



# UNIVERSIDAD DEL SABES

**“TITULO DEL PROYECTO”**  
**PRODUCCIÓN DE HIERRO NODULAR EN CUBILOTE**  
**PARA LA SUSTITUCIÓN DE PIEZAS DE HIERRO GRIS**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.**  
**PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN**  
**INGENIERIA INDUSTRIAL**

**PRESENTA:**  
**LUIS ARMANDO GUTIÉRREZ JAIME**

**ASESOR:**  
**GLORIA ANGELICA HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**

---

# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>III</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	6
1.3 OBJETIVOS .....	10
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	11
<b>2. CAPÍTULO II MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
2.1 MARCO CONCEPTUAL .....	12
2.1.1 Producción. ....	12
2.1.2 Calidad .....	13
2.1.3 Hierro fundido.....	15
2.1.4 Hierro gris.....	15
2.1.5 Hierro nodular.....	16
2.1.6 Cubilote. ....	17
2.2 MARCO TEÓRICO.....	18
2.2.1 Fabricación de hierro nodular.....	20
2.2.1.1. Materiales de caga.....	20
2.2.1.2. Desulfuración de la fundición. ....	23
2.2.1.3. Materiales esferoidizantes.....	24
2.2.1.4. Métodos de esferoidización de la fundición.....	29
2.2.1.5. inoculación de hierro nodular. ....	42
2.2.1.6. Control de la fabricación de hierro nodular.....	48
<b>3. CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>49</b>
3.1 HIPÓTESIS.....	50
<b>4. CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>

---

4.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	54
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
5.1	DISCUSIÓN .....	67
5.2	CONCLUSIONES .....	69
5.3	RECOMENDACIONES.....	70
	<b>ANEXOS Y APÉNDICES .....</b>	<b>72</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>74</b>

---

## RESUMEN

La investigación se basó en dar solución a un problema en JL FUNDICIÓN SAS de CV que es una fábrica de fundición de hierro, fue fundada en 1998 y cuenta con un horno de cuba alto (cubilote) de 900 mm de diámetro interior. La capacidad aproximada calculada de la fábrica es de 85 toneladas al año. Esta empresa ha experimentado problemas de calidad en la producción de piezas de hierro gris, lo que ha llevado a la búsqueda de una solución mediante la producción de hierro nodular. Esta fábrica atiende principalmente a clientes de las industrias mecánica y minera. El objetivo es desarrollar una solución para el problema de calidad en la producción de piezas de hierro gris mediante la fabricación de hierro nodular con estándares de calidad aceptables para los clientes aplicando técnicas adecuadas de fusión en cubilote. El estudio se desarrolló utilizando el método tradicional de experimentación, mediante el cual se realizó una serie de pruebas para evaluar varios factores, siendo el nodulizante el principal de ellos en el proceso de obtención de hierro nodular. Este enfoque riguroso y sistemático permitió obtener información precisa y valiosa sobre la influencia del nodulizante en la formación y calidad del hierro nodular. Los resultados mostraron que en las primeras pruebas persistía el grafito laminar, característico del hierro gris. Sin embargo, a medida que se aumentó la cantidad de nodulizante, se observaron cambios en la estructura, se presentó una combinación de grafito laminar y grafito compacto, indicando una nodulización parcial. En pruebas posteriores, se evidenció una disminución del grafito laminar y un aumento del grafito compacto, con forma más redonda y esferoidal. Estos indicaron una nodulización más avanzada y una tendencia hacia el hierro nodular.

**Palabras clave:** Cubilote. Nodulizante. Hierro nodular. Hierro gris. Calidad.

---

## **ABSTRACT.**

The research was based on providing a solution to a problem in JL FUNDICIÓN SAS de CV, which is an iron foundry, founded in 1998 and has a high shaft furnace (cupola) of 900 mm inside diameter. The estimated capacity of the plant is 85 tons per year. This company has experienced quality problems in the production of gray iron parts, which has led to the search for a solution through the production of nodular iron. This factory mainly serves customers in the mechanical and mining industries. The objective is to develop a solution to the quality problem in the production of gray iron parts by manufacturing nodular iron with quality standards acceptable to customers by applying appropriate cupola melting techniques. The study was developed using the traditional method of experimentation, through which a series of tests were carried out to evaluate several factors, the nodulizer being the main one in the process of obtaining nodular iron. This rigorous and systematic approach made it possible to obtain accurate and valuable information on the influence of the nodulant on the formation and quality of nodular iron. The results showed that in the first tests the lamellar graphite, characteristic of gray iron, persisted. However, as the amount of nodulant was increased, changes in the structure were observed; a combination of lamellar graphite and compact graphite appeared, indicating partial nodulization. In later tests, a decrease in lamellar graphite and an increase in compact graphite, with a more round and spheroidal shape, were observed. These indicated more advanced nodulization and a trend towards nodular iron.

---

## INTRODUCCIÓN

Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio que generalmente contienen también manganeso fósforo, azufre, etc. Su contenido en carbono (2 a 4.5%) es superior al contenido en carbono de los aceros (0.1 a 1.5%). Para la fabricación de piezas de fundición, se emplea generalmente como materia prima fundamental el arrabio o lingote de hierro y además se utiliza también en las cargas de los hornos y cubilotes, chatarras de fundición y a veces se emplean también cantidades variables de chatarra de acero. Las investigaciones de Gagnerin, Millis y Pilliny en 1949 condujeron a la fabricación de fundición con grafito esferoidal por medio de una adición de magnesio siendo este proceso patentado por la International Nickel Company en Estados Unidos y por la Mond Company en Europa (Barreiro, 1963).

En 2010, se produjo un total de 94,1 millones de toneladas de piezas metálicas, y de ese volumen, el 25% correspondió a piezas de hierro nodular, una cifra que sigue en aumento (1). La producción anual a nivel mundial supera los 12 millones de toneladas, y se proyecta que en los próximos 10 años llegará a alcanzar los 20 millones de toneladas.

En la actualidad, la producción de hierro nodular supera a la del hierro maleable y al acero. Se está realizando una transición exitosa de piezas previamente fabricadas con hierro gris, maleable, acero fundido y acero forjado hacia el hierro nodular, especialmente en regiones en desarrollo. La razón principal de este cambio radica en la reducción de costos que implica la fundición con hierro nodular en comparación con la maquinación, soldadura y forja de piezas.

JL FUNDICION es una empresa familiar situada en San Diego de las Trascuilas, San José Iturbide, Gto, que se especializa en la fabricación de piezas de hierro gris partiendo de la fundición y utilizando el proceso de

---

moldeo en arena verde. Durante 22 años, se ha enfocado exclusivamente en la producción de hierro gris, lo cual ha limitado su base de clientes y ha llevado a la empresa a enfrentar dificultades competitivas y casi declararse en bancarrota. Estas dificultades se deben tanto a la limitada diversificación de clientes como a problemas de calidad en las piezas fabricadas. La pregunta central este trabajo es ¿Cómo producir hierro nodular de buena calidad aplicando técnicas de fusión adecuadas en cubilote? La hipótesis central es que las cantidades de nodulizante (ferro silicio magnesio 5911) agregadas al metal líquido influyen en la formación de grafito esferoidal, en la microestructura y determina el índice de calidad del metal para las piezas fabricadas. El objetivo central es Producir hierro nodular en JL FUNDICIÓN S.A.S de C.V, con estándares de calidad aceptables por los clientes aplicando técnicas de fusión adecuadas en cubilote, con el fin de remplazar piezas de hierro gris.

Para llevar a cabo este estudio, la investigación se ha estructurado en 5 capítulos. En el capítulo I “Planteamiento del Problema” se describen algunos antecedentes referentes a la problemática del tema, al igual que el problema y sus respectivos objetivos y preguntas. En el capítulo II “Marco Conceptual y Teórico” se describen los materiales usados para la obtención de hierro nodular, técnicas adecuadas de fusión de hierro, los aditamentos para la formación de grafito esferoidal y conceptos teóricos. En el capítulo III “Marco Metodológico” se presenta la hipótesis de la investigación, las variables que intervienen en la producción de hierro nodular, el enfoque de la investigación, el diseño y el muestreo de la investigación. En el capítulo IV “Presentación y Análisis de Resultados” en donde se presentan los resultados y se analizan los resultados importantes de la investigación. Y finalmente en el capítulo V “Conclusiones” se discute sobre los resultados obtenidos se llega a una conclusión y recomendaciones respecto a la investigación.

---

# 1. CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Antecedentes del problema

Muchas fundiciones de hierro gris están intentando producir hierro dúctil como producto secundario a partir del hierro gris. En muchos casos el personal de estas fundiciones tiene la creencia de que sólo es necesario desulfurizar el hierro gris y tratarlo con magnesio en alguna forma. El resultado de este proceso es normalmente algún hierro con grafito esferoidal con calidad marginal que no cumple con las especificaciones aceptables del hierro dúctil siendo entonces indispensable alguna forma de tratamiento térmico. Por años los productores de hierro dúctil han usado el tratamiento térmico como un recurso una excusa para no controlar debidamente sus prácticas de fusión del hierro base. (Arthur f, 1979)

Hoy en día las fundiciones de hierro y sus aleaciones, por su uso ocupan un lugar predominante en la industria automotriz maquinaria pesada, minería, etc. Este material comparado con el acero y las aleaciones no ferrosas es más barato y posee buenas propiedades mecánicas al estado sólido, así como buena fluidez y colabilidad al estado líquido, con una baja tendencia a la formación de rechupes. por esta razón se pueden fabricar un sinnúmero de piezas vaciadas con este material. (Fras, Serrano Toledo, & Bustos Alcala, 1990).

El hierro nodular es utilizado en la industria automotriz y minería, ya que este presenta algunas ventajas frente al acero o hierro gris, con una mayor resistencia a la fatiga y una mayor resistencia al desgaste, aunque con un mayor costo de fabricación más alto que el hierro gris. Por su buena tenacidad, el hierro nodular se está utilizando para la fabricación de piezas que experimentan ciclos de fatiga, ya que por el tipo de estructura cristalográfica que posee inhibe el crecimiento y propagación de grietas,



---

además tiene una alta resistencia al desgaste, como se requiere, por ejemplo, en cigüeñales, monobloques, engranajes, roscas, tuberías etc. (Acosta Esqueda, Martínez Madrid, & López, 2000).

Históricamente, las fundiciones han fabricado hierro fundido en hornos de cubilote y, aunque hace unas décadas se predijo que desaparecerían, hoy en día aproximadamente el 70% de los hierros fundidos del mundo se producen en cubilotes. esta situación se ha logrado porque el cubilote se ha modernizado de acuerdo con los avances tecnológicos y los estándares ambientales. (Héctor Daniel Mejía, 2002).

En 1948, el hierro nodular, el hierro con grafito esferoidal o el hierro dúctil se anunciaron en la Conferencia Anual de la American Foundrymen's Society. En los primeros años, INCO, la empresa responsable y titular de la patente, comunico el hierro nodular a ingenieros y diseñadores a través de la distribución de literatura técnica y seminarios. Su uso aumentó notablemente en la década de 1950 y principios de la de 1960. Después de que INCO terminara su promoción del hierro nodular en 1966, el mercado siguió creciendo incluso por delante de otras fundiciones ferrosas debido a sus propiedades, características y el beneficio económico que brindaba. (Ramírez Natera, 2015).

En la actualidad, la producción de hierro, de donde se deriva el Hierro dúctil es indicativa de la prosperidad de una nación y constituye una de las materias primas base para la producción en serie de muchas otras industrias, como la construcción naval, la construcción de edificios y la fabricación de automóviles, maquinaria, herramientas, equipamiento doméstico, etc. (Sion, 2019).

La Empresa JL FUNDICIÓN S.A.S de C.V en particular es una fábrica de Fundición Hierro, una de las entidades que presenta en su

---

banco de problemas es la producción de piezas de hierro gris con estándares de calidad aceptables los cuales ya no fueron aceptados por los clientes, por lo que optado por una nueva producción la cual es obtener hierro nodular para dar solución al mismo, la misma está ubicada en el km 6.5 a un costado de la carretera que va de San José Iturbide a Puerto Carroza en la comunidad de San Diego de las Trasquilas.

JL FUNDICIÓN S.A.S de C.V, fue fundada en el año de 1998 cuenta con un horno de cuba alta (cubilote) de 900 mm de diámetro interior. La capacidad aproximada calculada de la mencionada fabrica es de 85 toneladas al año. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica y Minera, el moldeo se realiza en cajas metálicas de dimensiones 900 x 500 x 300 mm y 650 x 500 x 400 mm y se utilizan mezclas en verde. En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición. 70 % de chatarra de hierro y 30 % de retorno.

---

## 1.2 Planteamiento del problema.

Realizar piezas de fundición no es para el fundador un fin, sino un medio. El fundidor, al igual que todos los industriales, que los comerciantes, y en general todo ser humano desarrollado, tiene un fin bien determinado, una voluntad bien definida: hacer piezas de buena calidad para ganar dinero, y este, en la mayor cantidad posible.

Diariamente se invierten sumas considerables en ejecutar piezas que apenas salidas de los moldes resultan inadecuadas para su empleo debido a los defectos que presentan, estos rechazos como se dice en términos profesionales contribuyen en gran manera a mantener el precio medio de las piezas de fundición.

Los fundidores que saben, pues la experiencia se los ha demostrado, que los defectos representan un cierto porcentaje del número de piezas coladas, tienen en cuenta este hecho a la hora de determinar los precios de costo, de los cuales se derivan los de venta. Todo aumento del número de rechazos no puede traducirse para el fundidor más que por una disminución --a veces catastrófica--, del beneficio de explotación, por el contrario, la reducción de rechazos es una de las causas más importantes del aumento del beneficio.

Toda pieza rechazada debe de rehacerse, y en ocasiones varias veces, por ende, exige mano de obra, por consiguiente, horas de trabajo que es preciso pagar (a veces horas extras, por tanto, a un precio mayor, puesto que, por causa de las imperfecciones, los plazos de entrega se encuentran generalmente comprometidos).

Los defectos que se presentan en las piezas de hierro gris son comunes cuando no se tienen conocimiento en el tema, por ejemplo, en una pieza fundida en arena verde, se observan repentinamente extensas superficies ásperas y rugosas en la parte superior de la pieza que a Menudo llevan a la pieza a ser rechazada, así como a un gran trabajo de recuperación en costo y tiempo.

---

Este problema es de los más comunes en las piezas y este defecto puede ocurrir en todas las piezas moldeadas (preferiblemente arena verde). Las penetraciones ocurren en lugares donde las piezas se calientan fuertemente, como en los bordes o en las áreas de los ataques, en lugares donde el material de moldeo está débilmente compactado. (ask-chemicals, s.f.).

Otro defecto que podemos encontrar en las piezas de hierro gris son cavidades con paredes redondeadas en su mayoría lisas que están acompañadas de escoria, a este problema se le conoce como sopladuras, y se produce principalmente como resultado de un pobre proceso de desgasificación en el molde y es más común en las fundiciones de hierro con grafito laminar (Hierro gris) que en las fundiciones de hierro con grafito esferoidal (Hierro nodular). Las cavidades con paredes redondas y lisas suelen aparecer entonces en grandes áreas. La razón de las sopladuras redondeadas o alargadas son los gases encerrados por el metal durante la solidificación en la superficie de la pieza, a menudo asociados con escorias u óxidos.

Los materiales para un fundidor juegan un papel muy importante ya que de este dependerá la calidad de las piezas fabricadas, dado que si utilizamos malos materiales obtendremos malos resultados en las piezas.

El hierro base más utilizado en las fundiciones son: El Hierro gris (Hierro colado), Hierro dúctil (Hierro nodular).

El hierro fundido gris, ofrece una buena colabilidad y maquinabilidad, además de propiedades mecánicas moderadas. Debido a sus ventajas económicas, el hierro fundido se utiliza en múltiples aplicaciones en automoción, fabricación y procesamiento de industrias metálicas. (Struers, s.f.).

El hierro gris al tener una alta tensión de rotura, pero baja ductilidad, casi toda su curva de tensión alargamiento presente muchas zonas en donde las tensiones son proporcionales a las deformaciones. Comparada

---

con otras aleaciones de hierro modernas, el hierro gris tiene una baja resistencia a la tracción y ductilidad por lo tanto su resistencia al impacto es casi inexistente. (Corporativo Mejorada, 2019).

La fundición dúctil o nodular se caracteriza por sus notables propiedades mecánicas (elasticidad, resistencia a los golpes, alargamiento...) lo que la diferencia de las fundiciones grises tradicionales. (PAM SAINT-GOBAIN, s.f.).

En el estado de Guanajuato, y sus alrededores, hay un gran número de empresas que se dedicaban a la producción de hierro gris, y estas en su totalidad quebraron por depender solamente de un cierto número de clientes, y no poderse adaptar a los nuevos estándares de calidad propuestos por los mismos, y por la falta de relación.

