

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

ESCUELA DE GRADUADOS



**FABRICACION DE MOLDES PARA ELABORACION
INDUSTRIAL DE GALLETAS A PARTIR DE UNA
FUNDICION DE HIERRO GRIS**

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA

MOISES HINOJOSA RIVERA

MONTERREY, N. L. SEPTIEMBRE DE 1991

TM

Z5853

.M2

FIME

1991

H5



1020070611

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

ESCUELA DE GRADUADOS



**FABRICACION DE MOLDES PARA ELABORACION
INDUSTRIAL DE GALLETAS A PARTIR DE UNA
FUNDICION DE HIERRO GRIS**

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

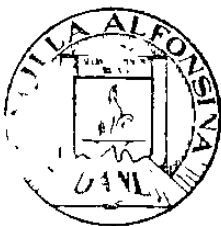
PRESENTA

MOISES HINOJOSA RIVERA

MONTERREY, N. L. SEPTIEMBRE DE 1991

TM
ZS853
-M2
FIME
/ /

2



FONDO TESIS

164043

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
ESCUELA DE GRADUADOS

FABRICACION DE MOLDES PARA ELABORACION INDUSTRIAL
DE GALLETAS A PARTIR DE UNA FUNDICION DE HIERRO GRIS

TESIS
QUE PRESENTA
MOISES HINOJOSA RIVERA

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

MONTERREY, N. L.

SEPTIEMBRE DE 1991.

Ubaldo M.

DR. UBALDO ORTIZ MENDEZ

ASESOR

Salvador Valtierra Gallardo

DR. SALVADOR VALTIERRA GALLARDO.

REVISOR

Rafael Colas Ortiz

DR. RAFAEL COLAS ORTIZ.

REVISOR

AGRADECIMIENTOS.

A Dios, por todo.

A mis padres por su apoyo, cariño y comprensión.

A la FIME. por brindarme la oportunidad de realizar estudios superiores.

A todos mis maestros.

Al CONACYT gracias a cuyo apoyo me fue posible realizar mis estudios de postgrado.

A mi asesor, Dr. Ubaldo Ortíz Méndez, por todo su apoyo.

Al Arq. Alfonso Cañamar, de GAMESA.

Al Ing. Luis A. Serna H., por su ayuda en la elaboración de este trabajo.

A todas aquellas personas que de alguna manera colaboraron en el desarrollo de esta tesis.

C O N T E N I D O.

	Pag.
Resumen.	7
1.- Introducción.	8
2.- Hierros fundidos.	9
2.1.- Generalidades.	9
2.2.- Clasificación y tipos de hierros fundidos.	10
2.3.- Composición química de los hierros fundidos.	15
2.3.1. Composición química y grafitización.	16
2.4.- Proceso de solidificación.	17
2.5.- Microestructura	21
2.6.- Influencia del azufre, fósforo, manganeso, oxígeno e hidrógeno.	22
2 7. Influencia de la velocidad de enfriamiento.	24
2 8.- Propiedades mecánicas y aplicaciones.	24
3.- Hierro fundido gris.	29
3.1.- Solidificación del hierro gris.	29
3.2. Estructura a temperatura ambiente.	30
3.3.- Efecto de la composición química.	32
3.4.- Morfología del grafito.	34
3.5. Sensibilidad al espesor.	36
3.6.- Clases de hierro gris	36
3.7.- Propiedades mecánicas y aplicaciones.	37

4.8.3.- Tratamiento térmico.	60
4.8.4. Microestructura.	60
4.9. Especificaciones.	62
4.9.1.- Material.	62
4.9.2.- Tratamiento térmico de relevado de estuerzos.	63
4.9.3.- Condición superficial.	63
4.10.- Beneficios obtenidos.	64
5.- Conclusiones.	65
Referencias bibliográficas.	67

RESUMEN.

Se caracterizaron diferentes moldes de hierro gris importados empleados en la elaboración de galletas, usando técnicas fundamentales de análisis. Sobre la base de estos resultados, se especificaron composiciones de hierros fundidos y procedimientos de fabricación de moldes usando materias primas nacionales y facilidades de la localidad. Los resultados demostraron que los moldes obtenidos según nuestras especificaciones sustituyen exitosamente a los anteriormente importados en las condiciones normales de operación.

I.- INTRODUCCION.

El hierro fundido es uno de los materiales más empleados en la industria. Su buena resistencia, versatilidad, bajo costo y facilidad de fabricación son algunas de las razones que lo hacen ser utilizado en aplicaciones desde elementos estructurales de maquinaria, hasta usos ornamentales. Existen varios tipos de hierro fundido, mereciendo particular atención el hierro gris, por ser el tipo de hierro fundido más frecuentemente utilizado.

El presente trabajo describe la aplicación de técnicas básicas de caracterización de materiales para la obtención de especificaciones de materiales y procedimientos de fabricación de moldes empleados en la elaboración de galletas. La empresa GAMESA utiliza moldes de hierro fundido que son importados de Inglaterra y Alemania. Con objeto de poder fabricar satisfactoriamente dichos moldes en la localidad, GAMESA auspició un estudio que permitió determinar el tipo particular de hierro fundido, su composición química; así como su microestructura, dureza y tratamiento térmico.

Como resultado de este estudio, se ha logrado fabricar, en la localidad, moldes de características equiparables a las de los moldes importados. Se ha obtenido un significativo beneficio económico y en tiempos de entrega como resultado de suprimir la importación de los moldes.

II.- HIERROS FUNDIDOS.

2.1 GENERALIDADES.

Los hierros fundidos son aleaciones de hierro que contienen más de 2% de carbono y de 1 a 4% de silicio. Generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, etc. Como el alto contenido de carbono tiende a hacer muy frágil el hierro fundido, la mayoría de los tipos manufacturados comercialmente contienen de 2.5 a 4% de carbono. Pueden obtenerse amplias variaciones en sus propiedades modificando el balance entre el carbono y silicio, agregando elementos aleantes y variando la práctica de vaciado y tratamiento térmico. Adquieren su forma definitiva directamente por colada. En general, no son dúctiles ni maleables, no pueden forjarse ni laminarse y tienen relativamente baja resistencia al impacto [Ref. 1, 2 y 3].

Las propiedades mecánicas de los hierros fundidos dependen en gran manera del tipo y distribución de los componentes microestructurales. Propiedades físicas como la conductividad térmica y la capacidad de amortiguamiento también son influenciadas por la microestructura. En cualquier tipo de hierro fundido, el componente microestructural que tiene el efecto más importante sobre las propiedades es el grafito libre. La estructura de la matriz que rodea al grafito libre también influencia las propiedades mecánicas [Ref. 1].

2.2.- CLASIFICACION Y TIPOS DE HIERROS FUNDIDOS.

Existen varias maneras de clasificar a los hierros fundidos. La forma más sencilla es la tradicional, que los clasifica, según la apariencia de sus superficies de fractura, en hierro blanco, hierro gris y hierro atruchado o manchado (mottled iron).

No resulta satisfactorio clasificarlos por composición química, ya que los rangos de composición de los diferentes tipos de hierros fundidos se traslapan, en muchos casos, una misma composición puede resultar en cualquiera de los cuatro tipos básicos (blanco, gris, dúctil o maleable).

Una mejor clasificación se obtiene considerando la microestructura, dividiéndose así los hierros fundidos en tres grandes grupos [Ref. 3].

- 1.- Hierros en los que todo el carbono se encuentra combinado formando cementita y que al romperse presentan fractura de hierro blanco.
- 2.- Hierros en los que todo el carbono se encuentra libre, en forma de grafito.
- 3.- Hierros en los que parte del carbono se encuentra combinado formando cementita y parte libre en forma de grafito. A este grupo pertenecen la mayoría de las fundiciones que se fabrican.

Los diversos tipos de hierros fundidos son el resultado de la interacción de variables tales como el contenido de carbono, contenido de aleantes e impurezas, velocidad de

enfriamiento, tratamiento térmico, etc. A continuación se dan definiciones de los diferentes tipos de hierro fundido [Ref. 1, 2 y 3].

Hierro gris.- Hierro de composición química tal que, después de solidificar, una gran parte de su carbono queda distribuida como grafito en forma de hojuelas. Presenta una superficie de fractura de color gris (Fotos 5-11).

Hierro blanco.-Hierro de composición tal que, al solidificar, el carbono se encuentra combinado químicamente formando cementita. Presenta una superficie blanca al fracturarse (Fig.I).

Hierro atruchado o manchado (mottled iron).- Hierro de composición intermedia que solidifica parcialmente como hierro blanco y parcialmente como hierro gris (Fig.II).

Hierro enfriado rápidamente (chilled iron).- Hierro que normalmente solidificaría como gris pero que solidifica como hierro blanco en partes donde es enfriado rápidamente ("templado").

Hierro maleable.- Hierro con ductilidad o maleabilidad, producido por tratamiento térmico (maleabilización) de un hierro blanco de composición adecuada. El carbono se presenta como partículas redondas irregulares, conocidas como "carbono revenido" (Fig.III).

Hierro nodular.- También conocido como hierro dúctil. Es hierro que recibe un tratamiento especial en estado fundido, con una pequeña adición de magnesio, cerio u otro agente que provoque que una gran parte del carbono

adopte la forma de esferoides de grafito. La ductilidad se obtiene como resultado de la forma esferoidal de los nódulos de grafito (Fig.IV).

Hierro aleado.- Este tipo de hierro contiene Ni, Cr, Mo, Cu, etc; en porcentajes suficientes para mejorar las propiedades mecánicas de los hierros ordinarios o para comunicarles alguna otra propiedad especial, como alta resistencia a la corrosión, al calor, etc.

Hierro de grafito compactado (hierro vermicular).- Es hierro con estructura intermedia entre las del hierro gris y hierro nodular. Se caracteriza porque el grafito está interconectado dentro de celdas eutécticas. Este tipo de hierro se obtiene por medio de un proceso muy similar al empleado en hierro nodular.



FIG. I



FIG. II



FIG. III

FIG. I.- Microestructura de hierro blanco. Se observan agrupamientos pseudoeutecticos de pequeñas partículas de perlita sobre un fondo de cementita. Las grandes masas negras son perlita.

FIG. II.- Hierro atruchado. A la izquierda la microestructura es de hierro gris y a la derecha, de hierro blanco.

FIG. III.- Nodulos de grafito en matriz ferritica en un hierro maleable.



FIG. IV

FIG. IV.- Hierro nodular. Se observa grafito esferoidal sobre un fondo de perlita y ferrita.

