

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFECTO DEL TIPO DE CHATARRA SOBRE LA COLABILIDAD EN ALEACIONES HIPEREUTECTICAS Fe-C NODULARES

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar el
Título de Ingeniero Metalúrgico Por el
Br. Campos L. Ralph J

Caracas, noviembre de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFECTO DEL TIPO DE CHATARRA SOBRE LA COLABILIDAD EN ALEACIONES HIPEREUTECTICAS Fe-C NODULARES

Tutor Académico: Prof. Alfonso Bencomo

Tutores Industriales: Ing. Norberto Rizzo, Ing. Gerardo Pignone

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar el
Título de Ingeniero Metalúrgico Por el
Br. Campos L. Ralph J.

Caracas, noviembre de 2005

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Casimira de Campos y Rafael Campos, a mis hermanos Jairo, Rafael y Carol (La niña) por todo el apoyo brindado durante toda mi carrera.

Al Ing. Norberto Rizzo y todo el personal de la Gerencia Técnica de SH Fundiciones por darme la oportunidad de pertenecer al grupo DANA y toda su colaboración para la culminación de esta investigación.

A mi tutor académico Alfonso Bencomo por su valiosa colaboración y aporte académico en esta investigación.

Y un agradecimiento especial a Josgla Everena Nieves por tener siempre para mí una mano extendida, además de ser un ejemplo de fortaleza que me impulsa a seguir adelante a pesar de los inconvenientes.

ACTA

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado titulado:

" EFECTO DEL TIPO DE CHATARRA SOBRE LA COLABILIDAD EN ALEACIONES HIPEREUTECTICAS Fe-C NODULARES"

presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por el Br. Ralph J. Campos L., dejan constancia de lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los diecisiete días del mes de noviembre del año 2005.



Prof. Alfonso Bencomo

Tutor



Prof. Ruth Bisbal

Jurado



Prof. Edwin Carrasquero

Jurado

Autor: Campos L. Ralph J.

EFEECTO DEL TIPO DE CHATARRA SOBRE LA COLABILIDAD EN ALEACIONES HIPEREUTECTICAS Fe-C NODULARES

Tutor Académico: Prof. Alfonso Bencomo. Tutores Industriales: Ing. Norberto Rizzo, Ing . Gerardo Pignone. Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. 2005,93 pag.

Palabras claves: Colabilidad, Cuchara Tundish, Nódulo, Probeta de la Espiral.

Resumen. En este trabajo de investigación se evaluaron algunas variables asociadas al tipo de chatarra utilizada en la cuchara de reacción en búsqueda del efecto que esta pueda generar sobre la colabilidad y densidad de nódulos del hierro nodular en la empresa S.H. Fundiciones. Se elaboraron 112 probetas en forma de espiral haciendo pruebas con distintos tipos de chatarra en función de su espesor y geometría. Para cada uno de los ensayos realizados se determinó el magnesio residual presente en la aleación de hierro nodular hipereutético. Adicionalmente se realizaron ensayos variando la cantidad de chatarra para determinar el efecto de la cantidad de la misma sobre el hierro nodular.

Para minimizar el número de variables, todas las espirales colados en este estudio corresponden a la colada del número de parte 47777 (COCO 80). Las variables estudiadas en el presente trabajo fueron: el tipo de chatarra en función de su composición química, espesor y geometría además de la cantidad de chatarra en la carga de la cuchara de reacción.

Los ensayos iniciales se realizaron con 7,5 Kg. de chatarra en la cuchara de reacción por cada cuchara, usando chatarra en forma de láminas de distintos espesores 5mm y 6,5mm y de diferentes geometrías (cuadrada, triangular y redonda). Los resultados iniciales no mostraron variaciones significativos en la colabilidad, densidad de nódulos ni en el magnesio residual de la aleación.