*“La clave es escuchar a nuestros clientes, saber lo que necesita y cubrir esa necesidad”*<sup>1</sup> (López, 2022)

JL FUNDICION es una Fábrica (Empresa familiar) ubicada en la comunidad de San Diego de las Trasquilas, San José Iturbide, Gto dedicada a la producción de piezas de hierro gris, la principal actividad de esta pequeña empresa es la realización de piezas de hierro gris partiendo del moldeo de piezas en arena verde (mezcla compactada de arena de sílice SiO<sub>2</sub> y bentonita derivada de la arcilla humedecida).

Gracias a este proceso de función en arena verde se puede abarcar muchas posibilidades en el moldeo de piezas con formas específicas que a través de otros procesos sería imposible alcanzar. Esta cualidad brinda la posibilidad de ofrecer soluciones muy dispares dirigidas a sectores industriales específicos.

Esta pequeña empresa por 22 años solamente se ha dedicado a la producción de hierro gris para sector automotriz y sector minero,

---

manteniéndose con un cierto número de clientes lo cual la ha orillado a salir del sector de competencia y casi declararse en quiebra debido a las dificultades de solo tener un cierto número de clientes así como también por problemas de calidad en las piezas fabricadas, como lo son, problemas relacionados con tenacidad, ya que al ser piezas de hierro gris al momento de aplicarles una fuerza sobre ellas, las piezas está en riesgo de ruptura. Baja resistencia a la tracción, las piezas de hierro gris no tienen mucha propiedad de alongarse (estirarse) por lo que al momento de estirarlas tienden a fracturarse de los puntos más débiles.

Ductilidad, el hierro gris presenta una baja ductilidad por ende las piezas de hierro gris bajo la acción de una fuerza no pueden deformarse (plásticamente) de manera sostenible sin romperse.

Por otra parte, los competidores se han adaptado a las nuevas normas y estándares de calidad por parte de sus clientes, además de que han implementado nuevas técnicas de trabajo con el fin de sobresalir y ampliarse a más mercados de la industria, así como obtener más números de clientes lo cual ha hecho que se mantengan por delante de algunos competidores.

Finalmente, y por tal razón, surge la siguiente pregunta ¿Cómo producir hierro nodular aplicando técnicas de fusión adecuadas en cubilote, con estándares de calidad aceptables por los clientes con el fin de remplazar piezas de hierro gris? Con el objetivo de volver a tener una estabilidad económica y productiva.

---

### 1.3 Objetivos

- **Objetivo general**

- Producir hierro nodular en JL FUNDICIÓN S.A.S de C.V, con estándares de calidad aceptables por los clientes aplicando técnicas de fusión adecuadas en cubilote, con el fin de remplazar piezas de hierro gris.

- **Objetivos específicos**

- Identificar los requerimientos para producir hierro nodular en cubilote.
- Identificar los estándares de calidad de los clientes para una buena producción de hierro nodular.
- Implementar técnicas adecuadas de fusión de hierro para la producción de hierro nodular.

### 1.4 Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los factores a los que nos enfrentamos al producir hierro nodular en cubilote?
- ¿Qué tipos de estándares de calidad tienen los clientes para una buena producción de hierro nodular?
- ¿Como implementar técnicas adecuadas de fusión de hierro nodular para la producción de hierro nodular?

---

## 1.5 Justificación

Esta investigación se encuentra en que, permitirá producir un producto secundario con nuevos estándares de calidad con el fin de salir de la banca rota y poder acceder a un nuevo crecimiento dentro de las fundiciones de hierros dúctiles, así mismo, un aumento en la productividad de la empresa (laboral y económicamente), ser más competitiva dentro de la rama de la industria metalúrgica además de que brindara estabilidad laboral para las personas que laboran ahí, brindándoles un trabajo seguro, estable y contribuir a la economía local.

De igual forma, proporcionará información que será útil para todas aquellas empresas de la rama metalúrgica y talleres de fundición de metales para mejorar o implementar nuevos productos y así mismo incrementar la producción y ampliarse aún más al sector de clientes, además de que los resultados obtenidos podrán ser contrastados con otras investigaciones el mismo tópico, e incluso, servir como referente para otros trabajos.

Por otra parte, la investigación contribuye a ampliar conocimientos relacionados con la producción del hierro nodular en cubilote, así como técnicas adecuadas de fusión de hierros en cubilote, el trabajo tiene una utilidad metodológica, ya que podrían realizarse futuras investigaciones que utilizaran metodologías compatibles, de manera que se posibilitaran análisis conjuntos, comparaciones entre periodos temporales. La investigación es viable, pues se dispone de los recursos necesarios para llevarla a cabo.



---

## 2. CAPÍTULO II MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO.

### 2.1 Marco conceptual

La producción es un proceso fundamental en la industria que implica la fabricación y creación de bienes y servicios para satisfacer las necesidades de los consumidores. La calidad, por su parte, es un factor clave en la producción, ya que se refiere al grado de excelencia de los productos y servicios que se ofrecen.

En la industria metalúrgica, el hierro fundido es uno de los materiales más utilizados en la producción de piezas y componentes para maquinarias y estructuras. Este material se divide en diferentes tipos según sus características, como el hierro gris y el hierro nodular, que se diferencian por su composición y propiedades mecánicas.

Para la producción de hierro fundido, se utiliza un horno llamado cubilote, que es un recipiente en forma de cilindro donde se funde el hierro y se vierte en moldes para su posterior utilización en la producción industrial. La calidad del hierro fundido y el proceso de producción son aspectos críticos para garantizar la confianza y durabilidad de los productos fabricados. A continuación, se describirán más a detalle los conceptos mencionados en el texto anterior.

#### 2.1.1 Producción.

*“La producción es la actividad económica que se encarga de transformar los insumos para convertirlos en productos”<sup>1</sup> (Quiroa, 2019).*

También se podría decir que la producción es una actividad dirigida a la satisfacción de las necesidades humanas, a través del procesamiento de las materias primas, hasta generar productos o mercancías, que serán intercambiadas dentro del mercado.

---

Otro concepto de definición de producción hace referencia a la acción de generar (entendido como sinónimo de producir), al objeto producido, al modo en que se llevó a cabo el proceso o a la suma de los productos del suelo o de la industria.

El verbo producir, por su parte, se asocia con las ideas de engendrar, procrear, criar, procurar, originar, ocasionar y fabricar. Cuando se refiere a un terreno, en cambio, producir es una noción que describe la situación de rendir fruto. Por otra parte, cuando esta palabra se aplica a un elemento, adquiere el sentido de rentar o redituar interés. En el campo de la economía, la producción está definida como la creación y el procesamiento de bienes y mercancías. El proceso abarca la concepción, el procesamiento y la financiación. La producción constituye uno de los procesos económicos más importantes y es el medio a través del cual el trabajo humano genera riqueza. (Pérez Porto, 2023).

Por otro lado, producción también se define como el conjunto de procesos, procedimientos, métodos y técnicas que son necesarios para la obtención de bienes o servicios mediante la aplicación sistemática de un conjunto de decisiones que tienen como objetivo incrementar el valor de los factores que intervienen en la creación de dichos bienes y servicios, de forma que los mencionados productos satisfagan las necesidades sentidas por los clientes. (Dolores Tous Zamora, 2019).

### **2.1.2 Calidad**

*“Calidad: grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos” (ISO 9000, 2015).*

El término de calidad puede ser definido de diferentes perspectivas, si hablamos de la perspectiva del usuario nos referimos a la capacidad de

---

satisfacer los deseos de los consumidores. Si se define desde la perspectiva de un producto se dice que: La calidad de un producto o servicio es la percepción que el cliente tiene del mismo. Es una fijación mental del consumidor que asume conformidad con un producto o servicio determinado, que solo permanece hasta el punto de necesitar nuevas especificaciones. La calidad es un conjunto de propiedades inherentes a un objeto que le confieren capacidad para satisfacer necesidades implícitas o explícitas. Por otra parte, si la definidos por la perspectiva de la producción define que es la conformidad relativa con las especificaciones, a lo que al grado en que un producto cumple las especificaciones del diseño. (Ródenas, 2011).

La calidad también puede referirse a la conformidad con los estándares y específicas, así como a la mejora continua de los procesos y productos. En este sentido, la calidad no es un evento aislado, sino un proceso continuo de mejora que requiere un enfoque sistemático y una cultura organizacional centrada en la excelencia. Dicho esto entonces podemos decir que la calidad se refiere a la medida en que un producto, servicio o proceso cumple con los requisitos y expectativas de los clientes o usuarios, además se considera que la calidad es un factor clave en la satisfacción del cliente y en la capacidad de una empresa para mantener una ventaja competitiva, las empresas que tienen una reputación de alta calidad suelen tener una mayor lealtad de los clientes, una mejor imagen de marca y una mayor capacidad para atraer y retener a los empleados talentosos.

---

### 2.1.3 Hierro fundido

El término hierro fundido se refiere a una familia de aleaciones ferrosas compuestas de hierro, carbono (desde 2.11% hasta aproximadamente 4.5%) y silicio (hasta aproximadamente 3.5%).

*“En ingeniería de materiales, los hierros fundidos son una clase de aleaciones ferrosas con contenidos de carbono superiores al 2,14% en peso. La diferencia es que los hierros fundidos pueden aprovechar la solidificación eutéctica en el sistema binario de hierro y carbono, por lo tanto, los hierros fundidos son un material ideal para la fundición en arena en formas complejas” (William D. Callister, 2016).*

Normalmente, los hierros colados (Hierros fundidos) contienen de 2,14% en peso a 4,0% en peso de carbono y en cualquier lugar de 0,5% en peso a 3% en peso de silicio. Las aleaciones de hierro con menor contenido de carbono se conocen como acero. La diferencia es que los hierros fundidos pueden aprovechar la solidificación eutéctica en el sistema binario hierro-carbono. El término eutéctico es griego para “fusión fácil o bien”, y el punto eutéctico representa la composición en el diagrama de fases donde se alcanza la temperatura de fusión más baja. Para el sistema hierro-carbono el punto eutéctico se produce a una composición de 4,26% en peso de C y una temperatura de 1148°C. (Departamento de Energía de EE . UU, 1993).

### 2.1.4 Hierro gris

El hierro fundido gris, también conocido como hierro gris o hierro maleable, es un tipo de hierro fundido que tiene una apariencia grisácea debido a su alto contenido de carbono y su estructura cristalina en forma de laminillas. La estructura del hierro fundido gris está formada por una matriz de grafito laminar o en escamas, dispersa en una matriz de hierro y otros elementos. Esta estructura le produjo al hierro fundido gris una serie

---

de propiedades mecánicas y físicas, como buena resistencia a la compresión, buena capacidad de absorción de vibraciones y amortiguación, y buena resistencia a la abrasión y al desgaste. (Metalium, 2014).

El grafito existe principalmente en forma de hojuelas (laminillas). Se le llama hierro fundido gris o hierro gris, debido a que, cuando se le rompe, la trayectoria de la fractura ocurre a lo largo de las hojuelas de grafito y tiene, por tanto, una apariencia gris y de color del hollín. Estas hojuelas actúan como elemento de esfuerzo. Como resultado, el hierro gris tiene una ductilidad insignificante, y como otros materiales frágiles, es débil a la tensión, aunque resistente a la compresión.

Por otra parte, la presencia de hojuelas de grafito le da a este material la capacidad de amortiguar vibraciones causadas por fricción interna y, en consecuencia, capacidad de disipar energía. Esta capacidad hace del hierro fundido gris adecuado y de uso común como material para construir bastidores y estructuras de máquinas herramientas. (Serope Kalpakjian, 2009).

#### **2.1.5 Hierro nodular.**

También conocido como hierro dúctil, es un tipo de hierro fundido que ha sido tratado con magnesio u otros elementos químicos para cambiar su estructura y hacerlo más flexible, resistente y maleable que el hierro fundido convencional. La estructura del hierro nodular se caracteriza por la presencia de nódulos o esferoides de grafito en su matriz metálica, en lugar de la estructura laminar o en escamas que se encuentra en el hierro fundido gris convencional. Esta estructura única le soporta al hierro nodular una serie de propiedades mecánicas y físicas superiores, como alta resistencia, ductilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga y resistencia a la corrosión. (Corporativo Mejorada., 2019).

---

Para producir la estructura nodular el hierro fundido que sale del horno se inocula con una pequeña cantidad de materiales como magnesio, cerio, o ambos. Esta microestructura produce propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia, buen maquinado, buena fluidez para la colada, buen endurecimiento y tenacidad. (Reliance Foundry, 2023).

El hierro nodular se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde piezas de maquinaria pesada hasta componentes de automóviles, tuberías y accesorios de fontanería, debido a sus propiedades mecánicas y físicas superiores.

#### **2.1.6 Cubilote.**

El diccionario lo define como horno cilíndrico vertical para fundir lingotes de hierro gris. La Enciclopedia Británica afirma que René-Antoine Ferchault de Réaumur construyó el primer horno cubilote en Francia alrededor de 1720. (Insertec, 2016).

Es un tipo de horno cilíndrico vertical de aproximadamente 6 metros de alto, el cual lleva a los metales en él colocados, hasta el estado líquido y permite su colado, el mismo puede ser utilizado para la fabricación de casi todas las aleaciones de Hierro.

Su nombre proviene de la palabra cupa que significa cuba; es un horno cilíndrico compuesto de una capa exterior de acero y una capa interior de ladrillos. Los mismos pueden variar en su tamaño desde sólo 30 cm de diámetro hasta más de 3 metros. El Cubilote, sigue siendo el proceso de fusión más económico si el horno funciona continuamente. Es el único horno de fusión secundaria, no siderúrgico, que tiene al metal y al combustible en contacto directo por lo que logra altos grados de eficiencia térmica; usando coque de carbón, carbón mineral y carbón vegetal. El

---

cubilote descansa sobre una placa circular que es soportada arriba del piso mediante cuatro columnas separadas convenientemente para que las puertas abisagradas puedan caer libremente. Estando en operación, estas puertas se giran hasta una posición horizontal y se mantienen en su lugar por medio de una estaca vertical.

La puerta de carga está localizada más o menos a la mitad de la cubierta vertical y la parte superior del cubilote queda abierta, a excepción de una pantalla de metal o para chispas. Las aberturas para introducir el aire a la cama de coque se conocen como toberas. Alrededor del cubilote y en la zona de las toberas, se encuentra una caja, para el suministro del aire, opuestas a cada tobera se encuentran unas pequeñas ventanas cubiertas con mica de tal forma que puedan inspeccionarse las condiciones dentro del cubilote. El aire, suministrado por un ventilador centrífugo entra por un lado de la caja. Opuesto al vertedero de colada, se encuentra otro vertedor para la escoria, en la parte de atrás del cubilote. Esta abertura está colocada debajo de las toberas para evitar un posible enfriamiento de la escoria, provocado por la corriente de aire. (Edoardo, 1974).

## **2.2 Marco teórico**

El objetivo primordial de la fabricación de fundición nodular es la formación de grafito esferoidal mediante la adición de cantidades pequeñas de magnesio bien puro o combinado con otros elementos. La cantidad mínima de magnesio retenido necesaria para producir un grafito esencialmente nodular oscila entre 0.018 y 0.050; viene determinada por los contenidos de azufre y oxígeno de hierro base. Para conseguir la cristalización de grafito en forma esferoidal, la fundición líquida debe ser sometida a un tratamiento en la cual consiste añadir a la fundición líquida

---

por los procedimientos que se consideran más adelante una aleación que contenga un elemento esferoidizante.

El número de estos elementos es bastante limitado y, principalmente, son el Mg, Ca, Ba, Ce, Sr. Aleado el magnesio con metales pesados como Fe, Ni, Cu, o Si, la presión de vapor puede reducirse considerablemente, pero la reacción con la fundición será todavía violenta si la proporción de magnesio en la aleación es superior al 50%, sólo se evita el peligro con proporciones de magnesio inferiores al 25%. El punto de ebullición del magnesio puro se sitúa aproximadamente entre 1100 y 1500° C temperatura normal del tratamiento de fundición líquida alcanzando la presión de vapor del magnesio las 10 atmósferas. por ello la adición del magnesio a la fundición líquida provoca una vaporización explosiva que implica peligrosas proyecciones de metal líquido. El magnesio no puede por tanto utilizarse en estado metálico puro excepto si se les recurre a técnicas especiales de adicción.

Las aleaciones de tipo Fe, Si, Ca y Mg con 20% a 30% de Ca apenas se utilizan actualmente por ser demasiado ligeras y de reactividad muy débil. Además, se desintegran lentamente por oxidación atmosférica. Hay algunas aleaciones que contienen cerio y otros elementos de las tierras raras que se emplean para compensar o anular la influencia de otros elementos perniciosos. La cantidad de aleación que debe adicionarse a la fundición líquida para obtener el grafito esferoidal depende de varios factores, entre los que desempeña un papel preponderante el contenido de azufre, ya que el magnesio presenta mayor afinidad con el azufre que el hierro o manganeso. Por ello, cierta cantidad de magnesio adicionado al baño será consumida por la desvalorización con la formación de magnesio y azufre. Durante esta reacción una unidad de azufre se combina con 3/4 de unidades de magnesio.



---

Se ha comprobado experimentalmente que la esferoidización perfecta requiere la presencia de la fundición de cierta cantidad de magnesio residual, según las circunstancias oscilará entre 0.03% y 0.06%. Por otra parte, el rendimiento del magnesio no es del 100% sino que depende de la temperatura de la fundición del proceso del tratamiento empleado y del contenido de magnesio de la aleación.