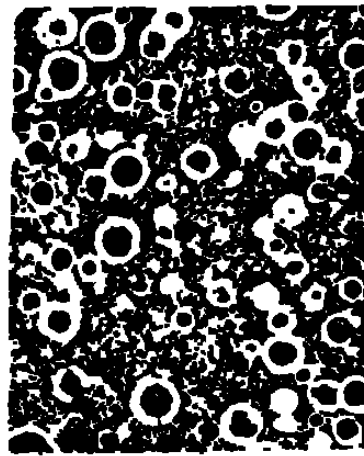


FIG. V

FIG. V.- Hierro nodular en el que se aprecia la típica estructura 'cico de puey'.



FIG VI

FIG. VI.- Eutectico extendida en un hierro gris con alto contenido de fósforo.

2.3.- COMPOSICION QUIMICA DE HIERROS FUNDIDOS.

En la tabla I se dan los límites de composición de algunos hierros fundidos. Una visión de los rangos de composición respecto al carbono y silicio se ilustra en la Fig. 1. Nótese los traslapes de las composiciones de los diferentes tipos [Ref. 2].

Tabla I.

Elemento	%			
	H. gris	H.blanco * (maleable)	H. gris alta resistencia	H.nodular**
Carbono	2.5-4.0	1.8-3.6	2.8-3.3	3.0-4.0
Silicio	1.0-3.0	0.5-1.9	1.4-2.0	1.8-2.8
Manganeso	0.4-1.0	0.25-.80	0.5-0.8	0.15-0.90
Fósforo	0.05-0.25	0.06-0.20	0.12 max	0.03
Azufre	0.05-1.0	0.06-0.18	0.15 max	0.10

* Tales composiciones pueden ser convertidas a hierro maleable por tratamiento térmico.

** Por requerimiento de proceso contienen de 0.01 a 0.10% de Mg.

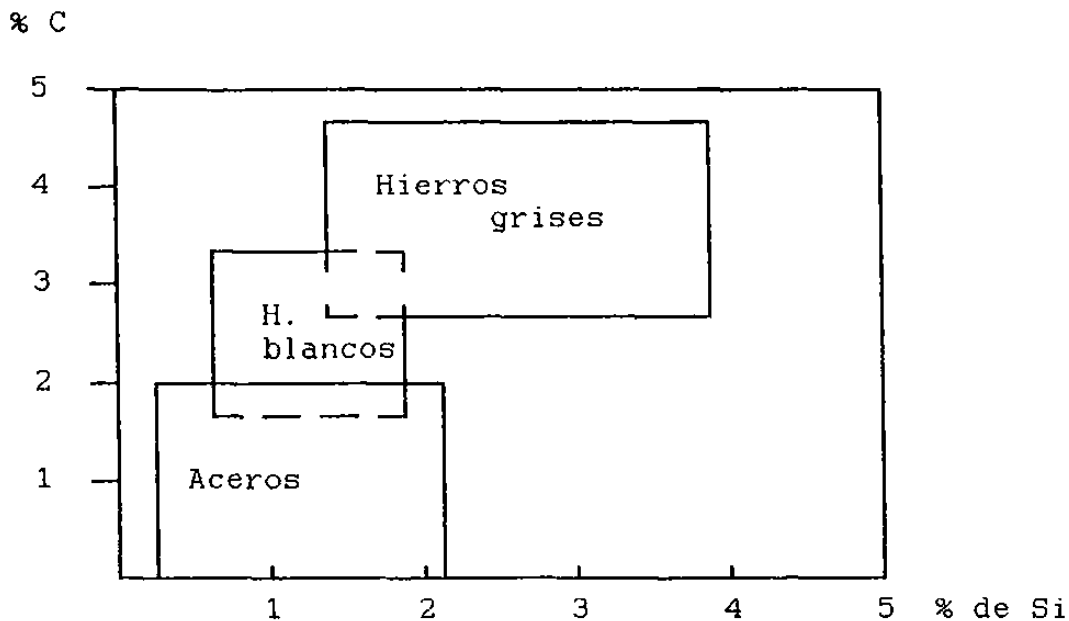


Fig. 1

Contenidos en carbono y en silicio correspondientes a las hierros grises, a las hierros blancos y a los aceros.

2.3.1.- COMPOSICION QUIMICA Y GRAFITIZACION.

Los contenidos de carbono y silicio influyen en la naturaleza de los hierros fundidos. Para simplificar el efecto de ambos elementos en el proceso de solidificación se utiliza el concepto de carbono equivalente (CE) :

$$CE = \% C + (\% Si / 3)$$

ó; en forma más precisa, considerando el efecto del fósforo :

$$CE = \% C + (\% Si + \% P) / 3$$

Hierros con CE igual a 4.3 son considerados eutécticos.

Hierros con CE menor a 4.3 son considerados hipoeutécticos.

Hierros con CE mayor a 4.3 son considerados hipereutécticos.

Tanto el carbono como el silicio promueven la formación de grafito al aumentar su porcentaje en el hierro.

Grafitización es el proceso por el cual el carbono libre es precipitado en el hierro, o bien, el carbono combinado en la cementita pasa a carbono libre (grafito). Al aumentar el porcentaje de carbono en un hierro, especialmente sobre 2.0, aumenta la factibilidad de grafitización. La presencia del silicio provoca que el carburo de hierro sea más inestable y así favorece la formación del grafito. Como puede verse en la fig. 1, los contenidos de carbono y silicio pueden ser variados para obtener hierro gris o blanco según se quiera. Otra variable que debe considerarse, ya que afecta la grafitización, es la velocidad de enfriamiento (que depende del espesor de las piezas y del tipo de molde) [Ref. 1, 2, 3].

2.4.- PROCESO DE SOLIDIFICACION.

Las diferencias entre los diferentes tipos de hierros fundidos quedan establecidas en gran medida durante la solidificación. En rigor, el proceso de solidificación debe analizarse utilizando el diagrama de equilibrio ternario Fe - C - Si. Sin embargo, las ideas esenciales pueden describirse con ayuda de un diagrama simplificado como el de la Fig. 2. Con referencia a este diagrama, la solidificación y enfriamiento de un hierro de composición A, puede describirse en las siguientes etapas :

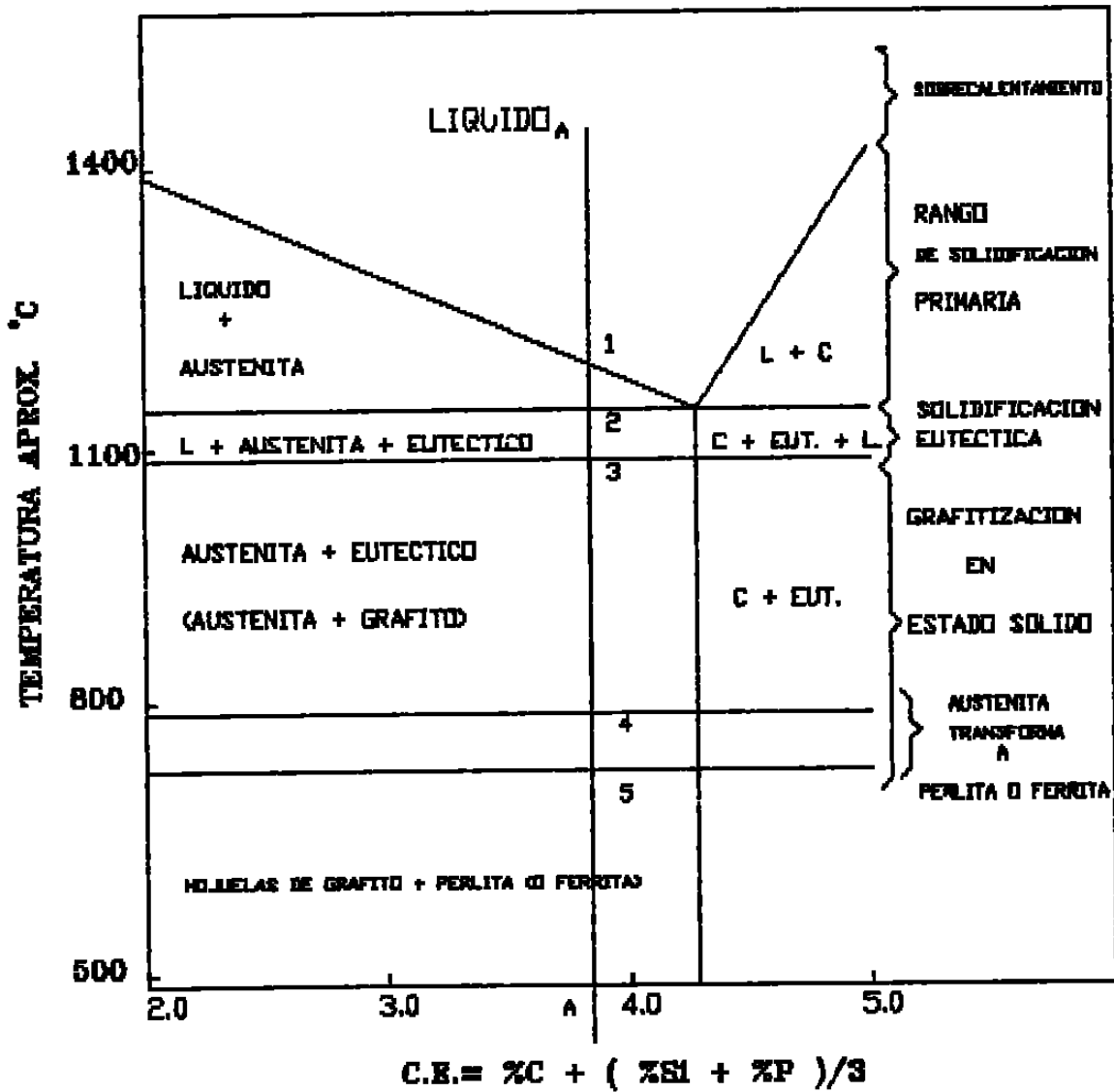


FIG. 2

- 1.- Al enfriarse el hierro en estado fundido, la solidificación empieza en el punto 1. Se forman dendritas de austenita y crecen hasta que se alcanza el punto 2, donde el líquido alcanza la composición eutéctica. Cuando la composición es eutéctica este paso no se presenta.
- 2.- Al continuar el enfriamiento, comienza la solidificación eutéctica. El sólido eutéctico formado puede ser una mezcla de austenita y carburo de hierro o austenita y grafito. Cuando se forma carburo, el hierro solidifica como blanco. Si se forma grafito, el hierro puede solidificar como hierro gris o nodular. Se formará grafito si el contenido de silicio es alto y/o el enfriamiento es lento. Bajos contenidos de silicio y altas velocidades de enfriamiento favorecerán la formación de carburo y austenita (hierro blanco). Al descender la temperatura hasta el punto 3 la solidificación es completa.
- 3.- El enfriamiento entre los puntos 3 y 4 resulta en la precipitación del carbono presente en la austenita, puesto que la solubilidad del carbono en austenita disminuye desde 2.0 % al final de la solidificación, hasta entre 0.6 y 0.8 % en el punto 4. El exceso de carbono precipita como carburo en hierros blancos y como grafito en hierro gris o nodular.
- 4.- Entre los puntos 4 y 5 ocurre el cambio final, ya en estado sólido. La austenita se transforma en una forma

algo compleja. Bajo condiciones favorables de grafitización, se forma ferrita en hierros grises y nodulares. Con condiciones menos favorables para grafitización, se forma ferrita y perlita o solamente perlita. En hierro nodular, se forman estructuras de ferrita y perlita conocidas como "ojos de buey" alrededor de los esferoides de grafito (Fig.V). En hierros blancos solo se forma perlita.