El ensayo de esparcimiento reveló que el cubrimiento de la chatarra sobre el magnesio en la cuchara Tundish, varía significativamente al modificarse la geometría de la

chatarra y las cantidades de las mismas, al aumentar la cantidad de chatarra aumenta el cubrimiento del magnesio en la cuchara a excepción de la lámina cuadrada que no realiza un cubrimiento efectivo.

Se realizaron nuevamente los ensayos de colabilidad variando la geometría de la chatarra esta vez utilizando 12 Kg. de la misma por cada cuchara, al aumentar el cubrimiento del magnesio aumentó la colabilidad, la densidad de nódulos y el porcentaje de magnesio residual en el hierro nodular. Las curvas de enfriamiento no mostraron cambios significativos pero la cantidad de chatarra genera una leve caída de temperatura de la aleación.

.Los últimos ensayos se realizaron con chatarra de forma triangular, por su cobertura efectiva, para determinar cual es la cantidad de chapita óptima a adicionar en la cuchara de reacción, utilizando 8, 12 y 16 Kg. de chapita en donde se pudo demostrar que una vez que la chatarra alcanza el cubrimiento efectivo sobre el magnesio, no aumenta la colabilidad ni el magnesio residual de la aleación, pero baja levemente la temperatura del baño.

En base a los resultados obtenidos se pudo determinar que la geometría de la chatarra influye directamente sobre el magnesio residual, la chatarra elaborada por con bordes filosos se ancla en el magnesio no permitiendo un cubrimiento efectivo a diferencia de la chatarra de bordes suavizados en donde el cubrimiento es mucho mayor aumentando de esta manera el magnesio residual del hierro nodular.

INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Sistema Fe-C.....	4
2.2 Efecto del Silicio en el Diagrama de Fase Fe-C.....	5
2.3 Carbono Equivalente.....	8
2.4 Fundiciones.....	8
2.5 Clasificación de las Fundiciones.....	8
2.5.1 Clasificación de las fundiciones por su microestructura.....	8
2.5.2 Clasificación de las fundiciones por su fractura.....	9
2.6 Hierro Nodular.....	10
2.7 Características de los Agentes Nodulizantes.....	12
2.8 Principales Constituyentes del Hierro Nodular.....	13
2.8.1 Carbono.....	13
2.8.2 Azufre.....	13
2.8.3 Silicio.....	14
2.8.4 Manganeso.....	14
2.8.5 Fósforo.....	15
2.8.6 Magnesio.....	15
2.9 Inoculación del Hierro Nodular.....	16
2.10 Mecanismo de Inoculación.....	18
2.11 Procedimientos de Inoculación.....	19
2.11.1 Inoculación en la cuchara (pre-inoculación).....	19
2.11.2 Inoculación en el molde (post-inoculación).....	20
2.12 Tratamiento de Nodulización.....	21
2.13 Adición de Magnesio al Baño Metálico.....	21
2.14 Métodos de Nodulización.....	22
2.14.1 Cuchara de reacción utilizada para la adición magnesio.....	22
2.15 Aleación de magnesio utilizada en la cuchara Tundish.....	23
2.16 Material para cubrir la aleación de magnesio.....	24
2.17 Solidificación del hierro nodular.....	25
2.18 Colabilidad.....	26

2.19 Métodos de Determinación de la Colabilidad.....	27
2.20 Parámetros que Afectan la Colabilidad.....	28
2.21 Influencia de la Composición Química.....	31
CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	33
3.1 Elaboración del Molde de la Probeta en Espiral.....	33
3.2 Colada del Espiral.....	35
3.3 Toma de Pastilla.....	38
3.4 Retiro de los Moldes del Sistema.....	39
3.5 Análisis Metalográfico.....	39
3.6 Análisis Químico.....	40
3.7 Ensayo de Esparcimiento de la Chatarra en el Bolsillo de la Cuchara Tundish.....	40
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42
4.1 Resultados Chatarra Parish Cuadra, Rudebeca y Triangular.....	42
4.2 Análisis Químico de la Chatarra Rudebeca y Parish.....	43
4.3 Resultados Chatarra Cuadrada Rudebeca Variando el Espesor.....	45
4.4 Resultados Chatarra Rudebeca Variando la Geometría.....	51
4.5 Resultados del Ensayo de Esparcimiento de los Diferentes Tipos de Chatarra Sobre el Magnesio en el Bolsillo de la Cuchara.....	60
4.6 Resultados Chapita Rudebeca 12 Kg. Variando la Geometría.....	62
4.7 Resultados Variando la Cantidad de Chatarra Utilizando Rudebeca Triangular.....	73
4.8 Estudio de Mejoras en Costos de Producción.....	78
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
APENDICE.....	85

