3.72

Para un mismo contenido de la muestra, se hicieron varias pruebas, en diferentes días (aquí se muestra 3 ensayos por cada contenido).

Además de estos controles en el laboratorio se realizaba un análisis por pérdida por calcinación y otro por el porcentaje de bentonita que hay en la arena de moldeo, como verificación.

### 3.- Preparación de las arenas para almas.

Las arenas de almas es la mezcla preparada con arenas

lavadas y secas, y productos aglomerantes. Se emplea normalmente en la fabricación de almas o noyos.

Debemos tener presente que las almas ó machos, constituyen aquellas partes de un molde, que forma la parte interna o hueca de una determinada pieza, impidiendo que el metal fundido llene el espacio que ocupa la arena de alma. Estas arenas generalmente se preparan sintéticamente y se caracterizan por un alto contenido de sílice, cuyos granos tienden a tener una forma redondeada, además el elemento aglutinante no es generalmente arcillas, sino un compuesto orgánico como aceite de lino, cereales, resinas, melazas, etc., que son empleados de acuerdo a la experiencia en cada planta de fundición.

La preparación de la mezcla lo hacen en un mezclador de rodillos cuya capacidad es de aproximadamente 2 ton. y el tiempo de mezclado es de 5 a 6 minutos.

Las arenas para almas emplean unos requisitos diferentes que las arenas de moldeo, por las siguientes razones:

- Han de mantener su forma hasta que el metal se solidifique.

- Que los granos se desmorone con facilidad, una vez que el metal se ha solidificado, caso contrario sería difícil extraer del interior de la pieza moldeada la arena.

- Que tenga muy elevada permeabilidad para facilitar la evacuación de los gases que quedan aislados en el interior de la pieza, para cuyo fin se practica en la almas, salidas artificiales.



- Un caracter refractario elevado, que no se des<sub>g</sub> haga bajo la acción del calor durante la colada.

- Respuesta al horneado de almas de tal modo que la resistencia, la dureza y otras propiedades sean condicio<sub>g</sub> nadas por las operaciones de horneado.

- Despues del horneado, adecuada resistencia al manipuleo, el colocado del alma y la conservación de la exac<sub>g</sub> titud dimensional.

a.- Componentes de la arena de almas.

El material que se compone la arena de almas son:

- Arena sílice (seco).
- Silicato de sodio.
- Aserrin.

Los porcentajes de cada uno de ellos se muestran a continuación:

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| - Arena sílice :      | 94.67 %                                      |
| - Silicato de sodio : | 4.73 %                                       |
| - Aserrin :           | 0.60 - 0.80 % (Para almas de mayor volumen). |
|                       | 0.10 - 0.20 % (Para almas de menor volumen). |

b.- Aditivos.

A continuación se describen a los aditivos de una forma general.

**b.1.- Silicato de sodio.**

Es un aglomerante que mezclado con arena lavada y seca, forma una película alrededor de los granos de arena la cual endurece y los liga entre sí, dando al alma la adecuada resistencia.

El efecto del silicato de sodio es debido a su descomposición y a la formación, por la acción del  $\text{CO}_2$  del aire, de carbonato y sílice coloidal.

La disgregabilidad de la mezcla se facilita añadiéndole aserrín o harina de madera (aproximadamente un 2.0 %).

El silicato de sodio es un producto inorgánico y viene en estado líquido.

**b.2.- Aserrín ó harina de madera.**

El aserrín o harina de madera es un aditivo que se adiciona a la arena para la confección de machos en el proceso silicato  $\text{CO}_2$ , como un agente colapsante.

A continuación se muestra las características exigidas para su empleo en fundición:

- Finura : El tamaño de granos debe de ser inferior a 0.3 mm. Los índices de finura pueden variar entre 70 y 200 .

- Contenido en cenizas : Debe ser inferior a 0.5 % cuando se calcina a  $950^\circ\text{C}$ .

- Ph : varía de 4.5 a 5 .

- Punto de inflamabilidad :  $250 - 300^\circ\text{C}$  .

- Humedad : 5.0 % .

#### 4.- Preparación de moldes, machos y recubrimientos.

##### a.- Preparación de moldes.

El moldeo, es una operación que consiste en atacar la mezcla de arena de moldeo, una vez preparada y conseguidas las propiedades óptimas de la mezcla, sobre un modelo ya diseñado de una determinada pieza que se quiere obtener, de tal manera que cuando se retire dicho modelo, quede perfectamente reproducida la forma de éste aún en sus detalles mínimos; algunas veces, ciertas piezas tienen partes huecas, en tal caso se colocan en aquellas partes del molde las almas o machos que evita el llenado del metal líquido.

El factor más importante durante la preparación de los moldes, es el apisonado o grado de apretado de las arenas de moldeo, que requiere en gran parte de la habilidad y experiencia del moldeador.

El tipo de moldeo que se utiliza es el moldeo en verde, la cual es practicado de muchas maneras, cuando se trata de moldear pequeñas cantidades las operaciones se realizan a mano, pero para producir en escalas mayores se utilizan las máquinas de moldeo.

El peso total del modelo, la caja y la arena, es usualmente limitado a la facilidad de manipulación para un hombre, pero cuando se moldean piezas grandes con el sistema de cajas es necesario utilizar una grúa.

Un molde consta de varias partes, parte superior, parte inferior y a veces partes intermedias, y de almas o noyos.

Las partes llevan impresas los sistemas de llenado y las portadas de las almas. Todo el conjunto armado con sus partes y las almas forman un molde.

Los recipientes en los cuales queda apisonada la arena y que contienen el molde se llama, cajas de moldeo.

A continuación se describen las características que se exigen a un molde de arena:

- Resistencia a los esfuerzos originados por las condiciones mecánicas a que está sometido, sin deformaciones o desplazamientos apreciables.

- Resistencia a la erosión originada por la circulación del caldo, por los sistemas de llenado y durante el llenado del mismo.

- Resistencia al ataque químico de la aleación líquida y resistencia o refractariedad al calor.

- Ser permeable a los gases (aire del molde, vapor de agua y otros gases formados durante la colada.).

- Posibilitar la obtención de superficies lisas en las piezas.

- Permitir una fácil eliminación del calor de la pieza.

- Facilitar el desmoldeo de ésta y la disgregación de las partes del moldeo y las almas.

Para conseguir las características mencionadas anteriormente es necesario seleccionar adecuadamente los materiales a emplearse, y formular y preparar las mezclas de acuerdo a las condiciones a que está sometido el molde, seleccionando se los métodos de moldeo en función de las mezclas que pueden

ser utilizadas. Simultáneamente debe haber un estricto control de materiales, mezclas y moldes de acuerdo a los standards establecidos.

En esta fundición se utiliza el moldeo manual y el moldeo mecánico. Con el moldeo manual se hacen en pequeñas cantidades, pero con el moldeo mecánico se realizan en mayores cantidades de moldes.

**a.1.- Moldeo manual.**

El uso del moldeo manual en la fundición se reduce a muy pocas unidades y lo realizan mayormente los trabajadores que tienen varios años de servicio en la empresa, ya que ellos son las personas que conocen a fondo el arte de la fundición y son capaces de asimilar rápida, y exactamente las indicaciones y sugerencias del jefe de planta. Los moldeadores se enfrentan continuamente con problemas, los modelos son muy distintos unos de otros y no siempre están contruidos teniendo en cuenta las exigencias de la fundición.

Para las piezas medianas y pequeñas utilizan la arena de relleno , y el ataque lo realizan con un apisonador y atacador de hierro fundido. Para las piezas grandes hacen uso de la arena de contacto y arena de relleno, y el ataque lo realizan con un atacador neumático.

Debido a que el patio donde se realiza el moldeo manual está alejado, donde se prepara la arena de moldeo estas son llevados en carretilla.

A continuación describiré el proceso sencillo de moldeo manual que se realiza en esta fundición:

- El moldeador lo primero que hace es de asegurar de tener todos sus herramientas necesarios para el moldeo. Coloca el modelo sobre el tablero, la 1/2 caja de moldeo, luego con un cedazo adiciona la arena de moldeo sobre el modelo, comprimiendolo a su alrededor con la mano. Adicionalmente luego arena de moldeo hasta una cierta altura de la 1/2 caja de moldeo y lo ataca con el atacador , ligeramente en torno al modelo y con más fuerza cerca de las paredes de la 1/2 caja, sin atacar dos veces sobre el mismo punto.

- Entonces llena la 1/2 caja de moldeo con la arena de moldeo y lo vuelve a atacar. Después añade más arena de moldeo hasta desbordar la 1/2 caja unos centímetros y procede a apisonar la arena. Luego quita la arena sobrante con una rasqueta arrastrándole sobre los bordes de la caja.

- Se levanta la 1/2 caja de moldeo y dándole la vuelta lo pone sobre un lecho plano de arena preparado previamente. El modelo es extraído cuidadosamente para no dañar el molde.

- Se procede entonces a repasar las partes del molde en el caso de que se hayan removido al extraer el modelo. En algunos casos de acuerdo al modelo de la pieza se refuerza con varillas o clavos las paredes más expuestas a la corriente del metal líquido a fin de evitar desprendimientos de arena. Para la salida de gases se pinchaba el molde con una aguja en los puntos y dirección adecuados, enseguida con un soplador de aire se quitaba los residuos de arena u otros materiales que haya en el molde.

- Enseguida, la parte del molde que iba a estar en contacto con el metal líquido, se le espolvoreaba con recubrimiento (para moldes chicos) y a otros se le pintaba con recubrimiento (para moldes medianos y grandes).

- Para completar el molde, se procedía a moldear la otra mitad de la caja, donde se ponía los modelos de los bebederos, mazarotas, etc. y la otra parte del modelo de la pieza a fabricar.

- Si la pieza tenía huecos u oquedades, se colocaban los machos, el cual iban también pintados con recubrimiento. Enseguida se prendían con fuego tanto a los moldes como a los machos, con el fin de que el recubrimiento quede impregnado en ellos y quede listo para la colada. Luego se cerraban ambas medias cajas, centrándole mediante pasadores.

- Para contrarrestar la presión metalostática, a los moldes de piezas chicas se les ponía pesas, a los moldes de mayor volumen se les aseguraba en los pasadores con alambres y en los costados con grapas, y encima con pesas.

#### a.2.- Moldeo mecánico.

El uso de las máquinas de moldeo en las fundiciones, es debido a que reducen el tiempo de trabajo, disminución del costo, producciones bastante elevadas y constantes, se mejora el producto, además las condiciones de trabajo es bastante mejor para los operarios.

Además el atacado de la arena es uniforme y constante, y permite prescindir de la capacidad del operario, recurriendo a mano de obra no especializada.

Esta fundición utiliza estas máquinas para producir en escalas mayores, por que con éste se permite una rápida culminación del proceso de fabricación.

Estas máquinas de moldeo, su función principal es de moldear y desmoldear ; para hacer la pieza completa se necesitan de 2 máquinas de moldeo, una para la parte inferior y otra para la parte superior (2 medias cajas). En seguida las dos medias cajas se acoplan y cierran, despues como de costumbre, obteniéndose así el molde completo de la pieza dispuesta para la colada.

A continuación se describe el proceso de moldeo a máquina, la que se realiza en esta fundición:

- La arena que emplean es de contacto y de relleno, la arena de contacto se encuentran depositados en cilindros tapados con plásticos y la arena de relleno se encuentran encima de las máquinas de moldeo, depositados en tolvas.

- El moldeador con sus herramientas que necesita para el moldeo, pone la media caja de moldeo sobre la placa-modelo, la cual se encuentra sobre la placa de la máquina. Cuando las cajas de moldeo son pesadas (mayor volumen) se utiliza una grúa puente la que lo coloca sobre los rodillos transportadores y se lleva al lugar de moldeo.

- Con un cedazo adiciona la arena de moldeo, sobre el modelo, comprimiéndolo a su alrededor con la mano ; luego añade una cierta cantidad de arena y pasa a la fase de sacudimiento, el número de sacudidas varía según las dificultades.



tades presentadas por el modelo, el cual será el operario la que se encargará de regularlo.

- Luego comienza a llenar de arena de moldeo hasta haber desbordado la caja unos centímetros, el operario lo arregla acomodando uniformemente la arena sobre toda la media caja de moldeo, poniendo luego una plancha de madera encima. Lleva el brazo giratorio con la placa de compresión sobre la caja y pone a funcionar la máquina de moldeo, abriendo la entrada de aire para la compresión, los pistones levantan el tablero, que soporta la placa modelo y la caja, contra la placa de compresión. Simultáneamente el pistón de la maza empuja a ésta para que dé una serie de golpes en el tablero, obteniéndose de este modo el asentamiento de la arena en torno al modelo.

- Realizada la operación, se devuelve el brazo a su posición inicial para efectuar luego el desmoldeo, donde las 4 espigas levantan la media caja de moldeo hacia arriba y la placa modelo se quedará hacia abajo. Después la 1/2 caja de moldeo es llevado hacia los transportadores de rodillo, y después puestos en el patio de colada.

- Para la salida de gases se pinchaba a los moldes con una aguja en los puntos adecuados, después con un soplador de aire se quitaba los residuos de arena u otros materiales que podrían estar en el molde.

- De igual manera a estos moldes se le pasaba con un recubrimiento a la parte que iba a estar en contacto con el metal líquido. Así mismo cuando llevaban machos

se le pasaba con el mismo recubrimiento. Se colocaban entonces los machos en los moldes y se procedía a cerrar ambas medias cajas, centrándolo mediante pasadores, quedando listo para la colada.

**b.- Preparación de machos.**

La preparación de los machos constituye una de las operaciones más delicadas del arte de moldear, porque casi siempre tienen una importancia decisiva para la obtención de piezas sin defectos.

Generalmente, los machos se hacen de arena o barro arcilloso. Su cohesión, rigidez y dureza se aseguran con los materiales aglutinantes y, además por medio de armaduras de hierro o fundición, de forma y tamaño apropiado. La evacuación del gas a través de los machos que por su naturaleza no sean tan permeables se facilita por medio de agujeros practicados durante la preparación ó después de la misma, empleando agujas.

El proceso que se utiliza es el  $CO_2$ , el cual usa una arena especial, la que endurece "in situ" insuflado con  $CO_2$ . La arena especial contiene una solución de silicato de sodio y aserrín; este proceso  $CO_2$  es de considerable interés en la fabricación de almas.

A continuación se describe, el modo de preparar:

- La arena de alma, luego de ser preparados son almacenados en cilindros cubiertos con papel gruesa húmeda y plásticos. Es necesario tenerlo cerrados o cubiertos para que no se endurezca en el medio ambiente.

- Se colocan la caja de machos sobre la mesa y se procede a rellenar de arena de almas. La caja de machos difieren unos de otros, tanto en la forma que se va a reproducir, como en el tamaño. Algunas veces los machos están compuestos de armadura, varilla de alambre que se inserta en el centro del macho.

- Con una aguja se practican unos cuantos agujeros que permitan la salida de los gases. Se golpea ligeramente la caja para crear un espacio vacío mínimo que facilite la extracción del macho.

- Enseguida se hace pasar el gas  $\text{CO}_2$  a travez del alma, hasta notar de que este duro. Luego se retira el gas  $\text{CO}_2$  y se procede a extraer de la caja el macho, y estar listo para su uso en la fundición. Previo antes de su uso se le hornea con leña.

- El proceso que se realiza entre el  $\text{CO}_2$  y la arena de alma, éste forma un ácido débil  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , en la solución de silicato de sodio, el cual hidroliza al silicato para formar una sílice " gel " a medida que tiene lugar la hidrólisis, una red de sílice en forma de gel rodea los granos de arena, de este modo proporciona un enlace. En el calentamiento, el exceso de agua se elimina del gel, y se fortalece el enlace.

- Una desventaja de este procedimiento es la presencia de un residuo de sal de sodio, el cual puede actuar como fundente para bajar la refractariedad de la mezcla de arena. Sin embargo esto puede contrarrestarse con el uso de un adecuado recubrimiento del molde.

c.- Recubrimientos.

El objeto de su empleo es de compensar la dilatación de la arena y crear una capa aislante entre la arena del molde y el metal líquido, a fin de impedir el contacto entre el metal y la arena, y que esta última se pegue a la pieza y aumente las dificultades del pulimentado de las superficies.

De este modo se reduce el tiempo de pulimento de las piezas mejorando su aspecto. El recubrimiento que utilizan es la Plombagina, aunque en ciertos casos utilizan el Moldcote. Ambos Plombagina y Moldcote, son de grafito; el primero de ellos es nacional y el otro es importado.

Para moldes de piezas pequeñas la Plombagina, lo espolvorean por la superficie que va a estar en contacto con el metal líquido. Mientras para piezas de mayor volumen utilizan una solución compuesta por los siguientes productos:

- Plombagina : 4.0 Kg.
- Thinner : 3.0 gls.
- Pez rubia : 0.350 Kg.

Utilizando una pistola de aire se pinta con esta solución a los moldes y machos.

A continuación se muestra las características de los productos mencionados:

c.1.- Plombagina. (Grafito)

El grafito es un producto de alta refractariedad que tiene un carbón fijo cuyo porcentaje varía al tipo.

Así tenemos:

- Tipo Pufriisa : 70 %

- Tipo Universal : 55 %

El grafito, es de color gris, viene pulverizada y se utiliza en fundiciones o industrias metalúrgicas.

Esta acondicionada para pintar con pistola de aire en soluciones de alcohol, agua, aceites, etc., así mismo para pintar con brocha. Como también para espolvorear a través de mallas o cedazos en polvo refinado, a los respectivos moldes para fundir.

Es de grandes cualidades ya que en caso de fundiciones no se cuartea, no se recoge, ni se desprende del molde al momento de fundir.

Para ser quemado se enciende el disolvente del recubrimiento y cuando el thinner ha quemado totalmente, el molde ya está listo para su inmediato uso.

c.2.- Pez rubia.

Viene a ser la goma de algarrobo. Es un producto de color amarillo pálido, frágil y viene en forma sólida parecido al vidrio. Para su uso lo muelen bien fino y se disuelve bien con el thinner.

c.3.- Thinner.

Viene a ser un líquido que actúa como disolvente de la Plombagina y la Pez rubia. Se inflama fácilmente con la llama.

5.- Instalación mecánica para la preparación de la arena de moldeo y distribución a las tolvas de alimentación.

La instalación de preparación de las arenas, esta combinada con una serie de máquinas de moldear, cribadora, separador magnético, molino, tolvas, fajas transportadoras, elevador de cangilones, todas conectadas entre sí de manera que la arena las recorre según la sucesión dispuesta, y es tán enlazadas con la sección de moldeo en forma que recogen la arena usada para prepararla y la devuelven y distribuyen ya regenerada.

### 5.1.- Descripción general.

A continuación se describe a los componentes de esta instalación en forma general:

- Zaranda vibratoria: Efectuada la colada y despues del necesario enfriamiento, se levantan las cajas con la grúa, y se llevan a las parrillas del desmoldeo, y se libra a las piezas de la arena de moldeo.

Las dimensiones de la parrilla son: 910x1890, estas dimensiones están dados en milímetros.

- Faja transportadora N°1, 2 y 3 :

La faja transportadora N° 1 , recibe la are na usada que proviene de la zaranda vibratoria, a su vez es ta faja N° 1 alimentará a la faja N° 2 .

La faja N° 3 distribuye la arena a las tolvas que alimentarán a las máquinas de moldeo.

Sus dimensiones son:

Faja N°1 : ancho = 15 "

longitud total = 16.30 mts.

Faja N°2 : ancho = 15 "  
longitud total = 16.20 mts.

Faja N°3 : ancho = 15 1/2 "  
longitud total = 16.35 mts.

En la faja N°2 , en su terminal de descarga cuenta con un émbolo magnético o rodillo magnético, el cual se encargará de separar los objetos metálicos magnéticos de la arena usada. Los objetos metálicos se irán a un depósito de desechos y la arena usada ira al elevador de cangilones.

- Elevador de cangilones N° 1 y 2 :

El elevador de cangilones N° 1 , transporta la arena que recibe de la faja N° 2 y la lleva hasta descargarlo en la criba giratoria. Sus dimensiones son:

Faja : Lona 8 1/2" x 1/4" x 4 pliegues.

Número de

cangilones : 50

El elevador de cangilones N° 2 , transporta la arena que viene del mezclador, hacia la faja N° 3 . Su especificación es :

Faja : Lona de 9" x 1/4" x 5 pliegues.

Número de

cangilones : 30

- Criba giratoria :

La criba giratoria se encarga de separar los fragmentos metálicos no ferrosos y cuerpos extraños de la arena usada. La arena usada pasa por las aberturas de la malla metálica, el cual es de una sola dimensión y caerá a

a la tolva de arena de 20 ton. Su forma es de un cilindro con un diámetro de 55 - 65 cms.

- Tolvas de almacenamiento :

Comprende de 2 tolvas de almacenamiento, la primera tolva que recibe la arena usada de la criba giratoria cuya capacidad es de 20 tons. y la segunda que recibe la arena de la primera tolva, cuya capacidad es de 2.0 tons. A su vez esta segunda tolva alimentará al mezclador.

- Mezcladora de artesa fija :

Esta máquina mezcladora de artesa fija y rodillos giratorios, son de gran diámetro, su acción de mezclado es obtenida debido a la circunferencia que estos recorren en el fondo de la artesa, es muy pequeña en relación con su diámetro; de este modo se produce el desplazamiento y, por lo tanto, la acción mezcladora.

La descarga del mezclado se hace a través de un portillo que se abre en el fondo de la artesa, el cual irá a un elevador de cangilones N° 2 .

Esta mezcladora prepara también la arena de contacto, su capacidad es de aproximadamente 3.0 tons.

- Tolvas de almacenamiento de arena de relle  
no:

Estas tolvas se encargarán de alimentar a las máquinas moldeadoras, de las 6 tolvas que existen, solo 1 se encarga de alimentar al moldeo manual. La capacidad de las tolvas es de 1.0 ton.

- Máquinas moldeadoras:

Las máquinas de moldeo tienen la función



de moldear y desmodelar, el moldeo se realiza mediante ata que por sacudidas o vibración y compresión. Es necesario suministrar arena y cajas a las máquinas y retirar los moldes ya preparados. Los moldes, apenas confeccionados, son depositados sobre transportadores de rodillos que los conducen inmediatamente al lugar donde se efectuará la colada.

Esta sección cuenta con 5 máquinas moldeadoras, de los cuales 2 máquinas sirven para moldear piezas chicas y las 3 restantes para piezas de mayor volumen.

- Transportador de rodillos :

Existen 4 transportadores de rodillos que sirven para el transporte de las cajas de moldeo, al lugar donde se realizará la colada.

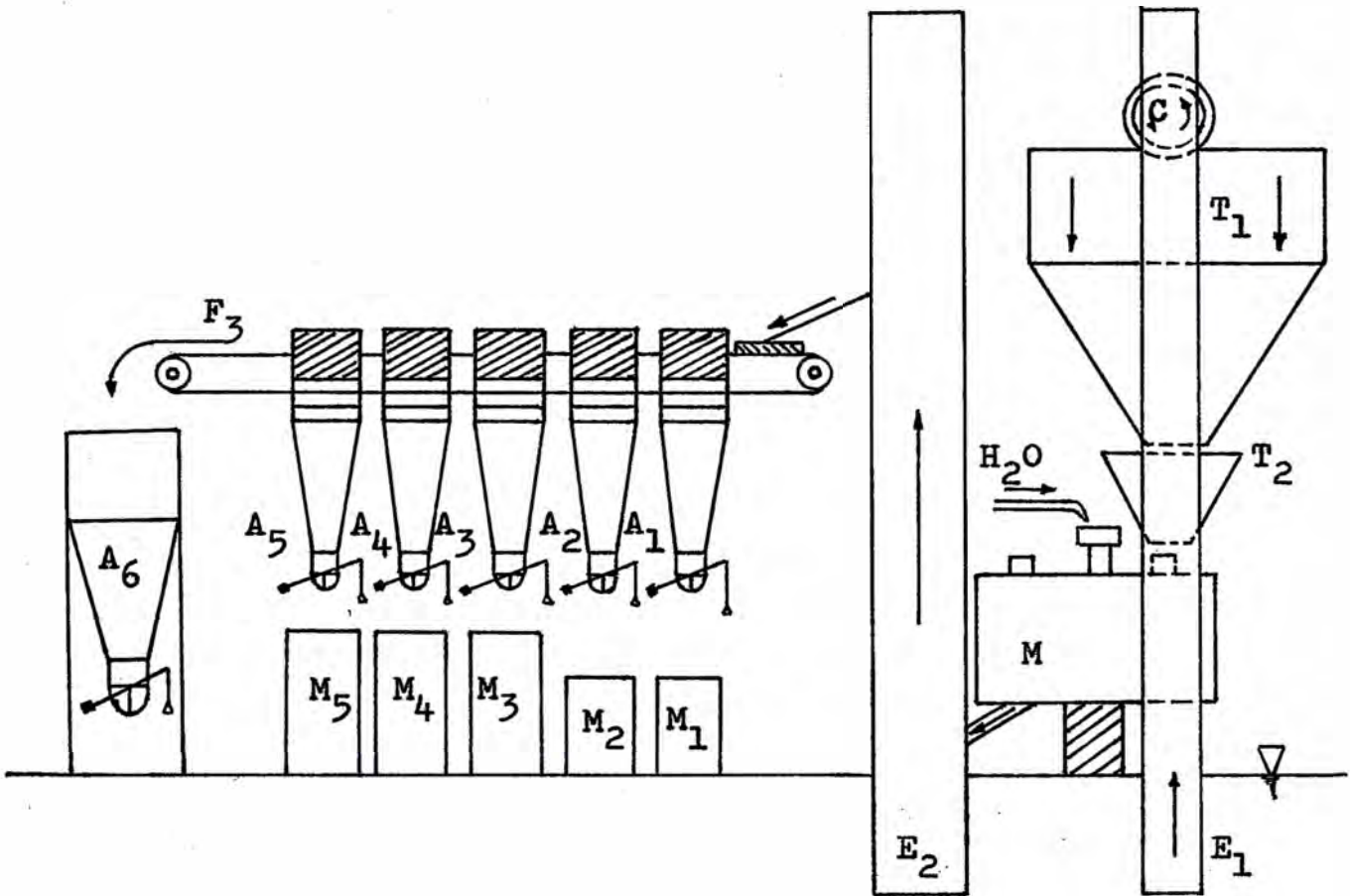
#### 5.2.- Esquema.

A continuación se muestra el esquema de la ingstalación de la preparación de las arenas de moldeo, en su vista frontal :

#### Leyenda

- |                   |   |   |
|-------------------|---|---|
| 1.- $E_1$ y $E_2$ | : | Elevadores de cangilones.                                   |
| 2.- $T_1$ y $T_2$ | : | Tolvas de almacenamiento de arena.                          |
| 3.- C             | : | Criba giratoria.  |
| 4.- M             | : | Máquina mezcladora.   |
| 5.- $A_1$ a $A_6$ | : | Tolvas de almacenamiento de arena preparada para el moldeo. |
| 6.- $M_1$ a $M_5$ | : | Máquinas moldeadoras.                                       |
| 7.- $F_3$         | : | Faja transportadora.  |

Vista Frontal



## D.- FUSION Y COLADA.

### 1.- Fusión.

La fusión desde el punto de vista de la fundición consiste en llevar metales y aleaciones, del estado sólido al estado líquido, generando determinada cantidad de calor, de valor definido y característico para cada metal o aleación. Para dar al metal el calor necesario a fin de fundirlo y recalentarlo, hasta un punto en que se adquiriera la fluidez necesaria, se emplean ciertos aparatos o reactores de fusión denominados hornos de fundición.

Para la producción de hierro fundido gris, se emplean el Horno Rotatorio, así como las materias primas. Y para los controles de los elementos básicos se cuenta con un laboratorio químico.

#### a.- Horno Rotatorio, diseño y refractarios.

El Horno Rotatorio, se fabricarón con el fin de aumentar la transmisión de calor en sus tres formas, por conducción, radiación y convección.

Este tipo de horno consiste en un tonel cilíndrico horizontal, fabricado con plancha de hierro, montado sobre rodillos y forrado interiormente con material refractario ; se enciende por un extremo con petróleo como combustible. Los productos de la combustión salen por el lado opuesto, pasando por un recuperador de calor, donde parte del calor sensible es transferido al aire suministrado por el ventilador.

El cuerpo del horno gira lentamente sobre los rodillos durante la fusión, poniendo así en contacto el caldo de

metal fundido con el forro refractario caliente.

Esta operación evita que el forro se sobre-caliente por efecto de la llama y reduzca el tiempo de fusión del metal.

El consumo de combustible, varía debido a las dificultades que podría presentarse, pero en término medio es de 1 galón de petróleo D-5 por cada 10 kgs. de hierro fundido.

Las condiciones de fusión permiten el uso de chatarra ligera posibilitando así el empleo de materiales de bajo costo, sin perjudicar la calidad del material.

#### a.1.- Estructura del Horno Rotatorio.

Comprende de un cilindro, dos troncos de conos, pistas, piquera, bridas.

##### a.1.1.- Parte cilíndrica.

Esta construido de planchas de hierro de 1/4" a 3/8" de espesor, el diámetro del cilindro es de 1.54 metros y la longitud es de 2.46 metros.

##### a.1.2.- Troncos de conos.

Estos troncos de conos servirán como tapas al cilindro, el cual van unidos mediante bridas empernadas. El número de pernos es de 32 y sus dimensiones son de 5/8"  $\varnothing$  x 2" .

El tronco de cono está construido con planchas de hierro de 1/4" a 3/8" de espesor.

Las dimensiones son:

Diámetro mayor : 1.54 mts.

Diámetro menor : 1.20 mts.

Longitud : 0.60 mts.

Estas dimensiones corresponden al tronco de cono, por donde se encuentra el quemador.

En el segundo tronco de cono se expulsan los gases de combustión; asimismo se realiza la carga del material. Las dimensiones son:

Diámetro mayor : 1.54 mts.

Diámetro menor : 1.10 mts.

Longitud : 0.81 mts.

#### a.1.3.- Pistas del horno.

Estas pistas del horno van fijados alrededor del cilindro. Las pistas deben ser ubicadas en puntos en donde las reacciones de los polines de la transmisión sean iguales, de esta manera se logra un desgaste uniforme; para esto es necesario encontrar el centro de gravedad.

El centro de gravedad se ubica entre el centro de la parte cilíndrica del horno al cono más grande (15% de la longitud a partir del centro del cilindro).

Estas pistas son de acero y van montados sobre 16 apoyos soldados al cilindro, sus dimensiones son:

- Espesor de la pista : 3.0 cms.

- Ancho de la pista : 14.5 cms.

- Separación entre pistas : 1.68 mts.

**a.1.4.- Piguera.**

En el centro de la superficie cilíndrica se han colocado dos picos de descarga, opuestos diametralmente, para ser usados alternativamente.

Se acostumbra tener dos piqueras sólo por seguridad en caso de haber obstrucción.

**a.1.5.- Bridas.**

Son coronas circulantes, el cual unen los troncos de conos con la parte cilíndrica, deben ser radiadas a sus estructuras para evitar desvíos.

El número de pernos de sujeción son de 32 y las dimensiones de estos pernos es de 5/8" x 2" .

**a.2.- Revestimiento refractario.**

Los refractarios son materiales resistentes al calor y en la fundición son los componentes que están en contacto con el metal fundido. En el caso del horno rotatorio la coraza debe estar convenientemente revestida con un espesor adecuado de material refractario.

Además de la alta resistencia a la temperatura, deben resistir a la abrasión, presión, ataque químico y cambio rápido de temperatura.

En el mercado se encuentran en forma de ladrillos, molidos y mezclados en forma plástica.

**a.2.1.- Componentes del revestimiento.**

El revestimiento que se usa es el siguiente:

- Arena sílice.
- Cuarzo granulado.
- Mortero super.
- Agua de chancaca.

Mortero super.

Es un material altamente refractario, pertenece a la clase sílico-aluminoso, y su temperatura de trabajo es de 1720°C . Es un mortero seco de fragua cerámica, altamente refractario.

**Especificaciones químicas:**

$Al_2O_3$	:	38 - 40%
$SiO_2$	:	56 - 58%
$Fe_2O_3$	:	1.0 - 1.5%

**Especificaciones físicas:**

Densidad	:	2.5 - 4.0 Kg/cm <sup>3</sup>
Porosidad	:	16.0 - 18.0 %

**a.2.2.- Preparación de la mezcla.**

Para una cantidad de 225 Kgs. , es la siguiente:

- Arena sílice : 26.7%
- Cuarzo granulado : 40.0%
- Mortero super : 33.3%
- Agua de chancaca : 4 - 5 gls.

**a.2.3.- Aplicación del refractario.**

El encofrado del cilindro, como de los troncos de conos se hacen separadamente. Para esto se hacen

uso de modelos que son de planchas de hierro, cuyo espesor es de 1/8" .

El uso de modelos adecuados durante el apisonado para retener y dar forma al refractario mejora el acabado final del mismo. El apisonado lo realizan con martillos neumáticos . El espesor del refractario que va en el horno es de 35.5 cms. aproximadamente.

La duración del refractario varía de 120 a 130 coladas y depende principalmente de un buen apisonado y de saber utilizar el material plástico.

Para utilizar el horno con refractario nuevo se le da un calentamiento de tres horas, aunque mayormente se prefiere colar piezas sin exigencias metalúrgicas. En la primera colada se tiene mayor gasto de silicio, debido a que se tiene tendencia al achilamiento (formación de carburos), por tener atmósfera con tendencia oxidante, esto es a la falta de evacuación del agua, ya que esta sustancia se descompone cediendo el oxígeno. Se va obtener un horno seco entre la segunda y tercera colada.

### a.3.- Chimenea ó Rompe fuego.

Este componente es un complemento del horno que sirve para recibir el impacto de la flama que sale del horno y desviarla junto con los gases de combustión hacia el recuperador de calor.

Así mismo, éste está construido con plancha de hierro de 1/4" de espesor, su cuerpo es cilíndrico.

Internamente va recubierto de material refracta



rio ( ladrillo refractario y mezcla refractaria ).

La chimenea va montado sobre una estructura metálica para darle la altura conveniente. Esta estructura descansa a su vez sobre cuatro ruedas y se desplaza sobre rieles con la finalidad de dejar libre la boca donde se hace la carga del material y efectuar también la limpieza del horno.

#### a.4.- Recuperador de calor.

Es un equipo construido con plancha de hierro estructural de 3/8" de espesor; se compone de dos cilindros coaxiales, uno dentro del otro, unidos entre sí por dos cámaras, inferior y superior.

Por la cámara inferior ingresa el aire del ventilador en forma tangencial y recorre la cámara cilíndrica de calentamiento, saliendo por la cámara superior tangencialmente hacia el quemador.

El recuperador se instala encima de la chimenea de tal modo que los gases de combustión lo atraviesen y calienten la superficie cilíndrica, interior.

El calor absorbido por la plancha, calienta el aire que circula interiormente hasta una temperatura aproximada de 200°C.

Este método es usado para ahorrar el consumo de combustible y mejorar las condiciones de combustión, logrando una mayor temperatura.

#### a.5.- Equipo de combustión.

La combustión que se realiza en el horno rotatorio, es cuando se inyecta petróleo en el interior del cuerpo

cilíndrico, estando en contacto con la llama, el cual a su vez dará origen a los gases que se forman y las reacciones al contacto con la carga del horno.

El combustible que se usa es el petróleo Diesel N° 5 que tiene las siguientes características:

Gravedad API	:	20°
Gravedad específica	:	0.934
lbs/gls.	:	7.78
BTU/lb.	:	19000
BTU/gl neto.	:	140000
Peso por pie <sup>3</sup>	:	58.25 lbs.

La instalación para la combustión es el siguiente:

- El tanque de almacenamiento del combustible está ubicado en la parte baja (subterráneo), este combustible es suministrado al quemador por medio de un motor.

- El control del flujo de petróleo se efectúa con una válvula de compuerta. En la entrada al quemador, la tubería tiene una dimensión de 3/4" .

- El quemador está construido con boquilla regulable para lograr una llama larga que atravieze el horno y permita una salida de aire con suficiente presión para la operación del horno. A continuación se describe sus características:

1.- El cuerpo del quemador es un cilindro de 8" Ø por 25" de largo, la entrada del aire es de 7" Ø por un extremo y a 90° con respecto al eje del cuerpo.

ii.- En la salida tiene unas aletas alabeadas (Mariposa) que le dan un giro al aire para mejorar la pulverización del combustible.

iii.- El combustible atraviesa el quemador ingresando por la parte posterior a través de una tubería de  $3/4'' \varnothing$  y saliendo por una boquilla con 6 perforaciones de  $1/8'' \varnothing$ , dispuestas de tal modo que permitan una flama larga y amplia a la vez.

Para fundir se deben tener en cuenta muchas variables ya que debemos de producir una combustión completa, para esto es necesario inyectar el petróleo lo suficientemente atomizado para que el aire insuflado pueda cubrir en forma óptima cada gota de petróleo y produzca reacción completa.

Si las gotas de petróleo fuesen demasiado grandes el aire envolvería solamente la superficie de la gota (produciendo combustión completa) quedando el centro sin reaccionar (crudo), produciéndose todavía en una segunda instancia la reacción, dando origen a una combustión incompleta. Esto quiere decir que en exceso de petróleo o un chorro muy grueso enfriará el baño en vez de calentarlo.

#### a.6.- Ventilador.

El ventilador centrífugo, suministra el aire necesario para la combustión del petróleo y la operación del horno.

El ventilador está construido con plancha estructural, el rodete tiene 12 aletas de 1 mm. de espesor.

La descarga del aire se hace a través de una tubería de 8 1/2" Ø que llega al recuperador de calor y de allí para el quemador.

El flujo de aire es controlado por una válvula de mariposa. Además es accionado el ventilador por un motor eléctrico de 15 Hp.

#### a.7.- Sistema de accionamiento.

El Horno Rotatorio va montado sobre cuatro polines de rodadura, los que son soportados por 8 chumaceras con rodamientos de bolas.

Todo el conjunto descansa sobre un bastidor estructural construido con vigas H. Este bastidor a su vez se encuentra instalado sobre una cimentación de concreto armado para dar la altura conveniente al horno.

Dos de los polines son independientes, los otros dos se encuentran conectados por un eje de transmisión en cuyo extremo se encuentra conectado una corona dentada, éste a una cadena, el cual conecta a un piñón y éste a su vez a un motor.

Al horno se le dá un movimiento de rotación cuando el metal comienza a fundirse. El propósito del movimiento es de aprovechar mejor el calor de todo el refractario de la bóveda, calentar uniformemente toda la masa del metal fundido, lograr un desgaste parejo del refractario, y una mejor acción de los fundentes.

La disposición para rotar, también se usa en el momento de la descarga del metal fundido a las cucharas. En

este caso, se opera con un mando eléctrico reversible, para poder girar el horno en ambos sentidos.

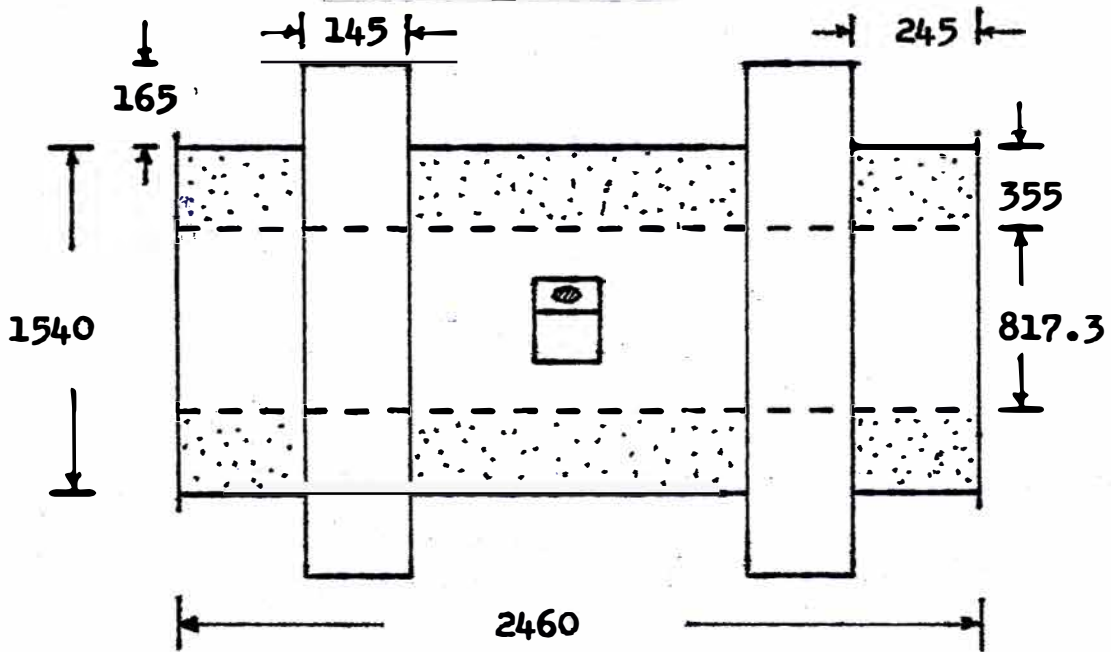
El motor reductor que se utiliza, tiene una potencia de 12 Hp .

a.8.- Dimensiones del Horno Rotatorio, Chimenea, Recuperador de calor y del sistema de accionamiento.

a.8.1.- Horno Rotatorio.

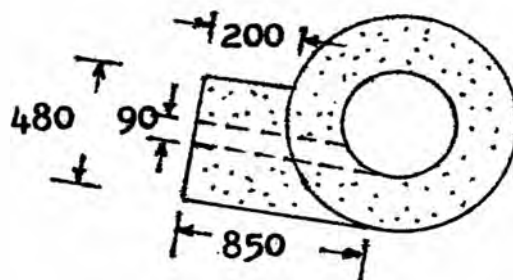
Las mediciones se dan en milímetros.

- Parte cilíndrica.

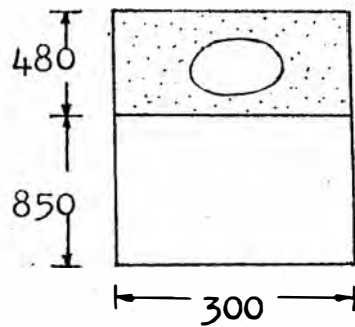


Pico de colada:

Perfil:

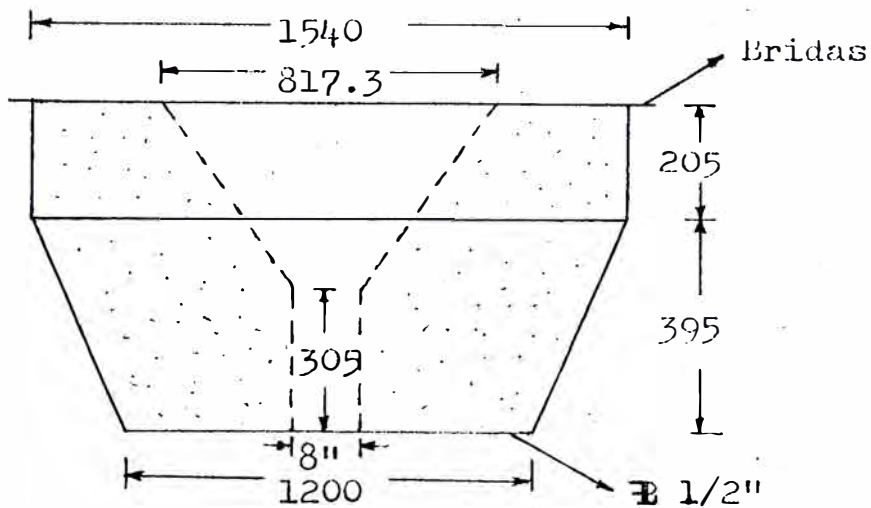


Frontal

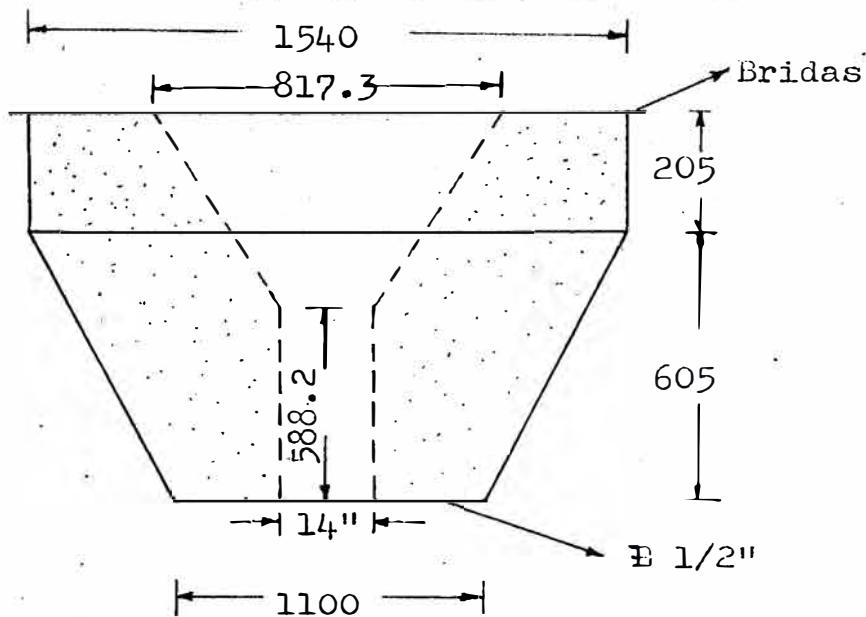


- Parte tronco de cono.

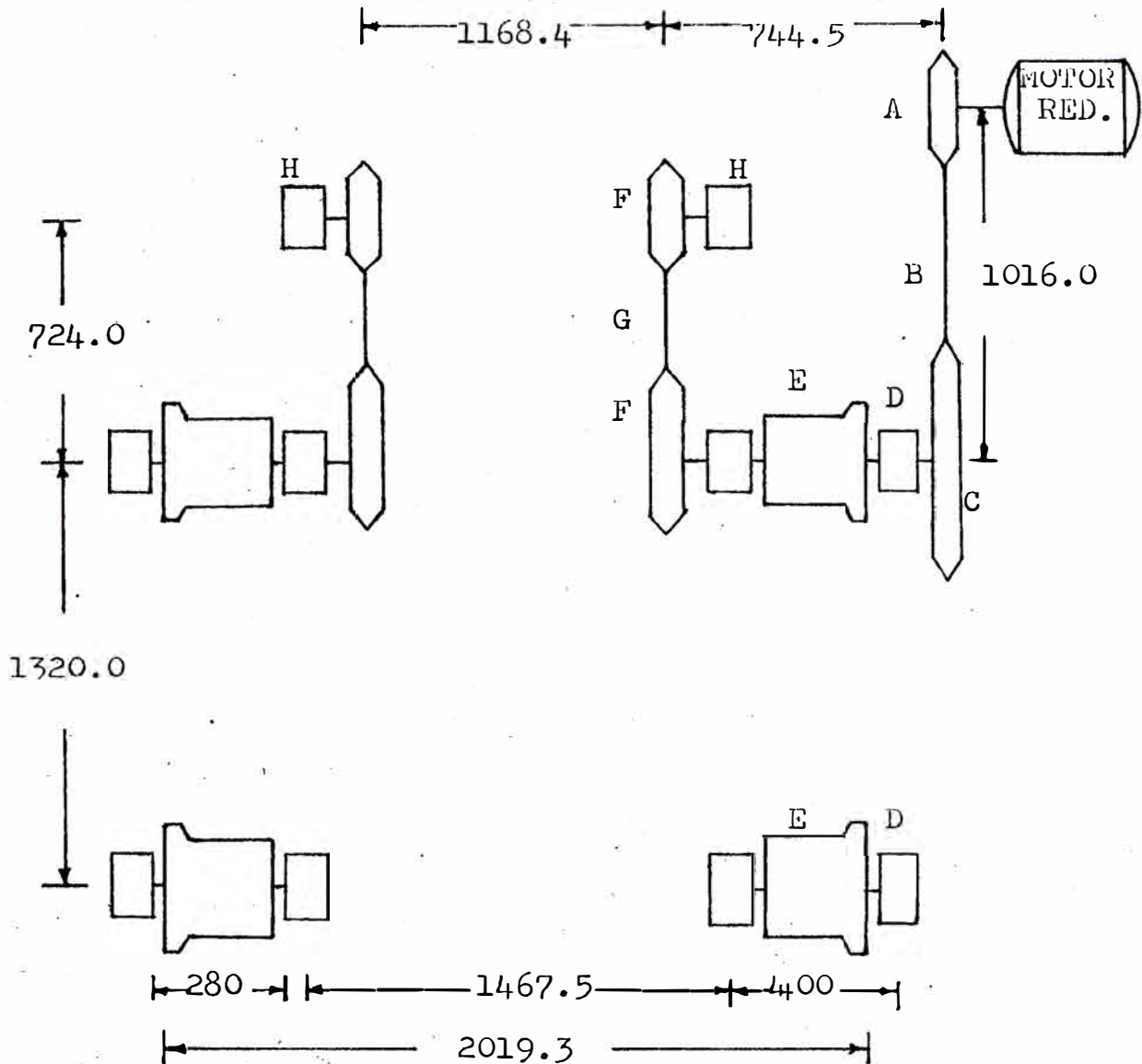
i.- Lado de entrada del petróleo y aire.



ii.- Lado que se realiza la carga del material.



a.8.2.- Sistema de accionamiento.

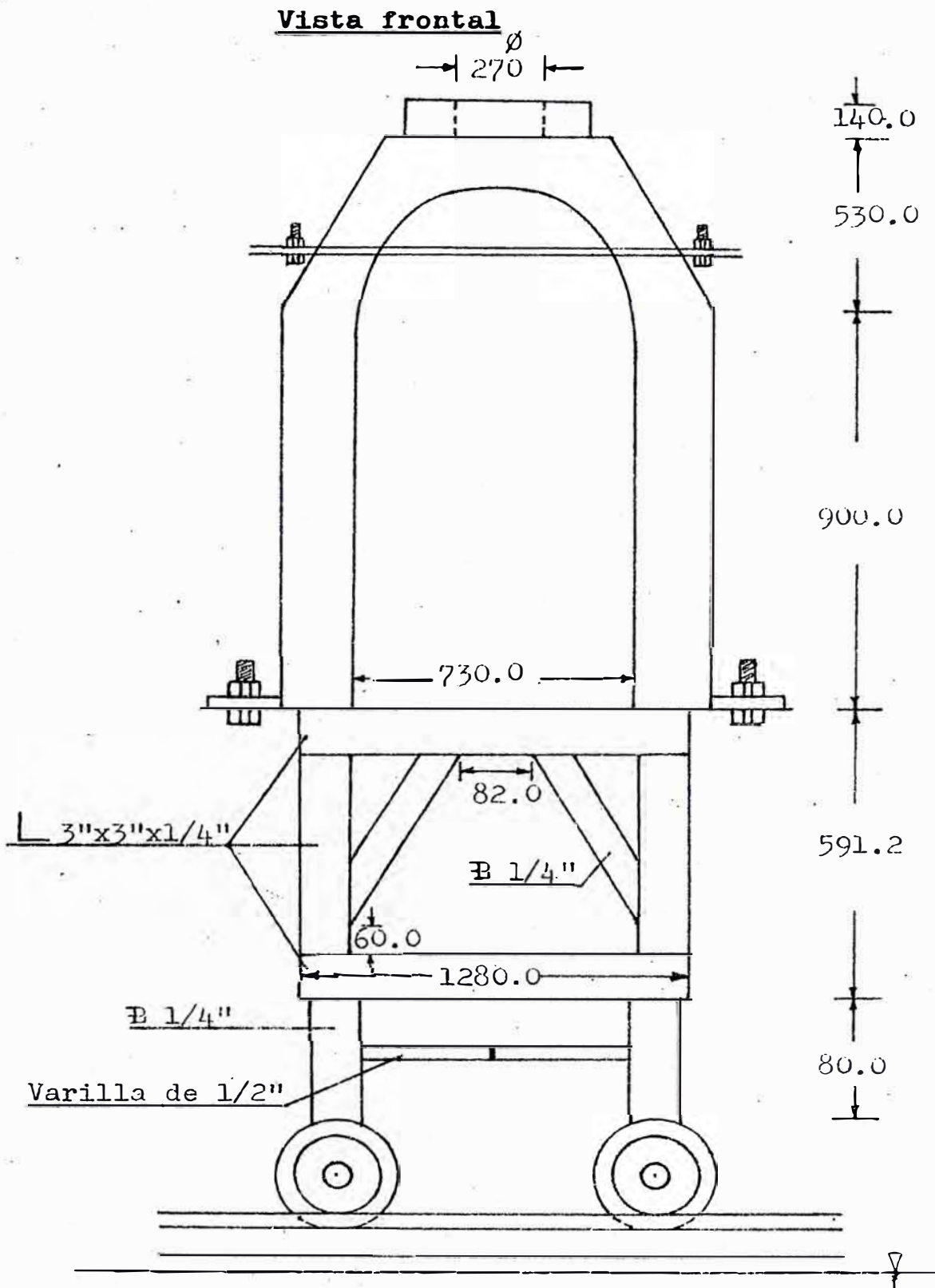


Leyenda

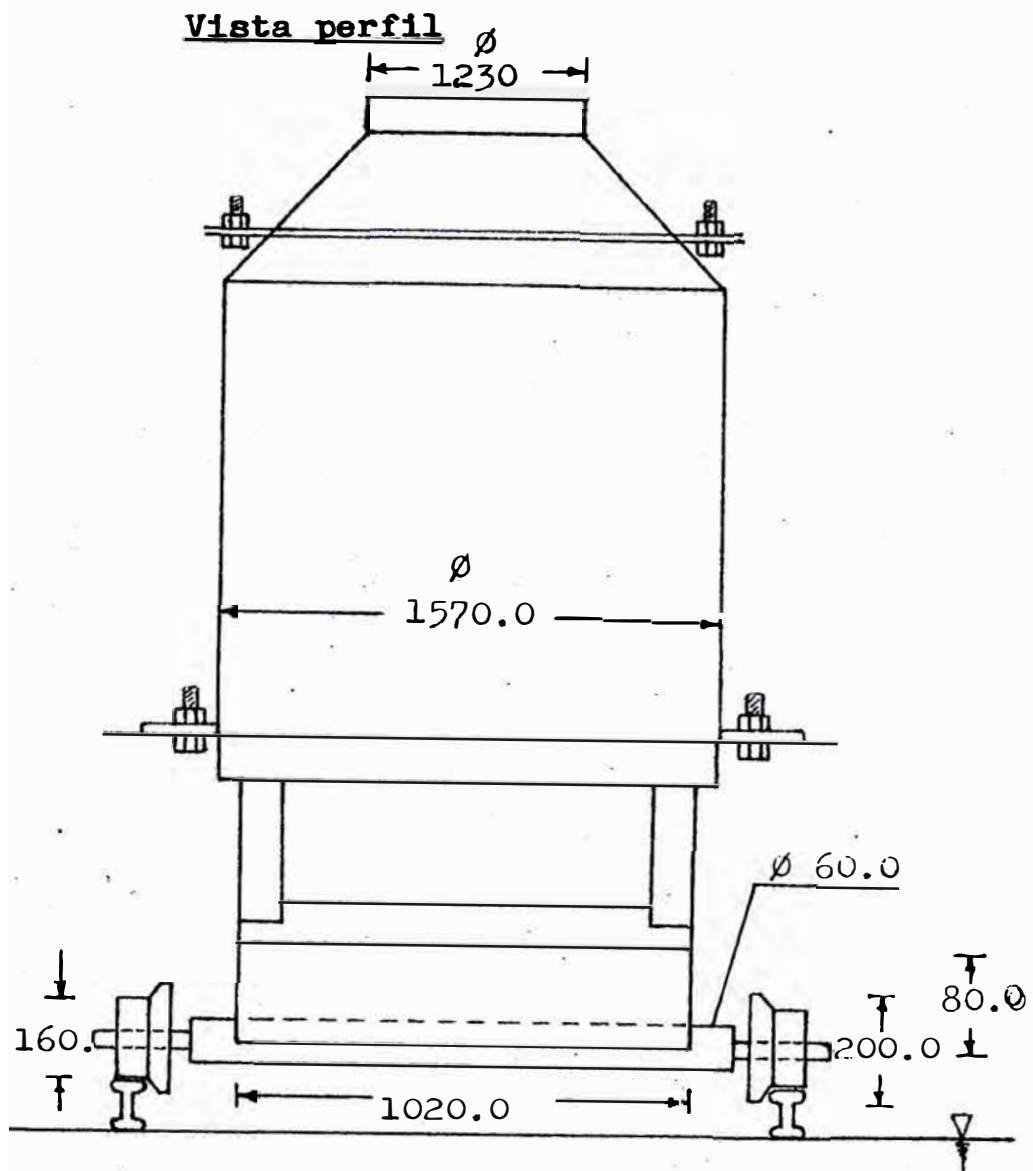
Cant.

A.- Piñón 12 T 1 1/2	1
B.- Cadena simple 74 pasos x 1 1/2.	1
C.- Piñón 30 T1 1/2.	1
D.- Chumacera SN517	
Rod. 22217 ESKC3 (3" Ø).	8
E.- Polín	4
F.- Piñón 18 T1 1/2	4
G.- Cadena simple 74 pasos x 1 1/2.	2
H.- Chumacera SN515	2

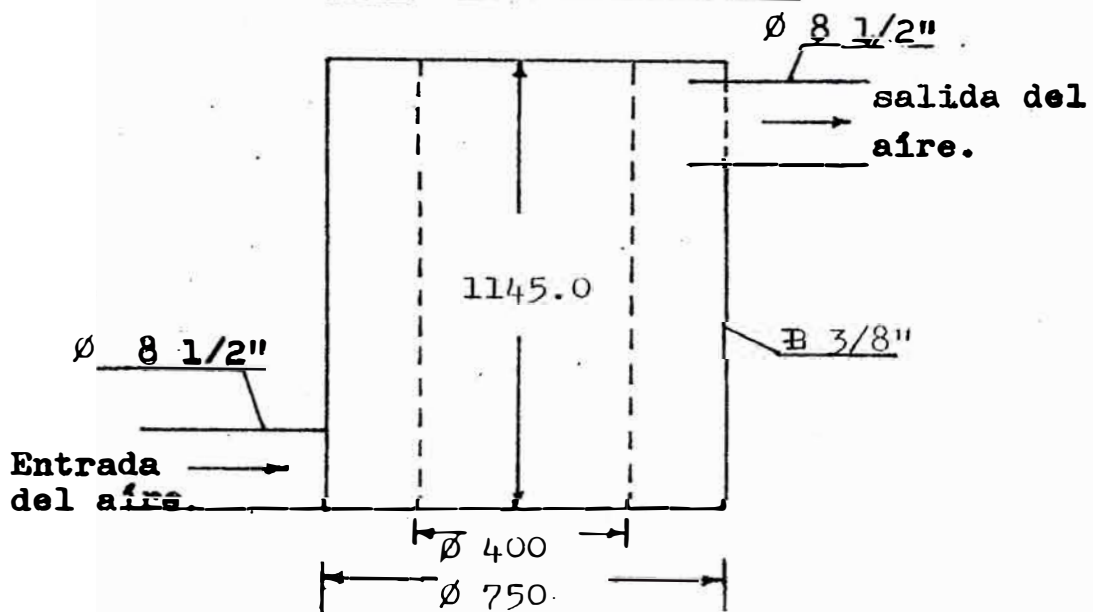
a.8.3.- Chimenea o Rompe fuego.