- 5.- Enfriamiento posterior hasta la temperatura ambiente produce poco cambio en el hierro.

2.5.- MICROESTRUCTURA.

Las propiedades de cualquier metal dependen en gran parte de su microestructura . A continuación se describen los componentes microestructurales que aparecen en los diferentes tipos de hierros fundidos [Ref. 1, 2, 3 y 4].

La apariencia de estos componentes puede verse en las figuras I a VI, en páginas anteriores.

Grafito.-Es una forma elemental del carbono. Se presenta en algunas clases de fundiciones , teniendo importante influencia en sus propiedades. Estas dependen fundamentalmente de la forma del grafito, de su tamaño , cantidad y distribución . Puede adoptar forma de hojuelas (hierro gris), nódulos o esferoides (hierro nodular, hierro maleable) u otras formas. La nula ductilidad del hierro gris se debe a las hojuelas de grafito. El grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión.

Cementita.- Es carburo de hierro. Es muy duro y frágil. El carbono forma cementita hasta una cantidad igual a 15 veces el contenido en peso del carbono. Así, un hierro blanco con 2.5% C contendrá alrededor de 37.5% de cementita, por lo que será muy duro y frágil. La cementita aparece también como componente de la perlita.

Ferrita.- Es hierro alfa, el cual puede presentarse como ferrita libre o como componente de la perlita. Suele contener en solución cantidades importantes de silicio

que aumentan su dureza y resistencia.

Perlita.- Es una mezcla de ferrita y cementita arregladas en láminas alternas. La perlita es resistente, de dureza moderada y posee cierta ductibilidad. Debido a la presencia del silicio, el contenido de carbono de la perlita en hierro fundido es inferior al de los aceros.

Esteadita.- Es un compuesto de naturaleza eutéctica que aparece en los hierros de alto contenido en fósforo ($P > 0.15\%$). Es muy duro y frágil (Fig.VI).

Ledeburita.- Es el eutéctico que se forma en el enfriamiento de los hierros fundidos. Está formado por 52% carburo de hierro y 48% austenita. No existe a temperatura ambiente en hierros ordinarios, debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita. Sin embargo, se pueden conocer las zonas donde existió por el aspecto eutéctico con que quedan esas agrupaciones de perlita y cementita (Fig.VI).

Austenita.- Es hierro gamma con carbono en solución. En el enfriamiento se transforma a perlita, ferrita o a una mezcla de ambas. A temperatura ambiente, puede presentarse en hierros aleados.

2.6.- INFLUENCIA DEL AZUFRE, FOSFORO, MANGANESO, OXIGENO E HIDROGENO EN LOS HIERROS FUNDIDOS.

La influencia del azufre, fósforo, manganeso, oxígeno e hidrógeno sobre la microestructura de los hierros se detalla

a continuación [Ref. 3].

Azufre.— Se opone a la grafitización del carbono y favorece la formación de cementita. Los contenidos de azufre suelen variar de 0.01 a 0.2%. Tiende a reaccionar con el hierro para formar sulfuro de hierro (FeS). Este compuesto de baja fusión aumenta la probabilidad de que haya fisuras a altas temperaturas.

Manganeso.— Se opone a la grafitización del carbono, tiende a blanquear los hierros. Tiene mayor afinidad por el azufre que el hierro, formando sulfuro de manganeso (MnS) e impidiendo la formación de FeS. Los hierros contienen de 0.4 a 1.5% de Mn.

Fósforo.— Se añade a veces intencionalmente para favorecer la fluidez. Su presencia da lugar a un aumento de la fragilidad y dureza. Forma el eutéctico esteadita, que aparece siempre en las uniones de los granos, ya que por su bajo punto de fusión, este eutéctico es el último de los constituyentes que solidifica. Un contenido normal de fósforo es de, por ejemplo, 0.15%; se emplean contenidos más bajos cuando se desea alta resistencia y más elevados, hasta 1.5%, cuando se desea alta colabilidad.

Oxígeno.— Es un antigrafitizante energético. El porcentaje de oxígeno en los hierros suele variar de 0.002 a 0.020%. Con altos contenidos de oxígeno la colabilidad disminuye mucho, se producen rechupes importantes y la estructura puede sufrir sensibles modificaciones.

Hidrógeno.- Se presenta como impureza gaseosa, da lugar a porosidades en las piezas cuando el porcentaje es importante. La solubilidad del hidrógeno aumenta con el porcentaje de silicio. Por ello, las fundiciones altas en silicio suelen ser más porosas que las de bajo contenido en silicio.

2.7.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LOS HIERROS FUNDIDOS.

La velocidad de enfriamiento es otro factor que influye en la calidad y microestructura de los hierros fundidos. Depende del espesor de las piezas y de la clase de molde empleado. Enfriamientos rápidos tienden a producir hierro blanco, mientras que los enfriamientos lentos favorecen la grafitización y, por lo tanto, la obtención de hierro gris. Los espesores pequeños se enfrían mucho más rápidamente que los grandes. Un molde metálico enfría más rápidamente que un molde de arena [Ref. 1, 6].

2.8.- PROPIEDADES MECANICAS Y APLICACIONES.

Las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de hierro varían dentro de rangos muy amplios. Aún hierros del mismo tipo presentan grandes variaciones en propiedades debido a diferencias en su estructura y composición. Por estas razones no resulta fácil englobar las propiedades

mecánicas de los hierros fundidos . Cada miembro de la familia de hierros fundidos debe considerarse como una serie de aleaciones con su propio rango de propiedades.

A continuación se exponen algunas generalidades respecto a las propiedades mecánicas de los hierros fundidos [Ref. 1, 3, 5].

Hierro blanco. - El uso principal del hierro blanco es como materia prima para elaborar hierro maleable.

Algunos hierros blancos se utilizan como tales por su alta dureza y resistencia al desgaste. Su microestructura consta de perlita y un gran porcentaje de cementita, por lo que presenta durezas de 350 a 600 BHN o más.

Dureza Brinell 350 - 600

Resistencia tensil 20,000 a 70,000 lb/pulg².

Módulo elástico 24 a 28 x 1 millón lb/pulg².

Usos : Camisas para mezcladores de cemento, boquillas de extrusión, bolas de trituración, etc.

Hierro maleable. - Con el tratamiento térmico de maleabilización , el carbono queda como grafito en forma de nódulos compactos que no rompen la continuidad de la matriz, dando como resultado una buena ductilidad. Los nódulos de grafito actúan como lubricante de las herramientas de corte, lo cual explica la alta maquinabilidad del hierro maleable.

Dependiendo del tratamiento térmico, pueden obtenerse hierros maleables de matriz perlítica o ferrítica, con propiedades muy diferentes. Los hierros maleables perlíticos pueden convertirse a martensíticos por tratamiento térmico

posterior. Debido a que todos los hierros maleables se obtienen por tratamiento térmico, sus propiedades son muy uniformes en las piezas.

Los principales usuarios del hierro maleable son la industria automotriz y la industria de equipo agrícola y construcción de maquinaria.

La Tabla II muestra propiedades de varios tipos de hierros maleables.

	Resistencia tensil mín. psi	Esfuerzo de cedencia mín. psi	Elongación mínima % en 2 pul	Dureza Brinell Típica
Ferríticos maleables				
35018	53,000	35,000	18.0	110-145
32510	50,000	32,500	10	110-145
Perlíticos maleables				
45010	65,000	45,000	10	163-207
50007	75,000	50,000	7	179-228
80002	100,000	80,000	2	241-269

|Tabla II.-Propiedades de varios tipos de hierros maleables. |

Hierro gris.- Sus propiedades y aplicaciones se exponen más adelante.

Hierro nodular.- Esta familia de aleaciones combina las ventajas del hierro gris (bajo punto de fusión, buena fluidez, excelente maquinabilidad y buena resistencia al desgaste) con las ventajas del acero (alta resistencia, tenacidad, ductilidad, etc.).

La matriz puede ser controlada por la composición,

práctica de vaciado y/o tratamiento térmico para producir desde hierros con resistencia mínima a tensión de 60,000 psi y 25% de elongación hasta hierros con resistencia de 150.000 psi y 1% de elongación.

La Tabla III resume propiedades y aplicaciones de hierros nodulares.

Grado o clase	Dureza HB	Resistencia tensil		Esfuerzo cedencia		Elongación mínima en 2 pul. (%)
		MPa	Ksi	MPa	Ksi	
60-40-18	143-147	414	60	276	40	18
80-55-06		552	80	379	55	6
120-90-02 (martensítico)		827	120	621	90	2
D5506	187-255	552	80	379	55	6

Grado o Clase	Aplicaciones típicas
60-40-18	Válvulas para vapor y plantas químicas.
80-55-06	Cigüeñales, engranes.
120-90-02 (martensítico)	Piñones, engranes.
D5506	Cigüeñales.

Tabla III.-Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de algunos tipos estándar de hierro nodular.

Hierros aleados.— Los hierros aleados poseen propiedades especiales para aplicaciones específicas como resistencia a la corrosión, al calor, al desgaste o cuando se requiere excepcional resistencia mecánica. Su rango de propiedades es tan amplio que aquí solo se comentan algunas generalidades.

Los hierros de baja y media aleación, que contienen pequeños porcentajes de Ni, Cr, Mo y Cu, son fundiciones de alta resistencia a la tracción, de 35,000 a 71,000 psi. En este grupo se encuentran hierros con 1 a 2% de cromo, resistentes al calor y hierros martensíticos de alta resistencia al desgaste. Los hierros de alta aleación son, en general, de muy alta resistencia al calor y a la corrosión.

La Tabla IV muestra las composiciones de algunos hierros aleados de alta resistencia, así como ejemplos de aplicación.

Aplicación	Composición (%)						
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni
Camisas de cilindros de motores automotric.	3.25	2.2	0.6	0.5	1.0	1.0	0.2
Tambores de freno	3.3	2.25	0.65	0.30	--	--	0.25
Cigüeñales	1.5	0.95	0.70	0.45	1.75	--	--
Bancadas de máquinas	3.3	1.6	0.6	0.25	--	0.20	1.00
Rodillos de laminación en caliente	3.1	0.6	0.2	0.4	--	0.4	3.5

Tabla IV.— Composiciones de algunos hierros aleados.