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La Empresa C.A. DANA División S.H. Fundiciones, es una de las pocas plantas en Venezuela en el área de aleación de hierro nodular dedicada al mercado automotor. La misma busca que sus productos cumplan con las especificaciones requeridas en el mercado, además que contribuyan a la reducción de costos operacionales y mecanizados no concluidos.

Para poder lograr estos requerimientos, se hace uso del proceso de planificación avanzada de calidad (APQP por sus siglas en ingles), que consiste en distribuir la “Voz del Cliente” en productos de buena calidad, servicios y proceso de entrega eficiente y efectivos. Esto surge a raíz de las corrientes denominadas filosofía de la calidad y mejoramiento continuo, las cuales precisan no solo el interés de producir y ganar; sino de tomar en cuenta al cliente dando lo que realmente quiere, a través de la constante revisión y acondicionamiento de los procesos productivos, procurando el mínimo de costos.

En esa búsqueda del mejoramiento continuo, se realizaron pruebas para determinar cual es el tipo de chatarra que puede generar mayor rendimiento del magnesio residual y mayor colabilidad del hierro nodular, ya que al mejorar la colabilidad, disminuyen los defectos en la piezas, tales como: rechupes, llenado incompleto de piezas y otros. Para estas pruebas se utilizó la probeta en espiral, donde se obtiene la longitud recorrida por el metal dentro de la cavidad del molde de la espiral. Esta longitud recorrida por el metal ha ido mejorando desde que comenzaron los estudios de colabilidad hace aproximadamente 3 años, sin embargo, no se ha podido determinar con precisión que factor crítico es el que hace que la colabilidad aumente o disminuya en el hierro nodular. Por tal motivo, se realizaron pruebas de colabilidad tomando en cuenta las siguientes variables: temperatura de colada, magnesio residual, cantidad de chatarra y el tipo de la misma.

La chatarra Parish esta constituida por láminas cuadradas, de ángulos rectos de alto manganeso y espesores (6-7)mm, la chatarra rudebeca es triangular de bordes redondeados con espesor de 5mm, la utilización de uno u otro tipo de chatarra genera diferencias en cuanto a la colabilidad y magnesio residual principalmente, en este trabajo se realizaron ensayos en donde se puedan controlar las variables sujetas al tipo de chatarra.