### **2.2.1 Fabricación de hierro nodular.**

La fabricación de hierro nodular es un tipo determinado comprende entre otros, la elección de:

- Los materiales de carga
- El desulfurante y método de desulfuración (si es necesario)
- La cantidad de material esferoidizante
- El método de tratamiento
- La cantidad de inoculante
- El método de inoculación
- El método de control del proceso de fabricación del hierro nodular.

#### **2.2.1.1. Materiales de carga.**

Las materias primas requeridas para la fabricación de hierro base, para obtener el hierro nodular perlítico ferrítico, pertenecen a un grupo especial de materiales de carga y algunos de ellos no se utilizan en la fabricación de hierro gris o inoculado.

Normalmente en la fabricación de hierro nodular perlítico se utiliza.

- Hierro nodular de retorno;
- Arrabio Especial de bajo fósforo;
- Briquetas de carburo de silicio;
- Carburo de silicio granulado;
- Trozos de ferro-silicio al 50%;

- 
- Placa cortada y chatarra de acero estructural;

En el caso de la fabricación de hierro nodular férrico, que utiliza la mayoría de estas materias primas, con la diferencia de que en lugar de arrabio de bajo fósforo se utiliza arrabio con menores cantidades de fósforo y manganeso, en lugar de placa cortada y chatarra de acero estructural, se usa chatarra de lámina de acero

**Hierro nodular de retorno.** Normalmente el rendimiento total del hierro nodular es de orden de 40-60%, siendo este rendimiento menor que el hierro gris. Debido a esto, en la carga el hierro lugar de retorno (Sistema de colada, alimentadores y piezas defectuosas de las fundiciones anteriores), se utilizan alrededor del 50%. Es muy importante, que el hierro nodular de retorno no se mezcle con otros tipos de fundición en el almacén de materias primas, por lo tanto, debe ser clasificado y fácil de identificar, ya que en caso contrario puede producir fundiciones defectuosas o fuera de las especificaciones requeridas por el cliente. (Fras, Serrano Toledo, & Bustos Acalá, Fundiciones de hierro , 1990)

**Arrabio de bajo fósforo y manganeso.** Uno de los factores más importantes en la fabricación de hierro nodular de alta calidad, es la disminución del contenido de elementos que favorecen la formación de grafito laminar y de carburos. Para reducir el contenido de estos elementos, mediante disolución, frecuentemente se utiliza en la carga el 15% al 30% de arrabio con bajo contenido de fósforo y manganeso adicionalmente el uso de este arrabio posibilita la reducción de fósforo, silicio y manganeso a niveles recomendables.

**Sorematal.** Este material de carga se caracteriza especialmente por los bajos contenidos de elementos que se encuentran en el hierro (con excepción del carbono). el papel que juega la utilización del sobre metal al principio es similar a la utilización de arrabio de bajo fósforo y manganeso es decir reduce el contenido de fósforo manganeso y elementos dañinos.

---

**Adiciones de carbono.** En ocasiones el hierro base se fabrica en hornos eléctricos a partir de chatarra de acero en el cual es necesario carbonizar el baño para alcanzar un nivel de carbono requerido. Como carburizante se recomienda utilizar materiales de bajo contenido de azufre y cenizas, tales como; grafito sintético, electrodos de grafito, coque de petróleo con bajo contenido de azufre o grafito natural mexicano.

**Briquetas de carburo de silicio y carburo de silicio granulado.** Estos materiales son la fuente de silicio y carburo durante la fusión de la carga en cubilote y hornos eléctricos. Además, actúan como gérmenes de grafito y aumenta el número de granos eutécticos. El carburo de silicio reduce la tendencia a la formación de cementita en los hierros aumenta la elongación y reduce en forma pronunciada la dureza de las piezas coladas. Las briquetas de carburo de silicio se utilizan en las cargas de los cubilotes en cantidades de uno a 2%. En el mercado se venden 2 tipos de estas briquetas que contienen 65% y 75% de carburo de silicio. El carburo de silicio granulado cumple el mismo papel que las briquetas y es utilizado en la carga a fundir en hornos eléctricos de diferentes tipos.

**Trozos de ferro-silicio al 50%.** Esta aleación (47-51% Si, 0.1% C, 0.025% S, 0.035% P, 1.2% Al, y 0.75% Mn) es aprovechada como una fuente de silicio durante la fusión del hierro base en hornos eléctricos.

**Placa cortada y chatarra de acero estructural.** La fracción de perlita en las piezas fundidas depende entre otros del nivel de manganeso en la fundición. Debido a esto en la fabricación de hierro nodular perlico, el tipo 80-55-06 y el 100-70-03, una fuente de manganeso en la carga puede ser chatarra de acero estructural que contiene 0.5-0.7% de Mn. Además, utilizando este acero el rendimiento del manganeso es mayor y los costos son menores, que si utilizamos ferro manganeso.

---

**Chatarra de lámina de acero.** En el caso de la fabricación de hierro nodular con bajos contenidos de manganeso (normalmente 0.15 0.25%), se recomienda utilizar chatarra de lámina de acero que contiene 0.20 a 0.35% en manganeso. Utilizando esta combinación con el arrabio de bajo fósforo y manganeso se puede producir nodular de la clase 60-40-18 y 65-45-12.

#### **2.2.1.2. Desulfuración de la fundición.**

**Materiales desulfurantes.** Los elementos esferoidezantes tienen una propiedad característica a saber, gran afinidad química por el azufre, por lo tanto, estos elementos después de introducirlos en el baño causan entre otras cosas la desulfuración hasta un nivel menor a 0.02% S, lo que sirve como hierro base para obtener el hierro con grafito nodular. Sin embargo, cuando el contenido de azufre en la fundición sobrepasa en la práctica el valor de 0.05% los costos de desulfuración mediante materiales esferoidezantes son mayores que si hubiéramos usado desulfurantes más baratos y eficientes como, por ejemplo, CaO, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y CaC<sub>2</sub>. Cuando se usan cubilotes de recubrimiento ha sido el contenido de azufre en las fundiciones de 0.07-0.12% lo cual implica realizar un tratamiento de desulfuración posterior fuera del cubilote.

**Desulfuración mediante sosa Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Carbonato de Calcio).** La sosa se introduce a la olla una vez que existe una pequeña cantidad de metal líquido en la misma, procediendo enseguida al llenado total de la olla, después se espera hasta que la llama amarilla desaparezca de la superficie del metal líquido y luego la escoria se desinfesta durante la edición de la piedra caliza en polvo en la cantidad de 50 a 60% con respecto a la sosa consumida. el grado de desulfuración que se alcanza cuando se consume aproximadamente 1% sosa del peso total del metal líquido normalmente es de 30 a 50%.

---

**Desulfuración mediante compuestos de Calcio.** La reacción de desulfuración de la fundición de carburo de calcio es exotérmica. Por esto, la fundición se puede sulfurar eficazmente a temperaturas relativamente bajas. La granulometría del carburo de calcio utilizado en este proceso es de 0.3 a 3 mm. Otros compuestos de calcio pueden ser usados para la desulfuración de la fundición son la cal  $\text{CaO}$  y el cianuro (cianamida) de calcio  $\text{CaCN}_2$ , sin embargo, la eficiencia de desulfuración de la fundición mediante  $\text{CaO}$  es menor a la del uso de  $\text{Ca}_2\text{C}$ . Además, la reacción de desulfuración es endotérmica por lo que las caídas de temperatura son mayores a temperaturas altas, es decir, mayores que el  $1400^\circ\text{C}$ , el material más efectivo es  $\text{CaCN}_2$ , el cual se disocia en calcio, carbono y nitrógeno atómico. El calcio se une con el azufre y forma  $\text{CaS}$ , quien flota a la escoria.

#### **2.2.1.3. Materiales esferoidizantes.**

Los esferoidizantes más comunes en la práctica industrial son: el magnesio, el cerio, y las aleaciones de estos elementos.

**Magnesio.** El uso de magnesio es más económico, pero existen problemas en la tecnología desde su adicción al hierro líquido. El magnesio es muy volátil, su punto de evaporación es bajo ( $1107^\circ\text{C}$ ) por lo que a la temperatura de la fabricación de las fundiciones la presión de los vapores del magnesio es alta. Su densidad es cuatro veces menor que la del hierro y fácilmente flota en la superficie donde se quema con intensos desprendimientos de luz y calor acompañado de chispas luminosas lo que en lo sucesivo llamaremos fenómenos pirotécnicos. El magnesio se usa en diferentes formas que depende de la tecnología de esferoidización. El interés de estas tecnologías es asegurar, que las pérdidas de magnesio sean pequeñas y disminuir la velocidad de la reacción en el baño. Durante la fabricación del hierro nodular se usa  $\text{Mg}$  puro en la forma siguiente.

- Gránulos o polvo introducidos por el método de inyección mediante lanza.

- 
- Lingotes usados en equipo especial, ollas de alta presión o en ollas basculantes.
  - Lingotes cubiertos de materiales aislantes los cuales se introducen en el método de inmersión MAP; estos lingotes fueron desarrollados por Pont-a Mousson.
  - varillas usadas en ollas JPK.
  - Briquetas de coque con magnesio elaboradas por Foseco. El coque llamado Mag-coke que contiene de 43 a 45 % de Mg y es un producto comercial de diferentes tamaños
  - Briquetas llamadas De Flake; este producto es una muestra porosa de acero con magnesio con un 20-25% Mg.
  -

***Magnesio puro (pureza comercial).*** Frecuentemente se aplica por métodos de inmersión, lo cual minimiza la introducción al baño de otros elementos, además el magnesio es más barato. Una desventaja de esto es el peligro laboral en el uso de esta tecnología, o la necesidad de uso de equipo adicional costoso. Por lo tanto, muy frecuentemente en lugar de Mg se usan sus aleaciones.

***Aleaciones de magnesio.*** La ventaja del uso de las aleaciones de magnesio en comparación con el magnesio puro radica en que la introducción del esferoidizante, al metal líquido, ocurre de manera menos intensa. Así, a medida que disminuye el contenido de magnesio en su aleación, disminuye también la intensidad de los efectos pirotécnicos. También las pérdidas de magnesio disminuyen, con esto aumenta la eficiencia del proceso referido a la unidad de magnesio. Por otro lado, una desventaja es la gran disminución de la temperatura del baño durante la operación de esferoidización por el uso de aleaciones. en este caso también se introduce diferentes elementos presentes en la aleación, los cuales frecuentemente no son deseables en el hierro. las selecciones de

---

mayor importancia industrial son: Mg-Ni, Mg-Si, y algunas veces se usan aleaciones con cobre.

**Aleaciones base níquel.** Las aleaciones Mg-Ni son las más antiguas en cuanto a uso en el proceso de esferoidización del hierro. Se comportan mejor en el baño, son de fácil operación y ofrecen un mayor aprovechamiento del magnesio. Las aleaciones tipo Incomag, tienen mayor densidad en comparación con el hierro líquido, siendo esta propiedad muy importante en la práctica porque permite sumergir la aleación directamente en el baño. Por lo tanto, la tecnología del proceso de esferoidización es simple y el aprovechamiento del magnesio es grande (aproximadamente del 60-90%). en el caso de la aleación Incomag 1 y 2, el aprovechamiento del magnesio puede alcanzar 90%. Su desventaja es el alto costo, el cual aumenta con el contenido de níquel. La aleación que contiene 30% Mg es más barata, pero su utilización exige un equipo especial de inmersión.

**Aleaciones a base de ferro-silicio.** Se desarrolló este tipo de acciones para bajar el costo del níquel. Estas aleaciones difieren en el contenido de Mg, Ca, Ce y Al se distinguen principalmente tres grupos (tabla 1).

El primer grupo denominado 3 tiene un contenido por medio de magnesio de 2% a 3%. Se recomienda su aplicación en el caso del método sándwich. Este es esferoidizante presenta menos efectos pirotécnicos, debido al poco contenido de Mg, y siendo una condición para su aplicación, el contenido de azufre no sobrepase 0.02% S. Por el contrario, a mayor cantidad de azufre, aumenta el consumo y la cantidad de silicio introducida al hierro. La aleación tipo Noduloy 3R contiene mayor cantidad de cerio y las tierras raras lo cual elimina su introducción posterior en el baño.

El segundo grupo denominado “5” contiene cerca del 5% de Mg y está destinado principalmente para la obtención de hierro nodular por el método sándwich. El aprovechamiento del magnesio con estas aleaciones resulta ser de 55%. el nivel de azufre admisible en el hierro es un poco más alto del orden de 0.03% S.

El tercer grupo de aleaciones denominado “9” contiene alrededor de 9% Mg y es utilizado en el método sándwich y por inmersión. el contenido admisible inicial de azufre en la fundición puede ser de 0.05%.

*Aleaciones a base de ferro-silicio.*

Denominación del esferoidizante	Composición química					
	Mg	Si	Ca	Ce	Al	Fe
Noduloy 3	2,8- 3,3	44-44	0,8 -1,3	—	1,2 máx.	resto
Noduloy 3-R	2,8- 3,3	44-44	0,8 -1,3	0,035-0,5	1,2 máx.	resto
Remag	2,7- 3,5	46-48	0,8 -1,3	1,75 -2,5	1,2 máx.	resto
Noduloy 5	5,0- 6,0	44-48	0,8 -1,3			resto
Noduloy 5C	5,0- 6,0	44-48	0,50-1,3	0,50 -0,75	1,2 máx.	resto
Noduloy 5-LC	5,0- 6,0	44-48	0,8 -1,3	0,30 -0,48	1,2 máx.	resto
Noduloy 5R-1	5,0- 6,0	44-48	0,8 -1,3	0,30 -0,45	1,2 máx.	resto
Noduloy 5R-2	5,0- 6,0	44-48	0,8 -1,3	0,45 -0,60	1,2 máx.	resto
Noduloy 5R-3	5,0- 6,0	44-48	0,8 -1,3	0,85 -1,00	1,2 máx.	resto
Noduloy 9	8,5-10,0	44-48	1,0 -1,5		1,2 máx.	resto
Noduloy 9-LC	8,5-10,0	44-48	1,0 -1,5	0,30 -0,40	1,2 máx.	resto
Noduloy 9-C	8,5-10,0	44-48	1,0 -1,5	0,50 -0,75	1,2 máx.	resto
Noduloy 9-R	8,5-10,0	44-48	1,0 -1,5	0,35 -0,50	1,2 máx.	resto

Tabla1. Grupos de esferoidizantes y composición química. Obtenido de (Aleaciones a base de ferro-silicio, 1990)

**Cerio y sus aleaciones.** El cerio es el segundo esferoidizante después del magnesio. En comparación con el magnesio, el cerio tiene mayor densidad 6.8% g/cm<sup>3</sup>, mayor punto de fusión (795° C) y muy alto punto de evaporación (3468° C). Estas propiedades fisicoquímicas causan que durante la inmersión del cerio al baño no existen efectos pirotécnicos,



lo que facilita el proceso de expedición. Por supuesto que la aplicación del cerio puro no es económica y por esto se utilizan aleaciones tipo: Michmetal, ferro-silicio con adición de cerio, etc. (tabla 2)

El principal interés en la utilización de las aleaciones de cerio es la neutralización de los esferoidizantes, tales como: plomo, antimonio, bismuto, arsénico, aluminio y titanio. Estos elementos reaccionan en el cerio, los productos de reacción son estables e impiden la formación de grafito laminar. Por otro lado, el cerio es un esferoidizante más débil, en comparación con el magnesio, por lo que industrialmente se usan las aleaciones de cerio juntamente con las aleaciones de magnesio en una relación de alrededor de 1:1. Esta tecnología tiene las siguientes ventajas: disminuye las limitaciones sobre la cantidad de antiesferoidizantes y disminuye los efectos pirotécnicos. Las desventajas de esta técnica estriban en los altos costos de las aleaciones de cerio y la dificultad de su análisis químico cuantitativo.

Denominación del esferoidizante	Composición química, %					
	Si	Ce	Mg	Ca	Tierras raras	Fe
Mischmetal	—	50-56	—	—	44-50	—
CSF 10	36-40	9-11	—	—	10,5-15	resto
—	30-33	15-17,5	—	—	30-35	resto
—	38	23	0	5	27	resto
Ce-Mg 1	45	4	3	1	—	resto
Ce-Mg 2	45	3	8	1	—	resto

Tabla 2. Esferoidizantes con Cerio. Obtenido de (Fras, Serrano Toledo, & Bustos Acalá, Cerio y sus aleaciones, 1990).

**Aleaciones a base de cobre.** Estas elecciones se usan raramente en la industria. estas contienen 10% Mg y 90% Cu o 20% Mg y 80% Cu. Al igual que las aleaciones de níquel, estas aleaciones tienen también mayor densidad que el hierro líquido y se hunden en el baño. Por esto, La

---

operación con estas elecciones es simple y no existe el uso de equipo especial. debido al hecho de que el cobre tiene la habilidad para promover la formación de perlita, entonces sus selecciones se usan solamente durante la fabricación de hierro nodular con una matriz perlita, ya que es muy difícil obtener el hierro nodular con una matriz ferrítica. conclusiones similares se obtienen con otras aleaciones a base de cobre, por ejemplo 40% Si, 15% Cu 12% Mg, 33% Fe (Fras, Serranos, & Bustos, 1990).