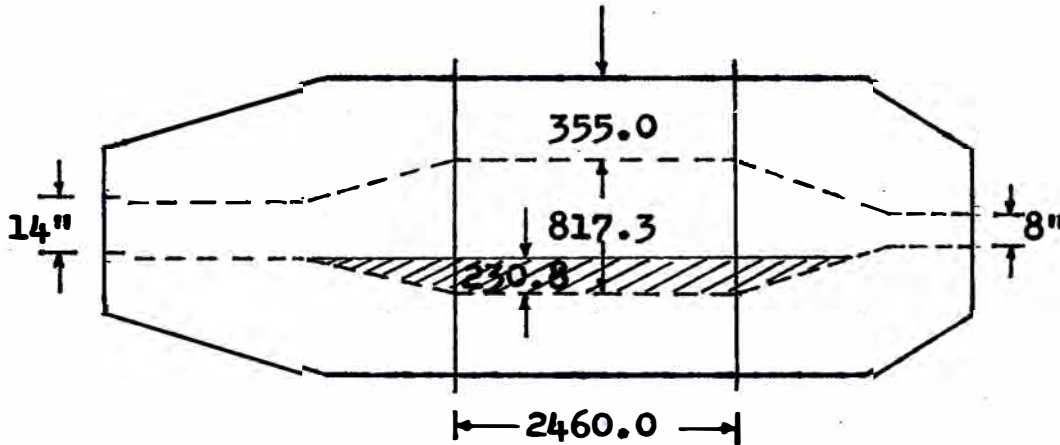


**a.8.4.- Recuperador de calor:-**

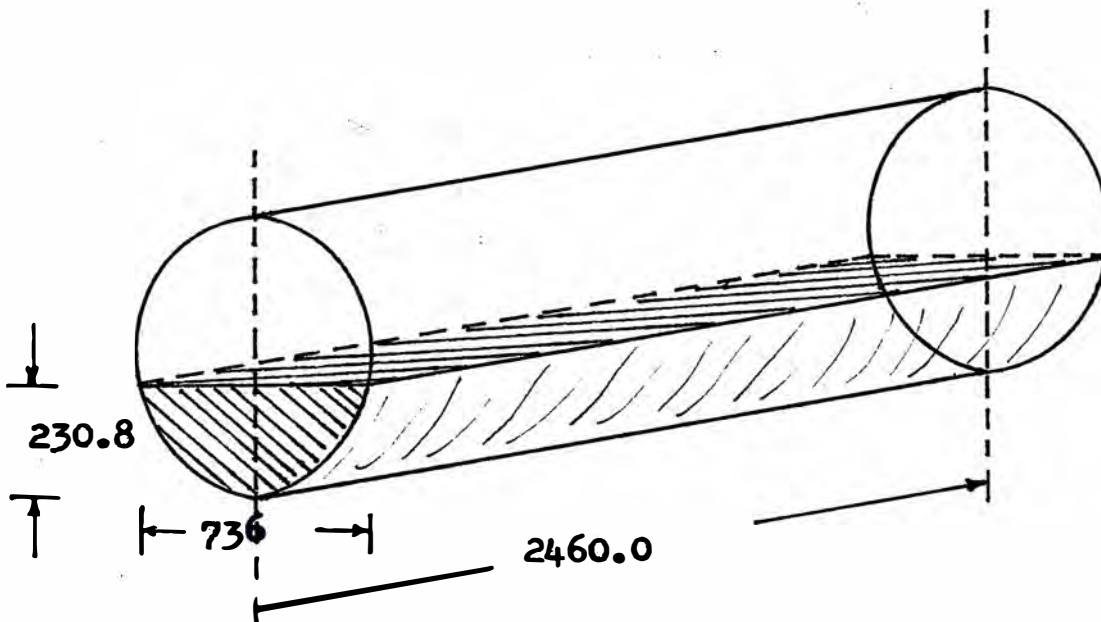


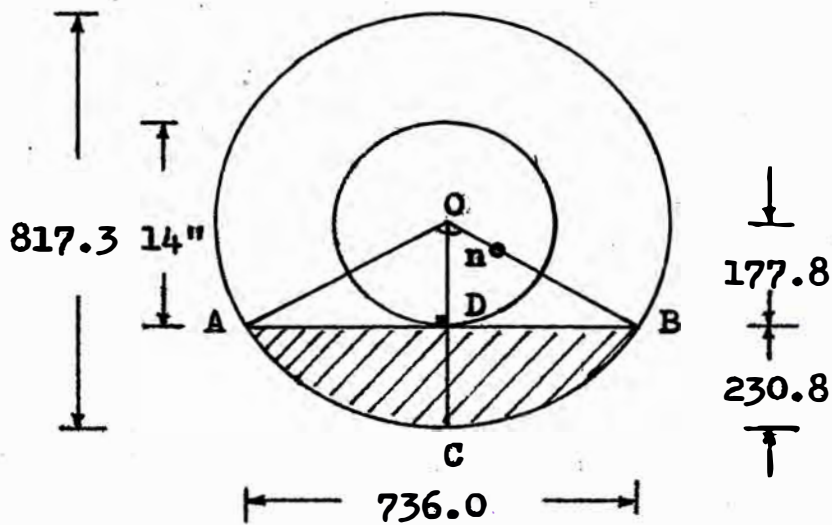
**a.9.- Cálculo de la capacidad del Horno Rotatorio.**

**a.9.1.- Dimensiones del Horno Rotatorio en su interior: medición en milímetros.**



**a.9.2.- Cálculo del segmento circular que se forma en el cilindro de metal líquido y su respectivo volúmen.**





$$n^{\circ} = 128.4$$

Area del segmento circular:

$$A = \frac{\pi r^2 n^{\circ}}{360} - \frac{c(r - h)}{2}$$

Donde : r ; radio del círculo (OA).

n°: ángulo mayor del triángulo ( $\sphericalangle$ AOB).

c : cuerda del segmento (AB).

h : altura del segmento (DC).

Reemplazando datos:

$$A = \frac{\pi (40.86)^2 (128.4)}{360} - \frac{(73.6)(40.86 - 23.08)}{2}$$

$$A = 1216.4 \text{ cm}^2.$$

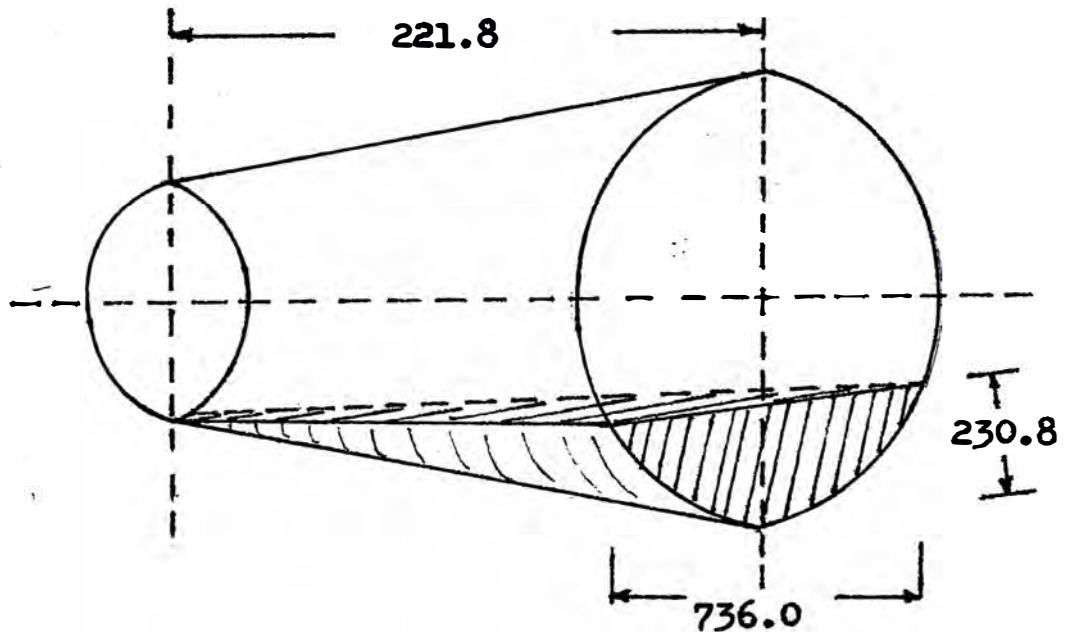
Volúmen que ocupa el metal líquido en la parte cilíndrica:

$$V = A \times h.$$

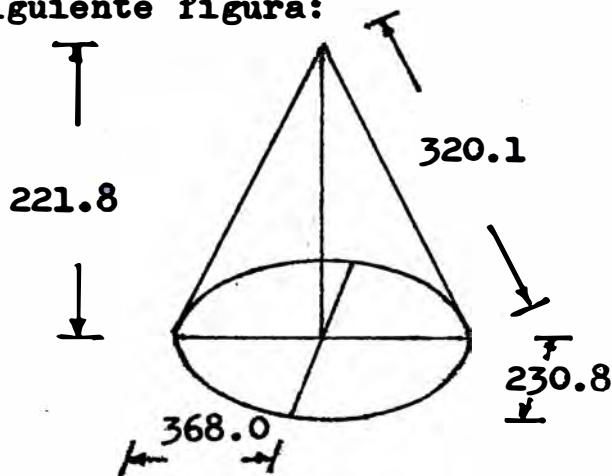
$$V_1 = 1216.4 \times 246 = 299234.4 \text{ cm}^3.$$

$$V_1 = 299234.4 \text{ cm}^3.$$

a.9.3.- Cálculo del volumen del metal líquido que ocupa en los troncos de conos.



La pendiente del refractario en ambos troncos de conos es la misma, si unimos imaginariamente la parte llena de material líquido de ambos troncos de conos, se puede tener una figura que se aproximaría a un cono de base elíptico; por lo tanto teniendo en cuenta esta consideración se tiene la siguiente figura:



Volumen del cono de base de elipse:

$$V = \frac{\pi abc}{3}$$

Donde: a = lado mayor.

b = lado menor.

c = altura.

$$V_2 = \frac{\pi (36.8)(23.08)(22.18)}{3} = 19727.6 \text{ cm}^3.$$

$$V_2 = 19727.6 \text{ cm}^3.$$

a.9.4.- Cálculo de la capacidad del Horno Rotatorio.

- Volumen total:

$$V_t = V_1 + V_2$$

$$V_t = 299234.4 + 19727.6$$

$$V_t = 318962 \text{ cm}^3.$$

- Peso específico del hierro en fundición gris.

$$\rho = 7.0 \text{ gr/cm}^3 = 7.0 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3.$$

- Capacidad del Horno Rotatorio.

$$\text{Como : } \rho = \frac{W}{V}$$

$$\text{Entonces : } W = \rho V.$$

$$W = 7.0 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3 \times 318962 \text{ cm}^3.$$

$$W = 2232.7 \text{ Kg.}$$

La capacidad del Horno Rotatorio, es de 2200 Kg, lo que equivale tambien a 2.2 Tn.

**b.- Cuchara o callana.**

El transporte del metal líquido del horno al lugar de colada, donde se encuentran las cajas de moldeo, se hace mediante el empleo de cucharas.

Las cucharas están hechos de planchas de hierro y el revestimiento refractario es variado, tanto para las cucharas chicas como para las grandes, que se han utilizado.

Para fundir piezas pequeñas, se utilizan las cucharas de 50 Kg. de capacidad, y es maniobrado por tres operarios. Estas son del tipo sifón, en los cuales se descorifica el metal más fácilmente. El metal se descorifica por medio de espumadores.

Cuando se funden piezas medianas y grandes se utiliza la cuchara de 500 Kg., el cual va suspendido de una grúa y transportados por ella, y maniobrados para colar el metal mediante tornillos sin fin y rueda helicoidal. Un obrero se encarga de transportar el crisol o cuchara, por medio de la grúa; del horno hasta el lugar de colada ( donde se encuentra las cajas de moldeo ), y otro se encargará de hacer la colada respectiva. Esta cuchara tambien es del tipo sifón.

**b.1.- Cuchara chica.**

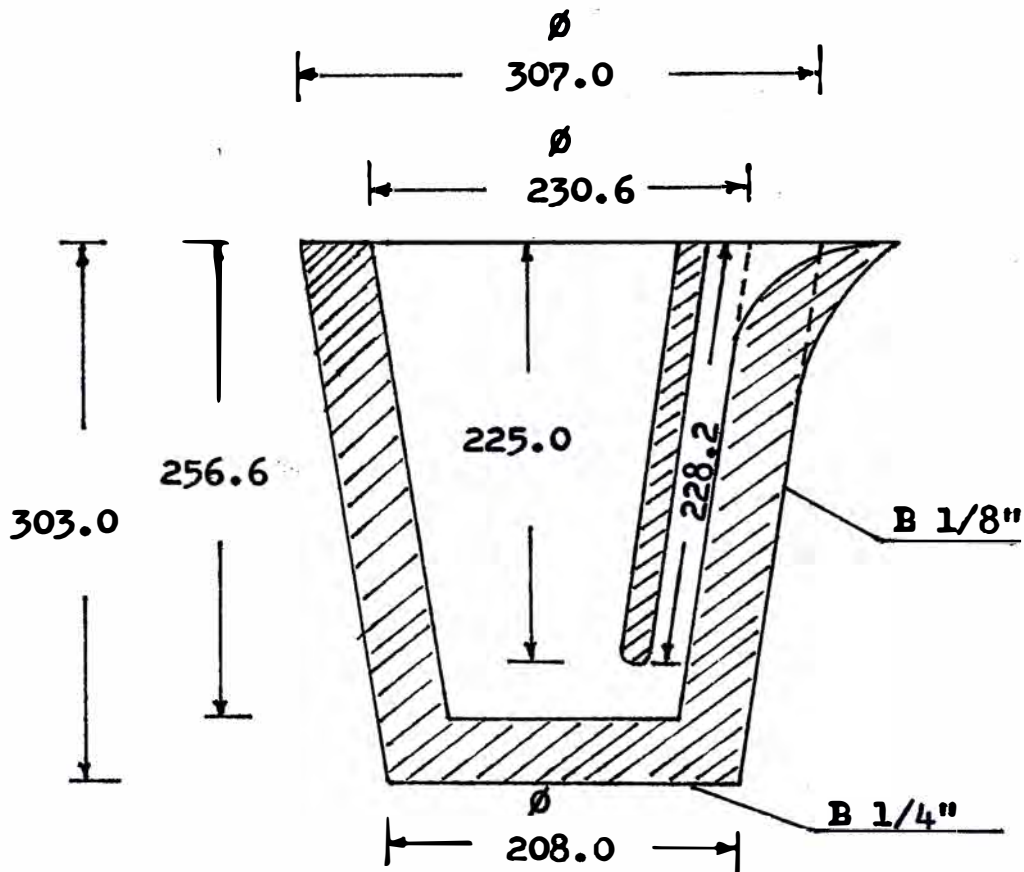
**b.1.1.- Revestimiento refractario.**

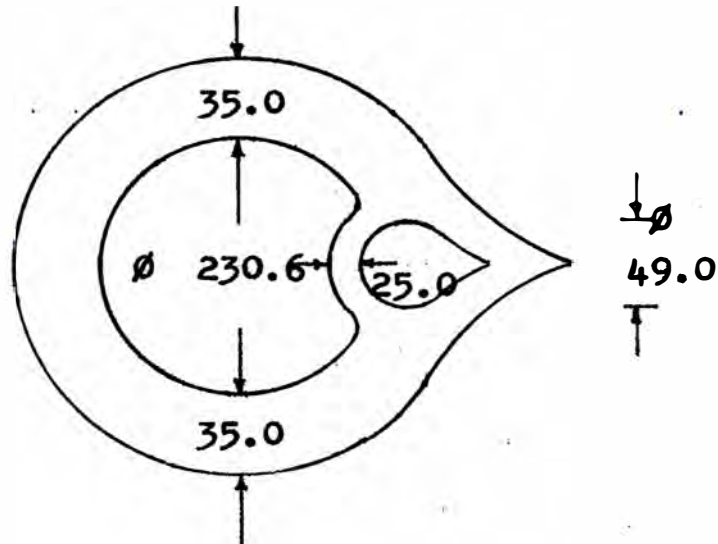
El revestimiento que va en la cuchara está compuesto por los siguientes materiales:

- Arena : 65.0 %
- Mortero super : 35.0 %
- Agua de chancaca.

**b.1.2.- Dimensiones de la cuchara.**

Medición dados en milímetros.





**b.1.3.- Cálculo de la capacidad de la cuchara.**

Según la figura se puede ver que se trata de un tronco de cono, a su vez también la formación de un cilindro hueco que se forma en el pico de colada, el cual ocupará las 3/8 partes del cilindro hueco en el tronco de cono.

**i.- Cálculo del volumen del tronco de cono.**

Empleando la fórmula:

$$V = \frac{\pi h}{12} (d_1^2 + d_2^2 + d_1 \times d_2)$$

Donde:  $d_1 = 23.06 \text{ cm.}$

$d_2 = 14.46 \text{ cm.}$

$h = 25.66 \text{ cm.}$



Reemplazando valores se obtiene:

$$V_1 = 7216.9 \text{ cm}^3.$$

ii.- Cálculo del volumen del cilindro hueco.

Empleando la fórmula:

$$V = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)h$$

Donde:  $d_o = 9.9 \text{ cm.}$

$$d_i = 4.9 \text{ cm.}$$

$$h = 22.82 \text{ cm.}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$V = 1326.3 \text{ cm}^3.$$

Debido a que el volumen que se ocupa en el tronco de cono es  $3/8$  de este cilindro hueco, se tiene lo siguiente:

$$V_2 = \frac{3}{8} (1326.3) = 497.4 \text{ cm}^3.$$

iii.- Capacidad de la callana .

$$V_t = V_1 - V_2$$

$$V_t = 6719.5 \text{ cm}^3.$$

Como :  $\rho = \frac{W}{V}$

y  $\rho = 7 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$ .

Entonces :

$$W = 47.0 \text{ Kg} \approx 50.0 \text{ Kg.}$$

Por lo tanto la capacidad de la cuchara es de aproximadamente 50.0 Kg.

#### **b.2.- Cuchara grande.**

##### **b.2.1.- Revestimiento refractario.**

El revestimiento que va en la cuchara grande, está compuesto de los siguientes materiales:

- Ladrillo de Arco N° 2.
- Ladrillo recto.
- Mortero super.
- Agua de chancaca.

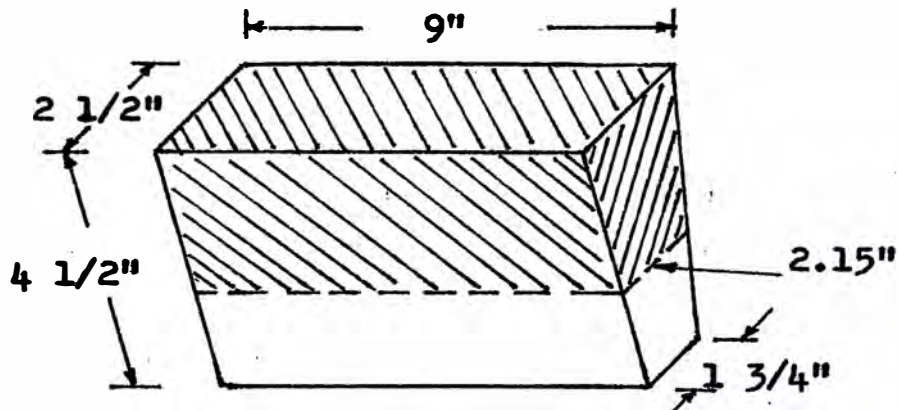
A continuación se hace una descripción breve de los ladrillos Arco y recto:

##### **Arco N° 2.-**

Sus dimensiones son::

9" x 4 1/2" x (2 1/2" - 1 3/4").

Este ladrillo se puso alrededor de la parte interna de la cuchara. En la figura se indica la parte sombreada que fué puesta a la cuchara.



Recto.-

Sus dimensiones son:

9" x 4 1/2" x 2 1/2".

Este tipo de ladrillo se puso en la base interior de la cuchara.

Ambos ladrillos tienen las siguientes especificaciones:

i.- Pertenecen a la clase sílico - aluminoso normal.

ii.- Temperatura : 1300°C a 1650°C .

Propiedades químicas.

$Al_2O_3$	:	32.0	-	35.0%
$SiO_2$	:	58.0	-	60.0%
$Fe_2O_3$	:	1.5	-	2.0%
Alcalis, máx.	:	2.0		%

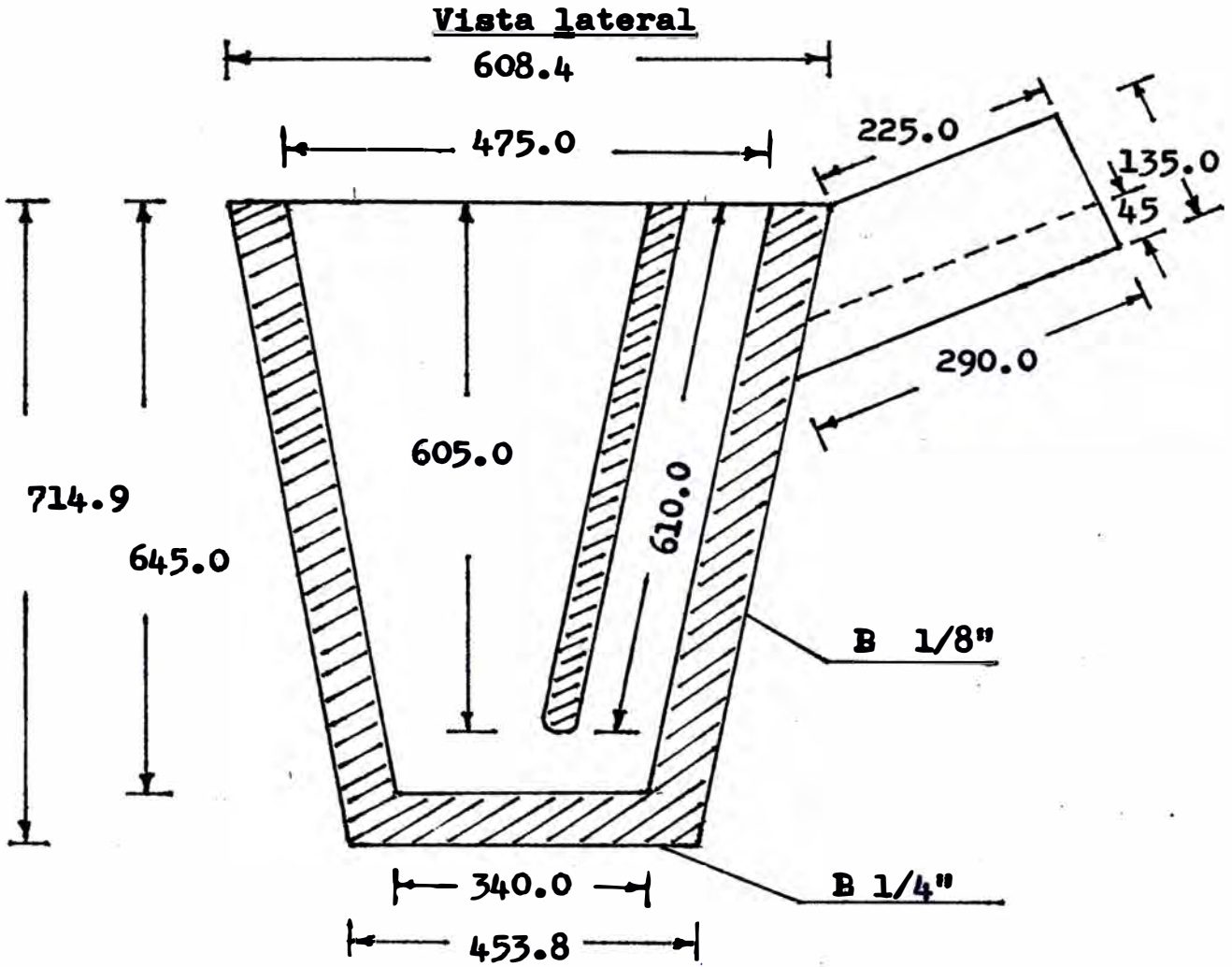
Propiedades físicas.

- Como pirométrico equivalente : 27 - 30
- Densidad aparente,  $gr/cm^3$ . : 2.0 - 2.2
- Porosidad aparente. : 18 - 21 %
- Resistencia a la compresión. : 300 - 400  $Kg/cm^2$ .
- Módulo de rotura a la flexión. : 80  $Kg/cm^2$ , mín.
- Tolerancia dimensional. :  $\pm$  1.0 %

**b.2.2.- Dimensiones de la cuchara.**

La medición se da en milímetros.

Debido a las irregularidades que presentó el armazón metálico, las medidas tomadas tanto en el interior como en el exterior, nos dió la forma de un tronco de elipse, por lo tanto daremos su capacidad en forma aproximada.



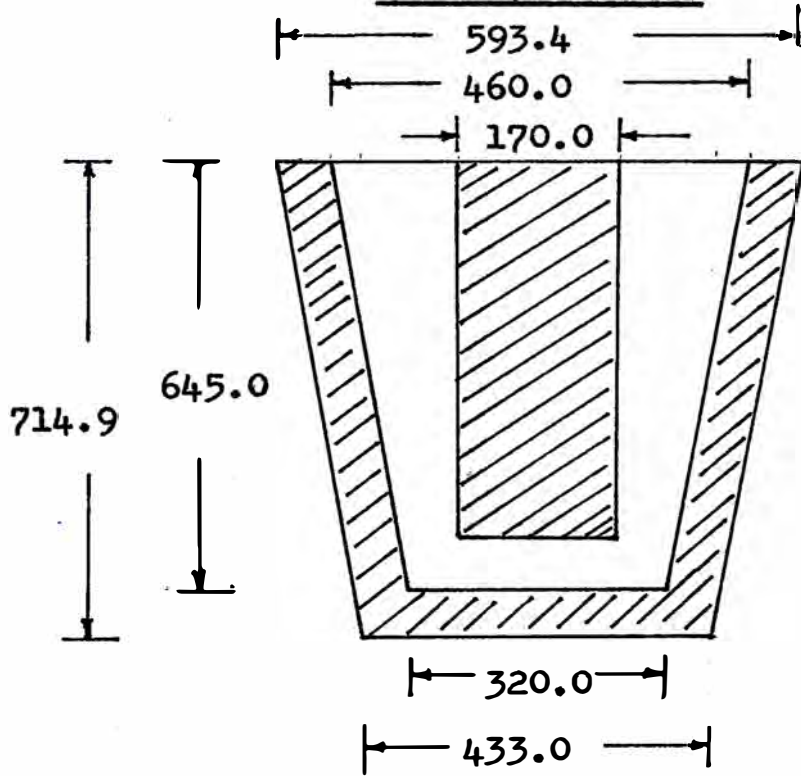
**b.2.3.- Cálculo de la capacidad de la cuchara grande.**

Según las dimensiones y forma que tiene, se hallará el volumen del tronco de elipse y las  $3/4$  partes de un cilindro hueco que hay en el tronco de elipse.

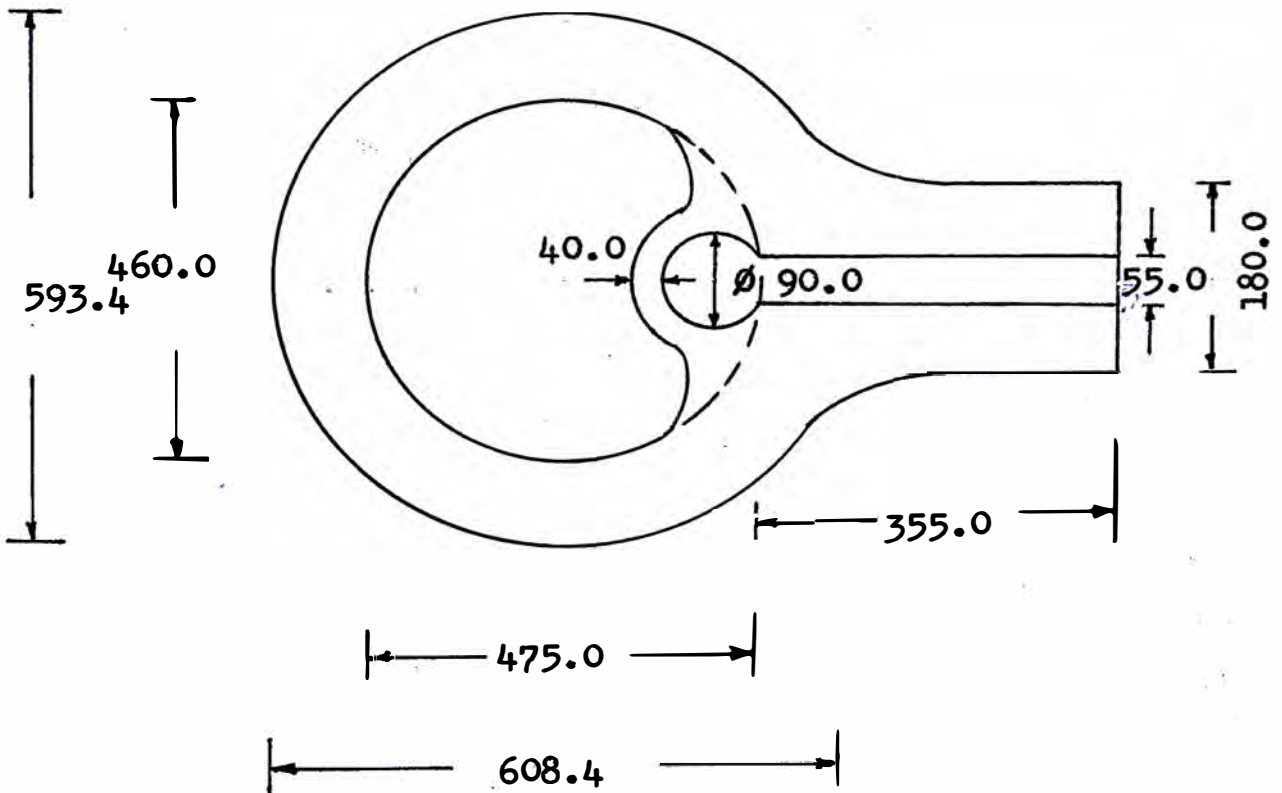
**1.- Cálculo del volumen del tronco de elipse.**

Empleando la formula:

Vista posterior



Vista planta



$$V = \frac{\pi c}{6} (2(ab + a'b') + ab' + a'b)$$

Donde :  $a = 23.75 \text{ cm.}$

$$b = 23.00 \text{ cm.}$$

$$c = 64.50 \text{ cm.}$$

$$a' = 17.00 \text{ cm.}$$

$$b' = 16.00 \text{ cm.}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$V_1 = 81306.4 \text{ cm}^3.$$

ii.- Cálculo del volumen del cilindro hueco.

Empleando la fórmula:

$$V = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) h$$

Donde :  $d_e = 17.0 \text{ cm.}$

$$d_i = 9.0 \text{ cm.}$$

$$h = 61.0 \text{ cm.}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$V = 9965.1 \text{ cm}^3.$$

Como ocupa las  $3/4$  partes de dicho cilindro hueco se tiene lo siguiente:

$$V_2 = 7473.8 \text{ cm}^3.$$

iii.- Capacidad de la callana o cuchara.

$$V_t = V_1 - V_2 = 73832.6 \text{ cm}^3.$$

$$f = \frac{W}{V}$$

$$W = 516.8 \text{ Kg.} \approx 500 \text{ Kg.}$$

Por lo tanto la capacidad de la cuchara es de 500 Kg. aproximadamente.

**c.- Materias primas.**

En la fundición se escogen diversas cualidades de los materiales que introducidos en el horno en proporciones distintas, y fundidas juntamente, dan las aleaciones que se vacían directamente en los moldes.

Los materiales que conforman la carga deben seleccionarse cuidadosamente, por lo tanto, es deseable conocer, en cuanto sea prácticamente posible la constitución química de las mismas.

La carga del horno está constituido por materiales metálicos y fundentes. Las materias primas que intervienen son de diferentes clases, la cual vienen a ser los siguientes:

- Arrabio.
- Retorno de colada ó chatarra de fundición.



- Antracita.
- Piedra caliza.
- Ferroaleaciones.

**c.1.- Arrabio.**

El arrabio es producido por Sider-Perú como un producto intermedio en la fabricación del acero. Es el producto que sale del alto horno, también se le conoce como " Fundición " o " Hierro de primera fusión ".

El arrabio que se suministra viene lingo tes, con una composición química variable. La composición química se muestra a continuación:

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.9 - 4.3	1.6 - 2.6	0.03 - 0.05	0.015 - 0.050	0.05 máx.

**c.2.- Retorno de colada ó chatarra de fundición.**

Este material proviene de piezas rechazadas, mazarotas, bebederos, piezas mal coladas, etc.

El material debe ser seleccionado en varias categorías, a fin de que el fundidor pueda utilizar, según los casos, el material más adecuado. La composición química se muestra a continuación:

% C	% Si	% Mn	% S	% P
2.95 - 3.30	1.6 - 2.4	0.65 - 0.80	0.080 - 0.105	0.07 máx.

**c.3.- Antracita.**

En cuanto al uso de la antracita, que es un combustible sólido; se utiliza por su bajísimo contenido de ceniza y de materias volátiles, el cual es especialmente adecuado para la carburación del hierro colado. Es preciso de tener en cuenta la calidad de la antracita, en cuanto a :

- % de carbón fijo.
- Cantidad de volátiles.
- Humedad.
- Azufre.

**c.4.- Piedra caliza.**

La carga no metálica del horno, está constituida por la adición de fundentes para tener una buena fluidez en la escoria, condición necesaria para mantener el horno limpio y una operación eficiente.

Para adquirir una buena piedra caliza, es preciso tener las siguientes consideraciones como:

- % de volátiles.
- % óptimo de  $\text{CaCO}_3$  .
- Bajo % de azufre.

**c.5.- Ferroaleaciones.**

Las ferroaleaciones sirven para adicionar al horno como parte de la carga, para la regulación de los niveles de silicio y manganeso contenidos en el producto.

Los ferroaleantes más usados son:

- Fe-Si : 45 % de silicio.
- Fe-Mn : 75 % de manganeso.

También se hace uso del Fe-Si 75 % , pero en menor escala ; así también se utiliza en ciertos casos la chatarra de acero, cuando el % de carbono en la carga está en exceso.

**d.- Control Químico.**

Los ensayos y los exámenes químicos son de fundamental importancia, tanto para la comprobación de la materia prima, como para la verificación de los resultados.

El hierro es el elemento base, el cual no es determinado nunca directamente sino sólo por diferencia del total, después de haber determinado todos los otros elementos contenidos (C, Si, Mn).

El control de la producción y la investigación científica están basados en dos métodos fundamentales: el análisis químico y el análisis metalográfico. El primero nos dice cuales elementos y en que proporción están contenidos en la aleación; y el segundo como están contenidos tales elementos,

esto es como están distribuidos y combinados entre sí, cuales son sus formas, sus dimensiones y su disposición; el exámen metalográfico nos revela pues, la estructura del material.

Para disponer las cargas para la fusión de la fundición es preciso, por consiguiente, tener presente varios factores, a saber:

- El análisis químico y las características de las piezas que se quiere obtener.

- El análisis químico y la naturaleza de las materias primas de las cuales se dispone.

- Las variaciones del análisis químico que sobrevengan durante la fusión del Horno Rotatorio.

Las piezas de fundición deben tener características diversas según su importancia, su destino o sus dimensiones; por eso serán diversos los análisis químicos, las estructuras, las propiedades mecánicas, etc.

El análisis químico, o la estructura, o la resistencia mecánica, pueden ser prescritos por el cliente; en caso contrario, se eligen según la experiencia, es decir eligendo los materiales más adecuados, y se calcula la composición de las cargas, teniendo en cuenta las variaciones del análisis químico durante la fusión.

#### e.- Operación del Horno Rotatorio.

La etapa de fusión se refiere a la disolución del

metal a altas temperaturas, el cual generará determinada cantidad de calor, y esto estará de acuerdo a la característica de cada metal o aleación.

El número de coladas que se realiza en esta fundición es de dos coladas diarias.

La carga de las materias primas, se le va incrementando de acuerdo al desgaste del revestimiento. Antes de que se adicione la carga, se le pesa para el control respectivo.

La primera carga se efectúa con el horno frío, introduciendo primero el retorno de colada o fundición, a continuación el arrabio, el carbón y la piedra caliza. El arrabio y el carbón (antracita), no se adiciona en su totalidad, sino después de un cierto tiempo se adiciona el resto.

Los ferroaleantes se agregan, después de haberse sacado una primera muestra preliminar, el cual se mandará a analizar al laboratorio químico y de acuerdo a sus resultados se añadirá la cantidad que se requiera.

El objetivo del Horne Rotatorio, es el de proporcionar al metal el calor necesario para fundirlo y recalentarlo hasta el punto de que se adquiera la fluidez necesaria para adoptar la forma del molde.

Se enciende el horno y se le mantiene estacionario hasta que la carga comience a fundirse. Cuando la masa está fundida, se comienza hacer rotar el horno, de modo que todo el recubrimiento entre en contacto, alternativamente, con la llama y con el metal; la máxima rotación se aplica

cuando el metal está cubierto de escoria, ello asegura una mezcla eficaz y, a la vez, la máxima homogeneidad del baño.

A continuación se muestra la secuencia de operación de una colada, para una carga de 1950 Kg.

i.- La distribución de graduación del aire está dividido en 10 puntos, el cual se coloca la palanquilla en uno de los puntos convenientes; mayormente se pone entre los puntos 6 ó 7 .

ii.- Se prende el horno : 10:00 a.m.

iii.- Se hace rotar el horno : 10:30 a.m.

iv.- Se adiciona el arrabio y el carbón  
para completar la carga : 11:00 a.m.

v.- Se saca una muestra preliminar : 11:30 a.m.

vi.- Se adiciona los ferroaleantes : 11:50 a.m.

vii.- Se empieza a colar : 12:30 a.m.

La duración de la fusión desde que se prende, hasta que se empiece a colar es de 2 hr.20 min.

Se debe tener en cuenta que la duración de la fusión es variable, debido a los diversos problemas que podrían surgir ; como tambien depende de la carga que se vaya a fundir.

## 2.- Colada.

Para efectuar la colada hay que romper el tapón del

pico de colada, y vaciar el metal pulsando el mando reversible, haciendo girar parcialmente el horno en ambos sentidos.

Se sabe que para determinado tamaño y espesor de la pieza, la temperatura adecuada varía de acuerdo al tipo de pieza que se va a colar.

Las cucharas a utilizar deberán estar calentados al rojo, con el fin de que durante el trayecto no se enfrién rápidamente el metal líquido y se haga la colada dentro del rango establecido para determinada pieza.

Para el control de la temperatura se cuenta con un aparato, llamado Pirómetro óptico.

A continuación describiré en una forma general, el modo de como se realiza la colada:

- Primero se comenzaba a colar los moldes, cuyas piezas a obtener son de menor importancia ya que no necesitan de un control estricto.

- Luego de comprobarse que la temperatura era adecuada, se empezaba a colar las piezas de mayor importancia.

Antes de adicionar o vaciar el metal líquido al molde, se añadía a la cuchara SLAX-30, el cual viene a ser un descorificador.

- Enseguida se pasaba a colar, poniendo la cuchara lo más bajo posible, hasta que llene el molde sin que haya interrupción, es decir sin cortar la alimentación, hasta que se haya llenado el molde.

- En la colada que se efectúa, se procura que el metal líquido salga de la cuchara limpio de escoria, y que los gases no queden obturados.

Después de haber llenado el molde de metal líquido, se cubre el metal que aparecen en los bebederos, mazarotas, con arena seca, para hacer más lento el enfriamiento de dicho metal.

Al finalizar la colada, y ver la aparición de escoria, se apagaba el horno y después se vaciaba al suelo todo lo que quedaba dentro del horno.

Para desprender la escoria y metal adherido a las paredes del horno, se prendía de nuevo y se hacía rotar continuamente, hasta que no quede nada dentro del horno y dejarlo listo para la segunda colada.

## E.- PRODUCTO FINAL Y CONTROL DE CALIDAD.

### a.- Producto final.

#### a.1.- Enfriamiento y desmoldeo.

Luego de haberse colados los moldes, se le dejan solidificar y enfriar el metal.

El tiempo de enfriamiento depende de la naturaleza del molde, de las dimensiones y espesores de las piezas. En los moldes de arena, por ejemplo, como son malos conductores del calor, las piezas deben permanecer mayor tiempo en el molde.



El desmoldeo para piezas chicas se hace en el mismo lugar en que se ha realizado la colada. De aquí son llevados a un patio, donde se les extrae, las partes inútiles como bebederos, mazarotas y cargadores, por medio de martillos.

El desmoldeo para piezas de mayor volumen, se hace llevando la caja de moldeo con una grúa puente del lugar de colada, hasta donde está ubicado la zaranda vibratoria. La arena cae debajo de la parrilla donde será recogida por una faja transportadora que la conduce a la sección de preparación de arenas de moldeo, mientras encima, quedan las cajas y las piezas libres de arena.

Después se sacan y son llevados a un patio, donde se le separa de las partes inútiles, como bebederos, alimentadores, etc., por medio del disco de corte, el cual es accionado por un motor y es portátil.

#### a.2.- Limpieza y acabado.

Para la limpieza se utilizan dos equipos, la granalladora y el equipo con chorro de arena.

La granalladora emplea, la granalla de acero; tiene la forma de un cilindro y es rotatorio, el tiempo de limpieza dura de 20 a 30 minutos y tiene las medidas de 80 Ø por 90 de altura (cm x cm).

El equipo del chorro de arena está ubicado dentro de un cuarto sin techo, para que el polvo salga al aire libre.

Esta limpiadora comprende de un recipiente en donde se cargará de arena, el aire entra en este recipiente a una presión de 90 lb/pulg<sup>2</sup>. El operario cubierto con un casco, maniobra la lanza de chorro de arena.

Luego de las limpiezas, se le lleva a la sección de acabado, donde se le quitará las rebarbas que contienen, el cual son ejecutados con el disco de esmeril.

La operación de acabado comprende, el maquinado de la pieza para darle las dimensiones requeridas, así como el pintado que se da a algunas piezas con pintura anticorrosiva.

#### **b.- Control de calidad.**

La inspección de las piezas de fundición en la planta responde básicamente a dos propósitos: primero, para descartar las piezas que no cumplan con los requisitos establecidos y segundo para garantizar la manufactura y los materiales empleados en la fundición.

Entre los métodos de inspección más usuales tenemos:

##### **b.1.- Inspección visual.**

El examen visual constituye una parte normal en el proceso de fabricación de las piezas de fundición, con lo cual se determina si la superficie de dichas piezas cumplen con las características deseables.

Además por el simple examen visual se pueden

detectar fallas visibles, la que con procedimientos simples se determinan si tales errores ocurrierón en el moldeo, colada, etc.

**b.2.- Inspección dimensional.**

La fabricación de piezas, requiere de una inspección dimensional, el cual comprende de medir tanto en el contorno, como el tamaño de las piezas con un trazador con regla métrica y calibrador.

**b.3.- Grosor de la pared.**

El diseño y grosor de la pared interna se controla por el seccionado de la pieza. El chequeo del grosor de la pared es normalmente por medio de métodos destructivos.

**b.4.- Inspección metalúrgica.**

Son los siguientes:

- Análisis químico.
- Exámen metalográfico.
- Ensayos mecánicos.
- Análisis químico.

Los exámenes químicos es muy preponderante en el estudio de las aleaciones de fundición.

Estas pruebas y exámenes químicos servirán para comprobar la materia prima y la verificación de los resultados obtenidos.

El laboratorio cuenta con un equipo DIETERT, cuyo método de análisis es por combustión y sirve para analizar el Carbono y Azufre.

Además emplea el método Gravimétrico, para analizar por vía húmeda al silicio. Emplea el método Volumétrico, para analizar por vía húmeda al manganeso.

- Exámen metalográfico.

Para examinar la microestructura de la pieza, la fundición cuenta con un microscopio, reactivos y pulimentador.

El análisis que se realiza sobre la microestructura de la pieza, es para ver el tamaño, tipo y distribución del grafito, así como el contenido que pueda presentar en la matriz como perlita, ferrita, cementita, steadita, etc.

- Ensayos mecánicos.

Las pruebas que se realizan son:

Dureza y Resistencia a la tracción.

### CAPITULO III

## INOCULACION Y EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PRINCIPALES INOCULANTES EN EL HIERRO FUNDIDO GRIS

### A.- GENERALIDADES

La inoculación es un tratamiento que consiste en añadir pequeñas cantidades de ciertas sustancias a un metal líquido, provocando modificaciones físico - químicas distintas de las que producirían estas mismas sustancias como elementos de aleación, esta definición es dada según el diccionario internacional de fundición.

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

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

Si el germen tiene el tamaño crítico para que sobre él se produzca la nucleación, dará lugar a un cristalito. Este tamaño

crítico es función del grado de subenfriamiento y, por tanto, de la velocidad de solidificación.

En consecuencia, el tamaño final de los cristales dependerá de la estabilidad de los cebos y de la velocidad de enfriamiento.

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

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

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

## **B.- SOLIDIFICACION DEL HIERRO FUNDIDO**

La mayor parte de los procesos de fundición, se consideran y estudian en función de estructuras y de su solidificación, por el solo hecho de que es fácil medirlos por medio de parámetros.

Considerando el argumento de la constitución del bajo enfriamiento y aunque sea claro que la temperatura gradiente juega importante papel en la estructura final de las fundiciones. Más aún el promedio de crecimiento es en verdad controlada por la temperatura gradiente en el líquido. Una alta temperatura gradiente, reclama el retiro de considerables cantidades de calor a través de la interfase sólido - líquido y que, por lo tanto la velocidad de solidificación será lenta.

La solidificación progresa por adición de átomos aislados o, en sustancias no metálicas, de moléculas a la superficie del cristal ya existente. El proceso total es la diferencia entre el número de átomos que se unen a la superficie en un tiempo determinado y el de los que la abandonan.

### **1.- Mecanismo de la solidificación**

Las aleaciones hierro - carbono al estado líquido tienen una solidificación progresiva, y esta solidificación comienza a producirse a una temperatura que es función del tener en carbono de la aleación.

Comercialmente el más importante eutéctico metálico está alrededor del 4% carbono en el sistema Hierro - Carbono. El hierro colado gris, blanco y dúctil están todos cerca a esta composición. Un hierro gris típico esta en el rango

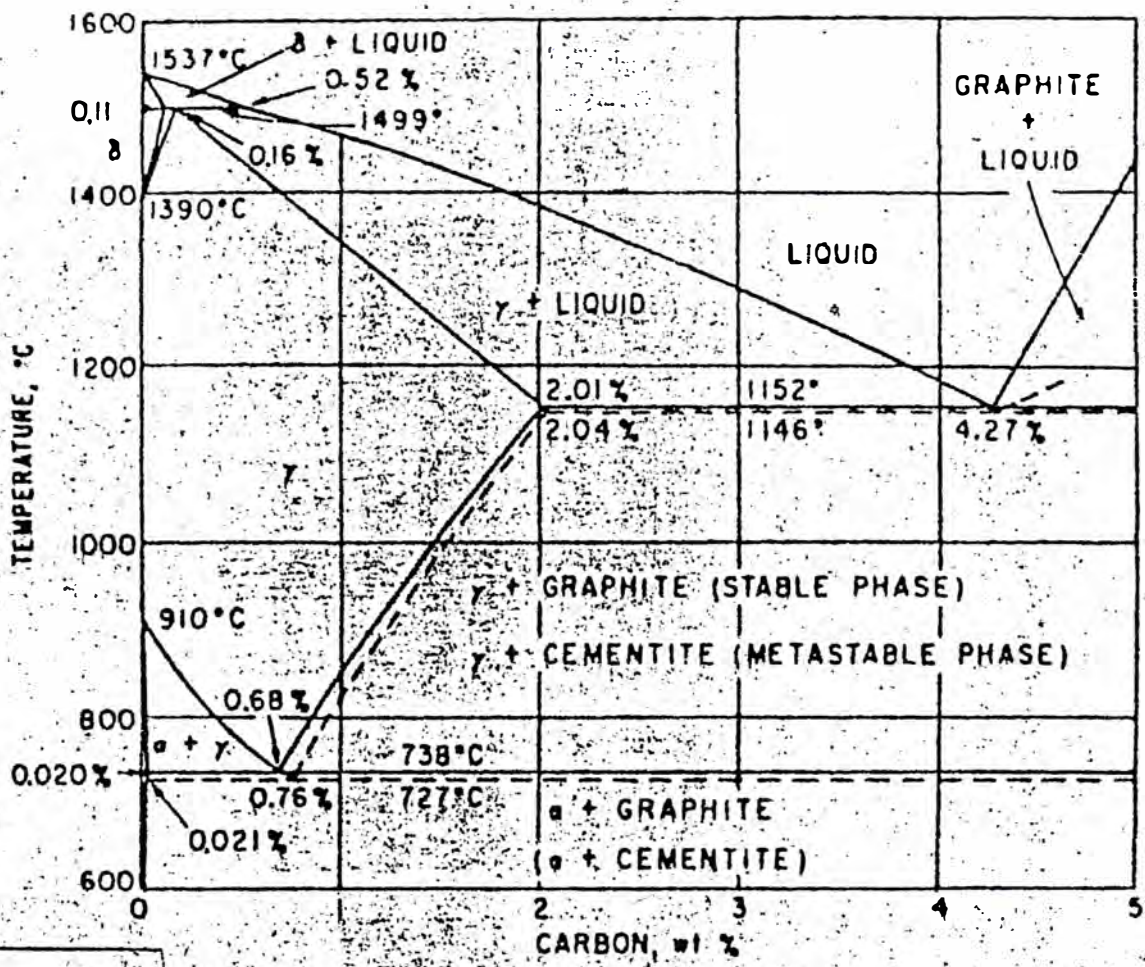
de 2 a 4% carbono, con 1% o más de silicio y una poca cantidad de manganeso. La solidificación y estructura del hierro fundido pueden estar cualitativamente en un simple diagrama binario Hierro - Carbono, asumiendo la completa difusión del carbono en la austenita durante y después de la solidificación.

Como ejemplo, una aleación Fe - 3% C puede solidificarse de acuerdo al sistema de equilibrio Hierro - Grafito (línea continua, Fig. 1-1) o en el sistema de equilibrio metaestable Hierro - Cementita (línea alterna, Fig. 1-1). A la temperatura eutéctica, en todo caso el equilibrio Fe - Grafito eutéctico o el equilibrio metaestable Fe -  $Fe_3C$  eutéctico (ledeburita) se forman, dependiendo de la temperatura de formación. Si la solidificación eutéctica ocurre muy por debajo del eutéctico metaestable, la proporción de aumento de la ledeburita es mucho más rápido que Fe - Grafito eutéctico para que esta estructura predomine.

En cambio, si la solidificación eutéctica ocurre sobre la línea eutéctica Fe -  $Fe_3C$  (y, por cierto, debajo del eutéctico Fe - Grafito), no puede formar ledeburita y la estructura solidificada es Fe - Grafito. Un número de factores influye la temperatura donde la solidificación eutéctica ocurre. Uno de estos factores es la proporción de enfriamiento; el lento enfriamiento favorece la solidificación según el sistema de equilibrio Fe - Grafito.

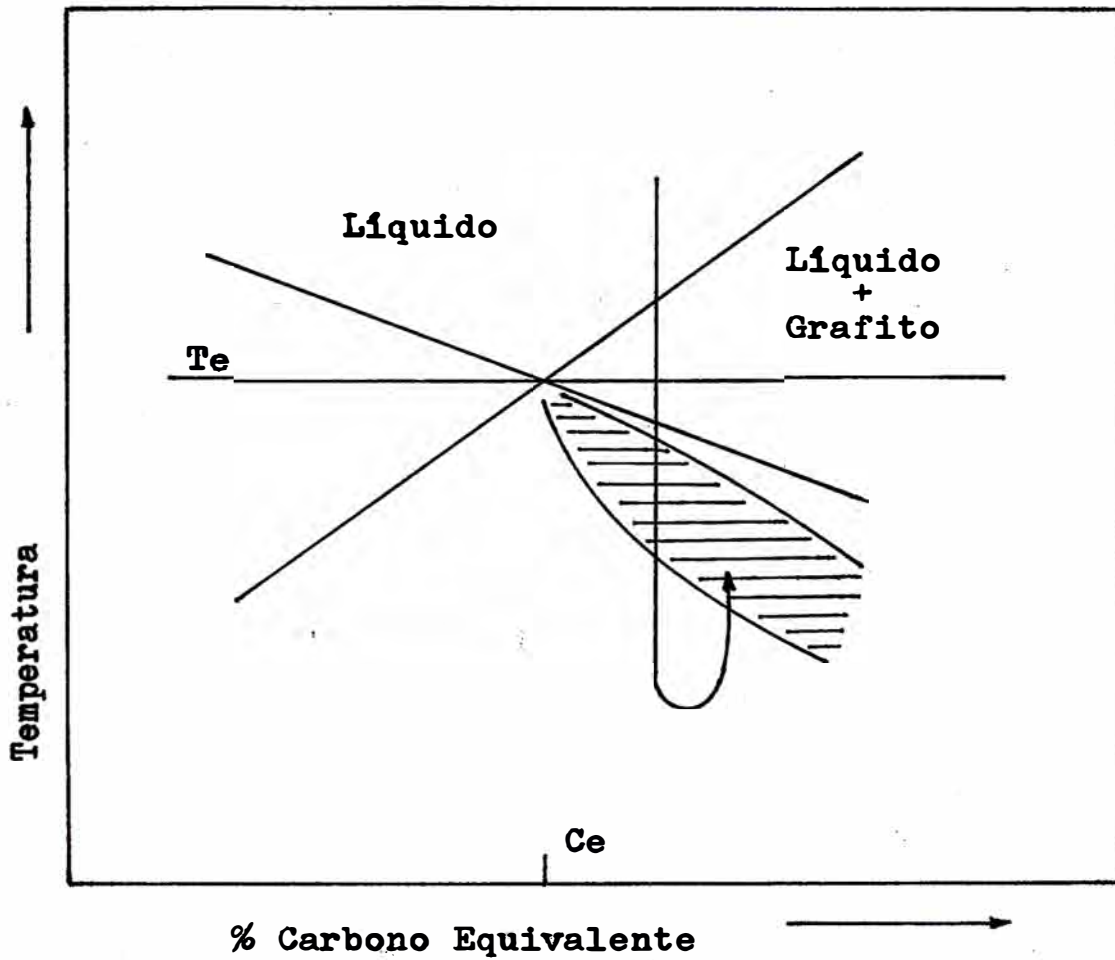
Las aleaciones que contienen más de 4.3% de carbono





**FIG. 1-1**

Iron-carbon phase equilibrium diagram. Dashed lines represent phase boundaries for metastable equilibrium with cementite.



**Fig. 1.- Hipótesis sobre la formación de dendritas de austenita en una fundición hipereutética. El área sombreada representa la zona de acoplamiento.**

se llaman hipereutécticas, y las aleaciones que contienen menos de 4.3% de carbono se llaman hipoeutécticas. La solidificación de estas aleaciones es diferente y se produce a partir del metal líquido que está compuesto de carbono disuelto en el hierro.

En una fundición hipoeutéctica, la austenita debe ser la primera fase que se forme, según indica el diagrama de equilibrio. En una fundición eutéctica, siguiendo la teoría del crecimiento acoplado asimétrico de Lakeland y Hogan, también se formará primero austenita. En el caso de las fundiciones hipereutécticas debería formarse en primer lugar grafito. Sin embargo, no es usual encontrar grafito primario. Antes al contrario, se observan dendritas muy parecidas a las de las fundiciones hipoeutécticas que parecen haberse formado antes de que precipite el grafito, debido a la velocidad de solidificación y al subenfriamiento necesario para que nucleee el grafito. La fig. 1 nos muestra cómo tiene lugar este proceso. El líquido hipereutéctico cruza la línea del liquidus, la línea eutéctica y la zona de acoplamiento sin que nucleee el grafito por no haber alcanzado el subenfriamiento necesario. En la primera germina la austenita, y al enriquecerse en carbono el líquido residual, <sup>entra</sup> en la zona de acoplamiento (segundo), en donde el enfriamiento es suficiente para que germine el grafito.

En el diagrama Fe - C se ve que el carbono queda libre por las descomposiciones de las soluciones sólidas y se puede depositar en la forma de grafito, sea si se combina al hierro para formar la cementita proeutectoide (temple primario)

rio) o la cementita perlítica.

Por otra parte, la austenita que cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas, mucho más regular e isotrópico que el sistema hexagonal del grafito, ve favorecida su nucleación por la acción de elementos que bloquean el crecimiento dendrítico para dar lugar a un crecimiento equiaxial. Elementos como el Zr y el Nb, bien conocidos de los aceros, provocan una nucleación abundante de la austenita.

Podríamos pensar que la austenita nuclea al grafito; pero se ha demostrado que no es así, ya que las fases que crecen sin facetas (austenita) no pueden nuclear a las facetadas (grafito).

Otro hecho que parece cierto es que la forma final del grafito laminar, vermicular o esferoidal no es consecuencia de la inoculación, sino de las condiciones en que se encuentra el baño metálico especialmente del sobreenfriamiento constitucional y del sobreenfriamiento cinético, como han demostrado Munitz y Minkoff. Las técnicas de pulido por plasma y la utilización del EDAX han puesto de manifiesto que las impurezas que se encuentran en el grafito laminar y en el esferoidal son muy similares.

## 2.- Tendencia a la grafitización de un hierro fundido

La tendencia a la grafitización de un hierro fundido directamente en una solidificación está en función de cuatro factores principales:

a.- Separación entre las temperaturas de equilibrio

de los eutécticos estable y metaestable, que es principalmente función del porcentaje de silicio.

b.- Velocidad de enfriamiento.

c.- Grado de nucleación, en particular del grafito.

d.- Presencia de pequeños porcentajes de elementos tales como: azufre, telurio, bismuto, etc.

Uno de los aspectos básicos de la solidificación de los hierros fundidos es la dificultad de nucleación del eutéctico estable que es reflejada por el grado de sobreenfriamiento necesario para que se inicie la solidificación de un hierro fundido gris. Las curvas de enfriamiento de los hierros fundidos grises tienden a mostrar un considerable sobreenfriamiento debajo de la temperatura de equilibrio del eutéctico estable antes de ocurrir la nucleación de las células eutécticas. El crecimiento subsecuente del eutéctico Grafito - Austenita tiende a dar con un sobreenfriamiento menor. Esto se ilustra en la fig. 2 donde se puede notar que la nucleación se da con un sobreenfriamiento elevado,  $\Delta T_n$ , y el crecimiento con un sobreenfriamiento pequeño,  $\Delta T_G$ .

