



# Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Química  
e Industrias Extractivas

Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales

“ABATIMIENTO DE COSTOS DE MAQUINADO EN HIERRO  
NODULAR APLICANDO CORRECTAMENTE LA INOCULACION”

## TESIS

Que para obtener el título de  
**Ingeniero en Metalurgía y Materiales**

**Presenta:**

**Ana Lilia Velázquez Laguna**

**Director de tesis:**

**Ing. Francisco Lagunes Moreno**



México, D.F.

2011

---

---

## AGRADECIMIENTOS

*Dedico este trabajo a mi familia, por acompañarme en cada etapa de mi vida.*

*A mis padres, especialmente por sus sabios consejos, por estar a mi lado en los momentos difíciles y sobre todo por que confiaron en mí en todo momento.*

*A mis abuelos por ser mis segundos padres, por sus cuidados y apoyo.*

*A todos mis profesores, mil gracias porque de alguna manera forman parte de lo que ahora soy. Especialmente a los tres que están en esto conmigo (mi asesor y sinodales).*

*Al más especial de todos a ti señor por haber hecho realidad este sueño, por todo el amor con el que me rodeas y apoyas. Esta tesis es para ti.*

---

---

# ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	7
<b>Introducción</b> .....	8
<b>Capítulo 1 Generalidades y Antecedentes</b> .....	12
1.1-Fundición.....	12
1.1.1-Hierro.....	13
1.1.2-Fundición Nodular.....	14
1.2-Tipos de grafito.....	16
1.2.1-Grafito esferoidal (nodular).....	18
1.3-Conceptos básicos.....	20
1.3.1-Inoculación.....	20
1.3.2-Nucleación.....	20
1.3.3-Nucleación heterogénea.....	20
1.4-Factores metalúrgicos.....	21
1.4.1-Velocidad de enfriamiento.....	21
1.4.2-Tamaño de las células eutécticas.....	21
1.4.3-El grado de sobrefusión.....	22
1.5-Cualidades de un hierro inoculado.....	23
1.6-Efectos, requisitos y composición.....	24
1.6.1-Efectos de la inoculación sobre las características mecánicas.....	24
1.6.2-Efectos de la maquinabilidad y profundidad de temple en las fundiciones.....	24
1.6.3-Requisitos prácticos de un inoculante.....	24
1.6.4-Composicion de un inoculante.....	25
<b>Capítulo 2 Descripción del proceso</b> .....	26
2.1-Fusion del hierro nodular.....	26
2.1.1.-Proceso de fusión.....	26
2.1.2-Proceso de tratamiento para la nodulización (Proceso al magnesio).....	26
2.1.3.-Composición del hierro base.....	26
2.1.4-Introducción del magnesio.....	27
2.1.5-Elementos inhibidores.....	27
2.2-Proceso metalográfico.....	29
2.2.1-Selección o muestreo.....	29

---

---

2.2.2-Corte o seccionado.....	29
2.2.3-Montaje (opcional).....	29
2.2.4-Desbaste.....	30
2.2.5-Pulido.....	31
2.2.6-Ataque químico.....	31
2.3-Procesos de análisis químico.....	33
2.3.1-espectrometria de absorción atómica.....	33
2.3.2-Espectrometria de emisión óptica.....	33
2.4-Equipo y condiciones para fundir.....	34
2.4.1-Materiales.....	34
2.4.2-Equipo de Seguridad.....	34
2.4.3-Pruebas básicas.....	34
2.4.4.-Condiciones de experimentación.....	34
2.5-Equipo metalográfico.....	34
2.5.1-Material.....	35
<b>Capítulo 3 Desarrollo experimental.....</b>	<b>36</b>
3.1-Informacion básica.....	36
3.2.1-Proceso de fusión.....	37
3.2-Diagramas de Proceso.....	37
3.2.2-Proceso metalográfico.....	38
3.2.3-Análisis químico.....	39
<b>Capítulo 4 Resultados y análisis.....</b>	<b>40</b>
4.1-Prueba A.....	41
4.1.1-Prueba: A pulida.....	41
4.1.2-Prueba: A con ataque (nital 3%).....	42
4.2-Prueba B.....	43
4.2.1-Prueba: B pulida.....	43
4.2.2-Prueba: B con ataque (nital 3%).....	44
4.3.-Resultado de análisis químico y dureza.....	45
4.4-Conclusiones.....	46
<b>Bibliografía.....</b>	<b>47</b>

---

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

## **Capítulo 1 Generalidades y Antecedentes**

Fig. 1 Diagrama Hierro Carbono.....	13
Fig.2 Hierro nodular 10x.....	14
Fig.3 Hierro nodular 40x.....	15
Fig.4 Fundicion nodular 20x.....	15
Fig.5 Grafito tipo A.....	16
Fig.6 Grafito tipo B.....	16
Fig.7 Grafito tipo C.....	17
Fig.8 Grafito esferoidal.....	17
Fig.9 Fundición maleable.....	17
Fig.10 Grafito tipo D.....	18
Fig.11 Grafito tipo E.....	18
Fig.12 grafito esferoidal.....	19

## **Capítulo 2 Descripción del proceso**

Fig. 13 Desbaste.....	30
Fig.14 Rotación de muestra.....	31
Fig. 15 Pulido.....	31

## **Capítulo 4 Resultados y análisis**

Fig. 16 a 5X.....	41
Fig. 17 a 10X.....	41
Fig. 18 a 40X.....	41
Fig. 19 a 100X.....	41
Fig. 20 a 5X.....	42
Fig. 21 a 10X.....	42
Fig. 22 a 40X.....	42
Fig. 23 a 100X.....	42
Fig. 24 a 5X.....	43
Fig. 25 a 10X.....	43
Fig. 26 a 40X.....	43
Fig. 27 a 100X.....	43
Fig. 28 a 5X.....	44
Fig. 29 a 10X.....	44
Fig. 30 a 40X.....	44
Fig. 31 a 100X.....	44

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

### **Capítulo 1 Generalidades y Antecedentes**

Tabla 1 Clasificación tradicional de las fundiciones de hierro.....	13
Tabla 2. Clasificación de las fundiciones de hierro.....	14
Tabla. 3 Inoculantes más utilizados.....	25

### **Capítulo 2 Descripción del proceso**

Tabla 4 Inhibidores comunes.....	27
Tabla 5 métodos de montaje.....	30
Tabla 6 Listado de reactivos de ataque.....	32

### **Capítulo 4 Resultados y análisis**

Tabla 7 Resultados de análisis.....	42
Tabla 8 resultado de dureza.....	45

---

---

# RESUMEN

A causa de las necesidades que la industria requiere para dar un servicio a tono con las demandas de los nuevos mercados mundializados, costo competitivo, volumen sostenido, excelente calidad y con oportunidad de entrega, que en la actualidad no se está logrando debido a un inadecuado control de la operación de inoculación, que origina piezas coladas que muestran dureza excesiva, lo que dificulta las operaciones de maquinado.

Por lo anterior se trata de establecer y dar a conocer los detalles del proceso antes mencionado, sobre todo a las PYME (pequeñas y medianas empresas) las cuales no cuentan con los recursos y la capacidad técnica para resolver por sí mismas el problema mencionado. Se ha localizado, en investigaciones realizadas en el ámbito de la fundición que la causa principal de este defecto resulta de una inadecuada aplicación del proceso de inoculación o simplemente no se está realizando.

Recurriendo al diagrama (Fe – Fe<sub>3</sub>C) Hierro - Carburo de Hierro en la porción de líquido para identificar las fases presentes, el material férrico se encuentra en forma exclusiva como carburo de hierro, conocida micro estructura con el nombre de **cementita**.

Para dar una idea de la dureza que se obtendría una vez solidificado este material sería del orden de 700 HB, cabe mencionar que los límites comerciales aceptados para un buen maquinado oscilan alrededor de 200 a 250 HB. A causa del desconocimiento de esta situación es por lo que aparecen los problemas en las plantas de maquinado que impactan en un desgaste excesivo de herramientas de corte y roturas, así como un deterioro de la eficiencia de las operaciones, mismas que se ven afectadas en su funcionamiento por:

- ❖ Desgaste prematuro de herramientas
- ❖ Disminución en la velocidad de maquinado

Retrasos costosos en el armado de componentes en línea final.

---

---

# INTRODUCCIÓN

Los países son el resultado del esfuerzo y del ejercicio pleno y consciente de sus potencialidades. Hoy se sabe que el liderazgo comienza por casa y, al abrirse el panorama del siglo XXI, México está en una posición privilegiada para regresar, por la inteligencia y el esfuerzo de su gente, a los primeros planos de la minería y de la metalurgia a escala mundial. Es imprescindible aprovechar la coyuntura, apenas el 20% del potencial minero del país ha sido explotado. Los documentos permiten llegar a la afirmación: solamente la quinta parte de la población del mundo, y que habita en los países más avanzados, aprovecha las maravillas de los minerales. Algunos países de Europa padecen ciertos problemas respecto a sus reservas. En Asia, Japón importa casi todos los minerales y metales que, hoy por hoy, emplea. Por otra parte, la mayoría de las reservas en minerales pueden hallarse en los países que, como México, se han colocado en el arranque de un desarrollo sostenido. Seguido por los Estados Unidos, México es el principal productor de plata en el orbe.

