

**Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Título:** Análisis morfológico y su relación con las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio.

**Trabajo de Diploma**

**Autor:** Yosbel Armando Alvarez Rodríguez

**Tutor:** Msc. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo  
Msc. Luminitza Dumitrescu.



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

## RESUMEN

En el Trabajo de Diploma se aborda acerca de la morfología y las propiedades mecánicas de muestras metalográficas, la relación que existe entre la morfología del producto y las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio, para identificar las estructuras y de ellas identificar cuáles son las que tienen mejores propiedades y poder seleccionar la que sea más idónea. Esto nos sirve en la metalografía que es la ciencia que estudia y relaciona las propiedades químicas, físicas, mecánicas de los metales para su correcta selección en distintas condiciones de trabajo y así prestar servicios investigativos a diferentes empresas de la industria que necesiten determinar un material y sus propiedades mecánicas, ya que no poseen estos equipos y no tienen otra vía para poderlos determinar, también para alcanzar la acreditación de los laboratorios que se complementa con la confección de muestrarios, ya que tenemos de algunos instrumentos de identificación y se pretende aumentar sus muestras metalográficas solo, con el fin de identificar las estructuras metálicas, por lo que tenemos que recurrir siempre a diferentes fuentes bibliográficas.



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

## **SUMMARY**

In the Work of Diploma approaches him about morphology and the mechanical properties of samples metalográficas, the relation that exists between the morphology of the product and the mechanical properties of the iron with spheroidal graphite obtained by the method of vibratory spill, in order to identify structures and of them to identify which ones are the ones that have better properties and being able to select the one that is more suitable. This serves in the metalografía that is the science that studies and relates the chemistries, physicists, mechanics of the metals for its correct selection in different working conditions and that way lending investigating services to different companies of the industry that need to determine a material and their mechanical properties, since do not have these teams and do not have another road to be able to determine them, also to catch up with the accreditation of the laboratories that is complemented with the confection of collections of samples, since we have of some instruments of identification and that is intended to enlarge it his samples metalográficas only, with the aim of identifying the metallic structures, For what we have to turn always to different bibliographic sources.



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE DESARROLLO DE LAS ALEACIONES DE HIERRO NODULAR.....	9
1.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS ALEACIONES DE HIERRO NODULAR	9
1.2 Aspecto económico de la fundición con grafito esferoidal.....	10
1.3 Tendencias actuales a la producción de hierro con grafito esferoidal.....	13
1.4 Antecedentes de la producción de hierro con grafito esferoidal en Cuba. ..	18
1.5 Estudio de las principales características del proceso “IN-MOLD” para la obtención de hierro con grafito esferoidal.....	20
1.6 Características generales de las aleaciones para nodulización en el molde. ....	27
1.6.1 Velocidad de vertido.....	29
1.6.2 Composición química de la aleación nodulizante .....	31
1.7 Se conocen varias propuestas de colocación y funcionamiento de las cámaras de reacción las comentaremos a continuación.....	37
1.8 Estudio de las características tenso activas del azufre y su posible influencia sobre la concentración de inclusiones.....	41
1.9 Carácter desulfurante del Magnesio.....	46
1.10 Mecanismo y cinética de los procesos de tratamiento de las fundiciones con calcio como desulfurante y mediante la activación de la superficie desulfurante-metal.....	51
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES MACÁNICAS DEL HIERRO CON GRAFITO ESFEROIDAL OBTENIDO POR EL MÉTODO DE VERTIDO VIBRATORIO.....	55
2.1 Reseña histórica del diagrama Hierro - Carbono.....	55
2.2 Alotropía del hierro y carbono.....	57
2.2.1 Alotropía del hierro .....	57



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

2.2.2 Alotropía del carbono .....	58
2.3 Fases y estructuras de diagrama Fe-C aceros y fundiciones .....	59
2.4 Fundiciones .....	69
2.4.1 Clasificación .....	69
2.5 Tamaño del Grano influencia en las propiedades mecánicas .....	76
2.6 Defectos de la estructura cristalina.....	78
2.7 Análisis morfológico y su relación con las propiedades mecánicas .....	83
CONCLUSIONES.....	92
RECOMENDACIONES .....	93
BIBLIOGRAFÍA .....	94
ANEXOS .....	1

## **INTRODUCCIÓN**

En la industria metalmecánica existe como tendencia mundial la sustitución de piezas de acero y de hierro fundido por hierro con grafito esferoidal, debido a que puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y menor costo por tonelada, eso se puede observar fundamentalmente en la industria automovilística, la naval, la construcción de maquinarias y la industria azucarera, entre otras. Este auge ha sido logrado gracias al desarrollo del tratamiento térmico de austemperizado, lo que ha permitido obtener fundiciones competitivas con los aceros, conocidas internacionalmente como ADI, o sea hierros dúctiles austemperados.

Además de resistencia elevada se alcanza también buena ductilidad y resiliencia. La finura de los constituyentes de la matriz les confiere mayor dureza que las fundiciones laminares, si bien el nodular es más fácil de mecanizar que éstas. También se consigue excelente estanqueidad, grado de pulido y resistencia a la corrosión. Resisten al calor y choque térmico, y presentan un buen coeficiente de frotamiento y resistencia al desgaste, tanto en seco o con lubricación.

Estas propiedades: resistencia elevada, alargamiento bajo, buenas características de frotamiento permiten que se apliquen generalmente en cilindros de laminación, cigüeñales, engranajes, árboles de levas, discos de embrague, bancadas de máquinas herramienta, platos de torno, roldanas, soportes de juntas de cierre, piezas de maquinaria agrícola. Otra propiedad como la estanqueidad se puede aplicar en tuberías de fundición, cilindros de aceite de servomotores, cuerpos de amortiguadores hidráulicos. Las de resistencia al calor y a ciclos de calentamiento-enfriamiento en: cilindros de laminación, coquillas de centrifugadoras de cilindros, moldes metálicos para no ferrosos, enfriadores, moldes para fabricación de neumáticos, colectores de escape. Las de facilidad de



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

mecanizado y resistencia al desgaste en piezas de maquinaria agrícola, engranajes de cremalleras, roldanas, camisas, cilindros, segmentos.

Esta demanda mundial de fundidos de hierro con grafito esferoidal ha posibilitado que una gran cantidad de investigadores hayan desarrollado una variedad de métodos para satisfacer las complejas particularidades que intervienen en la esferoidización del hierro, como lo son:

1. El tiempo de modificación del hierro gris de grafito laminar a grafito esferoidal debe ser el menor posible, desde la aplicación del nodulizante hasta la aparición de los microcristales en el comienzo de la solidificación, para evitar la demodificación.
2. La disolución del nodulizante debe ser rápida y homogénea durante todo el proceso de modificación para obtener una esferoidización uniforme en el fundido nodular.
3. La sobresaturación de la disolución del nodulizante no debe fluir al interior de la cavidad del molde para evitar el rechazo de la pieza por defectos superficiales, escorias e inclusiones no metálicas.
4. El cálculo de la cantidad del nodulizante debe ser la tecnológicamente adecuada, si es menor se obtiene muy poca o ninguna esferoidización y si es mayor ocurrirá sobresaturación en la disolución del nodulizante, provocando incrustaciones de escorias e inclusiones no metálicas, aumentando los costos de producción del proceso.
5. Las mejores propiedades mecánicas se logran cuando el porcentaje de magnesio residual deseado está en un intervalo entre 0.035 y 0.05 %, Y depende de la cantidad de nodulizante, masa del fundido, composición química del nodulizante (% Mg), eficiencia del magnesio, contenido de azufre.

6. Cuando el contenido de magnesio residual en el fundido es mayor, se obtiene una microestructura con concentraciones de hojuelas de grafito esferoidal y flotación de nódulos, esto provoca una mayor contracción por lo que aumenta el rechupe en los fundidos cuando el contenido de magnesio en el caldo metálico es bajo, no se logra la modificación, obteniéndose en la microestructura grafito vermicular ó mezclas de grafito esferoidal y laminar.

En la década de los años setenta del siglo pasado los investigadores Dunk y McCaulay logran controlar en gran medida estas particularidades colocando una cámara de modificación anterior al molde, en la cual se realiza la reacción del nodulizante con el caldo metálico en el propio molde por lo que se le llamó “cámara de reacción” y esta variante tecnológica fue patentada como tratamiento “In mold” (en el molde, como se le llamará en el presente trabajo) y que se caracteriza por aplicar el nodulizante granulado en una cámara, tecnológicamente diseñada, para que cumpla con los parámetros que intervienen en la modificación permitiendo un flujo laminar y uniforme del caldo metálico que permita una velocidad constante en la disolución del nodulizante durante todo el vertido, condicionando que el nivel de la sección transversal horizontal de la cámara de reacción debe ser invariable para lograr que, el área superficial del nodulizante respecto al flujo del hierro siempre sea la misma durante el vertido.

El tratamiento en el molde ha demostrado ser uno de los métodos de obtención de hierro con grafito esferoidal más eficiente en cuanto a:

- La disolución uniforme del nodulizante permite obtener fundidos de gran calidad estructural.
- Como el tratamiento de modificación se realiza en el interior del molde se disminuyen las emisiones gaseosas nocivas al entorno humano, así como





---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

se evita el fenómeno del piroefecto de las aleaciones nodulizantes y el escoriado.

- Se pueden aplicar en un mismo vertido diferentes tecnologías y obtener varias marcas de fundiciones nodulares o no, lo que flexibiliza la producción del taller y contribuye al mejor desenvolvimiento económico.
- Cuando el caldo metálico baja de la temperatura tecnológica de vertido puede regresarse al horno para afinarlo nuevamente, disminuyendo la pérdida metálica y aumentando el rendimiento de la fundición.

A pesar de estas condiciones favorables que propicia el tratamiento en el molde las empresas fundidoras, a nivel mundial, no han logrado establecer de manera estable una tecnología de obtención de hierro con grafito esferoidal debido que aun con la aplicación de los nuevos conceptos y medidas de calidad son muy frecuentes los rechazos de piezas por mala calidad superficial, escoriedad e inclusiones no metálicas, producto de la introducción en el molde de los restos de la sobresaturación de las reacciones de modificación del caldo metálico y la cantidad de nodulizante y la escoria generada durante la disolución del mismo. Estas adversidades son mayores a medida que aumenta la masa de la pieza fundida, lo que a la vez aumenta el flujo de aleación nodulizante no disuelta hacia la pieza, que aunque se obtiene con una estructura interna adecuada, se tiene que descartar por los defectos de incrustaciones, cola de ratón, entre otros, limitándose de esta manera la utilización del tratamiento in mold cuando aumenta la masa del fundido a obtener, además de la necesidad de una cámara de reacción tecnológicamente adecuada, siendo esta, frecuentemente, excesivamente grande lo que disminuye el rendimiento metálico, influyendo negativamente en el rendimiento tecnológico general del proceso productivo.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En la actualidad en la UEB Fundición Acero Hierro de Holguín se ha desarrollado una tecnología de obtención de hierro gris con grafito esferoidal de alta resistencia.

Estas particularidades industriales permiten definir el siguiente problema científico: Determinar la relación que existe entre la morfología del producto y las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio.

Objeto de estudio: las estructuras y las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio.

Campo de acción: análisis metalográfico.

Hipótesis: Si se realiza un correcto análisis metalográfico del material se puede determinar la relación que existe entre la morfología y las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio y seleccionar el idóneo.

Objetivo general: Determinar la relación que existe entre la morfología y las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio.

Como tareas de investigación se plantean:

- Realizar una revisión bibliográfica actualizada.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

- Realizar el estudio metalográfico de las probetas y someterlas a ensayo para relacionarlas entre sí.
  
- Procesar los datos obtenidos.
  
- Elaborar el informe final.

Métodos de investigación utilizados.

Los métodos científicos cumplen una función fundamental en el desarrollo de la ciencia, ya que permiten obtener nuevos conocimientos sobre el fenómeno que se estudia y ejercen un papel importante en la construcción y desarrollo de la teoría científica. A continuación se exponen los métodos fundamentales utilizados en la investigación:

Métodos Teóricos

**Histórico-lógico:** Este se aplicó para establecer el estado del arte con respecto a la morfología del producto y su relación con el método de fundición, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre el tema objeto de estudio a fin de sustentar el objeto y el campo de la presente investigación.

**Análisis y síntesis:** Se utiliza para identificar los factores principales -y sus características- que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación.

Métodos empíricos:

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Observación científica: se utilizará para observar los tipos de estructura y tamaño y forma del grafito

Consulta: se realizaron consulta con expertos en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas

Medición: se desarrollan con el objetivo de determinar el tamaño de los granos y del grafito.

La investigación presenta el siguiente aporte: la determinación de la relación que existente entre la morfología y las propiedades mecánicas del hierro con grafito esferoidal obtenido por el método de vertido vibratorio.

El informe de tesis se estructura en la siguiente forma: introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía consultada.

El primer capítulo: "Antecedentes y estado actual del método de vertido dinámico y del tratamiento en el molde para la obtención de hierro con grafito esferoidal" se presenta un análisis de la revisión bibliográfica realizada, donde se examinan los aspectos esenciales relacionados con la tendencia actual de utilización del método el método de "vertido dinámico" en la obtención de fundidos metálicos y con los estudios experimentales del cálculo de la cantidad de aleación nodulizante en la producción de hierro con grafito esferoidal por el tratamiento en el molde. Se muestran además las tendencias fundamentales de dicha tecnología.

En el Capítulo 2: "Análisis morfológico y su relación con las propiedades mecánica" se determina la relación que existe entre la tipo de estructura, tipo de grafito y se seleccionan las de mejores propiedades mecánicas.



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

Se establecen las conclusiones generales y las recomendaciones a partir de los resultados de la investigación, en correspondencia con los objetivos planteados.

## **CAPÍTULO 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE DESARROLLO DE LAS ALEACIONES DE HIERRO NODULAR.**

### 1.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS ALEACIONES DE HIERRO NODULAR/1; 3; 4; 7; 17/

El 7 de mayo de 1948 H. Morrogh y W. J. Williams dieron a conocer, en el congreso de American Foundrymen's Society (A.F.S.) que determinados elementos del grupo de las materias alcalinas, al igual que el Cerio ejercían una influencia específica sobre la formación de grafito esferoidal. Tratando la fundición líquida con mischmetal Cerio, estaban en condiciones de producir fundición con grafito esferoidal. En el debate que siguió, T. H. Wicken, de la International Nickel Corporation (INCO), anunció, ante el asombro general de las personas allí presentes, que su compañía realizaba investigaciones de laboratorio en este campo desde hacía muchos años y que habían ideado un procedimiento para elaborar fundición con grafito esferoidal agregando cantidades muy pequeñas de Magnesio (Mg) al caldo de la fundición gris. Este descubrimiento fue patentado por la International Nickel Corporation en 1949 y constituyó la base para la producción industrial de la fundición con grafito esferoidal debido a que el magnesio ha resultado ser un elemento especialmente eficaz para la formación de grafito esferoidal, así como para la producción de fundición con dicho tipo de grafito y debido también a que puede obtenerse en cantidades suficientes al contrario de lo que ocurre con el Cerio. La patente derivada del descubrimiento de T. H. Wicken adquirió gran importancia en la práctica.

Los campos de aplicación de la fundición con grafito esferoidal cubren en la actualidad grandes sectores que antes estaban reservados al acero fundido, a la fundición maleable, a las piezas forjadas e incluso a la fundición gris.

La industria del automóvil reconoció muy pronto las ventajas económicas de este material. Su éxito y consolidación vino de su empleo en la fabricación de cigüeñales, a comienzo de los 60 por la Ford Company USA. EL empleo de este material en cigüeñales demostró que este tiene una buena tenacidad y resistencia a la fatiga. Ello significa que en muchos casos las propiedades mecánicas son mejores y más elevadas que las del acero.

La producción mundial de hierro con grafito esferoidal en el año 1995 se distribuyó aproximadamente como sigue:

50%-Tubos de presión y piezas mecanizadas utilizadas principalmente para el abasto de agua y de gas.

22%-Construcción de vehículos de motor, comprendido los camiones, autobuses, y máquinas agrícolas.

20%-Construcción de maquinarias.

8%-Otro grupo de usuarios.

Cada una de las diferentes clases de fundición tiene sus propias características. El acero es resistente; la fundición maleable, tenaz; la fundición blanca, dura; la fundición gris, frágil y económica; la fundición con grafito esferoidal reúne casi todas estas propiedades y ha sido probada en los productos en los que la dureza y también el rendimiento económico desempeña un papel importante. Las propiedades mecánicas son esencialmente los datos que interesan especialmente a los usuarios y que, en primer lugar, permiten y controlan la producción de un material determinado.

1.2 Aspecto económico de la fundición con grafito esferoidal. /1; 4; 6; 9; 12/

A las excelentes propiedades mecánicas de este material, se le une la buena fluidez en estado líquido lo que permite fabricar también piezas complicadas de paredes delgadas. Un número cada vez mayor de elementos de construcción sometidos a esfuerzos se ejecutan en fundición con grafito esferoidal. Sustituyen a las piezas de fundición gris que, a causa de sus reducidas propiedades mecánicas, resultan pesadas y toscas. Para las piezas complicadas, sustituye también al acero moldeado y a las piezas forjadas, cuya elaboración ya no resulta económica.

El considerable aumento de la producción mundial esperado para el futuro se debe ante todo a la sustitución, por la fundición con grafito esferoidal de las fundiciones gris y maleable y del acero moldeado, así como de las piezas forjadas y soldadas. El aumento del consumo de la fundición con grafito esferoidal en la industria automovilística y de la construcción de maquinarias sobre todo en Europa, lo mismo que la sustitución de las lingoteras de fundición gris por piezas de fundición con grafito esferoidal, pueden ser decisivos para esta evolución.

Consideraciones estadísticas acerca de la evolución, presente y futuro de la producción de hierro nodular.

Haciendo un análisis, se puede apreciar la evolución de la producción de hierro con grafito esferoidal en Europa occidental, Estados Unidos, Japón, así como los países del antiguo Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME) y en otros países desde el año 1970, hasta el 1999; los datos fueron tomados de las siguientes fuentes: Informes anuales de la comisión número 7 del Comité de las Asociaciones Europeas de Fundición (CAEF) ; informes anuales de la asociación alemana de fundición, de las publicaciones estadísticas de las asociaciones de fundición y de los departamentos públicos competentes de los diferentes países (por ejemplo del Ministerio de Comercio de los Estados Unidos). Informes anuales



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

denominados "Foundry Statistics of Japan" del Centro General de Fundición del Japón. Revistas de fundición (por ejemplo "Modern Casting",

Estados Unidos, "Censo de la producción mundial de piezas fundidas")

Según los datos obtenidos la producción mundial de fundición con grafito esferoidal para el período comprendido entre 1979 y 1993 logró un porcentaje de crecimiento entre el cinco y el diez por ciento, en el periodo de 1995 al 1999 su producción aumentó en un 19% de seguir ese ritmo para el año 2005 la producción estará cercana a los 63,8 millones de toneladas anuales.

El acero fundido y las fundiciones maleables y con grafito esferoidal exigen cantidades de energía parecidas, hasta el momento de su colada en el molde, pero los dos primeros solo logran sus propiedades mecánicas tras el tratamiento térmico, el cual exige una energía adicional.

La fundición con grafito esferoidal puede elaborarse, en gran parte, sin tratamiento térmico, es decir, puede utilizarse en estado bruto de colada y sus propiedades de resistencia y de ductilidad son comparables a la del acero moldeado.

Este es el motivo de que sea probable que la fundición con grafito esferoidal en estado bruto de colado reemplace cada vez más al acero moldeado (y en algunos casos a las piezas forjadas de acero), a la fundición maleable y también a la fundición de hierro gris. De ese modo, los métodos de tratamiento con magnesio aumentan en importancia, dado que economizan energía y garantizan altos rendimientos de magnesio y bajas pérdidas de temperatura.

Para concluir puede admitirse que del 10 al 20% de los 55 millones de toneladas a que asciende la producción mundial con grafito esferoidal corresponde a piezas coladas que solo requieren un peso sin ninguna pretensión en lo que se refiere a

propiedades mecánicas. Por el contrario, del 80 al 90 % de la producción mundial de la fundición gris, es decir, alrededor de 45 millones de toneladas, corresponde a piezas que exigen propiedades mecánicas y que están sometidos a esfuerzos, por lo menos a una de sus partes. Si estas piezas se construyeran para ser coladas en fundición con grafito esferoidal podría lograrse una reducción de peso, según las experiencias, comprendida entre el 20 y el 40 %, en promedio el 30 %. Esto produciría una economía anual de aproximadamente 14 millones de toneladas de fundición y daría por resultado, junto a una economía de energía de aproximadamente 70 millones de Kw por año, un ahorro considerable de materias primas las que también están disminuyendo considerablemente.

### 1.3 Tendencias actuales a la producción de hierro con grafito esferoidal. /5; 6; 7; 8/

Como es conocido el hierro con grafito esferoidal al principio se obtenía mediante la utilización del Cerio, pero este modificador no alcanzó gran aplicación debido al alto costo del mismo. A pesar de ser deficitario y su alto costo, y por ese factor importante que es la tendencia del Ce y los Metales Tierras Raras de aumentar el subenfriamiento del hierro durante la cristalización y favorecer la formación de carburos dispersos en su estructura el uso del Ce y Metales Tierras Raras tuvo gran aceptación. En primer orden eso se debe a que una serie de firmas japonesas trabajaron con esta tecnología utilizando modificadores complejos del tipo los cuales contienen en su composición, Ca, Ce, Mg, Metales Tierras Raras, cloruros y fluoruros de metales. Este tipo de modificador no solo en Japón logró aceptación sino que se exportó a E.E U.U , el modificador más difundido en la actualidad es el Magnesio ya sea en forma pura o en forma de pre-aleación. Entre 1975 y 1980 la utilización de Magnesio en comparación con el Cerio aumentó en 50% aproximadamente.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

La introducción del magnesio en forma de pre-aleación de Ni - Mg fue uno de los métodos más difundidos y fiables en un largo periodo de tiempo, a pesar de ser el níquel un producto deficitario y costoso. Por ese motivo en los últimos tiempos se utilizan los modificadores sin níquel, principalmente si este no es necesario como elemento aleante.