III.- HIERRO FUNDIDO GRIS.

Una característica distintiva del hierro gris es que en el todo el carbono, o una importante parte, se encuentra como grafito en forma de hojuelas. Las propiedades físicas y mecánicas del hierro gris varían dentro de amplios rangos respondiendo a factores como la composición química, velocidad de enfriamiento, microestructura, forma y tamaño de las hojuelas de grafito, naturaleza de la matriz, tamaño y espesor de las piezas, práctica de vaciado y tratamiento térmico.

3.1.- SOLIDIFICACION DEL HIERRO GRIS.

La microestructura y propiedades del hierro gris quedan determinadas, en gran medida, durante el proceso de solidificación. Para que el hierro solidifique como gris es necesaria la presencia de elementos grafitizantes. El contenido de silicio es el factor más importante que promueve la grafitización. El proceso de grafitización puede dividirse en tres etapas:

- 1.- Grafitización durante la solidificación.
- 2.- Grafitización por precipitación del carbono en exceso en austenita.
- 3.- Grafitización durante la transformación eutectoide.

En un hierro gris hipereutético (en términos de carbono equivalente, C.E.), la solidificación empieza con la precipitación de grafito en el metal líquido (grafito kish).

Este grafito crece como hojuelas que tienden a subir hacia la superficie debido a su baja densidad. Al descender la temperatura, el líquido restante solidifica como una estructura eutéctica de austenita y grafito. Generalmente, el grafito eutéctico es más fino que el grafito kish.

En un hierro hipoeutéctico, la solidificación empieza con la formación de dendritas de austenita. Al descender la temperatura, las dendritas crecen y el líquido se enriquece de carbono. Al alcanzarse el contenido y temperatura eutéctica empieza la solidificación de la mezcla eutéctica de austenita y grafito. En aleaciones de composición eutéctica la solidificación se manifiesta sin la formación de constituyentes proeutécticos.

3.2.- ESTRUCTURA A TEMPERATURA AMBIENTE.

Enfriamiento posterior provoca la precipitación del carbono en exceso en austenita. Al alcanzarse la temperatura eutectoide se presenta una nueva transformación cuyos productos dependen de la velocidad de enfriamiento y composición de la austenita. Bajo condiciones normales, la austenita se transforma a perlita o a ferrita y grafito.

La transformación a ferrita es favorecida por:

- a) Enfriamiento lento, que permite mayor tiempo para la migración del carbono.
- b) Altos contenidos de silicio, que promueven la formación de grafito.

c) Altos valores de C.E.

d) La presencia de hojuelas finas de grafito (tipo D) subenfriadas.

Cuando se tienen bajos valores de C.E. o la rapidez de enfriamiento es alta, se favorece la formación de perlita. En algunos casos la microestructura contiene las tres fases: ferrita, perlita y grafito. Con ciertas composiciones, especialmente en hierros aleados, es posible obtener estructuras martensíticas [Ref. 1].

3.3.- EFECTO DE LA COMPOSICION QUIMICA.

A continuación se describe brevemente el efecto sobre la microestructura, de los principales elementos encontrados en el hierro gris [Ref. 1, 2, 3, 4].

Carbono.- Los hierros grises contienen, típicamente, de 2.5 a 4.5% de carbono total. El carbono puede encontrarse como grafito en las hojuelas, o bien, combinado en la cementita.

El grado de grafitización puede expresarse como:

$\% \text{ carbono total} = \% \text{ grafito} + \% \text{ carbono combinado}.$

Si la grafitización es completa, como ocurre en hierros grises ferríticos, el porcentaje de carbono total será igual al porcentaje de grafito.

Porcentajes de carbono combinado de 0.5 a 0.8% generalmente indican que la estructura de la matriz es principalmente perlítica.

Para que un hierro solidifique como gris es necesario un contenido mínimo de carbono total, alrededor de 2.2%, pero este valor depende del contenido de silicio.

Silicio.- Se encuentra presente en cantidades de 1 a 3.5% en hierro gris. Microestructuralmente, el silicio se encuentra disuelto en la ferrita. La cantidad de silicio tiene efecto sobre la solidificación, ya que favorece la solidificación de acuerdo con el sistema estable hierro-grafito. El silicio también tiene efecto sobre la transformación eutectoide. La perlita en un hierro gris con 2% de Si puede contener solamente 0.60% de carbono.

Azufre y Manganeso.- El azufre en hierro gris puede estar presente en cantidades de hasta 0.25%. Es un elemento que restringe la grafitización (estabiliza el carburo de hierro). El azufre forma FeS, que es indeseable. En presencia de manganeso se forma MnS, que aparece en forma de inclusiones distribuidas al azar. Sólo, el manganeso también es un estabilizador del carburo. Las siguientes reglas se aplican para regular las interacciones entre estos elementos:

- 1.- $1.7 (\%S) = \%Mn$; Porcentaje estequiométrico para formar MnS.
- 2.- $1.7 (\%S) + 0.15 = \%Mn$; Porcentajes de Mn que favorece la formación de un máximo de ferrita y un mínimo de perlita.
- 3.- $3 (\%S) + 0.35 = \%Mn$; Porcentaje de Mn que resultará en estructura perlítica.

Fósforo.- Se encuentra presente en cantidades de 0.1 a 0.9%. Provoca la formación de esteadita, que es un eutéctico ternario duro y frágil. La presencia de esteadita hace frágil al hierro fundido, de manera que el contenido de fósforo debe ser controlado cuidadosamente si se desean propiedades óptimas. El fósforo incrementa la fluidez, por lo que ocasionalmente es añadido cuando se fabrican formas complicadas.

3.4.- MORFOLOGIA DEL GRAFITO.

En el hierro gris, las hojuelas de grafito adoptan diferentes tipos o patrones. La Fig. 3 muestra los tipos de hojuelas según la norma ASTM A247 [Ref.1]. El tamaño de hojuela se determina por comparación con patrones de tamaño ASTM que muestran la apariencia de ocho tamaños de hojuela diferentes a 100 aumentos. En la Tabla V aparece la asignación de números.

Las hojuelas tipo A, de tamaño pequeño, son las que se prefieren para la mayoría de las aplicaciones. Los tamaños grandes interrumpen seriamente la continuidad de la matriz, reduciendo la resistencia y la ductilidad del hierro gris.

El mejor método para reducir el tamaño y mejorar la distribución de las hojuelas de grafito es la adición de inoculantes de ferrosilicio [Ref 6, 7].

Las hojuelas tipo B son típicas de enfriamientos rápidos.

Las hojuelas tipo C son consecuencia del grafito kish que se forma en hierros hipereutéticos.

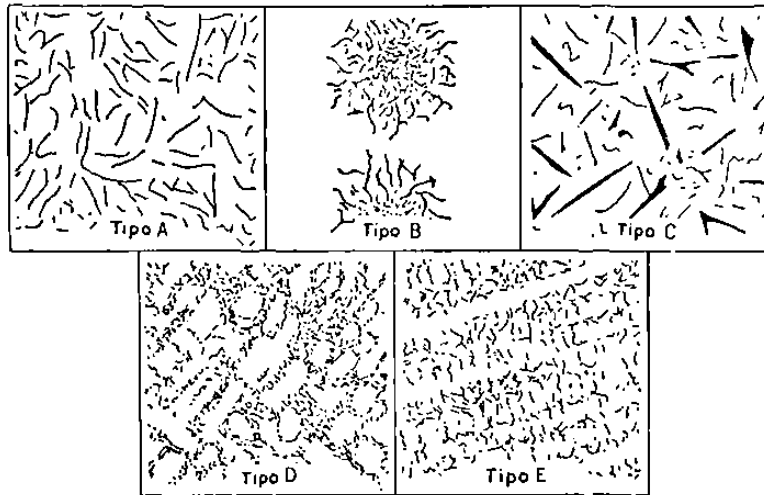


Fig. 3 .-Diferentes clases de grafito que suelen aparecer en las fundiciones.

Número de Tamaño AFS-ASTM	Longitud de las hojuelas más largas a 100 x.	
	Pulg.	MM.
1	4 ó más	128
2	2 - 4	64
3	1 - 2	32
4	1/2 - 1	16
5	1/4 - 1/2	8
6	1/8 - 1/4	4
7	1/16 - 1/8	2
8	1/16 ó menos	1

Tabla V.- Tamaños de hojuela ASTM.

Los tipos D y E aparecen en hierros de bajo contenido de carbono y alta temperatura de colada como consecuencia de un fenómeno de subenfriamiento. Estas estructuras se consideran indeseables, ya que dificultan la obtención de una matriz perlítica.

3.5.- SENSIBILIDAD AL ESPESOR.

La rapidez de enfriamiento del metal vaciado está influenciada por el espesor de las piezas. Espesores muy delgados quedan sometidos a enfriamientos rápidos que pueden producir hierro blanco. Para cada clase de hierro gris se habla de un espesor mínimo recomendado para evitar la formación de carburo [Ref. 1, 3].

3.6.- CLASES DE HIERRO GRIS.

La especificación ASTM A48 establece una clasificación simple de los hierros grises [Ref.1]. Se les divide en varias "clases", según su resistencia tensil expresada en ksi, que son: clase 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60. Esta especificación no considera la composición química.

En general, puede afirmarse que las siguientes propiedades se incrementan al ascender la "clase" desde 20 a 60 [Ref. 1].

- . La resistencia mecánica general.
- . El módulo elástico.
- . La capacidad de obtener un fino acabado maquinado.
- . La resistencia al desgaste.

Las siguientes propiedades disminuyen al ascender la clase.

- . Maquinabilidad.
- . La resistencia al choque térmico.

. La capacidad de amortiguamiento (damping capacity).

La especificación SAE J431 [Ref 1] describe requerimientos más específicos (Tabla VI).

Grado SAE	C	Mn	Si	P	S
G1800	3.4-3.7	0.5-0.8	2.8-2.3	0.15	0.15
G2500	3.2-3.5	0.6-0.9	2.4-2.0	0.12	0.15
G3000	3.1-3.4	0.6-0.9	2.3-1.90	0.10	0.15
G4000	3.0-3.3	0.7-1.0	2.1-1.80	0.07	0.15

Tabla VI . Composiciones de algunos hierro grises automotrices SAE J431.

3.7.- PROPIEDADES MECANICAS Y APLICACIONES.

Las propiedades mecánicas de los hierros grises varían ampliamente, dependiendo en gran medida de su microestructura. Como ejemplo, a continuación se dan los rangos de dureza para varias combinaciones de microestructuras [Ref. 6]:

Microestructuras	Dureza HB
Ferrita + grafito	110 - 140
Perlita + grafito	200 - 260
Perlita + grafito + carburo masivo	300 - 450
Bainita + grafito	260 - 350
Martensita revenido + grafito	350 - 550
Austenita + grafito	140 - 160

Algunas propiedades mecánicas típicas de los hierros grises, según la clasificación ASTM se dan en la Tabla VII.