## **¿Qué son los minerales?**

Hay que afirmar que son cuerpos formados a través de largos y complejos procesos inorgánicos de la naturaleza. Poseen una composición química extraordinariamente definida, si se han formado en condiciones apropiadas tendrán siempre una estructura molecular característica, la cual puede notarse dado sus tonos cristalinos, así como otras propiedades físicas. Si pensamos en los minerales, resulta muy propio comprender que un mineral es aquella sustancia inorgánica y susceptible de ser extraída de la tierra para su utilización. Piénsese en las rocas, en cualquiera de los metales, el carbón, el petróleo y el gas. Como es claro, los minerales deben tener una composición que sea expresable por medio de una fórmula química. **¿Qué son los metales?**

Sin duda alguna, podemos decir que son sustancias evidentemente opacas y fusibles; hay que advertir que resultan muy buenos conductores de electricidad y que se caracterizan por un brillo metálico. Casi todos vienen a ser maleables y pesados. Absolutamente todos, salvo el mercurio, son sólidos si se encuentran a temperaturas ordinarias.

---

---

## La metalurgia

Ciencia inmemorial y arte insustituible de preparar, para su empleo, a los metales que provienen de las minas, haciendo la separación de su composición química o de sus mezclas mecánicas. Como su nombre lo indica, la metalurgia implica los diversos procesos de fundición, amalgamación, refinación, electrolítica, etc. Es básico señalar que la metalurgia es una actividad que se ocupa de la producción de materiales metálicos crudos.

### La metalurgia y sus procesos

La historia del hombre, es la historia de quien aprende a transformarse a sí mismo y busca una relación responsable con la naturaleza. Desde los tiempos iniciales, el hombre ha establecido con los metales un camino de búsqueda y de encuentro, de ciencia, arte, trabajo y perseverancia. Así, ha inventado procesos y técnicas para conquistar la riqueza del subsuelo. La voluntad y la imaginación han sido vitales para hallar procesos adecuados en el beneficio de cada metal. Por citar sólo cuatro ejemplos, sin embargo esenciales, el hombre ha creado **La Amalgamación**, que es el procedimiento según el cual se recuperan el oro y la plata contenidos en un mineral molido, a partir de su aleación con mercurio, para después separarla por sublimación. Otro importante ejemplo vendría a ser **La Electrólisis**, que es el acto o proceso de descomposición química por efecto de una corriente eléctrica; o **La Refinación**, que en la metalurgia significa deshacerse de las impurezas de los materiales. No podemos dejar de citar **La Fundición**, que es el establecimiento donde los metales son fundidos.

La revolución tecnológica trajo consigo aportaciones que, en la actualidad, han transformado y hecho eficientes los procedimientos metalúrgicos más diversos. Pongamos el caso de **La Cianuración**, que se aplica en la extracción del oro y de la plata que se encuentran altamente concentrados en diversos minerales, o bien finamente molidos. Se ponen, entonces, soluciones en extremo equilibradas de cianuro de sodio, o de potasio. Ya disueltos, la plata y el oro se depositan sobre tiras o polvo de zinc metálico. Después se lavan y funden produciendo las hermosas barras Doré. Otro procedimiento es **La Clasificación**, su nombre lo indica, es clasificar, por diferentes tamaños, mineral molido. Vayamos adelante y hablemos de **La Sedimentación**, ésta hace referencia al material de roca que no se ha consolidado, o que se encuentra fragmentado. Tal material viene a ser transportado y depositado, de manera muy fina, en capas, o en las llamadas estratificaciones. Otro proceso extraordinariamente puntual es **La Molienda**, por ella debe entenderse el grado del mineral ya molido. Por lo común, se expresa en el porcentaje que pasa por determinadas mallas en términos de pulgadas cuadradas. Y, por último, porque no hablar de **La Flotación**, ésta se basa en los principios de tensión química y coloidal, y otros relacionados, para separar minerales de la ganga que los contiene, haciéndolos flotar en burbujas de aire hasta derramarlos como concentrados para su realización.

### La metalurgia hoy

Se ha detectado que en la actualidad el problema principal que enfrenta la industria de la fundición es el trabajar con costos competitivos y esto solo será posible lograrlo abatiendo los costos de procesos que significan rechazos, para evitar el ofrecimiento a los clientes

---

---

naturales de ella, que son las plantas de maquinado, piezas fuera de especificación por una elevada dureza, que ocasiona un desgaste excesivo en la herramienta de corte que refleja como consecuencia una baja productividad de las líneas de maquinado. Lo anterior añade un costo más elevado en el precio unitario de fabricación. Se ha encontrado que las fallas tienen por causa una aplicación inadecuada del proceso de **inoculación**. Esto es en referencia a piezas coladas con aleaciones hierro carbono.

Las fundiciones de hierro, al igual que el resto de los materiales metálicos, poseen características mecánicas que en gran medida son manifestación de sus microconstituyentes. La complejidad o sencillez de estos, así como su localización, distribución e interacción generan un comportamiento distinto ante las sollicitaciones externas que el material soporta.

La diversidad de factores que están influyendo en la naturaleza y disposición de los constituyentes microestructurales de los materiales hace que las posibilidades de respuesta y utilización sean múltiples.

Ello trae como contrapartida una gran dificultad en la producción homogénea del material, así como la necesidad de implantar severos controles de calidad orientados fundamentalmente a garantizar el cumplimiento de las crecientes exigencias del mercado.

Durante el proceso de fabricación de una fundición de hierro nodular se efectúa la operación de inoculación con el objetivo de controlar, el tipo, la distribución y la morfología de la fase grafito y evitar la presencia de carburos eutécticos.

El conteo nodular, determinado por la cantidad de partículas de grafito esferoidal por unidad de área, es el parámetro habitualmente utilizado para caracterizar la calidad y grado de refinamiento de una fundición nodular eutéctica.

Por tal motivo nos enfocaremos en obtener la dureza idónea mediante el proceso de inoculación, utilizando como inoculantes más comunes el ferrosilicio, calciosilicio y el grafito.

Mediante la inoculación lograremos que innumerables empresas ahorren tiempo y dinero ya que las producciones con piezas de fundición que presentan dureza excesiva no pueden ser maquinadas con facilidad logrando desgastes en las herramientas de corte y pérdida de tiempo, la inoculación tiene como propósito obtener piezas que sean fáciles de maquinar debido a que no presentan exceso de dureza.

La inoculación es la operación, que al realizarse con eficiencia, al sobrevenir la solidificación, nuclea una abundante precipitación de grafito procedente del carbono combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), con lo cual se garantiza la dureza superficial adecuada para las operaciones de maquinado.

Para poder lograr que las piezas fundidas no presenten dureza excesiva nos enfocaremos en los principales materiales inoculantes, teniendo como objetivo principal: lograr un adecuado control de la operación de inoculación para evitar una elevada dureza. Al lograr este principal objetivo cubriremos también lo que es: la satisfacción de los clientes de la

---

---

industria de la fundición que son las plantas de maquinado, las cuales hacen eficientes las operaciones con piezas con la adecuada dureza superficial especificada.

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## GENERALIDADES Y/O ANTECEDENTES

### 1.1-Fundición

La metalurgia es la ciencia que estudia la estructura y las propiedades de los metales. Establece la relación existente entre su composición química, su metalografía y sus características.

Las fundiciones son aleaciones hierro-carbono donde el contenido de carbono varía entre 2,14% y 6,67% (aunque estos porcentajes no son completamente rígidos). Comúnmente las más usadas están entre los valores de 2,5% y 4,5%, ya que las de mayor contenido de carbono carecen de valor práctico en la industria. Además de hierro y carbono lleva otros elementos de aleación como silicio, manganeso, fósforo, azufre y oxígeno.

Los materiales base hierro forman parte de la gran familia de los metales. Pueden presentarse como elemento puro o formando parte de las aleaciones. Desde el punto de vista industrial, los metales puros no tienen un campo de aplicación importante, ya que, en general, las piezas se fabrican partiendo de metales aleados. En ese sentido, el hierro en estado puro es prácticamente inusual, en lo que a aplicaciones industriales se refiere.

Por este motivo se habla siempre de las aleaciones ferrosas, se definen como aleaciones ferrosas aquellas en las que el hierro (Fe) es el elemento principal, ocupando el carbono un lugar destacado dentro del conjunto de los elementos químicos que las forman (ver figura 1).