Gran utilización tienen las pre-aleaciones de Fe - Si - Mg, a pesar de que en muchos casos limita el uso del retorno debido a la alta cantidad de azufre presente en el mismo. En Inglaterra aproximadamente el 90% de las piezas de hierro con grafito esferoidal se obtienen con las pre-aleaciones de Fe - Si -Mg y se utilizan cerca de 7000 - 8000 toneladas (t) de pre-aleación. La más difundida es la pre-aleación con 5% de Magnesio, sin embargo en los últimos tiempos se está utilizando una pre-aleación con poco contenido de Magnesio por ejemplo con 1,7% de Magnesio, en ese caso se utilizan también los Metales Tierras Raras.

En dependencia de las propiedades físico mecánicas de las pre-aleaciones (densidad, temperatura de fusión y otros) se utilizaron diferentes métodos de introducción de las pre-aleación al metal.

Uno de los métodos más difundidos es el denominado “Método Sandwich”, para el cual, la concentración de azufre en el caldo debe ser  $\approx 0.04 - 0.05\%$ , y presenta sus limitaciones en cuanto al uso de retorno con alto contenido de silicio. La asimilación de Magnesio oscila entre 35 y 90% y su mayor aplicación es en los Estados Unidos.

Es conocido que el efecto modificador disminuye principalmente entre los 5-10 segundos después de introducido el modificador, y que inmediatamente de ser introducido el mismo la aleación se encuentra en el denominado estado de

“supermodificación”, es por eso que para un mayor aprovechamiento del efecto de la modificación se comenzó a realizar la modificación dentro del molde ( in mold process).

Este proceso a pesar de la disminución del metal útil debido a la pérdida del mismo en la cámara de reacción, tiene grandes ventajas en cuanto a otros métodos de obtención del hierro con grafito esferoidal: Economía del modificador (asimilación del Magnesio entre 80 y 90%), simplificación del proceso productivo, disminución del piroefecto, aumento de las propiedades mecánicas, poca presencia o eliminación casi total de carburos libres en la estructura lo que trae como consecuencia que se pueda prescindir del tratamiento térmico.

Este proceso se puede automatizar con facilidad y se utiliza principalmente para producciones seriadas o masivas. En la actualidad es utilizado por prestigiosas firmas automovilísticas como la FIAT que obtiene cerca de aproximadamente 100 toneladas de piezas de hierro con grafito esferoidal al año con el uso de este método. La General Motors obtuvo licencia para el uso del mismo y está pasando en la actualidad a su aplicación en las grandes empresas metalúrgicas. La principal desventaja del mismo constituye en la necesidad de un estricto control de la temperatura, velocidad de vertido y la utilización de un metal base con  $\square$  0.015% de S.

Otro de los métodos de obtención del hierro con grafito esferoidal es el denominado Controlled Quality Inoculation (Co CQ).

El principio de este proceso consiste en la introducción de un alambre de magnesio el cual penetra en la taza de vertido del molde por medio de una bobina que se desenrolla adecuadamente durante el vertido.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En este caso el efecto de modificación no se “apaga”, debido a que el hierro modificado penetra en el molde inmediatamente después de la modificación. El proceso CoCQ garantiza la obtención de piezas con la microestructura adecuada gracias a la regulación de la velocidad de introducción del modificador inmediatamente después de terminado el vertido se detiene la introducción del alambre de Magnesio y puede ser automatizado con facilidad. Este método aún no ha logrado gran aplicación industrial.

Al mismo tiempo del desarrollo de modificadores base Mg, Ca, Ce, Metales Tierras Raras, fluoruros y cloruros de metales y otros ingredientes, se ha notado últimamente la tendencia de producción de hierro con grafito esferoidal modificado con magnesio puro. Los trabajos en esta dirección, se han realizado ininterrumpidamente durante más de cuarenta años. Esto se debe fundamentalmente al aspecto económico, así como, a la falta de restricción en el uso del retorno y el azufre en la aleación base. En los últimos tiempos se han creado procesos con el uso del Magnesio puro en calidad de modificador; el proceso convertidor realizado por la firma G.Fisher de Suecia, Proceso M.A.P. de la firma Pont-a-Mouson de Francia, el método Mg Coke de la firma FOSECO de Inglaterra y otros. Estos procesos permiten disminuir notablemente la velocidad de ebullición del magnesio y esto garantiza alta fiabilidad y estabilidad en la obtención del hierro nodular.

Los convertidores se pueden modificar en un solo ciclo desde 0.5 hasta 5 t de aleación. La concentración de azufre se permite hasta 0.15%. El coeficiente de asimilación del Magnesio 45 - 60%.

El método del convertidor se destaca por lo económico y se puede prescindir de la desulfuración del metal base. Este proceso es utilizado en más de 40 países y el 8% de la producción de hierro con grafito esferoidal se obtiene mediante el

mismo. La desventaja fundamental de este radica en el uso imprescindible de un herramental especial y sumamente complejo, así como un gran piroefecto y expulsión de humo.

El proceso MAP consiste en la introducción del magnesio puro, aislado totalmente por medio de un material refractario en forma de campana la cual solo permite el contacto de este con el metal base por medio de orificios (hasta 120) realizados en unos de los lados de la misma. La concentración de azufre en el metal base se permite hasta 0.05% y la asimilación del magnesio es entre 30 y 60%. Mediante el proceso MAP hasta 1998 se habían producido en Francia 13 millones de toneladas de hierro con grafito esferoidal.

El método de aplicación del magnesio puro elaborado por la firma FOSECO, se basa en la introducción del modificador y 43-45% de coque metalúrgico, este se coloca en una cazuela especial, la cual posee una cámara separada del resto de la cazuela en la que se coloca el magnesio y el coque (de esto proviene el Mag Coque). Este proceso se utiliza para la modificación del hierro con 0.1 - 0.15% de azufre sin desulfuración previa. El tiempo de un ciclo es de 5-9 minutos y el coeficiente de asimilación del magnesio es de aproximadamente 50%

Este proceso tiene alta divulgación en E.E.U.U., Canadá y algunos países de Europa occidental.

Junto con los nuevos métodos, se continuaron utilizando y modernizando los métodos de modificación en autoclaves bajo presión. El contenido de azufre inicial, se permite hasta 0.15%, la asimilación del magnesio es de aproximadamente 70% este proceso es ampliamente utilizado en Japón donde el 60% de las piezas de hierro con grafito esferoidal se obtienen con el empleo del autoclave.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

La tendencia de obtención del hierro con grafito esferoidal con el uso de magnesio puro en los últimos tiempos tiende a aumentar, esto sucede debido a que el magnesio no es un material deficitario.

El análisis demuestra que en los tiempos actuales no se ha creado un método universal de modificación que satisfaga las diferentes condiciones de producción de piezas. Se puede vaticinar que la producción de hierro con grafito esferoidal se desarrollara en las siguientes direcciones básicas; utilización del magnesio preferentemente puro y en composición con pre-aleaciones; aumento del uso de las pre-aleaciones que contengan metales tierras raras fluoruros cloruros y otros elementos, notable desarrollo de los métodos de modificación en el molde, y creación de métodos de modificación ininterrumpidos; así como la mecanización y automatización de los procesos tecnológicos de elaboración de las aleaciones.

#### 1.4 Antecedentes de la producción de hierro con grafito esferoidal en Cuba./10/

La producción de hierro con grafito esferoidal en nuestro país comienza a finales de la década del 70. En la empresa Sidero-Metalúrgica “Libertad” donde se realizaron pequeñas producciones por el método “Sanwich” .La obtención del arrabio no era dificultosa en ese tiempo y la carga que fue utilizada era la adecuada. El principal problema para lograr estabilizar este método consistió en la necesidad de cazuelas apropiadas y de un dinamómetro u otro instrumento que garantizara el control del peso del metal introducido en la cazuela, esta carencia trajo como consecuencia que en unos casos no se lograr la nodulización por insuficiente cantidad de prealeación y en otros se utilizara mucha cantidad de la misma lo que influyó en la economía del proceso. A principios de los años 80 se detuvo la producción de este material en la mencionada empresa.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En el año 1985 la planta de fundición de la entonces Empresa de Implementos y Remolques Agrícolas “Mártires del 26 de Julio” pudo realizar una colada de hierro con grafito esferoidal utilizando el método “Sanwich”. La principal dificultad en ese momento, consistió en la necesidad de fundir el metal base en un horno de arco con revestimiento básico, esto se realizó producto de la necesidad de desulfurar el metal, ya que el contenido de azufre promedio en la empresa era de 0.05% algo alto para este tipo de producción. Producto de la producción en el mencionado agregado de fusión, el conteo de nódulos obtenido fue insuficiente, las propiedades mecánicas no se comportaron estable en todos los moldes, las cazuelas de vertido existentes eran de mucha capacidad; esto dificultaba su maniobrabilidad produciendo el “apagado” del magnesio. Por esos motivos no se realizó más ningún intento de realizar este tipo de producción.

En los inicios del año 1981, La Empresa UNECA Motors de Ciudad de la Habana, comenzó la producción de hierro con grafito esferoidal para la obtención de piezas para la industria automotriz (volanta, caja diferencial, bielas y otras). Se logró la obtención de aleaciones tipo 42-12, 50-6, 60-2, 70-2 y 80-2. Para su producción se utilizó una variante del método “Sanwich”. Esta consistía, en el recubrimiento del nodulizante con un revestimiento y después del vertido se pincha con una lanza que rompe el mismo para iniciar su contacto con el metal. Esto se hizo necesario por la carencia de cazuelas apropiadas para evitar el piroefecto.

Las principales dificultades tecnológicas durante la aplicación del proceso en la mencionada empresa fueron la necesidad de cazuelas apropiadas, pues las existentes no cumplen los requisitos para la aplicación del “Sanwich” y al aplicarse la tecnología con recubrimiento del nodulizante disminuye la productividad y ocurre a menudo el “apagado” del nodulizante. Por otra parte, al comenzar la falta del arrabio para la producción se introdujo el hierro sintético, entonces el Carbono



Equivalente ( $C_e$ ) obtenido fue muy bajo y aparecieron dificultades en el conteo de nódulos e inestabilidad en las propiedades mecánicas obtenidas. En el año 1993 se detuvo la producción producto de las dificultades mencionadas.

En el año 1991 un colectivo de profesores de la CUJAE realizó algunas producciones de cigüeñales para el moto compresor marca “PRES-KOL” aplicando el “In-mold”. Fue utilizado un nodulizante granulado de la FOSECO marca NODULANT IV. Se modificaba en cámaras en forma de paralelepípedo en el semimolde inferior. Las principales dificultades comenzaron con la desaparición del arrabio en el mercado nacional además de la baja eficiencia de la nodulización debido al tipo de cámara utilizado. Las investigaciones en referencia al tema se detuvieron por falta de un patrocinador que costeara los gastos de la misma.

#### 1.5 Estudio de las principales características del proceso “IN-MOLD” para la obtención de hierro con grafito esferoidal./4;5;7;24/

Como se ha podido observar en todos los métodos de obtención del hierro con grafito esferoidal el denominado “In-mold” reúne una serie de requisitos con respecto a la sencillez y su facilidad de aplicación.

Son varios los investigadores que han trabajado este tema, con la finalidad de determinar los parámetros que influyen sobre el proceso y lograr optimizar los mismos de forma tal que se obtengan aleaciones con altas propiedades y con el menor costo posible. En experimentos realizados por Dunks se llegan a conclusiones importantes.

Él logra de forma práctica establecer una interrelación entre el Factor Solución y el contenido de magnesio residual en la pieza. Plantea que para este tipo de

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

proceso es indispensable determinar el nivel de magnesio residual requerido en el metal, en correlación con el magnesio presente en el nodulizante para las condiciones particulares requeridas del metal. Así él recomienda utilizar la relación cuantitativa de la aleación nodulizante que no es más que:

$$Ra = Mg_{res}/Mg$$

(1)

Donde:

Ra- relación cuantitativa de la aleación,

Mg<sub>res</sub>- Magnesio residual deseado

Mg- Cantidad de Magnesio que reacciona en dependencia del rendimiento de la aleación nodulizante.

Se ha establecido que la efectividad de la nodulización es más alta, cuando el tiempo desde la adición del nodulizante hasta el comienzo de la solidificación no es prolongado, independientemente del lugar donde sea aplicado el nodulizante.

Para realizar esta idea deben ser tomados en cuenta dos requerimientos fundamentales:

- La pre-aleación debe disolverse con prontitud y continuar con una concentración fija y uniforme desde el inicio hasta el fin del vertido.
- Los residuos de pre-aleación sin disolver no deben dejarse arrastrar hacia el interior de la pieza.

Para satisfacer estas condiciones, se han propuestos varias soluciones coincidiendo todas en el punto que, la pre-aleación debe ser agregada en la forma física más apropiada, es decir, en una sola pieza ó en granos sueltos ó con filtros inoculantes y granos compactos, según sea necesario.

Una solución satisfactoria al problema de la disolución uniforme es la presentada

por Dunks y McCaulay la que se denominó proceso “In-mold” con cámara de reacción. Consiste en colocar la aleación en forma de gránulos en una cámara convenientemente diseñada que mantenga una velocidad de disolución constante durante el vertido, siempre y cuando la velocidad de flujo del hierro sea invariable. La sección transversal horizontal de la cámara que contiene la aleación se debe mantener al mismo nivel, de modo que, el área superficial de la aleación expuesta al flujo del hierro siempre sea constante durante el vertido. Para un tipo de aleación, la velocidad de disolución está determinada por el tamaño de la cámara y por otros parámetros de la colada.

El tratamiento en el molde ofrece las siguientes ventajas: Alto aprovechamiento de la pre-aleación y excelente calidad en la microestructura.

- No es necesario el escoriado entre las operaciones de adición de aleación y vaciado.
- Se obtienen diferentes marcas de hierro con grafito esferoidal, con solo adicionar la cantidad y calidad propia de nodulizante en cada molde, dependiendo de los requerimientos.
- No se presenta el fenómeno de piroefecto ó emisiones de humo.
- No hay contaminación del metal no vertido y este puede ser regresado al horno sin ningún problema posterior.
- La factibilidad de adiciones totalmente automática del nodulizante.

Sin embargo, mientras se presentan estas considerables ventajas, el proceso de tratamiento en el molde también se ve afectado por algunas características desfavorables que requieren una atención cuidadosa, éstas son:

- Necesidad de una cámara de reacción adecuada y a veces excesivamente grande.
- Tendencia a inducir algunas inclusiones en las fundiciones.
- Necesidad de nuevos conceptos de control de la calidad en la producción.

Una preocupación de los productores de hierro con grafito esferoidal obtenidos por el método “In-mold” es la tendencia a la introducción de escoria e inclusiones a la pieza, con respecto a ese punto, en investigaciones recientes se plantea que al establecer una relación de los componentes del sistema de alimentación A alimentadores: A escoriador: A salida de la cámara: A conexión con cámara :A trag. 1:1,112:1,112:1,112:1,112: (es decir a que cada elemento siguiente del sistema de alimentación es 12% mayor que el anterior) el flujo de metal logra que en cada elemento siguiente del sistema de alimentación, el cual tiene mayor altura que el anterior, queden atrapadas las suciedades en la parte superior de la sección, evitando así su paso a la parte posterior y así sucesivamente va sirviendo de trampa hasta lograr una pieza limpia.

Por otra parte en diciembre del año 1987 Y.Cekebich en su artículo “Optimización de la tecnología de obtención de piezas de Hierro con grafito esferoidal mediante el proceso “In-mold”. Llega a la conclusión de que la distancia entre los alimentadores y la salida desde la cámara de reacción no debe ser inferior a los 150 mm así como la altura del modificador en la Cámara de Reacción no debe ser inferior a los 30 mm de ser así se observa una disolución brusca del modificador en los primeros 5 s sin dar tiempo a la modificación total del nodulizante.

En enero de 1994 A. luffe publica un artículo denominado “Modificación del hierro nodular en el molde “, en el mismo, mediante una serie de experimentos y bajo las condiciones que se plantean en el trabajo, llega a conclusiones de especial interés las que exponemos a continuación:

Se utiliza una pre-aleación con 10% de Magnesio, con una granulometría entre 4 - 10 mm y se utilizan varias variantes de la cámara de reacción.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Primera variante: Caída del metal por arriba.

Independientemente de la forma y dimensiones de la cámara de reacción el modificador burbujea junto con el metal dispersándose por toda la cámara. El aumento de la temperatura hasta 1480 - 1500 °C y la disminución de las partículas del modificador no produjo cambios sustanciales.

Segunda variante: Caída del metal de forma lateral a través de un canal que hace contacto con la parte superior de la cámara.

El burbujeo se observó en menor magnitud pero en este caso no se observó estabilidad en el proceso.

Tercera variante: Alimentando en toda la altura de la cámara y con una placa de penopolistirolo en el fondo de la cámara.

El penopolistirolo en contacto con la aleación provoca una atmósfera reductora que oxida las partículas de modificador provocando un borboteo que garantiza las mejores condiciones para la interrelación del metal líquido con el modificador.

Como resultado de sus experimentos luffe llegó a las siguientes conclusiones:

1-El parámetro de la cámara (K) debe encontrarse en valores entre 0.6-0.7

2-  $F_s = \frac{V}{S}$

(2)

Donde:

F<sub>s</sub> - factor solución 0.056 - 0.07 Kg /s. cm<sup>2</sup>;

V- Velocidad de llenado del molde Kg / s.

S \_ Área de la sección transversal de la cámara cm<sup>2</sup>.

3-Sobre la asimilación del magnesio influyen la velocidad de llenado y el tiempo de contacto del metal con el modificador.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

4-A baja velocidad del flujo del metal se observa grafito vermicular debido al enfriamiento rápido del metal y debido a esto un contacto insuficiente del metal con el modificador.

5-A alta velocidad las partículas del modificador se humedecen y se oxidan con el molde lo que produce una disminución del magnesio residual.

6-Para la eficacia de la nodulización, las aleaciones para uso dentro del molde deben satisfacer algunos requerimientos importantes, tales como: el análisis y tamaño de grano (granulometría) debe ser uniforme y accesible al mismo tiempo; del mismo modo las impurezas no pueden ser admitidas.

En noviembre de 1976 C.M.Dunks realiza una serie de experimentos con la finalidad de comprobar:

1-La cantidad de nodulizante necesaria para lograr una esferoidización completa por el método "In-mold".

2-La influencia de la masa de la pieza sobre la calidad superficial del producto terminado.

3-La influencia del espesor de las paredes de la pieza fundida sobre las características de la matriz metálica de la pieza fundida.

4-La elección de la aleación nodulizante correcta.

En la primera serie de experimentos se llegó a la conclusión de que con un 0.356% de nodulizante se obtienen una buena estructura. Un exceso de nodulizante en la cámara de reacción por encima de 0.5% produce el efecto de blanqueo en la estructura de la aleación obtenida.

En la segunda serie de experimentos el autor pudo comprobar que a medida que aumenta la masa de la pieza fundida a pesar de obtenerse una estructura correcta se observa mayor arrastre de aleación nodulizante a la pieza produciendo así incrustaciones y defectos de cola de ratón.

Esto traerá como recomendación de que el método "In-mold" presenta sus

limitaciones con respecto a la masa de la pieza a fundir.

En la tercera serie de experimento se demostró que la disminución del espesor de las paredes de la pieza produce una tendencia a la formación de estructura perlítica y que esta para espesores de menos de 15 mm presenta hasta un 80% de perlita.

En la cuarta serie de experimentos se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1- La calidad de la estructura en relación con la cantidad de nodulizante introducida es independiente de la composición química de la aleación.
- 2- La calidad de la estructura en relación con la concentración de magnesio en la aleación nodulizante es independiente de esta, solo se necesita introducir la cantidad de magnesio requerida en dependencia del contenido de este en el nodulizante.
- 3- La concentración de óxidos, silicatos y sulfuros de magnesio dependen de la pureza del metal base y no de la aleación nodulizante.