**Cálculo de la cantidad de esferoideizante.** Controlar la cantidad de magnesio durante la producción de hierro nodular es importante ya que el magnesio es un desoxidante y desulfurante muy importante, una parte del magnesio introducido en el baño se consume, ya que se forma MgO (óxido de magnesio) y MgS (sulfuro de magnesio). El magnesio agregado al baño ( $Mg_a$ ) puede separarse en cuatro partes:

- **$Mg_e$ :** cantidad en por ciento de magnesio perdido por evaporización
- **$Mg_s$ ,  $Mg_o$ :** cantidad en por ciento de magnesio perdido por la formación de  $Mg_s$  y  $Mg_o$  respectivamente.
- **$Mg$ :** cantidad en por ciento de magnesio que permanece en el baño.

Las pérdidas de MgO son relativamente pequeñas, y por lo tanto puede decirse que la cantidad de magnesio agregado al baño es un total de tres partes únicamente.

$$Mg_a = Mg_s + Mg_e + Mg [\%]$$

#### 2.2.1.4. Métodos de esferoidización de la fundición.

La adición de agentes esferoidizantes al hierro fundido es un paso importante en la producción de hierro nodular. El magnesio y sus

---

aleaciones poseen bajas temperaturas de vaporización, de ahí que su adición en el hierro fundido deba de hacerse con extremo cuidado.

**Método de vaciado directo.** Este método de tratamiento (*Ilustración 1*) es el más simple que se utiliza, mediante el mismo la cantidad requerida de la aleación esferoidizante se coloca en el fondo de una olla abierta calentada lo más rápido posible previamente, a la cual se le agrega una cantidad de hierro base a la temperatura de tratamiento. La eficiencia del elemento esferoidizante en este método varía de entre 20 a 25% dependiendo dicha eficiencia de factores, en donde algunos son inherentes al propio magnesio, ya que tiene una temperatura de vaporización baja, y una solubilidad en el hierro pequeña. Por estas razones, es deseable un baño profundo, para prolongar el contacto entre el hierro y el magnesio se incrementa el uso del elemento esferoidizante. Por lo tanto, la profundidad de la olla deberá ser de 2 a 3 veces el diámetro y el metal deberá ser vaciado en la olla tan rápido como sea posible. También, por razones similares, mediante este método, aleaciones esferoidizantes más densas producen mejores recuperaciones que aleaciones ligeras.

*Método de vaciado directo.*

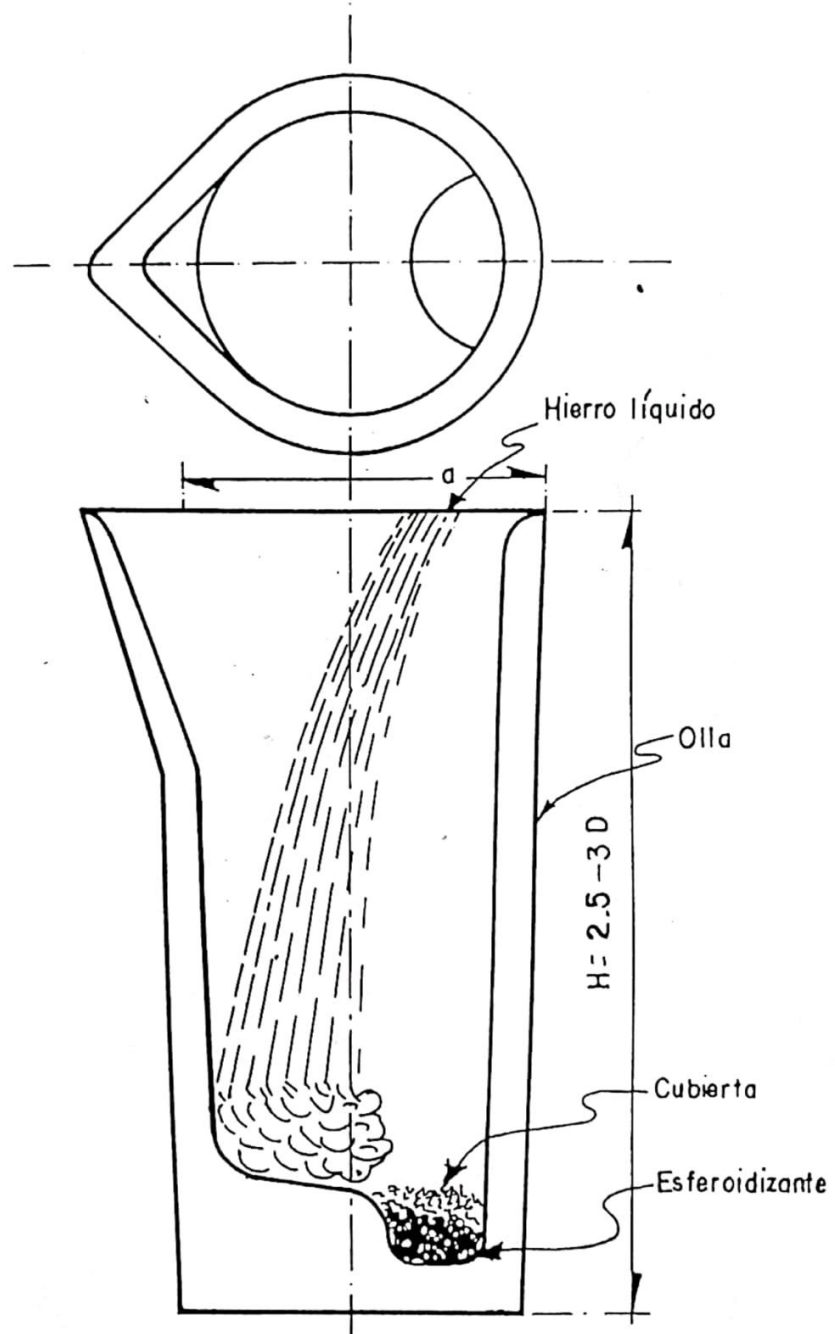


Ilustración 1. Olla para método de vaciado directo. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990)

---

**El método del sándwich.** La popularidad del método anterior condujo a una mejor técnica de tratamiento conocida como el método Sándwich (*Ilustración 2*). La configuración de la cuchara permanece en la forma similar al caso anterior excepto que el fondo de la cuchara tiene una depresión o desnivel para retener la aleación de tratamiento. El término sándwich se basa en el hecho, de que un material de recubrimiento o capas sándwich, se adiciona encima de la aleación esferoidizante antes de la adición de hierro fundido, para retardar el comienzo de la reacción. Este material generalmente es de pedantería de acero o placa en una proporción entre el 1-2% del peso total del baño. Además de la reacción retardante, el material de recubrimiento enfría el metal en la vecindad inmediata de la reacción del magnesio; y la recuperación de magnesio se incrementa cuando la temperatura disminuye. Del 50 al 75% de ferro silicio son utilizados como material de recubrimiento para mejorar la recuperación de magnesio y al mismo tiempo inocular e incrementar el contenido de silicio en el hierro hasta el nivel deseado. La recuperación de magnesio mejora sustancialmente con el tratamiento sándwich y puede llegar hasta 40 a 45%. Las ventajas son: tiempos de tratamiento más cortos, simplicidad, flexibilidad, alta recuperación de magnesio con menos escoria, humos, etc. La desventaja estriba en pérdidas ligeramente mayores debido al calentamiento adicional requerido para fundir de 1-2% del material de recubrimiento de acero.

## Método del sándwich

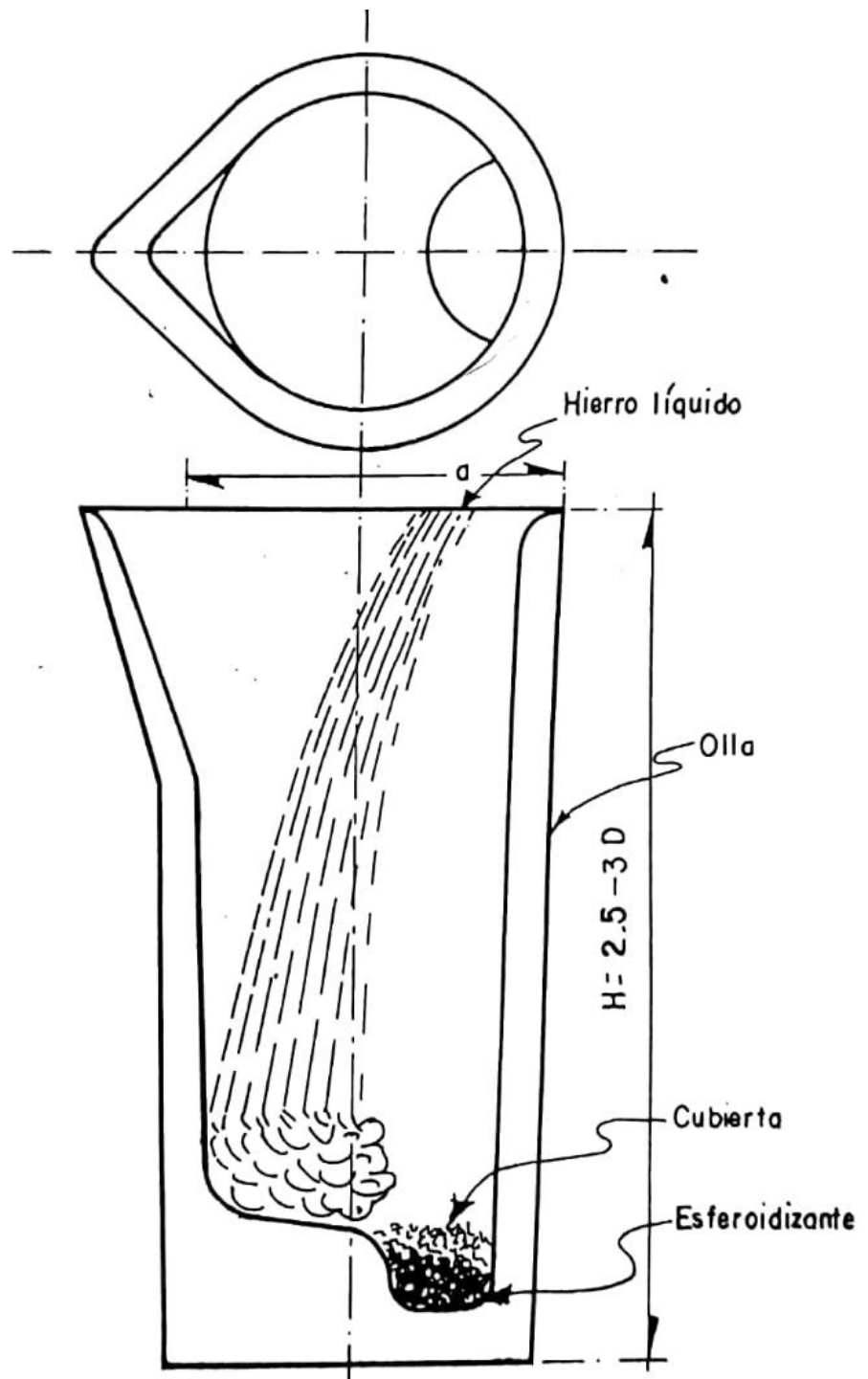


Ilustración 2. Olla para método sándwich. Tomado de. (Fundiciones de hierro, 1990)

---

**Método Trigger.** Fue desarrollado por International Mechanite Metal Company. En el método Trigger (*Ilustración 3*) se usa una olla en cuyo fondo se encuentra una cavidad para alojar el esferoidizante que contiene 5% de Mg. Este esferoidizante se cubre con una capa de carburo de calcio  $\text{CaC}_2$  con una granulometría de 0.3 a 0.7 mm, después de llenar la olla el  $\text{CaC}_2$  se funde parcialmente formando una cáscara de escoria, la cual, en determinado momento se perfora con una barra de acero. Después de la perforación comienza lentamente la reacción entre la esferoidizante y el hierro. En Checoslovaquia se usa en lugar de  $\text{CaC}_2$  el silicato de aluminio de granulometría de 1-30 mm la cual depende del tamaño de la olla.

*Método Trigger.*

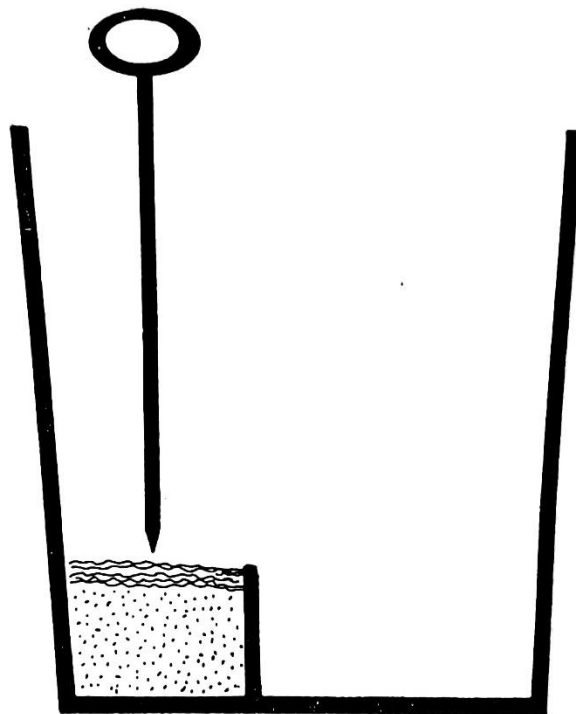


Ilustración 3. Olla para Método Trigger. (Fundiciones de hierro, 1990)

**Método Tundish-Cover.** Es una nueva modificación del método sándwich, descrita por primera vez por Forrest R. y Wolfenberger. El principio sobre el que se basa este método es el hecho de limitar la cantidad de aire (oxígeno) disponible, mientras ocurre la reacción líquido-esferoidizante ya que la olla es parcialmente cerrada por medio de una tapa en la parte superior de ésta (*Ilustración 4,5,6,7 y 8*). El metal base se vacía en un recipiente que contiene esta etapa y a través de un orificio de llenado se dirige al fondo de la olla por el extremo opuesto al lugar donde se encuentra el esferoidizante. El método tu Tundish-Cover se divide en 2 grupos básicos con diferentes modificaciones (tabla 3) .

Tapa móvil	Tapa fija	
	Con pequeños orificios de llenado	Con grandes orificios de llenado
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La tapa de la olla es móvil, lo que permite retirar la escoria formada durante el tratamiento.</li> <li>2. El hierro base puede tener alto contenido de azufre; <math>S &gt; 0,02\%</math>.</li> <li>3. Se tienen pequeños efectos pirotécnicos y poca cantidad de humos.</li> <li>4. Es necesario un trabajo adicional para retirar la tapa.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El hierro base debe tener bajo contenido de azufre; <math>S &lt; 0,02\%</math>.</li> <li>2. Se tienen pocos efectos pirotécnicos y poca cantidad de humos.</li> <li>3. No es necesario trabajo adicional para retirar la tapa.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El hierro base puede tener alto contenido de azufre; <math>S &gt; 0,02\%</math>.</li> <li>2. La escoria formada durante tratamiento puede ser de vaciado con la fundición líquida a través de un orificio grande de llenado.</li> <li>3. Mayores efectos pirotécnicos y cantidades de humos grandes.</li> </ol>

Tabla 3. Método *Tundish-Cover*. Ollas de tapa móvil y tapa fija. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990).



Método Tundish-Cover.

Diferentes construcciones de olla Tundish-Cover.

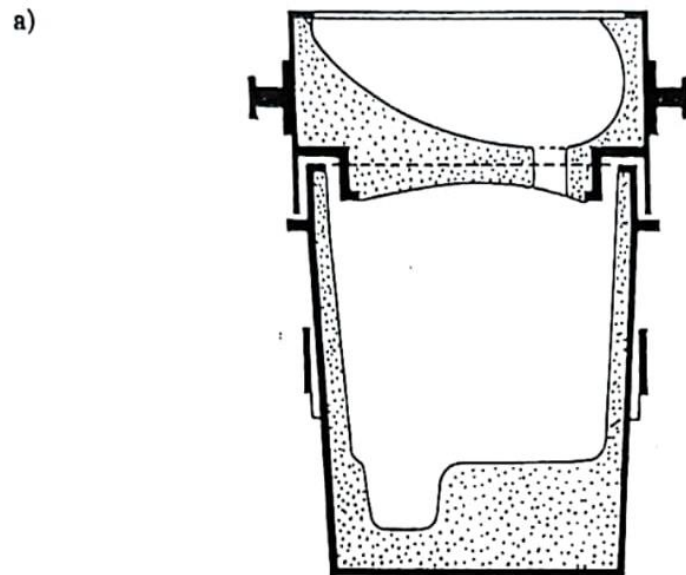


Ilustración 4. Olla Tundish-Cover tradicional. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990).