Por otro lado, se sabe que a medida que la velocidad de enfriamiento aumenta, la temperatura de nucleación de un hierro fundido gris disminuye y, por tanto,  $\Delta T_n$  aumenta. La nucleación del eutéctico metaestable ocurre con pequeño sobreenfriamiento y, por tanto, la velocidad de enfriamiento tiene poca influencia en la temperatura de nucleación del eutéctico metaestable.

El grafito no se deposita si la velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente lenta. El estado final del



metal tiende a tener en equilibrio dos fases sólidas. El equilibrio inestable de solución sólida y de cementita (Perlita - Cementita : fundiciones blancas) ó el equilibrio estable de solución sólida y de grafito (Ferrita - Grafito : fundiciones grises).

La velocidad de enfriamiento limita que el carbono y el hierro comienzan a combinarse y a esto se dice velocidad crítica de temple y esta en función de la composición de la aleación.

Ciertos factores aumentan el valor de esta velocidad crítica de temple y favorecen de esta forma los depósitos de grafito para una marcha de enfriamiento dado (por ejemplo: metal colado en molde de arena), a estos elementos se les dice grafitizantes. Otros elementos disminuyen el valor de esta velocidad crítica y favorecen la formación de carburos, estos son los elementos antigrafitizantes.

La presencia de estos elementos a excepción del hierro y el carbono en una aleación, desplaza los puntos particulares y las líneas del diagrama sin modificar la marcha en general.

Es básicamente la relación entre la velocidad de enfriamiento y las temperaturas de nucleación de los eutécticos estable y metaestable que determinan si el material se solidificará como hierro fundido gris o como hierro fundido blanco. Esto se representa esquemáticamente en la fig. 3 que muestra la dimensión crítica de la sección debajo de la cual se formaría hierro fundido blanco y encima de la cual se formaría hierro fundido gris. La fig. 3 muestra igualmente que

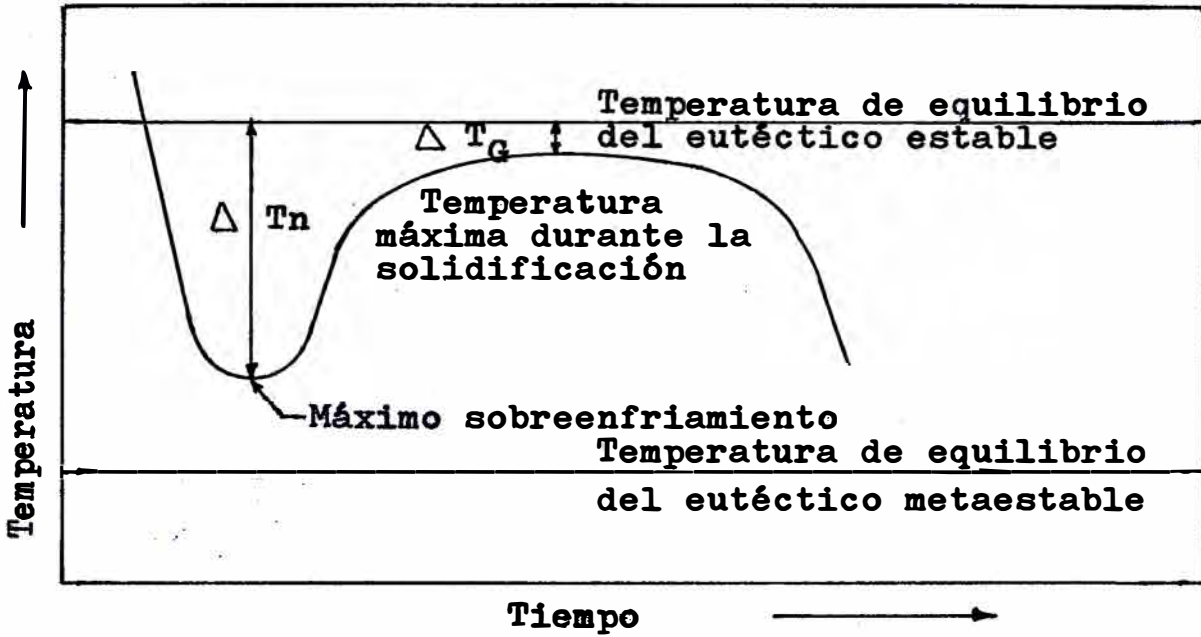


Fig. 2.- Curva de enfriamiento, mostrando sobreenfriamiento en la nucleación y en el crecimiento.

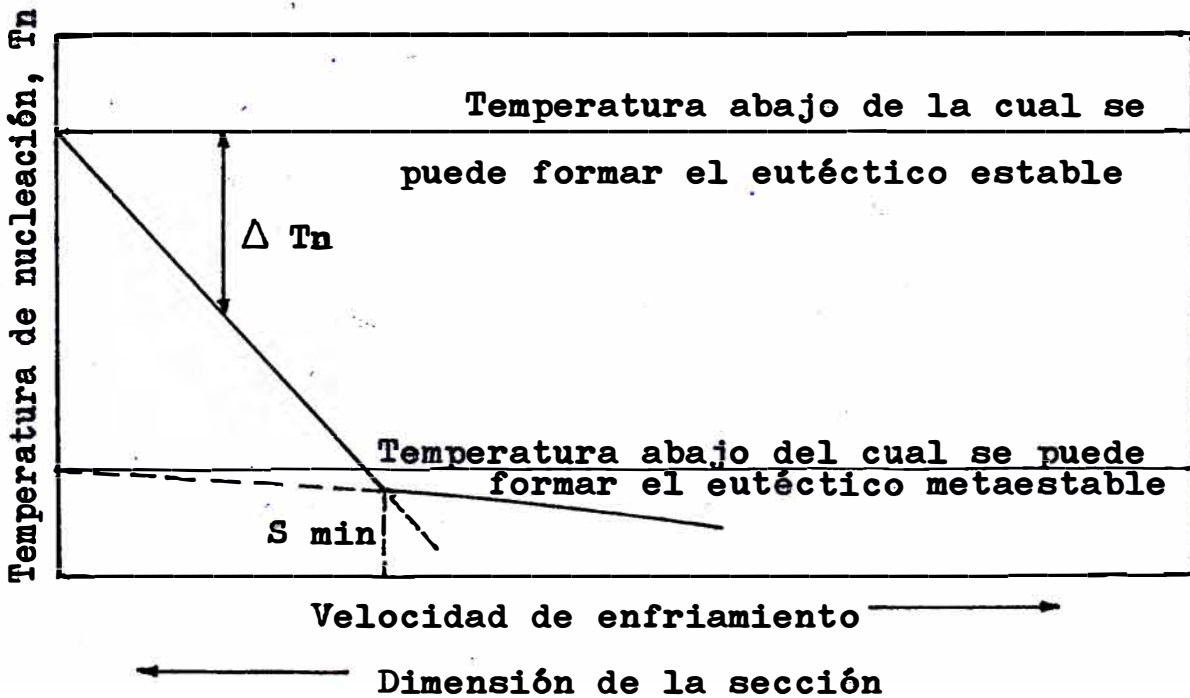


Fig. 3.- Representación esquemática de la influencia de la temperatura de nucleación del eutéctico en la dimensión mínima de la sección (S min.) que puede ser obtenida exenta de carburos de solidificación.

existe una velocidad de enfriamiento crítica encima del cual se formaría hierro fundido blanco y debajo de la cual hierro fundido gris.

El objetivo básico de la nucleación es promover la solidificación del eutéctico austenita - grafito para la modificación de la relación entre el sobreenfriamiento de la nucleación eutéctica ( $\Delta T_n$ ) y la velocidad de enfriamiento.

Se ha verificado que, mediante un conjunto de condiciones experimentales, los inoculantes tienden a reducir el  $\Delta T_n$  en grados diferentes en función de su poder grafitizante. Así, por ejemplo, la fig. 4 muestra el efecto de dos inoculantes diferentes, un inoculante suave (inoculante A) y otro poderoso (inoculante B) en la relación entre la temperatura de nucleación del hierro fundido gris y la velocidad de enfriamiento. Esto demuestra porque ciertos inoculantes eliminan la formación de hierro fundido blanco en una sección dada y otros no.

La influencia del grado de nucleación de un hierro fundido en la tendencia al achilamiento es compleja y los dos sólo pueden ser relacionados directamente para cada inoculante en particular. Ha sido mostrado que cuando el efecto de un inoculante disminuye con el tiempo, ocurre simultáneamente una disminución en el grado de nucleación y así un aumento en el valor de  $\Delta T_n$ . En consecuencia la relación  $\Delta T_n/V_c$  (velocidad de enfriamiento, gradualmente vuelve la relación (a la situación) del hierro fundido base. Consecuentemente la dimensión mínima de la sección que puede ser producida sin carburos de solidificación (sin achilamiento) aumenta. Inversamente



mente cuando se aumenta la cantidad de inoculante el grado de inoculación aumenta y el valor  $\Delta T_n$  disminuye. Esto entonces disminuye la dimensión mínima de la sección que puede ser producida libre de achilamiento.

No habido, entretanto, relación única entre el grado de nucleación y tendencia al achilamiento, de forma que, un inoculante que provoque aumento máximo en el grado de nucleación no significa que necesariamente irá promover la máxima disminución en la tendencia al achilamiento. Realmente, la tendencia al achilamiento puede ser fuertemente reducida sin cambio en el grado de nucleación. El silicio por ejemplo, es conocido como un elemento grafitizante. Ello produce este efecto, por la separación de las temperaturas de equilibrio de los eutécticos estable y metaestable y consecuentemente un aumento del porcentaje de silicio en el hierro fundido produce un efecto marcado en la tendencia al achilamiento disminuyendo la dimensión de la sección que puede ser obtenida libre de achilamiento para una relación dada  $\Delta T_n / \text{Velocidad de enfriamiento}$ . El efecto de algunos elementos como el cromo, por ejemplo es el de disminuir la separación entre los dos eutécticos y consecuentemente aumentar la dimensión mínima de la sección que puede ser obtenida sin achilamiento.

Conviene mencionar que hay elementos, tales como el telurio y bismuto, que actúan como promovedores de carburos por aumentar el valor de  $\Delta T_n$  para una velocidad de enfriamiento dada. Por tanto, actúan en el sentido de aumentar el achilamiento.

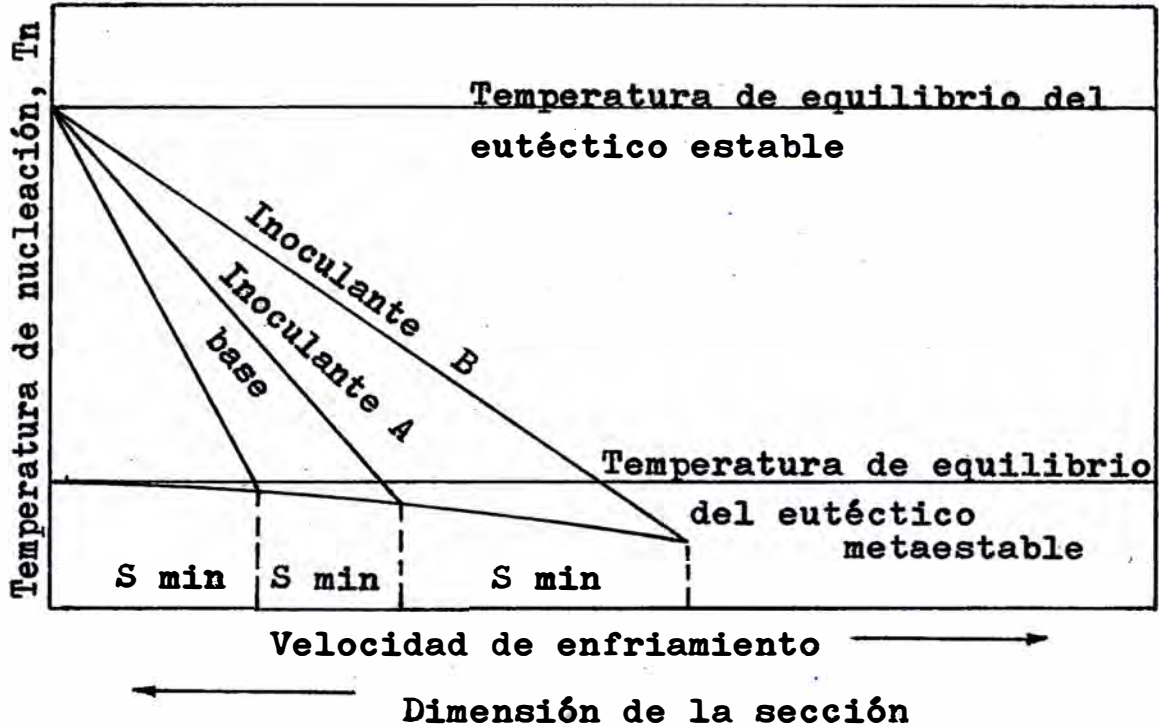


Fig. 4.- Representación esquemática del efecto de inoculación en la dimensión de la sección que puede ser obtenida exenta de carburos en un hierro fundido base.

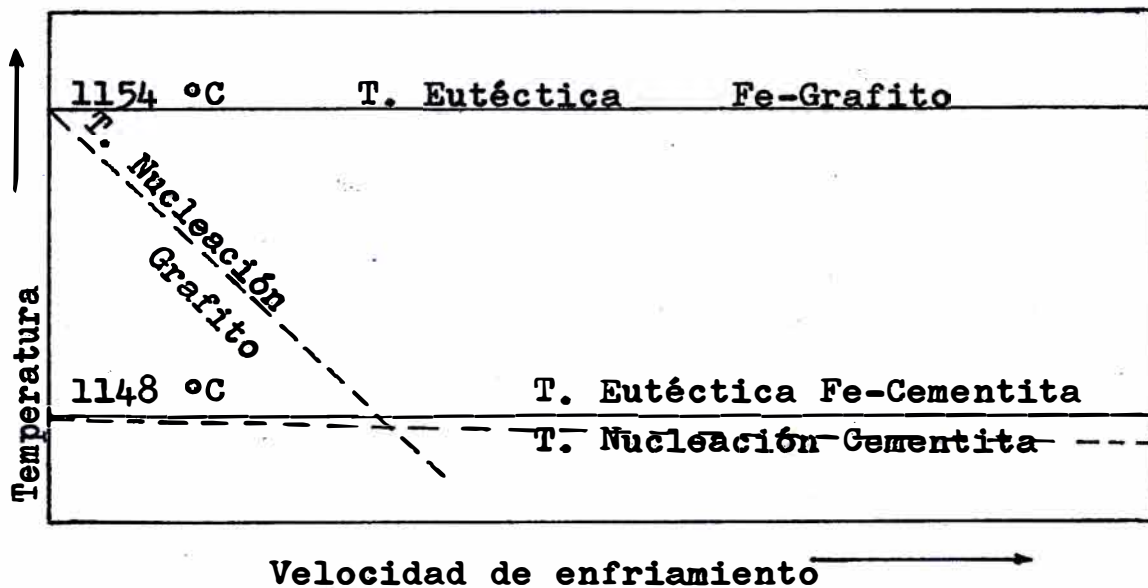


Fig. 5.- Temperaturas de germinación para fundición gris y para fundición blanca en función de la velocidad de enfriamiento.

Tambien elementos que actúan en el crecimiento de las células eutécticas pueden alterar la tendencia al achilamiento. Así por ejemplo, el azufre puede actuar tanto en la nucleación, disminuyendo el valor  $\Delta T_n$  para una velocidad de enfriamiento dado, como el crecimiento, en el sentido de disminuir la velocidad de crecimiento, aumentando el valor de  $\Delta T_G$  y dependiendo de su efecto en  $\Delta T_n$  y en  $\Delta T_G$  puede ser un grafitizante o un promotor de carburos.

De todo ello se deduce que la fase difícil de nuclear es el grafito, con el agravante de que si aumenta el sobreenfriamiento, corremos el riesgo de que germine la cementita y obtengamos fundición blanca, fig. 5.

La misión primordial de un inculante será la de promover la nucleación del grafito evitando la germinación de la cementita.

### C.- MECANISMO DE LA INOCULACION

Varias teorías han sido propuestas para explicar la acción de los inoculantes y no hay ninguna que pueda ser considerada como universalmente cierta.

Se admite que la inoculación básicamente actúa en el sentido de aumentar la nucleación del eutéctico estable, multiplicando el número de células eutécticas, principalmente por su actuación como nucleante del grafito que es considerada la fase más difícil de la formación del eutéctico austenita - grafito.

Casi todas las teorías consideran que la nucleación es heterogénea, habiendo divergencias en cuanto a la naturaleza del sustrato. Son usualmente citados como posibles sustratos

activos, el propio grafito, óxidos, carburos, sulfuros, nitratos, etc., o sus combinaciones complejas, estas impurezas deben cumplir las condiciones de estabilidad térmica y termo-dinámica y de coherencia cristalina.

Hay por ejemplo, citaciones de que la nucleación no sería sobre substratos introducidos o tomados en el interior del baño, de manera que la función de la inoculación sería básicamente la de criar regiones donde habría baja solubilidad del carbono.

Se sabe que, en general, las partículas nucleantes tienen su acción que depende del tiempo que transcurre entre su adición y la solidificación en el molde.

De un modo general con el aumento de este intervalo de tiempo tiende a ocurrir una disminución en su eficiencia. Este fenómeno en la literatura de la lengua inglesa es llamado "fading". El efecto de "fading" sería dependiente de la velocidad de disolución, reducción, combinación, fluctuación de los substratos o de re-homogenización del baño. Esas serían también una de las principales razones por las cuales compuestos con alta posibilidad de actuar como nucleante, a veces, no dan los resultados esperados.

En cuanto a los mecanismos de actuación de los inoculantes estos podrían ser agrupados, para efecto de análisis, en dos grupos principales: inoculantes a base de grafito e inoculantes con productos que contienen alto porcentaje de silicio.

### 1.- El Grafito como inoculante

Si la nucleación es heterogénea, y el hecho de que

las fundiciones respondan a la inoculación lo confirma, nos interesa conocer cuales son los substratos sobre los que se solidificará el grafito.

Mediante la extracción del grafito de la matriz metálica y posterior calcinación, Levi llegó a identificar que existen por  $\text{cm}^3$  cerca de 5 millones de partículas de óxidos, 43 millones de sulfuros y 5 millones de carbonitruros. Es evidente que no todos han de actuar como gérmenes, y una simple observación microscópica así los confirma. Además, con esta técnica no podía averiguarse si partículas de grafito no disueltas en el líquido o añadidas expresamente podían también actuar como gérmenes.

Veamos, pues, cuales pueden ser estos gérmenes de cristalización del grafito que deben cumplir las condiciones termodinámicas, cinéticas y cristalográficas para que sobre ellas se depositen los átomos de carbono y den lugar a las laminillas o las esferas del grafito.

En primer lugar, el mismo grafito debiera ser un buen inoculante. En efecto, a las temperaturas de obtención del hierro líquido presenta suficiente estabilidad como para que sobre él crezcan las partículas de grafito. Cristalográficamente presenta en principio la mejor posición para actuar como gérmenes. Sin embargo, salvo en los casos en que el grafito empleado tenga un alto grado de cristalinidad, sus resultados son mediocres.

Por el contrario, inoculantes a base de grafito que contengan FeSi proporcionan, con un menor porcentaje de adición, un notable efecto inoculante.

Por otro lado, conviene mencionar que la velocidad

de disolución del grafito en los hierros fundidos sería de pendiente del porcentaje de azufre del baño, siendo fácilmente soluble en hierros fundidos de bajo azufre; a medida que aumenta el porcentaje de azufre se reduce la velocidad de disolución del grafito en el hierro fundido líquido. Esto explicaría que los inoculantes a base de grafito :

a.- Serán menos eficaces cuando son adicionados en la cuchara que contienen hierros fundidos de bajo azufre ( $S < 0.03\%$ ).

b.- Actúan fuertemente cuando son adicionados instantes antes de la solidificación, como por ejemplo en el molde.

c.- Actúan eficazmente cuando son adicionados en hierros fundidos con azufre en el rango usual (de 0.06% a 0.10%).

## 2.- Función del ferrosilicio en la inoculación

Es conveniente examinar la función del FeSi, que aparece como el constituyente mayoritario en casi todos los inoculantes. Sabemos que el FeSi, como el Si puro, no son inoculantes. Sin embargo, juega un papel importante no sólo en la inoculación, sino también en el comportamiento del hierro durante la solidificación. En primer lugar, el Si es un elemento grafitizante cuyo efecto puede explicarse por la configuración electrónica de los elementos.

En efecto, el hierro como metal de transición presenta en su configuración electrónica orbitales d incompletos, con spines no compensados, lo cual permite un fácil intercambio de orbitales s a orbitales d y viceversa. Por su parte,



en el grafito los átomos de carbono están unidos por enlaces covalentes constituidos por un híbrido  $sp^2$ , mientras que el cuarto electrón llamado electrón  $\pi$ , está más suelto y enlaza los planos c de la estructura hexagonal del grafito. Estos electrones son muy lábiles y, al estar en contacto el grafito con el hierro, pueden pasar primero a los orbitales s del hierro y luego al intercambio  $s \rightleftharpoons d$ , con lo que el enlace Fe - C queda reforzado y la reacción:



tiende a desplazarse hacia la derecha.

Los elementos sp de los grupos III y IV de la tabla periódica (Al, Si y similares), al no disponer de sus orbitales d por tenerlos vacíos o completamente llenos, ceden sus electrones de valencia a los orbitales s del hierro, aumentando la densidad del estado, y por el intercambio  $s \rightleftharpoons d$ , a los orbitales d del hierro, reduciendo el número de electrones d con spin compensado, con lo que se reduce la energía del enlace Fe - C. Como también ceden electrones a la zona del grafito, se refuerza la interacción C-C. En consecuencia, el equilibrio anterior se desplaza hacia la izquierda, aumentando la actividad del carbono y, por lo tanto, la tendencia a la grafitización.

Por otra parte, en los primeros estadios de la solidificación se produce una segregación proeutéctica del silicio entre las dendritas primarias y el líquido residual, cuyo coeficiente de reparto, según mediciones efectuadas por Zhukov y colaboradores, es de 1.5 a 1.9, lo cual confirma lo señalado anteriormente y justifica la influencia del Si en la

actividad del carbono.

Durante la inoculación con aleaciones ricas en Si se produce una microheterogeneidad del Si en el líquido, con el consiguiente aumento de la actividad del C, que viene complementada por la acción desoxidante del silicio, ya que al disminuir el contenido de  $O_2$  se incrementa la actividad del carbono.

Si consideramos que la viscosidad del líquido inoculado es superior a la del metal sin inocular (fig. 6) y que este efecto desaparece con el tiempo, podemos suponer que los factores cinéticos también juegan un papel importante en el mecanismo de la inoculación.

El papel del FeSi parece claro. No poseyendo ningún efecto inoculante, como veremos más adelante, promueve las condiciones necesarias para que sobre el sustrato originado por el inoculante se depositen los átomos de carbono, dando lugar a una grafitización correcta. Este modo de actuar del FeSi explica el mejor comportamiento de los inoculantes a base de grafito cuando contienen FeSi, citados anteriormente.

### 3.- Tipos de germe

Visto el efecto inoculante del grafito y la importancia del FeSi en la inoculación, observemos el comportamiento de los otros germenos posibles.

Sabemos que entre las impurezas que pueden actuar como sustratos para nuclear el grafito se han encontrado óxidos, sulfuros, carburos y nitruros. Estas impurezas deben cumplir las condiciones de estabilidad térmica y termodinámica



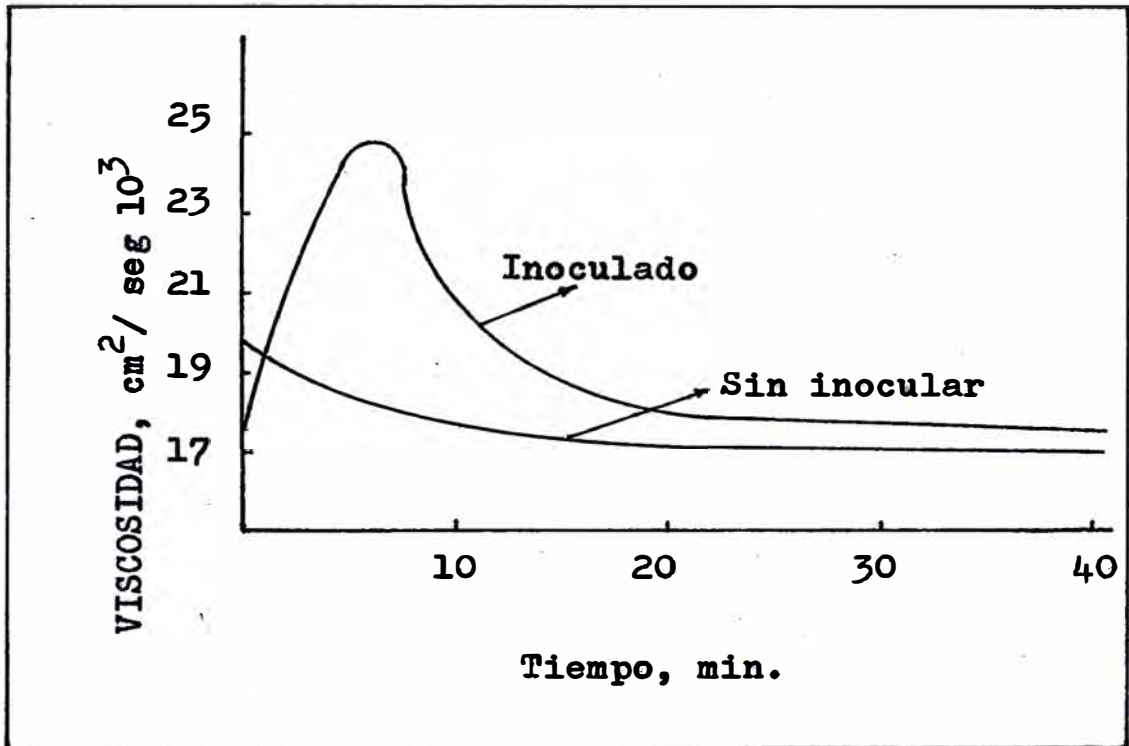


Fig. 6.- Viscosidad de la fundición no inoculada e inoculada en función del tiempo.

y de coherencia cristalina.

A continuación se examina las posibilidades de cada tipo de impurezas.

a.- Carburos

En el diagrama de Ellingham, aunque sea simplificado tal como se muestra en la fig. 7, que se ve que los carburos no pueden actuar como inoculantes, ya que al tener valores poco negativos de la energía libre serán poco estables frente a otros tipos de impurezas.

Sin embargo, se ha sugerido que los carburos, o sea los tipo carburos, podían actuar como substratos para la solidificación del grafito. Los metales del grupo II del sistema periódico y el Al son capaces de formar carburos no metálicos insolubles y por tanto propiciar la nucleación, en tanto que los metales del grupo IV y el Th, que forman carburos metálicos solubles, con el carbono en posición intersticial, son defectivos como gérmenes.

Es de notar que en los experimentos que han dado origen a esta teoría el número de células eutécticas era muy bajo y que posiblemente la formación de grafito era debida a la baja velocidad de enfriamiento y a la presencia de una cantidad muy pequeña de otras impurezas.

Hay que tener en cuenta, además, que los parámetros de las redes de los carburos no permiten la coherencia cristalina necesaria para la germinación del grafito.

Un caso muy aparte, que merece la pena que nos detengamos en él, es la formación de una fase, habitualmente

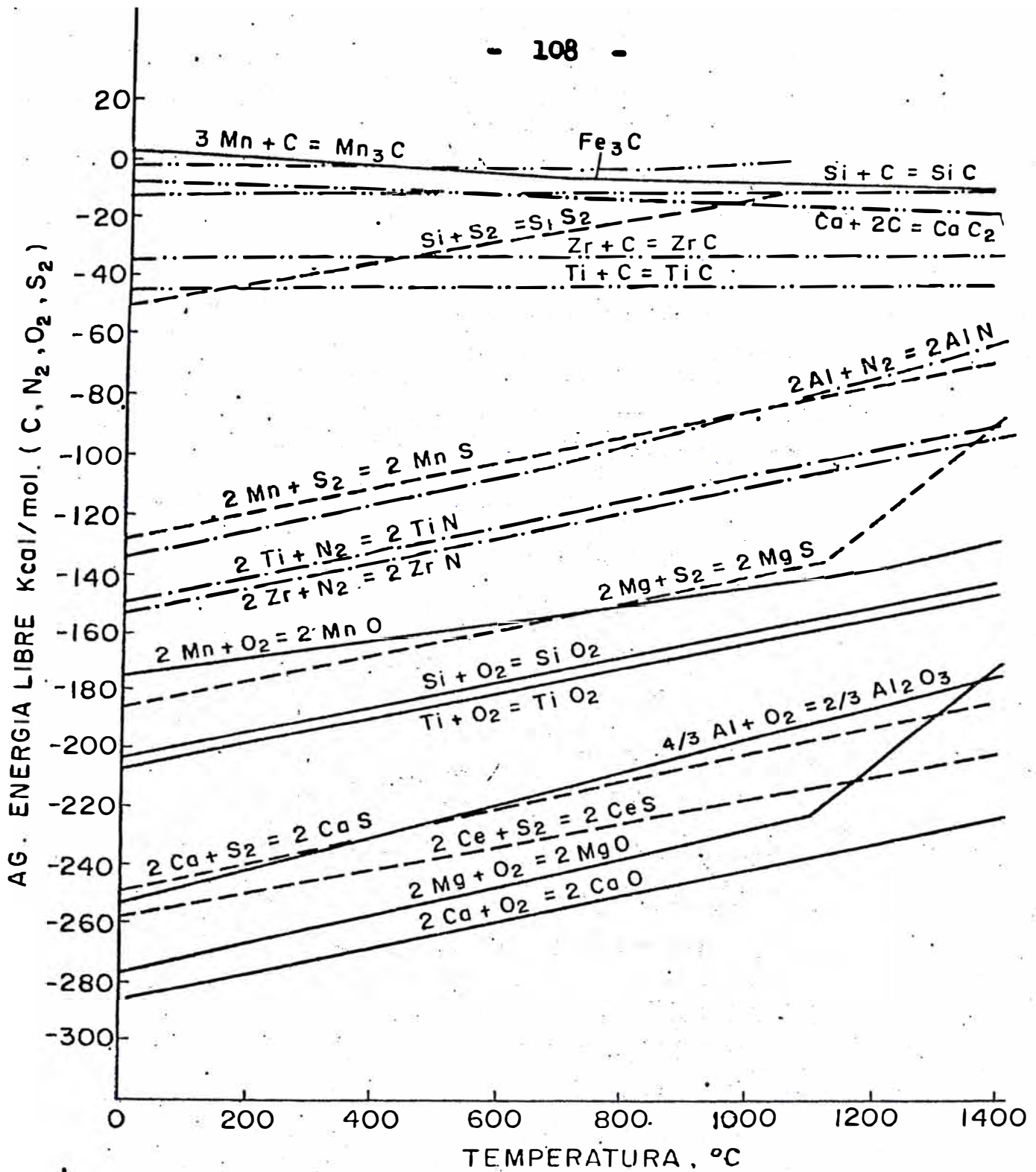


Fig. 7.- Diagrama de Ellingham para algunos carburos, nitruros, óxidos y sulfuros.

inestable, que puede aparecer debido a la alta concentración de silicio al añadir FeSi al metal líquido.

Los ensayos de Hurum, y especialmente de Decrop, parecen demostrar que la inoculación con FeSi pasa por una fase de carburo de silicio, y como tal ha sido identificado por difracción de rayos X y mediante microsonda. Sin embargo, debemos tener en cuenta que el CSi aparece en ensayos efectuados en condiciones muy especiales, utilizando pequeños crisoles, inoculando masivamente y sumergiendo el crisol en agua antes de que se haya disuelto por completo el inoculante e iniciado la solidificación.

Se han identificado, en estas condiciones, fases tales como  $Fe_3Si$ ,  $Fe_5Si_3$ , FeSi y CSi, algunos de los cuales serían estables. Durante el enfriamiento brutal del hierro líquido cubierto por el inoculante, debido a la alta concentración de silicio que no se habrá disuelto por completo, existirán zonas en donde el Si habrá cedido electrones a los orbitales  $\pi$  del grafito antes de que se haya producido la cesión electrónica al Fe. En estos momentos, el enfriamiento brusco impedirá la transformación a fases más estables, y entre formarse enlaces Fe - C o bien Si - C, se formará preferentemente CSi en las zonas ricas en silicio.

La presencia de algunos aglomerados de grafito dentro de los cristales de CSi puede explicarse porque, aunque la velocidad de enfriamiento es muy rápida, no es infinita, y durante la transformación sin difusión que da lugar a la fase metaestable puede producirse una pequeña segregación del carbono, dando lugar al aglomerado de grafito.

De todo ello podemos deducir, y la práctica lo confirma, que el FeSi no actúa como inoculante, ya que el CSi no tiene la posibilidad de existencia en las condiciones reales de la solidificación.

#### **b.- Nitruros**

Descartados los carburos, quedan como posibles germenos los óxidos, los nitruros y los sulfuros. De todos ellos, los nitruros son los que presentan menor estabilidad.

Sin embargo, se ha observado que, según el contenido de nitrógeno del baño, el efecto inoculante puede variar. Así, si el inoculante contiene Ti, existe el riesgo de obtener grafito de tipo D, síntoma de una mala inoculación, en las fundiciones obtenidas en cubilotes con bajos porcentajes de acero en las cargas. Por el contrario, en el horno eléctrico de arco, con el mismo tipo de inoculante, se obtiene grafito de tipo A y un mayor número de células eutécticas.

La tabla A, puede darnos la explicación. Si hay nitrógeno, caso del horno de arco, se combinará con el titanio para formar TiN, que actúa como germen de cristalización de la austenita. En las fundiciones sintéticas, elaboradas en cubilote a partir de chatarra de acero, se observa un mayor número de partículas de carbonitruros que de óxidos, debido a la presencia de Titanio.

Para contenidos muy bajos de nitrógeno, caso del cubilote con poco acero en la carga, se formará sulfuro de titanio, más estable que el sulfuro de manganeso, con lo que la acción inoculante de éste se perderá, en tanto que el TiS

no puede actuar, por razones cristalográficas, como sustrato para la nucleación del grafito.

Los nitruros y carbonitruros de titanio actúan como nucleantes de la austenita, y de modo similar se comportan los de Al y Zr.

### c.- Oxidos

Durante mucho tiempo se creyó que la germinación del grafito era producida por partículas de sílice o de alguna de sus variantes presentes en las fundiciones industriales, o bien formadas por reacción del silicio con el oxígeno del baño. Los ensayos de inoculación en fundiciones obtenidas al vacío, dando lugar a grafito tipo D, inducían a pensar que el hierro fundido era insensible a la inoculación porque estaba prácticamente desoxidado.

Los valores del calor de formación de óxidos (tabla A) parecen avalar esta tesis. Sin embargo, inoculando a distintas temperaturas, por encima y por debajo del equilibrio,



deberían dar mejores resultados a bajas temperaturas, cuando la reacción se desplaza a la derecha, que a altas temperaturas.

Pero no sucede así, ya que el efecto inoculante es mejor a alta temperatura.

Por otro lado, los trabajos de Lux indican que tanto al vacío, como al aire, como en atmósfera de CO las fundiciones responden bien a la inoculación.



La aparente discrepancia puede explicarse por la acción de otras impurezas. Así, en los ensayos de Zuthoff se partía de aleaciones Fe - C-Si muy puros. Al inocularlas con FeSi no había ningún efecto inoculante. Lo mismo sucedía con adiciones de manganeso. En cambio, al añadir azufre aparecía grafito de tipo A.

Por otra parte, en los ensayos efectuados en fundiciones industriales, la adición de componentes capaces de dar óxidos al descomponerse a altas temperaturas, carbonato cálcico, de bario, fluorcirconato amónico, etc., no han mejorado la estructura en las paredes delgadas de las piezas.

Únicamente aquellos óxidos cuyo calor de formación sea superior al  $\text{SiO}_2$  y que cristalicen de modo que pueda existir coherencia entre el óxido y el grafito podrían actuar como germenos. De todos los incluidos en la tabla A, que son prácticamente los que pueden formarse en el seno del hierro líquido, únicamente el de lantano podría dar germenos adecuados. Es una hipótesis que desgraciadamente aún no se ha podido verificar.

No obstante, como veremos después, los óxidos juegan un papel importante en la inoculación, no en cuanto la favorecen, sino en tanto que son responsables, en parte, del fenómeno de desvanecimiento ("fading") del poder inoculante.

#### d.- Sulfuros

Quedan, por último, los sulfuros. Los numerosos trabajos efectuados bajo la dirección de Wallace demuestran que los sulfuros actúan como germenos. La presencia, detecta

da por microsonda o EDAX de sulfuros de distintos elementos en partículas de grafito parecen avalar esta tesis. La dificultad de inocular una fundición con muy bajo contenido de azufre, y el menor número de células eutécticas en las fundiciones de grafito esferoidal, confirman esta aseveración.

Es posible que no solo sean sulfuros, sino también oxisulfuros, la formación de unos y otros, estudiada para los aceros, tiene lugar mediante un proceso de difusión controlada, y que primero se produce una desoxidación cuando se utilizan tierras raras, tal como corresponde según sus calores de formación.

En ausencia de inoculantes, es el MnS quien actúa como sustrato. Su temperatura de formación y su estructura cristalina lo hacen muy apto para que sobre él germine el grafito. Desgraciadamente, su bajo calor de formación retarda su formación y posibilita que aumente en exceso el sobreenfriamiento antes de la nucleación, con lo que se corre el riesgo de formación de grafito de tipo D, o en casos de un sobreenfriamiento excesivo, la solidificación según el sistema metaestable, obteniéndose cementita.

Debemos tener en cuenta que la presencia del azufre influye no sólo en las condiciones termodinámicas, sino también en la cinética del proceso. El S retarda la disolución del grafito en el hierro y modifica el crecimiento de las células eutécticas debido a su actividad superficial. Como el S es insoluble en la austenita, durante la solidificación del eutéctico el líquido se enriquece en azufre, que se concentra en la superficie de las células eutécticas en cre



cimiento, interfiriendo el paso de los átomos en la interca  
ra sólido - líquido.

El azufre, como los demás elementos del grupo VI de la tabla periódica, es antigrafitizante por razones ciné  
ticas. En ensayos efectuados con un hierro de la siguiente  
composición: 2.72% C , 2.48% Si , 0.55% Mn , 1.1% S y 0.17% P,  
enfriados muy lentamente en un horno de gran inercia térmica,  
se obtiene hierro gris, a pesar del desequilibrio entre Mn y  
S, confirmando que su acción antigrafitizante es cinética.

Los elementos que por su estabilidad térmica y  
por su calor de formación pueden dar sulfuros que actúen co  
mo germenos son los alcalino-térreos, los lantanidos y los  
actinidos. Descartados los últimos por ser casi todos ellos  
sintéticos, y por tanto muy raros, debemos buscar los germe  
nos entre los dos grupos citados primero.

Cuando están en presencia de átomos de Fe, estos  
elementos se comportan como si tuvieran uno o dos electrones  
en los orbitales d, ya que un electrón f pasa a la zona d  
por excitación térmica. Entonces actúan como los metales de  
transición de número atómico inferior al del Fe (V, Cr, Mn,  
etc.), que son antigrafitizantes, si bien se diferencian en  
que los lantanidos tienen escasa afinidad por el carbono, lo  
cual confirma que el poder grafitizante o antigrafitizante no  
tiene por qué ir ligado a la facilidad o dificultad para for  
mar carburos.

Teniendo en cuenta las dificultades de utilización  
de los actinidos por su precio, y de los lantánidos solos y  
en exceso por sus riesgos, aparecen como auténticos formado

res de germenos los elementos alcalino-térreos.

En la tabla A están los valores correspondientes a Be, Mg, Ca, Sr, y Ba. De ellos podemos descartar el Be por su bajo poder de formación. El resto forma parte de la mayoría de los inoculantes modernos.

Las ventajas de unos frente a otros no están bien dilucidadas, y la explicación de estas ventajas tampoco es muy clara. Así, parece que inoculando a temperaturas por encima de  $1450^{\circ}\text{C}$ , cuanto mayor es el contenido en Ca del inoculante, mayor es la resistencia al desvanecimiento del poder inoculante.

Se ha visto también que los inoculantes contienen de Ba son más efectivos que los de Ca a temperaturas más elevadas, mientras que entre  $1370$  y  $1430^{\circ}\text{C}$  el calcio es más efectivo que el bario.

Los inoculantes a base de Sr tienen un desvanecimiento muy rápido; pero tienen la ventaja de disolverse muy de prisa incluso a temperaturas tan bajas como  $1300^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, el número de células eutécticas no aumenta tanto como con los otros tipos de inoculantes.

Posiblemente, las diferencias entre unos y otros sean debidas a cuestiones cinéticas. Variaciones en la viscosidad, tensión superficial, etc., pueden ser la causa de las pequeñas variaciones que se observan en su comportamiento. Lo que sí parece cierto, y la práctica lo confirma, es que los sulfuros de estos elementos son los auténticos germenos de cristalización del grafito.

La tendencia actual es hacia inoculantes complejos

**TABLA A**

CALORES DE FORMACION, PUNTO DE FUSION, SISTEMA CRISTALINO Y PARAMETROS DE LA RED PARA CARBUROS, NITRUROS, OXIDOS Y SULFUROS DE ALGUNOS ELEMENTOS SUSCEPTIBLES DE ACTUAR COMO GERMESES DE GRAFITIZACION

	C	N	O	S
Al ΔH Kcal/mpl P. fusión °C Sistema crist. Parám. red Å	— 30,9 1.400 Hexagonal a = 3,331 c = 24,99	— 57,7 > 2.200 Hexagonal a = 3,114 c = 4,968	— 399,1 2.045 Hexagonal a = 7,849 c = 16,123	— 121,6 1.100 Tetragonal a = 7,028 c = 29,811
B	2.450 Hexagonal d = 5,60 c = 12,12	— 32,1 2.730 Cúbico a = 3,62	— 302 460 Ortorrómico	— 57 390 Hexagonal a = 5,80 c = 11,90
Ba	Tetragonal a = 6,23 c = 6,707	— 86,9	— 133,4 1.923 Cúbico a = 5,5393	— 106,0 1.200 Cúbico a = 6,385
Be	2.110 Cúbico a = 4,342	— 135,7 2.220 Cúbico a = 8,150	— 146,0 2.530 Hexagonal a = 2,6979 c = 4,380	— 55,9 Cúbico a = 4,862
Ca	— 15 1.630 Tetragonal a = 5,49 c = 6,38	— 103,2 1.195 Ortorrómico	— 151,9 2.580 Cúbico a = 4,8105	— 115,3 2.525 Cúbico a = 5,6948
Ce	Cúbico a = 8,4476	Cúbico a = 5,021	— 233 1.692 Cúbico a = 5,4110	— 153,9 2.450 Ortorrómico
La	Cúbico	— 72,1 Cúbico a = 5,30	— 458 2.315 Hexagonal a = 3,9373 c = 6,1299	— 306,8 2.200 Tetragonal a = 8,17 c = 16,65
Mg	Hexagonal a = 7,45 c = 10,61	— 110,2 800 Cúbico a = 9,95	— 143,8 2.800 Cúbico a = 4,213	— 83,0 > 2.000 Cúbico a = 5,200
Mn	— 1 Monoclínico	— 57,8 Tetragonal a = 2,66 c = 3,68	— 92,0 1.705 Cúbico a = 4,445	— 48,8 1.610 Hexagonal a = 3,994 c = 6,442
Si	— 26,7 2.700 Hexagonal a = 3,073 c = 6,0480	— 179,3 1.900 Hexagonal a = 7,758 c = 5,623	— 204,8 1.713 Hexagonal a = 5,03 c = 8,22	— 34,7 1.090 Tetragonal a = 5,430 c = 8,718
Sr	1.700 Tetragonal a = 5,81 c = 6,69	— 93,4 Monoclínico	— 141,1 2.430 Cúbico a = 5,160	— 108,1 > 2.000 Cúbico a = 6,020
Th	— 45 1.625 Cúbico a = 5,34	2.630 Cúbico a = 5,159	— 292 3.050 Cúbico a = 5,59	— 262 2.335 Cúbico a = 5,674
Ti	— 54 3.160 Cúbico a = 4,3285	— 73,0 2.980 Cúbico a = 4,246	— 218,0 1.840 Tetragonal a = 4,5137 c = 2,9618	— 67,4 Hexagonal a = 3,20 c = 11,19
Zr	— 45 3.030 Cúbico a = 4,6890	— 82,2 2.980 Cúbico a = 4,567	— 258,2 2.677 Tetragonal a = 5,09 c = 5,18	— 83 1.550 Hexagonal a = 3,660 c = 5,825

que contengan varios elementos alcalino-térreos, e incluso tierras raras, para incrementar el efecto inoculante y la resistencia al desvanecimiento.

#### 4.- Disminución de la eficiencia del inoculante

Un hecho cierto es que el poder de inoculación deca parece con el tiempo. Este desvanecimiento ("fading") es una de las causas de los fracasos de la inoculación. El fenómeno es complejo, pero podemos encontrarle una explicación. Hemos visto que la microsegregación del silicio al añadir un inoculante que lo contenga, al incrementar la actividad del carbono favorece el depósito de átomos de carbono sobre el sustrato. Con el tiempo tiende a diluirse en el hierro líquido, desapareciendo la heterogeneidad creada al principio de la inoculación. Entonces, las condiciones para la deposición de los átomos de C ya no son favorables.

Por otra parte, si el inoculante es a base de grafito, éste tiende a disolverse en el hierro, desapareciendo como sustrato válido para la formación de laminillas o esferoides. En el caso de los germenos constituidos por sulfuros se observa en la tabla A que los elementos que se combinan con el azufre son todos ellos desoxidantes, y más aún, los calores de formación de los óxidos son más negativos que los sulfuros, con lo que en presencia de oxígeno tenderán a combinarse con él.

El hierro líquido, mantenido en la cuchara o en un horno en contacto con la atmósfera, tiende a absorber oxígeno con lo que se favorece el paso de sulfuros a óxidos. Además,

a medida que va descendiendo la temperatura, la reacción



se desplaza hacia la derecha.

Como la mayoría de inoculantes tiende a formar silicatos complejos que pasan a la escoria, pueden desaparecer parte de los germenes y perderse el efecto de la inoculación. La presencia de Zr y Ce en algunos inoculantes se explica por su poder desoxidante, ambos muy enérgicos, evitando la formación de óxidos y/o silicatos de los elementos formados de germenes.

La fig. 8 corrobora estas deducciones. En ella se observa, en primer lugar, que el número de células eutécticas aumenta al disminuir la temperatura de inoculación, de acuerdo con las leyes de la nucleación. Sin embargo, lo más importante es que, a medida que desciende la temperatura, el decaimiento es más rápido, precisamente por que se atraviesan las isotermas que marcan el equilibrio anterior.

Si la pérdida de poder inoculante fuese debida únicamente a un proceso de disolución, éste sería mayor a temperatura más elevadas.

En una atmósfera inerte debiera mantenerse durante un tiempo más largo el efecto inoculante. Experiencias industriales en fundiciones esferoidales, cuya evanescencia es más rápida, confirman que el efecto inoculante puede mantenerse varias horas.

Todos los procesos de doble inoculación, inoculación

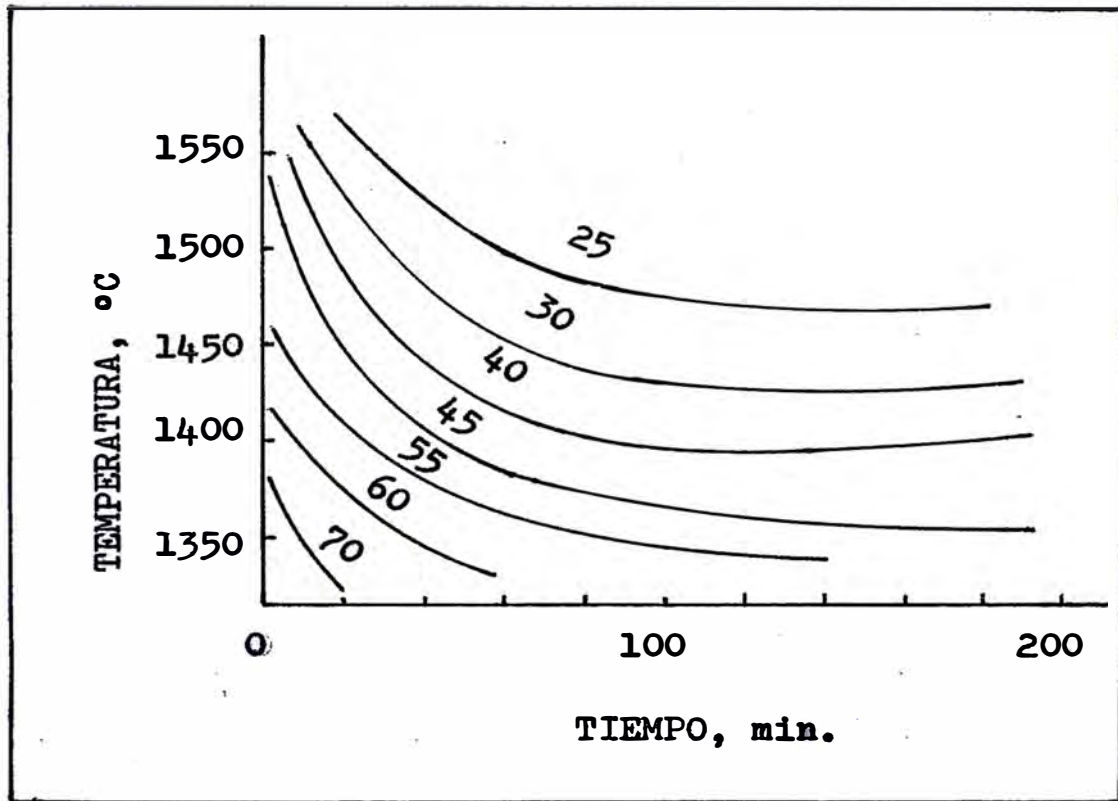


Fig. 8.- Efecto de la temperatura de sobrecalentamiento y del tiempo sobre el grado de nucleación. Las cifras sobre las curvas corresponden al N° de células eutécticas por  $\text{cm}^2$ .



en el molde, CQ (Controlled Quality Inoculation Process), inoculación en el bebedero con alambre conteniendo el inoculante, etc., se han desarrollado para evitar los inoculantes del desvanecimiento, permitiendo además un mayor rendimiento de la inoculación.

Uno de los aspectos relativos que se presentan a las teorías de grafitización conviene mencionar que existen elementos que en buena hora no actúan como inoculantes directos, esto es, no aumentan substancialmente el número de células eutécticas, sino que actúan como grafitizantes. Es, por ejemplo, el caso del cobre, estaño, níquel, cobalto, aleación del silicio (cuyo mayor efecto sería sobre las líneas del diagrama Fe - C). Una posible explicación es que esos elementos actuarían en el sentido de aumentar la actividad del carbono.

#### 5.- Condiciones que deben tener el metal y el inoculante

Para que la inoculación dé el resultado deseado, tanto el hierro líquido como el inoculante deben cumplir una serie de requisitos.

En primer lugar, el caldo no debe estar oxidado, ya que como hemos visto desaparecerían los germenos.

Una carga oxidada o una marcha oxidante del horno dificultan notablemente la inoculación.

Por motivos similares el metal debe estar desescoriado para evitar la formación de silicatos con los elementos formadores de germenos.

La temperatura del metal influirá en el número de células eutécticas y en la disolución del inoculante.

Por su parte, los inoculantes deben, en primer lugar, estar perfectamente secos. La aportación de hidrógeno poco antes de la solidificación puede ser nefasta.

El tamaño del inoculante debe estar en consonancia con la temperatura de tratamiento y la velocidad de disolución. Un tamaño muy pequeño dará un bajo rendimiento por oxidación del inoculante, mientras que un tamaño excesivo dificultará la disolución.

La dosificación correcta del inoculante, el modo de adición adecuado y la provisión del tiempo entre la inoculación y el llenado del molde para evitar la evanescencia son factores que nos ayudarán a realizar la operación con éxito.

#### **D.- EFECTOS DE LA INOCULACION EN HIERROS FUNDIDOS GRISES**

Tecnológicamente, a través de la inoculación se procura, para una composición química dada y un conjunto de variables de fabricación dado, un método relativamente simple y seguro de mejorar la calidad de un hierro fundido.

Por medio de la inoculación, en líneas generales, se promueve:

a.- Un aumento en la tendencia a la grafitización y consecuentemente una disminución en la tendencia al achilamiento.

b.- Una reducción en el sobreenfriamiento, favorece la formación del grafito tipo A y disminuye o elimina el grafito interdendrítico, en particular tipo D, y como consecuencia disminuye la cantidad de ferrita que tiende aparecer asociada a este tipo de grafito.



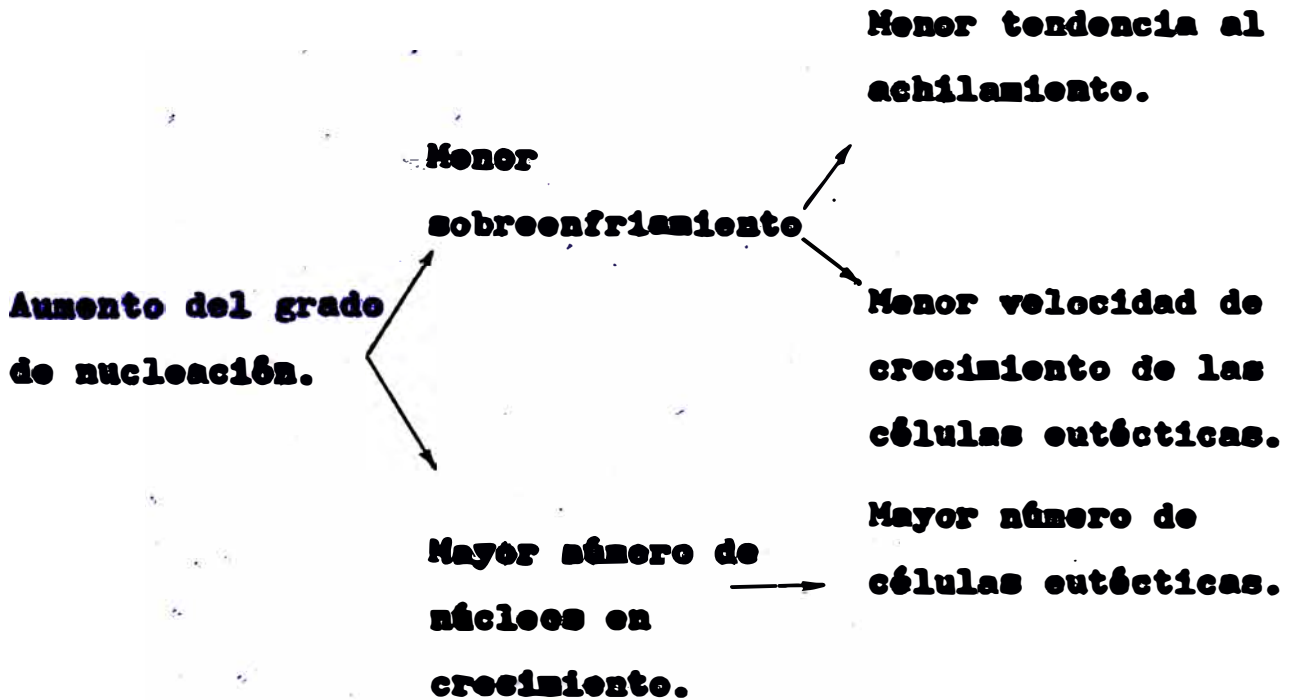
c.- Una mayor tendencia a la obtención de estructuras mas refinadas y uniformes para secciones de diversos espesores, esto es, hacer que la estructura sea menos dependiente de la velocidad de enfriamiento.

d.- Un aumento en las propiedades mecánicas.

e.- La posibilidad de obtener hierros fundidos grises de alta resistencia con carbono equivalente relativamente bajas, ausencia de carburos.

Esos efectos de la inoculación, básicamente, vienen de las alteraciones promovidas por la inoculación en el proceso de solidificación, principalmente en cuanto al aumento en el grado de nucleación.

Los efectos de la elevación del grado de nucleación en el proceso de solidificación del eutéctico estable se pueden entender mejor por el siguiente esquema:



Se tiene que una reducción en la cantidad de sobreenfriamiento, la elevación de la temperatura de solidificación del hierro fundido gris, implica una disminución de la tendencia al apareamiento de carburos eutécticos y de grafito tipo A, principalmente en la fase de la disminución de la velocidad de crecimiento de las células eutécticas y por consiguiente menor ramificación del grafito. Como también se forman más células eutécticas, el esqueleto de grafito, dentro de cada célula, es menor.

Por otro lado, siendo el grafito tipo A, hay mayor tendencia a que se forme una matriz perlítica.

El propósito de la inoculación, es de aumentar el número de células eutécticas, promover la formación del grafito tipo A fino y matriz perlítica, favorecer el refinamiento de las dendritas de austenita proeutécticas y en consecuencia de obtener una mejoría de las propiedades mecánicas.

Así, la relación Resistencia/Dureza tienden a aumentar con la inoculación, principalmente por el uso de los inoculantes a base de silicio.

El efecto del inoculante, proporcionalmente, tiende a ser tanto más intenso cuanto mayor fuera la tendencia al achillamiento de un hierro fundido dado. Así, por ejemplo, el efecto de la adición de un grafitizante tiende a ser mayor en hierros fundidos hipoeutécticos tanto en la estructura como en las propiedades mecánicas, siendo la inoculación principalmente recomendada para hierros fundidos de carbono equivalente debajo de 4.1% , en buena hora en algunos casos se puede justificar la inoculación en los mismos hierros fundidos hipereutécticos.

Por otro lado, como la inoculación promueve la formación de una estructura mas homogénea, para una gana grande de velocidad de enfriamiento, se tiene como consecuencia tambien una mejor homogeneidad de las propiedades mecánicas y la eliminación de regiones duras y débiles. Las regiones duras generalmente son debidas a la presencia de hierro fundido blanco o mezclado y las regiones débiles a la presencia de ferrita que casi invariablemente aparece asociado al grafito tipo D. Estas regiones débiles (ferríticas) tienden, generalmente, a ocurrir en regiones en que el sobreenfriamiento en la solidificación es relativamente elevado, en buena hora insuficiente para aparecer carburos libres, pero si suficiente para que se forme grafito tipo D.

Así muchas veces se tiene la siguiente secuencia:

- Sin inoculación ocurre la formación de carburos eutécticos y por consiguiente alta dureza.
- Con una inoculación débil se forma gran cantidad de grafito tipo D y ferrita, obteniendose baja dureza.
- Con un inoculante poderoso se tiende a obtener grafito tipo A y matriz perlítica.

A veces debido a la alta velocidad de enfriamiento, como tiende a ocurrir cuando el espesor de la sección es pequeña, ni con una inoculación intensa o uso de inoculante poderoso se consigue grafito tipo A, si hay la necesidad de conseguir matriz perlítica puede ser interesante recurrir a la adición de elementos perlitizantes como, por ejemplo, el estaño.