Se plantea que, la concentración de la aleación disuelta en el hierro por unidad de tiempo es directamente proporcional al área superior de la aleación expuesta al flujo del hierro, e inversamente proporcional a la velocidad del flujo del hierro. Esto hace posible el uso de la relación de velocidad del flujo del hierro entre el área de la cámara de aleación (también llamado Factor Solución) como un indicador cuantitativo de la mayor o menor capacidad de un sistema para disolver la aleación. El factor solución es independiente del peso de la colada. La relación existente entre el factor solución y el Magnesio residual se puede observar en la figura 1.1

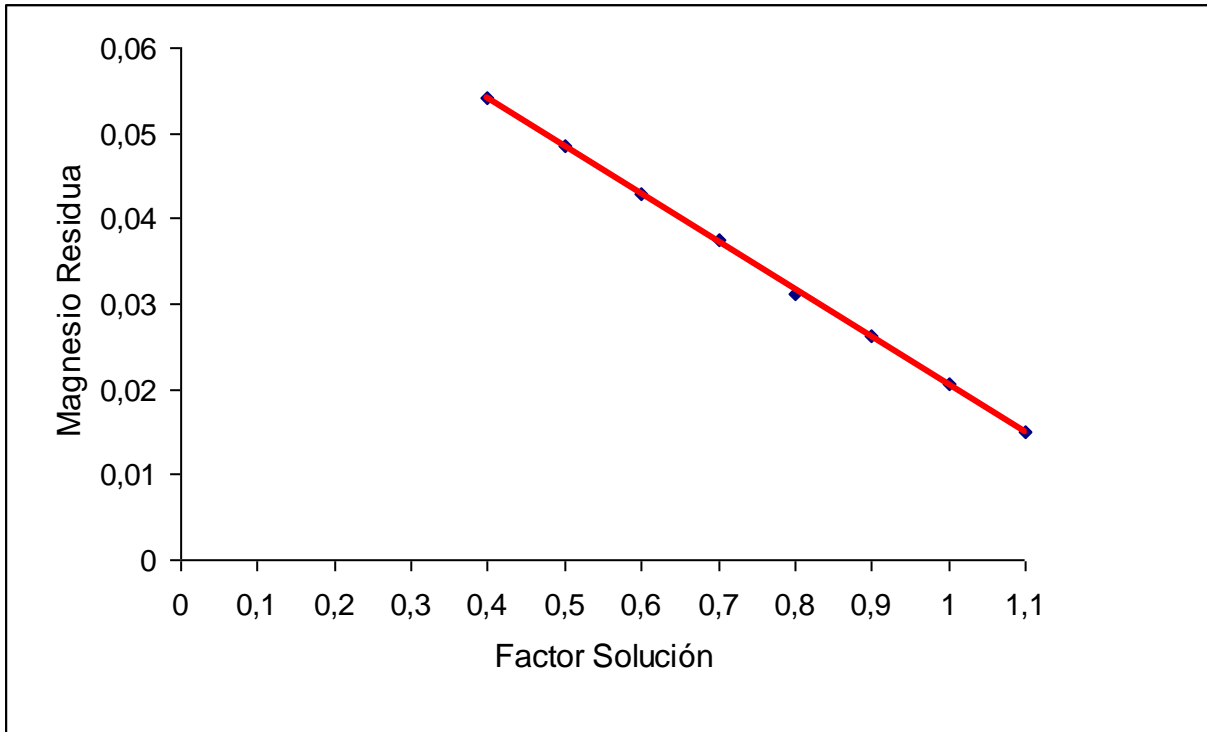


Fig. 1.1 Relación entre el factor solución y el Magnesio Residual según investigaciones de Dunks.

1.6 Características generales de las aleaciones para nodulización en el molde. /1; 4; 6; 7/

La FOSECO International LTD ha realizado investigaciones sobre la nodulización en el molde y se hicieron algunas consideraciones iniciales, sobre algunas de las características que debían cumplir los nodulizantes de modo que fuesen efectivos y seguros en su comportamiento, estas fueron:

- a) El nodulizante tenía que ser eficiente en la nucleación del grafito y por lo tanto, limitar o eliminar la formación de carburos.
- b) En vista del corto período de aplicación, el nodulizante tenía que ser





---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

razonablemente soluble de forma que su efecto fuera completo antes de la solidificación de la pieza. Al respecto, se consideraron importantes tanto el carácter nodulizante como la granulometría de las partículas.

c) La distribución del nodulizante tenía que ser uniforme para evitar que quedasen zonas de hierro sin nodulizar dentro de la pieza.

d) El nodulizante no debería introducir inclusiones perjudiciales en la pieza.

Parámetros que influyen sobre la obtención del hierro con grafito esferoidal por el método “in-mold”.

Para el buen desempeño del proceso In-mold se requiere tomar en consideración varios parámetros importantes como son la temperatura de vertido, tiempo de vertido, factor de solución, composición química del nodulizante, granulometría, cámara de reacción, diseño del sistema de alimentación, eficiencia del magnesio, peso de la colada. Porcentaje de magnesio requerido en la pieza y la cantidad de aleación nodulizante.

A continuación se explican con detalle cada uno de ellos.

Temperatura de vertido

El control de la temperatura de vertido es de suma importancia en este proceso ya que de ella depende en gran medida la disolución del nodulizante, limpieza de la pieza, la nodularidad de la pieza y por lo tanto la eficiencia del magnesio.

En estudios realizados por sobre el efecto de la temperatura de vertido en el proceso In-mold sobre la nodularidad, revela que en el rango de 1365-1450°C no existe efecto adverso alguno de gran significación.(preferentemente en la región de 1425-1450 °C).

Con temperaturas menores a 1360 °C, pueden surgir problemas como aleación no disuelta, conjuntamente con defectos de escoria, uniones frías y otros .La velocidad de formación de óxidos sólidos se incrementa conforme la temperatura disminuye.

La temperatura más importante relacionada con el proceso”In-mold”, es la del

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

metal al salir de la cámara de reacción. Durante el vertido de la cazuela al molde se pierden de 50 a 60 °C y otros 20 a 30 °C durante el flujo desde el tragadero hasta los canales de entrada a la cámara de reacción, entonces, la temperatura de entrada del metal a la cámara de reacción es aproximadamente 80 °C menor que la temperatura de vertido. Por esta razón, se requiere una temperatura de vertido mayor que en los otros procesos para producir hierro nodular.

Contenido de azufre del metal base.

Es importante controlar el nivel de azufre del metal base, ya que interviene en la eficiencia del magnesio, es decir en la economía del proceso, así como en la obtención de una nodularidad aceptable en las piezas. Para este proceso se recomienda un nivel de azufre de 0.015% para así minimizar el uso de la aleación nodulizante.

Pueden utilizarse mayores valores de azufre, pero tendrán que ser empleados mayores niveles de magnesio, con una posible tendencia a formar escorias de sulfuro de magnesio, silicatos de aluminio-magnesio y por lo tanto defectos y un aumento del costo.

Debido a que existe una gran afinidad entre el azufre contenido en el metal base y el magnesio contenido en el nodulizante adicional, durante el tratamiento se desarrollan ciertas reacciones químicas, una de ellas es la siguiente:



De la estequiometría de esta reacción se puede deducir el % de magnesio necesario para neutralizar el efecto nocivo del azufre sobre la nodulización.

$$\%Mg = \%S \times 0.76$$

(3)

Donde:

%Mg.-Magnesio necesario para neutralizar el efecto nocivo del azufre.

%S.-Concentración de azufre en la aleación base.

1.6.1 Velocidad de vertido.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Otro factor importante que debe considerarse durante el desarrollo del proceso “In-mold” es la velocidad de vertido, ya que influye en el tiempo de vertido de la pieza, en el factor de solución empleado y por consiguiente en la velocidad de disolución de la aleación.

La velocidad de vertido se puede determinar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_v = Pc / T_v$$

(4)

Donde:

V<sub>v</sub> -. Velocidad de vertido Kg/s

P<sub>c</sub>-. Peso total de la pieza (colada)

T<sub>v</sub> -. Tiempo de vertido s

O por la deducción de la siguiente expresión:

$$F_s = V / S$$

(5)

Donde:

F<sub>s</sub> - factor solución 0,056 - 0,07 Kg /s. cm<sup>2</sup>.

V-Velocidad de llenado del molde Kg/s

S - Sección transversal de la cámara cm<sup>2</sup>

La velocidad de vertido entre una planta y otra depende directamente del equipo con que se cuenta y del procedimiento que se emplea durante la operación de vertido. Generalmente ya está determinada en cada planta en particular.

Es claro que al aumentar la velocidad de vertido se reduce el tiempo de vertido. En otros casos, se recomienda partir del cálculo del tiempo de vertido y luego se determina sobre la base de este, la velocidad de vertido.

La velocidad de vertido se puede modificar, variando el diámetro del embudo y tragadero del sistema de alimentación de la colada.



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En este caso para la determinación de la velocidad de vertido partimos del cálculo de tiempo de vertido por la fórmula de Ossan.

$$T_v = S \cdot \sqrt{G \cdot K} \quad (6)$$

Donde:

G- Masa de la pieza en Kg;

K- Coeficiente que incluye la pérdida del metal en sistema de alimentación y mazarotas.

T<sub>v</sub>-Tiempo de vertido s

S- Coeficiente que se determina por tablas y depende del espesor medio de las paredes..

Tiempo de vertido.

Es otro factor importante que debe considerarse durante el desarrollo del proceso “In-mold”, para producir buenas piezas .En general, los tiempos de vertido son directamente controlados por el sistema de alimentación. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de vertido afecta directamente a la velocidad de vertido e indirectamente a la velocidad de disolución de la aleación nodulizante. Para una velocidad de vertido constante, el tiempo de vertido se incrementa conforme al peso de la pieza.

#### 1.6.2 Composición química de la aleación nodulizante. /4; 7/

Es indispensable conocer la composición química y densidad de la aleación nodulizante utilizada en el proceso, para posteriormente determinar la cantidad de aleación nodulizante requerida y el diseño de la cámara de reacción.

Shea y Holtan han encontrado que el valor de la relación Si/Mg en algún momento pueden propiciar alteraciones en el tamaño de la cámara de reacción, en particular al área superficial de la cámara. Encontraron que si la relación Si/Mg es mayor que 11 hay una baja reactividad y se requiere de una cámara de reacción con una gran área superficial para alcanzar a disolver completamente la aleación

durante el tiempo de llenado del molde. Por su parte, si la relación Si/Mg es menor de 5, significa que existirá una reacción excesiva debido a la alta concentración de magnesio; en este último caso no se requiere de grandes áreas superficiales de las cámaras de reacción.

Para finalizar, diremos que la relación Si/Mg siempre hay que considerarla, ya que si en un momento determinado no llegase a disolver completamente la aleación cuando todas las variables del proceso están bien controladas, esta podría darnos la pauta para solucionar dicho problema.

**Cantidad de aleación nodulizante.**

La cantidad de aleación nodulizante durante el proceso In-mold debe ser la necesaria, ya que si es insuficiente no se obtiene una nodularidad satisfactoria en la pieza ó ninguna; por lo contrario, si es excesiva es probable que existan problemas de disolución incompleta del nodulizante, inclusiones de escoria y una reducción en la economía del proceso.

Es preciso determinar la cantidad de aleación nodulizante requerida, ya que de ella depende en gran medida la eficiencia del magnesio, la disolución, el contenido de magnesio deseado en la pieza y por supuesto, la economía del proceso.

**Eficiencia del magnesio.**

La ventaja más importante que presenta el proceso In-mold comparado con otros procesos de nodulización es precisamente la gran eficiencia obtenida por el magnesio, siendo esta generalmente superior al 80%. Sin embargo, puede variar entre una pieza y otra y en las diferentes plantas debido al procedimiento utilizado, y a muchos otros factores como son: el peso de la pieza, composición química del nodulizante, temperatura de operación, nivel de azufre del hierro base, cantidad de nodulizante agregado y de la disolución de la aleación nodulizante.

Es recomendable realizar un análisis químico y verificar o comprobar que se

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

obtengan eficiencias satisfactorias deseadas, después de la solidificación de piezas obtenidas por este proceso.

Porcentaje de magnesio residual deseado.

Trabajos de señalan que debe quedar por lo menos 0.040% de magnesio residual para conseguir que todo el grafito sea esferoidal, (otros autores delimitan un intervalo entre 0.035 y 0.05%) y para obtener a la vez, la mejor, combinación de características mecánicas.

La cantidad de magnesio residual depende de los siguientes factores, entre otros: cantidad de pre-aleación, peso de la pieza, composición química del nodulizante (%Mg), eficiencia del magnesio, contenido de azufre, etc.

Cuando el contenido de magnesio residual en la fundición es excesivo, lo cual no es recomendable, en la microestructura pueden aparecer racimos de hojuelas de grafito esferoidal y flotación de nódulos así como existe mayor contracción y por lo tanto es mayor el rechupe en las piezas. Por el contrario, cuando el contenido de magnesio en la fundición es bajo, se producirá en la microestructura grafito vermicular ó mezclas de grafito en forma esferoidal y laminar.

Diseño del sistema de alimentación.

El diseño del sistema de alimentación influye en: La velocidad de disolución de la aleación, el factor solución, el diseño de la cámara de reacción, peso total de la colada, etc.

La posición de la salida del metal de la cámara debe provocar una retención momentánea del hierro entrante sobre la cámara de reacción antes de permitir que el metal pase a los otros elementos del sistema de alimentación. Así como debe evitar puntos muertos en la cámara; ya que ésta es un área potencial para la erosión de la arena, se incorporará, cuanto sea posible, diseño de radios lisos. Se debe procurar sencillez al diseñar las dimensiones.

El área del escoriador puede variarse, de tal forma que se obtenga una velocidad adecuada de flujo del metal dentro del molde y con esto conseguir fundiciones



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

limpias, libres de inclusiones de arena. Se ha sugerido que mientras se procure mantener una distancia mínima de 150 mm entre la cámara de reacción y el primer conducto de entrada a la pieza, las velocidades requeridas del metal serán entre 200 y 500 mm/s. (8 y 20 pulg/s.) Con áreas de escoriador 12 % más grandes que el área de entrega al choque(o alimentadores), se alcanzan velocidades de 700 a 760 mm/s. (28 a 30 pulg/s.). Esto lavará las inclusiones como SiC y MgSiO<sub>2</sub> en su camino con posibilidad de erosionar y arrastrar arena dentro de la cavidad.

La fórmula para determinar el área de choque o área del alimentador:

$$A_{\text{aliment.}} = P_v \times K / T_v \times \sqrt{E.M.H.} \quad [\text{FES-CAUTIPLAN}]$$

(7)

Donde:

P<sub>v</sub> - Peso del metal vertido

K-constante (K=0.32)

T<sub>v</sub>-Tiempo de vertido, en s

$EMH = H - P^2/2C$  ; Donde: H-. Altura del metal por encima del choque o alimentador

C-. Altura de la pieza P -. Altura de la pieza por encima del choque.

La constante K puede variar de fundición a fundición. El reporte técnico de un comité de Materiales & Methods. Ltd sugiere el uso de 0.32, no obstante que puede variar de 0.31 a 0.34 dependiendo de la práctica.

Otra recomendación de cálculo para el área mínima del Sistema de Alimentación es la recomendada por [Goyos Pérez L. Año.1991]. El denominado método de Ossan.

$$\square F_{im.} = \frac{K.G}{\square T_v.0.31. \sqrt{Hm}}$$

(8)

Donde:

G- Masa de la pieza en Kg

K- Coeficiente que incluye la pérdida del metal en sistema de alimentación y mazarotas

□- Coeficiente que incluye la resistencia del sistema de alimentación al paso de metal

$t_v$  - Tiempo de vertido, s

$H_m$  - Presión metalostática media, cm

$$T_v = S \cdot \sqrt{G \cdot K}$$

S- Coeficiente que se determina por tablas y depende del espesor medio de las paredes.

$H_m = H_o - P^2/2C$ . ; Donde: C- Altura total de la colada según la elección del plano divisor; P- Altura de la colada por encima del plano divisor,  $H_o$  - Altura de la caja superior.

Con estos importantes aspectos, el diseñador de modelos incluyendo el sistema de alimentación, en la industria de la fundición, puede jugar de tal manera que llegue a la construcción de un sistema que le dé óptimos resultados.

Peso de la colada.

El peso total de cada colada depende principalmente del tamaño de la pieza y del diseño del sistema de alimentación. El peso de la colada interviene en otros parámetros como la velocidad, tiempo de vaciado, diseño de la cámara, cantidad de vaciado, y cantidad de aleación nodulizante. Para el cálculo de la cantidad de aleación nodulizante, cabe mencionar que se considera únicamente el peso a partir de la cámara de reacción hasta la pieza requerida, sin incluir el peso de los otros elementos del sistema de alimentación.

Granulometría.

A pesar de tener la cantidad adecuada de esferoidizante, la granulometría llega a ser un factor importantísimo en el tratamiento de nodulización dentro del molde.





Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

De acuerdo a varios trabajos de investigación de este proceso, se ha observado que cuando se emplean nodulizante con granulometría (o tamaño de malla) muy finas no se obtienen buenos resultados, debido a que no ocurre una disolución adecuada; por lo contrario cuando se utilizan granulometrías más grandes (0.056 mm) se encuentran resultados más convenientes. Cuando los nodulizantes están formados por una mezcla mecánica de compuestos, se requiere que exista una distribución de tamaño compatible para cada uno de los dos componentes.

A continuación se mostrará los resultados de investigaciones realizadas por luffe, el mismo muestra como conclusiones una tabla (ver tabla 1.1) en la que se observa la influencia de diferentes intervalos de temperatura, área de la cámara y granulometría sobre la velocidad de disolución del nodulizante.

Diseño de la cámara de reacción.

La cámara de reacción como contenedor del nodulizante y lugar donde debe ocurrir la disolución de este, ocupa un papel muy importante en el proceso, por lo que requiere que su diseño sea adecuado; además que dependen de ella muchos otros factores como son: velocidad de vertido, factor de solución, disolución de la aleación, etc.

Tabla 1.1 Influencia de intervalos de temperatura, área de la cámara y granulometría sobre la velocidad de disolución del nodulizante para el “In-mold”

Temperatura °C	1352	1352	1352	1402	1402	1402	1452	1452	1452
Área de la cámara cm <sup>2</sup>	19	81	187	19	81	187	19	81	187
	VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN (mm / seg)								
Granul. Hasta 1mm	0.5	0.6	0.85	1.02	1.26	1.31	1.31.	1.3	1.4.



Granul. desde 1 a 3 mm	1.35	1.42.	1.34	1.7	1.77.	1.67	2.17.	2.27	2.07 .
------------------------------	------	-------	------	-----	-------	------	-------	------	--------

El factor básico para una buena nodulización en el molde es la sección horizontal de la cámara, la cual debe ser prácticamente constante en todas las alturas, además, es importante que otros elementos de diseño de la cámara sean elegidos apropiadamente para satisfacer los dos requerimientos siguientes:

- a) La cámara debe permitir un flujo regular del hierro sobre la aleación, para facilitar su disolución gradual.
- b) El diseño de la cámara debe ser tal, que los residuos de aleación sin disolver arrastrados por el hierro no penetren en la cavidad de la pieza.

Para ambos requerimientos, es conveniente evitar el choque violento del hierro que fluye dentro de la cámara, contra un área localizada de aleación nodulizante. Esto provocará el desplazamiento y proyección de granos, con la consiguiente formación de inclusiones. Esto también puede generar vórtices y algunas veces esquinas muertas donde la disolución es extremadamente lenta o totalmente incompleta.

Cuando es posible, también se procura ubicar la posición de la salida de forma tal que permita, forzar al hierro a una cierta circulación sobre la aleación antes de alcanzar la salida, esto se logra por acomodo de la dirección de la salida un tanto contrapuesta, pero aún paralela con la entrada y en otros casos en ángulo o cruzados.

1.7 Se conocen varias propuestas de colocación y funcionamiento de las cámaras de reacción las comentaremos a continuación. /4; 6; 7/

Las cámaras presentan aditamentos para la carga de la cámara con nodulizante, así como, un sistema de reten para evitar la entrada de inclusiones al molde. Este garantiza que no penetren inclusiones al molde, tiene la desventaja de ser

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

complejo y costoso pues se debe fabricar para cada tipo de pieza un dispositivo diferente con las dimensiones de la cámara según la masa de la pieza.

Sistema “In-mold” con dispositivo de cámara y vertido colocado en la parte superior del molde a este dispositivo se le adiciona un sistema de filtrado del metal antes de su entrada a la cámara de reacción. También presenta un retén para evitar la entrada de inclusiones al molde y un aditamento para la carga de la cámara con nodulizante, tiene la desventaja de ser complejo y costoso pues se debe fabricar para cada tipo de pieza un dispositivo diferente con las dimensiones de la cámara según la masa de la pieza.

En otra variante se observa una cámara en forma de paralelepípedo ubicado en la parte inferior del molde. Seguidamente a la cámara se coloca en la parte superior del molde una trampa de escoria con el fin de evitar el paso de inclusiones de escoria y magnesio al metal. Este sistema no es costoso pero los cantos agudos característicos del paralelepípedo dificultan la reacción del nodulizante en esa zona, quedando parte del mismo sin disolverse, esto le resta rendimiento durante la nodulización.

En el sistema “In-mold” con cámara en forma de paralelepípedo ubicado en la parte inferior del molde. Seguidamente a la cámara se coloca en la parte superior del molde una trampa de escoria con el fin de evitar el paso de inclusiones de escoria y magnesio al metal. Este sistema es para piezas con plano divisor vertical. No es costoso pero los cantos agudos característicos del paralelepípedo dificultan la reacción del nodulizante en esa zona, quedando parte del mismo sin disolverse, esto le resta rendimiento durante la nodulización

La forma geométrica y posición de la cámara de reacción no influye en la metodología para determinar otros parámetros que son indispensable para la construcción de la misma.

Con relación a la altura de la cámara, se puede decir que la disolución de la aleación es menos uniforme a medida que la profundidad de la cámara aumenta.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En la práctica, con un diseño de base cuadrada es conveniente que la profundidad no sea mayor que la longitud del lado horizontal.

Los pasos a seguir para la construcción de la cámara de reacción se pueden resumir de la siguiente forma: Diseño del sistema de alimentación, determinar volumen del sistema de alimentación, determinar la masa de la pieza de acuerdo a la relación siguiente:

$$M_{p.s.a} = V_p \times \delta$$

(9)

Donde:

$M_{p.s.a}$  -Masa de la pieza y el sistema de alimentación, en kg;  $\delta$ - Densidad del material, en g/cm<sup>3</sup>

$V_p$  - volumen de la pieza

Luego se determina el tiempo de vertido de acuerdo a la masa de la colada y al sistema de vertido de la planta. Este puede ser calculado por las recomendaciones de Dunks.C.M .Se calcula la velocidad de vertido de acuerdo a la siguiente relación:.

$$V_v = \frac{P_c}{T_v}$$

(10)

Donde:

$V_v$  - Velocidad de vertido, en Kg/ s

$P_c$  - Peso de la colada, en Kg

$T_v$  -Tiempo de vertido, en s.