Clase ASTM	Resistencia tensil		Resistencia a compresión	
	MPa	Psi	MPa	Psi
20	152	22	572	83
25	179	26	669	97
30	214	31	752	109
35	252	36.5	855	124
40	293	42.5	965	140
50	362	52.5	1130	164
60	431	62.5	1293	187.5

Clase ASTM	Dureza HB	Módulo Elástico	
		GPa	1,000,000 psi
20	156	27-39	3.9-5.6
25	174	32-41	4.6-6.0
30	210	36-45	5.2-6.6
35	212	40-48	5.8-6.9
40	235	44-54	6.4-7.8
50	262	50-55	7.2-8.0
60	302	54-59	7.8-8.5

Tabla VII.

Las propiedades de algunos hierros SAE J431 se dan en la Tabla VIII.

Grado SAE	Dureza HB	Resistencia tensil mínima	
		MPa	ksi
G1800	187 máx	118	18
G2500	170 - 229	173	25
G3000	187 - 241	207	30
G4000	217 - 269	276	40

Tabla VIII.- Propiedades de hierros SAE J431.

Las aplicaciones del hierro gris son múltiples, siempre se le considera primero cuando se va a seleccionar un metal vaciado, debido a su bajo costo. Solo se selecciona otro metal cuando las propiedades del hierro gris son inadecuadas. En particular, los hierros automotrices tienen aplicaciones específicas como las siguientes [Ref 1]:

G1800.- Aplicaciones diversas en partes que no requieren gran resistencia.

G3000.- Monoblocks automotrices, cabezas de cilindros, pistones, tambores de freno, platos de embrague, etc.

G4000.- Cilindros, pistones, árboles de levas, etc.

3.8.- MAQUINABILIDAD.

La mayoría de los hierros grises poseen superior maquinabilidad que otros hierros de similar dureza. También superan a muchos aceros en este importante aspecto. Esto es debido a que las hojuelas de grafito del hierro gris actúan como lubricante de las herramientas de corte. La maquinabilidad puede ser mejorada por recocido, obteniéndose una matriz completamente ferrítica, aunque se sacrifica dureza y resistencia [Ref. 1, 2, 3].

3.9.- ESTABILIDAD DIMENSIONAL.

En piezas que requieren buena estabilidad dimensional es necesario considerar la temperatura de operación. A temperaturas superiores a 480 °C, el hierro gris sufre un hinchamiento que puede ser evitado usando hierros aleados con 1% de cromo.

A temperaturas inferiores a 480 °C, dos factores pueden causar inestabilidad dimensional: Esfuerzos residuales y la práctica de maquinado.

3.10.- ESFUERZOS RESIDUALES.

Todas las piezas en condición de vaciado presentan esfuerzos residuales, que son causados por:

- 1.- Diferentes velocidades de enfriamiento en distintas

zonas del molde.

- 2.- Resistencia del molde a las contracciones del metal durante el enfriamiento.
- 3.- Algunos métodos de limpieza, como los chorros de arena.

Las piezas fundidas que requieren excepcional precisión dimensional son sometidas a tratamiento térmico de relevado de esfuerzos antes de ser maquinadas [Ref. 1, 3, 8].

3.11.- PRACTICA DE MAQUINADO.

En la condición de vaciado, las tensiones residuales y los esfuerzos de compresión están balanceados. Al remover partes de la superficie durante el maquinado, el balance de fuerzas se altera y puede producirse distorsión. Esta distorsión será más evidente en aleaciones de baja rigidez [Ref 1].

3.12.- TRATAMIENTOS TERMICOS.

Puesto que los hierros grises pueden ser calentados hasta un rango de temperaturas en que son austeníticos, es posible aplicarles tratamientos térmicos como a los aceros.

Los beneficios que pueden obtenerse son:

- 1.- Mejor maquinabilidad.
- 2.- Mejor resistencia al desgaste.
- 3.- Superior resistencia a la obtenida en condición de

vaciado.

4.- Estabilidad dimensional y liberación de esfuerzos.

Los tres tratamientos térmicos más comunmente aplicados son el recocido, relevado de esfuerzos y el normalizado. Tratamientos como temple y revenido, austemperizado y martemperizado son utilizados en raras ocasiones.

Tres tipos de recocido son aplicados: recocido subcrítico o ferritizante, recocido total y recocido grafitizante. Las temperaturas para recocido subcrítico son de 700 a 760 °C, en recocido total las temperaturas son de 800 a 900 °C y en recocido grafitizante son de 900 a 925 °C. Los tiempos recomendados son de 1 hr. por cada pulgada de espesor. En general, los recocidos son utilizados para mejorar la maquinabilidad.

El normalizado se aplica cuando se desea garantizar una matriz perlítica muy uniforme. Las temperaturas son de 875 a 900 °C.

El relevado de esfuerzos consiste, en esencia, en calentar las piezas a temperaturas de 500 a 650 °C, dependiendo de la composición, las piezas son mantenidas a esta temperatura de 2 a 8 horas antes de ser enfriadas al aire. El propósito es reducir los esfuerzos residuales inducidos en las piezas durante la solidificación [Ref. 6, 8].

4.- FABRICACION DE MOLDES PARA ELABORACION INDUSTRIAL DE GALLETAS A PARTIR DE UN FUNDICION DE HIERRO GRIS.

4.1.- ANTECEDENTES Y DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

En el proceso de elaboración de galletas "de nieve", GAMESA utiliza moldes de hierro gris de diferente procedencia. Un requerimiento importante que deben cumplir los moldes es mantener una buena estabilidad dimensional. Los moldes no deben distorsionarse ya que esto origina defectos inadmisibles en el producto. Otro requerimiento es un buen acabado superficial.

Originalmente todos los moldes se importaban de Alemania e Inglaterra. Estos moldes tenían un desempeño satisfactorio y solo necesitaban ser reemplazados después de varios años de operación. Los moldes se sustituyen cuando presentan quebraduras o distorsión que no puede ser eliminada por rectificado.

Recientemente se empezaron a sustituir los moldes importados por moldes nacionales. Estos moldes, fabricados en la localidad, pronto empezaron a manifestar problemas como los siguientes:

- Distorsión notoria después de unos meses de operación.
- Dificultad de obtener un buen acabado superficial.

Motivado por esta problemática, el departamento de tecnología de GAMESA auspició un estudio con el objetivo que

a continuación se presenta.

4.2.- OBJETIVO.

Determinar las especificaciones de fabricación que permitan la elaboración, en la localidad, de moldes que tengan un desempeño igual o superior al de los moldes importados.

4.3.- PROCEDIMIENTO.

El procedimiento que permitió llegar a la determinación de las especificaciones de los moldes fué el siguiente:

- . Se determinaron las condiciones de operación.
- . Se recopilaron las especificaciones anteriores de los moldes nacionales.
- . Se realizó una caracterización de los tres tipos de moldes.
- . Se emitió un diagnóstico del problema en base a los resultados obtenidos, proponiéndose una solución.
- . Se probó la factibilidad y efectividad de la solución propuesta.
- . Finalmente, se proporcionó un procedimiento estándar para la fabricación de los moldes.

4.4.- CONDICIONES DE OPERACION.

La Fig.4 muestra esquemáticamente las condiciones de operación de los moldes. Dependiendo del tamaño del horno, puede haber hasta 30 moldes por horno. La función de los moldes es dar forma a la galleta mientras esta es horneada. Los moldes no están sujetos a cargas mecánicas fuertes. Al describir la trayectoria mostrada en la figura, los moldes están sujetos a un ciclo que consta de las siguientes etapas:

- I.- Llenado del molde con pasta fría.- El molde está fuera del horno, su temperatura fluctúa entre 240 y 280 °C.
- II.- Cocción en el horno.- Dentro del horno, el molde está en contacto directo con la flama. Esta etapa dura unos pocos minutos (2 a 3).
- III.- Expulsión del producto.- Al salir del horno los moldes tienen temperaturas de 320 a 380 °C.

4.5.- ESPECIFICACIONES ANTERIORES.

La especificación utilizada para la fabricación de los moldes nacionales que presentaban los problemas descritos anteriormente, según consta en los dibujos de ingeniería, era la siguiente:

- . Material : fierro vaciado. (sic.)
- . Premaquinar a 1/8" (3.175 mm) de la medida final.
- . Recocer a 850 °C durante 42 horas, dar enfriamiento

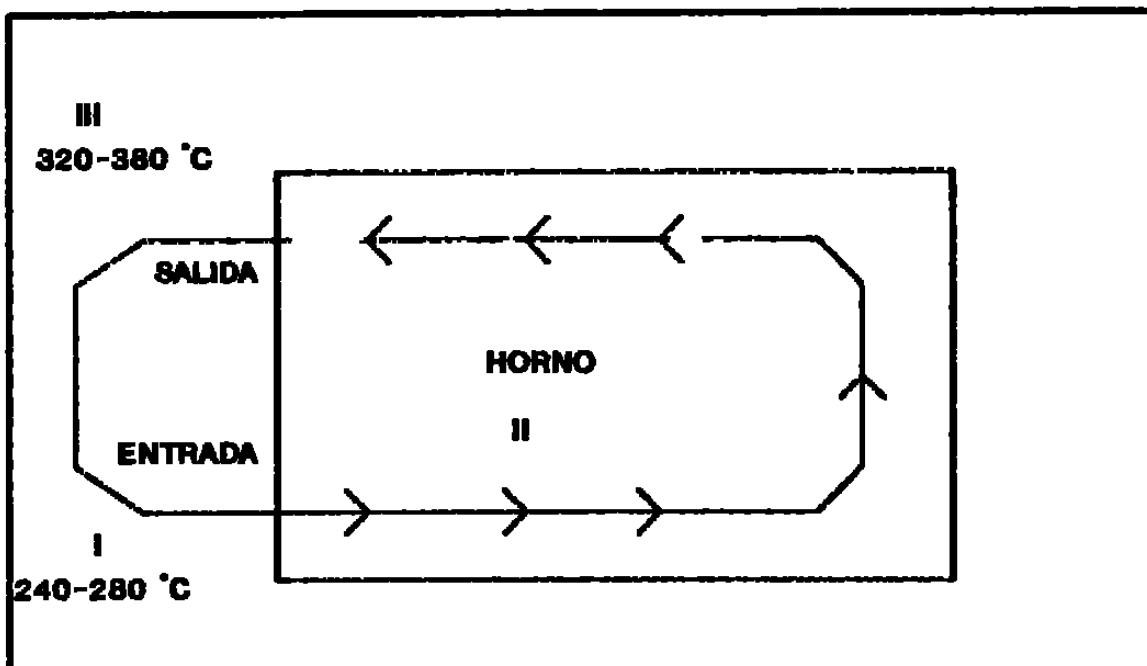


FIG.4

CONDICIONES DE OPERACION DE LOS MOLDES.

lento .