Otro efecto de la inoculación es que, como aumenta el número

de células eutécticas hay un aumento en el área total de contorno de las células pero con un menor crecimiento de cada célula, y consecuentemente tiende a haber menor concentración de impurezas en contorno de la célula, y por tanto, tiende a tener una mejor homogeneidad de composición y mejores propiedades mecánicas (menor sensibilidad al espesar). Esa mejor distribución de impurezas, que segregan para el contorno de las células eutécticas, puede ser observada en la práctica por la mayor dificultad que se tiene en obtener un delineamiento claro de los contornos de las células de los hierros fundidos inoculados ya que son principalmente las impurezas los mayores responsables por ese delineamiento.

Conviene resaltar que la inoculación no debe ser entendida como una solución para cualquier problema que puede aparecer en un hierro fundido gris. Al contrario, cuando es usado indbidamente puede perjudicar las propiedades. Así, por ejemplo, puede aumentar la tendencia al apareamiento de porosidades internas o superficiales.

Las porosidades internas están principalmente ligadas, a que la inoculación acentúa a la tendencia de ocurrir una solidificación tipo pastosa, este es, intensa nucleación en gran parte de la sección misma, antes de existir una capa superficial sólida, espesa y resistente. Como consecuencia, la expansión que tiende a ocurrir en la solidificación, debido al grafito, puede provocar movimientos de las paredes, resultando así un aumento de las dimensiones externas y la ocurrencia de contracción interna de la cavidad. Ese efecto tiende a ser tanto mayor, cuanto más efectivo fuera el inoculante en el

sentido de aumentar el número de células eutécticas y cuanto menor la resistencia del molde. Cuando ocurre esa tendencia se recomiendan moldes "duros" y usar inoculantes "suaves". Las porosidades superficiales o subsuperficiales, debido a la inoculación, son más raras, puede ocurrir cuando el inoculante contiene elementos que aumentan la solubilidad de los gases, en particular, del hidrógeno en el hierro fundido como, por ejemplo, aluminio residual en el ferrosilicio o el inoculante contiene humedad. Este problema tiende a ocurrir más fácilmente cuando se usan grandes cantidades de inoculantes. Los efectos de los inoculantes como ya fue mencionado, dependen de diversos factores, unos directamente ligados al propio inoculante y otros no directamente ligados al inoculante, el que se procura analizar en detalle el punto siguiente. En principio, todos los efectos descritos arriba podrían servir como criterios de evaluación de efectividad. Los criterios más usados han sido.

1.- Medida de la profundidad de temple claro y mezcla de en el cuerpo de prueba.

2.- Dimensión media de las células eutécticas o, el que es equivalente, número de células eutécticas por unidad de comprimido, área o volumen.

3.- Morfología del grafito, en particular la cantidad de grafito de sobreenfriamiento.

4.- Medida de la cantidad de sobreenfriamiento en la solidificación del eutéctico, por medio de análisis térmico.

5.- Propiedades mecánicas, por ejemplo, resistencia

a la tracción, dureza o relación resistencia/dureza.

Todos esos criterios presentan alguna restricción, pues un inoculante dado puede ser más efectivo que otro según el criterio dado y según otro criterio puede ocurrir el inverso. Por lo tanto, el criterio más recomendado dependerá del efecto que se pretende conseguir en cada caso.

### E.- FACTORES QUE INTERFIEREN EN EL RENDIMIENTO DE LA INOCULACION.

Se puede considerar que el éxito de la inoculación reside en el hecho que las fundiciones que son sometidos a este tratamiento presentan menos grafito de sobre-fusión.

El proceso de inoculación como ya se dijo es dependiente de un gran número de variables, siendo unas directamente ligadas al inoculante y otras no.

Son, por ejemplo, variables ligadas al inoculante:

- La composición química.
- La cantidad adicionada.
- La granulometría y estado físico.

Las variables no ligadas directamente al inoculante sería:

- La composición química del hierro fundido base.
- La composición de la carga ( materias primas ).
- El equipo de fusión.
- La historia térmica del baño.
- El estado de oxidación del baño.
- La presencia de escorias.
- La técnica de inoculación.



- La temperatura de inoculación.
- El tiempo de recorrido entre la inoculación y la solidificación en el molde.
- La velocidad de enfriamiento en el molde y el material del molde.

**a.- Factores relacionados al inoculante.**

El factor básico en la eficiencia de un inoculante es sin duda su composición química, este es, el tipo de inoculante; esto por lo tanto, será analizado en la parte referente a los inoculantes para hierros fundidos grises.

En cuanto a la cantidad del inoculante en líneas generales el efecto tiende a ser tanto mayor cuanto mayor fuera la cantidad adicionada. La cantidad óptima depende del efecto deseado y es función de muchas otras variables y es difícil, sino imposible, establecer la cantidad óptima del inoculante que se debe usar.

Hay casos en que porcentajes bajos del orden de 0.1% pueden ser suficientes y otras veces pueden ser necesarios porcentajes altos del orden de 1.0% , la cantidad óptima depende también del tipo de inoculante. Así, tratándose de inoculantes a base de grafito el porcentaje usual está en el rango de 0.05 - 0.25% .

Cuando se usa ferrosilicio (75%) común, el rango usual en hierros fundidos grises es de 0.1% a 0.3% o entre 0.1% a 0.5% .

Los inoculantes especiales son casi siempre adicionados en porcentajes menores, en un rango de 0.1% a 0.25% ,

siendo recomendado procurar adicionar los porcentajes mas apropiados. Se pueden usar porcentajes arriba de los rangos indicados y en algunos casos esto puede ser necesario.

Entretanto, es más interesante actuar simultáneamente sobre otras variables, que procurar resolver las dificultades através de la inoculación.

Conviene resaltar que adiciones muy elevadas pueden producir aquello que se podría llamar de sobre-inoculación, la cual puede aumentar la tendencia al apareamiento de defectos como porosidades e inclusiones de escoria y dross.

También hay la necesidad de considerar el rendimiento en la inoculación, pues siempre ocurren pérdidas por oxidación o no se disuelven. Comúnmente se mide la cantidad de inoculante tomando por base directamente el porcentaje adicional de  $\text{Si}$ , lo que también es común, para inoculantes ricos en silicio, por el porcentaje de silicio presente en el inoculante.

Se puede pensar en otros criterios como variación del carbono equivalente final. De un modo general este punto no es crítico, se debe ver que cuando se usan cantidades elevadas de inoculante puede ocurrir variaciones significativas en la composición química.

El rendimiento en la inoculación varía con otros factores, tales como, granulometría, temperatura de adición, densidad del inoculante, etc. En el caso de inoculante a base de ferrosilicio el rendimiento tiende a ser del orden de 60 - 80% pudiendo llegar a 90% .

La granulometría mas apropiada del inoculante es



principalmente función del tipo de inoculante y de la técnica de inoculación. Es difícil establecer recomendaciones. Se debe evitar partículas grandes, pues son de difícil disolución y también exceso de finos que tienden a oxidarse e disolverse muy rápidamente.

La temperatura de inoculación y la propia dimensión de la cuchara influye en la granulometría óptima. Cuanto mayor es la temperatura y la cuchara, mayor puede ser la granulometría. Para inoculantes ricos en silicio una recomendación posible sería, granulometría entre 0.2 - 4 mm para inocular en la cuchara de transferencia, entre 0.4 - 2 mm en la cuchara de llenado y de 0.1 - 0.4 mm para inoculaciones en el molde. Es común que los fabricantes entreguen los inoculantes en ciertos rangos granulométricos, o apenas limitan la dimensión máxima, incluyendo los finos, este último procedimiento ocurre más por el factor económico, siendo aplicado a los inoculantes de costo más elevado.

Otra de las variables que están enlazadas al inoculante, es la estabilidad física. Ha sido mencionado que la eficiencia del inoculante puede disminuir con el tiempo en función de reacción con la humedad del medio.

Así, inoculantes a base de grafito tienden a absorber humedad e inoculantes a base de silicio, en particular los que contienen altos porcentajes de elementos fácilmente oxidables, como por ejemplo, calcio, cerio, magnesio, tienden a juntarse con la humedad del medio el cual afecta no solo a la eficiencia, sino también a la reproductibilidad.

En vista de esto, se recomienda acondicionar los inoculantes en recipientes sellados a prueba de agua y en ambientes ventilados, cubiertos y libres de vapor de agua.

**b.- Factores que influyen en el inoculante**

Como se ha mencionado, varios son los factores que afectan la respuesta de un hierro fundido gris a la inoculación.

En cuanto al análisis químico del hierro fundido base, es importante el carbono equivalente, elementos de aleación y residuos. Cuanto menor es el carbono equivalente más eficiente debe ser la inoculación.

A medida que se aumenta los porcentajes de los elementos como el cromo, manganeso, molibdeno y vanadio la cantidad de inoculante necesario es mayor, aunque hay veces se tienen que hacer uso de inoculantes más poderosos.

Los porcentajes residuales de azufre y oxígeno parece que afectan a la respuesta del hierro fundido gris a la inoculación. Hierros fundidos con porcentajes de azufre del orden de 0.05 - 0.12% , serían los que mejor responderían a la adición de inoculantes. El mismo hierro fundido con porcentajes debajo de 0.03% no respondería tan fácilmente a la adición de inoculantes.

En cuanto al oxígeno, hay indicaciones que existe necesidad de cierto porcentaje de oxígeno en el baño, de preferencia entre 20 a 30 ppm para obtener así el máximo efecto inoculante. Porcentajes elevados de oxígeno serían perjudiciales, pues ocurriría excesiva oxidación de los constituyentes

activos del inoculante y porcentajes muy bajos de oxígeno no formarían un número suficiente de núcleos (teoría de los óxidos).

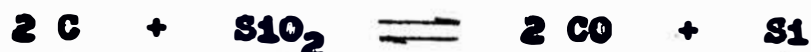
La materia prima es citada también como un factor que afecta la respuesta del material a la acción de los inoculantes. Se tiende a tener un comportamiento diferente cuando la carga metálica es constituida básicamente de hierro de primera fusión del que cuando se usa mucha chatarra de acero. Normalmente cuanto menor es la cantidad de arrabio en la carga, mayor es la cantidad necesaria de inoculante. En el caso de usarse carga metálica a base de chatarra de acero y carburante, el tipo de carburante también afecta la respuesta del inoculante. Este efecto depende de las características del carburante en cuanto al porcentaje de carbono grafitico y de residuos como nitrógeno, titanio, aluminio y magnesio. Por otro lado, el grado de oxidación de la carga, en particular, de la chatarra, cuando es excesiva, puede disminuir el rendimiento de la inoculación.

El tipo de equipo de fusión afecta la respuesta del hierro fundido gris a la inoculación. Hierros fundidos, de la misma composición, producidos en horno de cubilote exigirían menor inoculación que obtenidos en hornos eléctricos. Los hierros fundidos producidos en horno eléctrico de arco usualmente, en cuanto a la inoculación, presentan un comportamiento intermedio entre los dos de arriba que se mencionan.

En cuanto a la historia térmica del baño, en particular, la temperatura y el tiempo de enriquecimiento elevados,

afectan la inoculación, actuando en el sentido de disminuir el grado de nucleación del baño y por consiguiente hay la necesidad de una mayor inoculación a medida que se aumenta la temperatura y se prolonga el tiempo de enriquecimiento.

Comunmente se recomienda, enriquecimientos del orden de 50°C encima de la temperatura de equilibrio de la reacción



y tiempos de enriquecimientos cortos. Si el tiempo es largo y/o la temperatura es elevada, hay necesidad de corregir la composición química, siendo inclusive adiciones de nuevas cargas metálicas (arrabio, chatarra, carburantes o ferrealeantes) que auxiliaría inclusive para restituir el "potencial de nucleación del baño".

El rango usual recomendado para la inoculación de los hierros fundidos grises está entre 1420 - 1470°C.

El tiempo de recorrido entre la inoculación y la solidificación en el molde, es un factor crítico. Todos los inoculantes pierden la eficiencia con el tiempo después de la adición ("fading"). La velocidad de "fading" depende de una serie de factores, tales como temperatura de inoculación, granulometría, tipo de inoculante y características del baño, en particular porcentaje de azufre.

La mayoría de los inoculantes tiende a perder casi completamente el efecto de 15 a 30 minutos.

Un inoculante tiende a perder cerca del 50% de su poder grafitizante en aproximadamente 5 minutos. Por esa razón se recomienda llenar en el menor espacio de tiempo posible

despues de la inoculación.

Una de las técnicas de disminuir el problema "fading" es usando cantidades mayores de inoculantes, o como también, de usar inoculantes mas resistentes al "fading", como por ejemplo, inoculantes conteniendo bario.

Se debe mencionar que, en la práctica, en general, ocurren dos factores que simultaneamente tienden a disminuir el efecto grafitizante: de un lado es el "fading" del inoculante en sí y del otro es la temperatura del metal líquido. Esos dos factores asociados tienden a llevar a un aumento de la profundidad de temple mayor que apenas el "fading" del inoculante en sí.

#### F.- INOCULANTES Y SU USO EN LA FUNDICION GRIS

Existe una variedad de materiales que pueden ser usados como inoculantes en los hierros fundidos.

Se sabe que básicamente la inoculación se destina a provocar un aumento en el poder de grafitización del material. Entretanto, hay casos en que se da simultaneamente un incremento de las propiedades mecánicas, un mayor control de la estructura de la matriz y otras veces aliada a la alta grafitización en regiones se deja que no ocurra defectos.

La selección del inoculante puede depender del modo como se pretende realizar la inoculación, de la temperatura de la aleación a tratar, del tiempo de llenado del material tratado (tiempo de actuación del inoculante), etc. Por tanto, la selección del inoculante más adecuado es condicionado no solo al fin que se destina, también depende del modo que se reali

za la fabricación de los componentes del hierro fundido.

Muchos de los aspectos relativos a la inoculación son aplicables tanto para hierros fundidos grises como para nodulares. En los puntos que se siguen se da mayor importancia a los inoculantes para hierros fundidos grises, esto es, para hierros fundidos con grafito laminar.

En la tabla B, se presentan los principales inoculantes comerciales y sus respectivas composiciones químicas medias.

Como ya fue mencionado, la principal función del inoculante es la de grafitizar. Pero, hay algunos con la función de actuar <sup>COMO</sup> mas promovedores de perlita, dichos inoculantes son estabilizadores o perlitizantes. Es decir que actúan como promovedores de perlita.

A veces se procura agrupar a los inoculantes en familias en función de las características.

Una clasificación posible, sería por ejemplo, considerar los inoculantes grafitizantes como comunes y especiales, y considerar los inoculantes estabilizadores aparte, pues no son propiamente grafitizantes.

- Los inoculantes comunes, serían los inoculantes simples, como los ferrosilicios comerciales con diversos porcentajes residuales de calcio y aluminio, el siliciuro de calcio, el silicio metálico y el grafito.

- Los inoculantes especiales, serían inoculantes compuestos. Estos inoculantes, muchas veces, son comercializados con denominaciones codificadas y algunos fabricantes no dan indicación sobre la composición del producto. Se recomienda evitar el uso de un inoculante cuya composición se desconoce,



pues puede haber, en particular, en la producción de hierro fundido nodular efectos secundarios indeseables.

Los inoculantes especiales, en general, son a base de ferro-silicio o calcio-silicio, conteniendo elementos grafitizantes tales como: bario, estroncio, cerio, titanio, zirconio, etc., u otros elementos, como el manganeso, a fin de facilitar la incorporación del elemento activo. Los inoculantes grafitizantes especiales tienden a ser por unidad de peso, más caros que los comunes. Pero tienden a presentar un efecto grafitizante más intenso, siendo utilizados en porcentajes relativamente pequeños y son preferidos, por ejemplo, cuando se necesita un efecto grafitizante intenso que sólo sería conseguido con elevados porcentajes de inoculantes comunes.

Por esas razones, para un mismo efecto grafitizante, los inoculantes especiales pueden presentar un costo final menor.

- Los inoculantes estabilizadores son principalmente usados con la intención de obtener alta resistencia mecánica y deben ser de preferencia empleados en asociación con una pequeña cantidad de un inoculante grafitizante. Usualmente el elemento estabilizador es el cromo, pero se pueden utilizar otros, como por ejemplo, el estaño, el cobre, el molibdeno, el vanadio, etc.

Los inoculantes estabilizadores son más recomendados para hierres fundidos grises de carbono equivalente elevado, por ejemplo, 4.0 a 4.5% donde su efecto en el aumento de la resistencia mecánica es porcentualmente mayor que en carbono equivalentes más bajos.

En carbono equivalente de 3.4 - 4.0% , estos inoculantes su

**TABLA B .- PRINCIPALES INOCULANTES PARA HIERROS FUNDIDOS GRISOS**

GRUPO	INOCULANTE	COMPOSICION QUIMICA			OTROS (1)
		%Si	%Ca	%Al	ELEMENTOS %
Inoculantes grafitizantes comunes.	Grafito				
	Silicio metálico	98.5	0.04 máx		
	Ferro Silicio 50%	47.5	0.2	1.3	
	Ferro Silicio 75%				
	Tipo A	76.5	-	0.5 máx	
	Tipo B (2)	76.5	0.5 min	1.3	
	Ferro Silicio 85%	86.0	0.5 min	1.3	
	Siliciuro de calcio	62.5	32.0	1.1	
Inoculantes grafitizantes especiales.	Calcio - Silicio	57.5	14.0	1.0	
	Ca/Si/Mn	55.0	11.0	1.0	Mn = 18.
	Ca/Si/Ti	52.5	6.0	1.0	Ti = 10.
	Ca/Si/Mn/C	52.5	9.0		Mn=7.5; C=3.5.
	Si/Zr	50.0		2.0	Zr = 40
	Si/Zr/Ca	80.0	2.5	1.5	Zr = 1.5
	Si/Mn/Zr	62.5	3.5	1.0	Mn=6 ; Zr=6
	Si/Ba	60.0	1.0	1.0	Ba = 10
	Si/Mn/Zr/Ba	62.5	2.1	1.0	Mn=6 ; Zr=6 ; Ba = 2.50
	Si/Mn/Ca/Ba	62.5	2.5	1.25	Mn=10 ; Ba=5 .
	Si/Mn/Zr/Ca/Ba/C	47.5	5.0	0.75	Ba=4 ; Zr=7 Mn=7 ; C=18
	Si/Tierras Raras	50.0	2.5	4.25	TR = 31.5
	Si/Ce	30.0	0.5	0.5	Ce=10; Otras TR = 3.0
Si/Sr	77.5	-	0.5	Sr = 1	
Si Exotérmico.	61.0	0.5	1.1	NaNO=10; Mg=2.5	
SiC (3)	63.0	-	-	C = 28.	



CONTINUACION :

GRUPO	INOCULANTE	COMPOSICION QUIMICA			OTROS (1)
		%Si	%Ca	%Al	ELEMENTOS %
Inocu lantes	Cr/Si	15	-	-	Cr=60 ; C=5
	Siliciuro de cromo.	40	-	0.1	Cr=43; C=0.05
Estabi lizado res	Cr/Si/Mn	18	0.8	0.2	Cr=40 ; Mn=10; Ti = 0.75
	Cr/Si/Mn/C	10	-	-	Cr=54; Mn=6.5 C = 5.5
(perli tizan tes).	Cr/Si/Mn/Zr	22.5	2.5	-	Cr=27.5 ; Zr=5.5; Ba=2.5; Mn = 10

- (1) El restante es hierro, excepto en los inoculantes a base de de grafito.
- (2) Pueden existir con otros porcentajes de calcio y aluminio.
- (3) En general, usado en la carga; con otros aditivos puede ser usado en la cuchara de vaciado.

efecto tiende a ser menor y es casi obligatorio el uso asociado de un inoculante grafitizante, de preferencia de tipo especial. No se recomiendan el uso de inoculantes estabilizadores cuando el chill está en el punto mas crítico, en estos casos se dan preferencia a la adición de elementos perlitizantes que no aumentan el chill, como por ejemplo, el cobre y el estaño.

### **G.- TECNICAS DE LA INOCULACION**

La técnica de la inoculación, juntamente con la composición química, de los inoculantes, han sido los factores que mayor atención han recibido los estudiosos del asunto.

Varias son la técnicas que pueden ser empleadas para la introducción del inoculante en el baño líquido.

A continuación se dan algunas de las técnicas, cuyos métodos de inoculación son los siguientes; esto se da de un modo general.

**a.- Adición del inoculante en el propio horno de fusión.**

Se sabe que este método no es aconsejable, pues implica una baja efectividad del inoculante.

**b.- Adición del inoculante cuando se pasa del horno para la cuchara de vaciado o de transferencia, el metal líquido.**

La cual puede ser efectuada por una de las formas siguientes:

**b.1.- Adición del inoculante en el pico de vaciado del horno de fusión.**

Con esta técnica algunos de los fines del inoculante tienden a oxidar y pierden su eficiencia en cuanto

que las partículas gruesas pueden ser lanzadas para afuera de la cuchara en base de la fuerza centrífuga generada por el metal al fluir del pico para la cuchara.

**b.2.- Adición del inoculante después de pasar por el pico de vacado del horno.**

Según Patterson constituye probablemente el mejor método dentro de esta técnica. La adición debe ser efectuada cuando ya se tiene una columna metálica del orden de 10 cm. en la cuchara. El inoculante se funde rápidamente y se disuelve en el baño líquido.

**c.- Adición del inoculante en el fondo de la cuchara de vacado.**

Este método es considerado inadecuado pues no ocurre una reacción apropiada del inoculante en la cuchara y los finos o las mismas partículas mayores tiende a fijarlos presos en el fondo de la cuchara y así no le dejarían actuar al inoculante.

**d.- Adición del inoculante en el molde.**

La inoculación en el molde consiste en la adición del inoculante, en el sistema de alimentación del molde, la cual produce poderoso efecto, minimizando los problemas de "fading". Las adiciones efectuadas son muy pequeñas (del orden de 1 a 10 gr.) o también 0.1% de inoculante sería bastante efectivas, tanto en piezas grandes como en pequeñas.

Existen otras técnicas, que no fuerón descritos, que son empleados industrialmente, siendo algunos inclusive patentadas, entretanto, la que más ha sido recomendada es la introducción

del inoculante de forma granular, despues de pasar del pico del horno para la cuchara de vacado.

En general, el hierro fundido es inoculado en la cuchara, la inoculación en el molde no tiene mucho efecto, entretanto, si la inoculación preliminar fue ineficiente o entra en "fading", la inoculación en el molde promueve mejores resultados.

La inoculación en el molde, ha sido bastante empleada para obtener piezas exentas de carburos, en hierros fundidos nodulares y grises.

Las técnicas de inoculación de la cuchara para el molde y en el molde pueden, presentar, entretanto, algunos inconvenientes, como por ejemplo:

1.- Disolución inadecuada y distribución no uniforme del inoculante através del material fundido, el que puede ser debido a la propia composición del inoculante, o a la no adecuada granulometría, de la temperatura de vacado o de la velocidad de vacado. El uso de materiales y combinados con el inoculante es un medio de mejorar la disolución del inoculante.

2.- El peligro de partículas no disueltas del inoculante o de la escoria formada por el inoculante serán llevados a la pieza.

3.- Como el proceso es realizado para cada molde individualmente, la probabilidad de error humano aumenta considerablemente.

La inoculación durante el vacado para el molde o en el molde, exige pues cuidados especiales, envolviendo por tanto, mayores riesgos de suceso que la inoculación normal

en la cuchara de vacado, en buena hora se tiene una técnica que ha sido estudiada y usado como suceso.

## **H.- TRABAJO EXPERIMENTAL**

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo de presentar un estudio comparativo de los diversos productos usados como inoculantes, así como las diferentes combinaciones hechas entre ellas con diferentes composiciones y ser usadas en un hierro fundido gris.

Este estudio experimental se hizo con el uso de un horno rotatorio, la cual la utilizan para fundir y después por medio de cucharas colar las piezas que produce la fundición.

La composición química del metal base es variada y los factores que se analizarán son:

- Profundidad de temple.
- Grafito: tamaño, distribución y el tipo que corresponde.
- Porcentaje de ferrita <sup>mínima</sup> en la matriz.
- Resistencia a la tracción.
- Dureza.

### **1.- Trabajos Preliminares.**

Antes de que se realice, el trabajo experimental, se hicieron ensayos preliminares, cuyas finalidades se dan a continuación:

1.1.- Familiarizarse en las técnicas de fusión, inoculación, colada, control del chill, ensayos y análisis.

1.2.- Control del tiempo dispuestos en las diversas

operaciones, variación de la temperatura en el horno y en la cuchara de colada, etc.

1.3.- Determinación de la variables de operación (temperatura de inoculación, temperatura de colada, tiempo de inoculación, etc.).

Teniendo en cuenta el caracter esencialmente preparativo de los trabajos preliminares, se delinea el programa experimental, en donde el objetivo principal era la de mantener constante en cuasto sea posible las características de fabricación, en las diversas experiencias.

Conviene resaltar aquí que mantener constante en todas las experiencias, las variables de operación, implica en que no se tengallos mejores resultados para ciertos inoculantes. Esto porque, las condiciones establecidas para la realización de las experiencias no son, evidentemente las mas indicadas para todos los inoculantes ensayados. De esa forma, los resultados obtenidos reflejen el comportamiento de los inoculantes estudiados en una condición dada de trabajo, no representando necesariamente, por tanto , el mas acentuado efecto del inoculante para el porcentaje adicionado.

## 2.- Trabajos realizados.

La evaluación del comportamiento de un inoculante, es de una forma amplia y una tarea bastante difícil de ejecutar, pues como ya fue abordado, su eficiencia depende de un número muy elevado de factores.

Factores que dependen no solo del inoculante en sí, sino tambien de la técnica de fundición, como el medio de

fusión, composición química de hierro fundido base, composición de la carga, temperatura de inoculación, etc. De esta forma, es fácil concluir que los valores que se obtienen sobre el comportamiento de un cierto inoculante, en una fundición, difícilmente, serán reproducidos en otra fundición.

Delante de estos factores, se optó por desenvolver un trabajo donde las diversas experiencias fuerón realizadas apenas dentro de una situación de operación dado.

En cuanto a la composición química del hierro fundido base fue variado, estando dentro del siguiente rango en su mayor parte:

% C	:	3.0 - 3.3
% Si	:	1.6 - 2.2
% Mn	:	0.6 - 0.9
% S	:	0.04 - 0.1
% P	:	0.04 - 0.07

La composición química de este hierro fundido base adecuada, estuvo dentro de la norma STD 1102.25, clase 0125.00. Se optó por esta clase de hierro fundido por corresponder al hierro fundido gris de mayor uso.

Para todos los ensayos realizados con el inoculante, se empleó dicha composición química que pertenecía al hierro fundido base, utilizando como horno de fusión, el Horno Rotatorio. La intención de este trabajo, fue la de estudiar el comportamiento de los inoculantes en los h~~ie~~rreros fundidos grises que provenian del horno rotatorio.

Por otra parte las variables de fundición, como tem



peratura de inoculación, temperatura de vaciado, tiempo de inoculación, etc., fuerón fijados de acuerdo a la composición química del hierro fundido base y de otros factores ligados a la ejecución de la experiencias, despues de algunas fusiones preliminares.

Para este estudio fuerón escogidos, seis productos como inoculantes, la cual en su mayor parte fuerón usados en combinaciones, con diferentes porcentajes.

En cuanto a la granulometría, a exoepción de uno de los productos que era cobre, el cual venia en alambres, el resto se le pasaba por malla, cuya abertura es menor que 2 mm.

Se debe tener en cuenta, que los efectos de la inoculación en el proceso de solidificación de los hierros fundidos está principalmente relacionado con una alteración en la nucleación del baño líquido, de forma que la evaluación del comportamiento debe ser efectuada atraves de un análisis de las variaciones ocurridas en la características de solidificación tanto en la estructura, como en forma mecánica.

De esta forma la experiencias fuerón conducidas en el sentido de obtener información sobre las modificaciones impuestas por el proceso de inoculación, en la profundidad de temple, en el tipo, tamaño y distribución del grafito, en la matriz del metal, resistencia a la tracción y dureza.

### 3.- Materias primas y equipos empleados

Este trabajo se realizó en una planta de fundición con el uso de un horno rotatorio; debido a que esta fundición no cuenta con equipos para que se haga a nivel de laboratorio.



Este Horno Rotatorio emplea como combustible líquido, el petróleo D - 5 y el tiempo de fusión promedio de la carga es de 140 minutos.

Las cucharas donde se hace las inoculaciones, se usarán del tipo sifón, la cual permite descorificar el metal más fácilmente.

Tanto el Horno Rotatorio, como las cucharas que se usan, se describen en el capítulo II.

La lectura de temperaturas fue realizada con un pirómetro óptico marca PYRO, modelo N° 84, tipo "FOUNDRY TIPE".

Las materias primas que se utilizarán son las siguientes:

- Arrabio con bajos contenidos de azufre, fósforo y manganeso.
- Retornos de fundición.
- Ferroaleantes (FeSi, FeMn).
- Piedra caliza y antracita.

En ciertos casos se utilizaba chatarra de acero, cuando el contenido de carbono no era el adecuado (es decir superior al rango especificado).

El arrabio que se utilizó, no fue uniforme en cuanto a su composición química, debido a que este material que procede de SiderPerú es variado.

El retorno de fundición, la cual venía a ser las mazetas, bebederos, piezas mal coladas, etc., la composición química también es variado.

Los ferroaleantes que se utilizarán son:

Fe - Si : 45%

Fe - Mn : 75%

en ciertos casos se utilizaba el Fe - Si (75%).

A continuación se dan las composiciones químicas de la materia prima:

Materia prima	%C	%Si	%Mn	%S
Arrábio	3.9-4.3	1.6-2.6	0.03-0.05	0.015-0.05
Retorno de colada	2.95-3.3	1.6-2.4	0.65-0.80	0.08-0.105
Ferrosilicio		45.0		
Ferromanganeso			75.0	

El contenido de fósforo en el arrábio es menor que 0.05%, mientras que en el retorno de colada es menor que 0.07% .

#### 4.- Productos empleados como inoculantes.

Los productos que se emplearán como inoculantes, se encuentran en el mercado.

Las aleaciones inoculadas deben responder a ciertas características de la composición y estado físico y poseer otras propiedades importantes: una buena solubilidad, un fuerte coeficiente de eficacia.

Estos inoculantes se emplean entre otros fines, como desoxidantes, desulfurantes, para controlar el tamaño del grano de los cristales, para mejorar las propiedades físicas y mecánicas y la resistencia a la corrosión, etc.

#### 4.1.- Inoculantes

A continuación se detalla a cada uno de ellos:

##### a.- Ferrosilicio.

Denominación genérica de una serie de aditivos siderúrgicos cuyo elemento fundamental es el silicio.

El silicio es uno de los cinco elementos que acompañan al hierro (los otros son C, Mn, P y S). Se usa en primer lugar como desoxidante para reducir el exceso de oxígeno. Como elemento de aleación, aumenta la resistencia a la tracción, el límite elástico y la resiliencia a temperatura ambiente.

El ferrosilicio con 45% de silicio no es muy empleado como inoculante, pues es considerado poco efectivo. Este sería usado como inoculante cuando contenga de 0.8 a 1.25% Ca y 1.0 a 1.5% Al ; debido a que cuando contiene alto aluminio y calcio simultáneamente serán más efectivos que cuando contienen pequeña cantidad de calcio y aluminio.

El ferrosilicio con 75% de silicio es sin duda el inoculante más usado tanto en la producción de hierro fundido gris como en hierro fundido nodular.

Bilek et al, estudiando los efectos de la variación de los porcentajes de calcio (de 0 a 1.52%) y aluminio (de 0 a 2.28%) en el comportamiento de ferrosilicio 75% como inoculante en hierros fundidos grises con C.E. 3.6% y 3.9% observó entre otras cosas que el calcio y el aluminio no representaban efecto sobre la resistencia al "fading" del inoculante o sobre la dureza del material obtenido.

Los resultados obtenidos por Bilek et al, indican que el calcio no afecta la resistencia al "fading" del ferrosilicio; se ha afirmado que para temperaturas de inoculación mayores que 1450°C la elevación del porcentaje de calcio causa un aumento de la resistencia al "fading".

Los ferrosilicios son comunmente usados como inoculantes en la cuchara, en porcentajes de 0.2 a 0.5% . Su efectividad sería bastante disminuida despues de 10 minutos. El rendimiento de la absorción de silicio en el proceso de inoculación en la cuchara, varía en general de 50 a 80% , pudiendo llegar a 90% .

Los inoculantes a base de silicio serían mas recomendados que el grafito en "fusiones oxidantes" (baño con alto porcentaje de oxígeno), ocurriendo al contrario en "fusiones reductoras" (bajo porcentaje de oxígeno).

De acuerdo a las teorías de grafitización una hipótesis sería que el poder inoculante de los ferrosilicios es debido a la formación de microregiones ricas en silicio dentro de las cuales la solubilidad del carbono sería reducida ocurriendo la precipitación del grafito. Otra hipótesis es que se formarían fases ricas en silicio, inclusive carburo de silicio que sería sustrato efectivo para la nucleación del grafito. Una u otra hipótesis es que se formarían óxidos (sílice) que serían nucleantes. La explicación del efecto de residuos, tales como el aluminio y calcio, sería basado principalmente de que los nucleantes serían carburos de calcio y aluminio (carburos iónicos).

Los ferrosilicios comunes que contienen o no

calcio y aluminio serian poco efectivos como grafitizantes, en hierros fundidos grises de bajo azufre ( menor que 0.03% ), mas serian poderosos en hierros fundidos nodulares que contienen tambien bajo azufre. No habiendo una explicación satisfactoria para esa diferencia.

Se usó como inoculante el ferrosilicio 75%.

A continuación se darán las composiciones de los tipos 45% y 75%, la cual estan normalmente dentro de los siguientes rangos:

<u>Elemento</u>	<u>FeSi 45%</u> (%)	<u>FeSi 75%</u> (%)
Si	44 a 51	74 a 79
C	0.10 máx.	0.10 máx.
S	0.025 máx.	0.025 máx.
P	0.035 máx.	0.040 máx.
Al	1.50 máx.	1.25 máx.
Mn	0.40 máx.	0.75 máx.

b.- Ferrocromo.

Su empleo obedece siempre al deseo de incorporar al cromo como elemento de aleación.

Las adiciones de cromo a la fundición tiene el efecto de mejorar las propiedades mecánicas, aumentar la dureza, resistencia al desgaste, al calor, a la abrasión y a la corrosión.

El cromo afina igualmente la estructura en las grandes secciones. El cromo es un formador de carburos, y se encuentra en la fundición combinado al hierro y al carbono,

puede estar presente como constituyente de la perlita o de la cementita libre.

Los carburos de cromo son más estables que los carburos de hierro de la fundición ordinaria y por lo tanto la grafitización se retarda, aumentando el carbono combinado. Cuando se aumenta el cromo, mayor es la proporción de carburos que se forma, hasta la desaparición del carbono grafitico.

Con pequeñas adiciones de cromo (menor que 0.5%), no hay lugar a la formación de cementita libre, pero tiende a aumentar la perlita y a dar un grafito con mayor fuerza y con una mejor distribución. El tamaño de las lamelas de grafito se hace más uniforme y el grano del hierro se hace más fino.

El cromo no tiene efecto sensible sobre la mayor o menor dureza, pero sí las iguala en las diferentes secciones. Utilizando a razón de 0.15 a 1.0% con o sin otros elementos de aleación, el cromo produce un aumento general de las propiedades mecánicas.

Generalmente, el cromo es utilizado en compañía de otros elementos tales como el níquel, el cobre, el molibdeno y el vanadio.

Las combinaciones típicas son: Ni-Cr ; Cr-Mo ; Ni-Cr-Mo ; Cu-Cr ; y Cr-V .

Casi todas las calidades de ferrocromo contienen entre 50 y 70% de cromo.

Uno de los grados de alto carbono está dentro de los límites siguientes::

Cr	:	58.0	a	68.0%
C	:	3.0	a	5.0%

Si	:	1.5% máx.
S	:	0.040% máx.
P	:	0.030% máx.

**c.- Ferromanganeso.**

La adición de ferromanganeso se hace para obtener efectos desoxidantes, desulfurantes y para aportar manganeso al producto terminado. La mayor parte de los óxidos y silicatos de manganeso pasan a la escoria, dejando pocas inclusiones y poco nocivas.

El Mn desplaza el S de su combinación con el Fe, para formar MnS que estando insoluble en la fundición se evapora en la escoria en el baño líquido. La pequeña cantidad del MnS restante en suspensión en el metal, se encuentra al estado de pequeñas inclusiones compactas y que no tienen acción sensible sobre las cualidades del metal.

El manganeso, al igual que el cromo y molibdeno son formadores de carburos, son elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de la fundición gris y dificultan la grafitización.

El manganeso actúa como un estabilizador de la perlita aunque con un pequeño efecto que favorece la formación de cementita primaria ya que se opone a la grafitización cuando es mayor de 0.5% ; por esta razón es muy usado para asegurar una matriz completamente perlítica, especialmente en fundiciones de mucho espesor.

El ferromanganeso de alto carbono es, con mucho, la ferroaleación de mayor consumo. Una de las calidades de más



amplio uso tiene la composición dentro del siguiente rango:

Mn	:	74.0	a	76%
C	:	7.5%	máx.	
Si	:	1.2%	máx.	
P	:	0.35%	máx.	
S	:	0.05%	máx.	

**d. - Cobre.**

La adición del cobre en esta fundición se hizo por medio de chatarra clasificada y con contenido de cobre controlado. Mayormente como recortes y desechos de metal pure.

En las fundiciones, sus ventajas son variables, pero se emplea en todos los tipos: fundición gris, blanca, nodular, maleable, austenítica.

El cobre en una fundición funciona primeramente como un formador de grafito. Su efecto grafitizante es de alrededor de 1/10 del que tiene el silicio. Algunos investigadores piensan que el cobre retarda la grafitización durante la solidificación, cuando las condiciones para la formación de carburo son favorables o cuando se utilizan contenidos menores de 0.5% .

La solubilidad del cobre en la fundición es de más o menos 2.5% , en tenores superiores la fundición presenta las características de una fundición compleja.

Este valor no se modifica cuando la fundición sufre variaciones en su composición química, salvo en los casos de una adición de níquel.

Según los trabajos de la Monel Niquel Company's toda adición de 1.0% de níquel aumenta la solubilidad de 0.5% de cobre. En la práctica, el tenor posible de cobre en una fundición puede ser determinado por la fórmula:

$$\% \text{ Cu} < 3.5\% + 0.3 \text{ Ni}$$

El calcio, el silicio y el cromo, mejoran la solubilidad del cobre en proporciones mal definidas; el molibdeno, la disminuye notablemente, es por eso que se constatan segregaciones en una fundición con 0.79% de molibdeno y 1.0% de níquel con 1.30% de cobre.

El cobre tiene un efecto grafitizante, suprime la cementita libre sin tender a la descomposición de la perlita. El grafito tiende a tomar la forma dendrítica.

El poder grafitizante del cobre equivale a 30% del silicio y 85% del níquel, contrabalanca el efecto de 1.40% de manganeso o de 0.30% de cromo. Dado el efecto grafitizante del cobre en el intervalo de solidificación, y el efecto antiferritizante en el enfriamiento en las zonas de transformación, las adiciones de cobre en las fundiciones grises impide la formación de ledeburita en las secciones delgadas y la formación de ferrita en las zonas gruesas.

La adición de cobre provoca una estructura muy uniforme, sin formación de puntos duros, ni puntos dulces, y da al mismo tiempo propiedades de resistencia mecánica y de dureza remarcable.

Siendo grafitizante, el cobre produce un ablandamiento de la fundición cuando ésta contiene cementita libre.

En ausencia de cementita libre, el cobre, entra en solución en la matriz y provoca un aumento de la dureza. De este aumento de dureza, no resulta una disminución de la maquinabilidad, como en el caso del endurecimiento producido por la presencia de carburos.

Los ensayos de resiliencia han permitido constatar que el cobre tiene una influencia sobre la resistencia al choque de la fundición.

e.- Inoculín 25 (I - 25).

El inoculín 25, es un producto comercial que contiene en su mayoría silicio y como elementos menores contiene Zr, Mn, Al, Ca, y Mg. Es un producto que se obtiene por entafío en hornos adecuados, no es una mezcla, por lo tanto no hay separación de componentes.

Sus efectos no están tan afectados por el sílice como en otros materiales inoculantes y muchas de las desventajas que tienen ciertos inoculantes, han sido superados por el inoculín 25. La debilitación del efecto inoculante se retarda considerablemente y la reducción del efecto de temple es excepcional.

Mediante el empleo del inoculín 25 se consigue, al actuar sobre los factores esenciales que caracterizan la calidad de un hierro fundido: células eutécticas, grafito, microestructura, profundidad de temple, resistencia a la tracción, y dureza.

La cantidad que se ha de adicionar variará según el carbono equivalente del hierro, el espesor de la pieza y

la disminución de temple que se desee conseguir. El empleo de la probeta de temple facilita el control en este aspecto.

La composición del inoculín 25 es el siguiente:

Si	:	65.0%
Zr	:	3/4 %
Mn	:	3.0%
Al	:	1.0%
Ca	:	1.0%
Mg	:	0.3%

donde el Si y el Zr son grafitizantes, Al y el Ca son desoxidantes, el Mn actúa contra el S y el Mg rebaja el punto de fusión del inoculín 25, y actúa como fundente ayudando a la excepcional solubilidad del inoculante en el hierro fundido.

#### f.- Bismuto.

El bismuto que se utilizó, como inoculante es refinado, la cual viene en barras y se obtiene comercialmente de Centromin-Perú.

El bismuto es un metal que tiene un bajo punto de fusión, su radio atómico (1.82 Å) es 2.12 veces del radio atómico de carbono (0.86 Å), y 1.43 veces del radio atómico de hierro (1.27 Å), de este modo su solubilidad en el hierro sólido es muy bajo. El bismuto, por lo tanto, agregado en la interfase líquido-sólido, retarda la velocidad de crecimiento de las células eutécticas de grafito-austenita.

De este modo, nosotros podemos simplemente describir el mecanismo de la inoculación de inoculantes que contienen bismuto, los elementos que llevan los inoculantes tal

como Mn, Ce, Si, Ca, Al combinado con S, O, C en el hierro fundido, proporciona una porción (o lote) de núcleos heterogéneos de sulfuros, óxidos y carburos, facilitando por lo tanto la grafitización. Un pequeño porcentaje de bismuto agregado en la interfase líquido-sólido decrece o disminuye la velocidad de crecimiento de las células eutécticas, en consecuencia la microestructura aparece de grafito de tipo A, células eutécticas refinadas y una pequeña cantidad de ferrita libre, de este modo las propiedades mecánicas del hierro fundido gris son incrementados evidentemente.

La adición del bismuto es variado desde 100 ppm a 500 ppm.

En un ensayo, la adición del bismuto de 200 ppm a 400 ppm y combinados con los inoculantes CaMnSi y SiCa, el ensayo de tracción incrementaba evidentemente de 4 - 5 Kg/mm<sup>2</sup>. Cuando el bismuto estuvo conteniendo sobre 400 ppm, el ensayo de tracción ligeramente decrecía.

La dureza es incrementado con el incremento de la adición de bismuto.

El chill claro y chill total ensayados en pieza de forma triangular eran reducidos por inoculantes como CaMnSi y SiCa combinado con 100 a 2000 ppm de bismuto. Cuando el bismuto es adicionado sobre los 400 ppm, la profundidad de temple es incrementado, el inoculante complejo BiCaMnSi conteniendo 150 - 200 ppm de Bi es en consecuencia el más apropiado para un hierro base de C.E. 4.10 - 4.20 .

En una serie de ensayos el grafito tipo D predomina en un hierro fundido sin inocular, cuando se inocula con

CaMnSi, CaSi combinado con bismuto de 100 - 300 ppm, el grafito tipo D y el porcentaje de ferrita libre decrecen. Pero cuando el bismuto es adicionado de 400 - 500 ppm, 10 a 20% de tipo D aparece, y una pequeña cantidad de grafito compacto es obtenido.

#### 4.2.- Use de los inoculantes.

Los inoculantes o productos que se mencionan anteriormente, fueron utilizados en su mayor parte haciendo combinaciones entre ellas. Asimismo se iba variando la cantidad a adicionar.

A continuación se detalla en la forma de como se utilizarón:

- a.- Cu/Fe-Si.
- b.- Cu/I-25.
- c.- Cu/Fe-Si/Fe-Cr.
- d.- Cu/I-25/Fe-Cr.
- e.- Cu/I-25/Bi.

De la misma forma se hizo ensayos en forma individual para los inoculantes como el I-25 y el cobre.

Los resultados y porcentajes de adición que se efectuarón, de cada uno de ellos, se darán más adelante.

#### 5.- Proceso realizado para obtener las muestras.

##### 5.1.- Material utilizado.

Para obtener las muestras se recurrió a un molde, cuyo diámetro de la barra es de 30 mm., según la norma ASTM A 48-76, la cual servirá para los ensayos mecánicos y

metalográficos.

La caja que contiene al alimentador y las dos barras, es de plancha de hierro de 1/8" .

Los moldes del alimentador y las barras son de madera.

Para el moldeo se utilizó la arena de alma, que consiste de arena de sílice, silicato de sodio y aserrín, para después ser gaseado con  $CO_2$  .

La fig. 9 muestra el diseño y dimensiones del molde de barras que se utilizó para el ensayo de barras del hierro fundido gris.

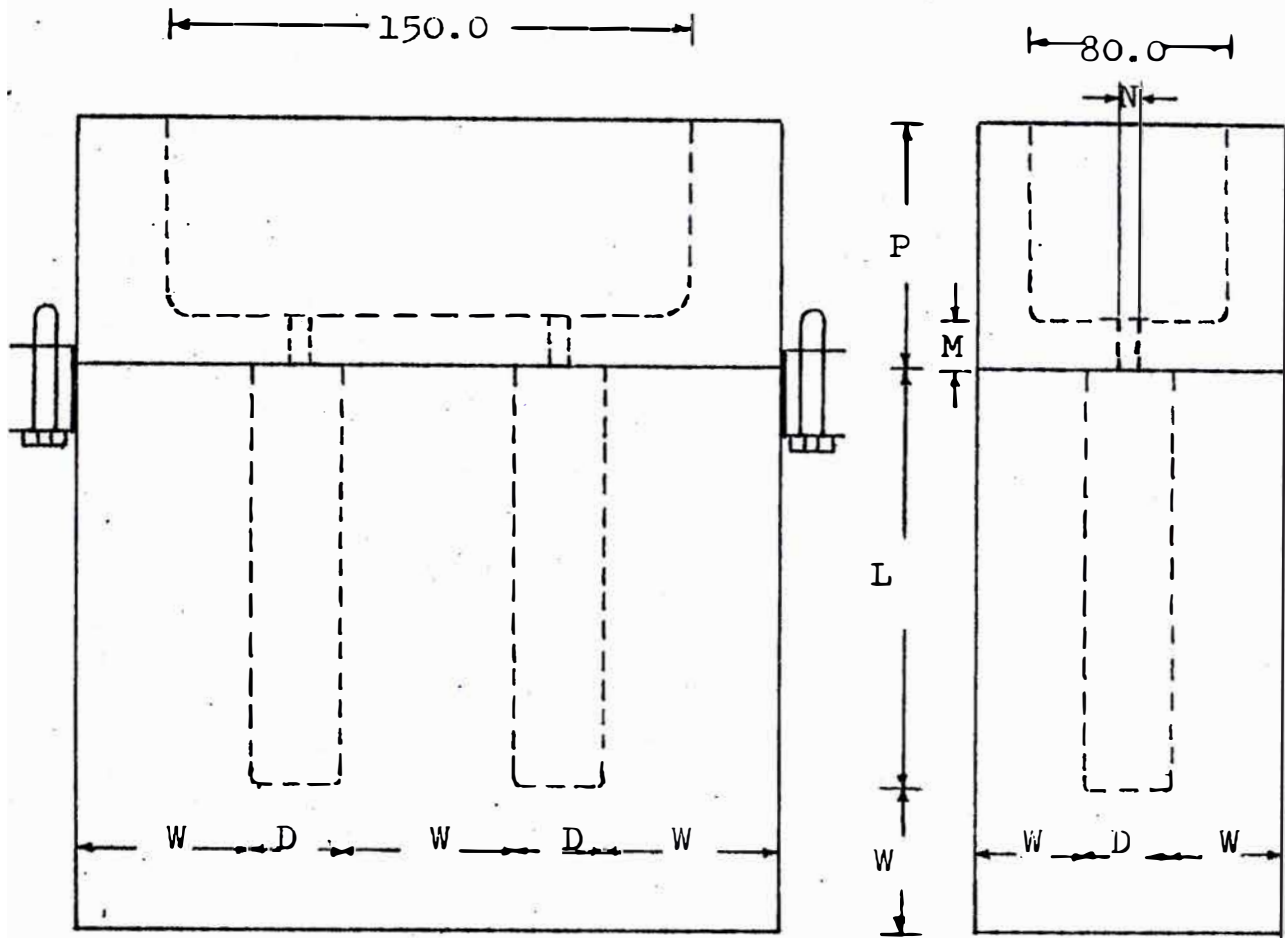
Para los ensayos de profundidad de temple, se recurrió al uso de una probeta de temple, la cual es una herramienta de control muy simple con lo que se obtiene una determinación muy rápida de la reducción de temple conseguida con la inculación.

Los moldes de estas probetas eran hechos con arena de alma; estas deben ser fundidas por la base de la cuña y cuando se han enfriado hasta el rojo oscuro, aproximadamente  $600^{\circ}C$  , la cuña se introduce en agua para que se enfríe y a continuación se parte por la mitad. La profundidad de temple se mide con un calibrador.

La conveniencia de un hierro tratado para piezas de determinados espesores, es fijada por la experiencia en los resultados dados por comparables profundidades de temple.

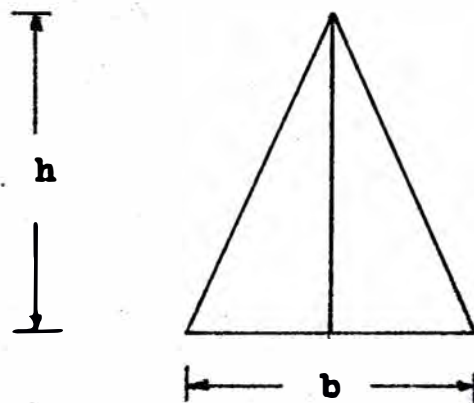
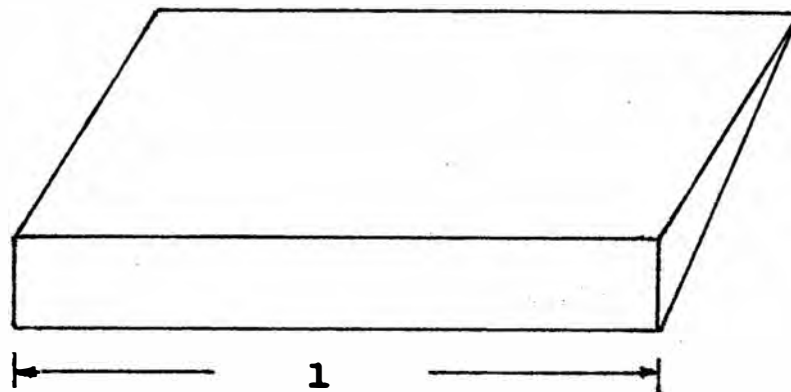
La fig. 10 muestra las dimensiones de la probeta de temple.





DIMENSIONES (mm).					
L	D ( $\emptyset$ )	P	N ( $\emptyset$ )	M	W
230.0	30.0	50.0	8.0	12.0	$\emptyset D <$

Fig. 9.- Cuerpo de prueba para ensayos de tracción



DIMENSIONES (mm)		
l	h	b
120.0	50.0	20.0

**Fig. 10.-** Cuerpo de prueba para los ensayos de Profundidad de temple (Chill).

## 5.2.- Obtención de las muestras.

Antes de realizar las inoculaciones respectivas, se hacían las correcciones necesarias del hierro fundido base con el fin de tener una composición química adecuada.

La cuchara que se iba a utilizar se calentaba hasta que el revestimiento este al rojo. Tanto los moldes de barras, como las probetas de temple se colocaban cerca al horno.

Para la colada, se procedía a empezar a colar las piezas que produce la fundición, y se controlaba la temperatura tanto del pico del horno como cuando se hacía el vaciado a los moldes. Además se controlaba la profundidad de temple.

Más o menos cuando se notaba que estaba por la mitad de la colada se procedía hacer la respectivas inoculaciones.

La temperatura del metal líquido que salía del pico del horno estaba entre 1440 - 1470°C.

La temperatura, cuando se vaciaba el metal líquido de la cuchara a los moldes estaba entre 1400 - 1420°C.

El tiempo que se mantenía al inoculante en la cuchara, con el fin de disolverse en el baño líquido, estaba entre 50 a 70 segundos, luego se vaciaba en los moldes de barras y en los moldes para profundidad de temple.

Además se sacaba muestras sin emplear inoculantes, tanto para los moldes de barras, como para las probetas para la profundidad de temple.

La granulometría del inoculante era menor que 2 mm, a excepción del cobre que se le añadía en alambres y

recortes.

La técnica de la inoculación empleada fue de dos maneras distintas, la primera de adicionar el inoculante en la cuchara antes de que se realice el vaciado del metal, y la segunda cuando después de haberse adicionado una cierta cantidad de metal líquido en la cuchara, recién se procedía a ir añadiendo el inoculante junto con el metal líquido en la cuchara, hasta que la adición del inoculante termine antes de que se llene la cuchara.

Las pruebas experimentales realizadas, tanto inoculadas y sin inocular, se hicieron generalmente ensayos de tracción, dureza y metalografía.

## **6.- Ensayos realizados.**

Los ensayos que se realizarán fueron:

- Ensayos metalográficos.
- Ensayos de resistencia a la tracción.
- Ensayos de dureza.
- Análisis químico.

### **6.1.- Ensayos metalográficos.**

Estos ensayos fueron realizados, cortando la muestra de la barra de 30 mm. de diámetro que era destinado a ensayos mecánicos. La muestra que se cortaba tenía una dimensión de 30.0 mm.  $\varnothing$  x 20.0 mm. de alto.

Después eran lijados con las lijas 220, 320, 400 y 600 en una superficie plana. Enseguida se realizaba el pulido en un disco cubierto con paño de billar; el abrasivo que se utilizaba era la alúmina, la cual consiste de un polvo

blanco y luego ser diluido en agua destilada.

Para el ataque químico se utilizó como reactivo el Nital 2% , la cual estaba compuesto por 2 ml. de  $\text{HNO}_3$  , diluido con alcohol etílico en una probeta de 100 ml.

Tanto el ácido nítrico, como el alcohol etílico son de alta pureza.

Las muestras fuerón fotografiadas con una cámara de 135 mm., el cual estaba adaptado a un microscopio, el tiempo de toma fue de 30 segundos.

#### 6.2.- Ensayos de resistencia a la tracción.

Los ensayos de resistencia a la tracción fuerón realizadas de acuerdo a la norma de la probeta mecanizada DIN 50109-68 , las dimensiones se dan en la fig. 11 .

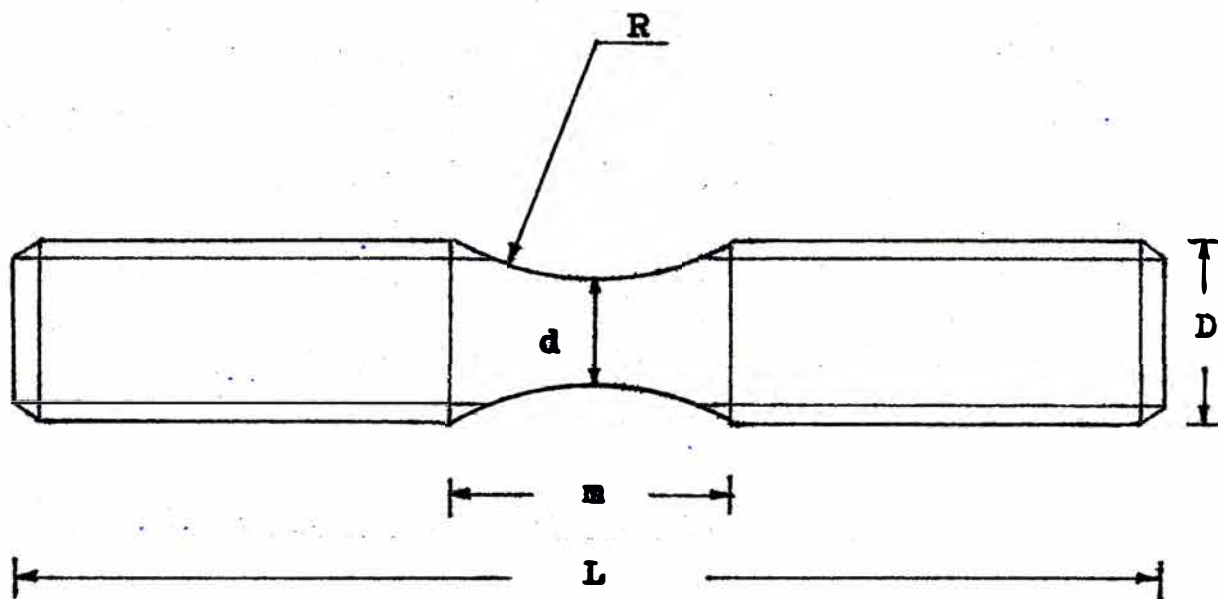
#### 6.3.- Ensayos de dureza.

Los ensayos de dureza, fuerón determinados por medio de un equipo que cuenta la fundición, la cual emplea el método Brinell.

Este aparato, cuyo modelo es HB-2, número 940 , de accionamiento hidráulico es manufacturado por la DETROIT TESTING MACHINE Co. /~~DETROIT~~, MICHIGAN; el cual permite emplear cargas de 3000, 1000 y 500 Kgf , el diámetro de la bola es de 10 mm.

La duración de la aplicación de la carga puede ajustarse con un tiempo determinado. Los diámetros de las huellas se mide con un aparato óptico.

La muestra que se utilizó para el ensayo metalográfico, se utilizó también para el ensayo de dureza; estos



DIMENSIONES (mm)				
$\varnothing D$	L	R	$\varnothing d$	m
$20 \pm 0.5$	205	$25 \pm \frac{5}{0}$	$12.5 \pm 0.2$	25

**Fig. 11.- Probeta mecanizada para los ensayos de Resistencia a la tracción.**

fuerón obtenidos midiendo para cada muestra dos diámetros perpendiculares, de la cual se obtenía su valor medio.

El ensayo de dureza se efectuó con una carga de 3000 Kgf, una esfera de 10 mm. de  $\phi$  y el tiempo que se usó cuando se aplicó la carga fue de 30 segundos.

#### **6.4.- Análisis químico.**

Para el análisis químico se utilizó el método gravimétrico, volumétrico y combustión.