Cuando por primera vez se realiza este proceso se recomienda un factor de solución 0.069 kg / s /cm<sup>2</sup>, según Dunks.

El siguiente paso consiste en encontrar el área de solución de la cámara de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A_s = V_v / F$$

(11)

Donde:

$A_s$  -Área de solución de la cámara, en  $\text{cm}^2$

$F_s$  - Factor de solución, en  $\text{Kg/ s. cm}^2$ .

Los siguientes pasos se utilizan para determinar la profundidad ó altura de la cámara de reacción .Una vez seleccionada la aleación nodulizante que se empleará, se determina la cantidad de aleación a introducir en el molde y con esto se calcula el volumen de la aleación conforme la siguiente expresión:

$$V_a = M_a / \rho$$

(12)

Donde:

$V_a$  -Volumen de la aleación, en  $\text{cm}^3$  .

$M_a$  -Masa de la aleación, en kg.

$\rho$  - Densidad de la aleación, en  $\text{g/cm}^3$ .

Se determina la profundidad de la aleación en la cámara:

$$P_a = V_a / A_s$$

(13)

Donde:

$P_a$  - Profundidad de la aleación, en cm.;

$A_s$  - Área de solución de la cámara, en  $\text{cm}^2$

Finalmente se determina la altura de la cámara:

$$H_c = P_a + 1 - 2 \text{ cm}$$

aprox.

(14)

Donde:

$H_c$ - Altura de la cámara;

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

La altura de la cámara se elige en dependencia del volumen de la misma, el cual se debe determinar en dependencia del parámetro de la cámara (K) que se expresa por la relación mostrada en la ecuación:

$$K = \frac{V_n}{V_c}$$

(15)

Donde:

K-.Parámetro de la cámara.

$V_n$ -.Volumen que ocupa el nodulizante.

$V_c$ -.Volumen de la cámara.

1.8 Estudio de las características tenso activas del azufre y su posible influencia sobre la concentración de inclusiones. /4; 7/

Para lograr con eficacia la tecnología de obtención del hierro con grafito esferoidal, es imprescindible lograr el control del azufre. Este último posee gran afinidad química con el magnesio, lo cual se representa con la ecuación siguiente:

$$\Delta G_{MgS} = -174928 + 18.29T \text{ (J/mol)} \quad (16)$$

Esta gran afinidad provoca que al iniciarse el contacto nodulizante - metal, el azufre reacciona con el magnesio del nodulizante y le resta el efecto globulizador al mismo. Es por eso, que el mismo es considerado el principal elemento demodificador dentro de las impurezas presentes en las aleaciones de hierro fundido.

En investigaciones realizadas se comprobó que en aleaciones de hierro con grafito esferoidal, con ciento por ciento de nodulización, a medida que era mayor el contenido de azufre en la composición química del metal base se presentaba, una pequeña, pero notable disminución de las propiedades mecánicas de las mismas, en comparación con aleaciones de menor azufre en el metal base. En otras investigaciones realizadas por [Van der Holst. Año.1995 y Castledine.T.

Año.1998] también se llegó a la conclusión de que neutralizado todo el azufre que podía reaccionar con el magnesio y obteniéndose una esferoidización completa en todo el volumen de la pieza, a medida que era superior el contenido de azufre remanente también se notaba la mencionada disminución de las propiedades mecánicas. Partiendo de estas conclusiones fue posible deducir que el contenido de azufre en las aleaciones ya esferoidizadas ejercían cierta influencia en las propiedades mecánicas del metal en estado bruto de colada. A partir de estas investigaciones se analizaron las posibles causas de la disminución de las propiedades mecánicas.

El azufre remanente, después de nodulizada la aleación, provoca la presencia de sulfuros en los límites intergranulares de la aleación lo que trae consigo la disminución de las propiedades mecánicas. Esta hipótesis fue demostrada por Medana.R. En el año 1997 basándose en investigaciones previas realizadas por Girchovib.N.G en el año 1992 y se comprobó que eran directamente proporcional el contenido de azufre remanente y la cantidad de sulfuros en la microestructura pero a muy pequeñas diferencias del contenido de azufre se observa una pequeña pero marcada influencia en las propiedades mecánicas.

El problema consiste en demostrar el mecanismo mediante el cual se pueda comprobar la posible interrelación entre el contenido de azufre en la aleación ya esferoidizada y los valores de resistencia a la tracción.

En estudios realizados se pudo comprobar que los fenómenos de tensoactividad podían ejercer cierta influencia en las propiedades mecánicas de las aleaciones de hierro con grafito esferoidal. Para un mayor entendimiento del lector tomaremos algunos planteamientos teóricos que pueden reafirmar el camino seleccionado para la investigación.

Kudrin plantea que al examinar las propiedades del metal líquido es necesario tener en cuenta que las partículas que se encuentran en las capas interiores y exteriores del líquido experimentan diversa influencia de las partículas que los



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

rodean, por esa razón, las propiedades de las capas superficiales de una sustancia siempre divergen algo de las interiores.

Con el aumento de la superficie, el potencial isobárico de las sustancias se incrementa, a consecuencia de lo cual, la capacidad de la sustancia de desprenderse de la fase dada en cualquier proceso aumenta, por lo tanto crece la solubilidad, la actividad química. Esta circunstancia ha de tomarse en consideración puesto que en la fabricación del hierro fundido nodular (durante la modificación con el nodulizante) la mayor parte de los procesos ocurren en la separación de las fases grafito - burbuja de vapor de magnesio, oxígeno - inclusiones, azufre - inclusiones, metal - vapor de magnesio. Así la superficie de separación modificador - metal, es mucho mayor durante el momento de la ebullición del magnesio que en estado tranquilo del baño y por lo tanto los fenómenos superficiales durante el proceso de obtención del hierro con grafito esferoidal se manifiestan con más intensidad que los fenómenos superficiales durante el proceso de obtención de aleaciones de hierro gris común.

El exceso de esa energía en la capa superficial de la sustancia cerca de la superficie de contacto de los cuerpos en comparación con la energía de la sustancia en el interior del cuerpo es lo que se denomina energía superficial y es igual al trabajo consumido para la formación de la superficie, o sea, el trabajo necesario para vencer las fuerzas intermoleculares (o interatómicas) de cohesión al desplazarse las moléculas (los átomos) desde el seno de la fase hacia la capa superficial.

La energía superficial libre específica para los líquidos móviles es idénticamente igual a la tensión superficial. Esta última es una de las más importantes características termodinámicas de la superficie de separación de las fases que se define como el trabajo que debe gastarse para formar la unidad de área de la superficie. Se expresa en  $J/m^2$  (la energía por la unidad de superficie).



Se conoce que, los procesos relacionados con la disminución del potencial termodinámico ocurren de forma espontánea, por tanto los procesos vinculados con la reducción de la tensión superficial se realizarán espontáneamente.

Al estudiar los procesos de la obtención de hierro con grafito esferoidal, y precisamente en el momento de la adición del nodulizante, se observa, que se trata de reacciones de disolución donde las fuerzas de interacción entre los diferentes componentes no son iguales. Teniendo en cuenta la espontaneidad del transcurso de los procesos debido a que la energía libre del sistema disminuye (en este caso los procesos están relacionados con la disminución de la tensión superficial), en la capa superficial se incrementará la concentración de aquel componente cuyo aumento causa la disminución de la tensión superficial. El fenómeno de la variación de contenido del componente dado en la capa superficial en comparación con su contenido en las capas internas, se llama absorción; las sustancias que hacen disminuir la tensión superficial del disolvente, o sea, las sustancias cuya concentración es mayor en la capa superficial que en la disolución se denominan tenso activas. Toda sustancia, siendo componente de una disolución líquida de un gas (o vapor), en condiciones correspondientes, puede manifestar la actividad superficial, o sea disolverse bajo la acción de las fuerzas intermoleculares en una u otra superficie, reduciendo su energía libre. No obstante, tenso activas se acostumbra llamar solo aquellas sustancias cuya absorción con una concentración muy pequeña (décimas o centésimas de por ciento) ocasiona la disminución brusca de la tensión superficial.

Las investigaciones han mostrado que tales elementos como el oxígeno, el azufre, el boro, el cerio, el calcio y otros son tensoactivas con respecto al hierro. Las pequeñas adiciones de elementos tensoactivos hacen disminuir la tensión superficial del hierro en un 20...30%, con lo que el contenido de estos elementos en la capa superficial aumenta.



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

La diferencia entre las concentraciones en volumen y superficiales de las sustancias tensoactivas puede ser bastante notable. Así por ejemplo, si la concentración de azufre en el metal es de 0,005%, su concentración en la superficie constituye varias unidades de por ciento de su concentración.

Está demostrado que cuando menor sea la tensión superficial menor trabajo se requerirá para que se forme un germen y tanto más favorable serán las condiciones para la formación (separación) de una nueva fase.

Por consiguiente, la presencia en el metal de las impurezas tensoactivas crea las condiciones para la separación (formación) de la nueva fase (burbujas de gas, inclusiones no metálicas) de

#### Inclusiones

Se denominan inclusiones no metálicas, a los componentes de los metales (Fe, Mn, Cr, W, V, Ti...) que reaccionan con los no metales, formando nitruros, sulfuros, óxidos así como, todos aquellos elementos que aparecen en la estructura de la aleación sin formar parte de la misma.

Las inclusiones no metálicas ejercen una influencia negativa en las propiedades de la aleación, pues una alta concentración de estas reduce el límite de fatiga de las aleaciones, provocan debilitamiento de los enlaces intergranulares y si tienen forma aguda, son fuentes de concentración de tensiones.

El proceso de formación de las inclusiones, como resultado de las reacciones entre los componentes disueltos en el metal, así como, el desprendimiento de las inclusiones debido a la disminución de su solubilidad en el hierro, al bajar la temperatura durante la cristalización, están relacionados con los procesos de formación de una nueva fase a partir del seno de una fase inicial

Sobre el mecanismo de formación de una nueva fase influyen factores termodinámicos (probabilidad de principio de transcurso del proceso) así como cinéticos (intensidad y velocidad con que transcurre la formación de la nueva fase). Del estudio de estos procesos ha quedado claro lo siguiente: la intensidad

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

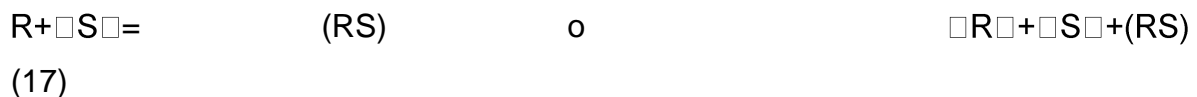
de la formación de los gérmenes de una nueva fase ( inclusión) será tanto mayor cuanto menor sea el valor de la tensión superficial  $\sigma_{me-incl}$  .en el límite metal-inclusión y cuanto mayor sea el grado de saturación.

El proceso de desprendimiento de las inclusiones se facilita en grado considerable si en el fundido hay superficies de separación acabadas .En muchos casos unas inclusiones no metálicas se desprenden de las superficies de otras de difícil fusión, contenidas en el fundido.

### 1.9 Carácter desulfurante del Magnesio.

Se conoce que el Magnesio es no solo un oxidante activo sino también un desulfurante de gran poder de reacción .Esto se puede determinar al observar los resultados sobre las investigaciones realizadas sobre los cálculos de variación de la energía libre para la formación de los sulfuros de magnesio vemos que sus valores se encuentran muy por debajo del  $\Delta G^\circ$  para la formación de  $Al_2S_3$ ;  $FeS$ ;  $MnS$ ; y  $NaS$

La interacción del Magnesio disuelto en el metal con el azufre se puede representar por medio de las siguientes reacciones:



La constante de equilibrio de esta reacción se puede determinar por medio de la siguiente ecuación

$$\lg p_{MgS} f_{MgS} / a_{MgS} = -22112/T + 9.19 \quad (18)$$

Donde:

$p_{MgS}$  -Presión del gas del  $MgS$ ;

$f_{MgS}$ - Concentración de magnesio y azufre

$a_{MgS}$ - Actividad del  $MgS$

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Deduciendo las ecuaciones anteriores se observa que en el caso de que ocurra la reacción en la frontera de las fases la actividad del azufre en el metal puede ser disminuida hasta niveles de muy bajo valor. Por ejemplo a 1600 °C y  $p_r$  0,1 en la salida de la burbuja del elemento reaccionante, la actividad del azufre no debe estar por encima de  $2 \cdot 10^{-3}$  en el equilibrio con los gases del Magnesio.

Experimentos realizados por [Bigueievs M. Año.1977] han demostrado que a las temperaturas del hierro fundido la concentración del azufre en equilibrio con el Magnesio disuelto en el metal puede ser de  $5 \cdot 10^{-4}$  con un contenido de Magnesio disuelto en el metal de 0.23%. Desulfuración, teoría y métodos.

El azufre, como es conocido es un elemento nocivo para casi todas las aleaciones de hierro carbono. El origen fundamental del mismo lo constituyen los materiales de carga. En dependencia de la concentración de azufre, los arrabios para la fabricación de aceros y fundiciones se dividen en tres categorías: La primera, cuando su concentración no sobrepasa el valor de 0.03%, la segunda cuando este se encuentra por debajo de 0.05% y la menos deseable cuando presenta valores inferiores a 0.07%. El denominado arrabio producido específicamente para la producción de hierro con grafito esferoidal en su composición química el contenido de azufre no es mayor de 0.015%. Bajo ninguna circunstancia, es recomendable para la obtención de hierro con grafito esferoidal, materiales de carga en los cuales la concentración de azufre sobrepase el valor de 0.03%.

Características del azufre que permiten su eliminación del metal fundido.

La actividad del azufre depende de la composición química del fundido. El carbono y el Silicio aumentan dicha actividad expulsando el azufre de las microcélulas de la estructura del metal líquido. Por eso es más fácil la desulfuración de los hierros fundidos que la de los aceros. Para medir la actividad del azufre  $A_s^\Sigma$  es preciso tomar en consideración la influencia que ejerce sobre esta cada impureza. ( $A_s^\Sigma = A_s^C A_s^{Si} A_s^{Mn}$ )



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

El azufre es tensoactivo, por eso en la superficie de separación de las fases, la concentración del mismo es mayor que por todo el volumen de la disolución. Por eso se tiene mayor efecto en la desulfuración, en aquellos métodos que aseguren el aumento de la superficie de contacto entre el metal y el elemento desulfurante (mezclado con escoria, insuflado en el metal del desulfurante. Por otra parte la presencia en el metal elementos tensoactivos provoca la denominada “lucha por la superficie”, donde cada elemento tensoactivo trata de ocupar la zona de separación de las fases dificultando así la reacción de desulfuración. Entre estos, el oxígeno es el principal elemento que causa dificultad en la desulfuración. Si el contenido de oxígeno en el metal se logra disminuir hasta  $< 0.01\%$  la velocidad y el grado de eliminación del azufre se incrementa bruscamente.

Por otra parte, cierta cantidad de azufre puede ser oxidada y evacuada a la parte gaseosa. Para el caso de procesos de desulfuración donde el desulfurante es impulsado por aire el azufre puede oxidarse según la reacción:



Para esta reacción la constante de equilibrio toma valor de:

$$\text{Log } K = \text{Log } P_{SO_2} / [S] \cdot O_{2g} = -294 / T - 2.8$$

(20)

Esta reacción alcanza con rapidez el estado de equilibrio y no adquiere ningún desarrollo notable.

*Elementos desulfurantes:* Los elementos que forman sulfuros cuya energía libre de formación ( $\Delta G^\circ$ ) es menor que la obtenida durante la formación de los compuestos de azufre con hierro, pueden servir como desulfurantes. Tales elementos son Mn, Mg, Na, Ca y otros, así como el Cerio y demás metales de las tierras raras. Todos estos elementos se utilizan en la práctica.

Realizando un análisis de los cálculos de energía libre presente en la formación de los sulfuros de calcio se pudo determinar que entre 1227 y 1627 °C el valor

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
 www.uho.edu.cu

de la energía libre del sulfuro de calcio  $\Delta G_{\text{CaS}} = -395 - 298 \text{ kJ / mol}$ , muy por debajo de los valores de la formación del  $\text{MgS}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{MnS}$ ,  $\text{FeS}$  y otros. Es decir que en este caso se considera apropiada la elección de un desulfurante a base de calcio debido a su alta afinidad con el azufre así como por ser un elemento barato y no deficitario.

La interacción del Calcio con el azufre disuelto en el metal se puede representar a través de la siguiente reacción.



La variación de la energía libre según datos de I. V. Machikin al ocurrir la reacción anterior se puede determinar por las siguientes formulas.

$$\Delta G_{\text{CaS}} = -421108 + 86.4 T; \text{ J/mol a } t = 1487 \text{ C} \quad (22)$$

$$\Delta G_{\text{CaS}} = -566808 + 171.4 T; \text{ J/mol a } t = 1487 \text{ C} \quad (23)$$

Análisis de algunos métodos de desulfuración empleados a escala mundial.

Introducción del desulfurante a alta presión sobre la superficie del metal base.

Una de las causas que dificultan el tratamiento con desulfurantes en las aleaciones ferrosas consiste en la gran diferencia entre la temperatura de ebullición entre los desulfurantes y el metal base. Disminuir o eliminar esta diferencia se puede lograr creando una alta presión sobre la superficie del metal la cual se acerca a la presión del gas del desulfurante (al ebullición este). Esto se logra si introducimos la cacerola con el metal en un autoclave hermético el cual es sometido a presión mediante el insuflado de aire comprimido, al lograrse la presión adecuada se le insufla el desulfurante en forma de polvo. Con este método se logran porcentajes de desulfuración de hasta 98%. Pero tiene la gran desventaja de la necesidad de construcción de un equipamiento muy costoso que encarece grandemente el proceso.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Introducción del desulfurante en el metal dentro de un medio recubridor.

Esto se realiza con el propósito de disminuir la velocidad de evaporación del desulfurante. El desulfurante se introduce en fracciones de 1Kg de peso y se envuelve en un recubrimiento de 20 - 40 mm de espesor, compuesto de, arcilla refractaria 45%, 45% de aserrín de madera y 10 % de silicato de sodio. Este compuesto es briqueteado hasta lograr una masa compacta luego se introduce en una campana metálica con orificios en toda su estructura de 25 mm de diámetro y se introduce en el interior de la cazuela con el metal fundido, luego se le da una permanencia de 10 ó 12 min. y se realiza el vertido. En este caso se logran valores de desulfuración de hasta 62%, con el inconveniente de alta pérdida de temperatura por la permanencia del metal para la desulfuración y que este proceso es muy trabajoso.

Método de Volianik

Este método se basa, en el aumento de la reactividad del azufre gracias a sus características tensóactivas. Mediante el aumento del área de contacto entre la superficie del metal fundido y el azufre se logran mejores resultados en el rendimiento de la desulfuración.

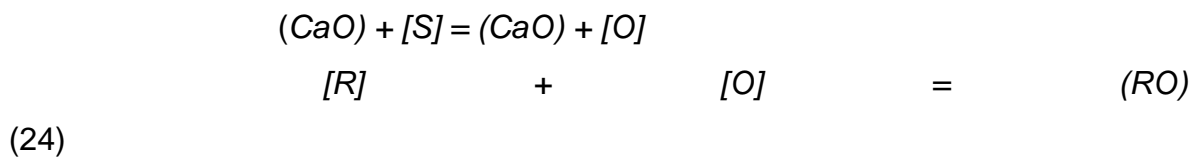
En este caso se utiliza como desulfurante el carbonato de sodio, ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), por medio de un dispositivo especial se introduce el desulfurante en forma de polvo y luego lo insufla al baño metálico por medio de un gas inerte (argón) para lograr una mayor área de contacto entre el desulfurante y el metal. Con el empleo de esta tecnología se puede lograr que el azufre disminuya en la aleación hasta un 95%

Este método posee algunas ventajas que se pueden resumir en lo siguiente: Alto porcentaje de desulfuración y la no presencia de suciedades en el metal producto de que el gas activador es inerte.

1.10 Mecanismo y cinética de los procesos de tratamiento de las fundiciones con calcio como desulfurante y mediante la activación de la superficie desulfurante-metal. /1; 2; 3; 4; 5; 6; 7/

La desulfuración ocurre con la ayuda de dos procesos. El primero es mediante la difusión del azufre desde el metal hasta la escoria. El segundo se basa, en la cinética del movimiento del desulfurante que se pone en contacto con el azufre en todo el volumen del metal impulsado por un agente externo.

Krupman en su publicación de la revista “Acero” No 9 de 1994 afirma que la formación del sulfuro de calcio ocurre según el siguiente esquema:



Plantea que para este caso la difusión de los elementos reaccionantes no limita la velocidad de reacción (la velocidad de eliminación del azufre es proporcional a la concentración del azufre y la cantidad de calcio disuelto en el metal)

En experimentos realizados por Krupman se demostró que prácticamente en todos los casos los procesos de desulfuración se describen mediante una ecuación exponencial:

$$S_f = S_i e^{-Kt}$$

(25)

Donde:

S<sub>f</sub>-Azufre final

S<sub>i</sub>-Azufre antes del tratamiento,

t- Tiempo de tratamiento,

K- Constante de la velocidad de reacción.



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Desde el punto de vista cinético Krupman demuestra que la velocidad de la reacción de desulfuración (Kg/s) se puede mostrar de la siguiente forma:

$$V_s = K.S F_R \quad (26)$$

Donde:

S- concentración del Azufre en el metal en % de masa,

$F_R$ - área de contacto del reaccionante (Ca) con el metal

Conclusiones parciales

1.-Las propiedades mecánicas del hierro nodular permiten realizar satisfactoriamente la sustitución de piezas de acero fundido por este tipo de material siempre y cuando las mismas no estén sometidas a tensiones superiores a los 500 MPa de tracción y esfuerzos de impacto no superiores a 4 J /cm<sup>2</sup>.