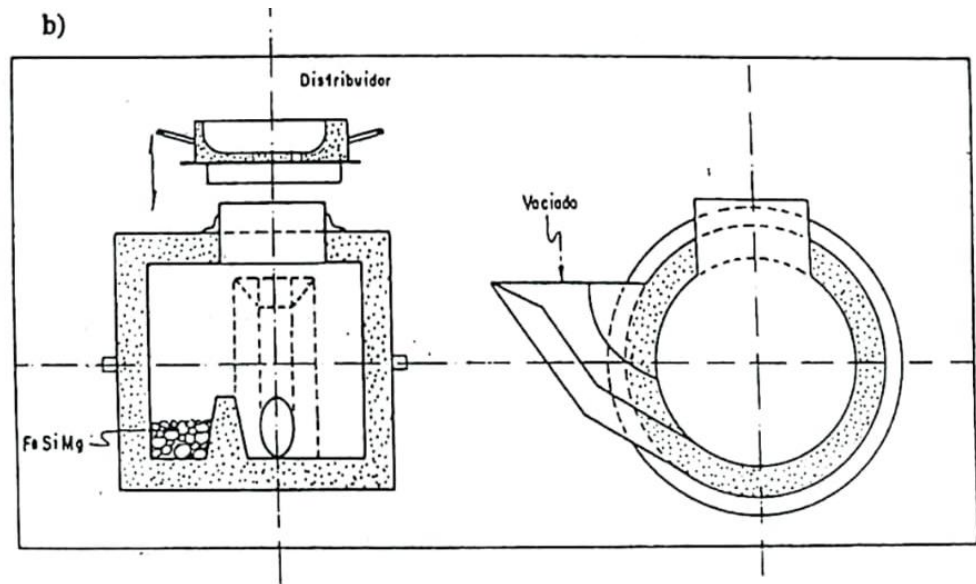


Ilustración 5. Olla tipo Mixto Top. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990).

## Método Tundish-Cover.

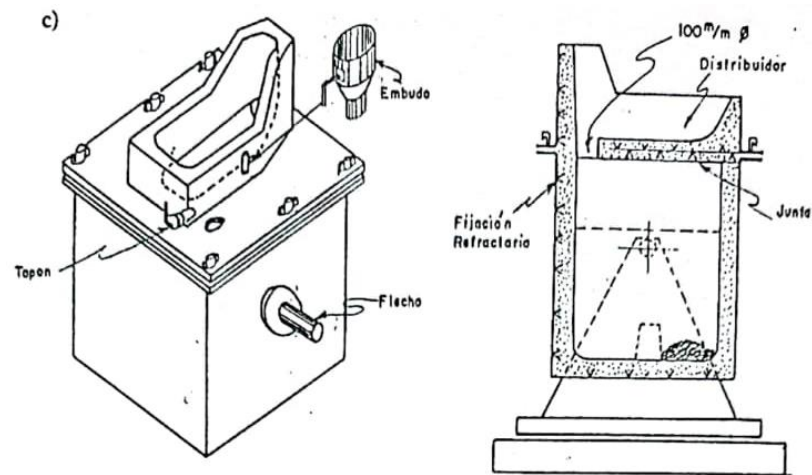


Ilustración 6. Olla tipo UPO. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990).

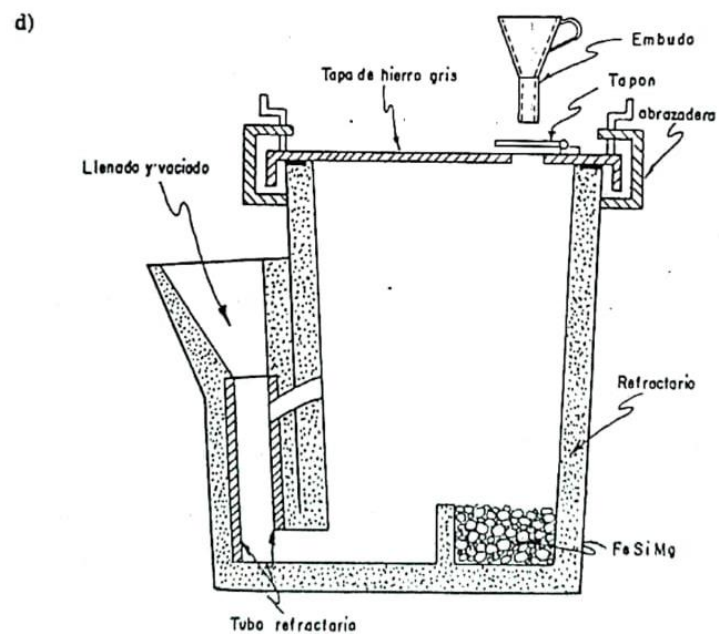


Ilustración 7. Olla tipo Teapod. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990).

### Método Tundish-Cover.

e)

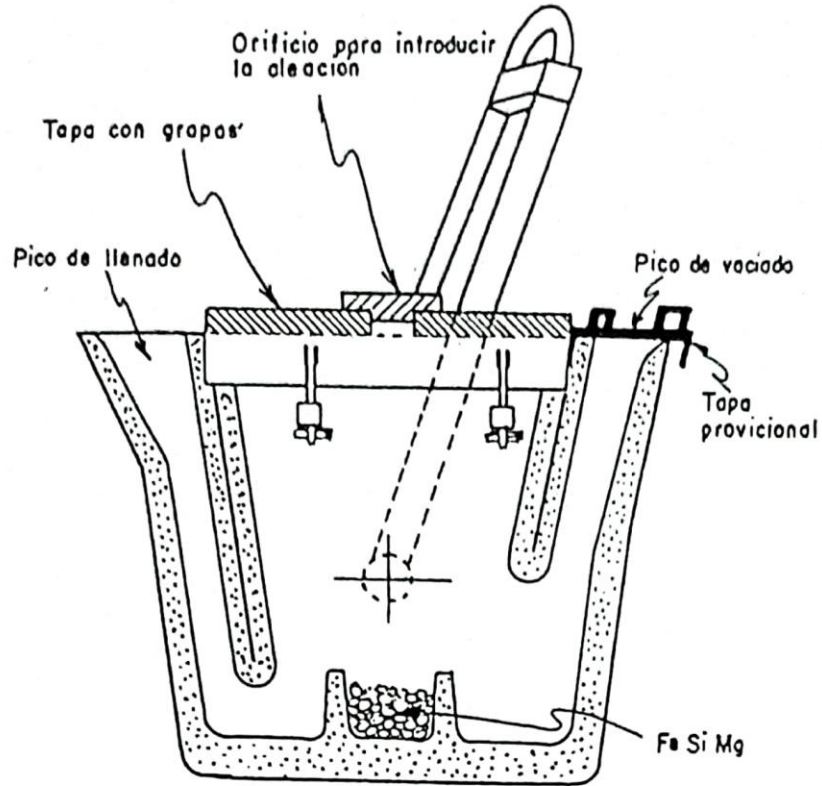


Ilustración 8. Olla tipo Teapot con doble pico. Tomado de (Fundiciones de hierro, 1990).

Este tipo de ollas se recomienda para las pequeñas y medianas fundiciones, asegurando los siguientes beneficios:

- Disminuye la generación de óxidos de Mg y el que se produce normalmente se deposita en la parte superior de la tapa de la olla. Además, la cantidad de humo que sale de la misma es mínima.
- Al reducirse la cantidad de Mg que se combina con el  $O_2$  del aire, lo cual aumenta el coeficiente de recuperación de

---

magnesio (a 60%), se aprecia una notable ventaja económica comparada con los métodos de la olla abierta y Sándwich.

- Desaparece por completo los relámpagos y las explosiones con proyección de partículas.
- Los costos de fabricación de hierro nodular son bajos en comparación con los métodos de olla abierta y Sándwich tradicional.

***Método de inmersión.*** Entre otras cosas el grado de avance de la reacción entre el hierro fundido y la aleación esferoidizante, determina la eficiencia del proceso de tratamiento individual. Los métodos descritos anteriormente son bastante efectivos, pero en algunos casos la técnica de inmersión es superior. Un refractario en forma de campana que contiene el material esferoidizante, se sumerge profundamente dentro de la olla de hierro. Esta inmersión y mantenimiento del material por debajo de la superficie del hierro evita que el material flote y de aquí que usualmente se obtenga un incremento de la recuperación del magnesio. El material es priorizan que usualmente es mantenido en el refractario por medio de un envase metálico u otro recipiente adecuado. El tratamiento de inmersión es ampliamente usado y versátil el cual consta de las siguientes partes mostradas en la siguiente Ilustración. 1. Cilindro de aire, 2. Varilla de pistón, 3. Tapa, 4. Olla, 5. Línea de metal, 6. Campana de inmersión, 7. Levantamiento de olla.

Prácticamente todas las formas de materiales esferoidizantes son usadas incluyendo el coque impregnado de magnesio y combinaciones de tierras raras. La recuperación de magnesio mediante este método es elevado y puede exceder fácilmente al 50%, debido a que el método tiene la ventaja de requerir menos materiales esferoidizantes que los métodos antes mencionados. El costo adicional del refractario tipo campana y el trabajo, pueden, sin embargo, eliminar la reducción en costos. Otra ventaja es que no necesariamente se requiere de una olla completamente vacía,

para cada tratamiento como en los casos anteriores (olla abierta o Sandwich). La principal desventaja de este método es que existen mayores pérdidas de temperatura, debidas al montaje frío de refractario tipo campana. El proceso no es flexible para volúmenes pequeños a tratar. Además, el tiempo de tratamiento es mayor que en los métodos anteriores.

*Método de inmersión.*

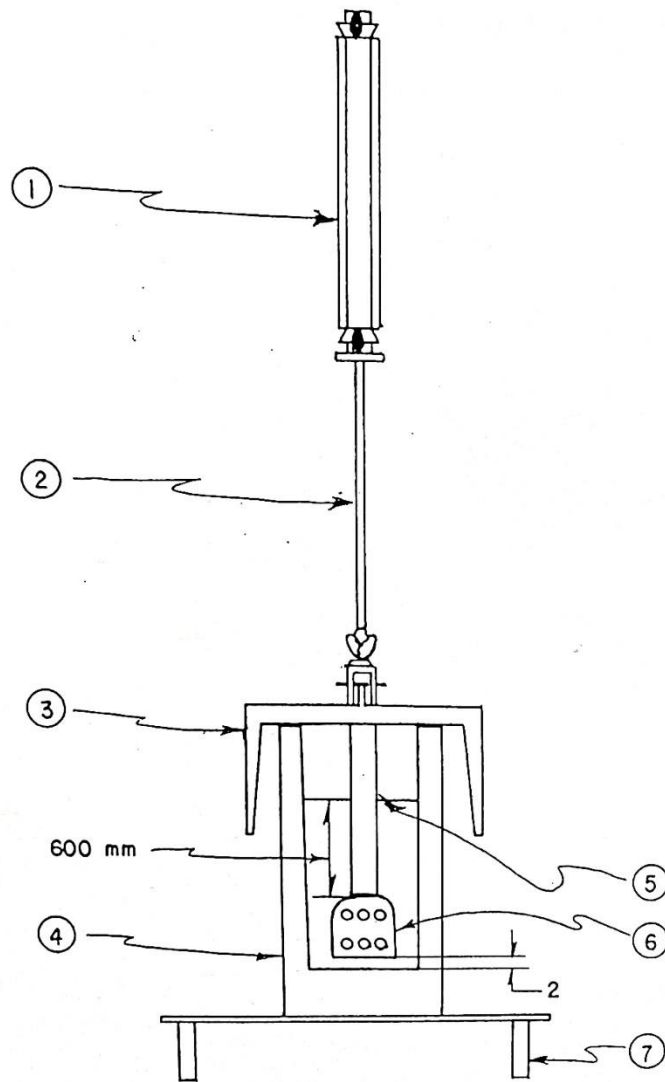


Ilustración 9. Olla de inmersión típica. Tomado de. (Fundiciones de hierro, 1990).

---

**Selección del método de tratamiento** La selección del método de tratamiento requiere de muchos factores. Las prioridades deben enfocarse hacia los factores más importantes después de las consideraciones debidas. Los criterios involucrados en seleccionar un método de tratamiento incluyen:

- **volumen a producir.** Tratamientos de volúmenes muy pequeños eliminan métodos, como el método de inmersión. La capacidad de cada planta puede dictar la cantidad de volumen a producir dentro de los límites muy estrechos.
- **Requisitos de temperatura.** Coladas de piezas ligeras de espesor delgado requieren hierro más caliente y podrían dictar el uso de métodos muy rápidos.
- **Costo.** Fundiciones que manejan altos volúmenes prefieren un tratamiento altamente eficiente con material para esferoidizar de bajo costo.
- **Posibilidades de mecanización.** Operaciones altamente repetitivas, que involucran trabajo manual, pueden ser más fácilmente mecanizarlas en algunos métodos específicos de tratamiento.
- **Simplicidad.** Falta de experiencia y confianza en la gente y la necesidad de equipo sofisticado puede ser un factor en la selección de equipo.
- **Consideraciones ambientales.** La evolución de humos varía en el método seleccionado.
- **Reproducibilidad.** La variabilidad inherente a algunos métodos puede ser muy grande para los requisitos de control de calidad.
- **Hierro base.** La cadencia de la colada y el equipo de fundición puedan resultar en hierro base, que elimina la posibilidad de uso de ciertos materiales y métodos de tratamiento.
- **Limitaciones físicas.** Distribución de planta, y la necesidad del pesado del metal tratado puede imponer restricciones.

- 
- **Tiempo de ciclo.** Las limitaciones de volumen deben considerarse desde el punto de vista del tiempo de ciclo o tiempo de permanencia después del tratamiento.
  - **Necesidad de inoculación.** Esta necesidad puede dictar la obligación de recuchareo y consecuentemente puede tener algún peso sobre el método de tratamiento a seleccionar.

#### **2.2.1.5. inoculación de hierro nodular.**

##### ***Objetivo del tratamiento de inoculación.***

Para la fabricación de hierro nodular de alta calidad hay que realizar también un tratamiento tecnológico a saber (tratamiento de inoculación de hierro), lo cual aumenta el número de gérmenes de grafito durante la solidificación de la pieza fundida. Si no se realiza este tratamiento entonces es imposible obtener piezas fundidas en zonas duras en las paredes delgadas. Estas piezas tienen propiedades mecánicas no homogéneas, sus paredes delgadas no se pueden maquinar, por lo que quedan defectuosas y es necesario darles un tratamiento térmico. En ambos casos los costos de producción aumentan, lo cual siempre es indeseable.

El proceso de inoculación aumenta el grado de nodulización, el número de las esferas de grafito disminuye sus dimensiones y hace la estructura de hierro más homogénea en comparación con las piezas fundidas no inoculadas.

***Elección del tipo de inoculante.*** Existen cerca de 200 diferentes tipos de inoculantes, el técnico debe saber elegir cuál de ellos es el más apropiado para la producción de hierro nodular. Se sabe que el primer paso es eliminar los inoculantes que contienen elementos

antiesferoidizantes. De la experiencia práctica de muchos años resulta, que los inoculantes más usados para la fabricación de hierro nodular son los representados (tabla 2). De ellos, el más frecuentemente usado en la industria, el inoculante número 1, es decir Fe-Si, mediante el cual se produce alrededor del 75% de la producción mundial de hierro nodular.

Inoculante	Composición química									
	Si	Al	Ca	Sr	Mg	Ba	Mn	Zr	Otros	Fe
1	74-69	0,6-1,2	0,5-1,0	—	—	—	—	—	—	resto
2	60-65	1,0-1,5	1,5-3,0	—	—	4,6	9,12	—	—	resto
3	60-65	0,75-1,25	—	—	—	0,6-0,9	5,7	5,7	—	resto
4	74-75	0,6-1,1	1,2	—	—	—	—	—	—	resto
5	46-50	1,5	0,6-0,9	—	—	—	—	—	—	resto
6	46-50	1,25	0,6-0,9	—	1,0-1,5	—	—	—	—	resto
7	58-61	0,9-1,2	0,5-0,7	—	2,0-2,5	—	—	—	—	resto
8	73-78	0,5	0,1	0,6-1,0	—	—	—	—	—	resto
9	74-78	1-3	2,2-2,5	—	—	—	—	1,25-1,75	—	resto

Tabla 4. *Composición química de diferentes inoculantes.* Tomado de (Composición química de inoculantes, 1994)

Su influencia sobre la estructura se muestra (ilustración 8), donde resulta que sin el proceso de inoculación se obtiene poca cantidad de nódulos irregulares y muchos carburos. Debido a esto se obtiene alta dureza y baja elongación. En cambio, después del tratamiento de nodulización, obtenemos un importante número de granos auténticos que tienen una forma más adecuada en una matriz sin ledeburita con mayor cantidad de ferrita.