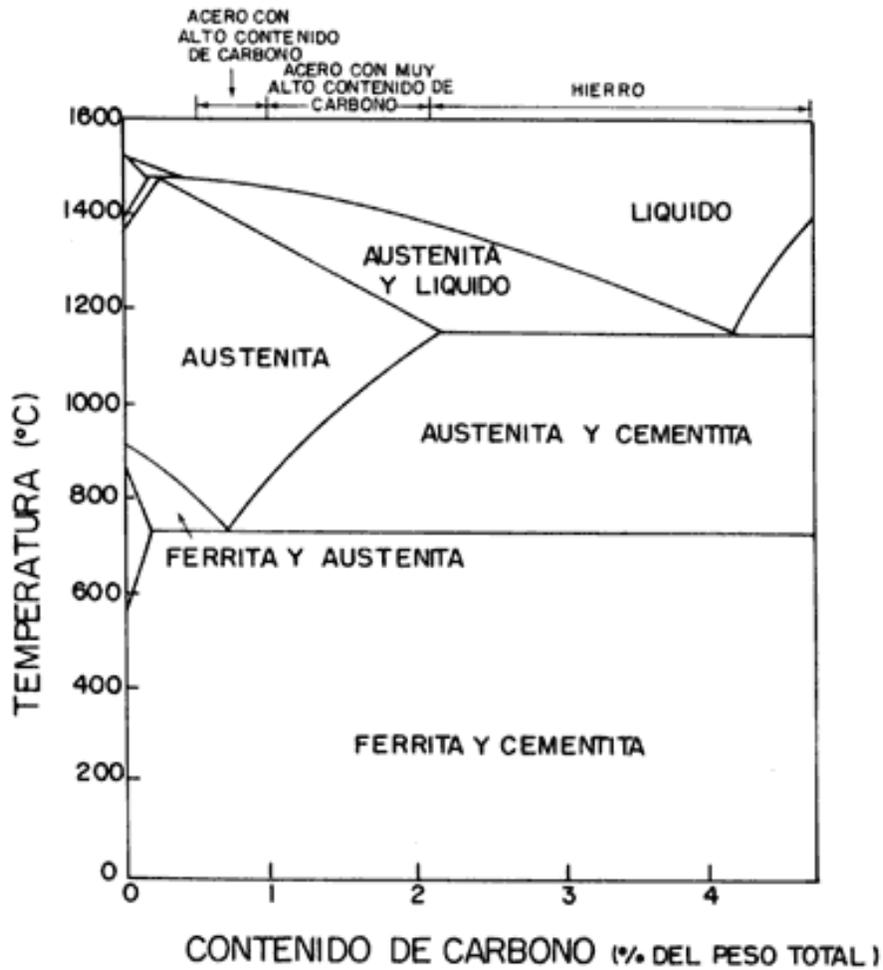


Fig. 1 Diagrama Hierro Carbono

### 1.1.1-Hierro

El hierro colado contiene de 2 a 4.5% de carbono, tiene una temperatura de fusión de 1149 °C (2100 °F). Tradicionalmente el hierro se clasifica de la siguiente forma (ver tabla 1 y 2).

Fundiciones de Hierro		
Fundición gris	Fundición blanca	Fundiciones Especiales
Ferrítica	Aleada	Maleables
Perlítica	Sin alear	Esferoidales

Tabla 1 Clasificación tradicional de las fundiciones de hierro

Fundiciones de Hierro	
Grafíticas	No grafíticas
Laminares	Blancas
Maleables	Aleadas
Esferoidales	
Compactas	

Tabla 2. Clasificación de las fundiciones de hierro

El hierro nodular se obtiene mediante la introducción controlada de magnesio en el hierro base, y bajas proporciones de azufre y fósforo. Se obtiene de este modo una extraordinaria modificación en la micro-estructura del metal, ya que el carbono se deposita en la matriz ferrítica en forma de esferas al contrario de lo que ocurre en el hierro gris, en el que el carbono toma la forma de láminas.

El resultado de este importantísimo cambio de estructura, es un hierro mucho más resistente.

- ❖ Resistencia a la tracción.
- ❖ Aptitud al moldeo.
- ❖ Resistencia a la abrasión.
- ❖ Maquinabilidad.
- ❖ Resistencia a la fatiga.

### 1.1.2-Fundición Nodular

Al contrario de una fundición gris, la cual contiene hojuelas de grafito, la fundición nodular tiene una estructura de colada que contiene partículas de grafito en forma de pequeños nódulos esferoidales en una matriz metálica. De este modo la fundición nodular tiene una resistencia mucho mayor que una fundición gris y un considerable grado de tenacidad, estas propiedades y otras tantas pueden mejorarse con la utilización de tratamientos térmicos.

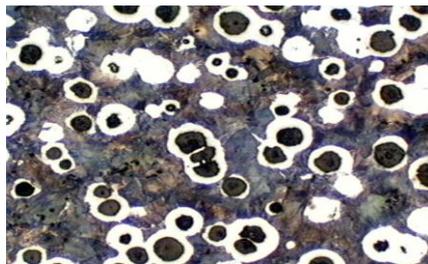


Fig.2 Hierro nodular 10x



Fig.3 Hierro nodular 40x

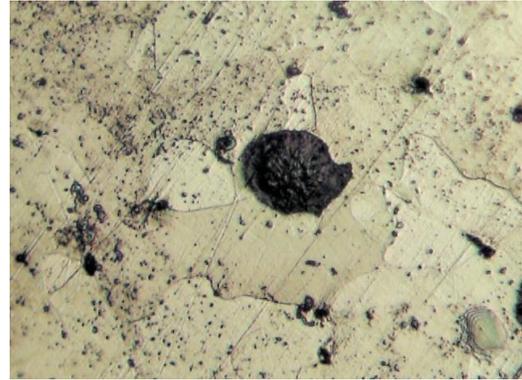


Fig.4 Fundicion nodular 20x

Al igual que una fundición gris, este material tiene la ventaja de poseer una excelente fluidez. De este modo es posible obtener piezas de reducidos espesores, siempre que se asegure un flujo lineal y calmado a la hora de llenar los moldes, esto es imprescindible para evitar el endurecimiento de los bordes y la formación de carburos en las secciones más delgadas.

La fundición nodular tiene varios usos estructurales, particularmente aquellos que requieren resistencia y tenacidad combinados con buena maquinabilidad y bajo costo.

Entre las exclusivas propiedades de la fundición nodular se incluye, la facilidad para realizar tratamientos térmicos, ya que el carbono libre de la matriz se puede disolver a cualquier nivel para ajustar su dureza y propiedades mecánicas.

La fundición nodular es menos densa que el acero y la diferencia de peso entre ambos puede llegar al 10% en el mismo espesor. Tanto las propiedades de la fundición como su propia aceptación vienen condicionadas de manera preferente por la forma esferoidal del grafito.

---

---

## 1.2-Tipos de grafito

Tipo A (Láminas de grafito distribuidas uniformemente sin orientación preferente): Es el tipo más comúnmente observado. Aparece en las fundiciones grises si los contenidos en Si y P no son muy elevados (ver figura 5).

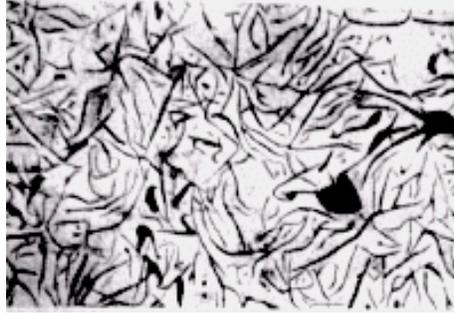


Fig.5 Grafito tipo A

Tipo B (Grafito en rosetas): Este tipo de grafito está asociado a velocidades de enfriamiento más altas. Cada roseta tiene por origen un centro de cristalización a partir del cual las láminas de grafito han crecido radialmente. Se encuentra frecuentemente en la superficie de piezas que presentan grafito A en su interior (ver figura 6).

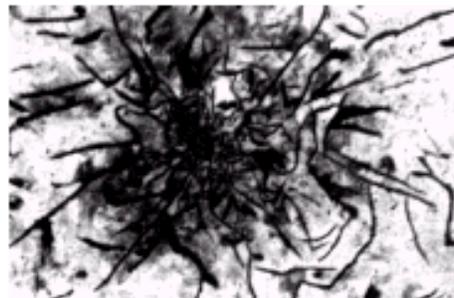


Fig.6 Grafito tipo B

Tipo C (Láminas de dimensiones diferentes): Se presenta en fundiciones de composición hipereutéctica. Las láminas más gruesas se forman directamente del líquido, mientras que el grafito eutéctico se forma más tarde en el espacio que han dejado las láminas. Se pueden ver depósitos de grafito secundario en las caras de las láminas (ver figura 7).

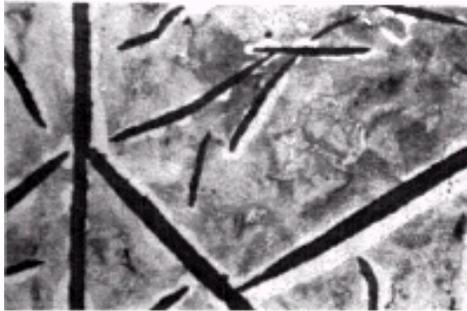


Fig.7 Grafito tipo C

Grafito esferoidal: Se obtiene en fundiciones con composiciones específicas con un tratamiento de nodulización de metales como Mg y Ce. El esferoide consiste en una serie de cristales que crecen a partir de un centro común (ver figura 8).

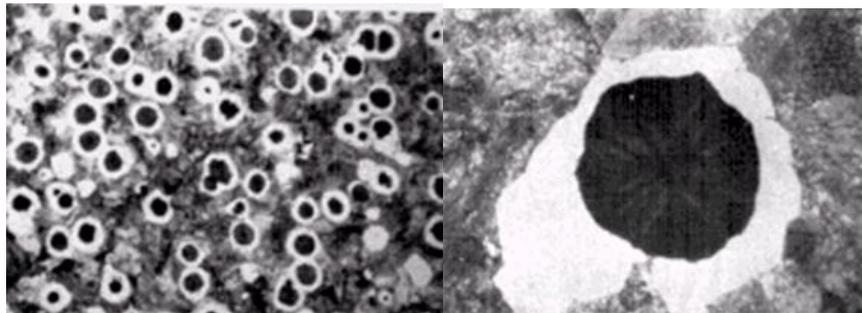


Fig.8 Grafito esferoidal

Fundición maleable: Proviene de la descomposición de la cementita a altas temperaturas. El contorno puede ser más o menos irregular, dando lugar a formas de apariencia de cangrejo o nodular (ver figura 9).