### **7.- Resultados experimentales.**

#### **7.1.- Introducción.**

Los resultados obtenidos, en las diversas experiencias varían uno del otro, debido a que la adición del inoculante es variado.

La sensibilidad de las características de solidificación de los hierros fundidos a las variables de fabricación es tan acentuada que difícilmente son reproducidos los valores absolutos alcanzados para características tales como profundidad de temple, resistencia a la tracción, dureza, etc., procurando asimismo mantener constante las condiciones de trabajo.

De esta forma, los valores se mantenían dentro de un cierto rango, la variación que ocurre es suficiente para hacer difícil la realización de un estudio comparativo de los efectos de diversos inoculantes a través de los valores absolutos obtenidos. Tal estudio sólo sería válido si todas las muestras a ser ensayadas fuesen obtenidas de una sola



colada del horno e inoculadas y llenadas simultáneamente. Debiendo tal procedimiento ser repetido varias veces. Esto, por lo tanto, es prácticamente imposible, cuando se desea estudiar la adición de varios inoculantes en porcentajes diversos.

Después de esta explicación, se procuró desenvolver el presente trabajo utilizando como medio de comparación valores relativos provenientes de la cantidad en porcentaje, de las variaciones ocurridas en las características del hierro fundido base con la presencia de un porcentaje dado de inoculante.

Las comparaciones de valores absolutos sólo eran efectuadas entre el material inoculado y los del hierro fundido base, correspondiente a la misma colada. En ciertos casos se hacía la comparación de uno u otro inoculante con porcentajes iguales y diferentes.

En casi la mayor parte de las experiencias fueron realizadas más de una vez.

Los resultados de un material inoculado con un mismo porcentaje, varían entre uno u otro, debido a la variación del hierro fundido base.

## 7.2.- Discusión de resultados.

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, tiene por objetivo de evaluar los efectos que tienen los inoculantes que se han usado en el hierro fundido gris. Dichos efectos se refieren a la resistencia a la tracción, dureza, profundidad de temple (chill), distribución del grafito (tipo y tamaño) y el contenido de ferrita que

pueda estar presente.

La adición entre uno u otro inoculante es variado, para lo cual la comparación de efectividad entre ellos se hizo viendo esta consideración.

Fuerón realizadas 140 pruebas, seleccionandolos las que se muestran en las tablas, la cual se encuentran en el anexo.

Las muestras seleccionadas, se clasificaron de la siguiente manera:

- Manteniendo casi constante el C.E., variando solamente el contenido de adición del inoculante, y
- Manteniendo constante el % de adición del inoculante, variando solamente el carbono equivalente (C.E.).

La tabla I, se refiere a las muestras que no fuerón inoculadas, pertenecen a la resistencia a la tracción, dureza, distribución del grafito (tipo y tamaño) y el contenido de ferrita que está presente en la matriz. El carbono equivalente es variable.

La tabla II, los resultados se refieren a la profundidad de temple sin inocular e inoculado, manteniendo el carbono equivalente casi constante. Las muestras fuerón inoculadas y su adición está en forma creciente.

La tabla III, los valores se refieren a las muestras que fuerón inoculadas, para lo cual se mantuvo el carbono equivalente casi constante. Pertenecen a la resistencia a la tracción y dureza; la adición de los inoculantes está en forma creciente.

La tabla IV, los resultados se refieren a la distribución del grafito (tipo y tamaño) y a la cantidad de ferrita que está presente en la matriz. Para lo cual se mantuvo casi constante el carbono equivalente y la adición de los inoculantes está en forma creciente.

La tabla V, nos muestra los resultados que se obtuvieron, respecto a la profundidad de temple, sin inocular e inoculado. El contenido del inoculante permanece constante y el carbono equivalente varía en forma creciente.

La tabla VI, los valores se refieren a la resistencia a la tracción y a la dureza, manteniendo constante el contenido del inoculante y variando el carbono equivalente en forma creciente.

La tabla VII, los resultados se refieren a la distribución del grafito (tipo y tamaño) y al contenido de ferrita que está presente en la matriz, manteniendo constante el contenido del inoculante y variando el carbono equivalente en forma creciente.

Los resultados que se muestran en las tablas, fuerón llevados a la gráfica, la cual se presentan en las siguientes figuras:

La figura I, pertenece a las pruebas sin emplear inoculantes y se graficó:

- C.E. vs. Rt.
- C.E. vs. Dureza (HB).

Las figuras II y III, pertenecen a las muestras cuando el carbono equivalente se mantiene casi constante y el

contenido del inoculante varía en forma creciente, se graficó:

- % Inoculante vs. Rt.
- % Inoculante vs. Dureza (HB).
- % Inoculante vs. Profundidad de temple.

Las figuras IV y V, pertenecen a las muestras cuando el carbono equivalente varía en forma creciente y el contenido del inoculante se mantiene constante. Se graficó:

- C.E. vs. Rt.
- C.E. vs. Dureza (HB).
- C.E. vs. Profundidad de temple.

A continuación se hace un análisis del efecto del inoculante en el hierro fundido gris.

A.- Cuando el carbono equivalente se mantiene casi constante y la adición del inoculante varía en forma creciente.

a.- Los inoculantes que se mostrarán efectivos en la reducción de la profundidad de temple son:

- I-25/Cu.
- Cu/I-25.

Le siguen en efectividad:

- Cu/Fe-Cr/I-25.
- Cu/I-25/Fe-Cr.
- Bi/I-25/Cu.
- Fe-Cr/Fe-Si/Cu.

**Los menos efectivos fuerón:**

- Cu.
- Fe-Si/Cu.
- Cu/Fe-Si.

**b.- Los inoculantes que se mostrarón efectivos en la resistencia a la tracción fuerón:**

- I-25/Cu.
- Cu/Fe-Cr/I-25.
- Fe-Cr/Fe-Si/Cu.

**Le siguen en efectividad:**

- Cu/I-25.
- Bi/I-25/Cu.
- Cu/I-25/Fe-Cr.

**Los menos efectivos fuerón:**

- Cu/Fe-Si.
- Fe-Si/Cu.
- Cu.

**c.- En lo que respecta a la dureza, los inoculantes que se mostrarón efectivos fuerón:**

- Bi/I-25/Cu.
- Cu/Fe-Cr/I-25.
- Cu/I-25/Fe-Cr.

**Le siguen en efectividad:**

- Fe-Cr/Fe-Si/Cu.
- I-25/Cu.
- Fe-Si/Cu.

El menos efectivo fué:

- Cu.

d.- Los inoculantes que mostraron efectividad en la distribución del grafito (tipo y tamaño) fueron:

- Cu/I-25.
- Cu/Fe-Cr/I-25.
- Cu/I-25/Fe-Cr.

Le siguen en efectividad:

- I-25/Cu.
- Fe-Cr/Fe-Si/Cu.
- Cu/Fe-Si.
- Cu.

Los menos efectivos fueron:

- Bi/I-25/Cu.

La misma secuencia es para el contenido de ferrita que se presenta en la matriz. Es decir los inoculantes que fueron más efectivos en la reducción del contenido de ferrita.

La comparación entre uno u otro inoculante, se hizo en forma generalizada, a pesar de que existen diferencias en el carbono equivalente y en el % de de adición del inoculante. (ver tablas).

B.- Cuando el carbono equivalente varía en forma creciente y la adición del inoculante se mantiene constante.

a.- Los inoculantes que se mostraron efectivos en la reducción de la profundidad de temple son:

- I-25/Cu : 0.350/0.625%

**Le siguen en efectividad:**

- Cu/I-25/Bi : 0.625/0.350/0.005%.
- I-25/Fe-Cr/Cu.

**Los menos efectivos fuerón:**

- I-25 : 0.200%.
- I-25/Cu : 0.200/0.625%.

La reducción de la profundidad de temple, varía de acuerdo al carbono equivalente a emplear y la cantidad del inoculante a adicionar (caso del I-25 ó Fe-Si). El uso de I-25 con 0.200% para un C.E. de 3.63 a 3.74 demuestra que la reducción en la profundidad de temple (chill) es bajo; ensayos realizados con 0.250 y 0.350% demostrarón que la reducción se incrementa notablemente.

**b.- Los inoculantes que muestran mayor efectividad en la resistencia a la tracción son:**

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.300/0.400/0.750%.
- I-25/Cu : 0.350/0.625%.

**Le siguen en efectividad:**

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.300/0.500/0.750%.
- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.200/0.500/0.625%.
- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.250/0.500/0.625%.
- Cu/I-25/Bi : 0.625/0.350/0.005%.
- I-25 : 0.200%.

**El menos efectivo fué:**

- I-25/Cu : 0.200/0.625%.



c.- De un modo general, el inoculante más efectivo en la dureza fué:

- Cu/I-25/Bi.

Le siguen en efectividad:

- I-25/Fe-Cr/Cu.

- I-25/Cu.

- I-25.

d.- Los inoculantes que mostrarón mayor efectividad en la distribución del grafito (tipo y tamaño) fuerón:

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.300/0.500/0.625%.

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.300/0.400/0.750%.

- I-25/Cu : 0.350/0.625%.

Le siguen en efectividad:

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.250/0.500/0.625%.

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.300/0.500/0.750%.

- I-25/Fe-Cr/Cu : 0.200/0.500/0.625%.

- I-25/Cu : 0.200/0.625%.

- I-25 : 0.200%.

El menos efectivo fué:

- Cu/I-25/Bi : 0.625/0.350/0.005%.

En cuanto al contenido mínimo de ferrita que pueda estar presente en la matriz, la secuencia es la misma que se hizo para la distribución del grafito.

A continuación se presentan algunas consideraciones referentes a los resultados obtenidos para cada inoculante en sayado:

### 7.2.1.- Ferrosilicio 75% e Inoculín - 25.

El silicio, reconocido como el elemento grafitizante por antonomasia, incrementa localmente la actividad del carbono y su velocidad de difusión. Esto se traduce en una elevación de la temperatura eutéctica en el diagrama estable y una disminución en el metaestable.

El Fe-Si 75% es uno de los componentes de los inoculantes compuestos que se han empleado, lo mismo sucede con el inoculín - 25, la cual haremos un análisis de comparación. Tanto el Fe-Si 75% y el I-25 tienen diferente composición química, se verifica por ejemplo que el I-25 contiene Si, Zr, Mn, Ca, Al, y Mg, mientras que el Fe-Si 75% contiene Si Al y Mn; las diferencias que presentan son bastante significativas. Durante los

Durante mucho tiempo se creyó que el efecto inoculante al añadir al caldo ferrosilicio de alta riqueza era debido a la concentración local de silicio, con la consiguiente separación entre el diagrama estable y el metaestable. No obstante ferrosilicios con igual porcentaje de silicio presentaban efectos inoculantes completamente distintos, especialmente cuando transcurría un cierto tiempo entre la inoculación y la solidificación de la pieza. Además, hierros muy puros, con porcentajes de azufre inferiores al 0.03% respondían peor a la inoculación que otros con azufres más elevados.

Ha sido afirmado que el Ferrosilicio cuando no contiene pequeños contenidos de calcio y aluminio presentan muy poco poder de inoculación. Igual resultado se obtenía

si el inoculante no contenía pequeñas cantidades de Ce, Sr, Ba, Mg, etc.

Debemos tener en consideración de que el poder germinador puede ser atribuido, en orden decreciente, a los sulfuros de Ce, Ca, Sr, Ba, Mg, y Mn. Es de notar que, en ausencia de inoculantes, la germinación del grafito se produce por las partículas de MnS que se forman en el metal líquido.

Según J. Tartera B. , el análisis de dispersión de energía de los rayos X (EDAX), confirmarán la presencia de los sulfuros de estos elementos tanto en el grafito laminar como en el esferoidal.

En realidad, el proceso es mucho más complejo, ya que se pueden formar compuestos ternarios cuyas características permiten clasificarlos dentro del orden citado. Esto puede explicar la presencia de Aluminio, siempre asociado al silicio, puesto de manifiesto por el EDAX en algunos gérmenes. Sin embargo, este último caso sólo se da en ausencia de otros formadores de gérmenes, ya que se ha demostrado (según P.J. Bilek, J.M. Dong y T.K. McCluhn) que, en el ferrosilicio conteniendo Ca y Al, el elemento que actúa como inoculante es el Ca , mientras que el Al tiene un efecto poco pronunciado, incluso en ausencia de Ca. Por otra parte, el Al puro, al igual que el Si puro, no presenta ningún efecto inoculante.

Los resultados que se han obtenido, demuestran que el inoculín - 25 es más efectivo que el Fe-Si 75% ; la cual viene favorecida por los elementos que presentan en

pequeñas cantidades.

### 7.2.2.- Ferro-cromo.

Este inoculante es empleado como material perlitizante, siendo por eso llamado inoculante estabilizador.

Su uso requiere mayor cuidado, pues puede promover la formación de una estructura mezclada, siendo por eso en general estar acompañado de un inoculante grafitizante.

El uso de Fe-Cr , se hizo acompañado de I-25/Cu y de Fe-Si/Cu , para lo cual se obtuvieron resultados satisfactorios en las diferentes propiedades ensayadas.

El Fe-Cr se utilizó mayormente con una adición de 0.500% , variando en su composición de adición el I-25 , Fe-Si y Cu ; el uso de Fe-Cr/Fe-Si/Cu mejora la resistencia a la tracción, dureza , y permite que se obtenga una reducción adecuada en la profundidad de temple, una distribución adecuada del grafito y una reducción bastante significativa en la ferrita. Mientras el uso de Cu/Fe-Cr/I-25 , permite obtener resultados más favorables a comparación de Fe-Cr/Fe-Si/Cu , con respecto a la dureza, distribución del grafito y la reducción en la ferrita.

Para carbono equivalentes altos (3.9 - 4.1) la adición del inoculante deberá ser mayor, para obtener buenos resultados.

El uso excesivo de Fe-Cr , va a permitir que se obtengan carburos de cromo, la cual se formarán más

primeros que los carburos de hierro, por ser más estables, lo que traerá como resultado que la pieza a fabricar no sea maquinable.

Ensayos efectuados con Fe-Cr/Cu , cuya composición era de (0.500/0.250%), se obtuvieron que la profundidad de temple no disminuye, la resistencia a la tracción aumenta (entre 26 - 29 Kg/mm<sup>2</sup>), la dureza aumenta (entre 217 a 223 HB), aparece el grafito tipo D (10 a 20%) y aumenta el contenido de ferrita (10 - 15%).

### 7.2.3.- Cobre.

Este inoculante tiene un efecto grafitizante, suprime la cementita libre sin tender a la descomposición de la perlita. El grafito tiende a tomar la forma dendrítica.

La adición de cobre provoca una estructura muy uniforme, sin formación de puntos duros, ni puntos dulces, y da al mismo tiempo propiedades de resistencia mecánica y de dureza remarcable.

El cobre usado solo como inoculante no promueve a la disminución de la profundidad de temple, según se puede ver en la figura III, su disminución es pequeña.

En cuanto a la resistencia a la tracción no es tan efectivo, como el resto de inoculantes que se han visto. La dureza se ve mejorada hasta cierto punto. La distribución del grafito es adecuado y su porcentaje de ferrita lo disminuye. (ver tabla IV)

El cobre acompañado del I-25, mejora la resistencia a la tracción, dureza, así como reduce la profundidad. El grafito también es mejorado con este inoculante, dis

minuyendo por lo tanto la cantidad de ferrita en la matriz.

Mientras el cobre acompañado de Fe-Si, la profundidad de temple en cuanto a su reducción es bajo, o sea no lo disminuye eficientemente, la resistencia a la tracción y dureza aumenta pero no lo suficiente. El grafito es adecuado, cuando se usa en porcentajes como (0.500/0.125,... 0.250%), esto se refiere a Cu/Fe-Si.

Para el resto, el resultado es diferente, dependiendo de la cantidad del inoculante a utilizar y del carbono equivalente, así como de las condiciones de trabajo. (ver tabla IV).

Comparando ambos inoculantes (I-25/Cu) y (Cu/Fe-Si) ó (Cu/I-25) y (Fe-Si/Cu), el que mejor dió resultados es el que contiene I-25, debido al fuerte poder de inoculación que tiene este inoculante I-25.

Ensayos efectuados con Cu/Fe-Mn, demostraron que mejoraba la resistencia a la tracción, dureza y la distribución de grafito, pero no mejora la profundidad de temple. El porcentaje utilizado de Cu/Fe-Mn, fué de 0.250/0.063%.

#### 7.2.4.- Bismuto.

La influencia del bismuto sobre las propiedades mecánicas del hierro fundido están relacionados a los cambios de la estructura que ocurren en la muestra.

Los ensayos efectuados con bismuto, se hizo acompañado de los inoculantes I-25 y cobre, debido a que el bismuto es un estabilizador de la perlita.

Los ensayos que se efectuarón con bismuto, se hizo en combinación con I-25 y cobre y su composición fué Bi/I-25/Cu : 0.100/0.350/0.625% ; los resultados obtenidos con este porcentaje fué de que la dureza se incrementaba, la resistencia a la tracción aumentaba, pero en cuanto a la profundidad de temple ocurría lo contrario, es decir no lo disminuía, sino que lo aumentaba el chill. En cuanto a la distribución del grafito (tipo y tamaño), aparecía el tipo D y E , esto permitía a que el porcentaje de ferrita se incrementara.

En vista de los resultados obtenidos con el bismuto a 0.100% , se hicieron nuevos ensayos, con un porcentaje de 0.005% de Bi , los resultados que se obtuvieron mejoraron, tanto para la profundidad de temple , como para la distribución del grafito , disminuyendo el grafito tipo D y E, y el contenido de ferrita. Asimismo la resistencia a la tracción y dureza eran mejorados. (ver tablas).

El uso de bismuto, requiere de mucho cuidado dependiendo del carbono equivalente y de las condiciones del hierro fundido base; para obtener resultados que satisfagan las propiedades ensayadas, la adición de bismuto deberá estar comprendido entre 100 ppm a 500 ppm y el carbono equivalente entre 3.7 - 4.2 .

Cuando el bismuto es utilizado en exceso, se produce la aparición de tipo D y E , la resistencia a la tracción disminuye y su dureza se incrementa; el contenido de ferrita en la matriz aumenta.

Para futuros trabajos de investigación, las pruebas que se realicen deberá estar comprendido de bismuto



bismuto entre 100 ppm a 500 ppm y el carbono equivalente este comprendido entre 3.7 - 4.2% , así mismo se podría utilizar como inoculantes acompañantes el inoculín - 25 y el cobre. El uso de I-25/Cu , con porcentajes de 0.350/0.625% , presenta mejores posibilidades de mejorar las propiedades, acompañando al bismuto.

En general con los resultados obtenidos en este trabajo experimental, tanto para la profundidad de temple, resistencia a la tracción, dureza, distribución del grafito y el contenido de ferrita que pueda estar presente, existe un factor primordial el cual viene a ser el carbono equivalente, cuyo análisis se hizo viendo los diferentes C.E. usados para cada inoculante.

#### 8.- Aplicación de algunos de los inoculantes en las piezas fundidas de hierro gris.

Luego de las pruebas experimentales efectuadas, se aplicarán los inoculantes que mejor respondieron a los ensayos efectuados a las piezas fundidas de hierro fundido gris.

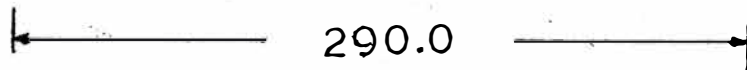
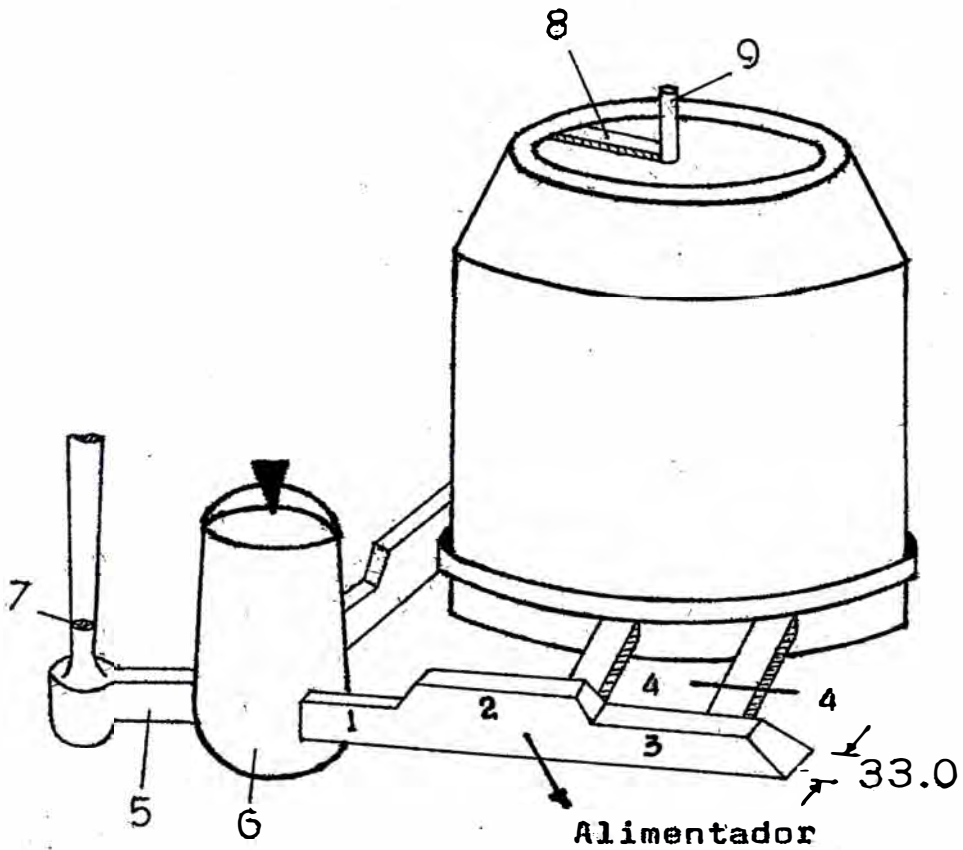
Mayormente la aplicación de estos inoculantes fue para piezas como tambores de freno, discos de freno, volantes, etc.

A continuación daremos dos ejemplos, de los inoculantes que se han empleado a las piezas fundidas de hierro gris:

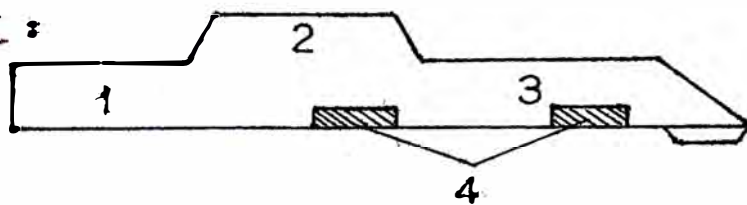
a.- Aplicación del inoculante (Cu/Fe-Si/Fe-Cr), con una composición de adición de (0.875/0.300/0.500), a tambores de freno. El tambor tiene un peso entre 60 a 65 Kg.

SISTEMA DE COLADA PARA EL TAMBOR DE FRENO

POSTERIOR



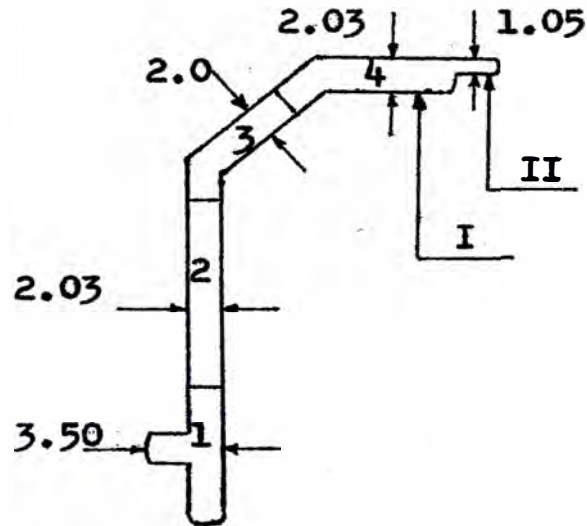
ALIMENTADOR :



DIMENSIONES (mm)								
23x21	25x40	28x22	35x7.5	23x43.5	70x150	36	24x6	24
1(axh)	2(axh)	3(axh)	4(axh)	5(axh)	6(Øxh)	7Ø	8(axh)	9 Ø

Fig. 12

En la figura 12 , se presenta el sistema de cola da para el tambor de freno posterior. Su sección transversal sin mecanizar es la siguiente: las medidas se dan en cms.



El carbono equivalente que se empleó fue de 3.91, el resultado en cuanto a sus propiedades se muestran a continuación:

- Profundidad de temple:

Sin inocular : 5.0 mm.

Inoculado : 3.2 mm.

- Dureza (HB) :

1.- 217

2.- 212

3.- 212

4.- 212

- Grafito : Tipo Tamaño

1.- A 4 > 5

E < 1%

2.- A 4 > 5

B < 1%

3.- A 4 > 5

B < 1%

4.-

I.- A 4 y 5

II.- D y E 4 y 5

- Ferrita :

1.- 3 - 4%

2.- 4 - 5%

3.- 3 - 4%

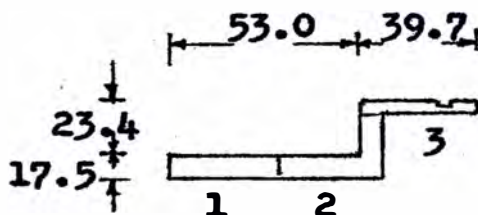
4.- 6 - 7%

- Resistencia a la tracción : 31.98 Kg/cm<sup>2</sup>.

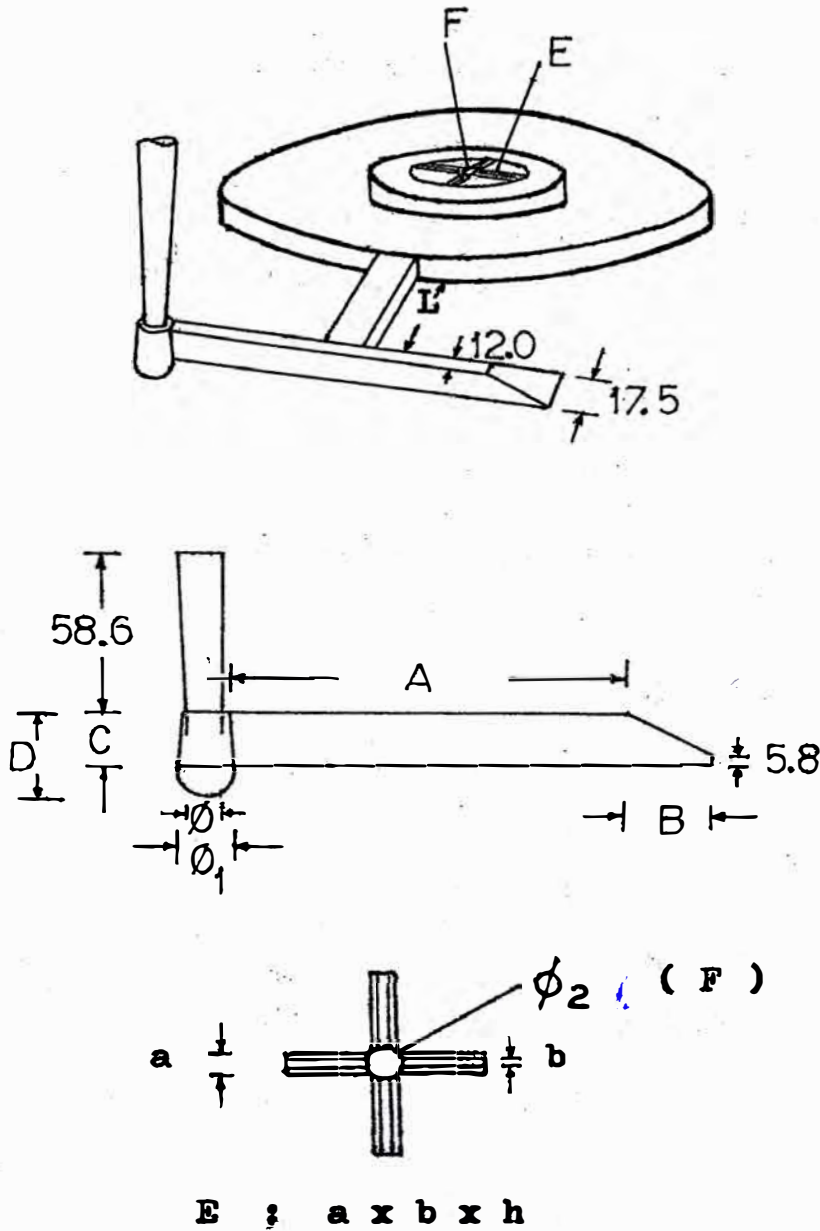
Para la resistencia a la tracción, se emplearán barras cuyo material es la misma con la que se fundió la pieza.

b.- Aplicación del inoculante (I-25/Fe-Cr/Cu), con una composición de (0.300/0.500/0.625%), a discos de freno. El disco de freno tiene un peso de 5.6 Kg. aproximadamente.

En la figura 13 , se presenta el sistema de colada para el disco de freno. Su sección transversal es la siguiente: medición en milímetros.



SISTEMA DE COLADA PARA EL DISCO DE FRENO



DIMENSIONES (mm)								
A	B	C	D	a x b x h	$\phi_2$	$\phi$	$\phi_1$	L
141.5	90	29.6	42	3x2x4	17.4	34.4	38.3	37.6

Fig. 13

El carbono equivalente que se empleó fue de 3.72 ,  
el resultado en cuanto a sus propiedades se muestran a conti  
nuación:

- Profundidad de temple:

Sin inocular : 5.0 mm.

Inoculado : 3.0 mm.

- Dureza (HB) :

1.- 212

2.- 217

3.- 212

- Grafito : Tipo Tamaño

1.- A 4 > 5

2.- B y E < 1%

2.- A 4 > 5

B < 2%

3.- A 4 y 5

B y E < 1%

D aislado.

- Ferrita :

1.- 3 - 4%

2.- 4 - 5%

3.- 6 - 7%

- Resistencia a la tracción : 28.53 Kg/mm<sup>2</sup>.

Para la resistencia a la tracción, se emplearán ba  
rras cuyo material es la misma con la que se fundió la pieza.

Los efectos de la inoculación del Cu/Fe-Si/Fe-Cr, 0.875/0.300/0.500 , con respecto a la distribución adecuada del grafito (Sin ataque) y % de ferrita mínimo, del tambor de freno posterior pueden ser observadas, a través de las fotografías que se muestran en las figuras 14 .

Los resultados con respecto a la dureza, Rt , profundidad de temple , grafito y % de ferrita mínimo se pueden ver en la página 183 - 184 .

La fotografía 15 a y b , muestran la microestructura de un hierro gris, que ha sido inoculado con cobre (Cu) , con un porcentaje de 0.375 % . Los resultados son :

Carbono Equivalente     : 3.78 %

Profundidad de temple :

    Sin inocular     : 4.6 mm.

    Inoculado       : 3.2 mm.

Resistencia a la tracción :: 23.88 Kg/mm<sup>2</sup> .

Dureza                   : 197 HB .

Grafito                   : A - 4

Ferrita                   : 9 % .

La fotografía 16 a y b , muestran la microestructura de un hierro gris, que ha sido inoculado con I-25 , con un porcentaje de 0.200 % . Los resultados son :

Carbono Equivalente     : 3.63 %

Profundidad de temple :

    Sin inocular     : 4.4 mm.

    Inoculado       : 2.8 mm.



Resistencia a la tracción : 27.53 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 207 HB.  
Grafito :: A - 4  
Ferrita : 4 % .

La fotografía 17 a y b , muestran la microestructu  
ra de un hierro gris, que ha sido inoculado con Cu/Fe-Si ,  
con un porcentaje de 0.500/0.250 . Los resultados son :

Carbono Equivalente : 3.94 %  
Profundidad de temple :  
Sin inocular : 4.0 mm.  
Inoculado : 2.8 mm.  
Resistencia a la tracción : 24.68 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 207 HB.  
Grafito : A - 4  
Ferrita :: 5 % .

La fotografía 18 a y b , muestran la microestructu  
ra de un hierro gris, que ha sido inoculado con I-25/Cu , con  
un porcentaje de 0.350/0.625 . Los resultados son :

Carbono Equivalente : 3.74 %  
Profundidad de temple :  
Sin inocular : 7.3 mm.  
Inoculado : 3.3 mm.  
Resistencia a la tracción : 30.26 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 212 HB.  
Grafito : A - 4 , 5  
Ferrita : 3 % .

La fotografía 19 a y b , muestran la microestructura de un hierro gris, que ha sido inoculado con I-25/Fe-Cr/Cu con un porcentaje de 0.200/0.500/0.625 . Los resultados son:

Carbono Equivalente :: 3.75 %  
Profundidad de temple :  
    Sin inocular : 5.2 mm.  
    Inoculado : 3.0 mm.  
Resistencia a la tracción : 27.86 Kg/mm<sup>2</sup>  
Dureza : 217 HB.  
Grafito : A - 4 y 5  
Ferrita : 5 % .

La fotografía 20 a y b , muestran la microestructura de un hierro gris, que ha sido inoculado con I-25/Cu , con un porcentaje de 0.200/0.625 . Los resultados son:

Carbono Equivalente : 3.78 %  
Profundidad de temple :  
    Sin inocular : 6.9 mm.  
    Inoculado : 3.1 mm.  
Resistencia a la tracción : 25.74 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 207 HB .  
Grafito : A - 4 y 5  
Ferrita : 4 % .

La fotografía 21 a y b , muestran la microestructura de un hierro gris, que ha sido inoculado con Bi/I-25/Cu , con una composición de 0.005/0.350/0.750 . Los resultados son:

Carbono Equivalente : 3.73 %

Profundidad de temple :  
Sin inocular : 6.4 mm.  
Inoculado : 2.9 mm.  
Resistencia a la tracción : 30.56 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 229 HB.  
Grafito : A - 4 y 5  
D < 6 % , E < 2 % .  
Ferrita : 8 %

Con respecto a las muestras que no han sido inocu-  
ladas, se muestran en las siguientes figuras :

- Figura 22 a y b , muestran la microestructura  
de un hierro gris sin inocular.

Carbono Equivalente : 3.70 %  
Resistencia a la tracción : 21.47 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 187 HB.  
Grafito : A - 4  
D < 2 %  
Ferrita :: 8 %

- Figura 23 a y b , muestran la microestructura  
de un hierro gris sin inocular.

Carbono Equivalente :: 3.63 %  
Resistencia a la tracción : 21.98 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 187 HB.  
Grafito : A - 4 y 5  
Ferrita : 9 %

- Figura 24 a y b, muestran la microestructura de un hierro gris sin inocular.

Carbono Equivalente : 3.99 %  
Resistencia a la tracción : 19.76 Kg/mm<sup>2</sup> .  
Dureza : 187 HB.  
Grafito : A - 4 y 5  
Ferrita : 10 % .

Todos los resultados mencionados con sus respectivas fotografías, han sido dados , tanto con el empleo de inoculantes como tambien, sin emplear dichos inoculantes. Además todos estos resultados se muestran en las tablas (Anexo).

El reactivo químico que se empleó fué el Nital 2% , con el fin de atacar la muestra.

El aumento que se empleó del microscopio fuerón :

Sin atacar la muestra : X 100 .  
Atacada la muestra : X 500 .

En el Anexo se encuentran las fotografías, que corresponden a las siguientes figuras :

Fig. 14	Tambor de freno.
Fig. 15 a 21	Muestras de ensayo ( inoculadas )
Fig. 22 a 24	Muestras de ensayo ( sin inocular ).

La micrografia de las figuras que se muestran en el anexo ponen en evidencia la presencia de lamelas de grafito sobre un fondo de perlita o matriz perlítica. Se constata que la perlita tiene una estructura lamelar compuesta de lamelas alternadas de ferrita y cementita.

Con respecto a las micrografias referidos al tambor de freno, la perlita que presenta la microestructura es un poco variado, notándose la presencia de lamelas gruesas en la parte 3 y 4. Respecto a la parte 4, se tiene en esta sección diferentes espesores y la microestructura es tambien diferente, notándose que en la sección delgada tiende a formarse grafito del tipo D y E, y la matriz presenta lamelas gruesas de perlita con un poco de ferrita, el cual va junto a las láminas de grafito.

Las micrografias que representan a los ensayos que han sido inoculados (Fig. 15 a 21), muestran a la perlita en su mayor parte de lamelas delgadas y un poco de lamelas gruesas, así como tambien se aparece algo de ferrita.

Las micrografias que representan a los ensayos que no han sido inoculados, muestran en su mayor parte ferrita y en menor proporción perlita. (Fig. 22 a 24).

Cabe señalar con respecto a las tablas IV y VII, los resultados se refieren al contenido mínimo que contiene de ferrita la matriz, debido a que la matriz es en su gran parte perlítico (de lamelas gruesas en pequeña cantidad).

De acuerdo a los resultados obtenidos en ambas piezas fundidas de diferentes espesores, es bueno.

Con respecto a los graficos y tablas, se verán en el Anexo. Dichos gráficos se refieren a los resultados obtenidos en la parte experimental, así mismo las curvas o rectas han sido trazados sobre los puntos hallados en el proceso experimental.

### I.- BREVES DATOS ECONOMICOS.

El costo de las piezas de fundición involucra la suma de varios factores como son, el costo de metal fundido, el moldeo y tratamientos posteriores.

Dichos costos, en cuanto a la pieza de fundición acabado, no se verá en este caso; debido a que el presente trabajo se centralizó mayormente en el uso de inoculantes. Dichos inoculantes al ser usados en las piezas fundidas no alterarán en el costo de la pieza fundida acabado, por que la cantidad de adición a utilizarse del inoculante (o inoculantes), es pequeño.

A continuación daremos el costo de cada uno de ellos:

<u>Inoculante</u>	<u>Precio I/Kg</u>	<u>(£)</u>
Fe-Si	18.85	
Fe-Cr	45.00	
Fe-Mn	17.00	

<u>Inoculante</u>	<u>Precio I/Kg (£)</u>
Cobre (1)	23.00
Inoculín - 25	165.30
Bismuto (2)	96.07

(£) Se refiere al mes de Mayo - Junio de 1987 .

(1) Chatarra de cobre.

(2) Bismuto refinado.

A manera de ejemplo, tomando como referencia, la aplicación del inoculante (Cu/Fe-Si/Fe-Cr), con una composición de adición de (0.875/0.300/0.500), veremos el costo del inoculante que se hizo a un tambor de freno posterior.

- Peso del tambor de freno posterior : 60 - 65 Kg.

- Contenido de metal líquido en la  
cuchara. : 400 Kg.

De este contenido se obtienen 4 tambores.

$$\text{Cu} : 0.875 \times \frac{400 \text{ Kg.}}{100} = 3.5 \text{ Kg.}$$

$$3.5 \text{ Kg.} \times 23.0 \text{ I/Kg.} = \text{I/ } 80.5$$

Para un tambor de freno :

$$\frac{\text{I/ } 80.5}{4} = \text{I/ } 20.12$$

$$\text{Fe - Si} : 0.300 \times \frac{400 \text{ Kg.}}{100} = 1.2 \text{ Kg.}$$

$$1.2 \text{ Kg.} \times 18.85 \text{ I/Kg.} = \text{I/ } 22.625$$

Para un tambor de freno :

$$\frac{\text{I/ } 22.625}{4} = \text{I/ } 5.66$$

$$\text{Fe - Cr} : 0.500 \times \frac{400 \text{ Kg.}}{100} = 2.0 \text{ Kg.}$$

$$2.0 \text{ Kg.} \times 45.0 \text{ I/Kg.} = \text{I/ } 90.0$$

Para un tambor de freno :

$$\frac{\text{I/ } 90.0}{4} = \text{I/ } 22.50$$

**El costo, del inoculante que se ha añadido a un tambor de freno es :**

$$\text{Total : I/ } 48.28$$



CAPITULO IV

C O N C L U S I O N E S

1.- En este trabajo, hemos pretendido revisar sobre la preparación de las arenas, tipo de horno que se ha usado, fusión, etc., lo cual nos ha llevado a las siguientes conclusiones:

1.1.- Se debe buscar un diseño adecuado de la chimenea, la cual permita aprovechar el mayor porcentaje de la energía (en forma de calor), con el fin de disminuir el consumo de petróleo.

Con esta energía se puede aprovechar para calentar las cucharas de colada. La chimenea con que se cuenta actualmente es deficiente.

1.2.- Se debe hacer un estudio sobre el comportamiento de las arenas, de aglutinantes y contenido de humedad, para encontrar un rango de adición adecuado de cada uno, así como el tiempo necesario de mezclado.

Esto estará de acuerdo a los ensayos de arena a analizar como compactabilidad, resistencia a la compresión, fluidez y permeabilidad, las cuales son los ensayos que se realizan en la planta de fundición.

En cuanto al moldeo que se realiza, el ataque al molde debe ser uniforme para que la arena se distribuya en toda la caja de moldeo y se evite así partes blandas.

El control de las propiedades de las arenas de moldeo es muy importante para la obtención de moldes de buena calidad, por que se eliminará los defectos que podría surgir

debido a la arena de moldeo.

1.3.- En cuanto a la parte de fundición, las cucharas en la cual se van a llenar de metal líquido, se deben calentar previamente hasta que estee al rojo, esto es con el fin de mantener la temperatura del metal líquido y no disminuya muy rápidamente su temperatura hasta el lugar donde se realice la colada a los moldes.

Así mismo las cucharas que vuelvan a ser cargadas con metal líquido deben estar vacíos, o sea si en caso queda un poco, este debe ser lingoteado debido a que dicho metal líquido está frío.

La temperatura de vaciado a los moldes debe seleccionarse de acuerdo al espesor de la pieza para evitar defectos que puedan surgir en ella.

Si un metal se vacía a una temperatura excesivamente alta, la arena en el sistema de alimentación y en las paredes del molde serán atacados muy severamente. Esto puede producir una superficie áspera sobre la pieza y un atrapamiento de los productos de reacción, sólidos, líquidos y gases, en la pieza.

Si un metal se vacía a una temperatura demasiado baja, este comenzará a solidificar en el sistema de alimentación y el molde no podrá llenarse. También se tendrá fallas mecánicas causadas por una unión incompleta entre dos diferentes chorros de metal líquido que fluyen dentro de la cavidad del molde.

2.- El trabajo experimental que se efectuó, no fué posible realizarlo a nivel de laboratorio, debido a que esta fundición no cuenta con los equipos necesarios. Realizandose este trabajo experimental con el uso del horno rotatorio, la cual lo utilizan para fundir y despues por medio de cucharas colar los moldes, donde se obtienen las piezas que producen.

3.- Las experiencias realizadas sobre el efecto de los inoculantes en cada una de las características se dan a continuación:

3.1.- El inoculante más efectivo en la reducción de la profundidad de temple fue:

- I-25/Cu.

Los menos efectivos fuerón:

- Cu.

- Cu/Fe-Si.

- Fe-Si/Cu.

3.2.- Los inoculantes que mejor actuarón sobre la resistencia a la tracción fuerón:

- I-25/Fe-Cr/Cu.

- I-25/Cu.

- Fe-Cr/Fe-Si/Cu.

Los menos efectivos fuerón:

- Cu.

- Cu/Fe-Si.

- Fe-Si/Cu.

3.3.- En cuanto a la dureza, los inoculantes más efectivos fuerón:

- Bi/I-25/Cu.
- I-25/Fe-Cr/Cu.

El menos efectivo fue:

- Cu.

3.4.- Los inoculantes que mostrarón efectividad en la distribución del grafite (tipo y tamaño) fuerón:

- I-25/Cu.
- I-25/Fe-Cr/Cu.

El menos efectivo fue:

- Bi/I-25/Cu.

3.5.- Los inoculantes que presentarón un comportamiento claramente perlitizante (con mayor contenido de perlita) fuerón:

- I-25/Cu.
- I-25/Fe-Cr/Cu.

El menos efectivo fué:

- Bi/I-25/Cu.

Generalizando, con estos resultados puedo concluir que inoculantes conteniendo I-25 , Cu y I-25 , Cu , Fe-Cr , actuarón con mayor efectividad en las diversas propiedades ensayadas, que los otros inoculantes.

Debo recalcar que la comparación entre uno u otro inoculante, se hizo con respecto a las propiedades ensayadas, más

no con respecto a la adición del inoculante, debido a que son diferentes, lo mismo sucede con el carbono equivalente.

4.- El uso del inoculín -25 (I-25), se hizo solamente con una adición de 0.200% , obteniéndose resultados favorables en todas las propiedades ensayadas. No se hizo para porcentajes mayores, debido a que este trabajo se centralizó mayormente en combinar 2 ó 3 inoculantes diferentes y evaluar sus resultados.

Aunque, para comprobar sobre la reducción de profundidad de temple se hizo ensayos de adición de 0.250% y 0.350% , obteniéndose resultados buenos, debido a que el chill se reduce notablemente.

El I-25 es un inoculante que contiene silicio en menor cantidad (65%), a comparación del Fe-Si 75% , el cual contiene 75% de silicio, con la diferencia que el I-25 contiene elementos residuales que no contiene el Fe-Si 75% ; dichos elementos residuales le dan efectividad al inoculante para que actúe eficientemente en el hierro fundido gris.

En conclusión el inoculín - 25 , tiene un fuerte poder de inoculación y es más efectivo que el Fe-Si 75% .

5.- El uso de bismuto como inoculante en combinación con el I-25/Cu , le da a este inoculante compuesto un fuerte poder de inoculación.

Para obtener resultados que satisfagan en la distribución del grafito (tipo y tamaño) y de obtener un contenido mínimo de ferrita , el uso de bismuto debe ser moderado.

El bismuto es un agente estabilizador de la perlita cuando es inoculado por inoculantes que contengan bismuto.

La adición de 0.005% de bismuto en combinación con el I-25/Cu, respondió mejor, que cuando la adición fue de 0.1% de bismuto, en las diferentes propiedades ensayadas.

Para futuros trabajos de investigación, teniendo en cuenta el carbono equivalente utilizado, la cantidad de bismuto a utilizar sea menor que 0.005%, considerando también los inoculantes que van acompañados como I-25/Cu.

6.- Es lógico pensar que los agentes inoculantes reaccionarán con las impurezas presentes con gran rapidez, ya que la disolución del elemento químico y la formación de un compuesto con carbono, nitrógeno, oxígeno o azufre, presentes en el líquido, son casi simultáneos. Por tanto, aquellos compuestos que sean más estables, más fácilmente actuarán como gérmenes. No obstante, hay otra condición que debe cumplirse, la coherencia cristalina entre el germen y la fase a solidificar. Aquellos gérmenes cuyo sistema cristalino presente simetría ternaria, sistema cúbico y hexagonal, y cuyos parámetros sean semejantes a los del grafito (sistema hexagonal y parámetro  $a = 2.463$  y  $c = 6.714 \text{ \AA}$ ), tendrán mayores posibilidades de nuclear la solidificación.

En la tabla A, aparecen los calores de formación, los puntos de fusión y los sistemas cristalinos de una serie de compuestos susceptibles de actuar como gérmenes de cristalización.

7.- Según algunos autores, justifican que el azufre es un elemento indispensable en la inoculación, ya que son los sulfu

ros de los metales alcalino térreos los gérmenes de grafitización. Ensayos efectuados por investigadores, utilizando como inoculantes como  $\text{CaMnSi}$ ,  $\text{CeMnSi}$  y  $\text{SiCa}$  en un hierro fundido gris; confirmaron después mediante el uso del análisis de dispersión de energía de los rayos X (EDAX), que en el núcleo existían tres tipos de composiciones, como sulfuros  $(\text{MnCa})\text{S}$ ,  $(\text{MnCe})\text{S}$  y  $\text{MnS}$ ; óxidos  $\text{X.SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y carburos  $\text{CaC}_2$ .

8.- La técnica de la inoculación que dió mejores resultados fué, cuando después de haberse adicionado una cierta cantidad de metal líquido en la cuchara, recién se procedía a ir añadiendo el inoculante junto con el metal líquido en la cuchara, hasta que la adición del inoculante termine antes de que se llene la cuchara.

9.- Los inoculantes que se aplicaron a las piezas fundidas, tales como  $(\text{Cu/Fe-Si/Fe-Cr})$  y  $(\text{I-25/Fe-Cr/Cu})$ , reflejan la efectividad que tienen en cada una de las características que se han analizado.

Tanto el tambor de freno, como el disco de freno, presentan en su microestructura, el grafito del tipo A y un contenido menor de ferrita, notándose en secciones más delgadas de las piezas la aparición del tipo D y E. La dureza y la resistencia a la tracción es mejorado, lo mismo sucede con la profundidad de temple.

10.- Es muy importante, para obtener la estructura deseada que nos garantice las propiedades mecánicas solicitadas, la velocidad de enfriamiento de la pieza fundida. Esto es obvio, ya que la segregación del grafito es fundamentalmente un

fenómeno de difusión y por tanto muy dependiente de la temperatura. De una misma composición, se puede obtener estructuras diferentes según sea el espesor de las paredes de la pieza, el material de moldeo, si la pieza se enfría en molde o se deforma inmediatamente después del vaciado, etc., es decir en resumen, se enfríe, rápida o lentamente.

Como ejemplo, se tiene el tambor de freno, donde en la sección de espesor más delgado, aparece el tipo D y E, mientras en secciones de espesor mayor el grafito es de tipo A.

11.- El uso de inoculantes, en los hierros fundidos grises ha dado oportunidad a obtener no sólo mejores propiedades, sino también de facilitar el proceso productivo.

La cantidad de inoculante a utilizarse, será también bajo, para lo cual el costo de la pieza fundida terminada no se alterará.

12.- La influencia beneficiosa de los inoculantes permiten que se obtengan en la microestructura un grafito del tipo A tamaño 4 y 5, y una matriz perlítica; reduciendo de este modo el contenido de ferrita que puede presentarse.

Cuando la matriz presenta una perlita fina, bien homogénea, la fundición presenta una dureza y características mecánicas remarcables.



**BIBLIOGRAFIA      CONSULTADA**

- 1.- Avaliacao de comportamento de alguns inoculantes para ferros fundidos cinzentos.**

**Luis Montenegro Chaves Filho, Adolar Pieske y Clovis Penteado de Castro.**

**Ed. Sociedad Educacional Tupy, 1975 , Brasil.**

- 2.- Mecanismo de la Inoculación de las fundiciones.**

**Jordi Tartera B.**

**Revista Colada, vol. 11 , núm. 12, 1978.**

- 3.- Solidificación de las fundiciones.**

**Jordi Tartera B.**

**Revista Colada, vol. 10 , núm. 3 , 1977.**

- 4.- More Powerful Inoculants for Gray Cast Iron.**

**Yang Jingxiang, Li Jianzhong, Li Rongde.**

**Presented at the 91 st AFS Casting Congress & CASTEXPO'87.**

**April 6 - 10 , 1987 .**

- 5.- Inoculated high duty grey cast iron. INFORME 52.**

**Issued by FOSECO (F.S.) LIMITED, TAMWORTH, STAFFS, ENGLAND.**

- 6.- Standard Specification for gray iron castings.**

**ASTM . Folleto publicado en Noviembre 1976 .**

**7.- An Introduction to the Solidification of metals.**

**W. C. Winegard.**

**University of Toronto, Toronto, Canadá.**

**8.- Defectos de las piezas de fundición. Tomo I.**

**Defectos debidos a la forma de solidificación de la aleación colada.**

**Le Breton, H.**

**9.- Ferroaleaciones y su mercado en América Latina.**

**ILAFSA, 1975. Santiago de Chile.**

**10.- Solidification Processing.**

**Merton C. Flemings.**

**11.- Atlas of microstructures of industrial alloys.**

**American Society for metals, Ohio, 1973.**

**Metals Handbook, vol. 7 .**

**12.- Estudio sobre las características, producción y propiedades de las fundiciones de hierro.**

**Cesar Augusto Samanez V.**

**Tesis de grado, 1976 .**

**13.- Metalurgia Física.**

**Bruce Chalmers.**

**Madrid, Aguilar, 1968 .**

**14.- I Seminario de fundición.**

**Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1979.**

**15.- Introducción a la Metalurgia Física.**

**Sidney Avner.**

**Segunda edición. Marzo 1980 - México.**

**16.- Tecnología de la fundición.**

**Eduardo Capello.**

**17.- Metalografía.**

**A. P. Guliaev.**

**Tomo I**

**Impreso en la URSS. 1978 , editorial MIR - Moscú .**

**18.- Fundiciones.**

**José Apraiz Barreiro.**

**19.- Metalurgia Física.**

**A. H. Cottrell.**

**20.- Fundamento de la práctica metalográfica.**

**George L. Kehl.**

**21.- Horno Rotativo para fundición de hierro gris.**

**Rosas D. Vidal Solis.**

**Tesis de grado, 1983 .**

**22.- El Horno de Cubilote y su operación.**

**American Foundrymen's Society, CECSA, México, Junio 1975.**

**23.- Manual de materiales para la fabricación de moldes de arena.**

**ITINTEC, PERU, Lima 1980 .**

**24.- Preparación de las arenas de moldes dentro del proceso de fundición.**

**Edgardo M. Crispin R.**

**Tesis de Bachiller.**

**25.- Fundición para Ingenieros.**

**Howard F. Taylor.**

**26.- Principles of metal casting.**

**Heine Loper Rosenthal**

**American Foundrymen's Society , Second Edition.**

**A N E X O**

TABLA I

VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CORRESPON-  
DIENTE A MUESTRAS SIN INOCULAR, PERTENECIENTE A LA  
RESISTENCIA A LA TRACCION, DUREZA, GRAFITO Y FERRITA.

C.E.	Resistencia a la tracción	Dureza	Grafito		Ferrita
%	Kg/mm <sup>2</sup>	HB	Tipo	Tamaño	%
3.53	22.92	197	A D < 6% ; E aisl.	4 y 5	12
3.63	21.98	187	A D < 5% ; E aisl.	4 y 5	9
3.70	21.47	187	A D < 2% ; B y E aisl.	4 > 5	8
3.77	21.00	192	A D < 4% ; E < 1%	4 > 5	9
3.96	20.30	187	A D < 3% ; E aisl.	4 > 5	8
3.99	19.76	187	A B y D aisl.	4 y 5	10
4.01	19.37	187	A D < 2% ; B aisl.	4 > 5	6
4.02	20.45	187	A B < 3% ; D < 1%	4 > 5	7

Continua.....

**Continuación :**

<b>C.E.</b>	<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>Dureza</b>	<b>Grafito</b>		<b>Ferrita</b>
<b>%</b>	<b>Kg/mm<sup>2</sup></b>	<b>HB</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamaño</b>	<b>%</b>
<b>4.07</b>	<b>18.98</b>	<b>187</b>	<b>A</b> <b>D &lt; 9% ; E aisl.</b>	<b>4 y 5</b>	<b>12</b>
<b>4.17</b>	<b>19.56</b>	<b>187</b>	<b>A</b> <b>D &lt; 5% ; B y E aisl.</b>	<b>4 y 5</b>	<b>8</b>



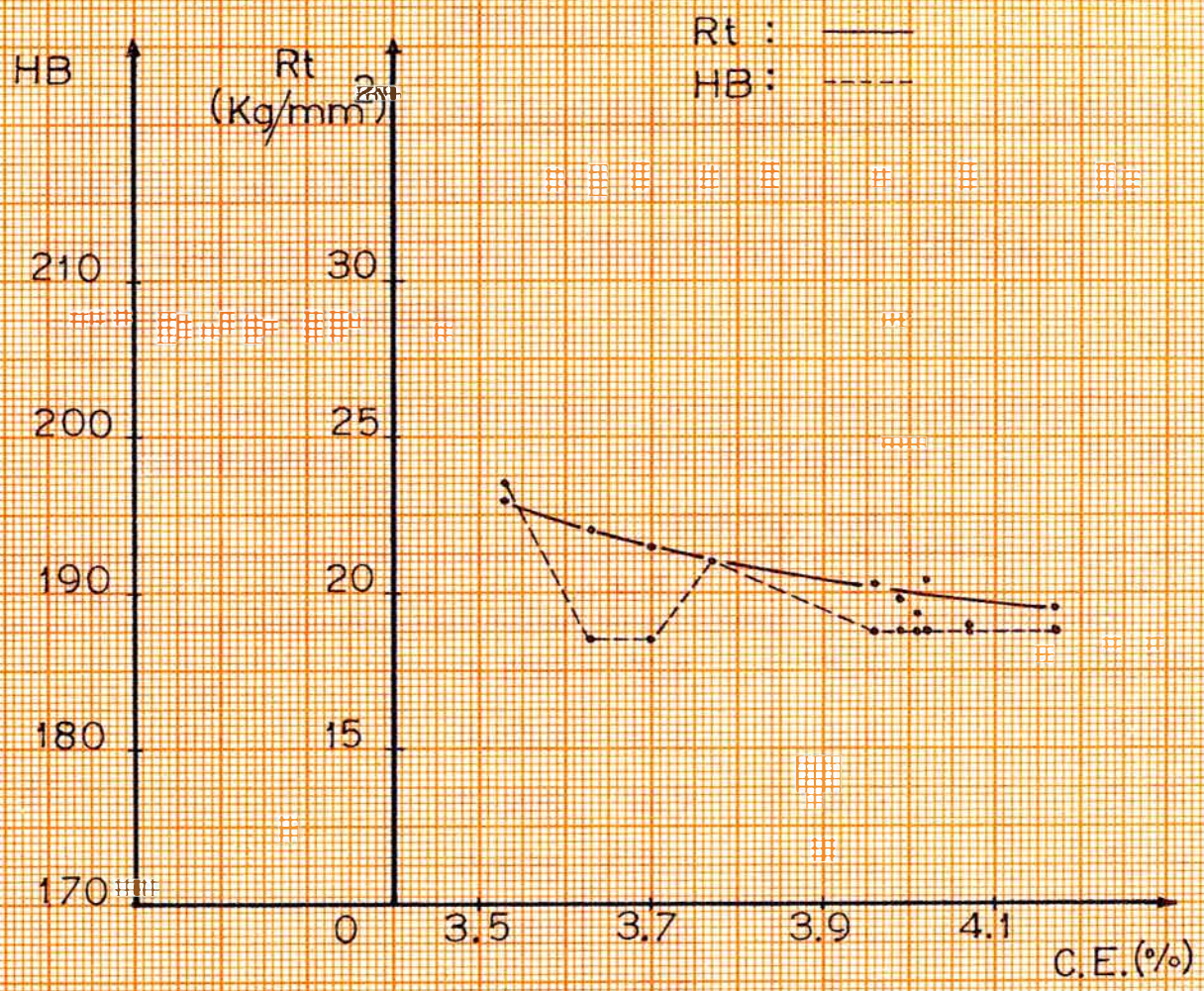


FIG. I



**TABLA II**

**VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CORRESPON-  
DIENTE A LA ADICION DE INOCULANTES EN EL HIERRO FUN -  
DIDO GRIS, RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE TEMPLE Y  
CARBONO EQUIVALENTE.**

INOCULANTE		PROFUNDIDAD DE TEMPLE (mm)		C. E.	
Tipo	%	S. I.	I.	%	
Cu (1)		0.250	3.8	3.0	3.80
		0.375	4.6	3.2	3.78
		0.500	6.5	6.3	3.76
		0.625	7.3	5.4	3.79
Fe-Si/Cu (2)	0.125 (2)	0.250	5.2	4.1	3.97
		0.400	4.8	4.0	4.01
		0.625	4.6	3.8	4.01
	0.250 (3)	0.375	5.6	4.1	3.63
		0.950	6.5	5.6	3.64
		1.500	4.7	2.7	3.67
I-25/Cu (4)	0.350	0.500	5.9	1.6	3.64
		0.625	6.3	2.2	3.66
		0.750	6.5	1.0	3.63
Cu/Fe-Si (5)	0.500	0.125	5.4	4.3	3.91
		0.150	4.9	3.9	3.90
		0.225	5.9	4.6	3.92
		0.250	4.0	2.8	3.94

Continuación :

INOCULANTE			PROFUNDIDAD DE TEMPLE (mm)		C.E.
Tipo	%		S.I.	I.	%
	0.750 (6)	0.300	6.1	4.2	3.63
		0.325	6.5	5.1	3.61
		0.375	5.6	3.8	3.63
Cu/I-25	0.625 (7)	0.200	6.9	3.1	3.78
		0.325	6.5	2.9	3.79
		0.350	6.8	2.0	3.79
		0.400	5.7	1.2	3.77
Fe-Cr/ Fe-Si/ Cu	0.500/0.250 (8)	0.500	6.7	4.0	3.79
		0.625	6.0	3.5	3.78
		0.750	6.8	3.7	3.79
		0.875	6.1	3.4	3.82
	0.500/0.300 (9)	0.500	6.0	3.9	3.90
		0.625	5.8	3.1	3.92
		0.750	6.1	3.8	3.94
		0.875	5.9	3.0	3.91
Cu/ Fe-Cr/ I-25	0.625/0.500 (10)	0.200	5.2	3.0	3.75
		0.250	7.5	4.9	3.73
		0.300	5.8	3.2	3.72
		0.350	6.0	2.8	3.73
		0.450	5.6	3.5	3.76

Continua.....