### *Elección del tipo de inoculante.*

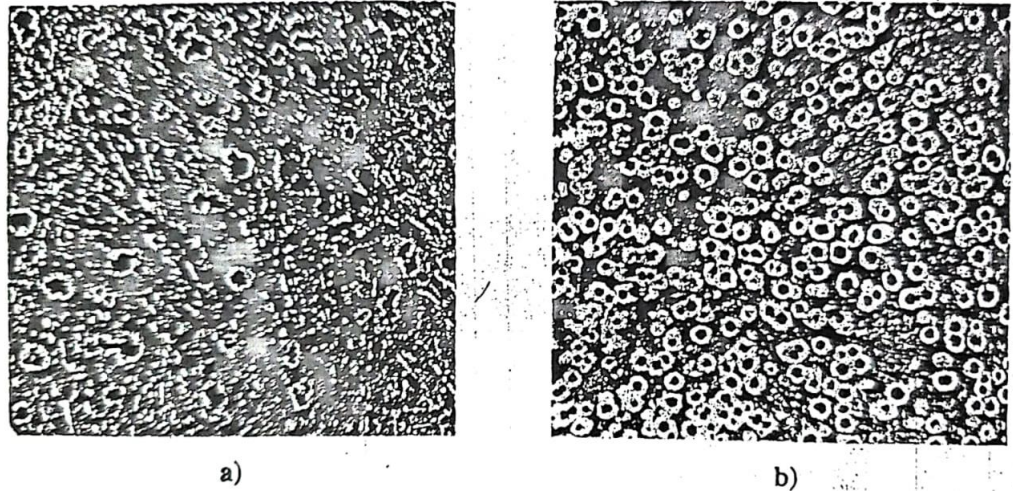


Ilustración 10. Influencia de la inoculación sobre la estructura del hierro nodular. a) Hierro base después de esferoidización, pero antes de Inoculación; b) hierro después de esferoidización e inoculación. Tomado de (Fras, Serrano Toledo, & Bustos Acalá, Eleccion de tipo de inoculante, 1994).

Por esta razón, se modifican en las propiedades mecánicas de la fundición, es decir, la dureza disminuye y aumenta la elongación. El consumo de inoculante considerado, depende las paredes de las piezas fundidas que se fabrican. De los resultados de las investigaciones experimentales que para la fabricación de piezas fundidas que tengan paredes con espesor de 10 a 25 mm se debe introducir en el baño 0.7% del inoculante. En cambio, cuando se producen piezas fundidas, que tienen paredes más delgadas, el consumo de inoculante aumenta y es del orden del 1% para paredes de 6 mm.

El inoculante complejo número 2 contiene tres inoculantes simples, es decir, Aluminio, Calcio, Bario y también un suplemento de Manganeso. El Manganeso en este inoculante disminuye la temperatura de fusión. Debido a esto, el inoculante 2 se disuelve más rápido en el baño que otros inoculantes. Cuando esta aleación se usa para la postinoculación de hierro

---

dúctil no se debe usar en cantidades excesivas. La adición recomendada es de 0.25 a 0.40% dependiendo del tamaño de sección de la pieza fundida. En estas cantidades la adición de Cilicio será un máximo de 0.25% el cual es 0.50% menor que una adición de 1% de ferro silicio al 75%. A menudo esta adición más baja de Silicio puede ser ventajosa si se requiere una cantidad mayor que la recomendada para lograr los resultados deseados. Esta puede ser reemplazada por ferrosilicio al 75%. El uso de cantidades excesivas de cualquier postinoculante, puede ocasionar escoria excesiva y posiblemente invierta el efecto de reducción del temple superficial, además, no es económico usar más de la cantidad recomendada.

El inoculante número 3, es otro inoculante bien conocido y comercial que se desempeña bien en el hierro gris y dúctil. Además de Aluminio y Calcio, este inoculante contiene Barios, Magnesio y Zirconio. Como en los otros inoculantes, los tres primeros elementos funcionan como agentes nucleadores. El Manganeso reduce el punto de fusión de la aleación, causado así que se disuelva rápidamente en el hierro fundido. El Zirconio se puede cambiar con el oxígeno y nitrógeno en el metal fundido y por consiguiente facilita el proceso de nucleación del grafito. Como el inoculante número 2, esta aleación no debe ser agregada en cantidades excesivas. Los compuestos de circonio son relativamente pesados y pueden ser atrapados en el metal durante la solidificación.

El inoculante número 4 ya ha sido cubierto durante la discusión del inoculante 1. Como se estableció antes, este ferrosilicio más alto en calcio no es ampliamente usado debido a que puede causar escoria excesiva en el hierro fundido, aumentando el peligro de atrapar escoria en las piezas fundidas.

El inoculante número 5 contiene 50% ferrosilicio, suficiente aluminio y calcio, para nuclear efectivamente el grafito en el hierro gris y nodular.

---

En muchos casos este producto puede reemplazar la inoculación de ferrosilicio de grado 75%. Sin embargo, este no siempre puede funcionar tan efectivamente como el ferrosilicio de 75%. Por esta razón los rendimientos comparativos de cada post-inoculantes deben ser evaluadas antes de tomar una decisión final.

El inoculante número 6 es una modificación del número 5 por la adición de 1 a 1.5% Mg. Este último inoculante trabaja muy bien en los hierros nodulares tratados con las aleaciones de ferro-silicio-magnesio. De hecho, es posible realizar los tratamientos de nodulización con menor cantidad que las cantidades normales de aleaciones de ferro-silicio-manganeso, considerando la adición de Magnesio tardío, introducido en el postinoculante para proveer la diferencia de magnesio necesaria para obtener una buena nodulización. Así, esta aleación sirve para un propósito doble, principalmente asistiendo en el tratamiento de neutralización y simultáneamente postinoculando el hierro, lo cual nos permite usar una cantidad menor del esferoidizante, consecuentemente se genera una menor cantidad de humos y se disminuyen los costos. Los reportes de campo indican una recuperación del 70% de magnesio de este inoculante. El rango de adición normalmente es alrededor del 0.3%.

El inoculante número 7 es un producto que se ha estado disponible por casi 20 años. Este contiene Calcio y Aluminio para propósitos de nucleación y un promedio de 2.25% de magnesio para corregir el desvanecimiento de magnesio durante períodos de retención entre los tratamientos de modulación y nodularización. Este también contiene nitrato de sodio, el cual produce una reacción exotérmica y permite que la aleación se disuelva rápidamente en el hierro fundido sin reducir la temperatura del metal. Este inoculante es especialmente efectivo para una última adición inoculante, cuando el metal fundido ha sufrido pérdidas considerables de temperatura. Debido al nitrato de sodio, se genera algo

---

de humo durante la adición de esta aleación. Sin embargo, no se ha sabido que sea tóxica en alguna forma. La proporción de adición normalmente es de 0.3 a 1.0%.

El inoculante número 8 es un producto muy conocido para inoculación de hierro gris y dúctil. Se trata de un ferro silicio al 75%. Bajo en calcio y en aluminio, conteniendo además ser 0.60 a 1.0% de Estroncio, para su poder de germinación nodular. La experiencia muestra que, en los productos de hierro nodular, si los niveles de calcio y serio de la aleación nodulizante son demasiados altos (realmente ninguna cantidad específica se ha mencionado), este inoculante no tiene ninguna ventaja con respecto al inoculante de ferrosilicio de grado 75%, cuyo costo es menor. Otros consumidores de este producto han expresado que, para tener una buena nucleación de grafito esferoidal, los contenidos de aluminio y magnesio de hierro base deben ser al menos 0.05% y alrededor de 0.10%, respectivamente.

El inoculante número 9 es otra aleación usada para tratar de revivir nodular y gris moldeado. Este producto es más alto en silicio que otros inoculantes. También contiene cantidades controladas de aluminio, calcio y circonio. Para fundiciones en la arena verde, el producto con un contenido de 1.00 a 1.50% de aluminio, se recomienda para evitar la formación de poros llamados “pinholes” (ilustracion 9).

---

### *Pinholes*

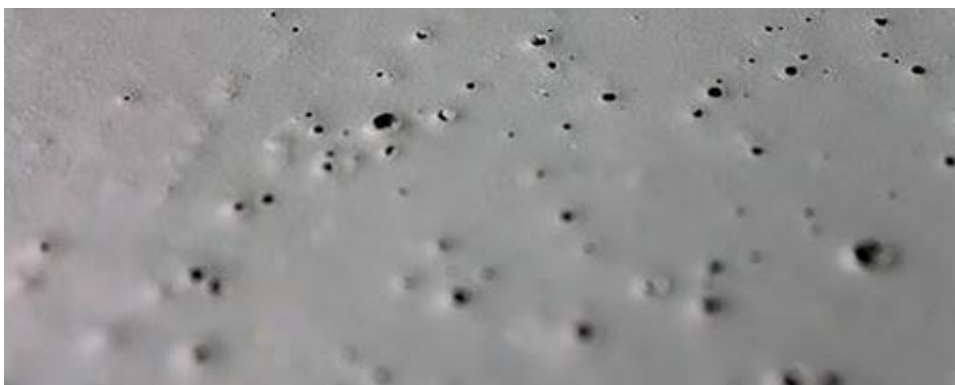


Ilustración 11. Poros en las piezas causadas por alto contenido de aluminio en el inoculante. Obtenido de (ASI International, 2002).

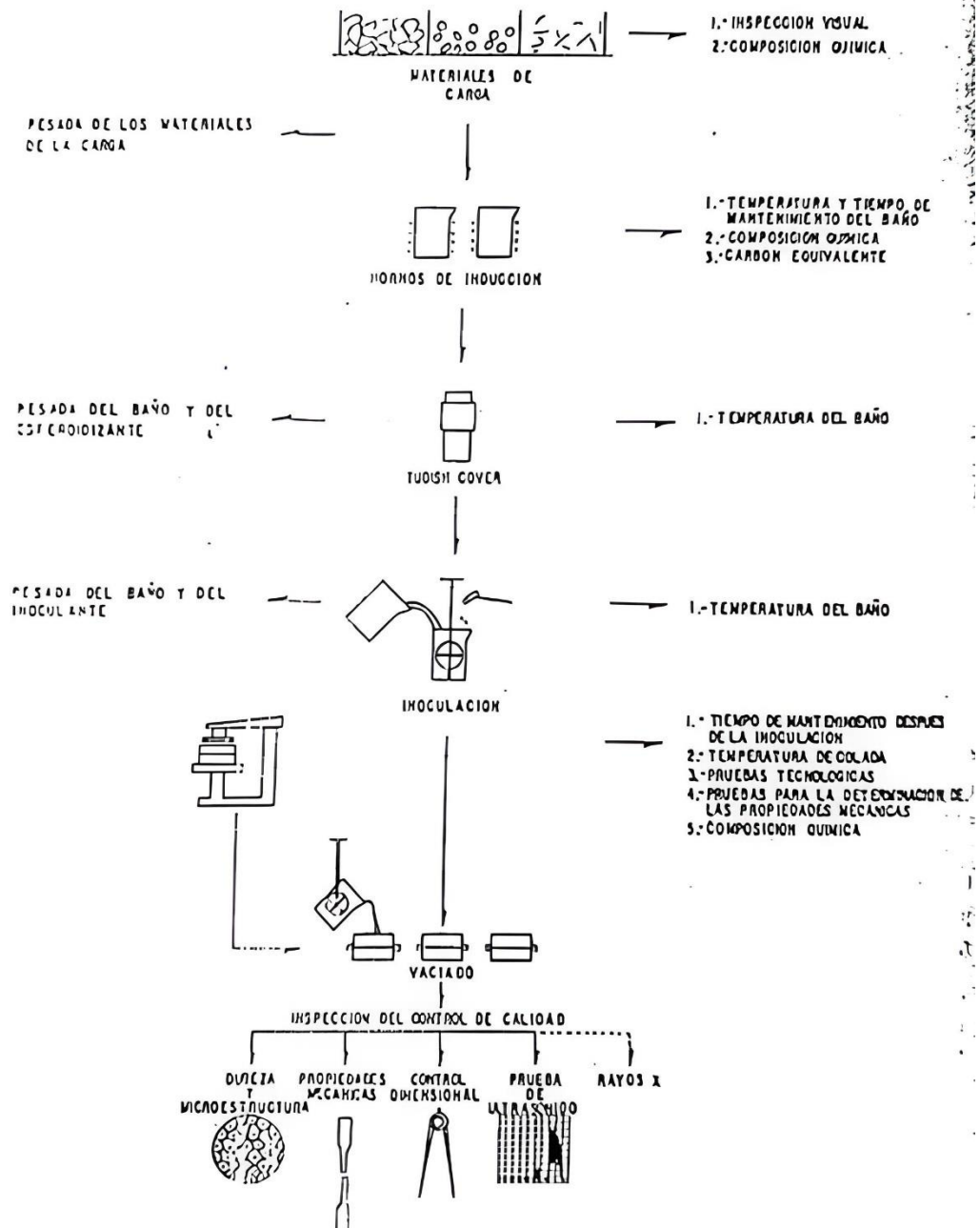
Para aplicaciones en molde seco, el contenido de aluminio puede estar en el rango de 2 a 3%. El aluminio en este rango puede ser benéfico para controlar la tendencia al temple superficial (chilling) y la formación subsecuente de carburos en las piezas fundidas de hierro gris. El circonio se puede combinar con el oxígeno y nitrógeno para formar compuestos estables y de este modo evitar que estos elementos causen porosidades en las fundiciones. Home nosotros inoculantes, el calcio actúa como un efectivo agente nucleador, para la precipitación de grafito esferoidal durante la solidificación de las fundiciones de hierro dúctil. La adición recomendada de este producto para postinoculación de hierro dúctil varía de 0.2 a 1.0%.

#### **2.2.1.6. Control de la fabricación de hierro nodular.**

La obtención de hierro nodular de alta calidad no es posible sin un control preciso de las diferentes etapas de su fabricación una especificación precisa de un control completo sería demasiado extenso, lo cual queda fuera del alcance de este trabajo. Por esta razón, nos limitaremos solamente a presentar un ejemplo (ilustración 10). En dicha figura se resumen los pasos más importantes para el control de la

fabricación de hierro modular, utilizando un horno de inducción y el método tundish-discover.

### *Control de la fabricación de hierro nodular.*



Ilustracion 12. Esquema de control de la fabricación de hierro nodular. Obtenido de. (Control de la fabricación de hierro nodular, 1994).

## **3. CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.**

---

### 3.1 Hipótesis.

Las cantidades de nodulizante (ferro silicio magnesio 5911) agregadas al metal líquido influye en la formación de grafito esferoidal, en la microestructura y determina el índice de calidad del metal para las piezas fabricadas.

- **Variables independientes.**

Cantidad de nodulizante agregado

- **Variables dependientes.**

Formación de grafito esferoidal y calidad del metal.

- **Variables intervinientes.**

Materiales introducidos en el horno de cubilote:

Caliper de freno.

Retorno de hierro nodular.

Coque (carbón).

Temperatura del hierro líquido

#### a) Enfoque de la investigación.

Dado que se busca comprobar la hipótesis previamente establecida, el presente trabajo será elaborado bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo. Este enfoque permitirá la recopilación de datos sobre el proceso que se está usando actualmente en JL FUNDICIÓN, así mismo, permitirá usar técnicas y herramientas matemáticas para cuantificar y analizar las variables ya mencionadas que influyen dentro del proceso de la fabricación del hierro nodular.

#### b) Diseño de la investigación.

##### i. Alcance de la investigación.

El alcance de esta investigación es explicativa ya que tiene como objetivo principal explicar las causas y efectos de una variable (la cantidad de nodulizante), y se basa en una hipótesis, la cual propone que una variable (cantidad de nudulizante) influye directamente en otras variables



---

(Formación de grafito esferoidal y calidad del metal), el objetivo de la investigación explicativa es probar esta hipótesis y proporcionar una explicación clara y detallada de la relación entre las variables.

## **ii. Tipo de estudio.**

Por como se presentan las variables y el tiempo de la obtención de los resultados, el método tradicional de experimentación, en las investigaciones exploratorias, lo hacen candidato para ser utilizado en este trabajo. El mismo consiste en realizar experimentos en los cuales varía solamente un parámetro y se mantienen constante todo los demás; de este modo, la variación de las respuestas se puede atribuir entonces a un solo factor que es el nodulizante. El tipo de estudio de las variables es similar al que se utiliza en un laboratorio, lo cual es un candidato perfecto para estudiar el comportamiento de estas, ya que en este tipo de estudios se lleva a cabo en un ambiente controlado, donde se pueden manipular las variables de interés para el estudio y se pueden controlar los factores que podrían interferir con los resultados.

## **iii. Técnicas, instrumentos y herramientas.**

### **Técnica.**

Observación directa. Para esta investigación el método a utilizar para la obtención de hierro nodular, la técnica de observación directa es perfecta, ya que esta técnica implica la recopilación de información y permitirá una comprensión detallada de cómo influye la cantidad de nodulizante en el proceso para la obtención de hierro nodular. Por otra parte, la observación directa proporcionara información en tiempo real lo cual es una gran ventaja ya que al obtener información en tiempo real permitirá tomar decisiones oportunas, identificar rápidamente posibles problemas y a su vez facilitar la coordinación en la obtención de los datos esto con el fin de mejorar la calidad de dichos datos. Mejorar la calidad de



---

los datos permite tomar decisiones, detectar y corregir errores de manera oportuna.