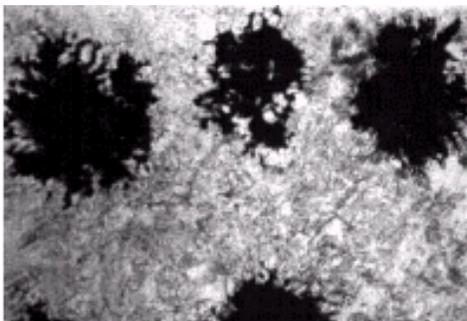


Fig.9 Fundición maleable

---

---

Tipo D (Grafito interdendrítico de sobrefusión): Esta forma es debida a la nucleación retardada del grafito relacionada con sobrefusión. Se presenta en gran número de láminas muy pequeñas la distribución de las cuales muestra los ejes de crecimiento de los cristales durante la solidificación (ver figura 10)



Fig.10 Grafito tipo D

Tipo E (Grafito interdendrítico con orientaciones preferentes): Se encuentra en fundiciones de composición bastante hipoeutéctica. Está relacionado con una sobrefusión menos característica. La orientación está impuesta por las dendritas (ver figura 11).



Fig.11 Grafito tipo E

### 1.2.1-Grafito esferoidal (nodular)

Esta es la forma gráfica exigida a las fundiciones esferoidales. Su imagen microscópica es la de círculos oscuros ocluidos en la matriz metálica (ver figura 12).

La uniformidad de tamaño y reparto es indicadora de calidad de la propia fundición esferoidal.

Existen distintas teorías para mistificar la forma esferoidal del grafito, aunque ninguna de ellas es definitiva.

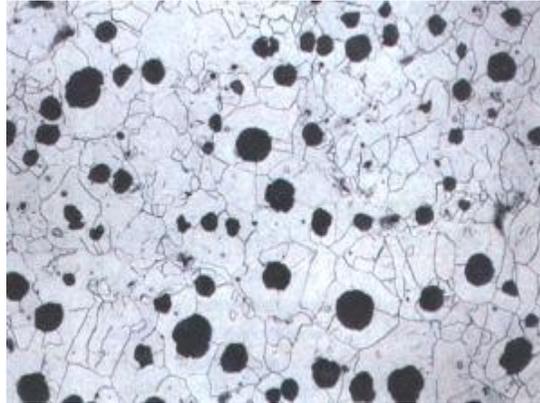


Fig.12 grafito esferoidal

Todas la normas internacionales exigen valores mínimos de esferoidización con el fin de determinar la aceptación o el rechazo. No obstante debería realizarse alguna acotación relativa a las formas gráficas no esferoidales. A modo de ejemplo podemos indicar que un contenido del 10% de grafito casi laminar, repartido uniformemente por toda la matriz, no presenta influencia desfavorable de importancia. Sin embargo, ese mismo 10% en forma de grafito intercelular es sumamente nocivo y, como tal, debe rechazarse.

---

---

## **1.3-Conceptos básicos**

### **1.3.1-Inoculación**

Es la operación, que al realizarse con eficiencia, al sobrevenir la solidificación, nuclea una abundante precipitación de grafito procedente del carbono combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), con lo cual se garantiza la dureza superficial adecuada para las operaciones de maquinado.

Es también la adición de un agente extraño (partículas) al hierro fundido que aporta sitios de nucleación en donde el grafito precipita durante la solidificación

### **1.3.2-Nucleación**

Es la formación de los primeros cristales de nano tamaño en el material fundido. Indica la etapa inicial de la formación de una fase a partir de otra.

Existen 2 tipos de nucleación la homogénea y la heterogénea, se enfocara este tema en la heterogénea.

### **1.3.3-Nucleación heterogénea**

Es la que se produce en superficies preexistentes.

Las impurezas cuando se solidifican actúan como nucleantes heterogéneos, a veces se introducen intencionalmente partículas nucleantes en el metal líquido. A estas partículas se les llama refinamiento del grano mejor conocido como inoculación.

La inoculación produce mayor cantidad de centros de nucleación cada uno de los cuales comienza a crecer a partir del núcleo.

---

---

## 1.4-Factores metalúrgicos

Los siguientes factores son los que determinan el tipo de hierro a obtener.

- ❖ Velocidad de enfriamiento
- ❖ Composición química, particularmente el contenido del Si
- ❖ Grado de nucleación , o sea, el número de células eutécticas
- ❖ Grado de sobrefusión

### 1.4.1-Velocidad de enfriamiento

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

La inoculación controla la sensibilidad al espesor actuando sobre el grado de enucleación, el grado de sobrefusión y el grado de oxidación del hierro.

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

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

La inoculación no puede cambiar la velocidad de enfriamiento, así que tiene que reducir por consiguiente la velocidad crítica de enfriamiento sobre la cual se forma carburo de hierro. Esto se realiza actuando sobre el grado de nucleación, grado de sobrefusión y grado de oxidación del hierro.

### 1.4.2-Tamaño de las células eutécticas

La inoculación aumenta el número de células eutécticas. El grafito en una célula eutéctica, tiene una forma groseramente esférica, que esta interconectada. Esta compuesto de hojas serpenteantes y deformadas radiando todas de un centro común y dando la estructura normal de grafito en láminas. Aumentando el número de células eutécticas y

---

---

con ello aumentando los centros de solidificación, el carbono en solución se puede separar a mayor velocidad y por consiguiente, facilita la obtención de estructuras grises a mayores velocidades de enfriamiento. (La migración del carbono en líquido hacia una lámina de grafito creciente requiere cierto tiempo. Aumentando el número de células eutécticas, se reduce la distancia que tiene que recorrer el carbono).

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

### **1.4.3-El grado de sobrefusión**

Los hierros colados solidifican eventualmente como un eutéctico de austenita-grafito o austenita-carburo de hierro.

La composición a la que esto ocurre viene expresada por la relación entre el carbono, silicio y fósforo. (Carbono equivalente).

Se forman principalmente en el líquido dendritas de austenita. Estas dendritas continúan creciendo hasta que el líquido realmente alcanza la composición eutéctica. (Como la austenita contiene solamente 1.7% de carbono, el líquido remanente va enriqueciéndose en carbono).

Bajo condiciones de equilibrio la composición eutéctica solidifica a determinada temperatura conocida, se forman los núcleos de grafito y posteriormente crecen juntas las láminas de grafito y austenita.

Mientras esto va ocurriendo, la temperatura permanece constante o puede incluso aumentar ligeramente hasta que todo el hierro ha solidificado correctamente, cuando la velocidad de enfriamiento excede de un valor crítico, el grafito no puede nuclearse hasta que se alcanza una temperatura más alta. O en casos extremos no puede nuclearse en absoluto. En las etapas intermedias la grafitización es retardada y el líquido llega a sobresaturarse de carbono, esto se conoce como sobre fusión. Bajo condiciones ideales, el calor desprendido como resultado de la solidificación del eutéctico puede interrumpir el descenso de la temperatura, pero cuando el calor es perdido por la pieza, a una velocidad bastante rápida esto no ocurre. Como el metal sigue enfriándose, se alcanza cierta temperatura a la que el hierro solidifica como carburo de hierro (blanco). De este modo entorpeciendo la reacción del eutéctico el tiempo disponible para la precipitación del carbono como grafito queda reducido y al mismo tiempo la concentración de carbono en el líquido remanente queda incrementada.

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

---

---

### 1.5-Cualidades de un hierro inoculado

Para ser susceptible de ser inoculada, una fundición tiene que ser hipo eutéctica. Esta técnica permite la utilización de hierro con carbono equivalente muy bajo para colar las piezas de altas características y de tal espesor que sin inoculación, presentarían una elevada proporción de cementita.

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

- ❖ Composición química prácticamente inalterada
- ❖ Mayor homogeneidad de la estructura cristalina entre los distintos espesores, así como entre la superficie y la parte interior de una misma pieza: esto corresponde a una menor sensibilidad de temple.
- ❖ Mejora de la maquinabilidad, es decir, mayor homogeneidad de las durezas superficiales de piezas.
- ❖ Mejores características mecánicas, o sea, una modificación de las estructuras metalográficas.
- ❖ Neutralización de la influencia de las variaciones y análisis del hierro base, y con ello, obtención de las características más constantes.
- ❖ Reducción de peso de piezas.
- ❖ Apreciable aumento de la resistencia a la tracción (420 N/mm<sup>2</sup>) respecto de las ya elevadas de las fundiciones grises (180 a 200 N/mm<sup>2</sup>); también la capacidad de alargamiento que rebasa ampliamente el 5%.

En resumen, aun poseyendo el mismo contenido de carbono que la fundición gris, la fundición nodular añade:

- ❖ Resistencia a la tracción y a los choques.