Continuación :

INOCULANTE			PROFUNDIDAD DE TEMPLE (mm)		C.E.
Tipo	%		S.I.	I.	%
Cu/ I-25/ Fe-Cr	0.750/0.300 (11)	0.400	4.8	2.8	3.97
		0.500	5.3	3.4	3.95
		0.700	7.5	3.2	3.92
		0.750	6.3	3.0	3.94
Bi/ I-25/ Cu	0.005/0.350 (12)	0.500	6.3	3.8	3.74
		0.625	6.8	3.1	3.76
		0.750	6.4	2.9	3.73



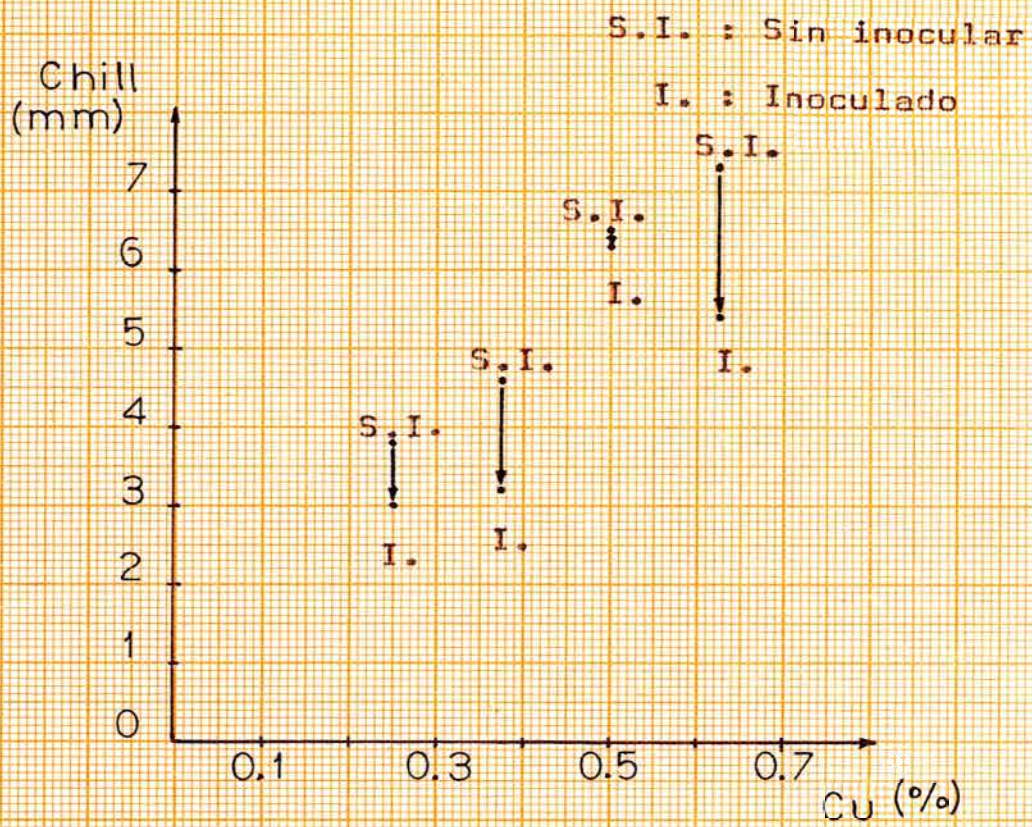


Fig. II-1



Fig. II-2



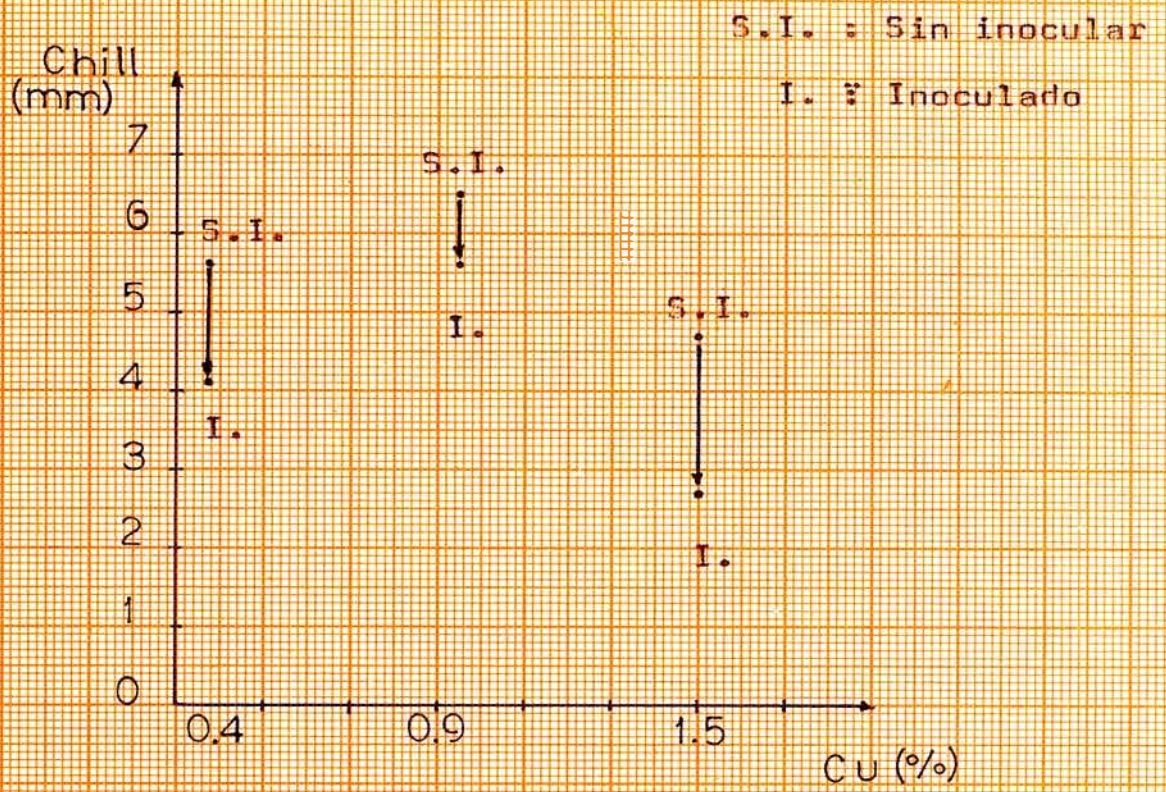


Fig II - 3

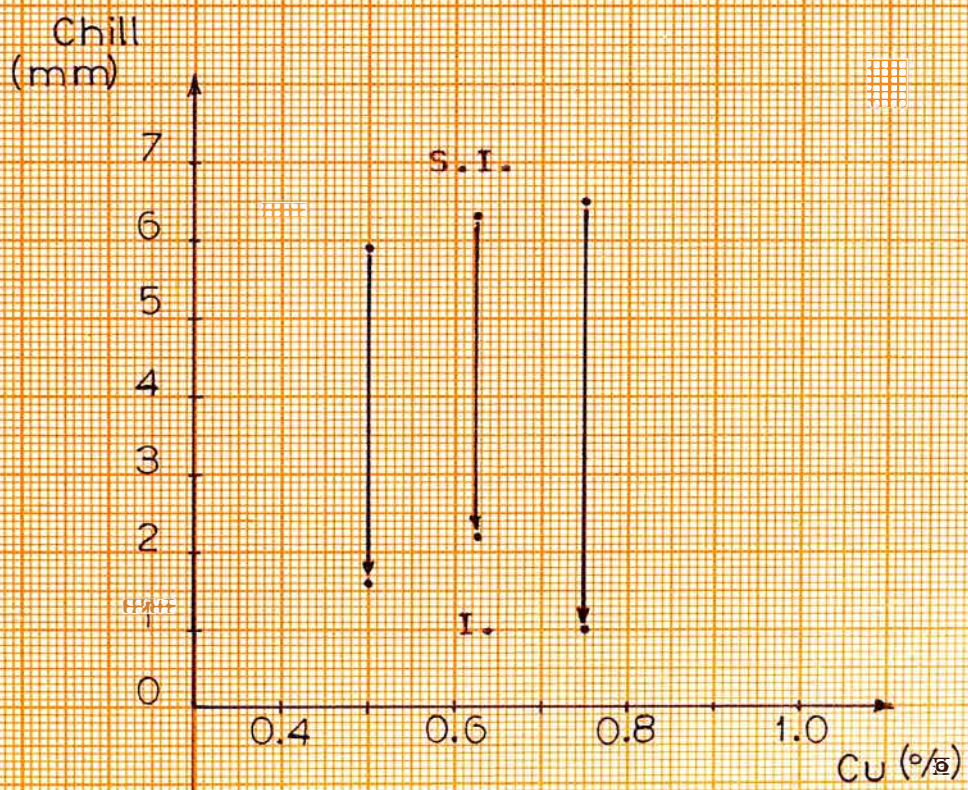


Fig II - 4



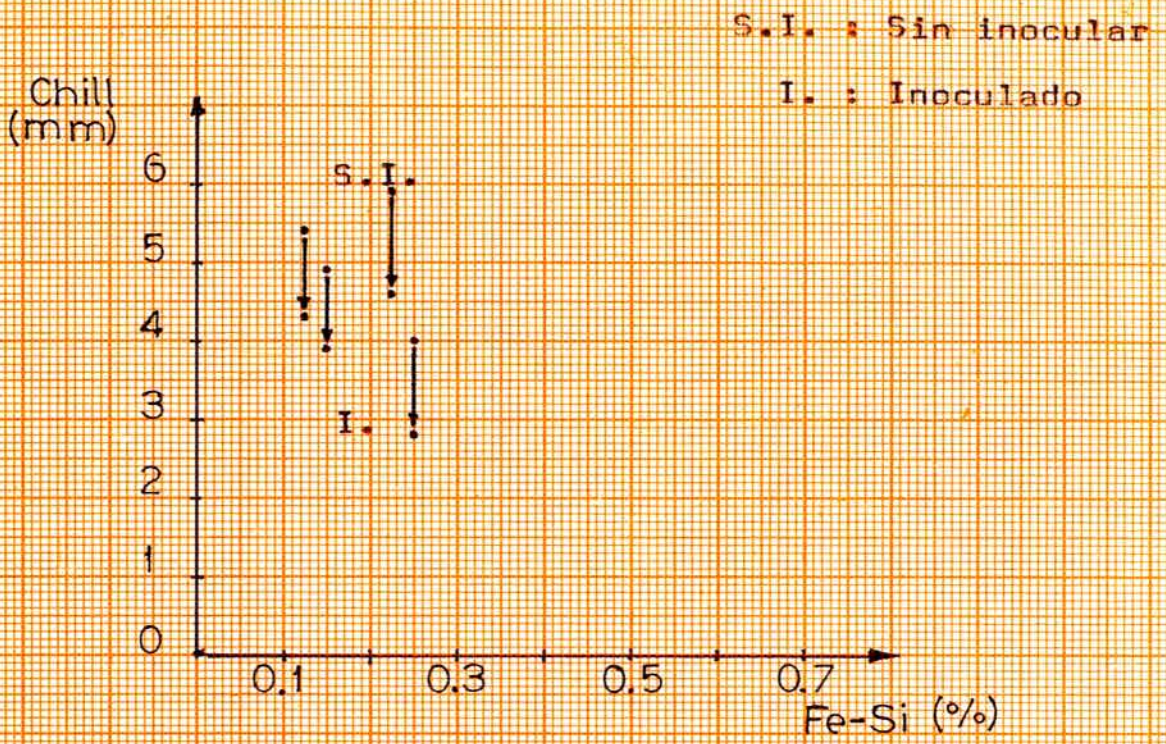


Fig II-5

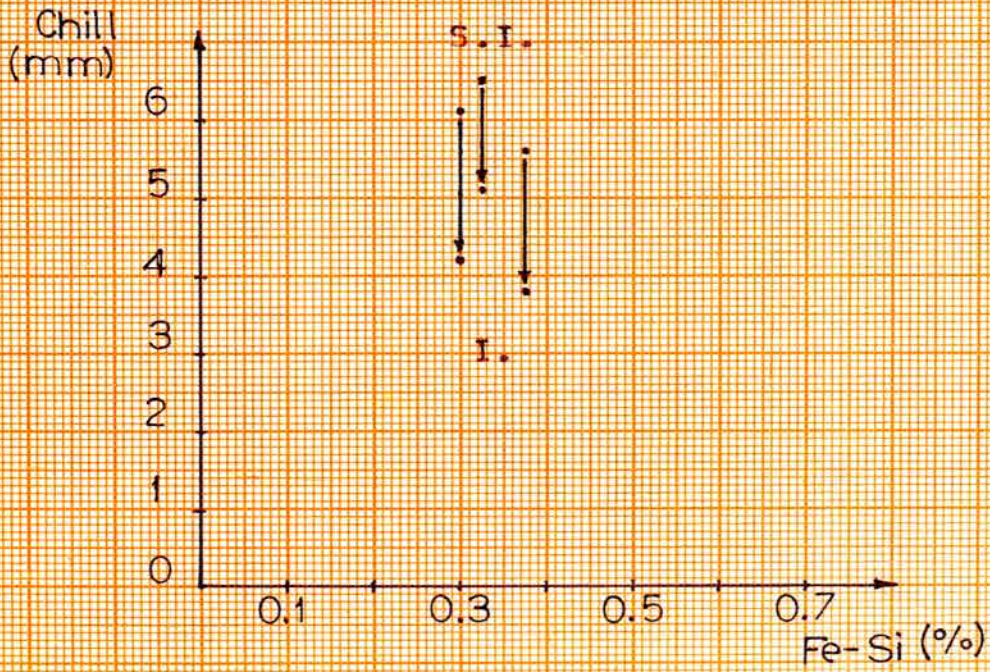


Fig II-6





Fig II - 7

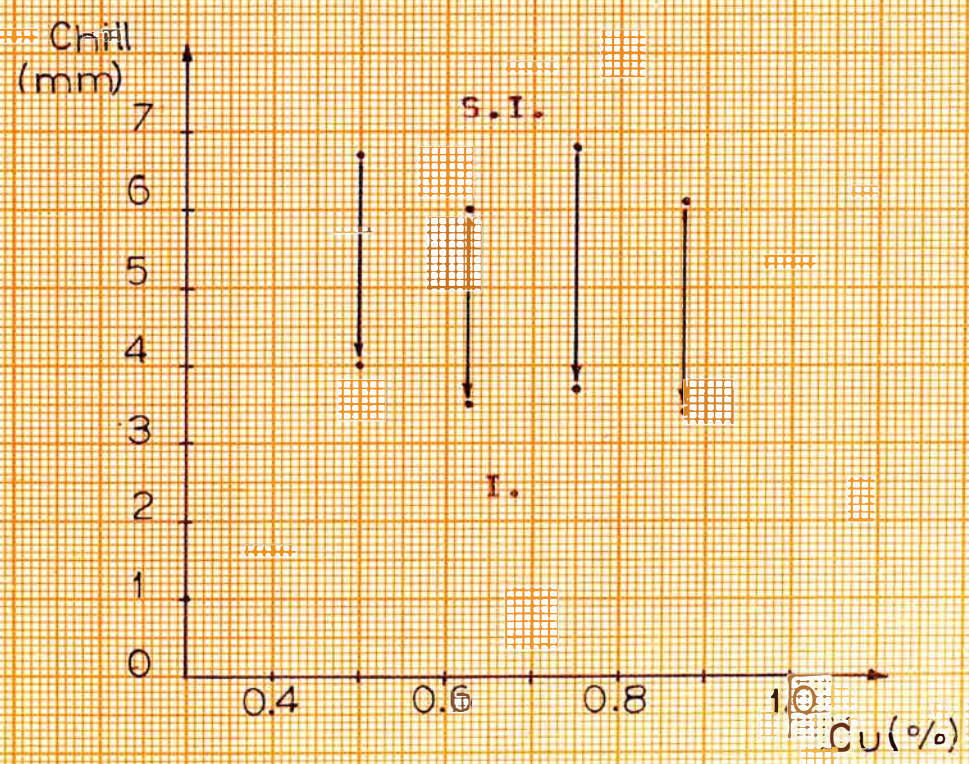


Fig II - 8



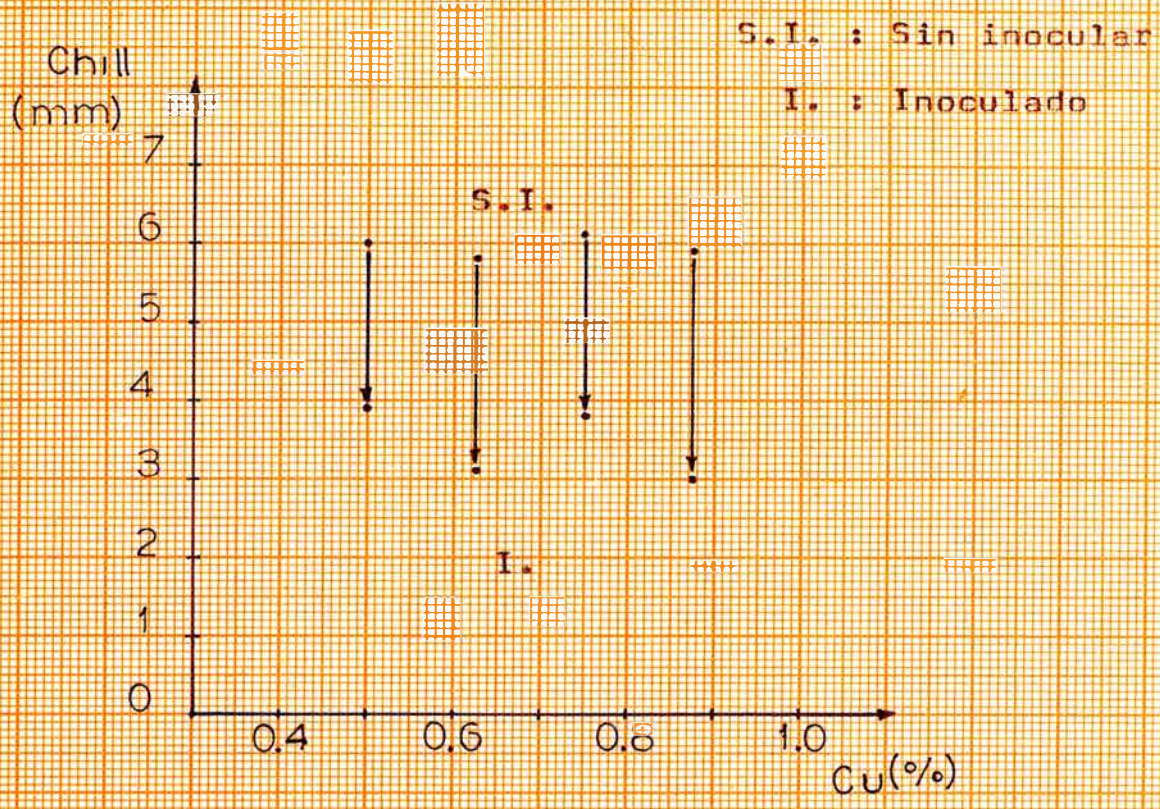


Fig II - 9

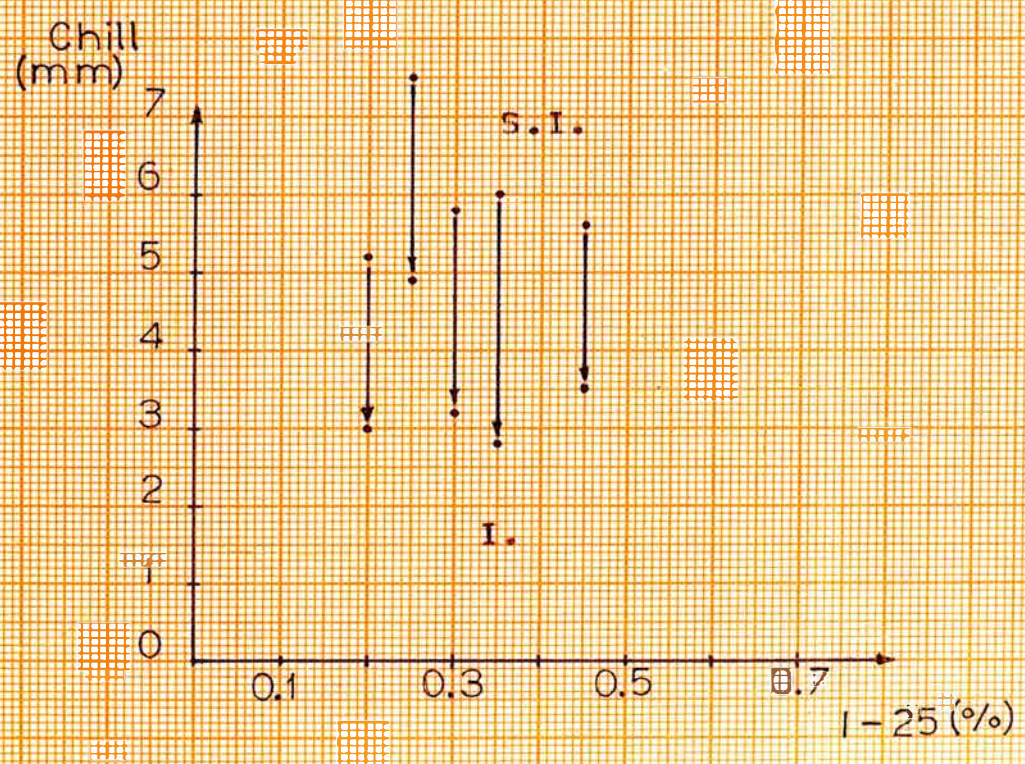


Fig II - 10



S.I. : Sin inocular

I. : Inoculado

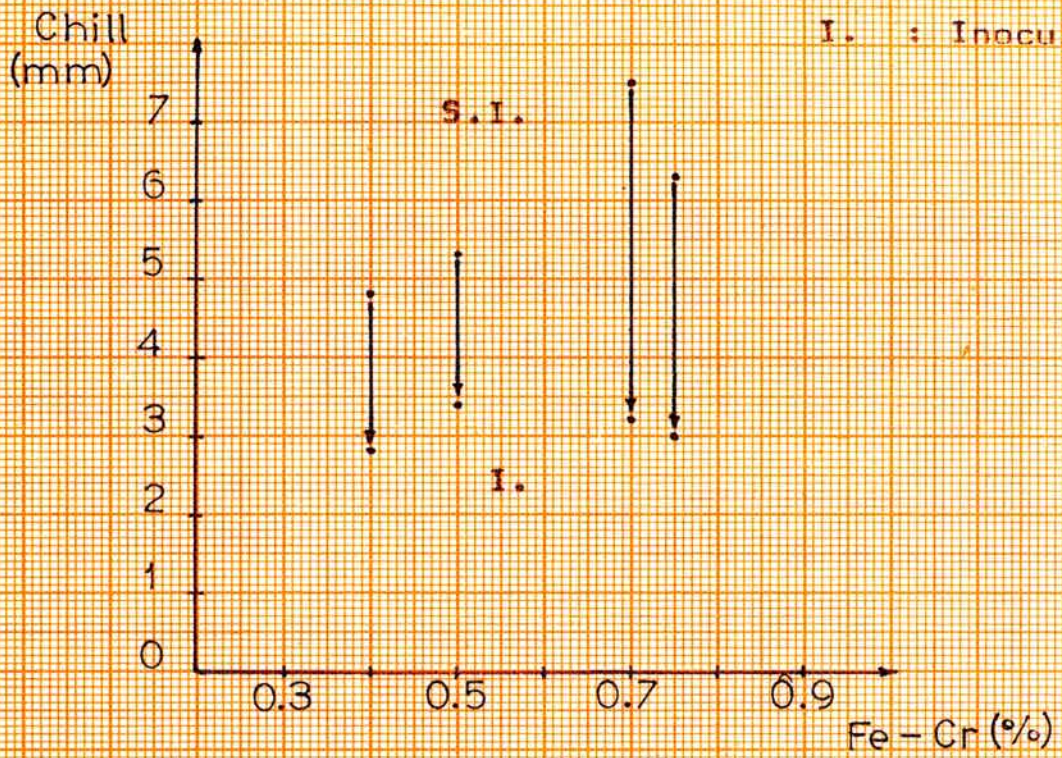


Fig II-11



Fig II-12



**TABLA III**

**VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CORRESPONDIENTE A LA ADICION DE INOCULANTES EN EL HIERRO FUNDIDO GRIS, RESPECTO A LA RESISTENCIA A LA TRACCION Y DUREZA.**

INOCULANTE		RESISTENCIA A LA TRACCION	DUREZA	
Tipo	%	Kg/mm <sup>2</sup>	HB	
Cu (1)		0.250	22.92	192
		0.375	23.88	197
		0.500	24.16	207
		0.625	24.76	207
Fe-Si/ Cu	0.125 (2)	0.250	23.43	212
		0.400	24.25	207
		0.625	24.97	207
	0.250 (3)	0.375	24.33	217
		0.950	25.68	223
		1.500	27.30	223
I-25/ Cu	0.350 (4)	0.500	30.12	217
		0.625	29.98	212
		0.750	30.85	223
Cu/ Fe-Si	0.500 (5)	0.125	22.94	212
		0.150	23.43	207
		0.225	24.47	207
		0.250	24.68	207

Continuación :

INOCULANTE		RESISTENCIA A LA TRACCION		DUREZA
Tipo	%		Kg/mm <sup>2</sup>	HB
	0.750 (6)	0.300	24.80	217
		0.325	25.48	217
		0.375	26.45	212
Cu/ I-25	0.625 (7)	0.200	25.74	207
		0.325	28.28	212
		0.350	29.47	207
		0.400	30.17	217
Fe-Cr/ Fe-Si/ Cu	0.500/0.250 (8)	0.500	26.52	207
		0.625	27.50	207
		0.750	30.97	217
		0.875	32.40	223
	0.500/0.300 (9)	0.500	25.30	207
		0.625	28.20	212
		0.750	29.48	217
		0.875	31.98	223
Cu/ Fe-Cr/ I-25	0.625/0.500 (10)	0.200	27.86	217
		0.250	28.36	217
		0.300	28.53	223
		0.350	29.05	223
		0.450	30.74	229

Continua.....

Continuación :

INOCULANTE		RESISTENCIA A LA TRACCION	DUREZA	
Tipo	%	Kg/mm <sup>2</sup>	HB	
Cu/I-25/ Fe-Cr	0.750/ 0.300 (11)	0.400	25.72	207
		0.500	26.44	217
		0.700	28.26	223
		0.750	29.13	223
Bi/I-25 Cu	0.005/ 0.350 (12)	0.500	26.99	223
		0.625	28.21	223
		0.750	30.56	229



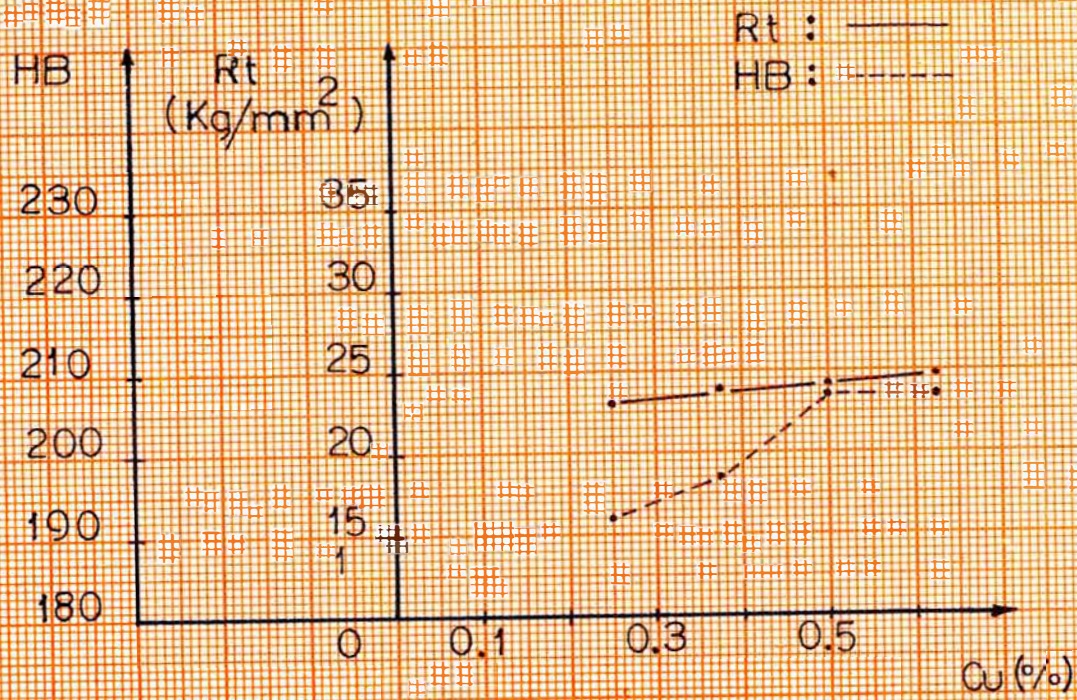


FIG III-1

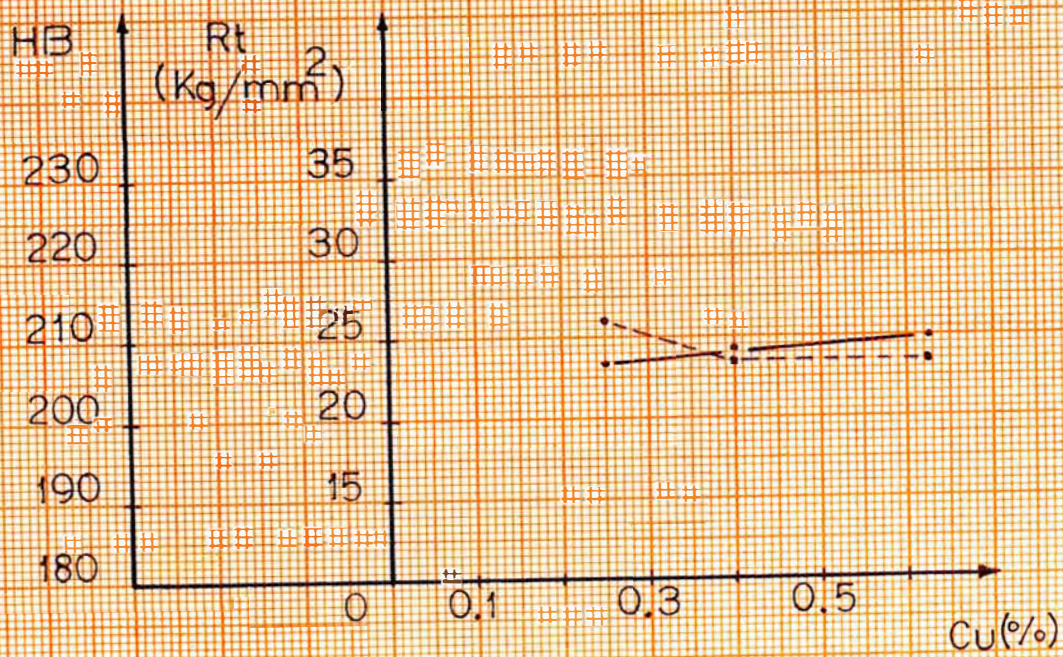


FIG III-2



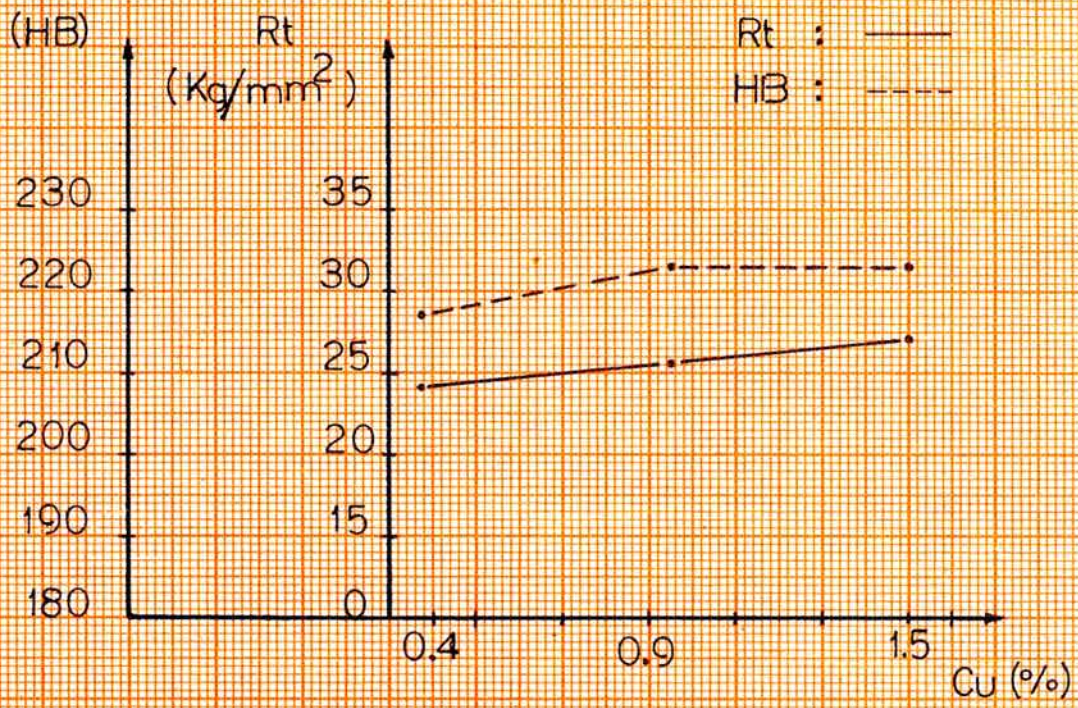


FIG III - 3

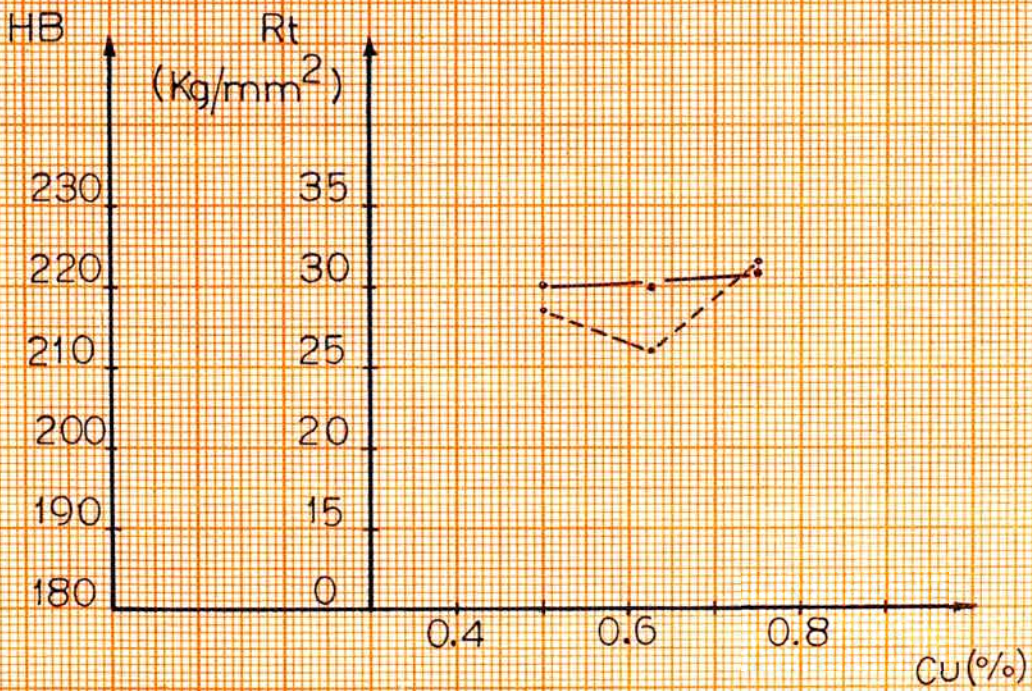


FIG III - 4



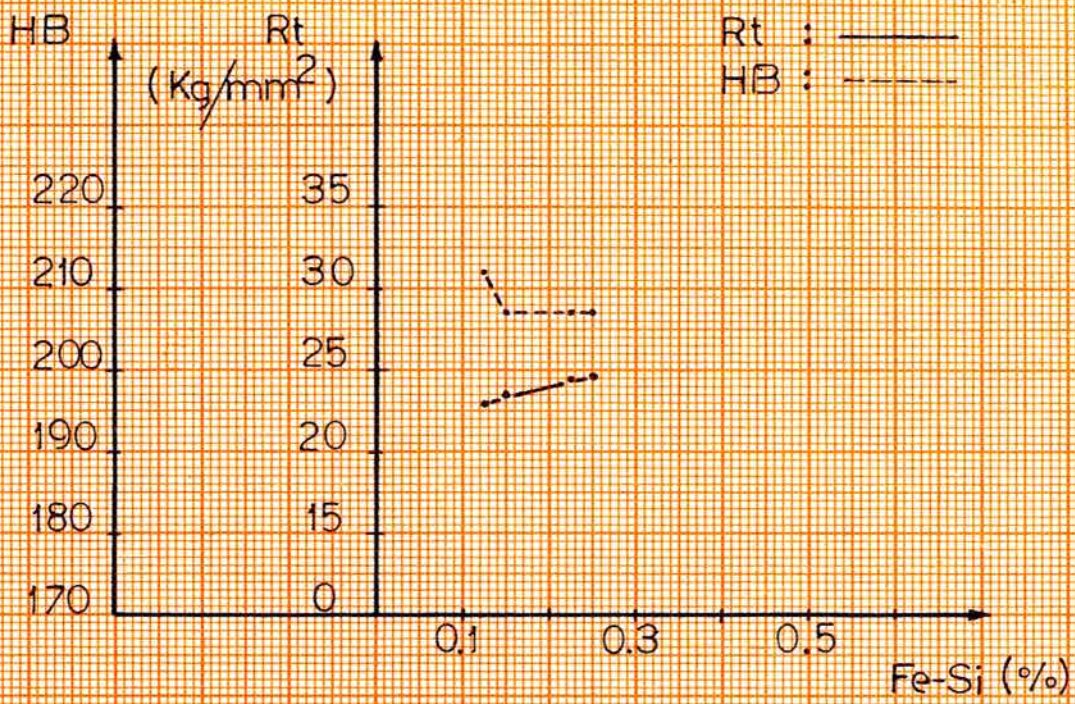


FIG III-5

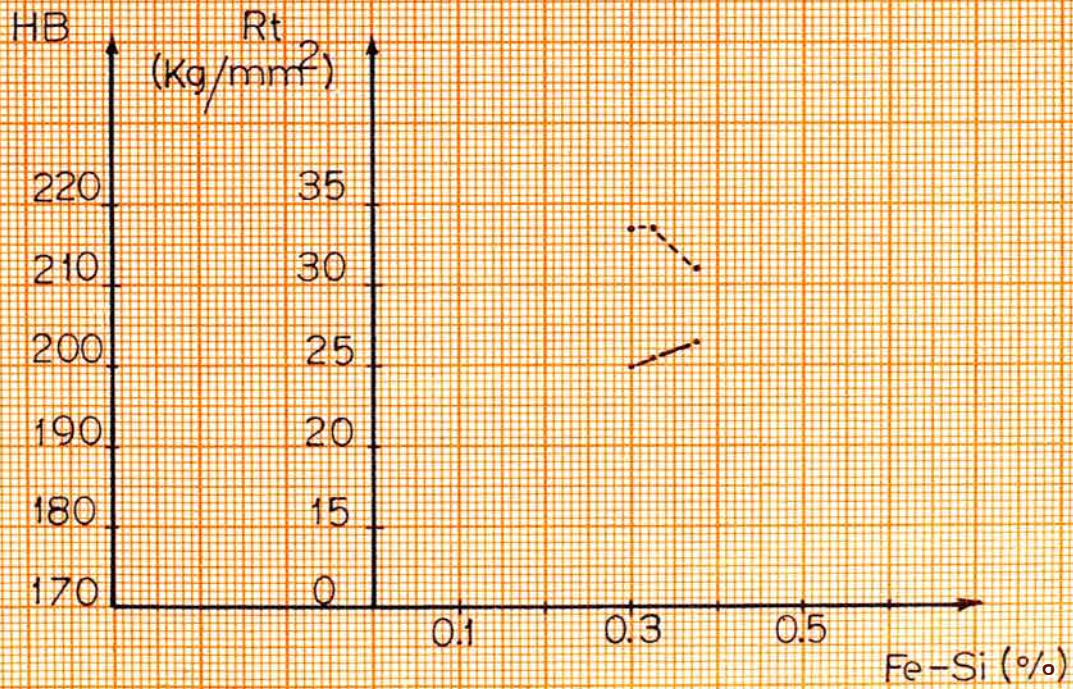


FIG III-6



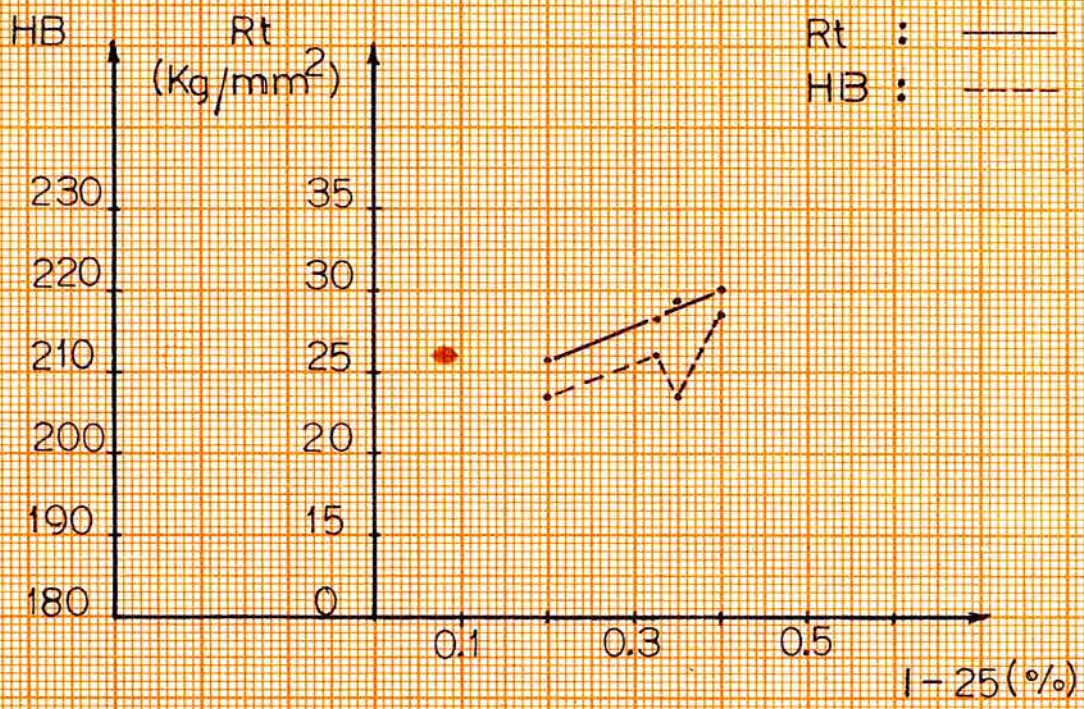


FIG III - 7

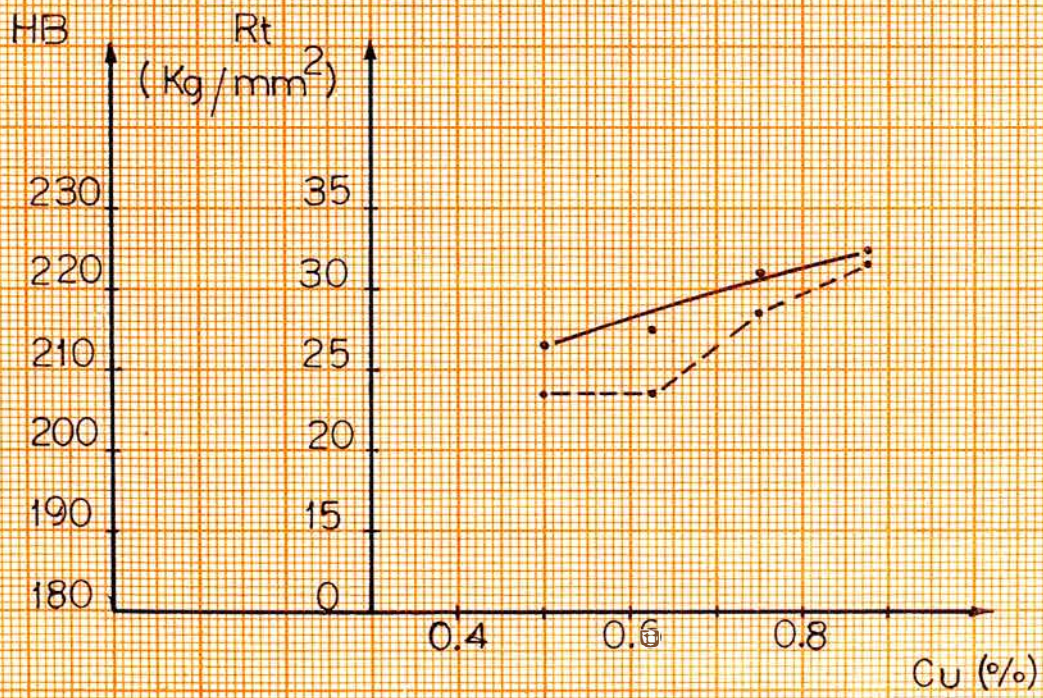


FIG III - 8



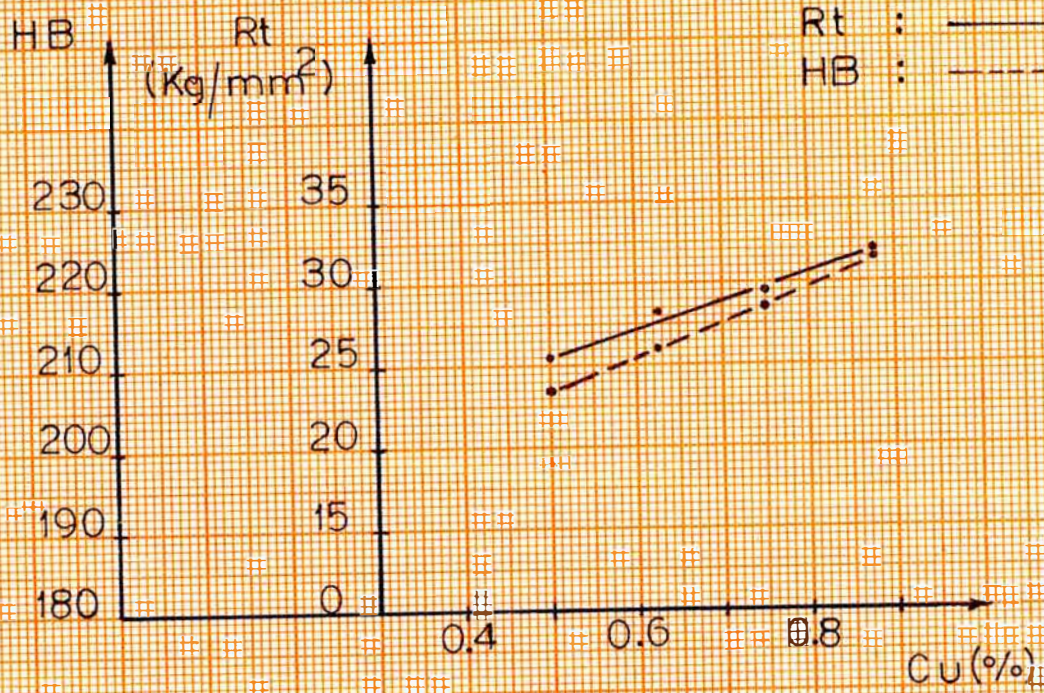


FIG III - 9

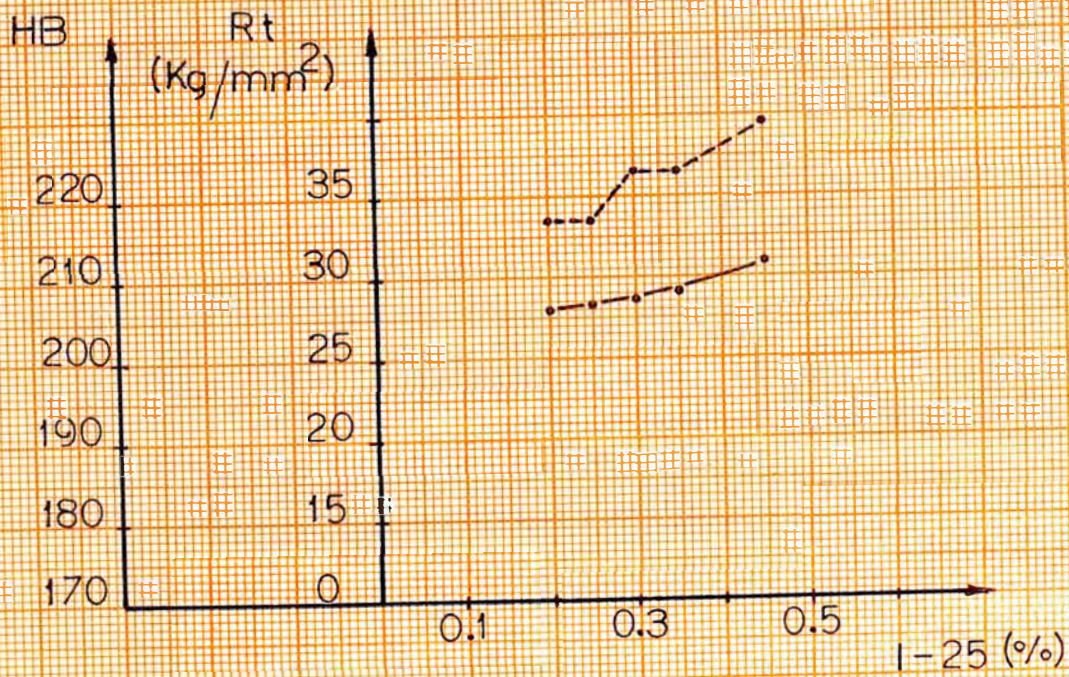


FIG III - 10



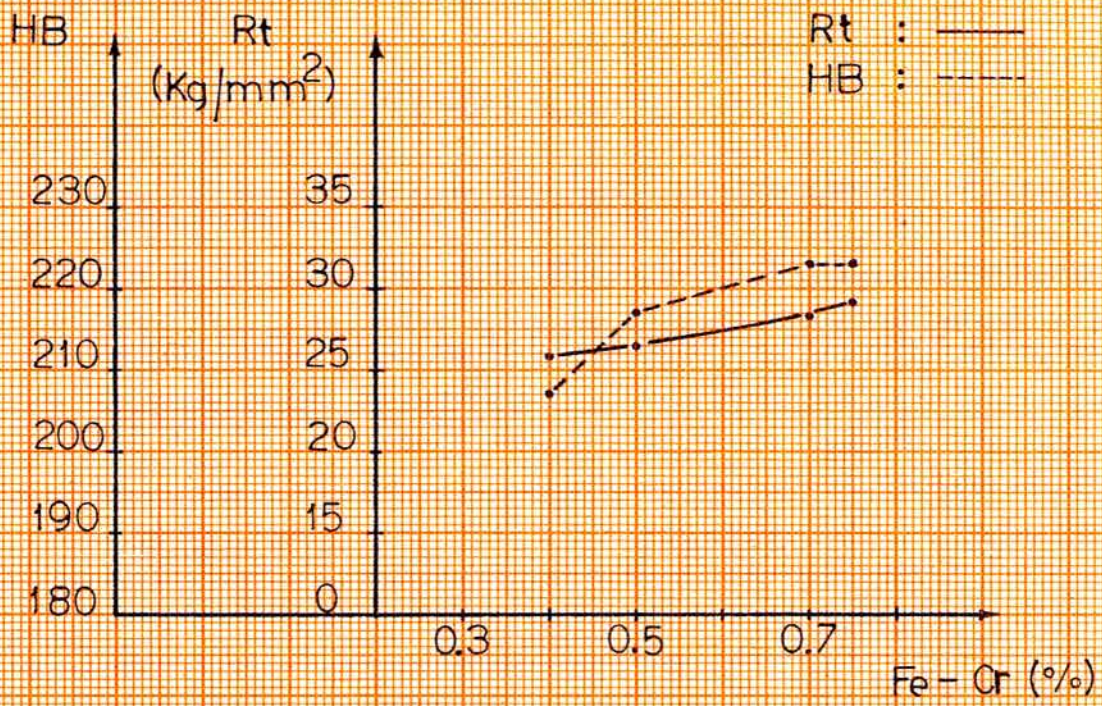


FIG III - 11

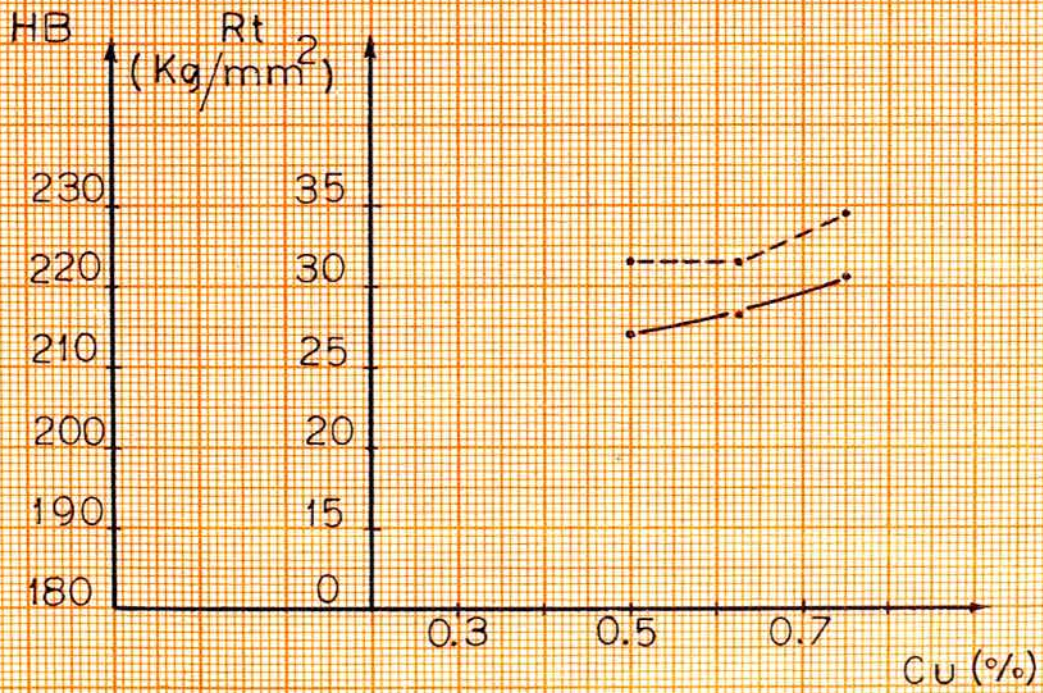


FIG III - 12



TABLA IV

VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CORRESPON-  
DIENTE A LA ADICION DE INOCULANTE EN EL HIERRO FUNDI-  
DO GRIS, RESPECTO AL TIPO Y TAMAÑO DEL GRAFITO Y A  
LA CANTIDAD DE FERRITA.