. Maquinado final.

4.6.- CARACTERIZACION DE LOS MOLDES.

Se utilizaron una serie de técnicas de análisis y medición para caracterizar los diferentes moldes.

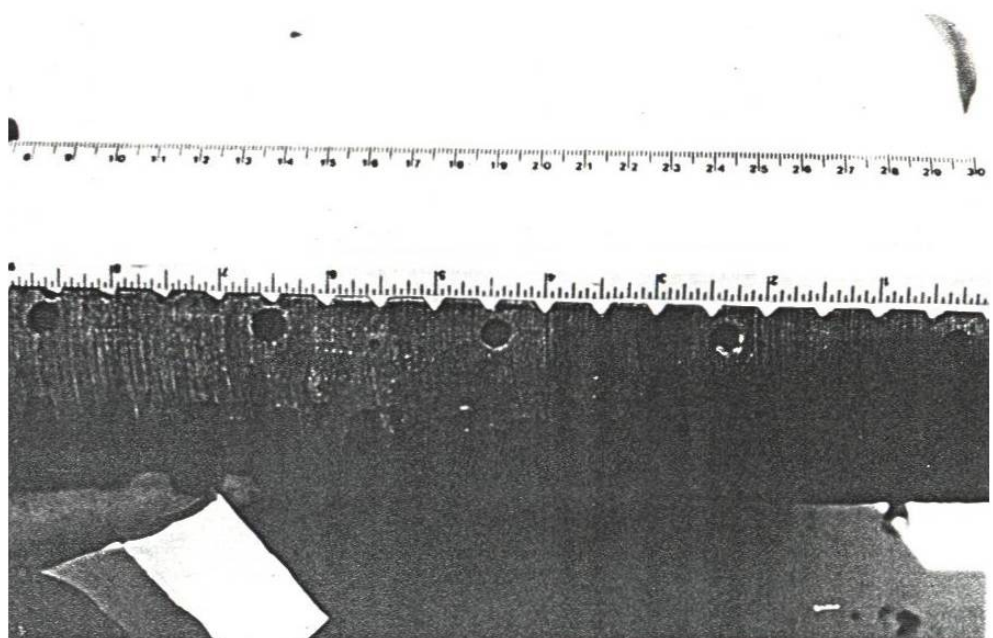
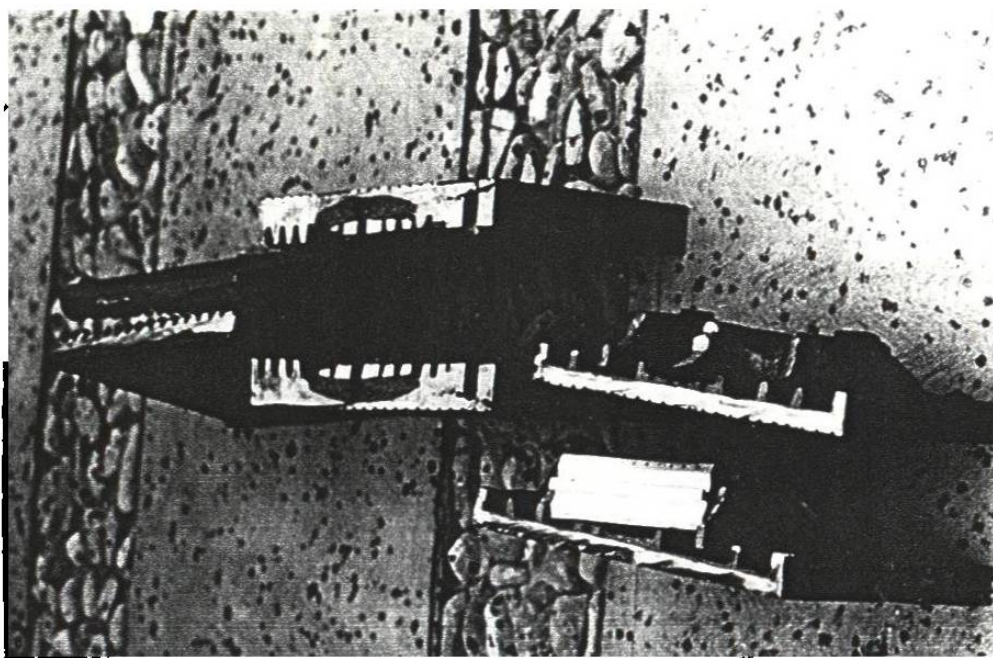
- Inspección visual.
- Análisis químico por espectroscopía de emisión de flama.
- Metalografía.
- Mediciones de dureza.

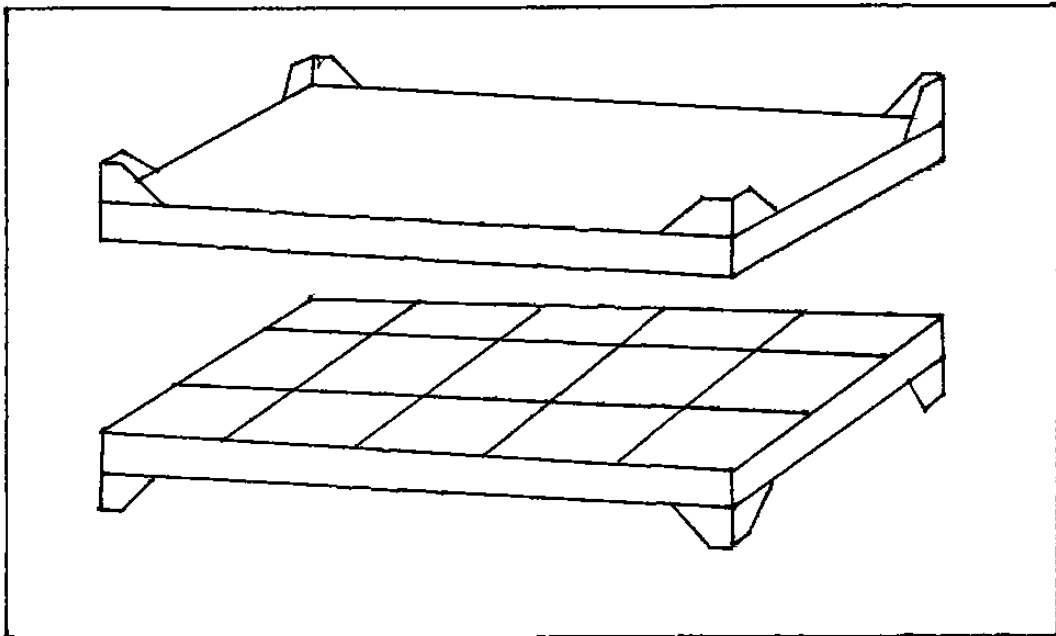
4.6.1- INSPECCION VISUAL.

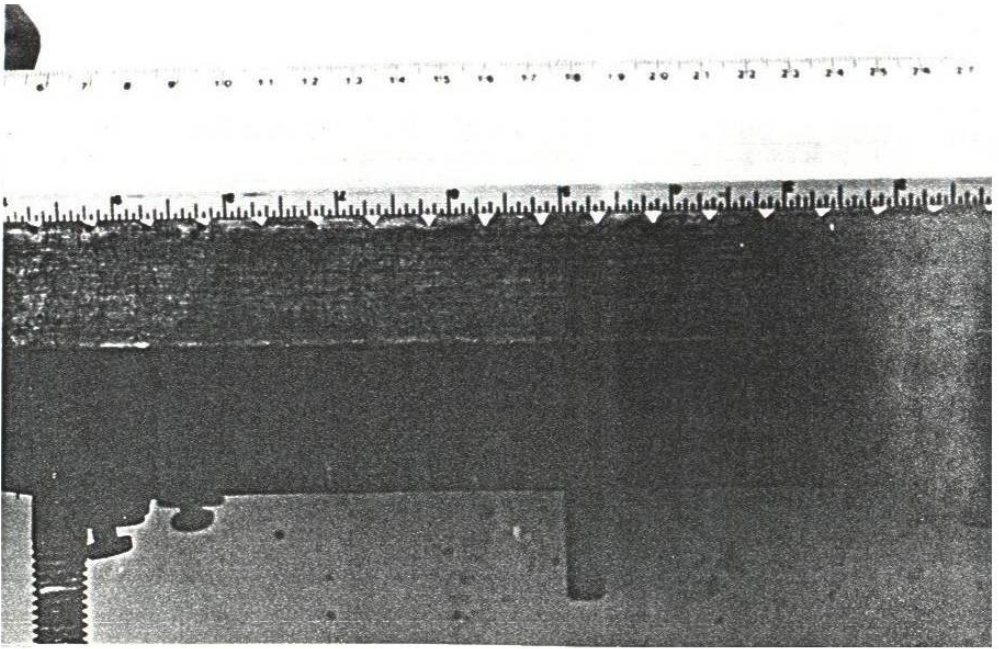
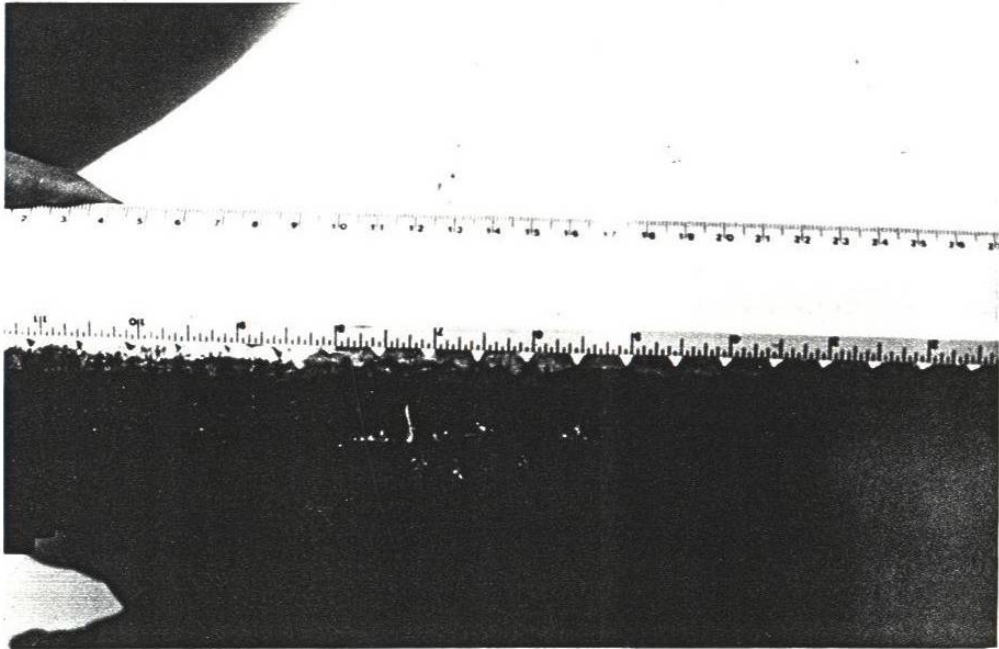
La Fotografía 1 muestra el aspecto general de una placa de cada tipo de molde. Los moldes están formados por dos placas rectangulares de 47 x 40 x 2.5 cm, como se representa en la Fig. 5. Los moldes nacional y alemán son de diseño muy similar; esto se debe a que originalmente solo se estaban fabricando moldes nacionales para sustituir moldes alemanes.