---

---

## **1.6-Efectos, requisitos y composición**

### **1.6.1-Efectos de la inoculación sobre las características mecánicas**

Si se emplea adecuadamente, la inoculación mejora la mayoría de las propiedades mecánicas de la fundición el grado de la mejora depende esencialmente del tipo de inoculante empleado y de la propia estructura de hierro base, es decir, los hierros que normalmente contendrían elevados porcentajes de grafito tipo D y E, serán mucho mejor logrados que otros tipos de hierro. Dichos hierros tendrían unas propiedades mecánicas muy bajas si no estuvieran inoculados, el uso de inoculantes promueve un nivel uniforme de altas propiedades mecánicas para cualquier composición dada y reduce las fluctuaciones en dichas propiedades, que son originadas por variaciones en el tipo de grafito y su distribución.

### **1.6.2-Efectos de la maquinabilidad y profundidad de temple en las fundiciones**

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

El efecto de la inoculación sobre la reducción del “blanqueo” o profundidad de temple esta directamente relacionado con la maquinabilidad del hierro. Debido a una mayor uniformidad en la estructura, a la eliminación de la ferrita primaria, a la disminución de la dureza superficial y al transformar en los espesores delgados el carburo de hierro en perlita y grafito.

### **1.6.3-Requisitos prácticos de un inoculante**

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

- ❖ Reducir al mínimo el valor del temple, en función de la composición química del hierro.
- ❖ Da resultados constantes con una adición predeterminada idéntica para cada tipo de composición de carga.
- ❖ No tener influencia sobre composición química.
- ❖ Prolongar su adición el tiempo suficiente para permitir el llenado de los moldes en condiciones normales, por lo tanto, no tiene que ser muy sensible a un efecto de decaimiento.
- ❖ Mejorar las características mecánicas.
- ❖ No tiene que haber efectos adversos al añadir mas inoculante (accidentalmente o a voluntad) que el mínimo necesario.
- ❖ Ser económico.

---

---

#### 1.6.4-Composicion de un inoculante

Ningún producto posee al mismo tiempo, todas las cualidades anteriormente citadas. Por este motivo, se utiliza frecuentemente una mezcla de diferentes metales, aleaciones y cuerpos simples (ver tabla 3).

Inoculantes más utilizados		
Ferro Silicio (de 0.1% a 0.6% de Silicio como Fe-Si)	Calcio Silicio (de 0.1% a 0.6% de Silicio como Ca-Si)	Grafito (de 0.06% a 0.1% de Carbono como grafito)

Tabla. 3 Inoculantes más utilizados

En efecto, si se examinan por separado los principales productos que permiten una inoculación y que son reconocidos como eficaces, se encuentran:

**Ferro-Silicio:** Producto altamente utilizado (0.1 a 0.6%) y tiene un efecto de decaimiento muy rápido si se utiliza en estado puro. En espesores importantes tiene tendencia a formar una estructura ferrítica. En realidad, al modificar sensiblemente la composición química del hierro tratado, puede decirse que su acción es más bien simple adición.

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

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

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

Estos pocos elementos, o compuestos están lejos de formar una lista exhaustiva de todos los inoculantes conocidos y posibles, pero ponen en evidencia las dificultades que existen en la composición de un producto que incremente las ventajas y reduzca los inconvenientes de cada uno de los constituyentes. La inoculación eleva: La resistencia mecánica de la fundición y la conductibilidad térmica

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## DESCRIPCION DEL PROCESO

### **2.1-Fusion del hierro nodular**

El hierro nodular o hierro con grafito esferoidal puede ser definido como un hierro base que tiene una microestructura cuando menos de 90% de grafito en una forma en verdad esferoidal. Se conocen varios elementos más ampliamente utilizados para este propósito. Sin embargo, otros elementos como el calcio y el litio son conocidos como capaces de desarrollar estructuras de tipo nodular.

#### **2.1.1.-Proceso de fusión**

La condición fundamental durante la producción de hierro nodular es el bajo contenido de azufre en el metal base. Esta exigencia está estrechamente relacionada con la elección del equipo de fusión.

#### **2.1.2-Proceso de tratamiento para la nodulización (Proceso al magnesio).**

De los elementos conocidos de ser capaces de producir estructuras con grafito nodular cuando es agregado al hierro base, el magnesio presenta el mayor interés industrial y parece ser capaz de desarrollar las mejores propiedades mecánicas.

#### **2.1.3.-Composición del hierro base.**

El contenido de azufre debe ser muy bajo en el hierro a tratar. El magnesio también es un agente desulfurante activo y su primer efecto al ponerse en contacto con el metal, es la

---

---

eliminación del azufre a contenidos del orden de 0.01%. Hasta que el azufre es disminuido a un límite como ése o cercano, el magnesio ejerce una pequeña influencia sobre la deformación del grafito.

Sin considerar el contenido de azufre, la composición preferida del hierro base, está entre los límites siguientes:

C total = 3.4 á 4.2%

Si = máx. 1.5%

Mn = máx. 0.4%

P = máx. 0.08%

S = 0.02%

Aun cuando el manganeso y el fósforo no impiden la formación de los nódulos de grafito, sí disminuyen la ductilidad en forma considerable y como esta propiedad es una característica importante del hierro nodular, es esencial mantener el contenido de estos elementos tan bajos como sea posible.

#### **2.1.4-Introducción del magnesio.**

Una de las grandes dificultades prácticas es conseguir la cantidad requerida de magnesio dentro del metal con el grado necesario de consistencia y seguridad combinada con la libertad suficiente para evitar los riesgos. El magnesio hierve a unos 1120°C y cuando es sumergido en el hierro base fundido a 1500°C, el magnesio metálico se funde y se evapora instantáneamente, escapando con violencia y arrastrando consigo algo de hierro.

#### **2.1.5-Elementos inhibidores.**

Algunos elementos que pueden estar presentes en el hierro base tienen un efecto inhibidor sobre la formación de los nódulos (ver tabla 4).

Inhibidores	
Aluminio	arriba de 0.13%
Arsénico	arriba de 0.09%
Bismuto	arriba de 0.002%
Plomo	arriba de 0.002%
Estaño	arriba de 0.04%
Titanio	arriba de 0.04%

Tabla 4 Inhibidores comunes

---

---

A esta lista se puede también agregar el antimonio, el telurio y el selenio; en contenidos límite aún desconocidos.

Todos ellos ejercen un efecto nocivo sobre el desarrollo de una estructura

El Plomo arriba de 0.002% elimina completamente la formación de nódulos.

---

---

## 2.2-Proceso metalográfico

La metalografía es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas.

Entre las características estructurales están el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal.

La preparación de muestras metalográficas generalmente requiere de 6 etapas principales:

- ❖ Selección o muestreo
- ❖ Corte
- ❖ Montaje
- ❖ Desbaste
- ❖ Pulido
- ❖ Ataque

Para una buena preparación se tiene que obtener:

- ❖ Una superficie plana
- ❖ Libre de rayas y picaduras
- ❖ Inclusiones intactas
- ❖ Terminado a espejo

### 2.2.1-Selección o muestreo

La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita examinarse y en la orientación apropiada, debe ser representativa. En resumen se necesita checar si se requiere un corte o más de un corte, que tipo de corte (transversal o longitudinal) y en base a esto y al tipo de material, seleccionar con que se va a cortar.

### 2.2.2-Corte o seccionado

Existen 2 formas para cortar, con segueta o con discos abrasivos ¿Cuándo elegir cuál? Si el material es suave como metales o aleaciones no ferrosas y aceros no tratados térmicamente, la sección puede obtenerse por corte manual con una segueta, si el material es duro la sección puede obtenerse mediante un disco cortador abrasivo.

### 2.2.3-Montaje (opcional)

El propósito de montar una muestra es la facilidad que nos brinda, ya que cuando tenemos muestras pequeñas o de forma incómoda esta facilitara de alguna manera su manejo en las etapas subsecuentes de la preparación y análisis, otro propósito es

---

---

proteger y preservar los bordes o defectos superficiales durante la preparación, además se pueden montar varias muestras en una misma probeta y pulirlas al mismo tiempo (ver tabla 5).

Un beneficio adicional del montaje es la facilidad con la cual una muestra montada puede ser identificada, escribiendo en la superficie de montaje sin dañar la muestra.

Métodos de Montaje
Con grapas o abrazaderas
Con presión
En frío

Tabla 5 métodos de montaje

#### 2.2.4-Desbaste

Los granos y otras características de los metales no pueden verse a menos que la muestra se desbaste y se pula para eliminar las ralladuras. El desbaste de la probeta es tal vez la más importante de las etapas necesarias para obtener una fotomicrografía de buena calidad. A menudo, y para obtener el fin deseado se busca un método más corto o un ahorro de tiempo en el trabajo de preparación, esto es rara vez productivo, y frecuentemente la probeta final no es ni exacta, ni representativa de la microestructura.

Una lija abrasiva de 150 a 180 es suficientemente gruesa para usarse en superficies de muestras cortadas por un disco de corte abrasivo, y el corte con segueta usualmente requiere lijas abrasivas en el intervalo de 80 a 150. Una secuencia de desbaste satisfactorio involucra tamaños de lija de 180, 240, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000 (ver figura 13).