2.- La producción de hierro con grafito esferoidal, ha crecido a nivel mundial y su tendencia sigue al crecimiento. Su aplicación fundamental es para tuberías y como sustituto de piezas fundidas de aceros al carbono y de hierro fundido. No existe un método de obtención que pueda calificarse como superior a los otros, cada fabricante adopta uno en dependencia de sus particularidades y condiciones para la fabricación.

3.- La experiencia existente en nuestro país en la producción de hierro con grafito esferoidal es escasa. Las dificultades materiales para la aplicación de su producción, provocaron la no existencia de un método y procedimiento científicamente fundamentado para la ejecución de una tecnología de obtención de hierro con grafito esferoidal, que garantizara la producción estable del mismo

4.-Debido a las ventajas que posee la aplicación del método "In-mold" y bajo las características específicas se entiende que este es el idóneo para su introducción en la industria.



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

5.-El contenido de azufre presente en la composición del metal base producido en la Empresa de Fundición de Hierro y Acero, no es el recomendable para la fundición de hierro con grafito esferoidal por el método “In-mold”.

6.-Realizando un análisis de los resultados expuestos en la tabla 1.1 y el planteamiento realizado por Hugnes y Manniòn, podemos tomar como recomendación para nuestra investigación una granulometría que se encuentre en un intervalo entre 0.63 y 3mm.

7.-El parámetro de la cámara debe encontrarse en los valores entre 0.6 y 0.7

8.-La presencia azufre remanente en la aleación ya modificada provoca la disminución de las propiedades mecánicas, aun existiendo una estructura, por ciento de nodulización y concentración de nódulos por campo.

9.-Los aspectos estudiados nos indican que existen razones para suponer que debe existir una interrelación, entre el contenido de azufre, elemento altamente tensoactivo y la formación de inclusiones como una nueva fase, así como la atracción por el mismo hacia los límites intergranulares de inclusiones ya formadas, por lo tanto” La presencia de azufre en el metal base (siendo este altamente tensoactivo) provoca la atracción de las inclusiones hacia el lugar de su ubicación. Si el mismo se ubica en los límites ínter granulares entonces las inclusiones no metálicas también se alojan en esas zonas debilitando las fuerzas de enlaces entre los granos y por lo tanto afecta los valores de la resistencia a la tracción.”

10.- A la temperatura del tratamiento del hierro fundido el magnesio en equilibrio es un fuerte desulfurante.

11.-La estabilidad de cualquiera de los sulfuros de Ca, Mg, Mn,...etc., aumenta con el incremento de la temperatura y se hacen más espontáneas las reacciones de formación de los mismos por encima de la temperatura de 1487°C. De esta manera, a las temperaturas propias para la producción de hierro no son de esperar altos valores de rendimiento en el proceso de desulfuración.



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

12.-Es necesario utilizar un método de desulfuración que facilite mayor rendimiento en el proceso, estimulado por la cinética de las reacciones.

13.-Dentro de los métodos de desulfuración analizados, el de Volianik permite el uso de variantes bajo las condiciones propias de nuestras empresas, para adecuarlo a las condiciones propias de nuestra industria se pueden señalar algunas desventajas que hacen bastante difícil la introducción del mismo estas son: Alto costo del carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), necesidad de mucho tiempo de soplado por falta de presión en el gas (en el caso de aplicarlo a nuestra industria, es necesario hacer el soplado directamente desde un balón de argón, el cual no garantiza la presión suficiente como para el mezclado intensivo del metal y por lo tanto nos vemos obligado a soplar durante más tiempo ) esto provoca una caída brusca de la temperatura y alta complejidad del dispositivo para el soplado.

## **CAPÍTULO 2: ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES MACÁNICAS DEL HIERRO CON GRAFITO ESFEROIDAL OBTENIDO POR EL MÉTODO DE VERTIDO VIBRATORIO.**

### 2.1 Reseña histórica del diagrama Hierro - Carbono. /4, 7/

El diagrama Hierro – Carbono es una representación gráfica de las fases y estructuras en equilibrio de las aleaciones de hierro y carbono, es decir de los aceros y de las fundiciones. En los comienzos del estudio del diagrama Hierro – Carbono sirvió la obra de D. K. Chernov publicada en 1868, ese fue el año en que se consideró el nacimiento de la metalografía como ciencia. En este trabajo indicó Chernov por primera vez que en el acero existe puntos críticos y que su posición depende del contenido de carbono; él fue el que dio la idea acerca del diagrama Hierro – Carbono. Más tarde Chernov representó gráficamente la idea antes expuesta, reproduciendo la configuración de las líneas más importantes del diagrama Hierro – Carbono. D.K. Chernov determina la posición de los puntos críticos a ojo, por los colores incandescencia del acero. El investigador francés F. Osmond utilizó el pirómetro de Le Chatelier, determinó la posición de los puntos críticos, describió el carácter de las variaciones micro estructurales que ocurren al pasar los puntos críticos y dio nombre a algunas de las fases y estructuras principales de las aleaciones Hierro – Carbono. La formación de las soluciones sólidas por calentamiento fue establecidas por W. Roberts – Austen de Inglaterra y demostrada por medio del análisis metalográfico directo de Le Chatelier A. A. Baikov y N.T. Gudtsov de Rusia.

Aplicando estos datos y la teoría de los equilibrios de fases elaborado por D. Gibbs de Canadá, el científico holandés Roozeboom y Roberts – Austen presentaron la primera variante del diagrama hierro – carbono. El carácter incompleto de los datos con que disponían no les permitió constituir un diagrama suficientemente completo, capaz de responder al equilibrio de fases real. Solo a

Al finales del siglo XX el científico alemán P. Herens aprovechó la experiencia de sus antecesores y los nuevos datos facilitados por los análisis micro estructural y térmico de las aleaciones, y construyó un diagrama muy parecido al actual. No es probable que sean introducidos cambios que puedan transformar el diagrama, pero si cambios cuantitativos ligados a la posición de las líneas de equilibrio así como debidos a la utilización de aleaciones cada vez más puras y métodos de investigación cada vez más exactos, se efectúan continuamente.

### Diagrama Fe - C

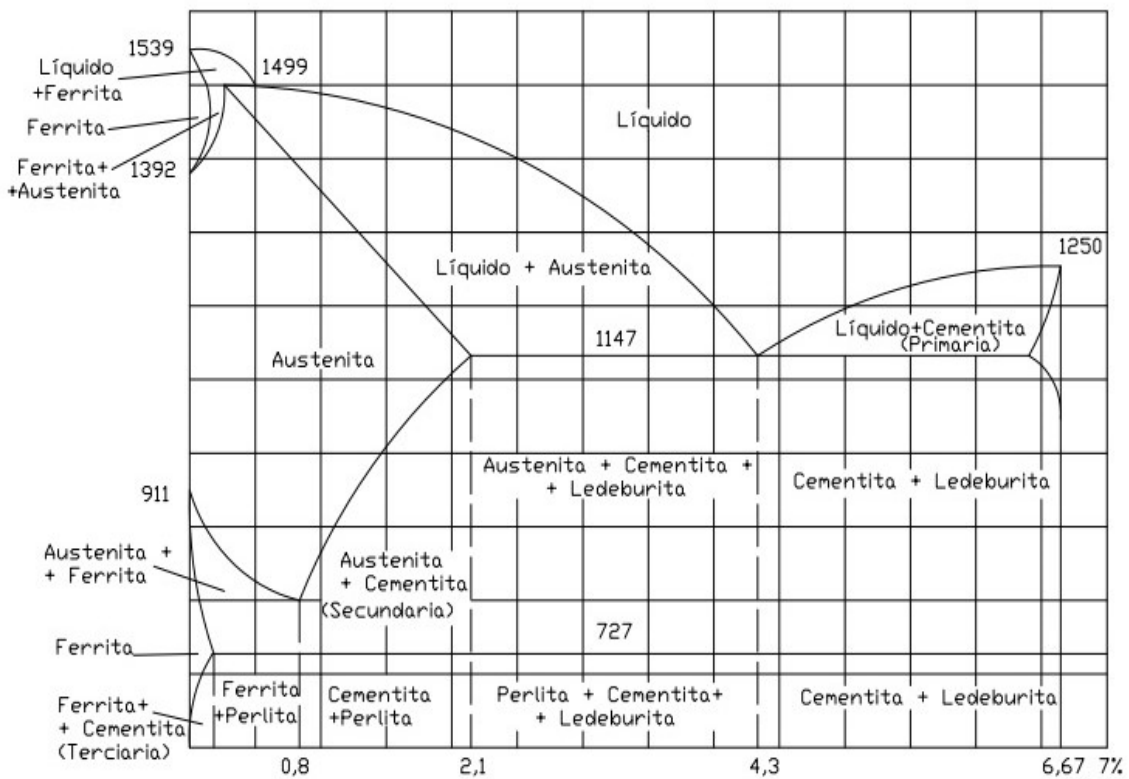


Fig.2.1 Diagrama Hierro – Carbono. /4/

Como habiamos mencionado este diagrama se obtiene experimentalmente a travez de curvas de enfriamientos y para familiarizarnos con ello debemos

conocer como se comporta el carbono y el hierro puro así como ligado con el carbono en distintos porcentajes.

## 2.2 Alotropía del hierro y carbono/4; 7/

### 2.2.1 Alotropía del hierro

Alotropía (del griego: allos, otro, y tropos, manera) en química es la propiedad que poseen determinados elementos químicos de presentarse bajo estructuras químicas diferentes, como el oxígeno, que puede presentarse como oxígeno atmosférico ( $O_2$ ) y como ozono ( $O_3$ ), o con características físicas distintas, como el fósforo, que se presenta como fósforo rojo y fósforo blanco ( $P_4$ ), o el carbono, que lo hace como grafito, diamante, grafeno y fullereno. Para que a un elemento se le pueda denominar como alótropo, sus diferentes estructuras moleculares deben presentarse en el mismo estado físico.

Las propiedades alotrópicas se presentan en elementos que tienen una misma composición, pero aspectos diferentes; por lo tanto, la propiedad debe observarse en el mismo estado de agregación de la materia y es característico del estado sólido.

La existencia de un mismo metal en varias formas cristalinas recibe el nombre de polimorfismo o alotropía. Las distintas formas cristalinas de una misma sustancia se llaman polimorfos o modificaciones alotrópicas en la tabla 9 página 59 formas alotrópicas de los metales. Se da el intervalo de temperaturas en que existen diversas formas alotrópicas de diversos metales.

Las formas alotrópicas se designan con las letras griegas  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  ext., las cuales se añaden como subíndices al símbolo del elemento. La transformación de una forma alotrópica en otra por calentamiento del metal va acompañada de absorción de calor y se efectúa a temperatura constante. Al enfriarse se produce el

desprendimiento del calor latente de transformación, así el hierro tiene dos temperaturas de transformación polimorfas:  $911^{\circ}\text{C}$  -  $1392^{\circ}\text{C}$ . A temperatura inferior a  $911^{\circ}\text{C}$  existe el hierro  $\alpha$ , a los  $911^{\circ}\text{C}$  la red centrada en el cuerpo (c.c.c) del hierro  $\alpha$  se transforma en red centrada en las caras (c.c) de hierro  $\gamma$ , la cual a  $1392^{\circ}\text{C}$  vuelve a convertirse en la red centrada en el cuerpo. De este modo, en el hierro una misma red (la cubica centrada en el cuerpo) es estable en dos intervalos de temperatura a bajas temperaturas hasta  $911^{\circ}\text{C}$  y superior a  $1392^{\circ}\text{C}$  hasta fundirse. La transformación gamma en alfa va acompañada de una disminución del número de coordinación de la red cristalina y la compactibilidad. Si esta disminución no fuera compensada en grado considerable por la disminución del radio atómico durante la transformación gamma en alfa el volumen del hierro debería aumentar 9 %. En realidad el volumen del hierro solo aumenta en 1%. Conviene indicar que las tensiones estructurales provocadas por este insignificante aumento de volumen, tiene gran importancia.

A  $768^{\circ}\text{C}$  se produce una detención en la curva de enfriamiento, esta detención no se debe a una reestructuración de la red, sino a una variación de las propiedades magnéticas por encima de esta temperatura el hierro es no magnético y por debajo es ferromagnético.

### 2.2.2 Alotropía del carbono

El carbono es un elemento químico de número atómico 6 y símbolo C. Es sólido a temperatura ambiente. Dependiendo de las condiciones de formación, puede encontrarse en la naturaleza en distintas formas alotrópicas, carbono amorfo y cristalino en forma de grafito o diamante. Es el pilar básico de la química orgánica; se conocen cerca de 16.000 000 de compuestos de carbono, aumentando este número en unos 500.000 compuestos por año, y forma parte de todos los seres vivos conocidos. Forma el 0,2 % de la corteza terrestre. El carbono es un elemento notable por varias razones. Sus formas alotrópicas incluyen,

sorprendentemente, una de las sustancias más blandas (el grafito) y la más dura (el diamante) y, desde el punto de vista económico, uno de los materiales más baratos (carbón) y uno de los más caros (diamante). Más aún, presenta una gran afinidad para enlazarse químicamente con otros átomos pequeños, incluyendo otros átomos de carbono con los que puede formar largas cadenas, y su pequeño radio atómico le permite formar enlaces múltiples. Así, con el oxígeno forma el dióxido de carbono (IV), vital para el crecimiento de las plantas con el hidrógeno forma numerosos compuestos denominados genéricamente hidrocarburos, esenciales para la industria y el transporte en la forma de combustibles fósiles; y combinado con oxígeno e hidrógeno forma gran variedad de compuestos como, por ejemplo, los ácidos grasos, esenciales para la vida, y los ésteres que dan sabor a las frutas; además es vector, a través del ciclo carbono-nitrógeno, de parte de la energía producida por el Sol.

### 2.3 Fases y estructuras de diagrama Fe-C aceros y fundiciones./4; 7/

Caracterización de las fases y estructuras encontradas en el diagrama Hierro-Carbono. El hierro y el carbono se ligan en distintas formas y cantidades en el diagrama formando así soluciones sólidas, mezclas mecánicas, y compuestos químicos.

#### Cementita

Es un compuesto químico que aparece en fundiciones de aceros y otras aleaciones férreas como las fundiciones blancas, que se forma cuando el enfriamiento de la aleación se realiza según el diagrama meta estable F-Fe<sub>3</sub>C en vez de seguir el diagrama estable hierro-grafito. La cementita que disuelve un 6,67% de carbono, es un compuesto químico intermetálico de inserción. La composición química de la cementita es Fe<sub>3</sub>C, y la estructura cristalina es del tipo



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

ortorrómbica con 12 átomos de hierro y 4 átomos de carbono por celda. La cementita es muy dura, de hecho es el constituyente más duro de los aceros al carbono, con una dureza de 800HB. La cementita destaca por ser un constituyente frágil, con alargamiento nulo y muy poca resiliencia. Su temperatura de descomposición es de 1250°C. Como la cementita es muy dura y frágil no es posible utilizarla para operaciones de laminado o forja debido a su dificultad para ajustarse a las concentraciones de esfuerzos. Este compuesto químico se llama también carburo de hierro, y es muy resistente al rozamiento en las fundiciones atruchadas. A bajas temperaturas es ferromagnético y pierde esta propiedad a 217°C (punto de Curie), es termodinámicamente estable a temperaturas inferiores a 1200°C. Se puede presentar en forma reticular, laminar y globular.

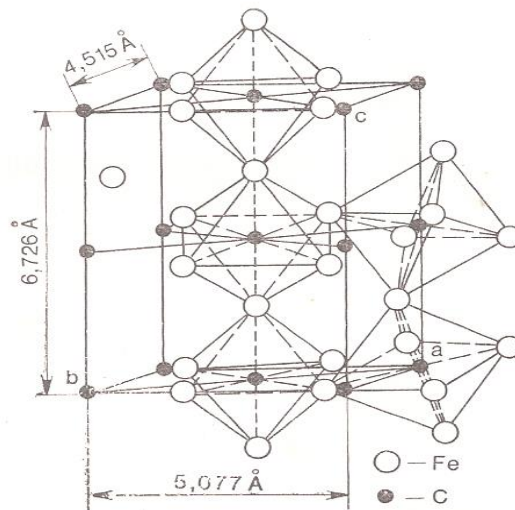


Fig. 2.2 Estructura de la cementita/21/

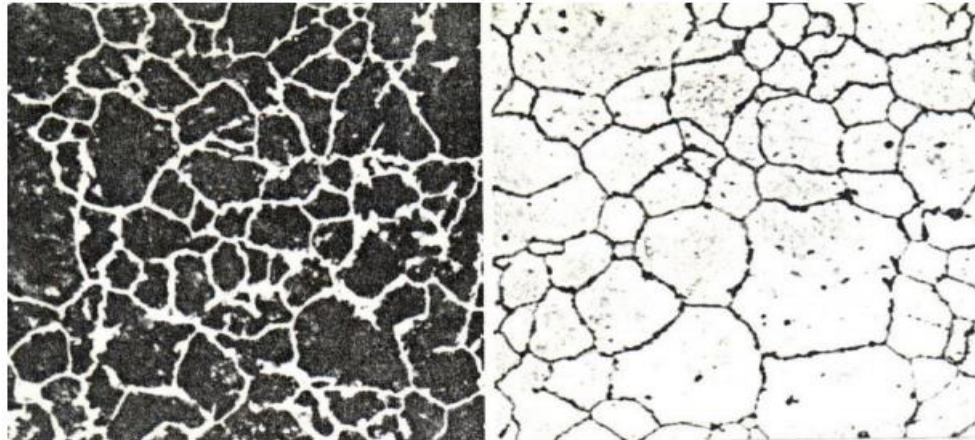


Fig.2.3 Observación de cementita pro-eutectoide con diferentes reactivos/8/

### Grafito

En el grafito los átomos de carbono presentan hibridación, esto significa que forma tres enlaces covalentes en el mismo plano a un ángulo de  $120^\circ$  (estructura hexagonal) y que un orbital  $\Pi$  perpendicular a ese plano quede libre (estos orbitales deslocalizados son fundamentales para definir el comportamiento eléctrico del grafito). El enlace covalente entre los átomos de una capa es extremadamente fuerte, sin embargo las uniones entre las diferentes capas se realizan por fuerzas de Van der Waals e interacciones entre los orbitales  $\Pi$ , que son mucho más débiles. Se podría decir que el grafito son varias capas de grafeno montadas. Esta estructura laminar hace que el grafito sea un material marcadamente anisótropo. La estructura cristalina del grafito es laminar. La distancia que hay entre los átomos de carbono que se encuentran en un plano es de  $1.54 \text{ \AA}$  y la distancia entre los granos igual  $3.40 \text{ \AA}$ , de los cuatro electrones de valencia del átomo de carbono, solamente uno pasa a tomar parte del gas electrónico, lo que condiciona ciertas propiedades mecánicas como la resistencia y la plasticidad, aunque débiles, del grafito.

El grafito se puede formar a partir del líquido o de la austenita proceso que transcurre lentamente, ya que el trabajo de formación del germen de grafito es grande y requiere una considerable difusión de los átomos de C para la formación de cristales de grafito y una retirada de los átomos de Fe del frente de cristalización del grafito. Para acelerar el proceso se usan modificadores.

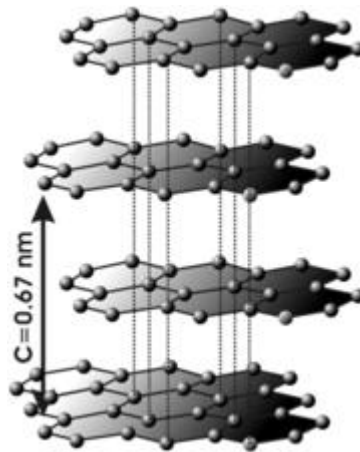


Fig.2.4 Estructura atómica del grafito/21/

### Austenita

La austenita es una solución sólida que disuelve una determinada cantidad de carbono en el hierro gamma. Ésta es la forma estable del hierro a una temperatura superior de 723°C. La austenita no es estable a temperatura ambiente excepto en aceros fuertemente aleados como algunos inoxidables. Está formado por una disolución sólida del carbono de hierro gamma, puede disolver hasta 2.14 % de carbono. Es dúctil, blanda y tenaz, es la forma de la red es cúbica centrada en las caras (FCC) con los siguientes parámetros de red,  $a=3,56 \text{ \AA}$  y en el centro hay un poro de  $d=1,02 \text{ \AA}$ . El diámetro del átomo de carbono en estado libre es igual a  $1.54 \text{ \AA}$ . En este poro puede alojarse un átomo de carbono,

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

provocando cierto aumento en la dimensión de la red del hierro gamma. La estructura cristalina de la austenita podemos figurárnosla como una red c.c.c, compuesta por átomos de hierro en la cual se han insertado átomos de carbono de menor tamaño. Pero como el átomo de carbono es mayor que las dimensiones de los poros, cuando este cae en la red del hierro, la última se deforma y los demás poros se hacen inaccesibles para los átomos de carbono. Esta estructura permite una mejor difusión con el carbono, acelerando así el proceso de carburación del acero. La solubilidad máxima es sólo del 2.14%C. Hay que recordar que por definición los aceros contienen menos de 2.14% de carbono y pueden tener disuelto el carbono completamente a altas temperaturas. La austenita es blanda y dúctil y, en general, la mayoría de las operaciones de forja y laminado de aceros se efectúa a aproximadamente los 1000°C, cuando la fase austenítica es estable. Finalmente, la austenita no es ferromagnética a ninguna temperatura, es el constituyente más denso de los aceros.