Las Fotografías 2 y 3 muestran la distorsión presente en moldes nacionales y alemanes. La distorsión es mayor en el molde nacional. La Fotografía 4 muestra un molde inglés sin distorsión apreciable.

La inspección visual también permitió notar que los moldes nacionales presentan porosidad tanto interna como externa. El acabado superficial de estos moldes presenta







imperfecciones debido a tal porosidad.

4.6.2.- COMPOSICION QUIMICA.

La Tabla 9 muestra la composición química promedio de los tres tipos de moldes.

Elemento % Peso	Molde nacional	Molde alemán	Molde inglés
C	3.18	3.49	3.27
Si	1.52	1.29	1.04
S	0.102	0.083	0.136
P	0.062	0.049	0.149
Mn	0.65	0.83	0.83
Carbono Equiv. $CE = \%C + (\%Si + \%P) / 3$	3.71	3.94	3.67

Tabla IX.- Composición química de los moldes.

Como puede observarse, las tres aleaciones tienen composición química similar. Los tres son hierros hipoeutécticos ($CE < 4.3\%$). Los porcentajes de Mn y S están bien balanceados y dentro de rangos típicos. El contenido de fósforo es relativamente bajo en los moldes nacional y alemán; en el molde inglés, el contenido de fósforo está a un nivel típico para hierro gris.

4.6.3.- MICROESTRUCTURA.

Las microestructuras observadas en los diferentes tipos de moldes se muestran en las Fotografías 5 a 9.



FOTO.5.- MICROESTRUCTURA DE MOLDE INGLES. 100X.

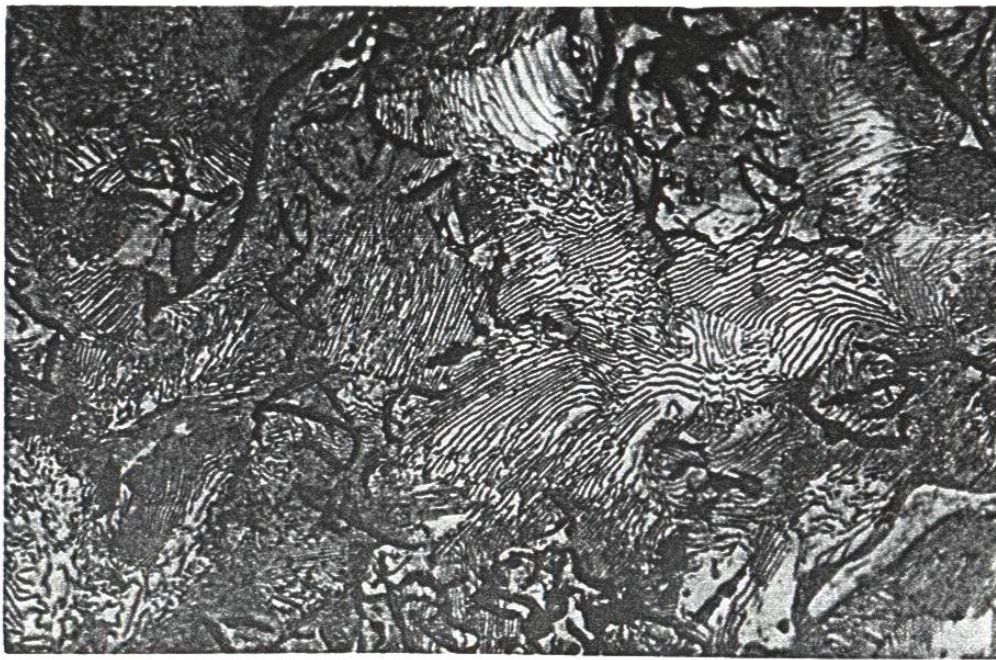
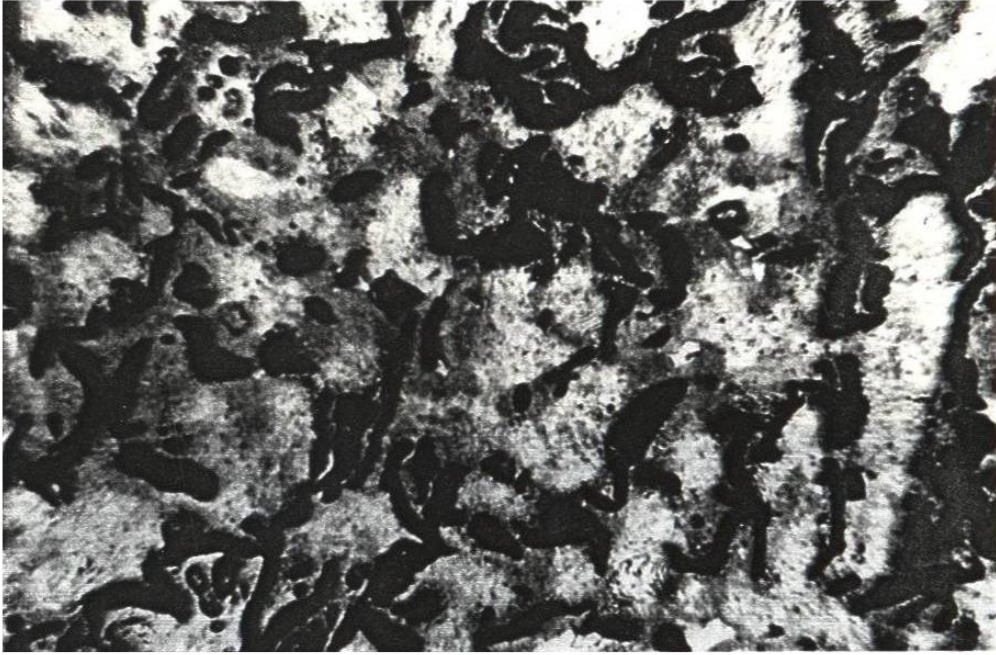
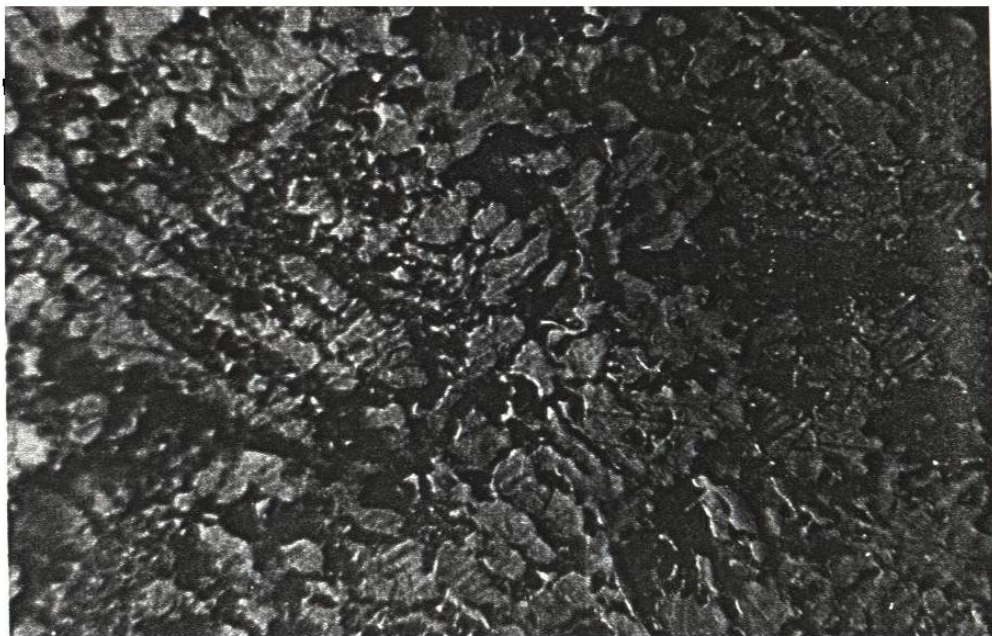


FOTO.6.- MICROESTRUCTURA DE OTRA MUESTRA DE MOLDE INGLES. 100X.





MOLDE INGLES.

Es un hierro gris, con hojuela tipo A de tamaño ASTM 4. La matriz es perlítica con apreciable presencia de esteadita. Ver Fotografías 5 y 6. Se observó homogeneidad en distintos moldes y en zonas diferentes de un mismo molde.

MOLDE ALEMAN.

Es un hierro gris, con hojuela tipo A, tamaño ASTM 4. La matriz es una mezcla de ferrita y perlita (Fotografía 7). Se observa ligera variación en la microestructura en distintos moldes.

MOLDE NACIONAL.

Es un hierro gris con hojuela tipo A, tamaño ASTM 2 (Fotografía 8). La matriz es predominantemente ferrítica. Se observó gran variación en la microestructura de distintos moldes y en zonas diferentes de un mismo molde. En algunos casos se observó segregación dendrítica con hojuelas irregulares tipo D (Fotografía 9).

4.6.4.- MEDICIONES DE DUREZA.

Los resultados de mediciones de dureza fueron los siguientes:

Dureza Brinell promedio.

Molde inglés	190
Molde alemán	135
Molde nacional	121

4.7.- DISCUSION.

4.7.1.- COMPARACION DE LOS DIFERENTES MOLDES.

Las condiciones de operación de los moldes no se consideran mecánicamente severas. Durante el ciclo de trabajo, los moldes soportan temperaturas de hasta 350 °C o mayores, lo cual puede ser fuente de posibles distorsiones debido a la relajación de esfuerzos residuales generados Durante el vaciado y maquinado [Ref.1,2]. Estos problemas se agudizan con la utilización de hierros de baja resistencia, tales como hierros de matriz ferrítica, como el utilizado en los moldes producidos en México, que además recibió un tratamiento de recocido.

La especificación empleada para la fabricación de los moldes nacionales realmente no especificaba el tipo de hierro a utilizar, ni en términos de clase ASTM, grado SAE, composición, microestructura ni dureza.

El tratamiento térmico especificado de recocer a 850 °C durante 42 horas, garantiza la disolución de posibles

carburos presentes, resultando en una matriz completamente ferrítica muy fácilmente maquinable pero sacrifica la dureza y resistencia de los moldes. El tiempo especificado es excesivamente largo. El tratamiento es inadecuado y antieconómico. Considérese además que las posibles ventajas del tratamiento térmico solo son aprovechadas en el maquinado final, puesto que se especifica un premaquinado en la condición de vaciado, cuando las piezas son más duras y, por lo tanto, difíciles de maquinar.