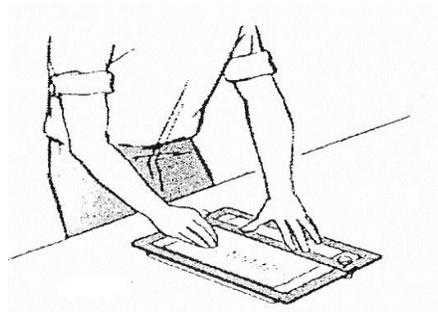


Fig. 13 Desbaste

El operador usualmente puede asumir que la operación está concluida si se desbasta el tiempo requerido para mover las rallas producidas por la etapa anterior, la probeta debe rotarse de tal forma que las nuevas rayas corten a las anteriores en un ángulo aproximado de 45° o 90° entre cada paso, para así saber cuándo se han eliminado las rayas del paso anterior (ver figura 14).

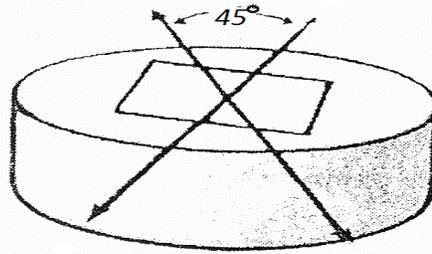


Fig.14 Rotación de muestra

### 2.2.5-Pulido

El pulido es la etapa final en la producción de una superficie que es plana, libre de rayas y similar a un espejo en apariencia (ver figura 15). Dicha superficie es necesaria para la correcta interpretación de una metalografía, ya sea cualitativa o cuantitativamente. La técnica de pulido empleada no debe provocar estructuras extrañas como metal distorsionado, picadura, colas de cometa o retención de líquidos.

El pulido debe efectuarse en un área libre de polvo, preferiblemente retirada del área de corte, desbaste y montaje. Es necesario extremar precauciones de cualquier contaminación sobre un paño de pulido por partículas abrasivas, las cuales pueden provenir de operaciones anteriores, polvo, tierra, etc. Es importante que el operador lave sus manos meticulosamente antes de pasar a la etapa de pulido, el cual es otra fuente de contaminación de los paños. Si por algún motivo el paño es contaminado, es casi imposible remover todos los contaminantes lavando el paño, en esta situación, el operador deberá reemplazar el paño.

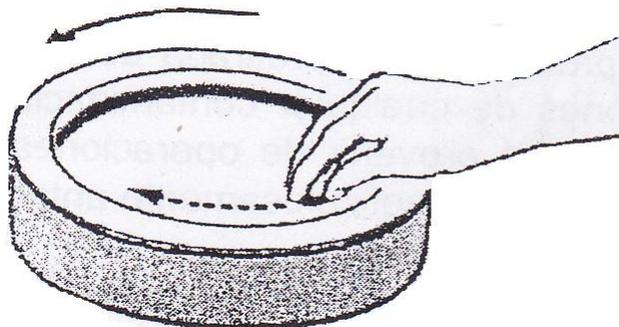


Fig. 15 Pulido

### 2.2.6-Ataque químico.

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación el proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de las microestructura.

---

---

Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química.

La selección del reactivo de ataque está determinada por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver.

Los reactivos que se utilizan consisten en ácidos orgánicos o inorgánicos y álcalis disueltos en alcohol, agua u otros solventes (ver tabla 6).

Metales	Reactivo
Hierro y acero al carbono	Nital
Aceros aleados e inoxidables	Cloruro férrico y ácido clorhídrico
Aceros de alta velocidad	Ácidos clorhídrico y nítrico
Aluminio y aleaciones	hidróxido de sodio
Magnesio y aleaciones	Glicol
Níquel y aleaciones	Ácido acético y ácido nítrico
Cobre y aleaciones	Ácido nítrico

Tabla 6 Listado de reactivos de ataque

---

---

## **2.3-Procesos de análisis químico**

### **2.3.1-espectrometria de absorción atómica**

En química analítica, la espectrometría de absorción atómica es una técnica para determinar la concentración de un elemento metálico determinado en una muestra. Puede utilizarse para analizar la concentración de más de 62 metales diferentes en una solución. En metalurgia esta técnica es muy útil ya que permite determinar diversos elementos en un amplio rango de concentraciones.

### **2.3.2-Espectrometria de emisión óptica**

Este tipo de análisis permite determinar los elementos presentes en una muestra así como el porcentaje de cada uno de ellos. El método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa.

---

---

## **2.4-Equipo y condiciones para fundir**

- ❖ Horno de arco eléctrico de 30Kg de capacidad
- ❖ Dos ollas para el vaciado del metal fundido de 15Kg cada una
- ❖ Maquina adobera para fabricar el molde en arena para obtener las muestras necesarias

### **2.4.1-Materiales**

- ❖ Chatarra de acero
- ❖ Lingotes de arrabio(sorel)
- ❖ Ferro silicio en roca 50%
- ❖ Ferro silicio en grano al 75%
- ❖ Ferro manganeso en roca 50%
- ❖ Agentes recarburizantes
- ❖ Escorificante
- ❖ Inoculantes

### **2.4.2-Equipo de Seguridad.**

- ❖ Casco y lentes de azul cobalto zapatos de seguridad
- ❖ Guantes de asbesto aluminizado y de carnaza.
- ❖ Mandiles y polainas de asbesto aluminizado y carnaza.
- ❖ Careta de plástico transparente
- ❖ No deben usarse zapatos tenis.

### **2.4.3-Pruebas básicas**

- ❖ Obtención del metal al estado fundido
- ❖ Transferir el metal a la olla de vaciado
- ❖ Aplicar el proceso de inoculación
- ❖ Desmolde de piezas obtenidas
- ❖ Preparación de muestras para análisis metalográfico
- ❖ Evaluación de resultados sin ataque (pulido con alúmina)
- ❖ Evaluación de resultados con ataque (nital al 3%)

### **2.4.4.-Condiciones de experimentación**

- ❖ Temperatura de sobrecalentamiento del metal de 100 a 120° arriba del punto de fusión
- ❖ Eliminación de la capa de escoria
- ❖ Inoculación, cumpliendo con las indicaciones programadas
- ❖ .Tiempo de desmolde 0.5hr /cm.
- ❖ Resultados de los análisis químicos, pruebas físicas y metalografía de las probetas del laboratorio
- ❖ Obtención de resultados de las pruebas
- ❖ Análisis de resultados obtenidos y conclusiones

---

---

## **2.5-Equipo metalográfico**

- ❖ Cortadora metalográfica o segueta
- ❖ Desbastadora
- ❖ Pulidora metalográfica
- ❖ Microscopio metalográfico

### **2.5.1-Material**

- ❖ Pieza 1 y 2
- ❖ Lijas
- ❖ Alúmina
- ❖ Nital
- ❖ Bakelita

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1-Informacion básica

Se planeó una serie de pruebas las cuales consisten en la obtención de metal fundido con diferente composición química y con el proceso de inoculación variando las cantidades de inoculante.

Se realizaron 2 coladas cada una con un diferente contenido de inoculante. Estas muestras serán identificadas como A y B

La idea es obtener materiales con la dureza adecuada para su maquinado ya que al excederse esta hay pérdida de costos y tiempo en equipo de corte.

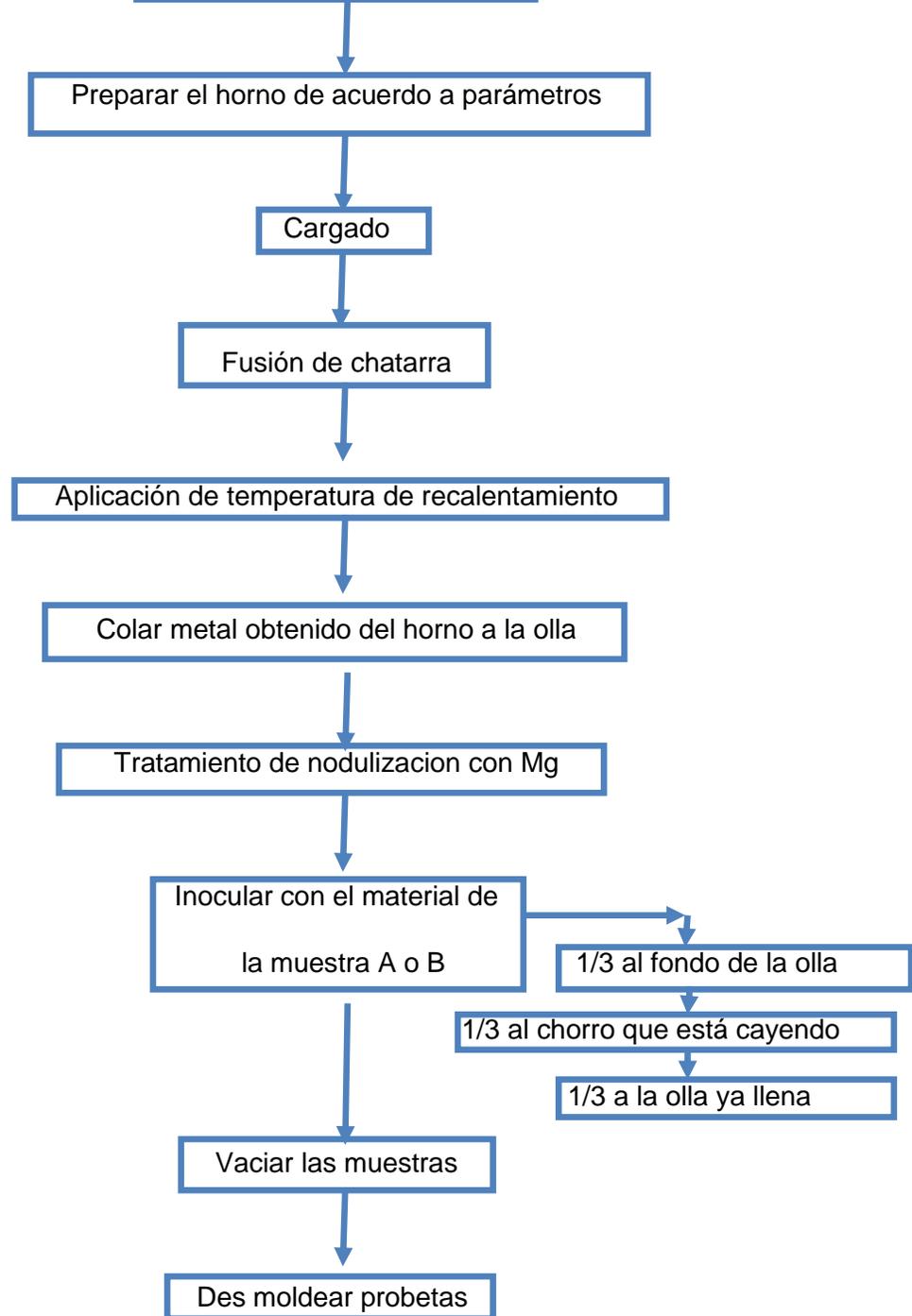
Actualmente las industrias están sustituyendo sus piezas de hierro gris por el hierro nodular dando resultados satisfactorias y si a esto le agregamos que se busque la dureza idónea para poder realizar el corte de piezas evitando el desgaste del equipo nos da un ahorro en costos y tiempo