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.	
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%	
Cu		0.250	A D y E < 2%	4 > 5	8	3.80
		0.375	A D < 1% ; E < 1%	4 > 5	9	3.78
		0.500	B y D A	5 > 4	12	3.76
		0.625	A D y E < 1%	4 y 5	7	3.79
Fe-Si/ Cu	0.125	0.250	A D < 1% ; B aisl.	4 y 5	7	3.97
		0.400	A D < 5% ; B aisl.	4 > 5	8	4.01
		0.625	A D y E < 1%	4 > 5	5	4.01
	0.250	0.375	A D < 8%	4 y 5	10	3.63
		0.950	A y D E < 3%	5 > 6	10	3.64

Continuación :

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%
		1.500 A D aisl.	4 > 5	5	3.67
I-25/ Cu	0.350	0.500 A D < 1% ; E < 1%	4 > 5	7	3.64
		0.625 A D < 2% ; B aisl.	4 > 5	6	3.66
		0.750 A D y E < 2%	4 > 5	8	3.63
Cu/ Fe-Si	0.500	0.125 A D < 1% ; B aisl.	4 > 5	4	3.91
		0.150 A D < 1% ; B aisl.	4 > 5	8	3.90
		0.225 A D < 2% ; E < 1%	4 > 5	7	3.92
		0.250 A B y D aisl.	4 > 5	5	3.94
Cu/ I-25	0.625	0.200 A D < 1% ; E aisl.	4 y 5	4	3.78
		0.325 A D < 1% ; E aisl.	4 y 5	5	3.79
		0.350 A D y E < 1%	4 y 5	4	3.79
		0.400 A D aisl.	4 y 5	3	3.77

**Continuación :**

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.	
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%	
Cu/Fe-Si	0.750	0.300	A D < 1% ; E aisl.	4 y 5	4	3.63
		0.325	A y D E < 8%	5 y 6	12	3.61
		0.375	A y D E aisl.	4 y 5	10	3.63
Fe-Cr/ Fe-Si/ Cu	0.500/ 0.250	0.500	A	4 y 5	3	3.79
		0.625	A D < 2% ; B aisl.	4 > 5	8	3.78
		0.750	A D y E < 2%	4 > 5	7	3.79
		0.875	A D y E < 2%	4 > 5	8	3.82
	0.500/ 0.300	0.500	A B y D aisl.	4 y 5	5	3.90
		0.625	A B < 5% ; D y E aisl.	4 > 5	8	3.92
		0.750	A D y E < 2%	4 > 5	7	3.94
		0.875	A B < 3% ; D y E aisl.	4 y 5	6	3.91

Continuación :

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.	
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%	
Cu/ Fe-Cr/ I-25	0.625/ 0.500	0.200	A D < 1% ; B aisl.	4 y 5	5	3.75
		0.250	A B < 2% ; D aisl.	4 > 5	6	3.73
		0.300	A B y D aisl.	4 > 5	4	3.72
		0.350	A B y D aisl.	4 y 5	5	3.73
		0.450	A B y D aisl.	4 > 5	4	3.76
Cu/ I-25/ Fe-Cr	0.750/ 0.300	0.400	A B y D aisl.	4 y 5	5	3.97
		0.500	A B < 2%	4 > 5	6	3.95
		0.700	A B < 2% ; D aisl.	4 > 5	4	3.92
		0.750	A B y E aisl.	4 > 5	4	3.94
Bi/ I-25/ Cu	0.005/ 0.350	0.500	A D < 10% ; E < 6%	5 > 4	11	3.74
		0.625	A D < 8%	4 y 5	9	3.76
		0.750	A D < 6% ; E < 2%	4 y 5	8	3.73



**TABLA V**

**VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON ADICION UNIFORME DEL INOCULANTE, VARIANDO EL CARBONO EQUIVALENTE, RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE TEMPLE Y CARBONO EQUIVALENTE.**

INOCULANTE		PROFUNDIDAD DE TEMPLE (mm)		C.E.
Tipo	%	S.I.	I.	%
I-25	0.200 (1)	4.4	2.8	3.63
		8.0	6.4	3.67
		5.8	3.8	3.68
		4.2	2.6	3.74
I-25/Cu	0.200/0.625 (2)	6.1	4.7	3.64
		5.6	3.3	3.72
		5.1	3.6	3.75
		6.9	3.1	3.78
		5.4	3.5	3.79
		4.0	2.4	3.94
	0.350/0.625 (3)	7.1	2.6	3.67
		7.3	3.3	3.74
		6.8	2.0	3.79
		4.8	0.0	3.92
		4.2	2.4	3.94

Continua.....

Continuación :

INOCULANTE		PROFUNDIDAD DE TEMPLE (mm)		C.E.
Tipo	%	S.I.	I.	%
I-25/Fe-Cr/Cu	0.200/0.500/0.625 (4)	7.1	4.8	3.68
		5.2	3.4	3.71
		5.2	3.0	3.75
		4.8	2.7	3.91
		5.1	4.1	3.95
	0.250/0.500/0.625 (5)	6.1	3.2	3.62
		7.5	4.9	3.73
		6.5	3.8	3.78
		5.8	3.2	4.03
	0.300/0.400/0.750 (6)	6.5	4.0	3.60
		6.8	4.6	3.79
		5.4	3.6	3.89
		4.8	2.8	3.97
	0.300/0.500/0.625 (7)	5.8	3.2	3.72
		5.6	2.9	3.75
		4.9	2.8	3.78
		5.1	3.4	3.82
		4.0	2.3	3.83
		4.0	1.7	3.94
	0.300/0.500/0.750 (8)	6.8	4.5	3.41
		6.5	3.6	3.82
		5.2	2.6	3.85
		5.3	3.4	3.95

Continuación :

INOCULANTE		PROFUNDIDAD DE TEMPLE (mm)		C.E.
Tipo	%	S.I.	I.	%
Cu/I-25/Bi	0.625/0.350/0.005 (9)	7.2	3.9	3.73
		6.8	3.1	3.76
		5.1	2.4	3.92

SECRETARIA



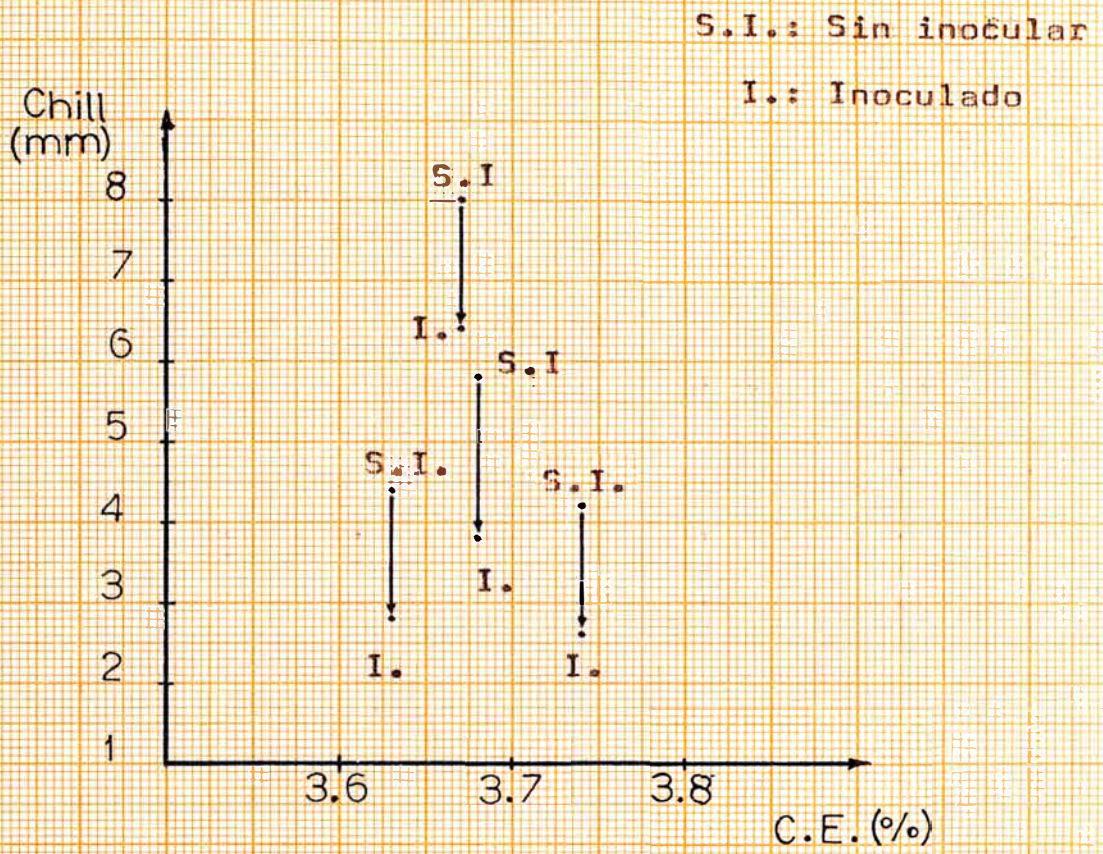


FIG IV - 1

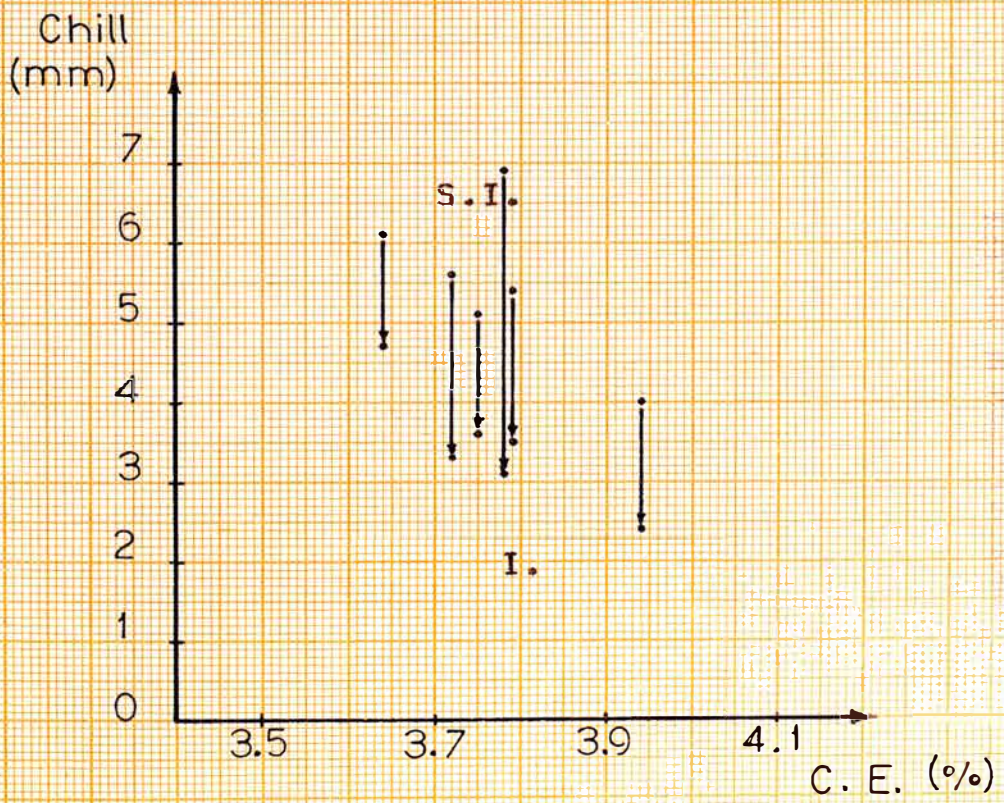


FIG IV - 2



S.I. : Sin inocular  
 I. : Inoculado

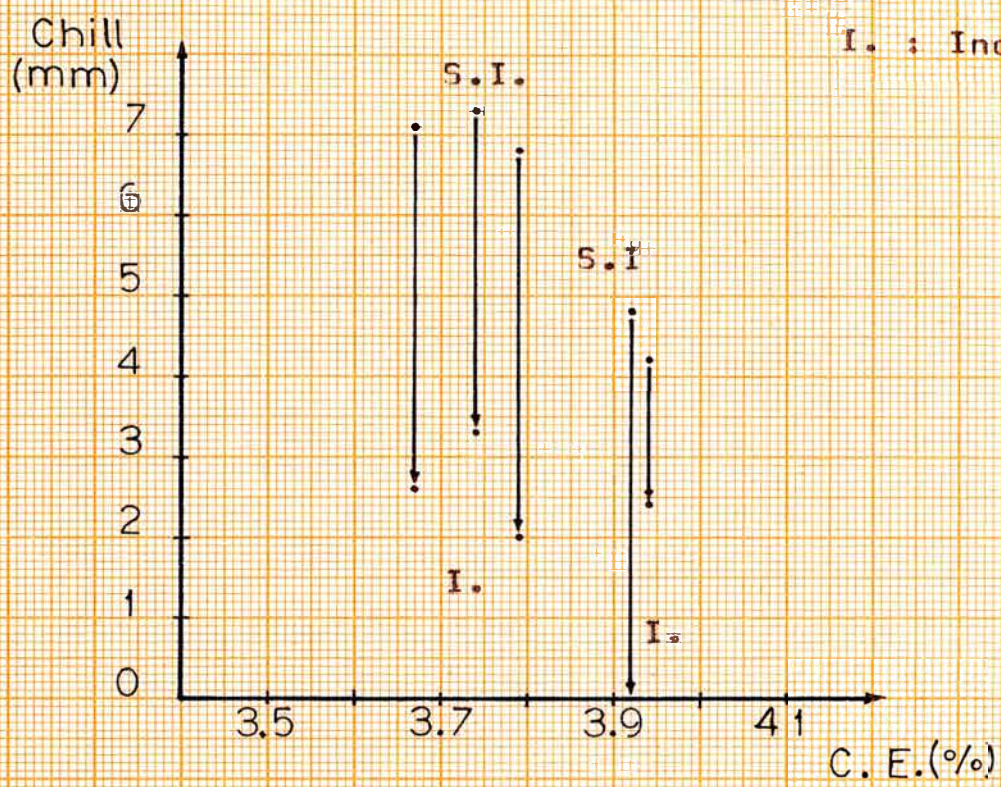


FIG IV - 3

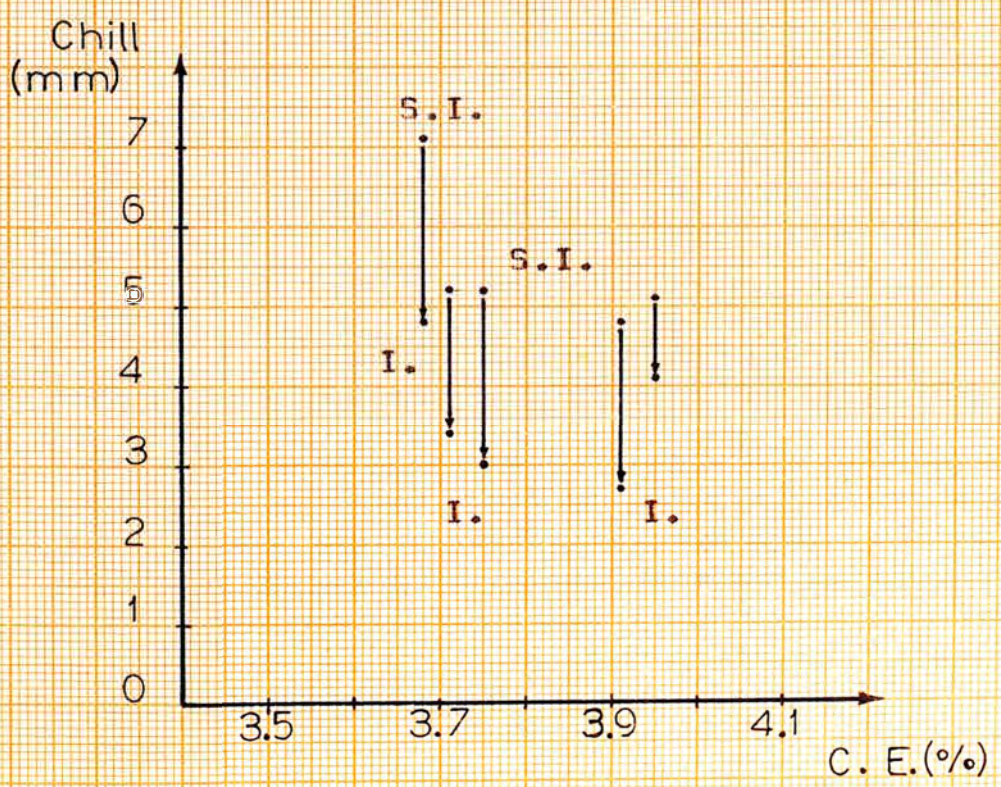


FIG IV - 4



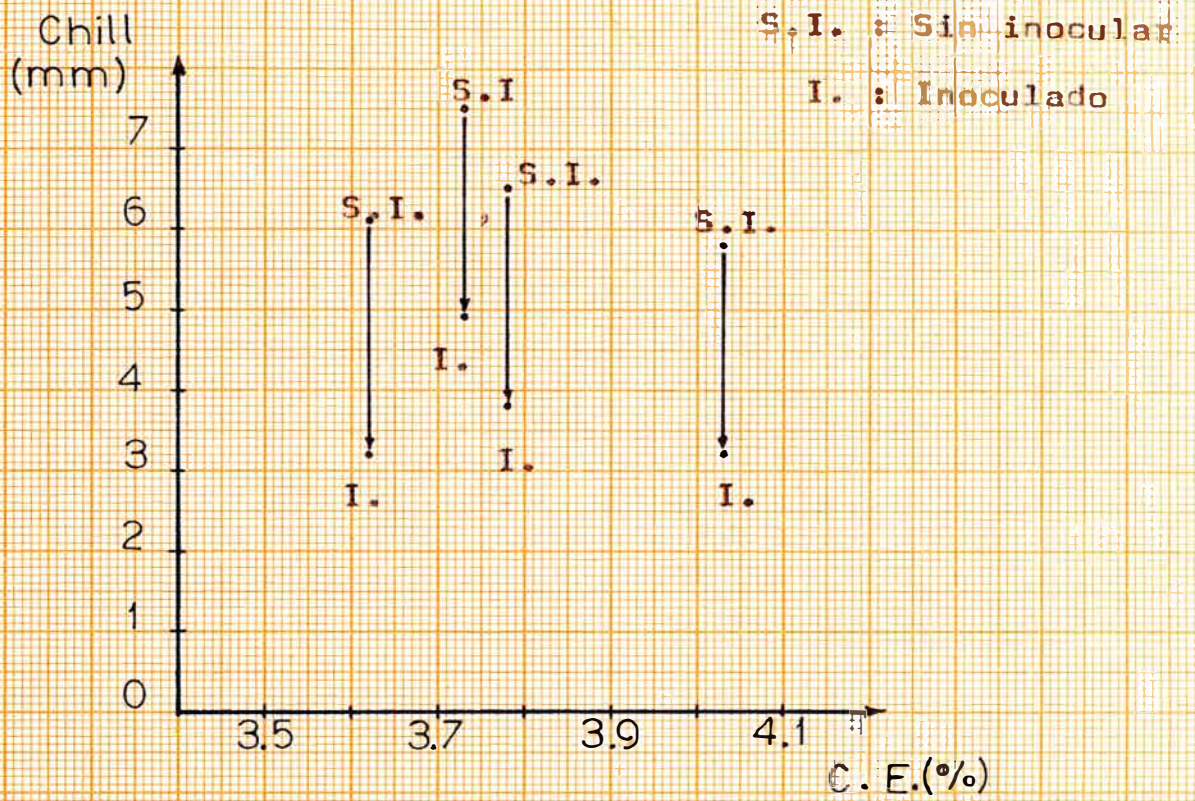


FIG IV - 5

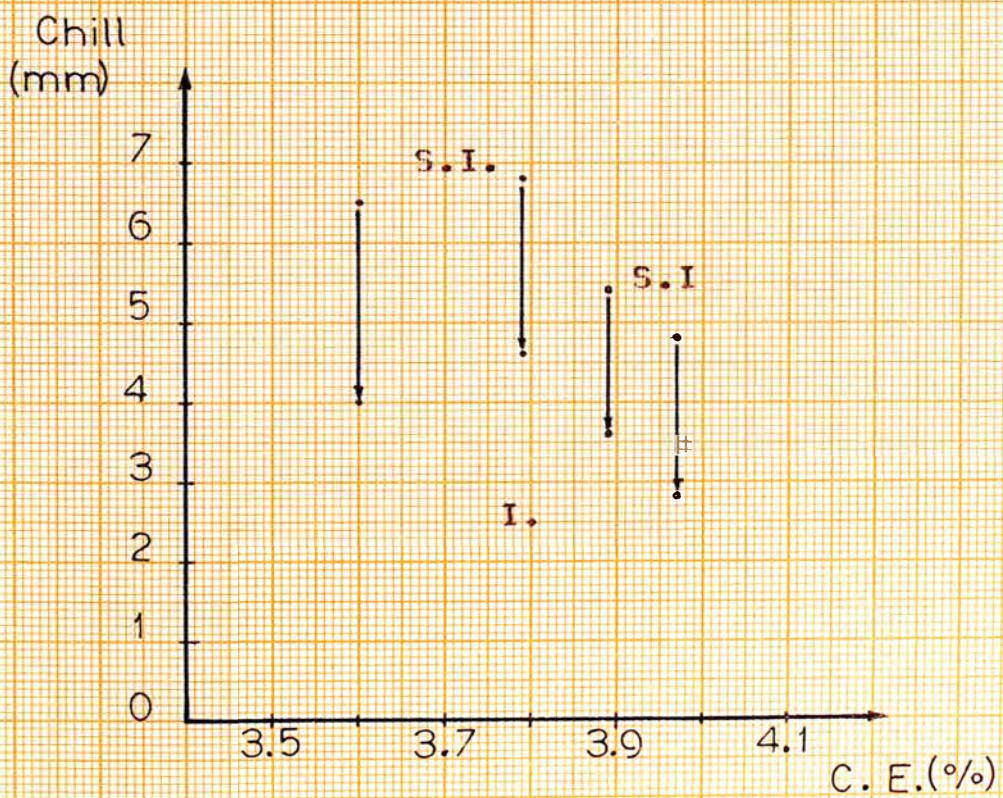


FIG IV - 6





FIG IV - 7

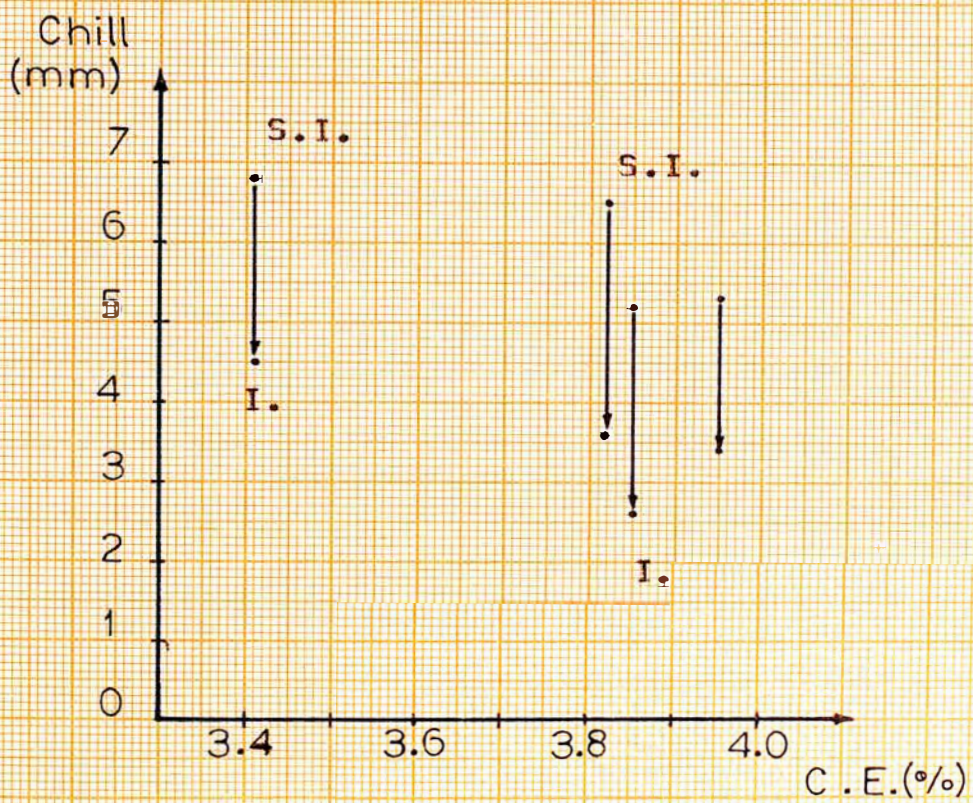


FIG IV - 8



S.I. : Sin inocular

I. : Inoculado

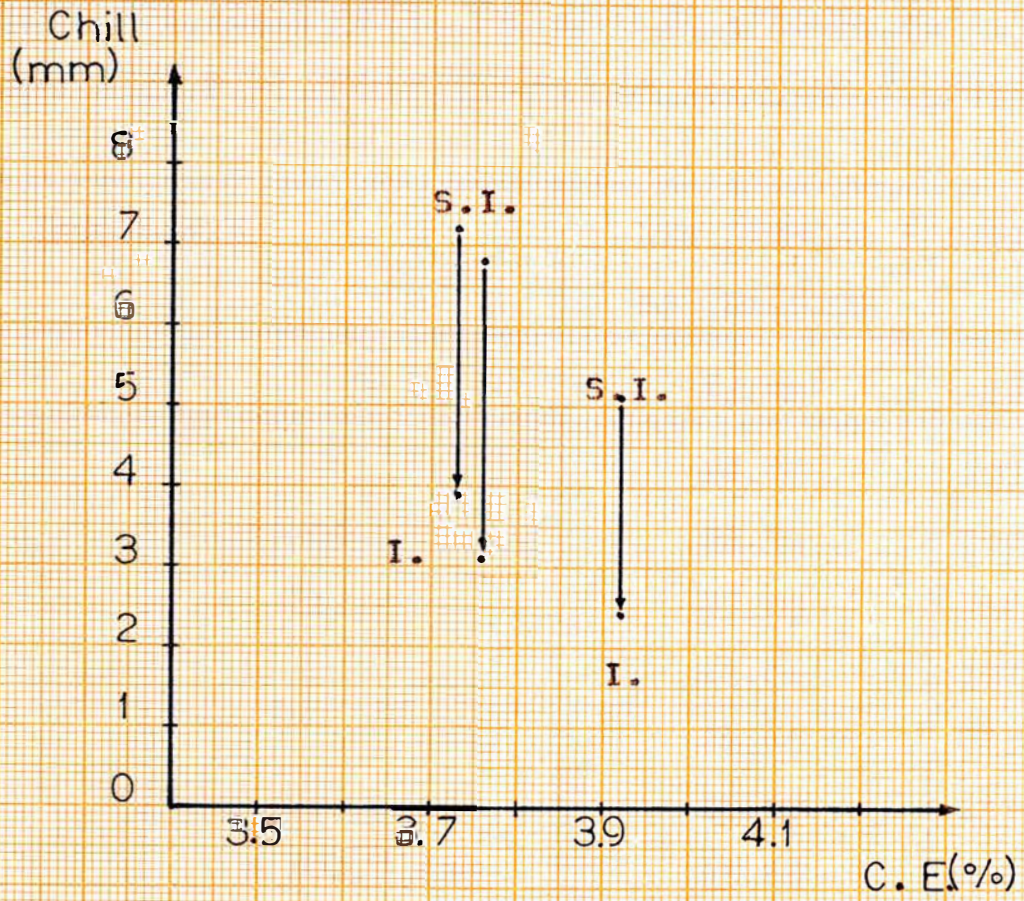


FIG IV - 9



**TABLA VI**

**VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON ADICION UNIFORME DEL INOCULANTE, VARIANDO EL CARBONO EQUIVALENTE, RESPECTO A LA RESISTENCIA A LA TRACCION Y DUREZA.**

INOCULANTE		RESISTENCIA A LA TRACCION	DUREZA
Tipo	%	Kg/mm <sup>2</sup>	HB
I-25	0.200 (1)	27.53	207
		26.56	207
		27.03	212
		24.86	207
I-25/Cu	0.200/0.625 (2)	26.69	223
		25.97	217
		25.68	207
		25.74	207
		25.30	197
		24.48	197
	0.350/0.625 (3)	30.68	217
		30.26	212
		29.47	207
		25.77	207
		24.68	207

Continua...

Continuación :

INOCULANTE		RESISTENCIA A LA TRACCION	DUREZA
Tipo	%	Kg/mm <sup>2</sup>	HB
I-25/Fe-Cr/Cu	0.200/0.500/0.625 (4)	30.41	223
		28.60	217
		27.86	217
		25.93	217
		23.97	207
	0.250/0.500/0.625 (5)	28.70	223
		28.36	217
		26.89	207
		25.78	207
	0.300/0.400/0.750 (6)	33.98	235
		30.93	223
		29.10	217
	0.300/0.500/0.625 (7)	25.72	207
		28.53	223
		26.28	217
		25.77	217
		25.32	217
		25.19	217
	0.300/0.500/0.750 (8)	25.05	207
		35.66	241
29.46		229	
27.90		217	
		26.44	217

**Continuación :**

INOCULANTE		RESISTENCIA A LA TRACCION	DUREZA
Tipo	%	Kg/mm <sup>2</sup>	HB
Cu/I-25/B1	0.625/0.350/ 0.005 (9)	28.95	223
		28.21	223
		24.88	217



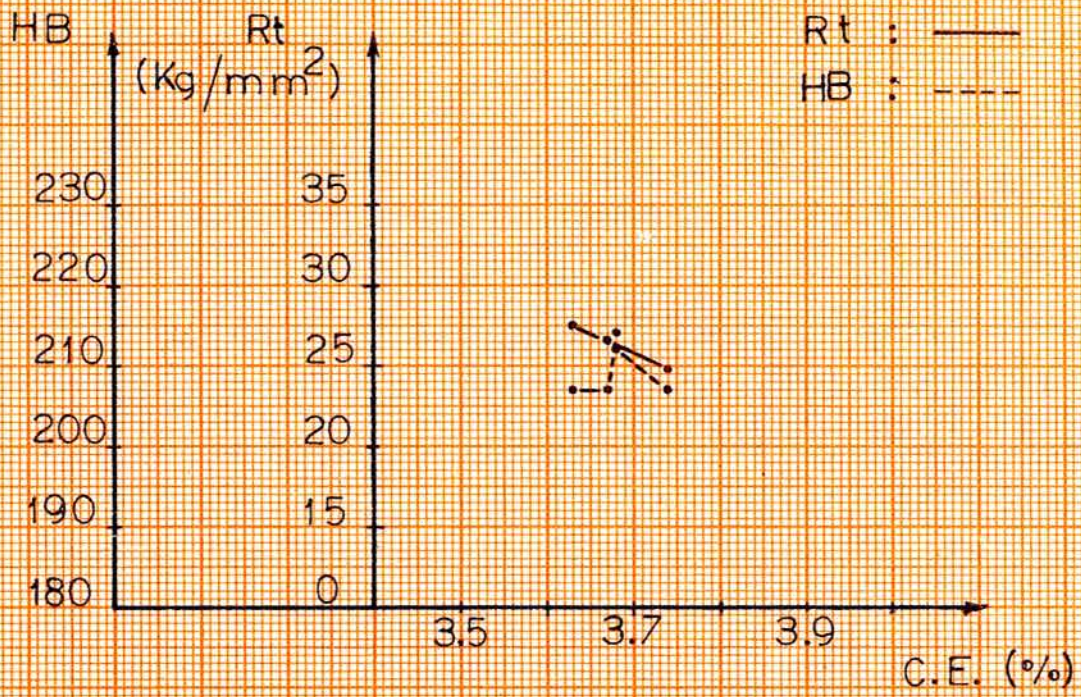


FIG V - 1



FIG V - 2



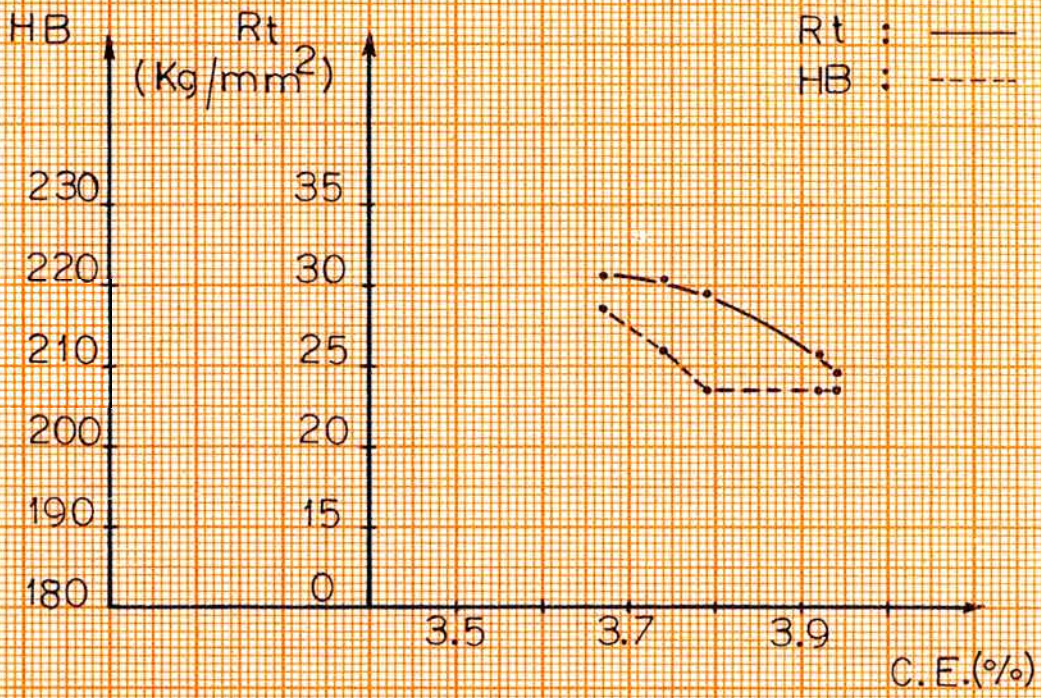


FIG V - 3

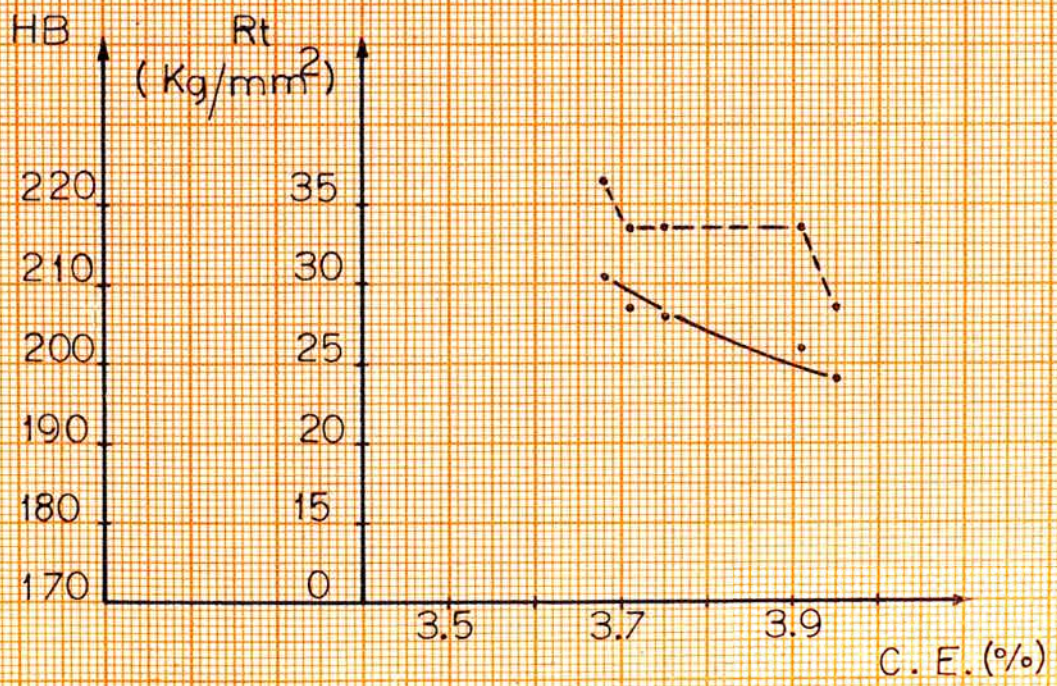


FIG V - 4



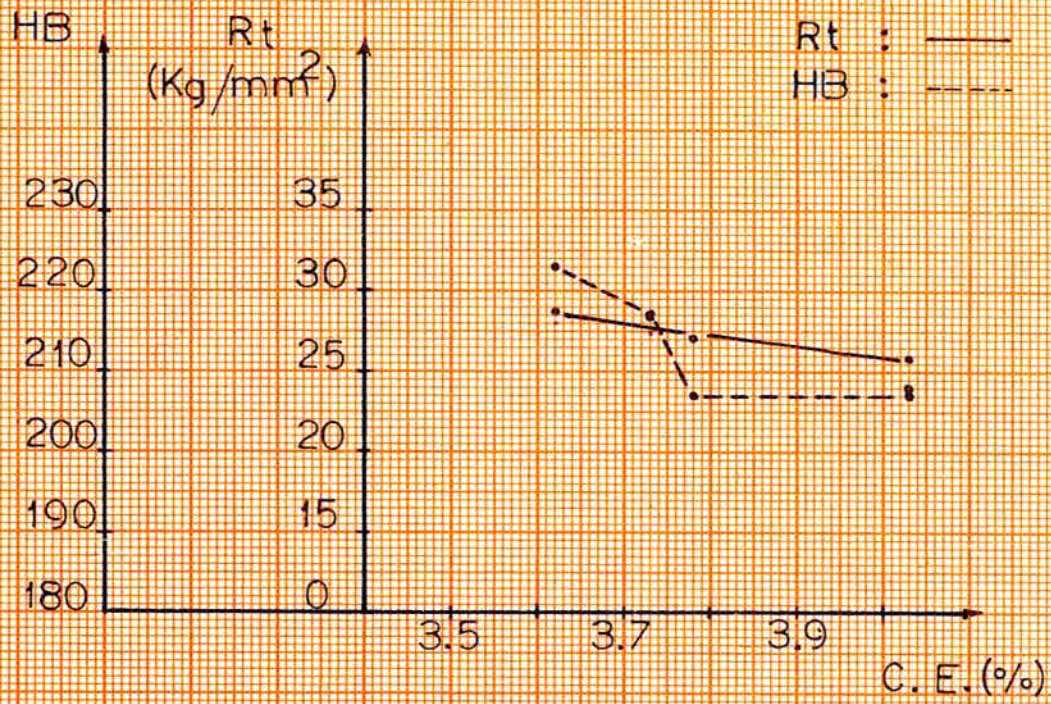


FIG V - 5

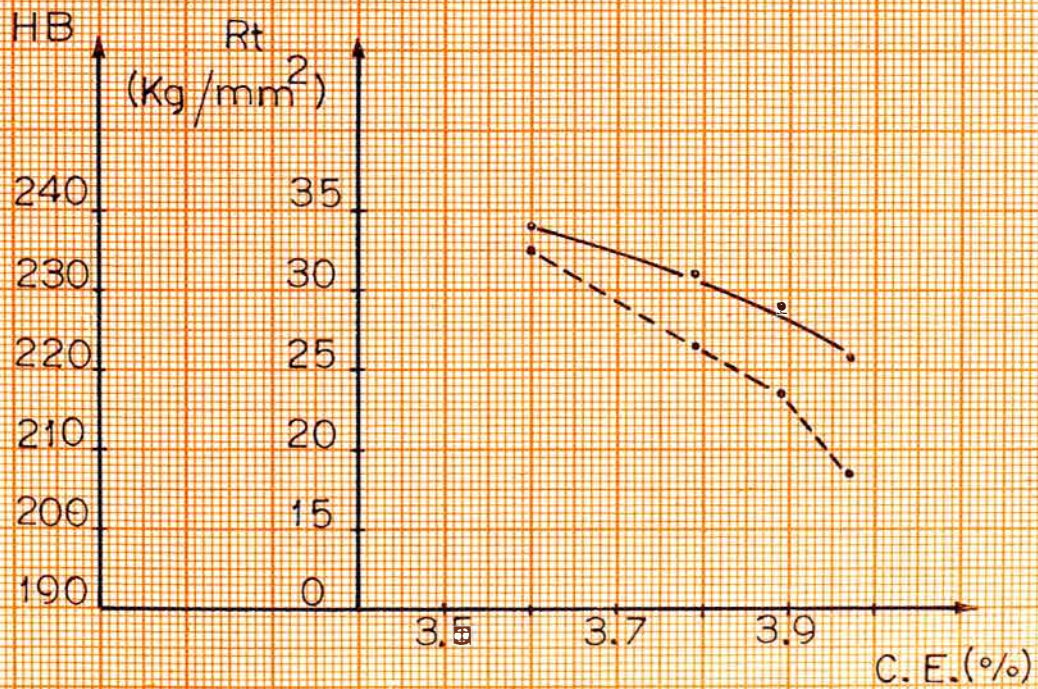


FIG V - 6



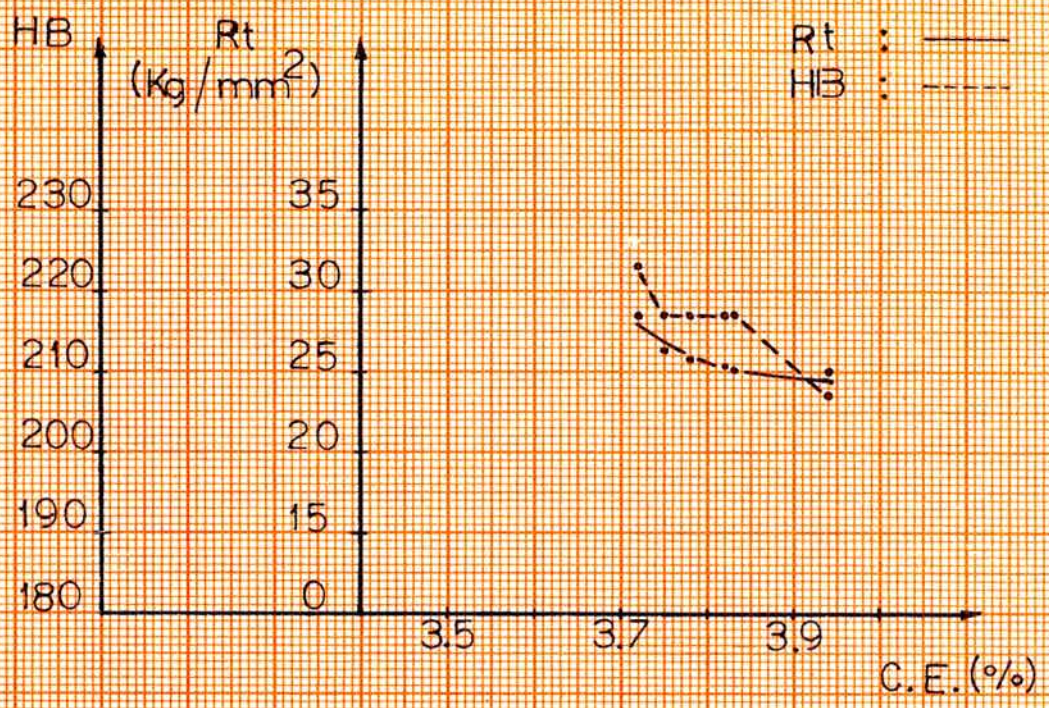


FIG V-7

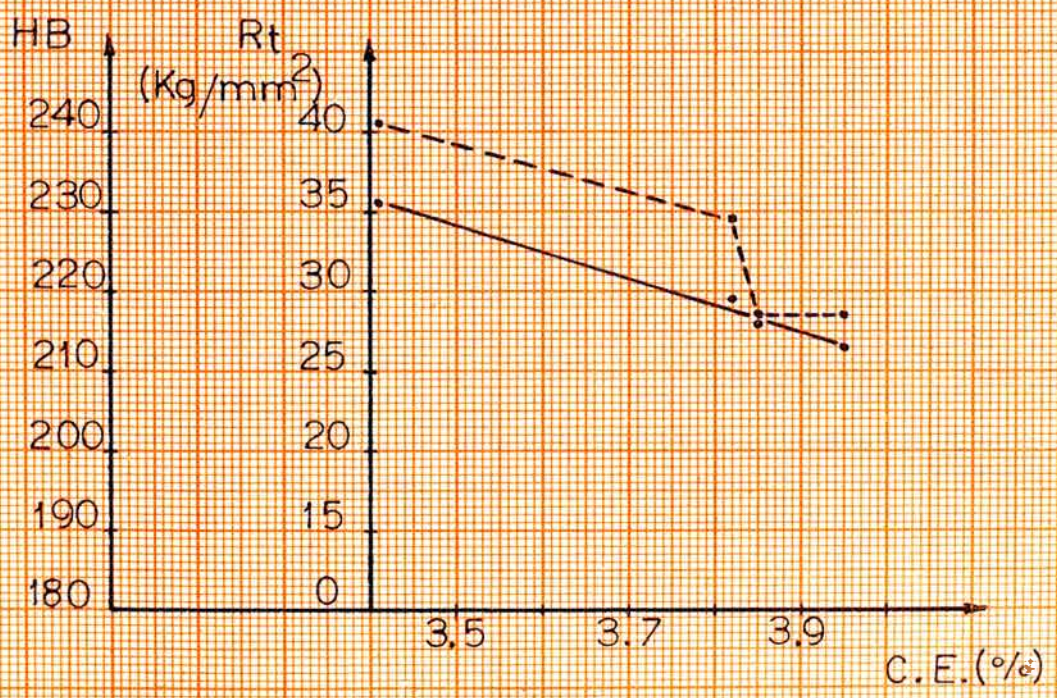


FIG V-8



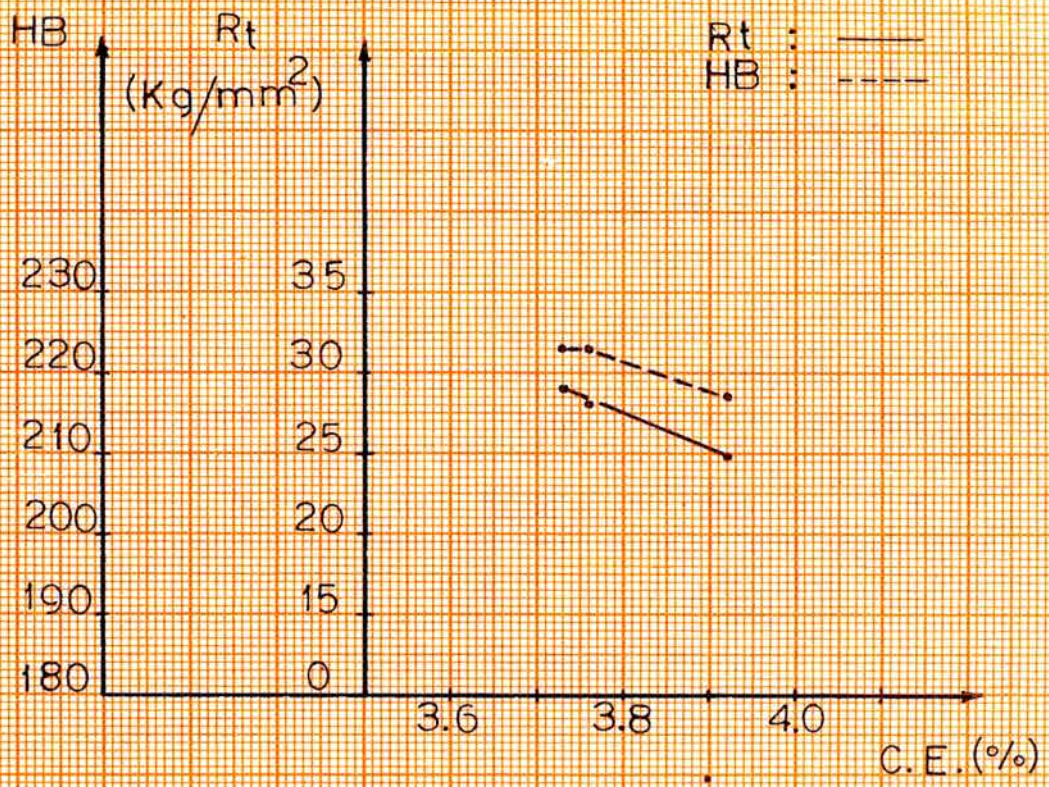


FIG V - 9



TABLA VII

VALORES OBTENIDOS DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON ADICION UNIFORME DEL INOCULANTE, VARIANDO EL CARBONO EQUIVALENTE, RESPECTO AL TIPO Y TAMAÑO DEL GRAFITO Y A LA CANTIDAD DE FERRITA.

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%
I-25	0.200	A B, D y E aisl.	4 > 5	4	3.63
		A D < 4% ; B y E aisl.	4 > 5	8	3.68
		A D < 2%	4 > 5	6	3.74
I-25/Cu	0.200/ 0.625	A D y E < 2%	4 > 5	7	3.64
		A D < 1% ; E aisl.	4 y 5	4	3.78
		A D < 1% ; E aisl.	4 y 5	5	3.79
	0.350/ 0.625	A D < 2% ; B aisl.	4 > 5	6	3.67
		A D aisl.	4 y 5	3	3.74
		A D y E < 1%	4 y 5	4	3.79

Continuación :

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%
		A B y D aisl.	4 > 5	5	3.92
I-25/ Fe-Cr/ Cu	0.200/0.500/ 0.625	A D < 1% ; B y E aisl.	4 y 5	6	3.68
		A D < 1% ; B aisl.	4 y 5	5	3.75
		A D < 2%	4 y 5	7	3.91
	0.250/0.500/ 0.625	A B y D aisl.	4 > 5	6	3.62
		A B < 2% ; D aisl.	4 > 5	6	3.73
		A B < 2% ; D aisl.	4 y 5	7	4.03
	0.300/0.500/ 0.625	A B y D aisl.	4 > 5	4	3.72
		A B y D aisl.	4 y 5	4	3.82
		A B y D aisl.	4 > 5	5	3.94

Continua.....

Continuación :

INOCULANTE		GRAFITO		FERRITA	C.E.	
Tipo	%	Tipo	Tamaño	%	%	
	0.300/ 0.500/ 0.750	A B < 2% ; D y E 1%	4 y 5	6	3.41	
		A B < 2% ; D aisl.	4	5	3.82	
		A B < 2%	4 > 5	6	3.95	
	0.300/ 0.400/ 0.750	A B y D aisl.	4 y 5	6	3.60	
		A B y D aisl.	4 > 5	5	3.79	
		A B y E aisl.	4 > 5	4	3.97	
	Cu/I-25/ Bi	0.625/ 0.350/ 0.005	A D < 9% ; E < 1%	4 y 5	10	3.73
			A D < 8%	4 y 5	9	3.76
			A D < 9%	4 > 5	9	3.92



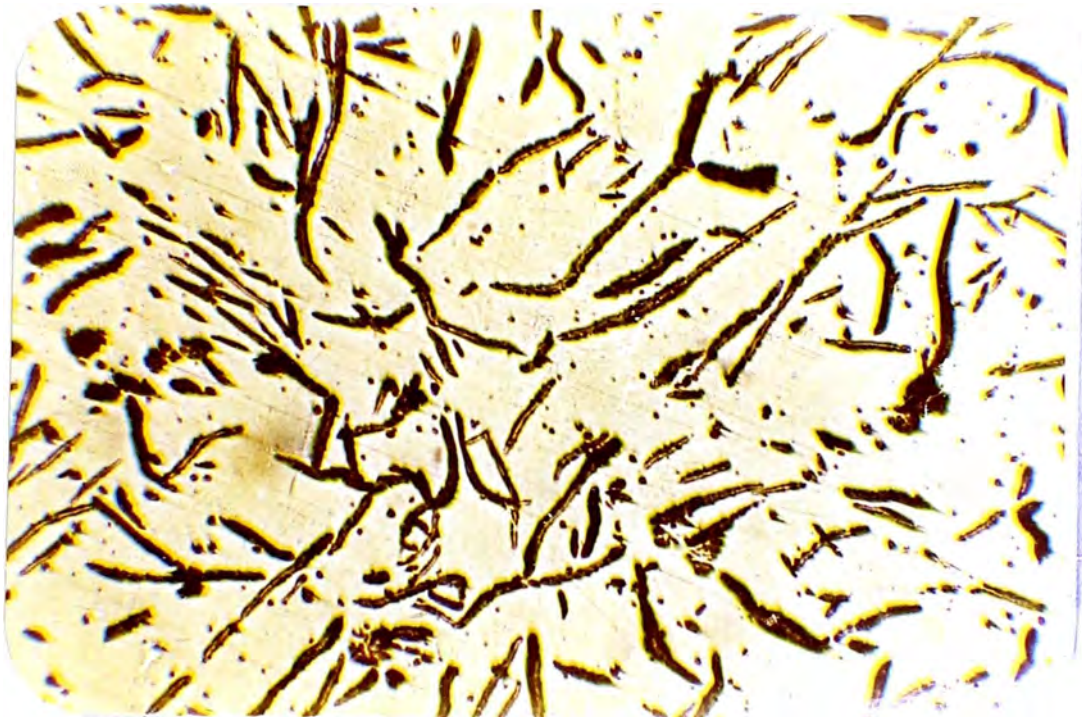


Fig. 14-1.- Microestructura de un tambor de freno, de hierro gris . Sin ataque , X 100 .

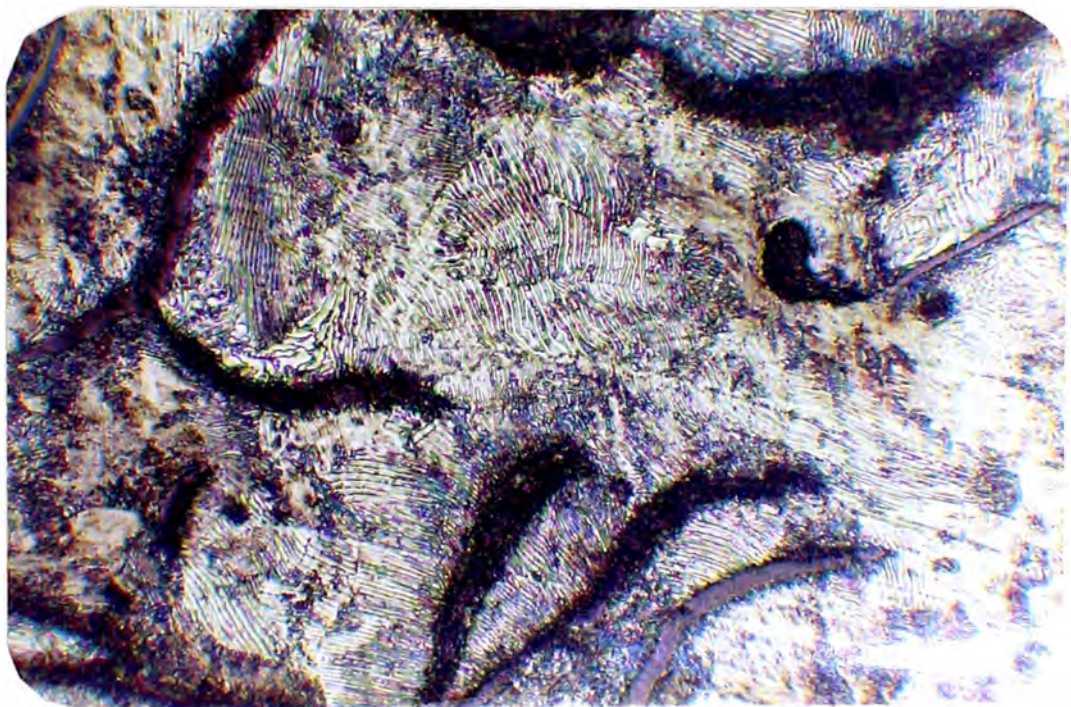


Fig. 14-1.- Microestructura de un tambor de freno, de hierro gris, inoculado con Cu/Fe-Si/Fe-Cr , 0.875/0.300/0.500 . Atacado . X500 .



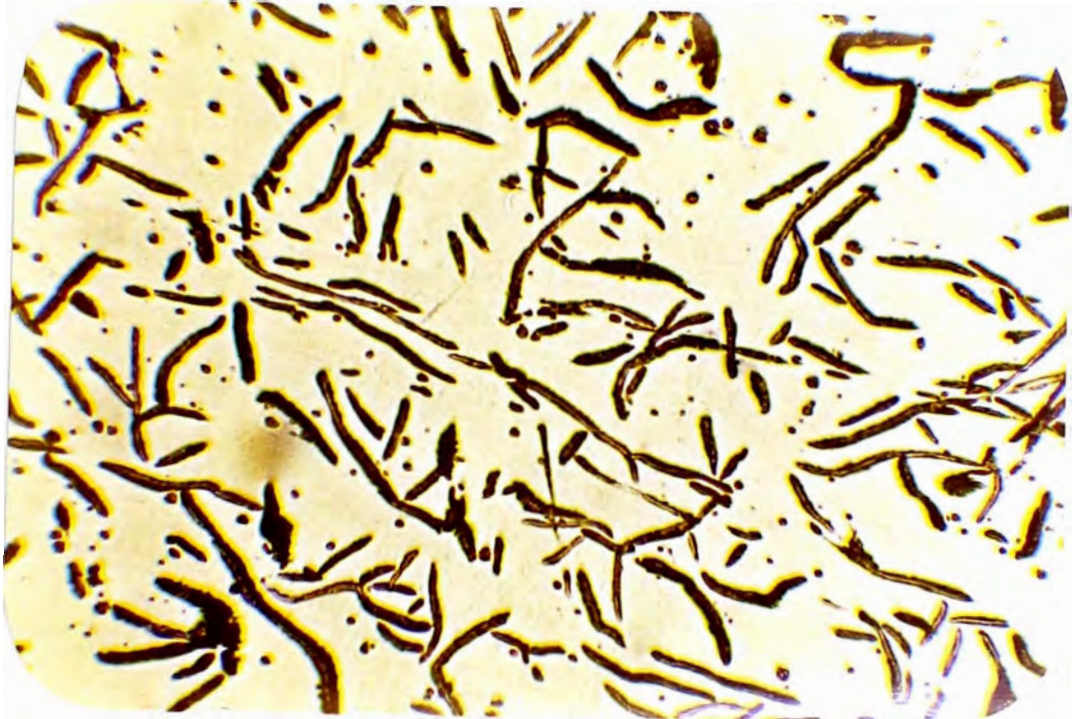


Fig. 14-2.- Microestructura de un tambor de freno  
segunda parte, sin ataque . X 100 .



Fig. 14-2.- Microestructura de un tambor de freno  
segunda parte, atacado, Nital 2%  
X 500 .