La composición química de los tres tipos de moldes es muy similar y es típica de hierros grises de uso común. El bajo contenido de fósforo de las piezas nacionales y alemanes es un factor positivo, ya que esto limita la aparición de la fase esteadita, que es un constituyente que fragiliza el hierro y que normalmente se considera indeseable.

La microestructura perlítica de los moldes ingleses les imparte una buena resistencia y rigidez, su dureza de 190 HB es típica de hierros de mediana resistencia (clase 25 o 30, SAE G3000). Estas características les permiten tener un excelente comportamiento en operación, libres de deformaciones y distorsiones.

El material de los moldes alemanes, con su microestructura ferrito-perlítica y dureza de 135 HB, es un hierro de resistencia relativamente baja. Su desempeño es

satisfactorio aunque inferior al de los moldes ingleses.

La microestructura ferrítica de grandes hojuelas de los moldes nacionales, así como su baja dureza, son resultado del inadecuado tratamiento térmico a que fueron sometidos. Su baja resistencia y rigidez, que pueden disminuir aún más para las temperaturas de operación, los hacen susceptibles de sufrir inestabilidad dimensional y distorsiones bajo las condiciones de operación.

4.7.2.- MODIFICACIONES PROPUESTAS.

En base a los resultados obtenidos, se propuso una solución fundamentada en los siguientes puntos:

- . Para tener un desempeño adecuado en operación, el material debe ser hierro gris de resistencia media con matriz perlítica y hojuela tipo A tamaño 3 o 4.
- . Basta un tratamiento de relevado de esfuerzos para disminuir los esfuerzos residuales en condición de vaciado. Además, con este tratamiento se disminuye un poco la dureza del material, dejándolo con muy buena maquinabilidad sin destruir su matriz perlítica.

Con objeto de probar la factibilidad de la solución propuesta, se trabajó en colaboración con una fundición de la localidad previamente seleccionada. A esta fundición se le solicitó elaborar un molde de prueba, con matriz perlítica y la composición en el rango de aleaciones SAE G3000 y G4000 (Tabla VI).

El molde de prueba fué analizado y sometido a tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.

Los resultados se presentan a continuación.

4.8.- RESULTADOS DE CARACTERIZACION DE MOLDE DE PRUEBA.

4.8.1.- COMPOSICION QUIMICA.

	%
Carbono	3.27
Silicio	2.29
Manganeso	0.53
Fósforo	0.04
Azufre	0.101

4.8.2.-DUREZA BRINELL PROMEDIO.

Antes de tratamiento térmico : 192.

Después de tratamiento térmico : 165.

Según datos proporcionados por la fundición, este material tiene una resistencia tensil de 25,000 a 30,000 psi.

4.8.3.- TRATAMIENTO TERMICO.

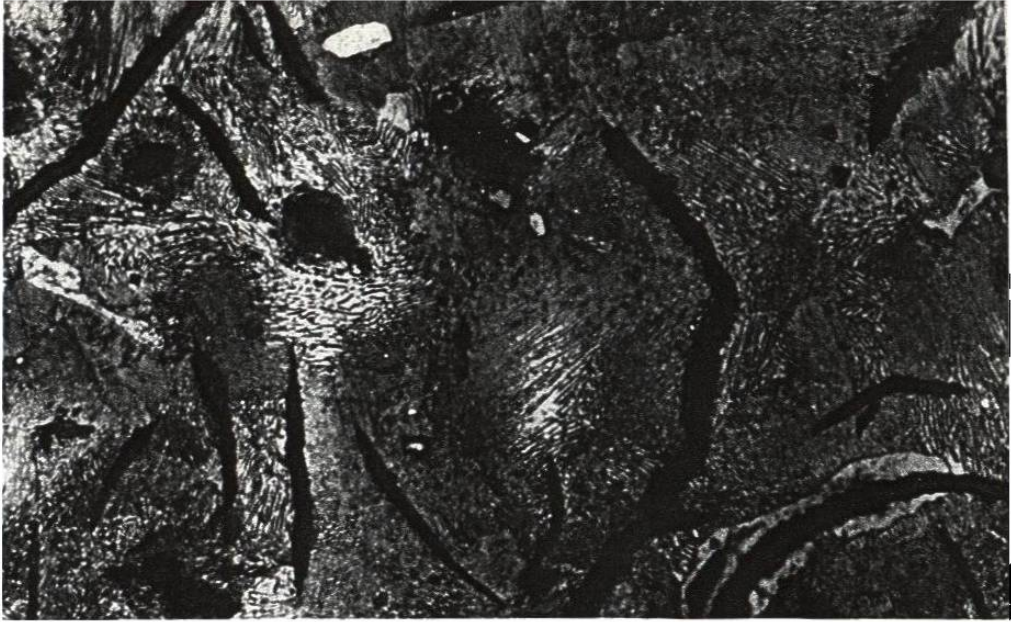
El tratamiento térmico consistió en mantener la pieza a una temperatura de 550 °C durante una hora y enfriarla en el horno hasta 450 °C, después se enfrió al aire. Con este tratamiento se puede liberar de 70 a 80 % de los esfuerzos residuales [Ref. 1, 3, 5, 8].

4.8.4.-MICROESTRUCTURA.

La Fotografía 10 muestra que la microestructura en la condición de vaciado resultó perlítica con hojuela tipo A, tamaño 3 a 4. Esta microestructura no sufrió modificación apreciable después del tratamiento térmico (Fotografía 11).

La microestructura y dureza obtenidas después del tratamiento térmico permiten una muy buena maquinabilidad.

Los resultados obtenidos del análisis del molde de prueba fueron considerados satisfactorios, ya que se obtuvo un molde de características muy similares a los moldes ingleses, lo que permite esperar que tenga un comportamiento satisfactorio bajo las condiciones de operación. Con base a estos resultados se determinaron las especificaciones que se exponen enseguida.



4.9.- ESPECIFICACIONES.

Enseguida se presentan las especificaciones de material y fabricación para moldes de galletas de nieve trabajando en las condiciones descritas en el apartado 4.4 y figura 4. Estas especificaciones comprenden: tipo de material, composición química, dureza , tratamiento térmico y condición superficial.

4.9.1.- MATERIAL.

- . El material debe ser hierro gris de resistencia media, clase ASTM 20, 25 ó 30, con hojuelas tipo A tamaño 3 ó 4 en matriz perlítica sin carburos primarios.
- . Se recomienda el siguiente rango de composición química.*

Elemento	%Peso
Carbono	3 - 3.4
Silicio	1.8 - 2.3
Manganeso	0.6 - 1.0
Azufre	0.15 máx.
Fósforo	0.1 máx.

* Rango de aleaciones SAE G3000, G3500 y G4000; que son hierros de matriz perlítica.

Pueden tolerarse ligeras desviaciones en composición si

se cumple con el requisito de matriz perlítica.

Dureza.- La dureza en condición de vaciado deberá estar en el rango de 180 a 210 HB.

4.9.2.-TRATAMIENTO TERMICO DE RELEVADO DE ESFUERZOS.

- . Mantener las piezas a una temperatura de 550 °C durante una hora. Si la dureza está en el extremo superior del rango especificado, el tiempo deberá ser de dos horas.
- . El calentamiento deberá realizarse a una razón aproximada de 175 °C/hora.
- . En el enfriamiento se recomienda enfriar las piezas de 550 a 300 °C en tres horas dentro del horno. Después enfriar al aire.

Este tratamiento deberá efectuarse antes de maquinar los moldes.

4.9.3.- CONDICION SUPERFICIAL.

Las piezas no deberán mostrar porosidad superficial a simple vista.

4.10.- BENEFICIOS OBTENIDOS.

- . Las especificaciones obtenidas permiten elaborar, en la localidad, moldes con propiedades y desempeño similares a los moldes importados, a una fracción del costo. Esto representa un gran ahorro económico y en tiempo de entrega al suprimirse la importación de los moldes.
- . A la vez que se resolvió técnicamente el problema, se garantizó la factibilidad de la solución encontrada al participar en el desarrollo del proveedor, trabajando en estrecho contacto con una fundición local.
- . Los resultados de este estudio han motivado a GAMESA a apoyar proyectos de desarrollo tecnológico para resolver otros problemas que enfrenta.
- . El logro obtenido en la planta Monterrey puede hacerse extensivo al resto de las fábricas del grupo GAMESA.

5.- CONCLUSIONES.

** Las condiciones de operación de los moldes no son mecánicamente severas y pueden ser soportadas por hierros de resistencia media con matriz perlítica.

** La composición química de los diferentes moldes es típica de hierros de resistencia media. La matriz perlítica de los moldes ingleses explica su superioridad respecto a los moldes alemanes, que tienen matriz ferrito-perlítica. Por lo cual se propone que los moldes tengan una matriz perlítica.

** Los moldes nacionales elaborados bajo las especificaciones anteriores a este estudio mostraron gran heterogeneidad en su microestructura, siendo ésta en general ferrítica. Eran sometidos a un inadecuado tratamiento térmico que los dejaba en una condición de baja resistencia y dureza, lo cual puede explicar las distorsiones que se manifestaban después de 1 a 3 meses en operación.

** El tratamiento térmico que deben recibir los moldes es un relevado de esfuerzos para garantizar una buena estabilidad dimensional. Además, con este tratamiento se disminuye la dureza, facilitando el maquinado, sin destruir la matriz perlítica.

** Los resultados obtenidos con el molde de prueba demostraron que las especificaciones propuestas permiten fabricar moldes que sustituyen exitosamente a los anteriormente importados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- 1.- American Society for Metals.
Metals Handbook Ninth Edition.
Vol. 1; Properties and Selection: Irons and Steels. 1985.
p. 3-73.

- 2.- R. W. Heine; C. R. Loper, Jr. and P. C. Rosenthal.
Principles of Metal Casting. Second Edition. p. 191-663.
Mc. Graw Hill.

- 3.- Apraiz Barreiro José.
Fundiciones. 3a. Edición.
Ed. Dossat. 1981.

- 4.- American Society for Metals.
Metals Handbook, Ninth Edition.
Vol. 9: Metallography and Microstructures. 1985.
p.246-255.

- 5.- S. H. Avner.
Introducción a la Metalurgia Física. 2a. Edición.
Mc. Graw Hill. 1985.
p.420-456.

- 6.- American Society for Metals.
Metals Handbook, Ninth Edition.
Vol. 15: Castings. p.627-661

7.- Foseco LTD.

The Foseco Foundryman's Handbook. p.255-338.

Pergamon Press.

8.- American Society for Metals.

Metals Handbook, Ninth Edition.

Vol. 4: Heat Treating. p.523-556.