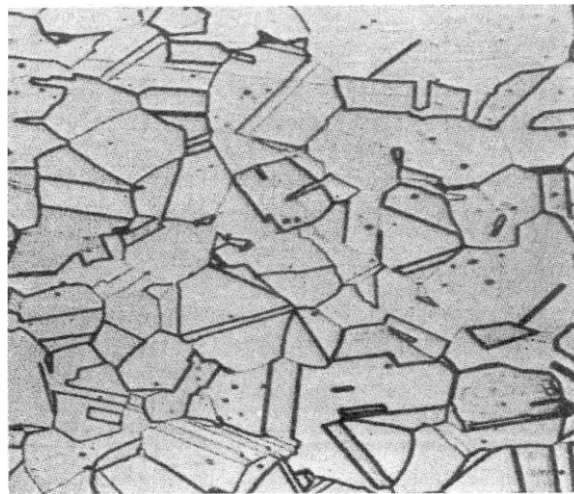


Fig.2.5 Estructura de la austenita/21/

## Ferrita

Este constituyente es una solución sólida de inserción de carbono en hierro alfa. La solubilidad del carbono en el hierro alfa es insignificante (menor de 0,02%) En la red cubica centrada en las caras (c.c.c.) hay 12 puestos libres en los puntos medios de las aristas. El diámetro de uno de estos puestos libres, llamados poros de la red cristalina, es de 0,62 Å. Este volumen es insuficiente para poder alojar en él un átomo de carbono. De este modo, los razonamientos puramente geométricos sugieren que el hierro alfa no disuelve carbono pero en la realidad es capaz de disolver el carbono en cantidades muy pequeñas y esto se debe a que en la red efectiva del hierro existen defectos, numerosos especialmente en los límites de los granos. El constituyente más blando de los aceros pero es el más tenaz, es maleable, su resistencia de rotura a la tracción es 250MPa, su alargamiento es de un 50% Estricción relativa 85% Limite de fluencia por tracción 120MPa y su dureza es de 80HB. Los granos son equiaxiales. Estos índices pueden variar dentro de ciertos límites, porque en las propiedades del hierro influyen una serie de factores (por ejemplo, el aumento del tamaño de los granos hace que disminuya la dureza). Este constituyente está formado por una solución sólida de inserción de carbono en hierro alfa (figura 2.5). Las ferritas son materiales cerámicos ferromagnéticos (sólo la alfa), compuestos por hierro, boro y bario, estroncio o molibdeno. La ferrita tiene una alta permeabilidad magnética, lo cual les permite almacenar campos magnéticos con más fuerza que el hierro. La ferrita se produce a menudo en forma de polvo, con el cual se pueden fabricar piezas de gran resistencia y dureza, previamente moldeadas por presión y luego calentadas, sin llegar a la temperatura de fusión, dentro de un proceso conocido como sinterización (es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las

partículas). Mediante este procedimiento se fabrican núcleos para transformadores, inductores/bobinas y otros elementos eléctricos o electrónicos.

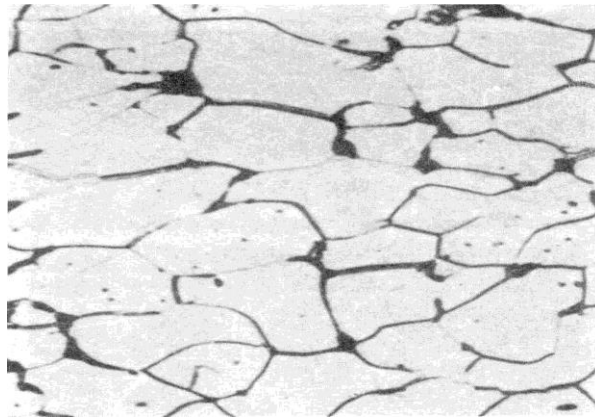


Fig.2.6 Estructura de la ferrita/7/

### Perlita

Se denomina perlita a la microestructura formada por capas o láminas alternas de las dos fases ( $\alpha$  y cementita) durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutectoide. Se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente a pocos aumentos. La perlita aparece en granos denominados "colonias"; dentro de cada colonia las capas están orientadas esencialmente en la misma dirección y esta dirección varía de una colonia a otra. Las capas delgadas claras son de ferrita, y la cementita aparece como capas delgadas más oscuras. La mayoría de las capas de cementita son tan delgadas que los límites de fases adyacentes no se distinguen. Está formada por una mezcla mecánica eutectoide de dos fases, ferrita y cementita, se produce a 727°C cuando la composición es de 0,8 % de carbono, su dureza es de 250 HB. Su estructura está constituida por láminas alternadas de ferrita y cementita, siendo el espesor de las láminas de ferrita superior al de las de cementita, estas últimas quedan en relieve después del ataque con ácido nítrico, lo cual hace que

en la observación microscópica se revelen por las sombras que proyectan sobre las láminas de ferrita. La perlita es más dura y resistente que la ferrita, pero más blanda y maleable que la cementita. Se presenta en forma laminar (figura 2.6), reticular y globular.

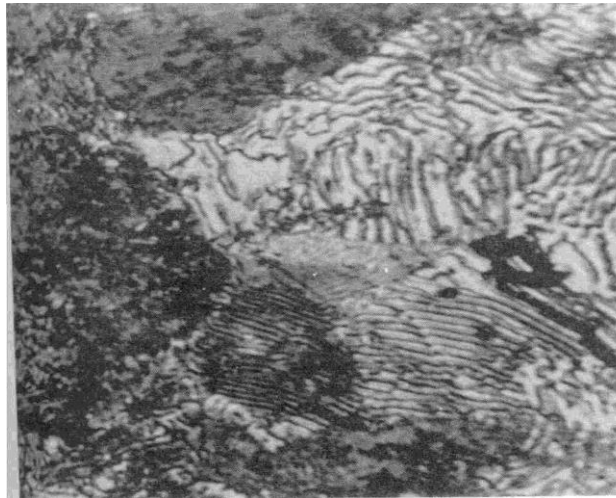


Fig.2.7 Estructura de la perlita laminar/7/

### Bainita

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250-500°C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la Bainita superior de aspecto arborescente formada a 500 - 580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos y la Bainita inferior, formada a 250 - 400°C tiene un aspecto similar a la martensita y está constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. La bainita tiene una dureza que va de 40 a 60 HRC.

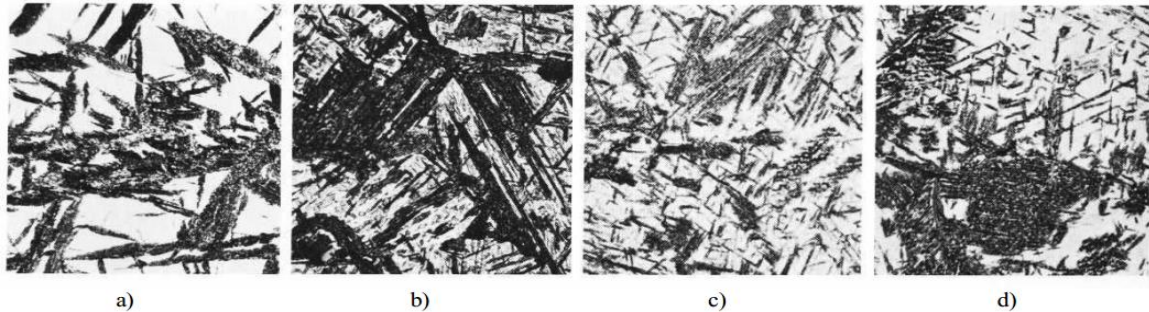


Fig. 2.8a) Bainita inferior (oscuro) en una matriz de martensita (claro).

b) Bainita superior (oscuras) en una matriz de martensita (claro).

c) y d) Se observan agujas oscuras de bainita inferior en matriz de martensita  
aumento a x500./21/

## Martensita

Se llama martensita en honor al metalúrgico alemán Adolf Martens (1850-1914). La estructura de la martensita tiene la apariencia de láminas o de agujas (variantes). La fase blanca es austenita que no se transforma durante el temple rápido. La martensita también puede coexistir con otros constituyentes, como la perlita. El enfriamiento rápido (o temple) del acero austenizado, hasta temperatura próxima a la ambiental, origina otro micro constituyente denominado martensita, que resulta como una estructura de no equilibrio de la transformación sin difusión de la austenita. Se puede considerar un producto de transformación competitivo con la perlita o la bainita. La transformación martensítica tiene lugar a velocidades de temple muy rápidas que dificultan la difusión del carbono, y otra oscura, el fondo gris es austenita retenida. Presenta una red tetragonal, sus características mecánicas son resistencia a la tracción entre 1700-2500MPa, dureza HRC entre 50-60, alargamiento de 0,5 % y es magnética.

## Eutéctica



Al finalizar la cristalización, la aleación con 4.3% C tiene una estructura puramente eutéctica es decir da dos fases sólidas, austenita y cementita, que se llama ledeburita. Cuando esta aleación se enfría desde 1147-727°C de la austenita que forma parte de la eutéctica se desprende cementita, la cual, de ordinario no se descubre estructuralmente ya que se une a la cementita de procedencia eutéctica. Es decir a 727°C la austenita de la eutéctica tiene una concentración de 0.8 %C y a esta temperatura se produce la transformación perlítica.

Por consiguiente a temperatura ambiente, la ledeburita es una mezcla mecánica de cementita y perlita.

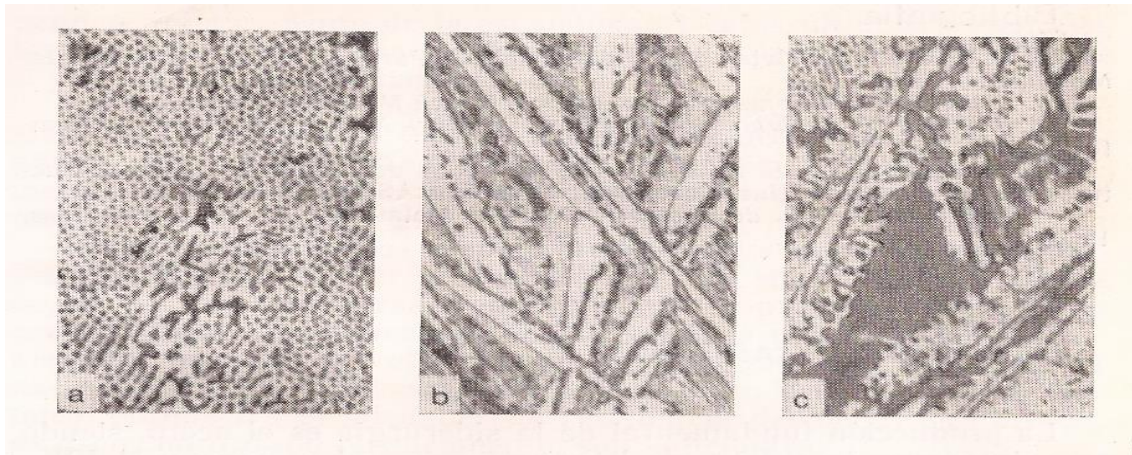


Fig.2.9 a) Eutéctica (ledeburita); b) Hipereutéctica (ledeburita+cementita primaria);  
c) Hipoeutéctica (ledeburita+perlita)/7/

Las mezclas mecánicas son estructuras frágiles debido a su alto contenido de cementita y la presencia de la eutéctica hace que la aleación no sea maleable.

La ledeburita aparece entre los constituyentes de la aleación cuando el contenido en carbono supera el 2% y es la responsable de la mala forjabilidad de la aleación marcando la frontera entre los aceros con menos del 2% de carbono (forjables) y las fundiciones con porcentajes de carbono superiores (no forjables y fabricados por moldeo).

## 2.4 Fundiciones/4; 7/

La estructura de las fundiciones consta de base metálica y grafito, las propiedades de aquella dependerán tanto de la base metálica como la cantidad y el carácter de las inclusiones de grafito. Las fundiciones, en comparación con el acero, tienen propiedades mecánicas bajas, por lo que las inclusiones de grafito pueden considerarse en primera aproximación como huecos o grietas. De aquí se deduce que la fundición describirse como un acero con gran cantidad de huecos y grietas, cuanto mayor sea el volumen ocupado por los huecos menores serán las propiedades de la fundición. Las propiedades mecánicas de la fundición dependerán de la forma, tamaño y distribución de los granos, por tanto cuanto más grafito se halla en una fundición, más bajas serán sus propiedades mecánicas, cuanto más burdas sean las inclusiones de grafito, tanto más romperán la base metálica y peores serán las propiedades de la fundición. Las propiedades más bajas son cuando el grafito forma un esqueleto cerrado. La fundición difiere del acero por su composición (mayor contenido de carbono) y por sus propiedades tecnológicas (mejores cualidades para la fundición, poca deformación plástica). En las condiciones ordinarias no puede forjarse, además de ser la fundición más barata que el acero.

### 2.4.1 Clasificación

La composición típica para obtener una microestructura grafitica es de 2.5 a 4% C y de 1 a 3% de silicio, además de manganeso, fósforo y azufre, el silicio juega un papel importante en diferenciar a la fundición gris de la fundición blanca, esto es debido a que el silicio es un estabilizador de grafito, esto significa que ayuda a precipitar el grafito desde los carburos de hierro, es una aleación ferrosa. En esta fundición hay grafito a diferencia de la blanca, en esta fundición hay que distinguir su base metálica y las inclusiones de grafito.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En dependencia de la forma en que se encuentra el grafito en la fundición, se distinguen:

La fundición blanca, recibe este nombre por el aspecto de su fractura, que tiene un color blanco mate. En esta fundición el carbono se halla en forma de cementita y la grafitización es nula, en esta todo el carbono se halla en estado ligado en forma de carburo. Estas fundiciones son muy duras y frágiles, se trabajan mal con herramientas cortantes, se emplean para ser fundidos de nuevo en acero y se llaman arrabio para la fabricación de acero.

Fundición gris, su nombre es por el aspecto de su fractura, que es de color gris. En esta fundición hay grafito cuya cantidad forma y tamaño varia dentro de unos límites amplios, la fundición gris se marca con las letras C4 y dos números de dos cifras. Las dos primeras cifras indican el valor mínimo del límite de resistencia a la rotura por tracción de la fundición, y las dos segundas, el valor mínimo de su resistencia a la rotura por flexión. Ejemplo: C400, C412-28, C418-36, C432-52.

Fundición gris ordinaria, fundición de alta resistencia y fundición maleable.

Fundición gris ordinaria, en la cual el carbono se encuentra en alto grado en forma libre de grafito laminar. La plasticidad de la fundición dependen de los valores del alargamiento relativo, en % que varía entre 0,2-0,5.

Fundición de alta resistencia: En la cual sus propiedades plásticas (alargamiento) no se garantizan, puede utilizarse solamente para hacer piezas que no sufran cargas dinámicas.

La fundición maleable, se obtiene por recosido de la fundición blanca. En la fundición maleable el carbono o gran parte de esta en estado libre en forma de nódulos irregulares (copos), por lo que diferencia las fundiciones del acero es que en su estructura hay inclusiones de grafito, las fundiciones se derivan por la forma de las inclusiones. Las fundiciones maleables se marcan por dos letras (K4), seguidas de un número que indica la resistencia a la rotura y otro número que indica el alargamiento relativo en %. Ejemplo: K4 30-6, K4 37-12, K4 56-4, K4 60-3. Su composición es de 2.4% de C; 0.8-1.4 de Si; <1% de Mn; ≤0.1% de S; y ≤0.2% de P.

En dependencia de la base metálica las fundiciones se clasifican en: fundición con base ferítica, fundición con base ferítico-perlítica, fundición con base perlítica.

Una característica distintiva del hierro gris es que el carbono se encuentra en general como grafito, adoptando formas irregulares descritas como “hojuelas”. Otro factor importante que ayuda a la formación de grafito es la velocidad de solidificación de la colada, una velocidad lenta tenderá a producir más grafito y una matriz ferrítica, una velocidad moderada tenderá a producir una mayor matriz perlítica, para lograr una matriz 100% ferrítica, se debe someter la fundición a un tratamiento térmico de recocido.

El silicio influye específicamente en la estructura de la fundición, intensificando la grafitización. El contenido de silicio en las fundiciones oscila dentro de amplios límites: desde 0.3-0.5 hasta 3-5 %. Variando el contenido de silicio pueden obtenerse fundiciones completamente por sus propiedades y estructura, desde blanca pobre en silicio hasta ferrita de alto

contenido de silicio (gris con grafito laminar o de alta resistencia con grafito esferoidal )

El Magnesio, a diferencia del silicio dificulta la grafitización, o como suele decirse, favorece la formación de fundiciones blancas.

El azufre también favorece también favorece la formación de fundición blanca, pero al mismo tiempo empeora las cualidades de fundición y colada (en particular hace que disminuya la fluidez del líquido), por esto el contenido de azufre en la fundición se limita: el límite superior, es para las piezas pequeñas de un 0.08% de carbono, para las más grandes, en que se pueden tolerar una fluidez del líquido algo menor, hasta un 0.1-0.12% de S.

El fósforo no influye prácticamente en el proceso de grafitización, sin embargo es un componente de adición útil en la fundición, ya que favorece la fluidez. Esto se explica por la formación de eutéctica ternaria, que funde a 950°C. En el instante de la solidificación, la eutéctica está formada por austenita, fósforo enriquecido, cementita y fósforo de hierro.

Las partes duras de la eutéctica fosfórica elevan la dureza general haciendo la estructura frágil, cargada de tensiones internas y la resistencia al desgaste de la fundición.

La solubilidad en el Fe alfa llega al 1.2%. La presencia de fósforo en cantidades mayores que esta ocasiona la formación de fosfuro de Fe<sub>3</sub>P, fase que se observen en las fundiciones.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Al disolverse en la ferrita el fósforo eleva bruscamente la temperatura de transición al estado frágil, es decir provoca la fragilidad en frío del material. Cuando la carga es variable, esta estructura favorece la formación de grietas de fatiga.

Según su estructura y su base metálica se clasifican en:

**Fundición gris perlítica:** Su estructura está formada por perlita más inclusiones de grafito. Como se sabe la perlita contiene un 0.8% C, esta cantidad de carbono se halla en la base metálica de la fundición perlítica en estado ligado, la cantidad restante se encuentra en estado libre es decir en forma de grafito y su dureza es de 250 HB.

**Fundición gris ferrítica** esta fundición su base metálica es ferrita y el C que hay en la aleación está en forma de grafito, su dureza puede ser hasta 150HB.

**Fundición Ferrito-Perlítica:** Su estructura está formada por ferrita + perlita con inclusiones de grafito, poseen una dureza de hasta 200HB.

### Propiedades

Como la estructura de la fundición consta de base metálica y de grafito, las propiedades de aquellas dependerán tanto de las de la base metálica como de la cantidad y el carácter de las inclusiones de grafito.

La fundición, en comparación con el acero, tiene propiedades mecánicas bajas. Cuanto más grafito haya en la fundición, más bajas serán sus propiedades mecánicas; cuanto más burdas sean las inclusiones de grafito, tanto más romperán la base metálica y peor serán las propiedades de la fundición.

La resistencia a la rotura por tracción, por flexión y por torsión dependen en lo fundamental de la cantidad, forma y tamaño de las inclusiones de grafito; en este caso las propiedades de la fundición difieren mucho de las del acero.

El que estudiaremos; grafito esferoidal en las fundiciones de alta resistencia, que se fabrican adicionando una pequeña cantidad de magnesio o de cerio, el grafito toma forma de esfera, las inclusiones redondas de grafito esferoidal no crean brascas concentradores de tensiones; estas inclusiones no son “grietas” y la fundición con grafito esferoidal tiene una resistencia a la tracción y a la flexión mucho más elevada que la fundición con grafito laminar. La fundición con grafito nodular ocupa un lugar intermedio por su resistencia entre la fundición gris y la de alta resistencia, y la de grafito vermicular lo ocupa entre la fundición gris y la maleable.

Así, pues, la resistencia de la fundición (con respecto a las tensiones normales) está determinada por la estructura del metal básico y por la forma de las inclusiones de grafito.

Tabla 2.1. Propiedades Mecánicas de las Fundiciones grises/7/

Marca de la fundición	Límite de resistencia a la rotura por tracción Kgf/mm <sup>2</sup>	Dureza HB
C4400	-	-
C412-28	12	143-229
C415-32	15	163-229
C418-36	18	170-229
C421-40	21	170-241
C424-44	24	170-241



C428-48	28	170-241
C432-52	32	187-255
C435-56	35	197-269
C438-60	38	207-269

En esta tabla se puede apreciar que la fundición con mejores propiedades es la C438-60, esta fundición se llama de alta calidad y tiene estructura de perlita con pequeñas inclusiones de grafito.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de las fundiciones de alta resistencia/7/

Marca de la fundición	Resiliencia kgf m/cm <sup>2</sup>	Dureza HB
B445-0	-	187-255
B450-1.5	1.5	187-255
B460-2	1.5	197-269
B445-5	2.0	170-207
B440-10	3.0	156-197

Las fundiciones B460-2, B445-5 y B440-10 son fundiciones de alta calidad que se diferencian principalmente por la estructura de la matriz metálica. En la fundición B460-2 esta es perlitica; en la B445-5 es ferrito-perlitica y en la B440-10 es ferritica, a esto se debe que sus resistencias sean diferentes.

Tabla 2.3. Propiedades Mecánicas de las Fundiciones Maleables/7/

Marca de la fundición	Resistencia a la rotura kgf/cm <sup>2</sup>	Alargamiento relativo %	Dureza HB (máxima)
	De corazón negro		





	(ferrítica)		
K430-6	30	6	163
K433-8	33	8	149
K435-10	35	10	149
K437-12	37	12	149
	De corazón blanco (ferrito-perlítica)		
K445-6	45	6	241
K450-4	50	4	241
K456-4	56	4	269
K460-3	60	3	269
K463-2	63	2	269

## 2.5 Tamaño del Grano influencia en las propiedades mecánicas /4; 7; 21/

Tamaño del grano.