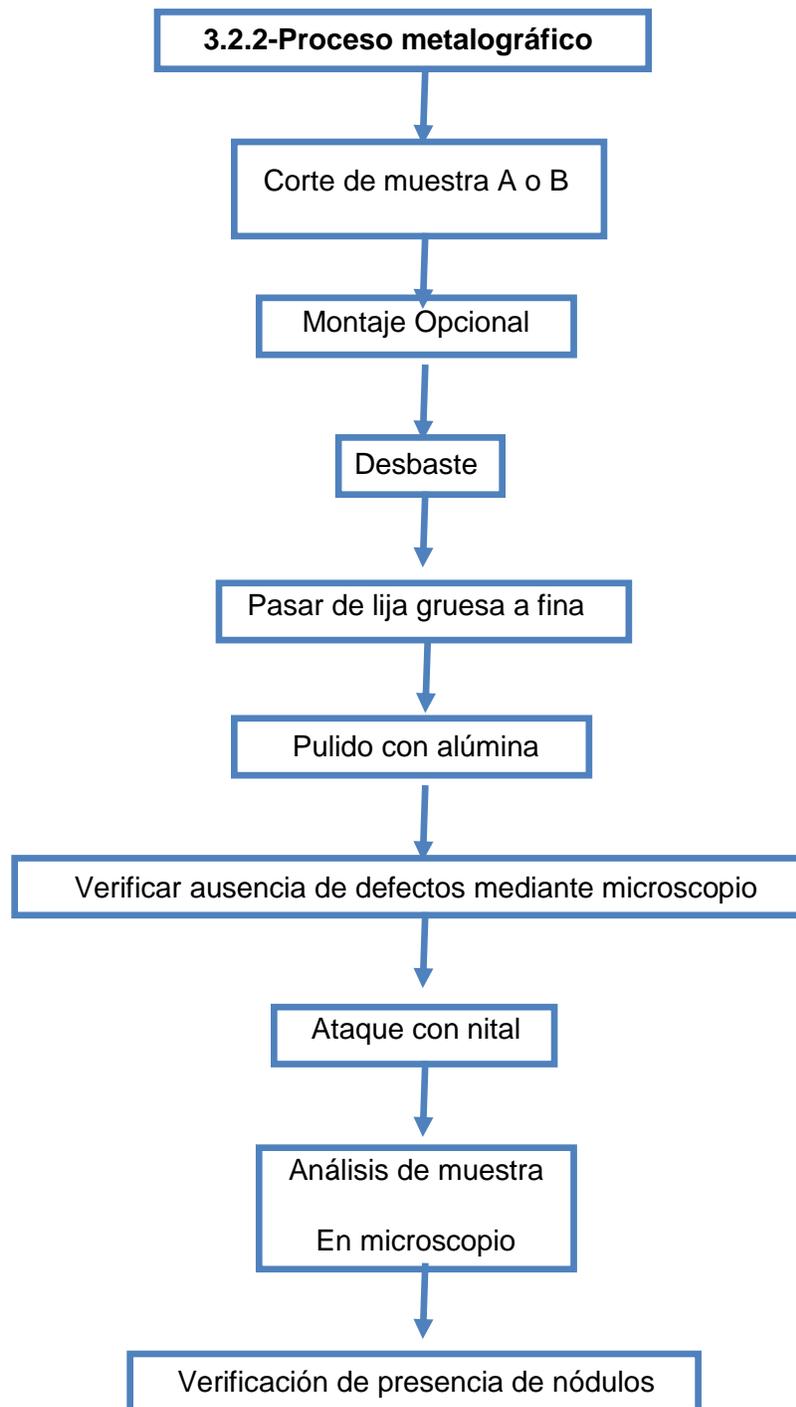
---

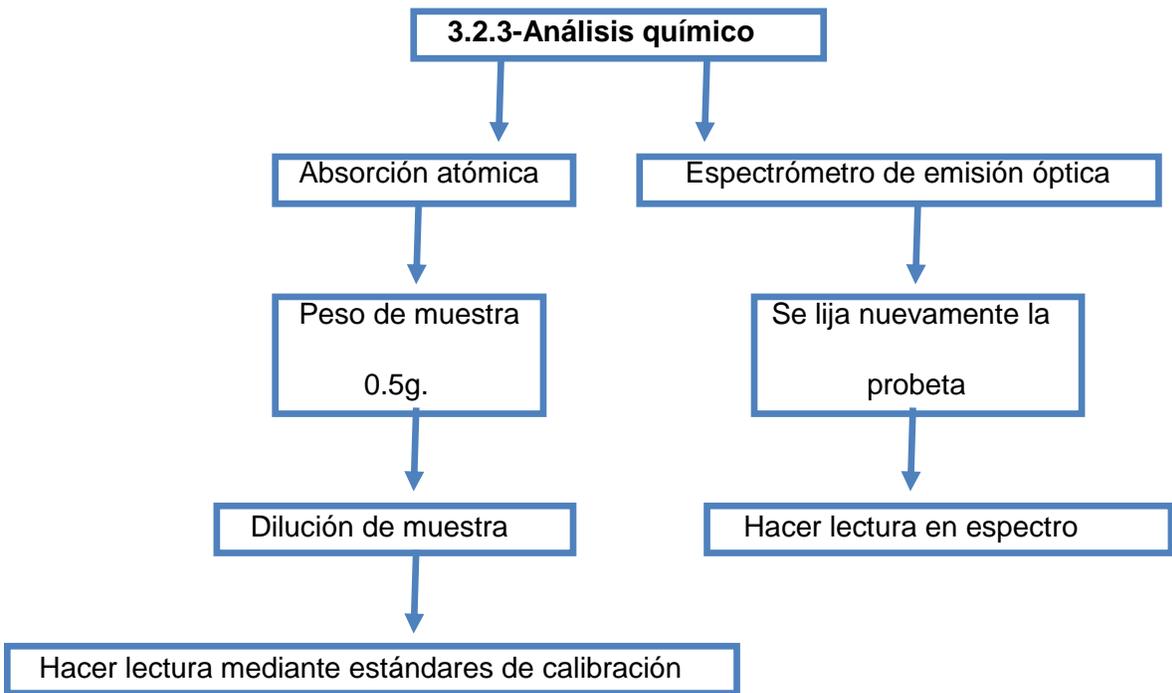
---

### 3.2-Diagramas de Proceso

#### 3.2.1-Proceso de fusión







Lectura de dureza en durómetro Rockwell B

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó el estudio metalográfico correspondiente a cada una de las pruebas para evidenciar los resultados obtenidos.

Las muestras se identificaron como A y B.

El análisis químico fue por absorción atómica y emisión óptica.