### **Instrumentos.**

Como instrumento a utilizar en esta investigación se utilizará una "Checklist". La Checklist será la guía y aliada principal en la evaluación del proceso para la obtención de hierro nodular. Su utilización brindará una estructura sólida y sistemática, y acercará a obtener resultados confiables y de alta calidad en nuestro estudio. Así mismo, será una herramienta importante para garantizar que todos los pasos necesarios se lleven a cabo de manera rigurosa y que no se omita ningún elemento crítico en la investigación (ver anexo 1).

### **Herramientas.**

- Olla de tratamiento: es utilizada para hacer el tratamiento del hierro fundido para la obtención de hierro nodular,
- Ollas de transporte: son usadas para el transporte de hierro nodular fundido a los moldes.
- Báscula digital: utilizada para pesar el nodulizante.
- Báscula de plataforma: utilizada para pesar las cargas de metal y el coque.
- Torno: utilizado para dar forma a las probetas.
- Máquina de prueba universal TENSILON RTG: utilizada para hacer las pruebas de compresión, tensión, flexión y esfuerzo.
- Microscopio metalográfico: este instrumento permite observar la microestructura de las muestras de hierro nodular, lo que es fundamental para entender su comportamiento y propiedades.
- Espectrómetro de emisión óptica: con este equipo se puede analizar la composición química de las muestras de hierro nodular, lo que es útil para determinar la cantidad de

---

elementos como carbono, silicio, manganeso, nitrógeno, entre otros.

#### **iv. Muestreo de la investigación.**

Para el desarrollo de nuestro estudio, se ha planificado realizar un total de nueve corridas con el objetivo principal de evaluar el efecto del nodulizante en el proceso para la obtención de hierro nodular. Estas corridas nos permitirán analizar y comprender en detalle cómo diferentes cantidades de nodulizante afectan la estructura.

Cada una de las nueve corridas representará un experimento independiente en el cual se variará la cantidad de nodulizante utilizado en el proceso. Esta variación nos brindará información valiosa. En cada corrida, utilizaremos una cantidad de metal líquido y añadiremos una cantidad específica según el diseño experimental previamente establecido. Posteriormente, se llevará a cabo el proceso de solidificación y se obtendrá una muestra sólida que será sometida a un análisis metalográfico detallado.

---

## 4. CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Presentación de resultados

El grafito nodular se forma a partir de la adición de nodulizantes al hierro fundido y su posterior enfriamiento y solidificación. Sin embargo, para lograr la formación de grafito nodular de alta calidad, es necesario controlar cuidadosamente una serie de factores críticos en el proceso de fundición. Se desarrolló una serie de nueve tratamientos donde varía la cantidad de nodulizante y se mantienen, en promedio, algunos factores críticos para la obtención de hierro nodular. Los factores críticos se encuentran escritos en la siguiente tabla.

Num. De tratamiento	Cantidad de nodulizante en gr	Cantidad de hierro fundido	Tamaño del Coke	Temperatura en °C	Porcentaje de Azufre	Tiempo de enfriamiento
1	2000 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.018	30 min a 1h
2	2250 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.015	30 min a 1h
3	2500 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.017	30 min a 1h
4	2750 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.012	30 min a 1h
5	3000 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.010	30 min a 1h
6	3250 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.016	30 min a 1h
7	3500 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.013	30 min a 1h
8	3750 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.016	30 min a 1h
9	4000 gr	200 kg	150 a 175 mm	1350 a 1360	0.015	30 min a 1h

Tabla 5. Numero de tratamientos, cantidad de nodulizante y factores críticos para la obtención de hierro nodular.

Estos tratamientos se hicieron bajo supervisión y siempre basándonos en el control de producción. Este control es fundamental para el proceso del cual se obtuvieron resultados importantes y se muestran a continuación.



Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
1	2000 gr		

Tabla 6. La metalografía 1 muestra la presencia de grafito laminar.

Se llevó a cabo una prueba inicial con una cantidad de 2000 gr de nodulizante que nos ha permitido obtener información relevante sobre la metalografía de la primera muestra analizada. A través de este análisis, se pudo examinar detalladamente la estructura microscópica del material y, con base a la forma del grafito presente, hemos llegado a una conclusión preliminar: se trata de hierro gris.

Durante el examen metalográfico, se realizaron cortes finos de la muestra para luego ser preparados y observados bajo el microscopio. Al observar la imagen de la tabla 6, se pudo apreciar claramente la presencia de grafito con una forma laminar. Estas laminillas de grafito se encuentran distribuidas de manera interconectada en la matriz metálica del material, lo que es una característica típica del hierro gris.



Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
2	2250 g		

Tabla 7. Nota. Aún persiste el grafito laminar.

Esta segunda prueba contenía 2250 gramos de nodulizante y se llevó a cabo nuevamente el análisis metalográfico. Al examinar detalladamente la estructura microscópica de la muestra, se observan similitudes significativas con la metalografía de la muestra anterior. Con base a estas observaciones, se concluye que aún se trata de hierro gris. Al examinar la imagen de la tabla 7, se pudo apreciar una vez más la presencia de grafito con una forma laminar similar a la observada en la muestra anterior.


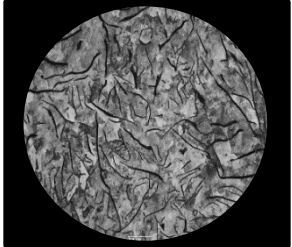
Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
3	2500 gr		

Tabla 8. Presencia de grafito robusto en la metalografía.

En la tercera prueba, se utilizó 2500 gramos de nodulizante y se llevó a cabo nuevamente el análisis metalográfico. Durante este análisis se observó nuevamente la presencia de grafito con una forma laminar, pero esta vez con características distintivas. Al examinar la imagen de la metalografía de la tabla 8, se observa que el grafito laminar es más robusto en comparación con las pruebas anteriores. Las laminillas de grafito son más gruesas y tienen una distribución interconectada por lo que se concluye que sigue siendo hierro gris y no ha logrado la nodulización deseada. La presencia del grafito laminar más robusto y su distribución interconectada indican que el material no ha experimentado una transformación adecuada en su estructura y continúa manteniendo las características del hierro gris.


Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
4	2750 gr		

Tabla 9. Combinación de grafito laminar y poco grafito compacto.

En la cuarta prueba, en la cual se utilizaron 2750 gramos de nodulizante, Nuevamente se ha observado la presencia de grafito con una forma laminar en la muestra analizada de la tabla 9. Sin embargo, en comparación con la prueba anterior, se puede apreciar que el grafito muestra un intento de adquirir una forma más compacta. El grafito sigue presentando una forma laminar, pero también se observan intentos de adquirir una forma compacta.


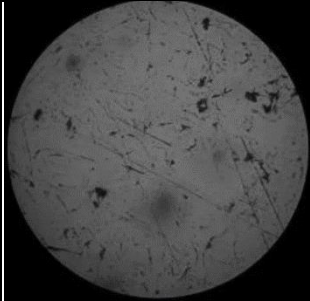

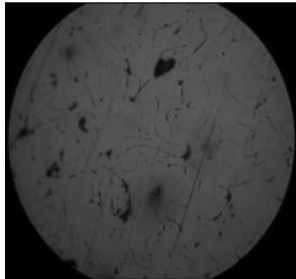
Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
5	3000 gr		

Tabla 10. Presencia de grafito compacto y grafito laminar

En la quinta corrida con 3000 gr de nodulizante el análisis metalográfico reveló resultados importantes. Al examinar nuevamente la metalografía, se observó una estructura que presenta tanto grafito laminar como un poco más de grafito compacto. El grafito ha adquirido una forma más compacta y vermicular a la anterior prueba, estos hallazgos indican que el material se trata de hierro con grafito compacto, también conocido como grafito vermicular

El grafito vermicular es un tipo de estructura intermedia entre el hierro gris y el hierro nodular. La presencia de grafito laminar y grafito compacto en la metalografía indica que el proceso de nodulización ha sido parcialmente exitoso. Sin embargo, es importante destacar que aún no se ha alcanzado una nodulización completa y el material resultante no puede clasificarse como hierro nodular puro.

Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
6	3250 gr		

Taba 11. Aun persiste el grafito laminar y el grafito compacto.

En la sexta prueba el análisis metalográfico de la muestra, utilizando esta vez 3250 gramos de nodulizante, mostró nuevos resultados, con una similitud con los resultados obtenidos en la prueba anterior, pero con una diferencia significativa en la presencia de grafito laminar y grafito compacto.



En comparación con las pruebas anteriores, la metalografía de la tabla 11 indica una menor presencia de grafito laminar y una mayor cantidad de grafito compacto. Esto significa que la cantidad de nodulizante utilizada en esta corrida ha tenido un mayor impacto en la estructura del material en comparación con las pruebas anteriores.

La disminución del grafito laminar y el aumento del grafito compacto sugieren que la nodulización del hierro está progresando en la dirección deseada.


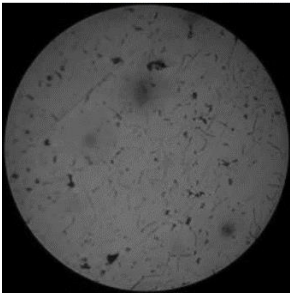
Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
7	3500 gr		

Tabla 12. La presencia del grafito en la metalografía tiende a ser más redondo.

En la séptima prueba utilizando 3500 gr de nodulizante y llevando a cabo el análisis metalográfico de la muestra. Los resultados obtenidos en esta metalografía son de gran relevancia, ya que muestran avances en la estructura del material en comparación con las pruebas anteriores.

Al examinar la metalografía, se observó una presencia muy mínima de grafito laminar casi nula y una mayor cantidad de grafito compacto. Además, el grafito compacto presente en esta prueba de la tabla 12, tiende a ser más redonda y esferoidal en comparación con la prueba anterior.

La disminución significativa en la presencia de grafito laminar y el aumento en la cantidad de grafito compacto con forma más redonda son indicadores positivos de una nodulización más completa del hierro. Aunque el material resultante todavía se clasifica como hierro compacto, se observa una clara tendencia hacia la formación de hierro nodular.


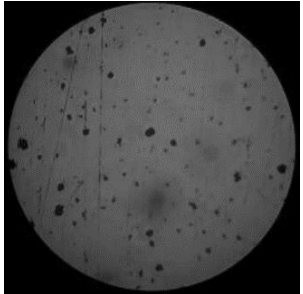
Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
8	3750 gr		

Tabla 13. Presencia de grafito esferoidal y muy poco grafito laminar.

En la octava prueba utilizando 3750 gramos de nodulizante y llevando a cabo el análisis metalográfico de la muestra, los resultados obtenidos en esta metalografía son muy alentadores, ya que muestran avances muy notorios en la estructura del material.

Al observar la nuevamente la metalografía de la tabla 13, se pudo apreciar una formación notable de grafito esferoidal y una mínima cantidad de grafito compacto en comparación con las pruebas anteriores. Esta observación indica una mejora sustancial en la nodulización del hierro. Sin embargo, aún se observa una cantidad mínima de grafito compacto que no está bien definido en forma de nódulos.

A pesar de la presencia residual de grafito compacto, los resultados sugieren claramente que el material resultante de esta octava prueba puede clasificarse como hierro nodular.


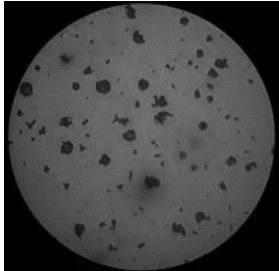
Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
9	4000 gr		

Tabla 14. Presencia de grafito esferoidal definido y nada de grafito lamiar.



En la última prueba utilizamos 4000 gramos de nodulizante y llevamos a cabo el análisis metalográfico. Los resultados obtenidos en esta metalografía son extremadamente importantes y nos permiten concluir de manera contundente que el material obtenido en esta prueba es hierro nodular al 100%.


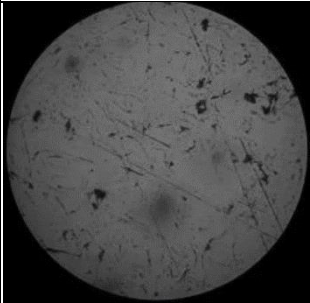
Al examinar la metalografía de la tabla 14, se pudo apreciar de manera evidente la formación de grafito esferoidal, que es una característica distintiva del hierro nodular. Además, se observó que el hierro compacto, que estuvo presente en pruebas anteriores, ha sido completamente transformado y sustituido por la estructura deseada de grafito esferoidal.


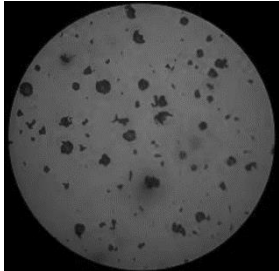
Este avance representa un logro en nuestro proceso de nodulización. La formación completa de grafito esferoidal indica que hemos alcanzado una nodulización exitosa y obtenido hierro nodular al 100%.

## 4.2 Análisis de resultados.

los resultados experimentales que confirman la hipótesis afirmando que diferentes cantidades de nodulizante (ferro silicio magnesio 5911) influye en la formación de grafito esferoidal en la producción de hierro nodular.

Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
1	2000 gr		

Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
5	3000 gr		

Num	Cantidad en gr de nodulizante	Muestra	Análisis metalográfico de la estructura
9	4000 gr		

Las tres tablas presentadas anteriormente son de vital importancia para comprender el efecto de la cantidad de nodulizante agregado al metal líquido en la formación del grafito esferoidal. Estas tablas, basadas en los resultados de nuestro experimento, demuestran de manera clara y coherente cómo la cantidad de nodulizante utilizado tiene un impacto directo en la estructura microscópica del grafito.

En la primera tabla, correspondiente a la adición de 2000 gramos, se observa una estructura de grafito predominantemente laminar. Esto indica que la cantidad utilizada no fue suficiente para lograr una nodulización completa y la formación de grafito esferoidal. Aunque se pueden apreciar ciertas áreas con grafito compacto, su presencia es limitada en comparación con el grafito laminar.

En la segunda tabla, donde se agregaron 3000 gramos, se observa una combinación de grafito laminar y grafito compacto. Esto indica que la adición de una mayor cantidad de ha permitido una nodulización parcial, lo que se refleja en la presencia de grafito compacto junto con el grafito laminar. Sin embargo, aún no se han formado nódulos bien definidos en toda la estructura.

En la tercera tabla, correspondiente a la adición de 4000 gramos de, se aprecia claramente la formación de nódulos bien definidos sin la

presencia de grafito compacto. Esto indica que la cantidad de nodulizante utilizada en esta prueba fue suficiente para lograr una nodulización completa y la formación exclusiva de grafito esferoidal. La estructura microscópica muestra una distribución homogénea de los nódulos de grafito, lo cual es altamente deseable en el hierro nodular.

Estos resultados corroboran de manera concluyente que la cantidad de nodulizante utilizado en el proceso tiene un impacto directo en la formación del grafito esferoidal. A medida que se aumenta la cantidad, se observa una transición gradual de la estructura laminar del grafito hacia una estructura combinada de grafito laminar y compacto, y finalmente hacia una estructura exclusiva de grafito esferoidal bien definido. En resumen, las tres tablas presentadas muestran claramente la relación entre la cantidad de nodulizante y la formación de grafito esferoidal.

A continuación, se presenta el análisis químico de la muestra número 9. El análisis químico se realizará para determinar la composición química exacta, lo que nos permitirá comprender mejor sus propiedades y características.

Es importante destacar que esta muestra fue seleccionada específicamente para este análisis ya que la estructura es más completa en comparación con las otras. Con la realización de estos análisis, podremos obtener una comprensión más completa de las propiedades químicas de la muestra, lo que a su vez nos permitirá obtener información valiosa para el proceso de la producción de hierro nodular y su relación con la formación de grafito esferoidal.

### ***Análisis químico.***

Type	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	%	%	%	%	%	%	%
< x >	3.29	2.64	0.329	0.0094	0.0123	0.0411	0.004

Type	Ni	Al	Co	Cu	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%
< x >	0.0255	0.0131	0.028	0.114	0.0028	0.0557	93.5

---

El análisis químico realizado en la muestra en cuestión revela la presencia de varios elementos en diferentes concentraciones. Los elementos analizados que contiene la muestra son: carbono (C), silicio (Si), manganeso (Mn), fósforo (P), azufre (S), cromo (Cr) y molibdeno (Mo), así como también níquel (Ni), aluminio (Al), cobalto (Co), cobre (Cu), vanadio (V), tungsteno (W) y hierro (Fe).

Los resultados del análisis químico se presentan en porcentajes (%), y se obtuvieron valores medios (indicados como  $\bar{x}$ ) para cada elemento. Se encontró que la muestra tiene un contenido de carbono del 3,29%, lo que indica que se trata de un material con un alto contenido de carbono. El silicio y el manganeso se encuentran presentes en concentraciones del 2,64% y 0,329%, respectivamente.

En cuanto a los elementos traza, se encontró una concentración de níquel del 0,0255%, y de aluminio del 0,0131%. También se detectó la presencia de cobalto y cobre en concentraciones de 0,028% y 0,114%, respectivamente. El vanadio y el molibdeno se encontraron presentes en bajas concentraciones, con valores del 0,0028% y 0,0557%, respectivamente.