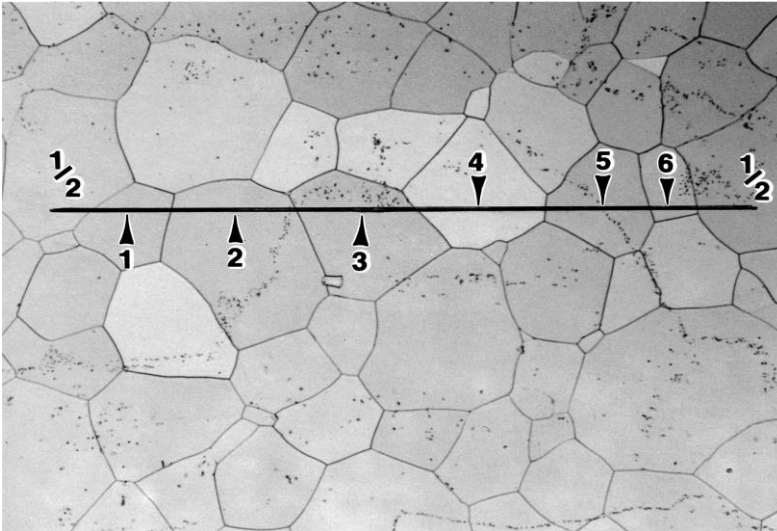


Fig.2.10 Intercepción,  $N$ , vale por una línea recta en una estructura del grano monofásico donde las flechas señalan para 6 intercepciones y dos le aplican delineador a los segmentos terminando dentro de grano ( $2 \times 1/2 = 1 N$ ) y  $N 7/30/$

El tamaño de los granos dependen del número de cristales y la velocidad de crecimiento, cuando la velocidad de crecimiento es grande y el número de cristales es pequeño, se forman cristales grandes y poco numerosos, cuando los valores de velocidad de crecimiento son pequeños y los del número de cristales es grande (gran subenfriamiento), se forma un gran número de cristales pequeños. El cristal crece más en la dirección en la que se extrae el calor

Es importante conocer el mecanismo de crecimiento del grano, ya que de su tamaño dependen muchas propiedades y conociendo el mecanismo se pueden regular su dimensión. En este mecanismo de crecimiento se pueden apreciar tres tipos:

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

1-El embrionario, que consiste en que después de la recristalización primaria (es donde durante la cual los granos alargados a consecuencia de la deformación plástica se transforman en granos pequeños de forma redondeada orientados irregularmente), aparecen otra vez centros embrionarios de cristales nuevos y su crecimiento ase que se formen nuevos granos, pero su número es menor que el de granos en el estado inicial y por esto, cuando termina el proceso, aquellos son, por término medio, más grandes.

2-El migratorio, consiste en la traslación de los límites del grano y el aumento de sus dimensiones. Como el grano grande es termodinámicamente más estable que el pequeño (porque la relación  $S/V$  es más pequeña para él, siendo  $S$  la superficie y  $V$  el volumen), los granos grandes crecen acosta de “comerse al más pequeño”.  
Completa

3-El de fusión, en el cual los límites de los granos van “desapareciendo” poco a poco y muchos granos pequeños se unen formando uno grande.

Las propiedades mecánicas dependen de la relación cuantitativa entre los componentes del tamaño y forma del grano, cuando el tamaño del grano es pequeño, la saturación de defectos es insignificante, a diferencia de cuando el grano es grande, ya que sus propiedades mecánicas son bajas.

#### 2.6 Defectos de la estructura cristalina /4; 7/

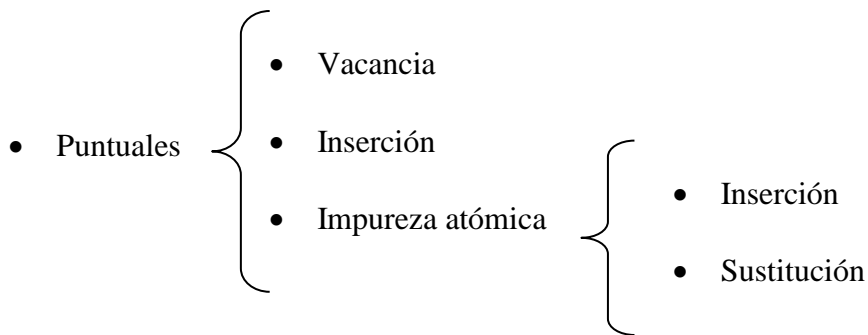
Un defecto cristalino es cualquier perturbación en la periodicidad de la red de un sólido cristalino. El cristal perfecto es un modelo ideal, en el que las diferentes especies (ya sean moléculas, iones u átomos neutros) están colocados de forma periódica y regular, extendiéndose hasta el infinito. En la realidad, cualquier cristal

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

presenta defectos en este modelo ideal, empezando por el hecho de que no hay cristales infinitos.

Son estos defectos cristalinos los que dan las propiedades más interesantes de la materia, como la deformación plástica, la resistencia a la rotura, la conductividad eléctrica, el color y la difusión.

Los defectos en los granos se clasifican en:



- Lineales
- Superficiales
- Volumétricos

Defectos puntuales.

Los defectos puntuales, son aquellos que tienen dimensiones comparables a las de un radio atómico, y son:

- Vacancia: un nudo en una red cristalina libre de átomos.
- Inserción: átomos que no están situados en los nudos de la red cristalina, sino entre ellas.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

- Impureza atómica: son átomos de otras sustancias que pueden ser por sustitución o por inserción.

Sin embargo este proceso no debe verse estáticamente, sino que ocurre de forma dinámica, relacionados entre ellos, por ejemplo al pasar un átomo del estado de equilibrio (nudo) a un espacio interatómico ocurre el par vacancia – inserción, a este defecto se le llama: defecto de *Frenkel*, y si a su vez un átomo de su nudo sale a la superficie del metal se forma el defecto *Shottky*.

Los defectos en los cristales se clasifican según el carácter de sus dimensiones en el espacio en:

- Puntual - (nuldimensional).
- Lineal - (monodimensional).
- Superficial - (bidimensional).
- Volumétrico - (tridimensional).

Los defectos puntuales a temperatura ambiente son relativamente pocos, (1 por cada  $10^{18}$  átomos), pero aumentan mucho con el aumento de la temperatura (hasta 1 por  $10^4$  átomos). También aumentan con el aumento de las deformaciones plásticas.

Los defectos puntuales desempeñan un papel importante en el desarrollo de los procesos de difusión en los metales, sobre todo en los tratamientos termoquímicos, lo que estudiarán posteriormente.

Defectos lineales.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Los defectos lineales se caracterizan porque sus secciones solo varían distancias atómicas y el largo puede ocupar todo el cristal.

Los defectos lineales se llaman dislocaciones, las que pueden ser lineales (de borde) y de espiral.

Las dislocaciones de borde ocurren por la aparición de un plano adicional originando por el borde 3–3 (ver retro y figura #8 del libro), como se observa en la figura #9 las dislocaciones pueden trasladarse o, mejor dicho, transmitirse a lo largo del plano de deslizamiento.

Las propiedades mecánicas de los metales, dependen de la densidad y de su facilidad para transmitirse.

Muchas veces ocurre una dislocación mixta donde se unen las dos anteriores.

Defectos superficiales.

Los defectos superficiales son aquellos que en la red cristalina que se extiende en dos direcciones y en tercera solo se extiende por variar distancias atómicas, entre estos defecto tenemos los defectos de compactación, las maclas, las fronteras de los granos y la superficie exterior del cristal.

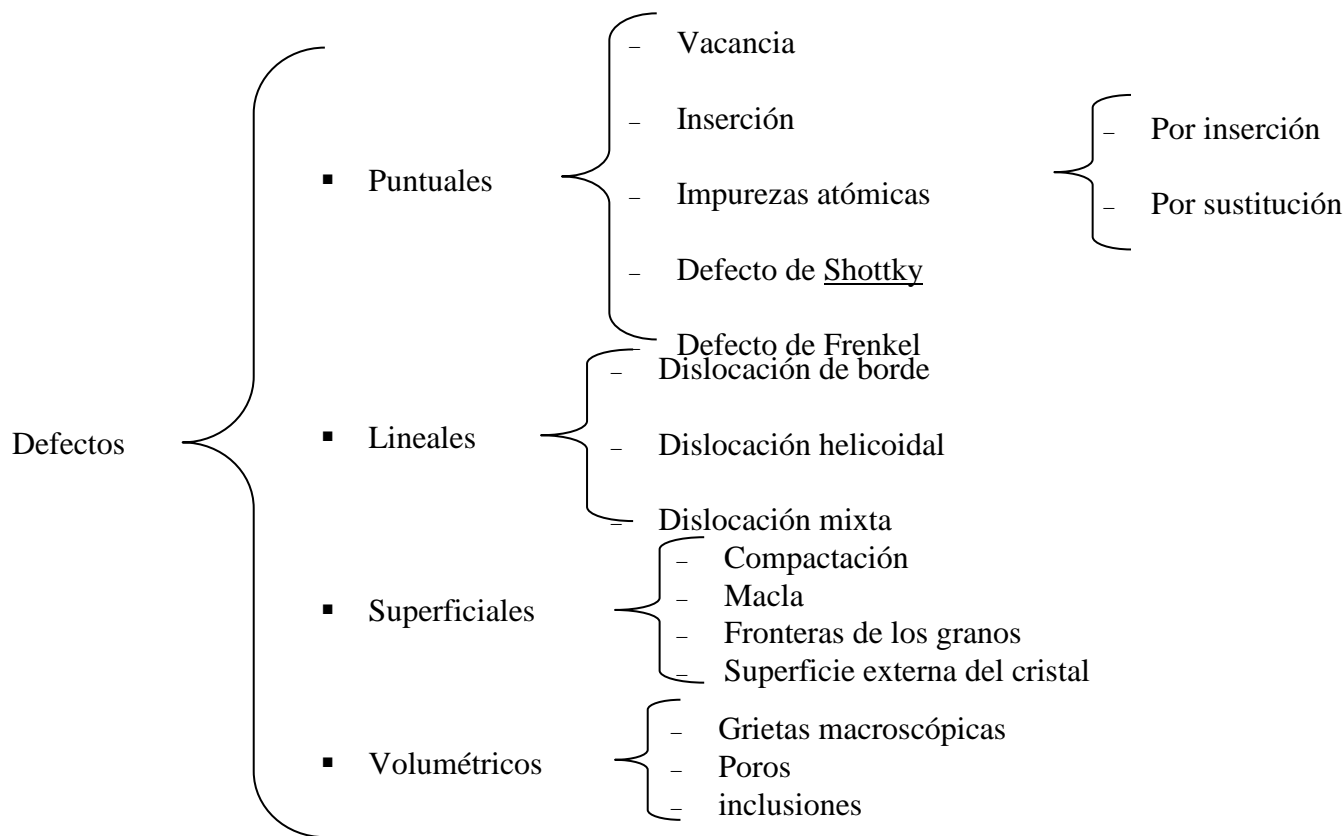
Como defecto de compactación encontramos las variaciones locales de la distribución de los planos compactos en los cristales.

Otros defectos superficiales es el maclado, o sea la reorientación simétrica de regiones de la red cristalina. La red dentro del maclado es un reflejo de la red en

el resto del cristal, frecuentemente el maclado ocurre en aquellos casos cuando la deformación por deslizamiento, o sea a través de las dislocaciones se dificulta.

Defectos volumétricos.

Los defectos volumétricos son aquellos que tienen dimensiones en las tres direcciones, son las grietas macroscópicas, poros, etc



Por la importancia de la morfología de la estructura se realizan las mediciones micro estructurales cuantitativas más comunes es aquella del tamaño de grano de metales y aleaciones. Numerosos procedimientos han sido desarrollados para estimar el tamaño de grano, estos procesos están sintetizados en detalle en la norma ASTM E112. Algunos tipos de tamaño de grano son medidos, tamaño de grano de la ferrita y tamaño de grano de la austenita. Cada tipo presenta

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

problemas particulares asociados con la revelación de estos bordes de manera que puede obtenerse un rango exacto. Los principales métodos para la determinación del tamaño de grano recomendados por la ASTM (American Society for Testing and Materials) son:

1. Método de Comparación.
2. Método de Planimétrico.
3. Método de Intersección.

#### 2.7 Análisis morfológico y su relación con las propiedades mecánicas. /4; 7/

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis metalográfico a todas las muestras de fundición obtenidas con diferentes tecnologías en vertido estático y dinámico. En cada caso se varía la frecuencia de vibración medida en Hz, masa de aleación nodulizante medida en gramos, temperatura de vertido se mantiene constante, medida en °C. En cada uno de estos casos luego de un análisis metalográfico con y sin ataque químico de las probetas, realizado con el microscopio Óptico-Metalográfico marca “Carl Zeiss”. Modelo: Neophot 30, lentes Plano cromáticos HD (3.2x / 0.60 ∞ / -A; 12.5x / 0.25 ∞ / -A); HD 25x / 0.50 ∞ / 0 – A; (50x / 0.90 ∞ / -A); HD HI 100x / 1.30 ∞ / 0–A; Cámara de vídeo Panasonic color CCTvw – CP 474, se procede a ensayos para determinar sus propiedades mecánicas y así se puede seleccionar las de mejores propiedades mecánicas y la mejor morfología.

Observaciones: Las muestras fueron preparadas y observadas antes de ser atacadas químicamente con aumento de 100x y después de atacar químicamente con aumento de 100x 400x.

Para una mejor apreciación los resultados se colocan en una tabla y debajo de la foto que representa la estructura obtenida se hace el comentario relacionado a la



morfología del producto y el resultado del ensayo mecánico. Como es sabido en relación con las propiedades mecánicas las más relevantes en las fundiciones son su dureza que por ser una fundición con una estructura en estado de suministro se mide en HB valor que depende de la base metálica, resistencia a la rotura que según el sistema internacional de unidades se mide en MPa, y el alargamiento relativo que se mide en %, y que indica la plasticidad del material propiedades que dependen del tipo y forma del grafito.

Cuando se procede al estudio metalográfico con ataque químico se destaca el tipo de estructura, la cantidad de ellas, también la forma de los granos y el grado de dispersión y como se conoce las características de cada una de ellas se aprecia si la distribución es homogénea o no. El estudio que se realiza sin ataque químico revela las inclusiones de grafito, la cantidad en %, forma y tamaño máximo de la inclusión, así como el grado de dispersión.

En la tabla debemos separar por columnas lo de vertido estático y de vertido vibratorio, y en cuanto el vertido vibratorio separarlo por frecuencias que se estudiaron y en las filas se sitúan las demás condiciones y así se procede al análisis.

Como se puede ver en todas las muestras que se estudiaron del vertido estático hay presencia de la estructura de eutéctica fosfórica, cuando se definió esta estructura se afirmó que era una estructura frágil, representaba puntos de concentraciones de tensiones y provocaba la fragilidad en frío, por lo tanto es una estructura indeseada. Así que este tipo de producto es deficiente.

Se excluye de los productos de buenos resultados. Ahora el estudio se realiza solo en los productos obtenidos con vertido vibratorio. Pero en este tipo de vertido se trabaja con varias frecuencias y hay que valorar bien los resultados. Las frecuencias con las cuales trabajan son de 65,70 y 75 Hz.

Se realizara el estudio por partes y comenzaremos con el de 75 Hz.



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

En el caso de frecuencia de 75Hz se realizan vertidos con masa de aleación nodulizante de 189gr, 170gr y 151gr.

Se comienza por 75Hz y 189gr: Se observa sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. Área ocupada por el grafito en la estructura es más de 8 hasta 12%. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60 micrones.

Del estudio con ataque químico se observa en la matriz una microestructura compuesta por ferrita (Constituyente estructural que es hierro  $\alpha$ , el cual disuelve carbono en cantidades insignificantes) en forma de granos más perlita. Área ocupada por la perlita en la estructura es de % de perl. = 20  $\geq$ 45 y las propiedades mecánicas son HB (Kgf/mm<sup>2</sup>)= 183, Rm (MPa)= 552,4, A (%)= 8,4, Ce = 4,3636  
Cuando la masa de aleación nodulizante es de 170gr, se observa sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. Área ocupada por el grafito en la estructura es más de 8 hasta 12%. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60 micrones. Se observaron con ataque químico en la matriz una microestructura compuesta por ferrita en forma de granos más perlita en poca cantidad. Área ocupada por la perlita en la estructura es menos de 2 %. Las propiedades mecánicas son HB (Kgf/mm<sup>2</sup>)= 137, Rm (MPa)= 418,4, A (%) = 12,1, Ce= 4,3605

Cuando la masa de aleación nodulizante es de 151gr: Se observa sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. Área ocupada por el grafito en la estructura es más de 8 hasta 12%. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60 micrones. Del estudio con ataque químico se observa en la matriz una microestructura compuesta por ferrita (Constituyente estructural que es hierro  $\alpha$ , el cual disuelve carbono en cantidades insignificantes) en forma de granos más perlita más eutéctica fosfórica. Área ocupada por la perlita en la estructura es menos de 2%.

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Estructura de la eutéctica fosfórica "Doble y Triple". Área ocupada por las grandes inclusiones de eutéctica de 10 000 hasta 16 000  $\mu\text{K}^2$  la estructura que se observa es ferrita + perlita + eutéctica fosfórica % de perl. =  $\leq 2$  y las propiedades mecánicas son: HB (Kgf/mm<sup>2</sup>)= 131, Rm (MPa) = 397,6, A (%)=12,8, Ce= 4,3536 Como se puede observar la última variante se desestima por presentar eutéctica fosfórica lo que hace bajar sus propiedades mecánicas, también se desestima la primera variante por tener baja plasticidad A (%)=8,4 y la segunda también se desestima por la morfología de los granos de perlita que son deformados y los de grafito la mayoría del máximo tamaño y poco dispersos. Por lo tanto los resultados de esta frecuencia se desestiman.

En el análisis con la frecuencia del vertido de 70Hz y la maza de nodulizante es de 189gr, se obtienen los siguientes resultados, del estudio metalográfico se observa sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. Área ocupada por el grafito en la estructura es mayor o igual que 12%. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60 micrones. Se observaron con ataque químico en la matriz una microestructura compuesta por ferrita en forma de granos más perlita. Área ocupada por la `perlita en la estructura es más de 2 hasta 10 %. Las propiedades mecánicas que se relaciona a esta morfología son: la resistencia a la rotura es de 473MPa, su dureza es de 186HB y alargamiento relativo es de 10.6%.

Como se puede observar los resultados de las propiedades mecánicas son muy buenos y eso se debe a que la forma del grafito es de bordes redondos y su dispersión es homogénea así como el tamaño de él que es bastante parejo, en cuanto a la distribución de la fase ferrita-perlita su dispersión es homogénea y la forma de los granos son regulares en su mayoría.

Del estudio se llega a la conclusión de que los resultados son aceptables.

Cuando el vertido tiene una maza nodulizante de 170gr los resultados del análisis metalográfico son parecidos tanto con y sin ataque químico que en el anterior en

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

cuanto a las cantidades, pero los resultados de las propiedades mecánicas se comportan de la siguiente manera:

La resistencia a la rotura es de 420MPa, la dureza es de 138HB, alargamiento relativo 12.2, se aprecia una mejoría en cuanto a las propiedades plásticas del material a costa de una ligera disminución de la dureza y la resistencia a la rotura del material. Eso se debe a la distribución morfológica de la estructura que es heterogénea.

En el vertido con una maza nodulizante de 151gr: Se observa sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. Área ocupada por el grafito en la estructura es más de 8 hasta 12 %. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60 micrones. Se observaron con ataque químico en la matriz una microestructura compuesta por ferrita en forma de granos más perlita en poca cantidad. Área ocupada por la perlita en la estructura es menos de 2 %, eso se refleja en las propiedades mecánicas de la siguiente manera, el alargamiento relativo 12.8% resistencia a la rotura es de 398.7MPa y su dureza es 131HB.

Como se puede observar los valores oscilan en rangos cercanos permisibles para emplearse en cualquier tipo de pieza, lógicamente los de mayor alargamiento relativo tienen mejores propiedades plásticas que se pueden emplear en piezas que se someten a vibraciones aunque dispone de menor dureza. De estas variables, la de mejor resultado sería con maza nodulizante de 189gr, que tiene menores propiedades de plasticidad pero la distribución y diámetro de los grafitos se ve bastante uniforme así como la fase de perlita y ferrita. Esto se refleja en sus propiedades mecánicas.

Cuando el vertido se realiza a una frecuencia de 65Hz y la maza nodulizante es de 189gr los resultados del análisis metalográfico sin ataque químico, área ocupada por el grafito en la estructura es más de 8 y hasta 12 %, su  $\phi_{max}$  es entre 40-60 y con ataque químico se obtiene ferrita-perlita con un % de perlita  $\geq 2-10$ . Las propiedades mecánicas relacionadas con esta morfología es la siguiente:



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

El alargamiento es de 9.1%, su resistencia a la rotura es 505MPa y la dureza 167HB. Los resultados de las propiedades mecánicas son buenas, pero la morfología en cuanto a la homogeneidad de los granos y el grado de dispersión del mismo no resulta homogénea.

Cuando el análisis es realizado con maza nodulizante de 170gr y con la misma frecuencia de vertido: Sin ataque químico el grafito oscila entre 8-12%, con un  $\phi_{max}$  de 40-60 y con ataque químico se obtiene ferrita-perlita el % de perlita esta entre 2.10. Las propiedades mecánicas de esta son las siguientes: El alargamiento es de un 12.1%, posee una resistencia de 419MPa y 137HB.