Dureza dada en Rockwell B

---

---

#### 4.1-Prueba A



Hierro nodular 0.5% de material inoculante

##### 4.1.1-Prueba: A pulida

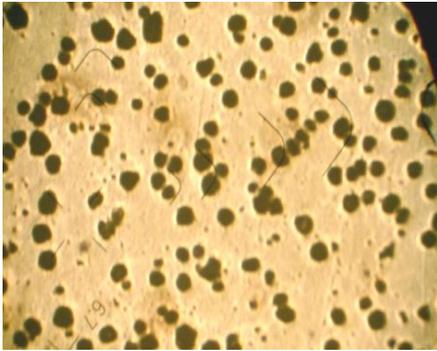


Fig. 16 a 5X

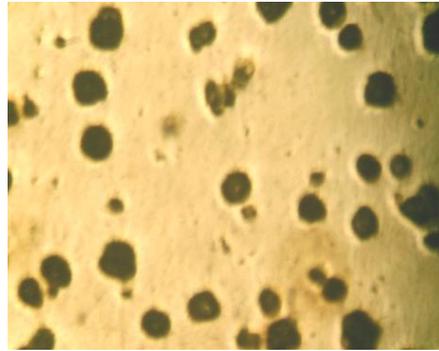


Fig. 17 a 10X

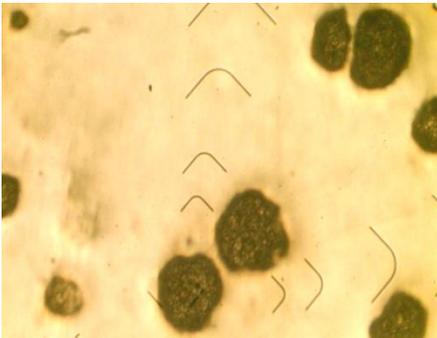


Fig. 18 a 40X



Fig. 19 a 100X

---

---

**4.1.2-Prueba: A con ataque (nital 3%)**

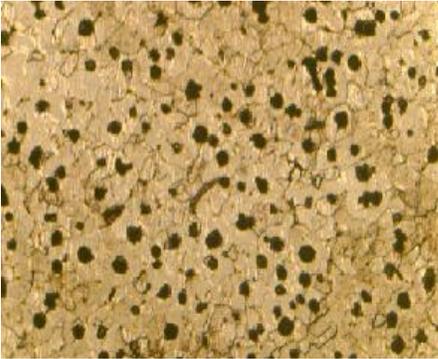


Fig. 20 a 5X

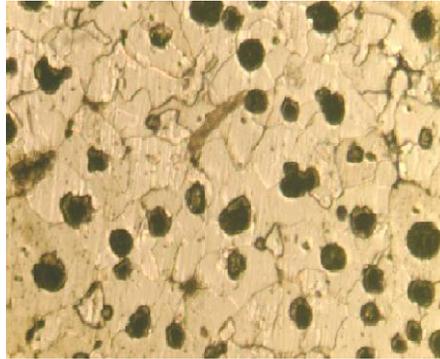


Fig. 21 a 10X



Fig. 22 a 40X

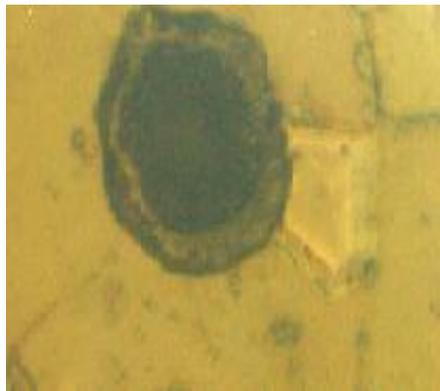


Fig. 23 a 100X

---

---

## 4.2-Prueba B



Hierro nodular 0.3% de material inoculante

### 4.2.1-Prueba: B pulida

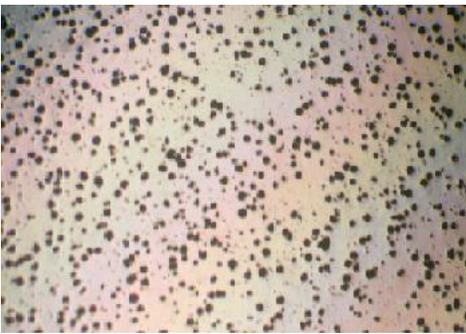


Fig. 24 a 5X

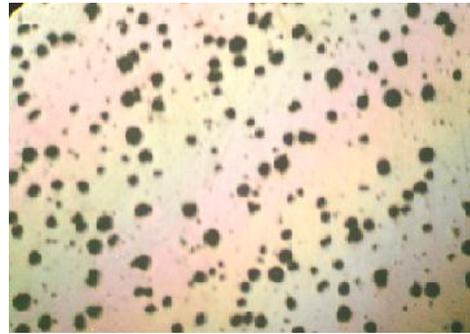


Fig. 25 a 10X

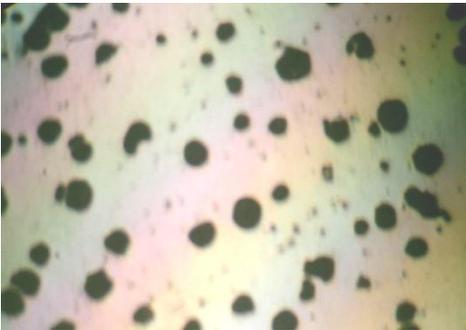


Fig. 26 a 40X

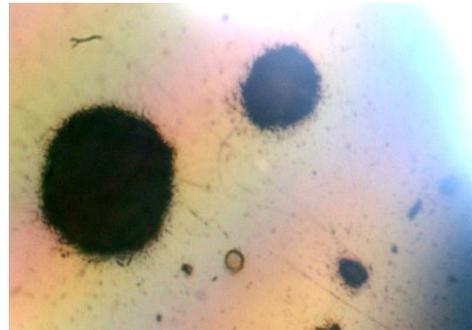


Fig. 27 a 100X

---

---

4.2.2-Prueba: B con ataque (nital 3%)

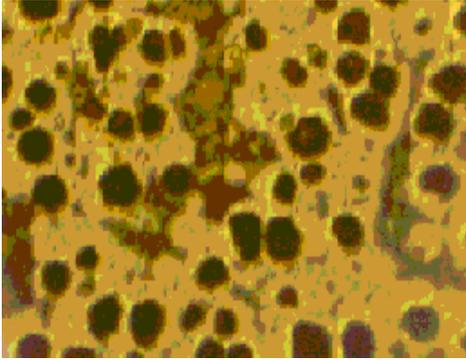


Fig. 28 a 5X

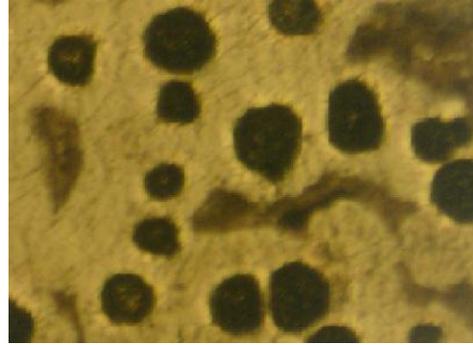


Fig. 29 a 10X

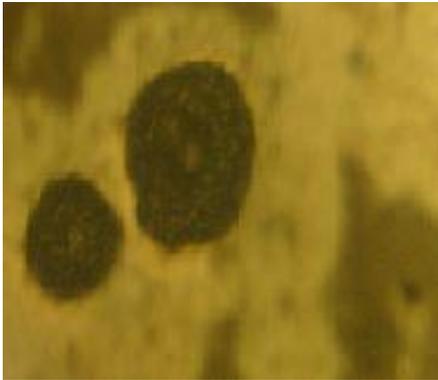


Fig. 30 a 40X



Fig. 31 a 100X

---

---

#### 4.3.-Resultado de análisis químico y dureza

COMPOSICION QUIMICA		
ELEMENTO	Prueba A	Prueba B
Silicio	1.124	1.424
Níquel	0.044	0.053
Manganeso	0.464	0.427
Cromo	0.055	0.063
Molibdeno	0.685	0.042
Carbono	3.42	3.55
Azufre	0.009	0.008
Hierro	Balance	Balance

Tabla 7 Resultados de análisis

DUREZA A	DUREZA B
91 HRB	87 HRB

Tabla 8 resultado de durezas

---

---

#### **4.4-Conclusiones**

El material inoculante que ofreció mejores resultados fue el ferrosilicio al 75% y de malla 20, para generación de una nucleación más efectiva.

Las metalografías indican que el porcentaje de 0.3% y 0.5% de material inoculante es el más idóneo ya que en este rango no se presenta dureza excesiva.

Esto se comprueba al realizar el análisis de dureza

Se comprueba también el porcentaje de nodularidad requerida (85% mínimo) y el conteo de nódulos (110 por mm<sup>2</sup>).

Pruebas A y B exitosas. Esto nos dice que en las herramientas de corte no tienen desgaste excesivo, lo cual es ahorro en costos y tiempo mediante el uso correcto de la inoculación, lográndose esto en un 30%.

---

---

# BIBLIOGRAFÍA

Polukhin, P. B. Et al, “Metal Process Engineering “Edit. Peace Publishers Moscow 1999

Higgins, Raymond A. “Ingeniería Metalúrgica” tomo 1 Metalurgia Física Aplicada Edit. Compañía Editorial Continental S.A. México D.F.

Salcines Merino, Dr. Claro Misael ,Tecnología de Fundición ,Edit. Pueblo y Educación Cuba 1985

Kelhl, George L., Fundamentos de la Práctica Metalográfica, Edit. Aguilar, S. A. De Ediciones Madrid 1954

Malishev, A. G. , Et al Tecnología de los Metales ,Edit. Mir Moscú 1967

ASM (American Society for Metals) Metals Handbook , Edit. ASM Cleveland Ohio. USA