En términos de impurezas, se encontró una concentración de fósforo del 0,0094% y de azufre del 0,0123%, lo que indica que la muestra contiene cantidades relativamente bajas de estas impurezas. El contenido de cromo se encontró en un valor del 0,0411%.

Finalmente, el análisis químico reveló que la muestra contiene una alta proporción de hierro, con un valor del 93,5%. Esto no es sorprendente, dado que la muestra se trata de hierro nodular.

---

## 5. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

### 5.1 Discusión

Los resultados de este trabajo demostraron de manera concluyente que la cantidad de nodulizante utilizado tiene un efecto directo en la formación del grafito esferoidal y en su microestructura. Como se observó en las metalografías previas, al agregar las diferentes cantidades se pudo apreciar un cambio importante en la estructura del grafito.

Estos hallazgos respaldan la afirmación de Frías, Serranos, & Bustos, 1990 donde recomiendan un contenido de ferro-silicio magnesio en el rango del 2% al 3% para obtener mejores resultados, especialmente en el método sándwich. Además, se sugiere que el contenido de azufre no supere el 0.02% para evitar efectos negativos en la calidad del material. Además, como se mencionó anteriormente en el aparatado de la problemática, los materiales para un fundidor juegan un papel muy importante ya que de este dependerá la calidad de las piezas fabricadas, dado que si utilizamos malos materiales obtendremos malos resultados.

La investigación también concluyó que el tiempo de desmoldeo no es importante, algo que no coincide con el trabajo de NATERA, 2015 donde menciona que el tiempo de desmoldeo afecta la microestructura de la pieza. A mayor tiempo de desmoldeo produce un crecimiento de los nódulos de grafito, reduciendo el porcentaje de perlita con un consecuente aumento de ferrita en el área circundante al nódulo. En nuestro estudio no se encontró una conexión significativa entre ambos. Según nuestro resultado obtenido, el tiempo de desmoldeo no parece tener un impacto directo en la formación y características de los nódulos de grafito.



---

Sin embargo, lo que sí se pudo evidenciar de manera contundente fue el efecto directo de la cantidad de nodulizante en los resultados obtenidos. A medida que se aumentó la cantidad, se aprecia una mayor formación de grafito esferoidal y una microestructura más deseable en las piezas fabricadas. Aunque es importante destacar que, si bien no se mostró una influencia clara en nuestros resultados, podrían existir otros factores que no se tuvieron en cuenta en este estudio específico y que podrían ser objeto de investigación futura.

La investigación llevada a cabo para la obtención de hierro nodular con el objetivo de sustituir piezas de hierro gris ha sido un esfuerzo significativo para contribuir a la solución de un problema en la industria. Se ha desarrollado un proceso eficiente y optimizado para la obtención de hierro nodular, superando los desafíos técnicos y económicos que implican su producción a gran escala. La aportación de esta investigación a esta industria permite dar una base sólida para adoptar el hierro nodular como material secundario siendo una opción más confiable y duradera.

Además, al sustituir las piezas de hierro gris por hierro nodular, también se generan beneficios económicos y ambientales. El hierro nodular tiene una mayor vida útil y requiere menos mantenimiento, lo que se traduce en ahorros significativos a largo plazo. Además, su mayor resistencia permite reducir el peso y las dimensiones de las piezas, lo que se traduce en ahorros de materiales y energía durante la fabricación.

Esta solución contribuye a la sostenibilidad al reducir el consumo de recursos naturales y minimizar los impactos ambientales asociados con la fabricación y reemplazo frecuente de piezas. Esta investigación en la obtención de hierro nodular como sustituto del hierro gris representa un avance importante al solucionar un problema.

---

## 5.2 Conclusiones

La investigación realizada ha logrado determinar de manera concluyente que diversos factores desempeñan un papel crucial en la obtención de hierro nodular. Entre estos factores destacan el tipo de material de carga utilizado en el horno, la cantidad de nodulizante empleado y el porcentaje de azufre presente en el proceso. Asimismo, se ha comprobado que un método de inoculación adecuado durante el proceso conlleva a resultados positivos y satisfactorios.

Estos hallazgos respaldan plenamente la hipótesis planteada al comienzo de la investigación, ya que se ha confirmado de manera fehaciente que la cantidad de nodulizante, en particular el ferro silicio magnesio 5911, tiene un impacto directo en la formación del grafito esferoidal, en la microestructura del metal resultante y en la determinación del índice de calidad de las piezas fabricadas.

Por otro lado, se ha observado que una técnica de inoculación adecuada y una selección cuidadosa de la materia prima también influyen significativamente en los resultados obtenidos. En caso de no tomar en cuenta estos aspectos fundamentales, se podrían derivar complicaciones en el proceso y obtener resultados no deseados en términos de calidad y características del metal producido.

Se ha demostrado que los resultados son claros y contundentes ya que la cantidad de nodulizante utilizado, junto con el material de carga, el porcentaje de azufre y la técnica de inoculación, son factores cruciales para obtener hierro nodular de calidad. Estos descubrimientos son de gran relevancia, ya que proporcionan información valiosa para mejorar los procesos de producción y garantizar la calidad de las piezas fabricadas.

---

### 5.3 Recomendaciones.

Establecidas las conclusiones de esta investigación se recomienda lo siguiente:

Evitar los sobretratamientos de nodulizante (ferro silicio magnesio 5911) ya que el contenido de este en exceso de 0.05% tiende a promover la formación de silica de magnesio y óxido de magnesio en forma de escoria, así mismo un contenido en el rango de 0.07% o más alto, ocasiona que los nódulos de grafito tomen la forma de trozos o forma de araña. A medida que se aumenta el contenido comienzan a aparecer áreas de grafito laminar. Por otra parte, el exceso de nodulizante también ocasiona formaciones de microporos que comúnmente se atribuyen a aluminio o a otras causas.

Los Microporos son un problema frecuente y generalmente ocurren en las piezas de hierro nodular que se han vaciado demasiado cerca a la temperatura de solidificación, los microporos también se asocian con moldeo por arena verde y se cree que los vapores de magnesio que se expulsan del hierro nodular reaccionando con la humedad de la arena del moldeo, se recomienda el uso de pinturas refractarias que contengan óxidos de hierro ya que estas tienden a reaccionar con el vapor del magnesio el hierro nodular. Este problema puede ser eliminado por el uso de pinturas a base de grafito o carbón.

El Rechupe (efecto de contracción) ocurre durante las últimas fases de solidificación y pueden ser generalmente eliminados cuando se generan cantidades adecuadas de grafito en la solidificación. Esto es importante en piezas que tienen áreas que son difíciles de alimentar efectivamente. El rechupe tiende a aumentar a medida que desciende la temperatura de vaciado, y es más pronunciado en secciones ligeras o medianas dependiendo de la relación de área volumen, o sea la velocidad de enfriamiento del metal a medida que se llena el molde.

---

Cuando las temperaturas del metal caen por debajo de 1260 °C la precipitación del grafito comienza. Vaciados demasiados lentos o sistemas de coladas que causen incrementos excesivos pueden también causar rechupes. Se recomienda que la cavidad del molde se llene antes de que la temperatura del metal baje a más de 1260 °C y que la distribución del metal sea tal que la temperatura sea tan uniforme como sea posible de tal forma que la expansión debido a la precipitación del grafito se contenga dentro del molde.

## ANEXOS Y APÉNDICES

### Anexo 1

#### LISTA DE CHEQUEO:

#### CONTROL DE PRODUCCION DE HIERRO.

Ítem/s inspeccionado/s:	Fecha:
Puntos chequeados: 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/>	Inspector: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

#### 1. Preparación del molde

Verificar que el molde esté limpio y libre de cualquier residuo antes de su uso.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Revisar el diseño del molde y confirmar que se ajusta a las especificaciones del producto deseado.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Verifique que el molde esté correctamente cerrado y sellado.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A

#### 2. Carga del horno

Verificar que el horno este en buen estado y limpio antes de su uso.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Asegúrese de que la cantidad de hierro cargado en el horno se ajuste a las especificaciones requeridas.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Verificar que la cantidad de fundente agregada sea la correcta según la proporción requerida.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Asegurarse de que la temperatura del horno sea la adecuada para el proceso.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A

#### 3. Preparación de la inoculación

Verificar que se tenga la cantidad suficiente de hierro fundido para el proceso de producción.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Asegurarse de que el nodulizante sea el adecuado y que este en buenas condiciones.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Mezclar el hierro fundido y el nodulizante de manera uniforme.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A

#### 4. Verificación para la fundición

Verificar que la temperatura del hierro fundido se haya alcanzado antes de verter en el molde.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Asegúrese de que el molde este en su lugar y que no haya fugas.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/P
Verter el hierro fundido en el molde de manera uniforme.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/P

#### 5. Verificación para el desmoldeo.

Retirar la pieza del molde con cuidado y asegurarse de que no se rompa.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Cortar los canales y los residuos sobrantes de la pieza.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Inspeccionar visualmente la pieza para detectar cualquier defecto o imperfección.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A

#### 6. verificación para la inspección y pruebas.

Inspeccionar visualmente la pieza para detectar cualquier defecto o imperfección.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Inspeccionar visualmente la pieza para detectar cualquier defecto o imperfección.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Verificar que la pieza cumpla con las especificaciones requeridas antes de pasar al acabado.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A

#### 7. Verificación para el acabado.

Limpiar y pulir la pieza para obtener un acabado suave y uniforme.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A
Verificar que la pieza cumpla con los requisitos de acabado antes de ser utilizada o enviada al cliente.	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N/A

#### Observaciones

--

N

NOTA: N/A = No aplicable. N/P = No presenciado.

---

## 6. REFERENCIAS

- Araba. (s.f.). *Fundiciones Araba*. Obtenido de Moldeo En Arena Verde: <http://www.fundicion-de-aluminio.es/procesos-de-fundicion/moldeo-en-arena-verde/>
- Acosta Esqueda, M. A., Martínez Madrid, M., & López, J. A. (2000). *El tratamiento de los hierros nodulares en le mejoramiento de los materiales en la industria automotriz*. Instituto Mexicano del Trabsporte, Queretaro.
- Aleaciones a base de ferro-silicio. (1990). En E. Fras , J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá, *Fundiciones de Hierro* (págs. 231-232). Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Arthur f, S. j. (1979). *producción de hierro nodular*. mexico: LIMUSA.
- ASI International. (2002). *ASI International*. Obtenido de ELIMINACIÓN DE DEFECTOS DE MICROPOROSIDAD SUB-SUPERFICIAL EN ACEROS DE ALEACIÓN AGREGANDO FERROSELENIO: [https://www.asi-alloys.com/pdf/SS\\_2019\\_Fall-SPA\\_ASI.pdf](https://www.asi-alloys.com/pdf/SS_2019_Fall-SPA_ASI.pdf)
- ask-chemicals. (s.f.). *ask-chemicals*. Obtenido de PREVENCIÓN DE DEFECTOS DE FUNDICIÓN: <https://www.ask-chemicals.com/es/apoyo/pregunte-al-experto/prevencion-de-defectos-de-fundicion#:~:text=Las%20posibles%20causas%20de%20tal,de%20la%20cavidad%20del%20molde.>
- Composición química de inoculantes. (1994). En E. Fras, Serrano t, J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá, *Fundiciones de Hierro* (pág. 257). Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Control de la fabricación de hierro nodular. (1994). En E. Fras, J. L. Serrano Toledo, & A. A. Bustos, *Fundiciones de Hierro* (págs. 263-264). Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Corporativo Mejorada. (25 de Diciembre de 2019). *Corporativo Mejorada*. Obtenido de Hierro gris : <https://corporativomejorada.mx/soluciones/productos/hierro-gris/>
- Corporativo Mejorada. (25 de Diciembre de 2019). *HIERRO NODULAR*. Obtenido de Hierro Nodular o Dúctil: <https://corporativomejorada.mx/soluciones/productos/hierro-nodular/>
- Departamento de Energia de EE . UU. (Enero de 1993). Manual de Fundamentos del DOE. *Ciencia de Materiales, Volumen 1 y 2*.
- Dolores Tous Zamora, V. F. (2019). *Sistemas de Producción. Análisis de las actividades primarias de la cadena de valor*. Madrid: ESIC.

- 
- Edoardo, C. (Enero de 1974). *Tecnología de Fundición Tercera Edicion*. Barcelona: Gustavo Gili, S.A.
- frás, E. (1990). *FUNDICIONES DE HIERRO*. Coahuila: ILAFA.
- Fras, E., Serrano Toledo, J. L., & Bustos Acalá, A. (1990). En E. Frás, J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá, *Fundiciones de hierro* (págs. 214-215). Chile: ILAFA.
- Fras, E., Serrano Toledo, J. L., & Bustos Acalá, A. (1990). En E. Frás, J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá. Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Fras, E., Serrano Toledo, J. L., & Bustos Acalá, A. (1990). Cerio y sus aleaciones. En E. Frás, J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá, *Fundiciones de Hierro* (págs. 231-232). Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Fras, E., Serrano Toledo, J. L., & Bustos Acalá, A. (1994). Eleccion de tipo de inoculante. En E. Frás, J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá, *Fundiciones de Hierro* (pág. 257). Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Fras, E., Serrano Toledo, J. L., & Bustos Alcala, A. (1990). *Fundiciones de Hierro*. México: ILAFA.
- Fundiciones de hierro. (1990). En E. Frás, J. L. Serrano Toledo, & A. Bustos Acalá, *Fundiciones de hierro* (págs. 235-236). Saltillo, Coahuila, México: ILAFA.
- Héctor Daniel Mejía, Á. G. (Abril de 2002). Producción de fundicion en el cubilote eco-eficiente de la Universidad de Antioquia. *Facultad de Ingenieria.*, 25(25). Obtenido de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/issue/view/2585>
- Insertec. (31 de Agosto de 2016). *HORNO CUBILOTE*. Obtenido de <https://www.insertec.es/blog/horno-cubilote/>
- ISO 9000. (2015). *ISO*. Obtenido de ISO 9000 Sistema de Gestion de Calidad.: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es>
- José Luis Enríquez Berciano, E. T. (Diciembre de 2012). *UPM*. Obtenido de FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR: [https://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n\\_nodular.pdf](https://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf)
- López, Ó. (3 de Octubre de 2022). *Guanajuato.gob*. Obtenido de La Innovación 4.0: <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2022/10/03/la-innovacion-4-0-se-vivio-en-communiti-leon/>
- Metalium. (23 de Abril de 2014). *Hierro fundido* . Obtenido de Hierro fundido gris: <https://metalium.mx/hierro-fundido>
- NATERA, J. J. (junio de 2015). OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIERRO . NUEVO LEÓN.



- 
- PAM SAINT-GOBAIN. (s.f.). *Pamline*. Obtenido de Características de la fundición dúctil:  
<https://www.pamline.es/informacion-tecnica/fabricacion-y-calidad/caracteristicas-fundicion-ductil>
- Pérez Porto, J. M. (25 de marzo de 2023). *Producción*. Obtenido de Qué es, en la economía, definición y concepto: <https://definicion.de/produccion/>
- Quiroa, M. (4 de Diciembre de 2019). *Economipedia*. Obtenido de Producción:  
<https://economipedia.com/definiciones/produccion.html>
- Ramírez Natera, J. J. (2015). *Optimización del proceso de producción de hierro nodular para piezas automotrices [Tesis de grado, Universidad Autónoma de Nuevo León]*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Reliance Foundry. (14 de Febrero de 2023). *Introducción al Hierro Fundido: Historia, Tipos, Propiedades y Usos*. Obtenido de Un metal versátil, el hierro fundido tiene muchas aplicaciones únicas en el mundo comercial e industrial: <https://www.reliance-foundry.com/blog/hierro-fundido-es>
- Ródenas, J. S. (2011). *TECNOMESURA*. Obtenido de Calidad:  
[https://www.bdv.cat/perfil/esbarbera/recursos/recursos/conferncia\\_qualitat\\_2011.pdf#:~:text=La%20calidad%20es%20un%20conjunto,satisfacer%20necesidades%20impl%C3%AD citas%20o%20expl%C3%AD citas.](https://www.bdv.cat/perfil/esbarbera/recursos/recursos/conferncia_qualitat_2011.pdf#:~:text=La%20calidad%20es%20un%20conjunto,satisfacer%20necesidades%20impl%C3%AD citas%20o%20expl%C3%AD citas.)
- Serope Kalpakjian, S. R. (2009). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Naucalpan de Juarez, Edo. de México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Sion, M. d. (22 de Abril de 2019). *Hierro Dúctil | La industria del hierro*. Obtenido de Fundidora de Alcantarillado Monte de Sion:  
<http://fundidoradealcantarilladomontedesion.com/blog/hierro-ductil-la-industria-del-hierro/>
- Struers. (s.f.). *Struers Ensuring Certainty*. Obtenido de CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL HIERRO FUNDIDO: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Cast-Iron#:~:text=El%20hierro%20fundido%20ofrece%20una,y%20procesamiento%20de%20industrias%20met%C3%A1licas.>
- William D. Callister, D. G. (Enero de 2016). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (Vol. 1 y 2). Barcelona: Editorial Reverté, S. A., 2016 .