Cuando la maza del nodulizante es igual a 151gr con la misma frecuencia de vertido, en los resultados del análisis metalográfico sin ataque químico aparece el grafito con un % de hasta 12, con un  $\phi_{max}$  de 40-60 y con ataque químico surge ferrita-perlita, la perlita aparece hasta 2% y las propiedades mecánicas relacionadas con esta morfología son: Alargamiento 12.2%, con una resistencia de 436.9MPa y con una dureza de 143HB.

Como se puede apreciar la morfología de estos productos se comporta bastante parecida en los tres casos y las propiedades mecánicas oscilan en rangos pequeños, de desestimar algunos de estos valores serían los que tienen menor resistencia a la rotura y dureza, que es la que se vierte con 151gr y 170gr de masa nodulizante, quedándose la otra opción que tiene 189gr de masa nodulizante con bastante buenos resultados, este se podría emplear en diversos tipos de piezas, teniendo valores buenos de plasticidad de dureza y de alta resistencia a la rotura.

Si se comparan estos resultados con los de la tabla (2.2) se puede observar que las propiedades mecánicas de las fundiciones de alta resistencia son parecidas en cuanto a la resistencia y a la tracción, está superado en cuanto a las propiedades de plasticidad en el vertido vibratorio, pero su dureza está ligeramente por debajo. Este valor depende de la base metálica ya que va a tomar la dureza de la



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

cantidad de perlita y ferrita que tenga. Si se compara con los valores de las fundiciones de alta resistencia (tabla 2.2) que son las que tienen mejores propiedades mecánicas, se observa que la resistencia a la rotura por tracción del B440-10 que tiene mayor plasticidad es de 400 MPa, 10% alargamiento relativo, 160 HB y en el vertido vibratorio es 473.6 MPa el alargamiento relativo de 10.6 y 250HB. En los otros casos la plasticidad baja considerablemente desde 0 a 1.5%.

Las muestras que se sometieron a 75Hz no son recomendables, ya que en ellas aparece una estructura de eutéctica fosfórica, que provoca la elevación de su dureza haciendo la estructura frágil, está cargada de tensiones internas, es decir que provoca la fragilidad en frío del material. Cuando la carga es variable, esta estructura favorece la formación de grietas de fatiga.

En las muestras con el vertido estático tampoco se recomiendan porque el índice de desmodificación es muy alto por lo tanto no se recomienda una línea de producción Industrial.

Tabla 2.4 Disminución de nodulizante en la obtención de hierro gris con grafito esferoidal con el uso del método de vertido vibratorio.

NODULAN II (gr)	Vertido Vibratorio (Hz)						Vertido estático (Patrón de comparación)	
	65		70		75		Sin ataque	Con ataque
	Sin ataque	Con ataque	Sin ataque	Con ataque	Sin ataque	Con ataque		
189								
	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 40-60$	ferrita + perlita % de perl. $\geq 2-10$	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 40-60$	ferrita + perlita % de perl. $\geq 2-10$	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 40-60$	ferrita + perlita % de perl. $\geq 55-65$	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 60-100$	ferrita + perlita + eutectica fosforica % de perl. =
	<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 167, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 505,5, <b>A</b> (%) = 9,1, <b>Ce</b> = 4,3505		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )=156, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) =473,6 <b>A</b> (%)=10,6, <b>Ce</b> = 4,3636		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 183, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 552,4, <b>A</b> (%)= 8,4, <b>Ce</b> = 4,3636		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )=123, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 477,3 <b>A</b> (%) = 6,8, Ce= 4,331	
170								
	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 40-60$	ferrita + perlita % de perl. $\geq 2-10$	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 40-60$	ferrita + perlita % de perl. $\geq 2-10$	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max. grf.} = 40-60$	ferrita + perlita % de perl. $\leq 2$	% de grf. $\geq 12$ $L_{max. grf.} = 25-40$	perlita+eutectica fosforica % de perl. =
	<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> ) = 137, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 419,2 <b>A</b> (%) = 12,1, <b>Ce</b> = 4,3474		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )=138, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 420,5 <b>A</b> (%)=12,2, <b>Ce</b> = 4,3574		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 137, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 418,4, <b>A</b> (%) = 12,1, <b>Ce</b> = 4,3605		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 222, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa) = 207,1, <b>A</b> (%) = 2,3, Ce= 4,31	
151								
	% de grf. $\geq 12$ $\Phi_{max.}$	ferrita + perlita % de	% de grf. =8-12	ferrita + perlita % de	% de grf. $\geq 12$	ferrita + perlita + eutectic	% de grf. $\geq 12$ $L_{max. grf.} =$	perlita+eutectica fosforica,



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

	grf.=40-60	perl. = ≤ 2	$\varphi_{\max}$ . grf.=40- 60	perl. = ≤ 2	$\varphi_{\max}$ . grf.=40- 60	a fosforica % de perl. = ≤ 2	80-125	% de perl. =
	<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 143, <b>Rm</b> (MPa) = 436,9, <b>A</b> (%) = 12,2, <b>Ce</b> = 4,3536		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 131, <b>Rm</b> (MPa) = 398,7, <b>A</b> (%) =12,8, <b>Ce</b> = 4,3605		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )= 131, <b>Rm</b> (MPa) = 397,6, <b>A</b> (%)=12,8, <b>Ce</b> = 4,3536		<b>HB</b> (Kgf/mm <sup>2</sup> )=225, <b>Rm</b> (MPa) = 202,9, <b>A</b> (%)= 5,2, <b>Ce</b> = 4,32	



## **CONCLUSIONES**

- Se hizo una amplia búsqueda bibliográfica que sirvió para realizar el estudio de esta investigación y ayudar a seleccionar correctamente la tecnología de mejores resultados.
- Se realizó el estudio metalográfico de las probetas y fueron sometidas a ensayos y se analizó la relación que hay entre la morfología del producto y las propiedades mecánicas.
- Se procesaron los datos donde la muestra que tiene mejores propiedades mecánicas es la que tiene como maza nodulizante 189gr y la de mejor morfología es la de vertido vibratorio de 70Hz.
- Se elaboró el informe final.

## RECOMENDACIONES

Del presente trabajo surgen las siguientes recomendaciones:

- Ampliar el campo de estudio con relación a la morfología de las fundiciones.
- Este trabajo investigativo se pueda utilizar en las prácticas de laboratorio ya que contribuye con la formación del Ingeniero mecánico.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Laird, G, Gundlach Richard and Röhrig Klaus, Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook, ASM International (2000) ISBN 0-87433-224-9
2. R Peter Lewis, Beautiful Railway Bridge of the Silvery Tay: Reinvestigating the Tay Bridge Disaster of 1879, Tempus (2004) ISBN 07524 3160 9
3. R Peter Lewis, Disaster on the Dee: Robert Stephenson's Nemesis of 1847, Tempus (2007) ISBN 0-7524-4266-2
4. Callister, W.D. Materials Science and Engineering. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc, Publishers, 1994.
5. Colectivo de autores: Máquina Herramientas para Metales. Ciudad de La Habana. Editorial 15PSG, 1992.
6. Folleto "Ciencia de los Materiales."
7. Guliaev. A. P: Metalografía Tomo I Y II, Cap.VI Diagrama Hierro - Carbono. Editorial MIR. Moscú 1989.
8. <http://html.rincondelvago.com/metalografia.html> consultado el 25 de marzo del 2015.
9. <http://moodle.uho.edu.cu/> consultado 5 de marzo del 2015.
10. <http://www.ecured.cu> consultado 9 de mayo del 2015.
11. <http://www.google.com/Metalografhy.mht> consultado 14 de febrero del 2015.
12. Introductory Practical Metallography Atlas of. Photomicrographs. Metallurgical Services Laboratories LTD.



---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

13. Larbáburu Arrizabalaga, Nicolás (2004). Máquinas. Prontuario. Técnicas máquinas herramientas. Madrid: Thomson Editores. ISBN 84-283-1968-5.
14. Colasante Luis (2006). L'étude des superficies de l'acierinoxydable austénitique AISI 304 après une déformation plastique et un procédéd'abrasion. Venezuela, Mérida: universidad de Los Andes.
15. Pérez Martínez, Francisco, Gordon Cintra, Jorge. Tecnología del Tratamiento Térmico. Editorial Pueblo y Educación, 1985.
16. Pérez Martínez, Francisco: Tecnología del Tratamiento Térmico.. Editorial Félix Varela, 2000. Editorial MIR. Moscú 1989.
17. Gómez Millán, Simón (2006). Procedimientos de Mecanizado. Madrid: Editorial Paraninfo. ISBN 84-9732-428-5.
18. S. Turla. Metalografía Microscópica. Zuev V Capacitación de Termistas
19. Sandvik Coromant (2006). Guía Técnica de Mecanizado. AB SandvikCoromant 2005.10.
20. Varios autores (1984). Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Salvat Editores S.A. ISBN 84-345-4490-3.
21. Wikipedia



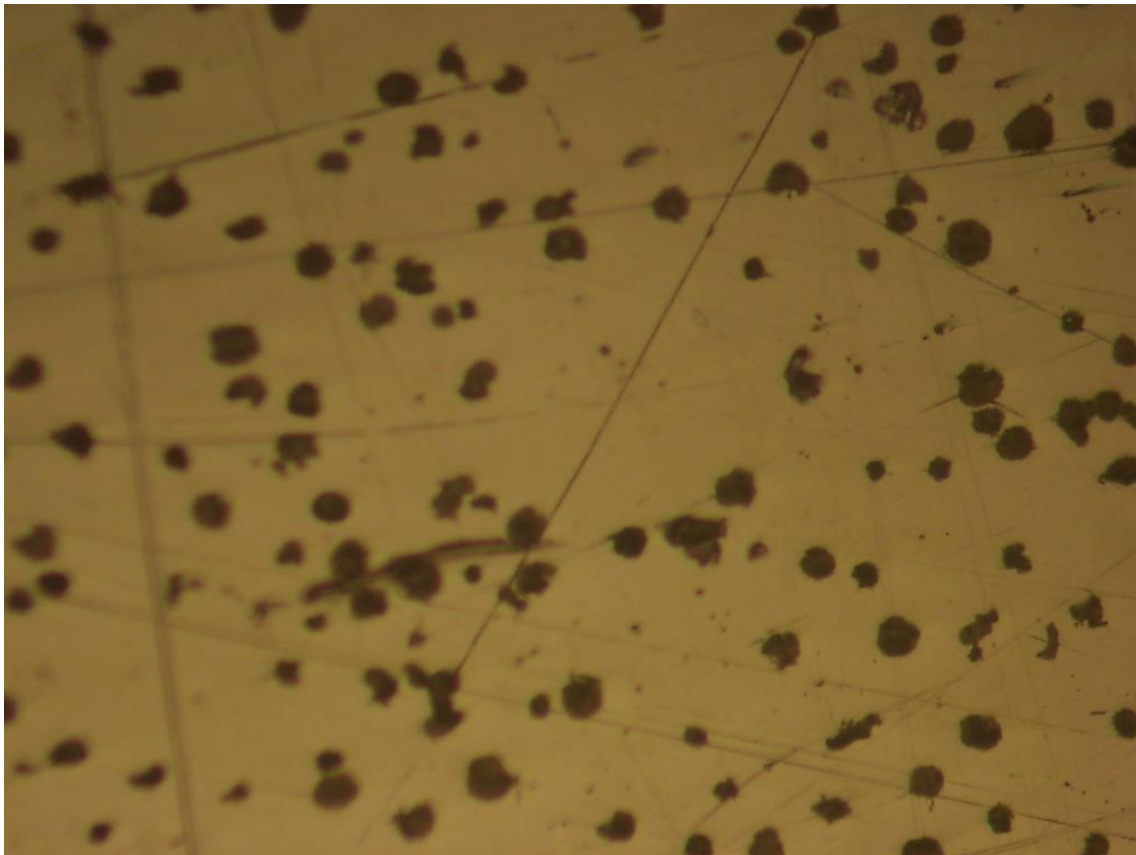
UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

## ANEXOS



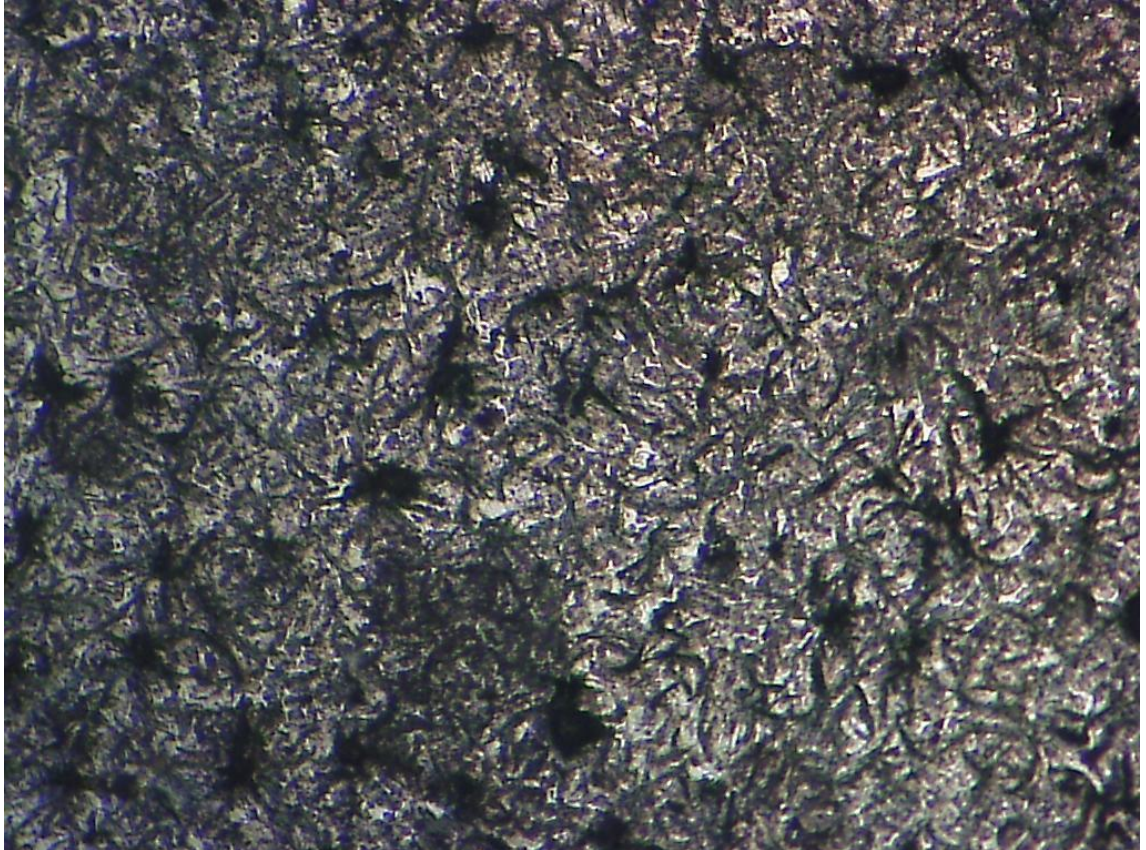
Grafito esférico



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)



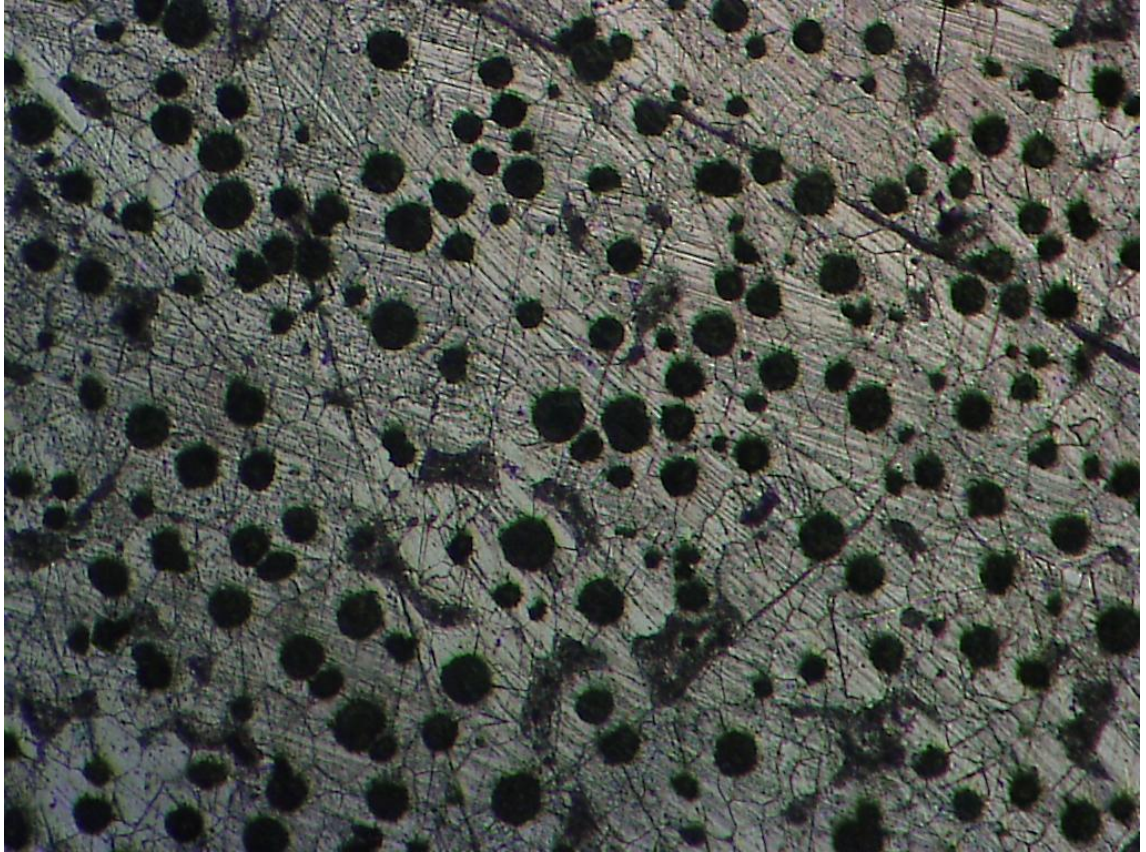
Grafito laminar



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)



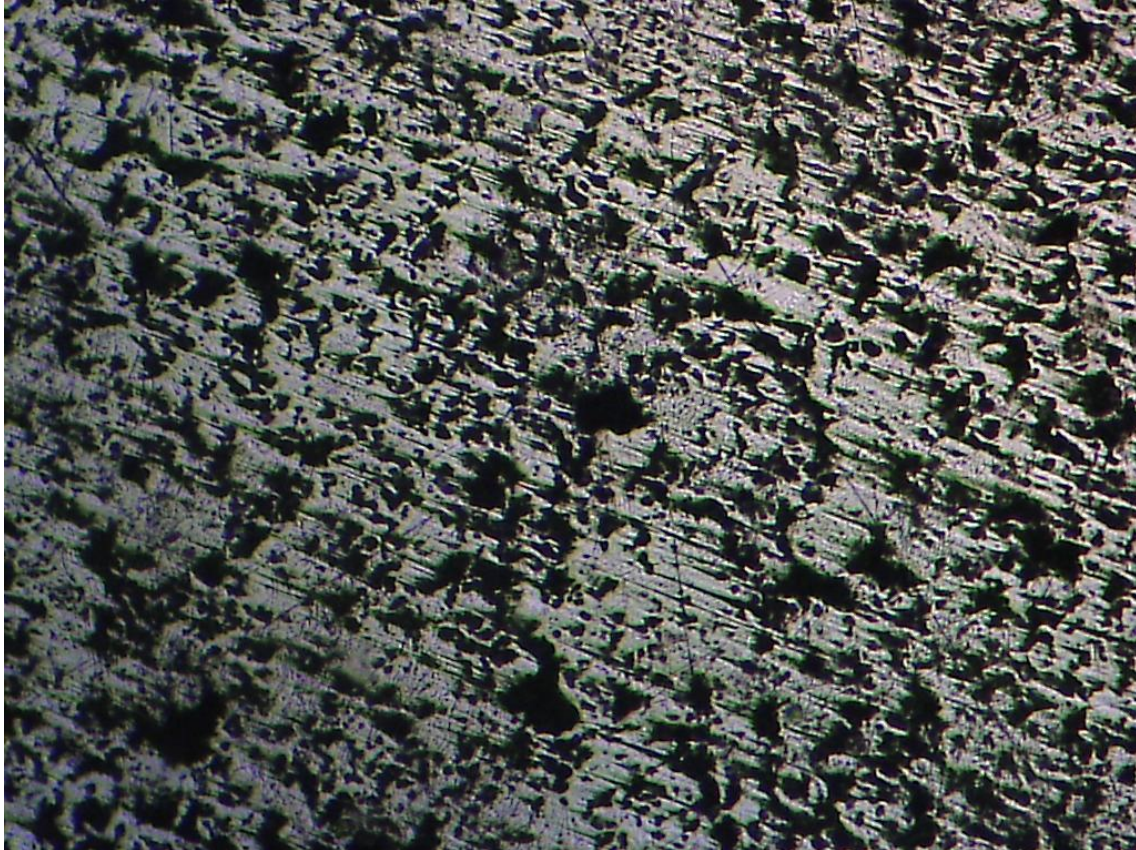
Grafito esférico



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)



Grafito nodular





UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN  
OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)



Vertido de la fundición



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

---

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

### **Simbologías**

Diagrama hierro-carbono- Fe-c

Alfa-  $\alpha$

Beta-  $\beta$

Gamma-  $\gamma$

Grados Celsius-  $^{\circ}\text{C}$

Red centrada en el cuerpo- (c.c.c)

Red centrada en las caras- (c.c)

Carbono- C

Angstrom-  $\text{Å}$

Grafito- graf

Diámetro máximo-  $\varphi_{\text{max}}$

Gramos-gr