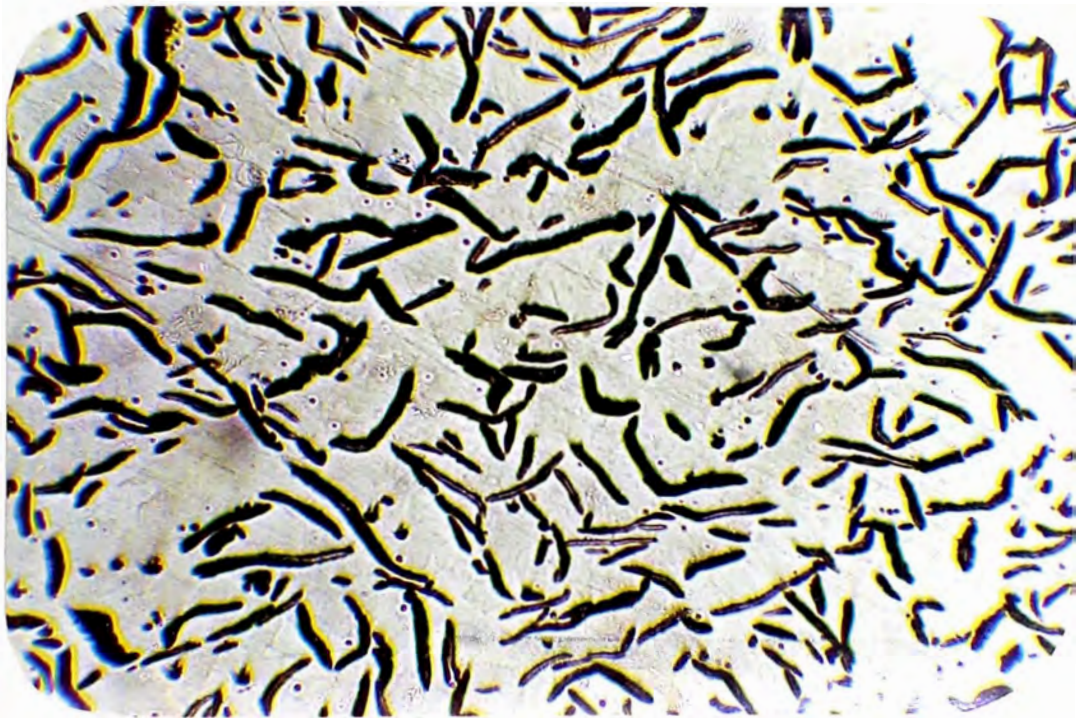


Fig. 14-3.- Microestructura de un tambor de freno  
tercera parte, sin ataque. X 100

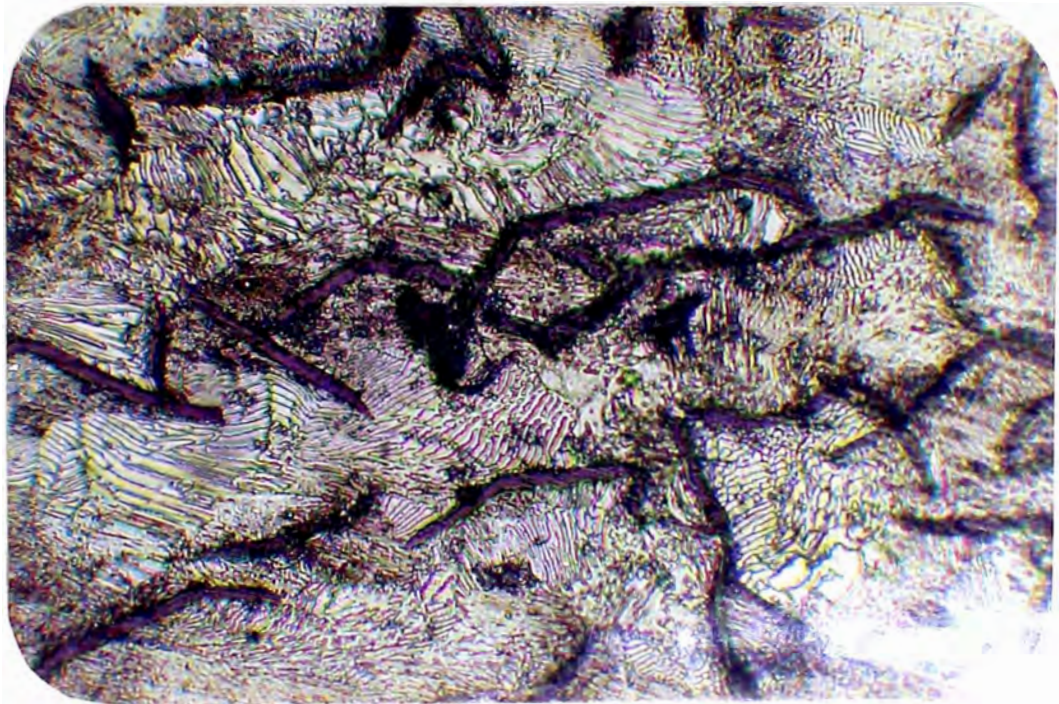


Fig. 14-3.- Microestructura de un tambor de freno  
tercera parte, atacado con Nital 2%  
X 500 .



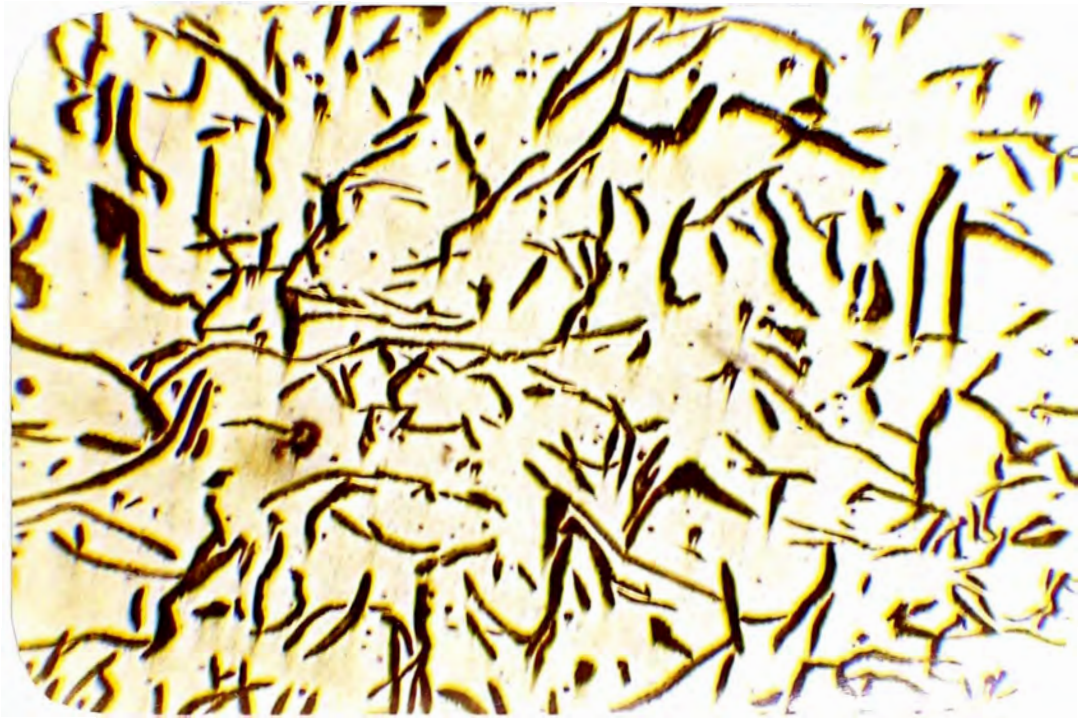


Fig. 14-4.- Microestructura de un tambor de freno  
cuarta parte (I) , sin ataque. X 100 .

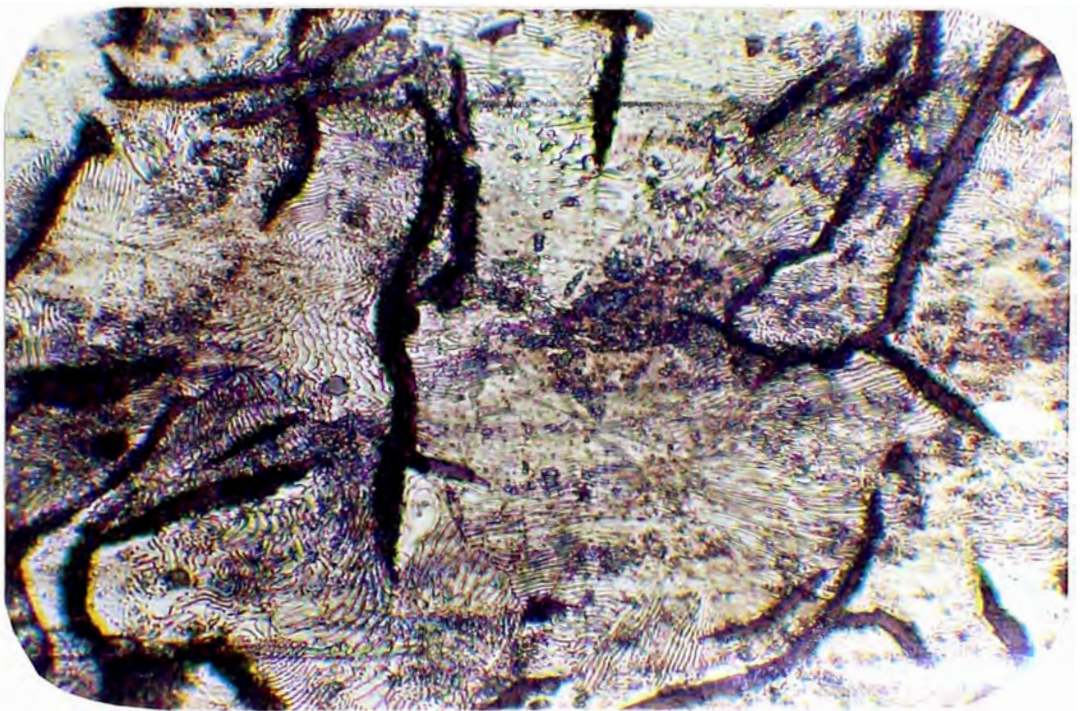


Fig. 14-4.- Microestructura de un tambor de freno  
cuarta parte (I) , atacado con Nital 2%  
X 500 .



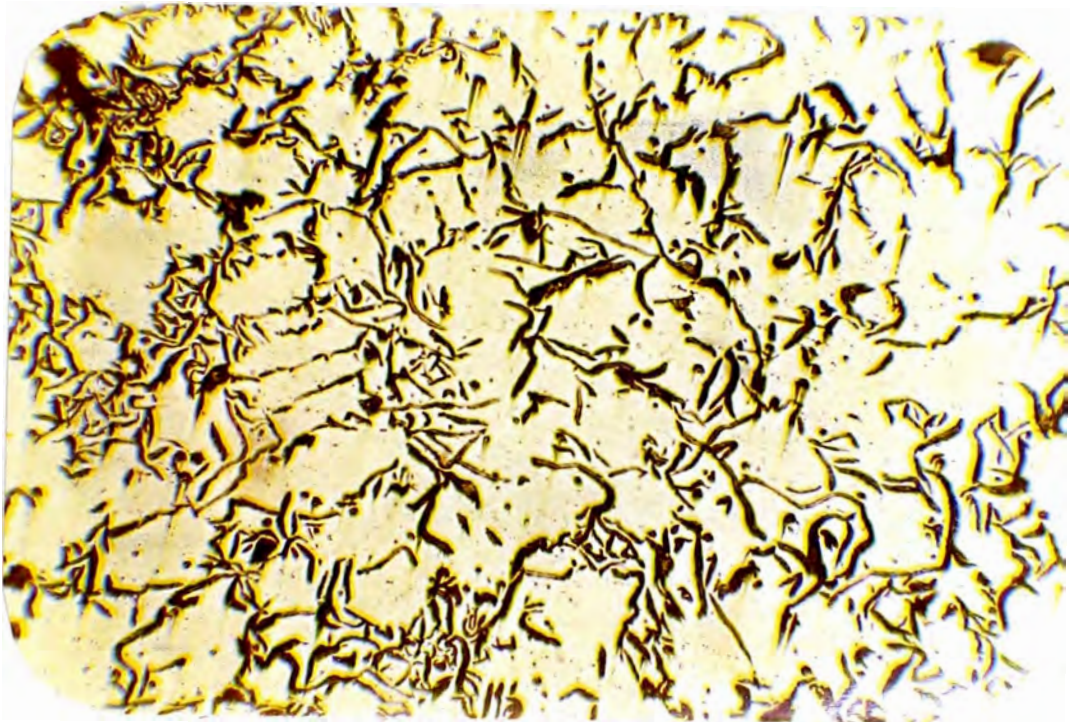


Fig. 14-4.- Microestructura de un tambor de freno cuarta parte (II) , sin ataque, X 100

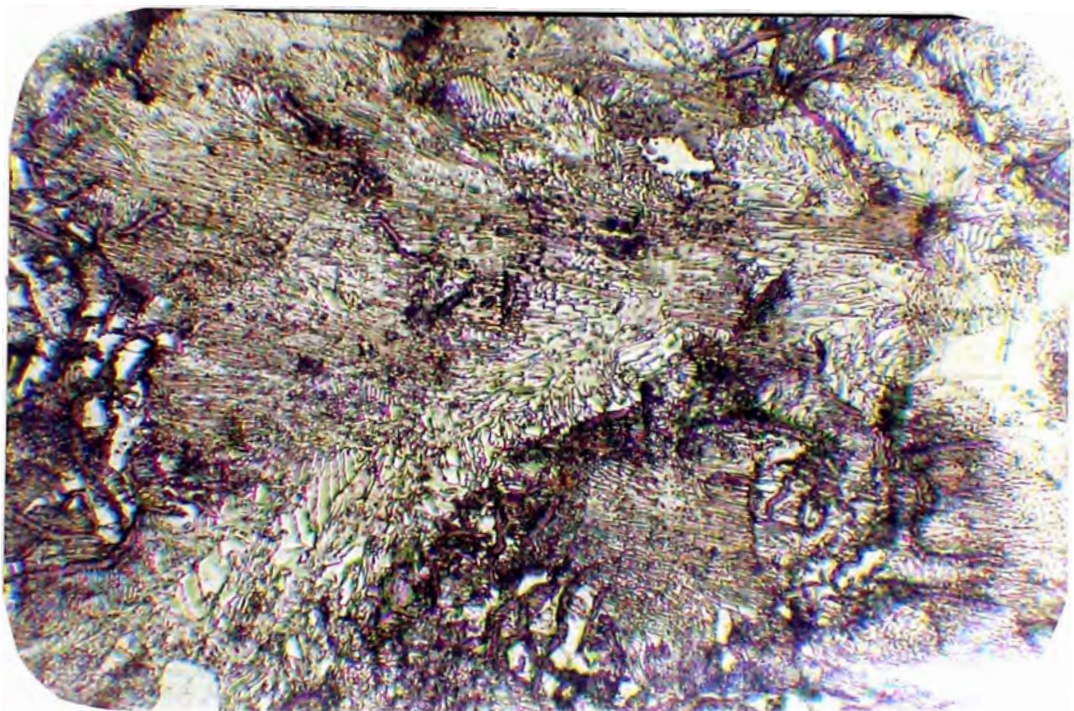


Fig. 14-4.- Microestructura de un tambor de freno cuarta parte (II) , atacado con Nital 2% X 500 .



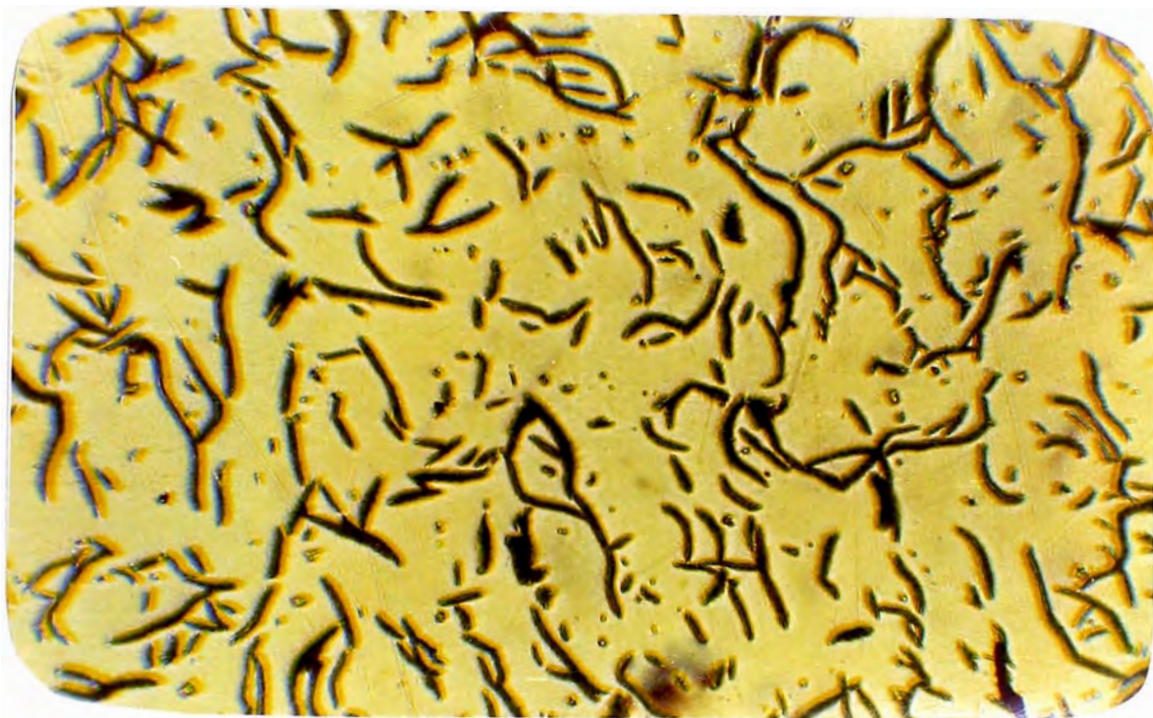


Fig.15 a .- Microestructura de un hierro gris inoculado con Cu, 0.375 %. Sin ataque. X 100 .

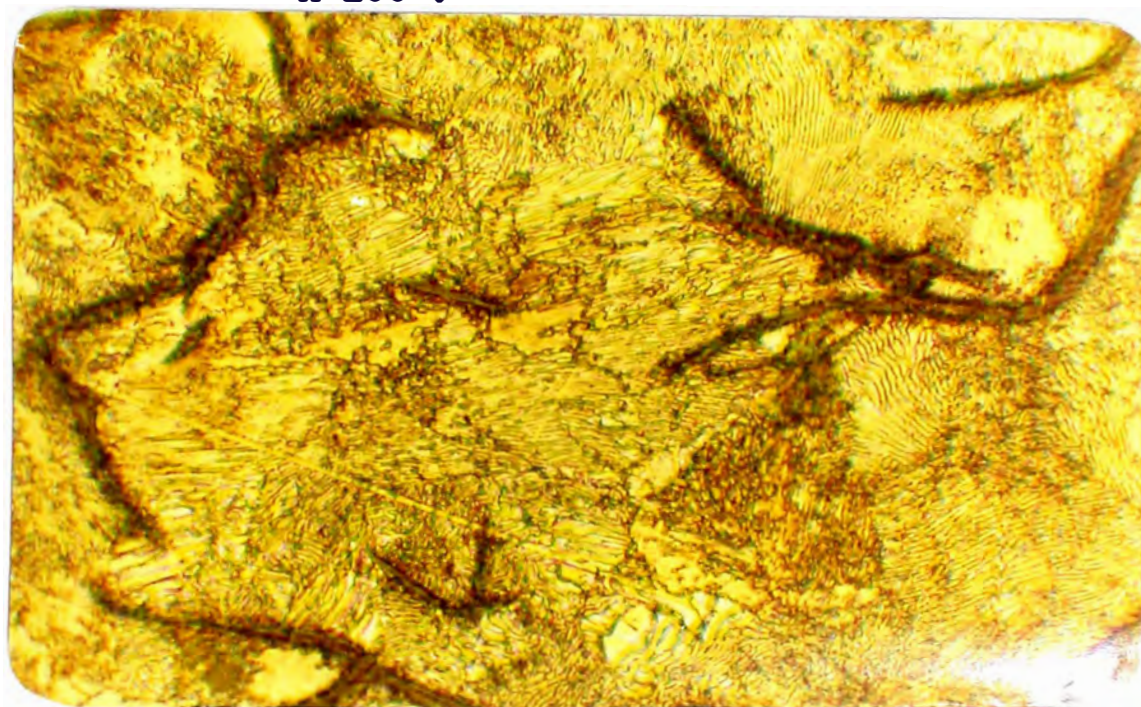
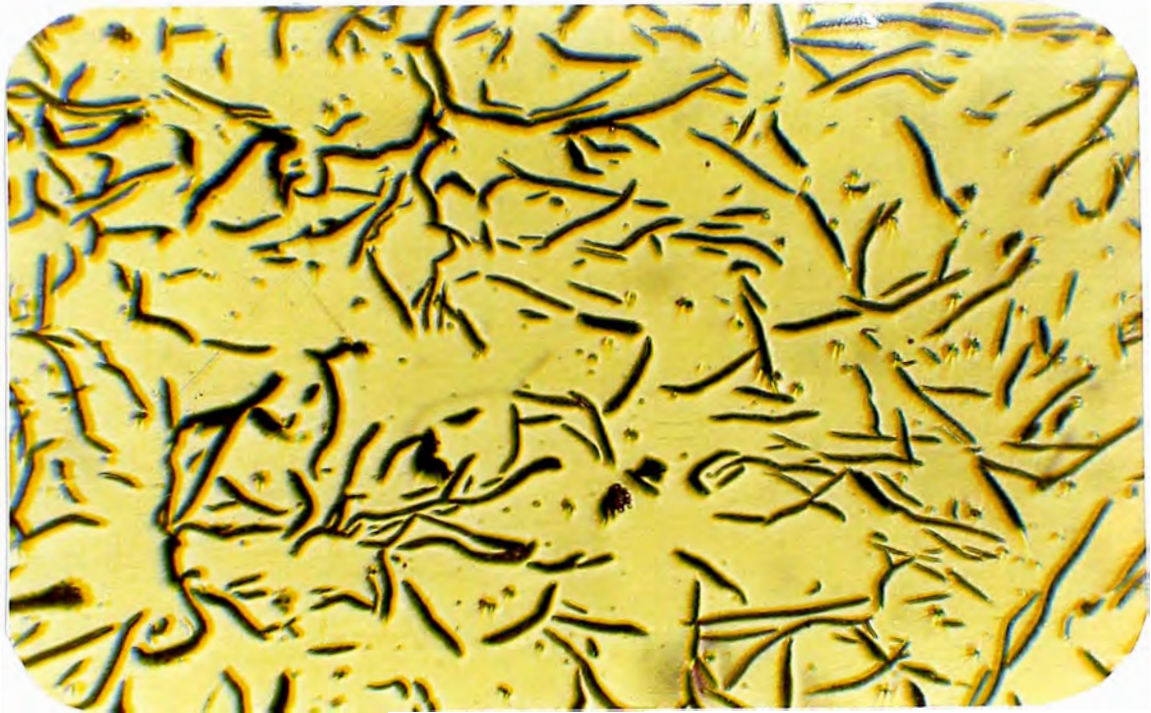
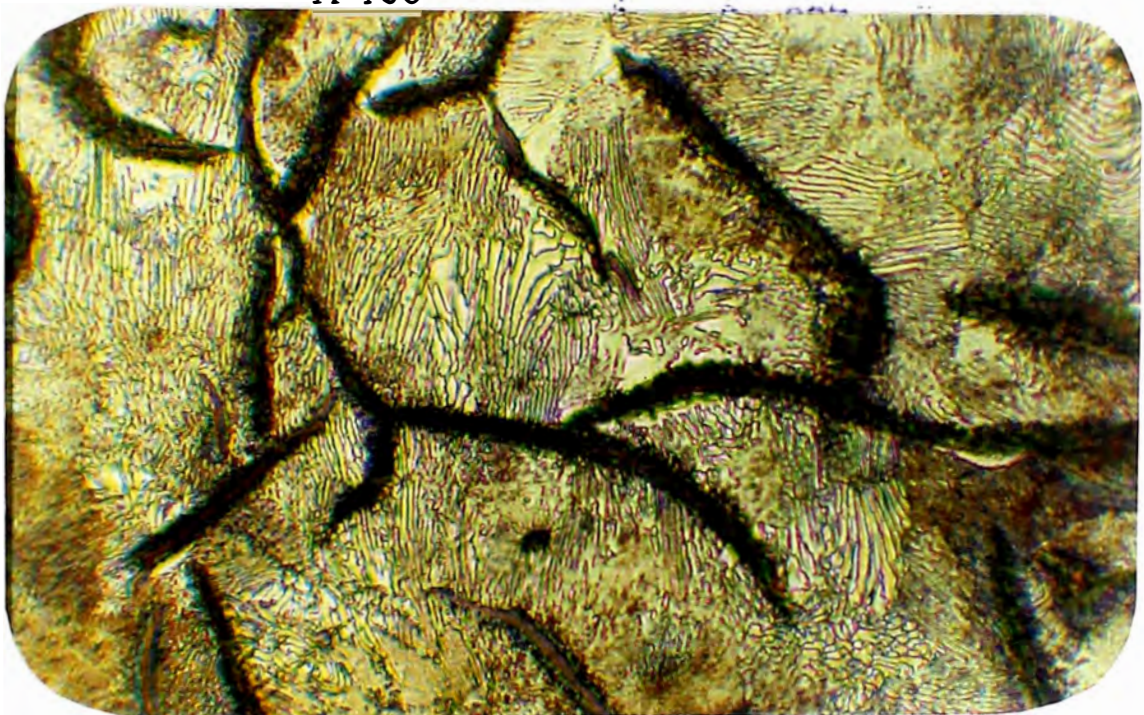


Fig. 15 b.- Microestructura de un hierro gris inoculado con Cu,0.375 %. Atacado Nital 2% , X 500 .



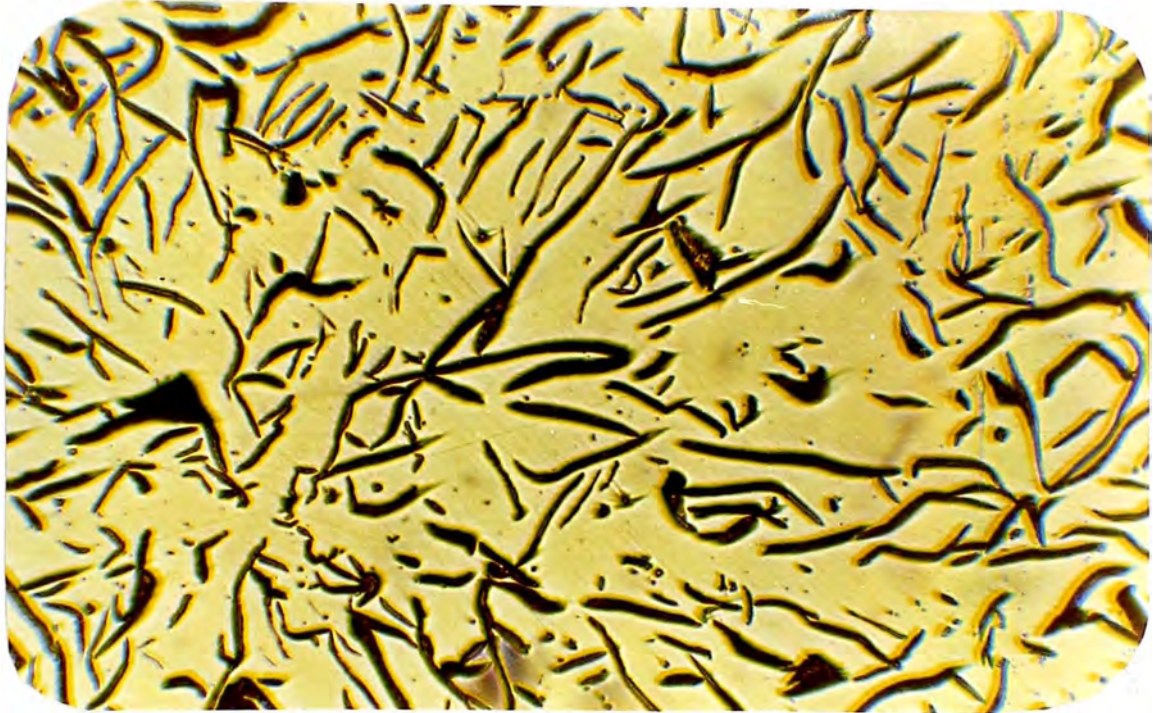


**Fig. 16 a.-** Microestructura de un hierro gris inoculado con I-25, 0.200% . Sin ataque X 100

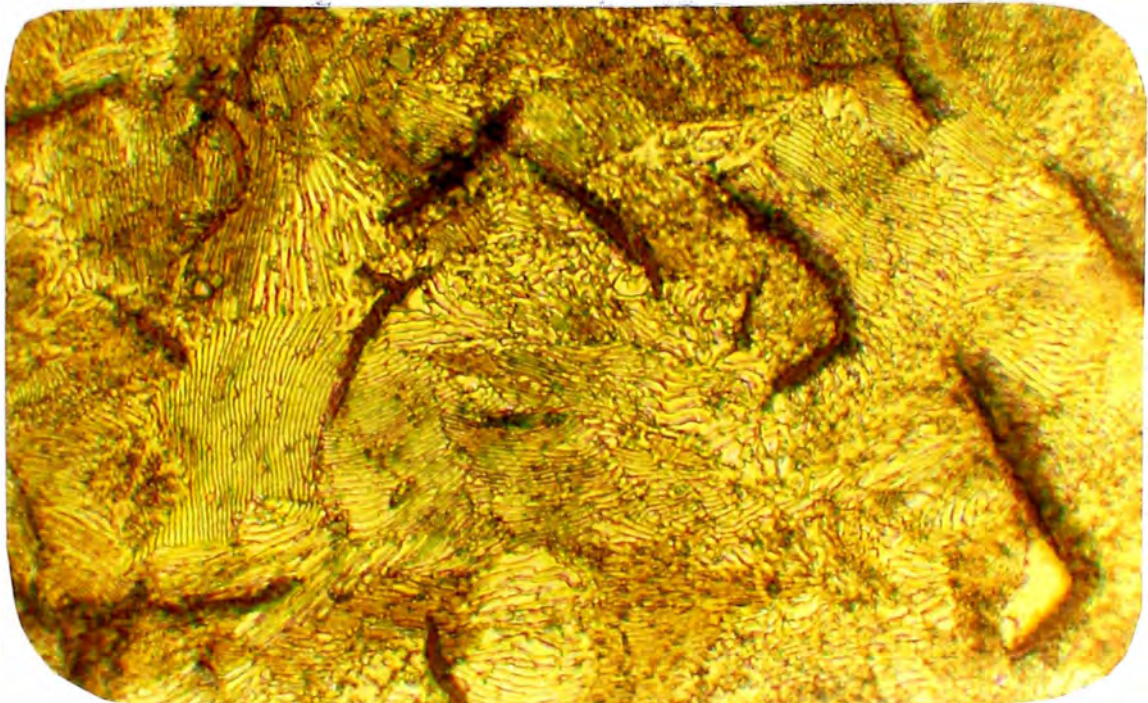


**Fig. 16 b.-** Microestructura de un hierro gris inoculado con I-25, 0.200% . Atacado Nital 2% , X 500 .





**Fig. 17 a.-** Microestructura de un hierro gris inoculado con Cu/Fe-Si, 0.500/0.250. Sin ataque , X 100 .

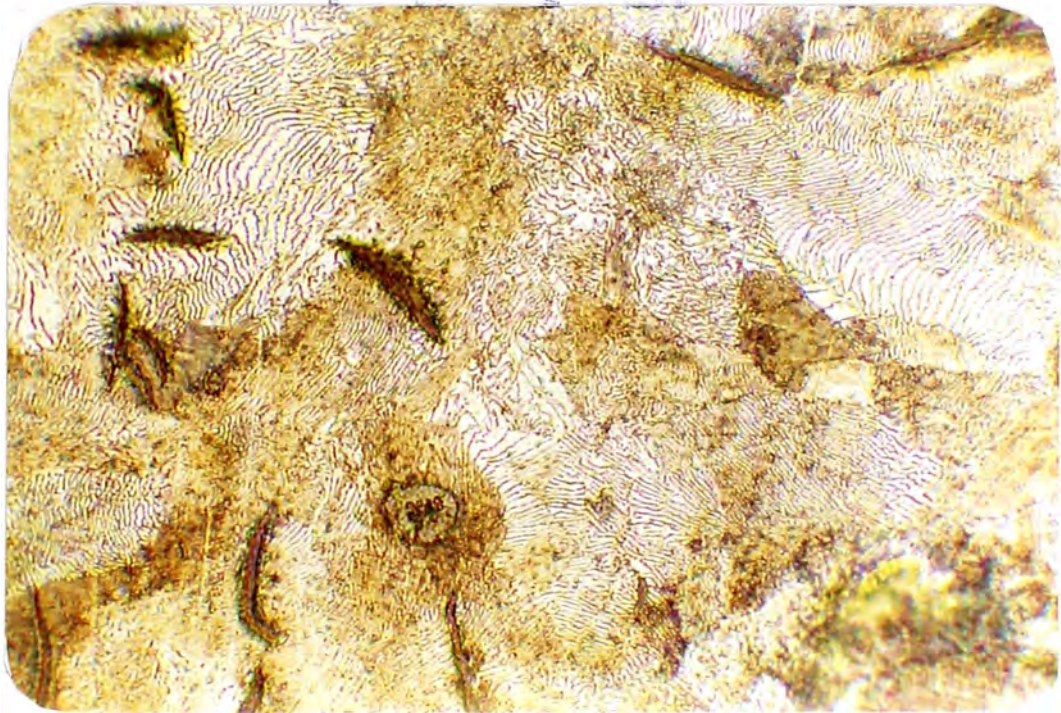


**Fig. 17 b.-** Microestructura de un hierro gris inoculado con Cu/Fe-Si, 0.500/0.250 . Atacado con Nital 2% , X 500 .





**Fig. 18 a.-** Microestructura de un hierro gris, inocul.  
con I-25/Cu , 0.350/0.625 . Sin ataque X100.



**Fig. 18 b.-** Microestructura de un hierro gris, inocul.  
con I-25/Cu , 0.350/0.625. Atacado con  
Nital 2% , X 500 .



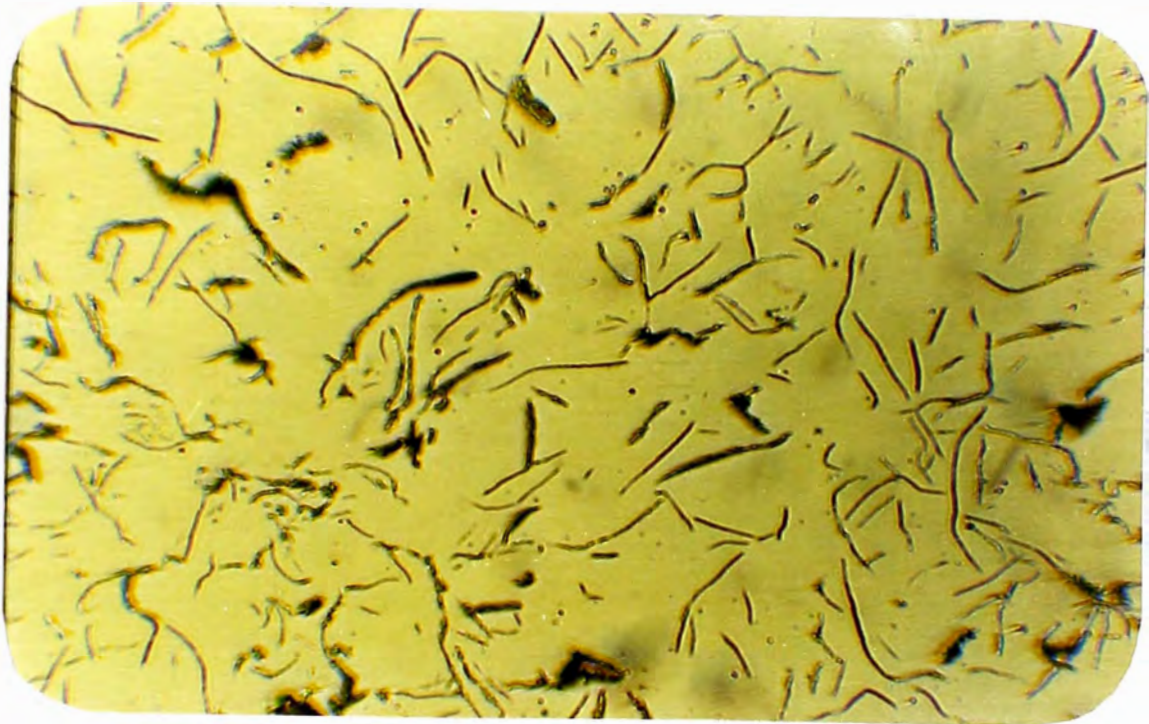


Fig. 19 a.- Microestructura de un hierro gris inocul.  
con I-25/Fe-Cr/Cu , 0.200/0.500/0.625 .  
Sin ataque , X 100 .

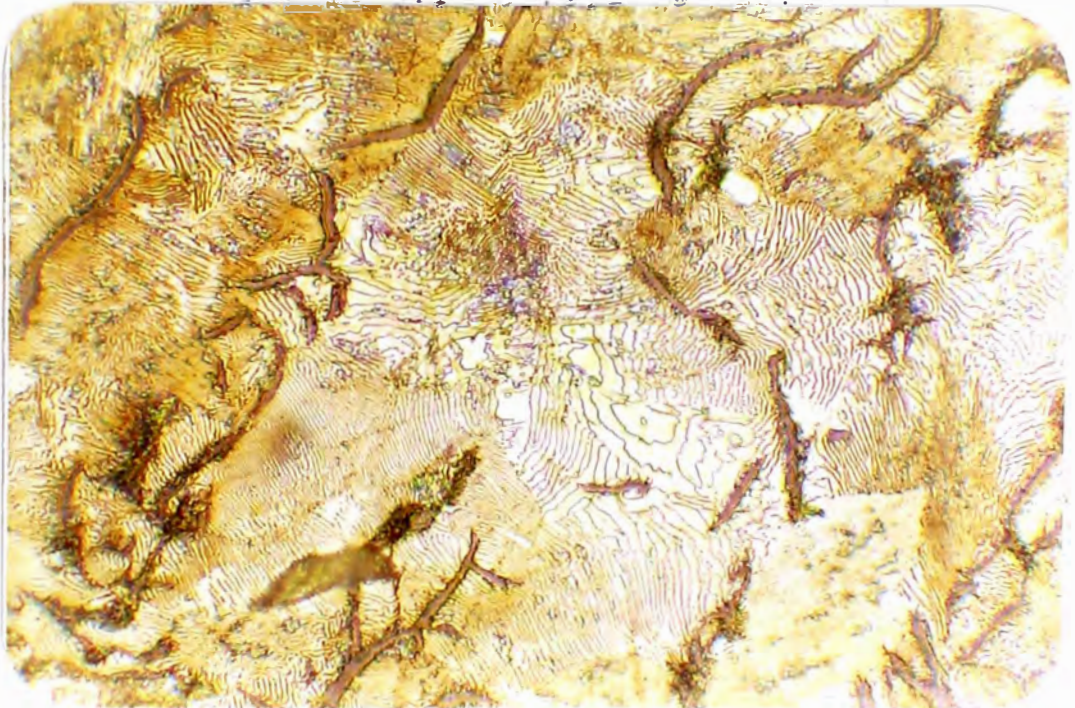
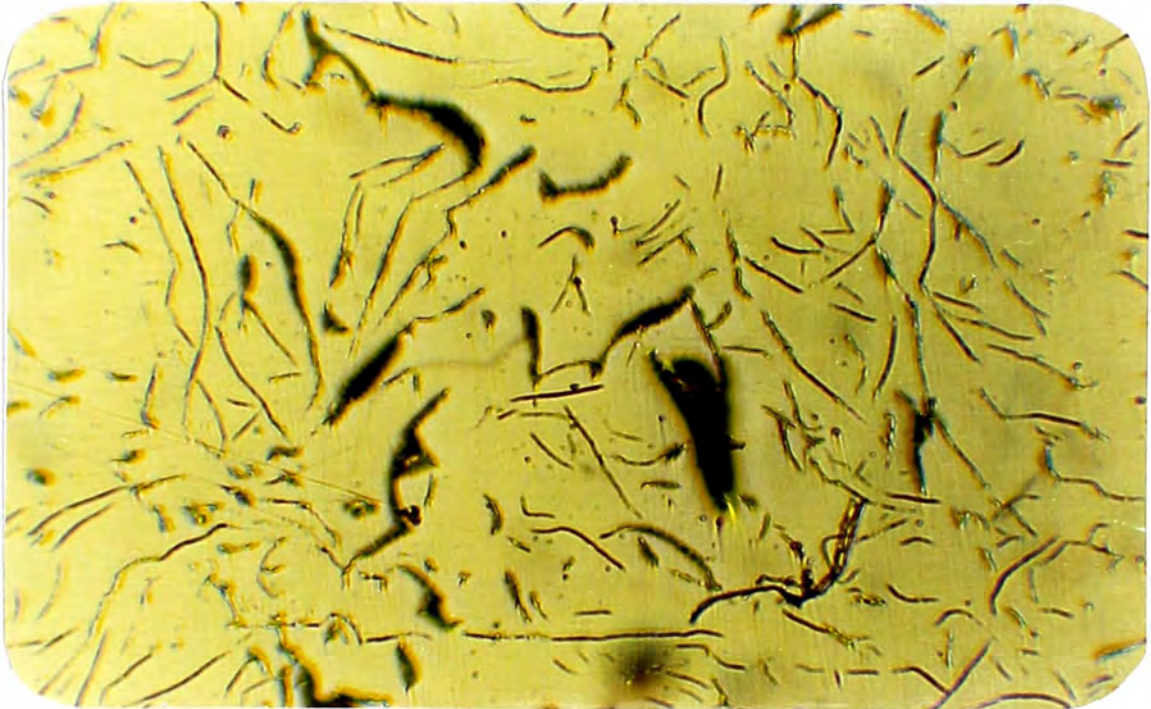
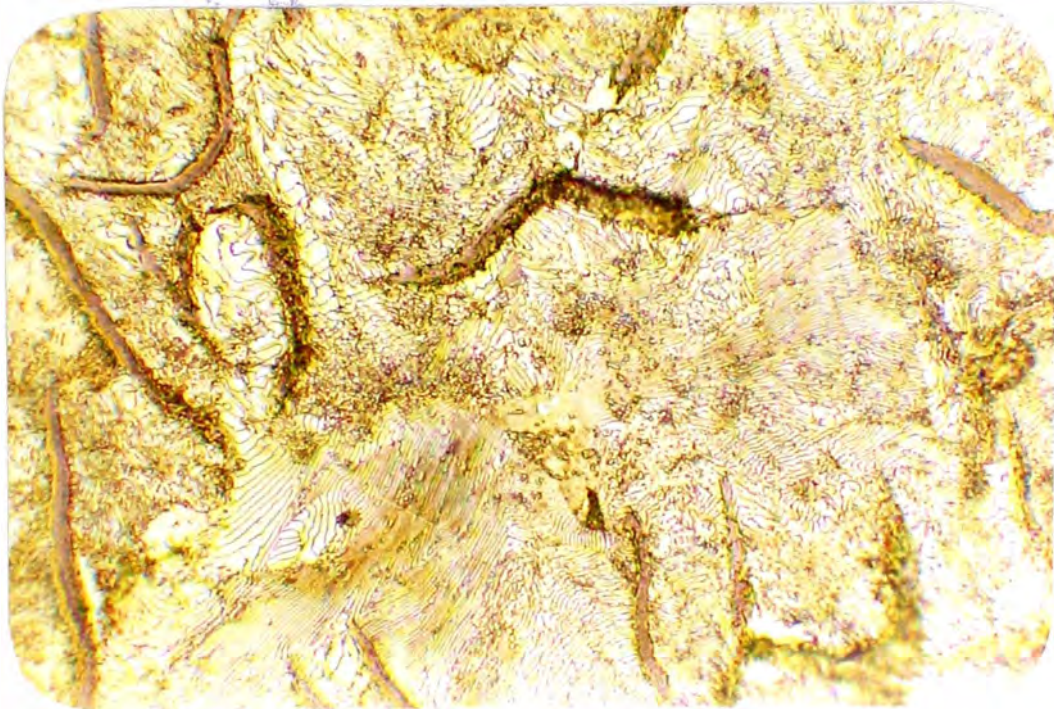


Fig. 19 b.- Microestructura de un hierro gris inocul.  
con I-25/Fe-Cr/Cu , 0.200/0.500/0.625 .  
Atacado con Nital 2% , X 500 .



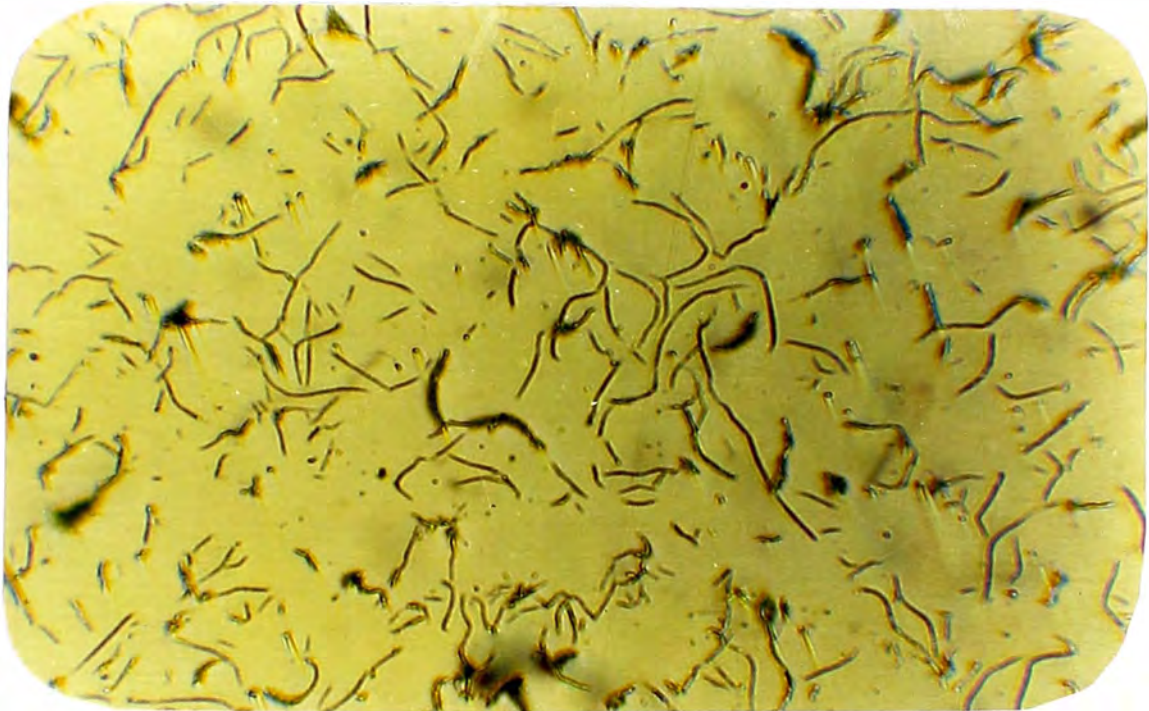


**Fig. 20 a.-** Microestructura de un hierro gris inocul.  
con I-25/Cu , 0.200/0.625 . Sin ataque  
X 100 .

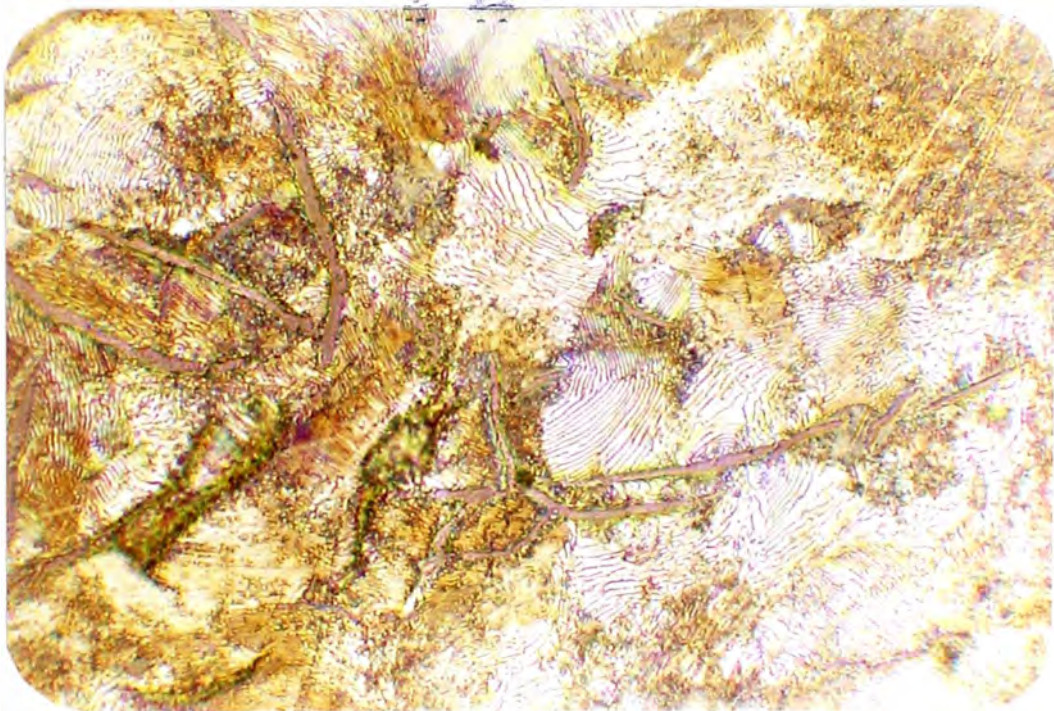


**Fig. 20 b.-** Microestructura de un hierro gris inocul.  
con I-25/Cu , 0.200/0.625 . Atacado con  
Nital , X 500 .



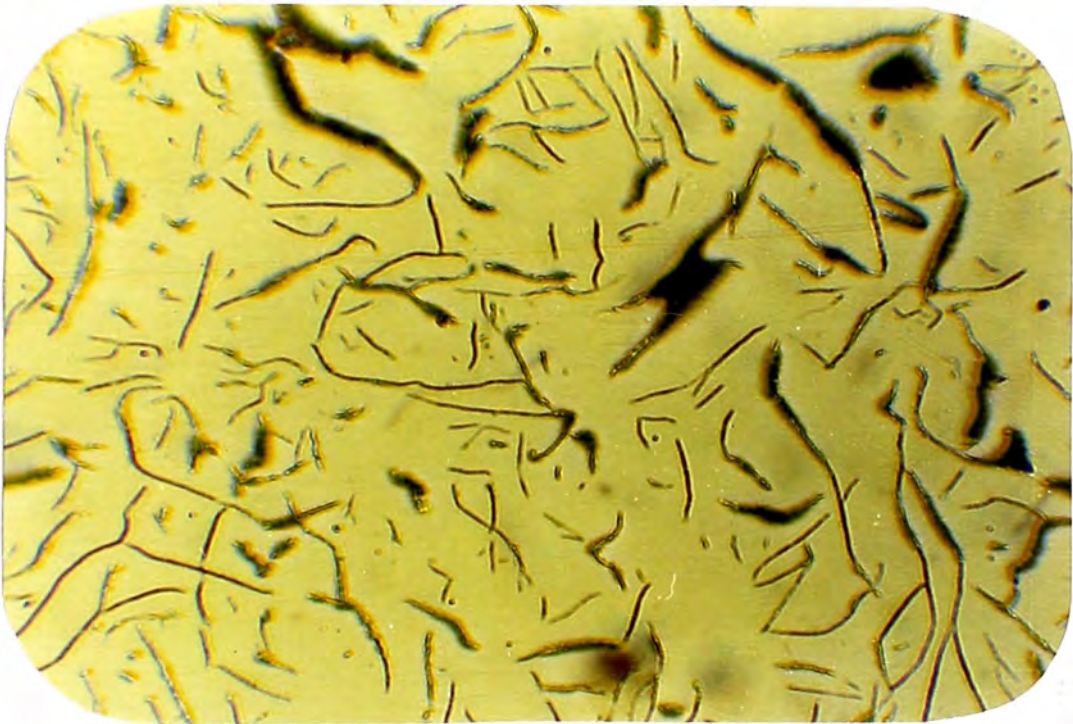


**Fig. 21 a.-** Microestructura de un hierro gris inocul. con Bi/I-25/Cu , 0.005/0.350/0.750 . Sin ataque , X 100 .



**Fig. 21 b.-** Microestructura de un hierro gris inocul. con Bi/I-25/Cu , 0.005/0.350/0.750 . Atacado con Nital 2% , X 500





**Fig. 22 a.- Microestructura de un hierro gris sin inocular . Sin ataque, X 100 .**



**Fig. 22 b.- Microestructura de un hierro gris sin inocular . atacado con Nital 2% X 500 .**





Fig. 23 a.- Microestructura de un hierro gris sin inocular . Sin ataque , X 100 .

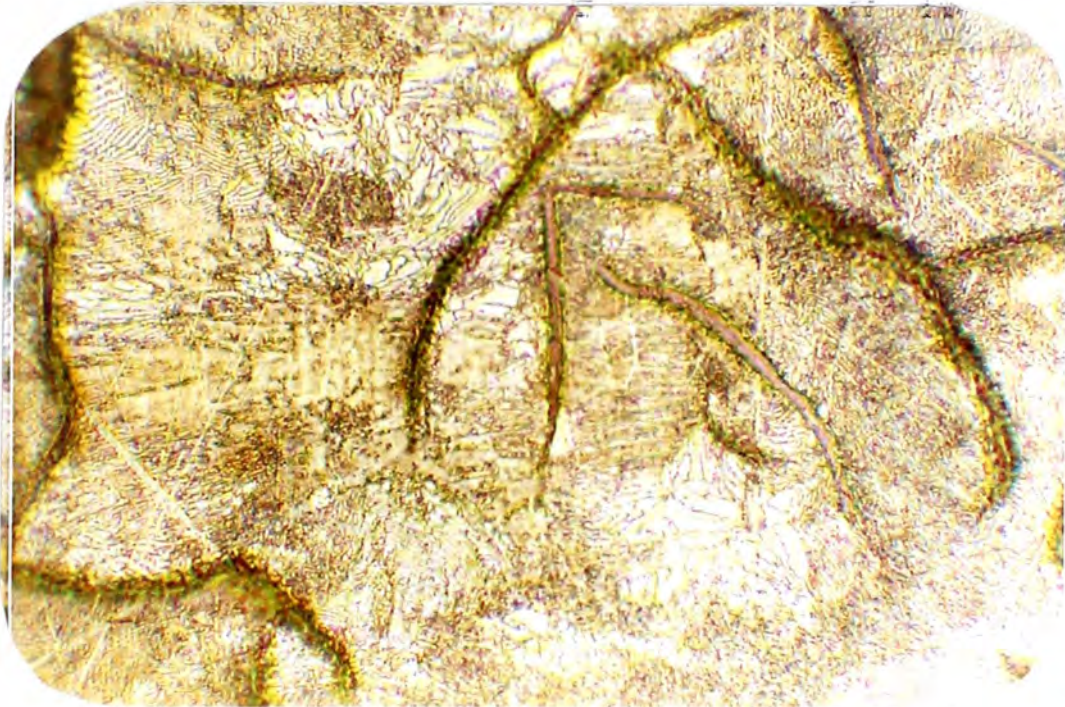


Fig. 23 b.- Microestructura de un hierro gris sin inocular . Atacado , Nital 2% X 500 .



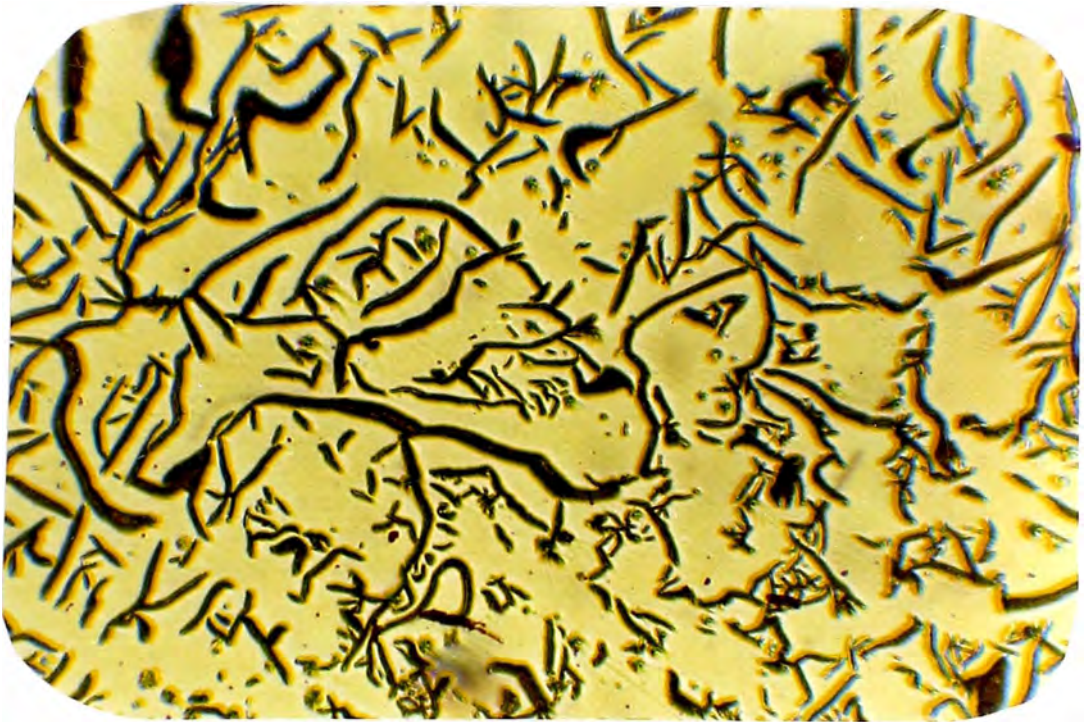


Fig. 24 a.- Microestructura de un hierro gris sin inocular . Sin ataque , X 100 .

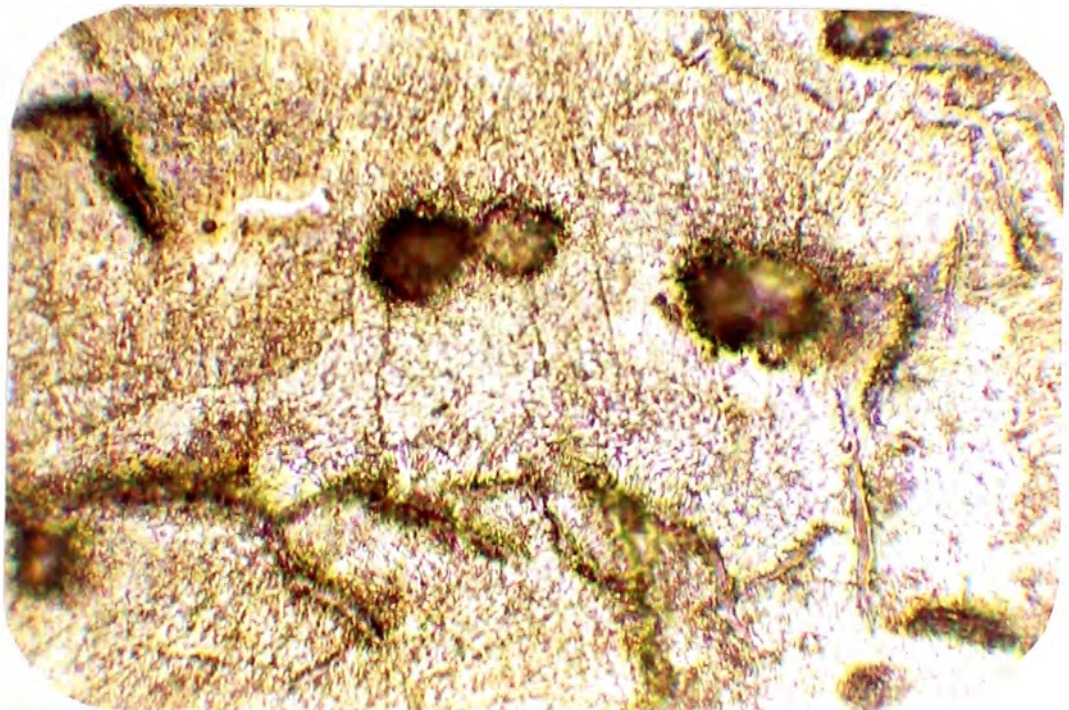


Fig. 24 b.- Microestructura de un hierro gris sin inocular . Atacado con Nital 2% X 500 .



**LEYENDA**

1. HORNO
2. CHIMENEA
3. VENTILADOR
4. QUEMADOR
5. PRECALENTADOR B AIRE
6. MOTOREDUCTOR 12 HP
7. MOTOR 15 HP

FUND. MALEABLE S. A.

HORNO ROTATORIO (2.2 Tn.)

ESC. = 1:25      DIB.: W. CASTRO P.

FECHA = 18-3-87