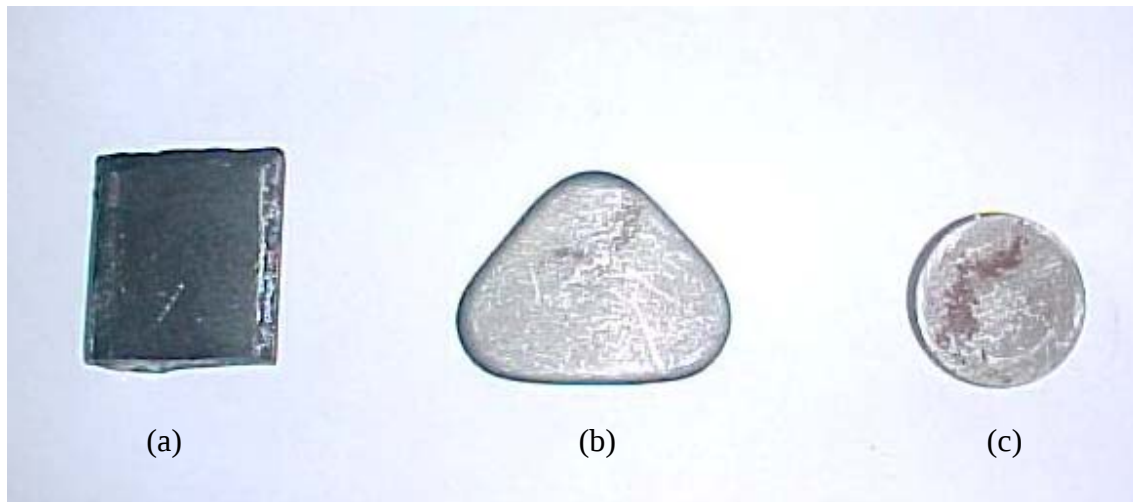


Figura 1.1 (a) Chatarra Parish (b) Chatarra Rudebeca Triangular
(c) Chatarra Rudebeca Redonda

La primera diferencia es la composición química, la segunda el espesor y por ultimo la geometría, para analizar la composición química de la chatarra se utilizó el espectrómetro de masa, para analizar el efecto del espesor de la chatarra en el hierro nodular, se utilizó chatarra de la misma geometría y composición química pero de espesores diferentes 5 y 6,5mm, esta chatarra correspondió a tiras de material de Rudebeca cortados a 50 ± 5 mm de longitud. Para analizar el efecto de la geometría se utilizó chatarra del mismo material, el mismo espesor pero de geometrías distintas. El material utilizado corresponde a láminas rectangulares, chatarra triangular de bordes redondeados y chatarra redonda, todas ellas procedentes de Rudebeca con 5mm de espesor.

Los objetivos alcanzados en esta investigación son:

Determinar el efecto del tipo de chatarra sobre la colabilidad en aleaciones hipereutecticas Fe-C nodulares.

Determinar el efecto del tipo de chatarra sobre el magnesio residual en aleaciones hipereutecticas Fe-C nodulares.

Determinar el efecto del recubrimiento de la chatarra sobre el magnesio en la cuchara de reacción sobre la colabilidad y el magnesio residual

Establecer la cantidad de chatarra óptima en la cuchara de reacción en función de la colabilidad de la aleación y el magnesio residual.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Sistema Fe-C

En el diagrama hierro-carbono, figura 2.1, normalmente se observa que existe una línea horizontal punteada a una temperatura de 6 °C mayor a la de la reacción eutéctica metaestable y de 11 °C por sobre la transformación eutectoide metaestable, entonces el diagrama de hierro-carbono tiene ahora dos sistemas superpuestos, uno es el termodinámicamente estable que corresponde al hierro-grafito y el otro es el termodinámicamente metaestable que corresponde al hierro-cementita. ^[1]

Cuando la aleación líquida de composición eutéctica solidifica bajo el sistema termodinámicamente estable, se observa que sucede a una temperatura mayor y a una menor concentración de carbono que la metaestable, figura 2.1; a esta diferencia de temperaturas se le denomina "diferencia de temperaturas grafito a cementita" ΔT_{G-C} . A la diferencia de temperaturas entre las reacciones eutectoides estable y metaestable, se le llama "rango crítico de temperaturas", RCT. En consecuencia, en el sistema de aleaciones hierro-carbono hay varias posibilidades de producir microestructuras a temperatura ambiente. Cuando el sistema hierro-carbono solidifica según el sistema hierro-grafito, en términos generales, se produce grafito generado por reacción eutéctica que tiene una morfología laminar; en ella, el grafito y la austenita que lo rodea han crecido cooperativamente para formar las celdas eutécticas. ^[1]

En fundiciones, además de que las posibilidades de reacción pudieran ocurrir según el diagrama estable o metaestable, existe la complicación adicional de tratarse de una aleación ternaria hierro-carbono-silicio y, por lo tanto, el estudio debe apoyarse en el diagrama ternario Fe-C-Si. ^[1]

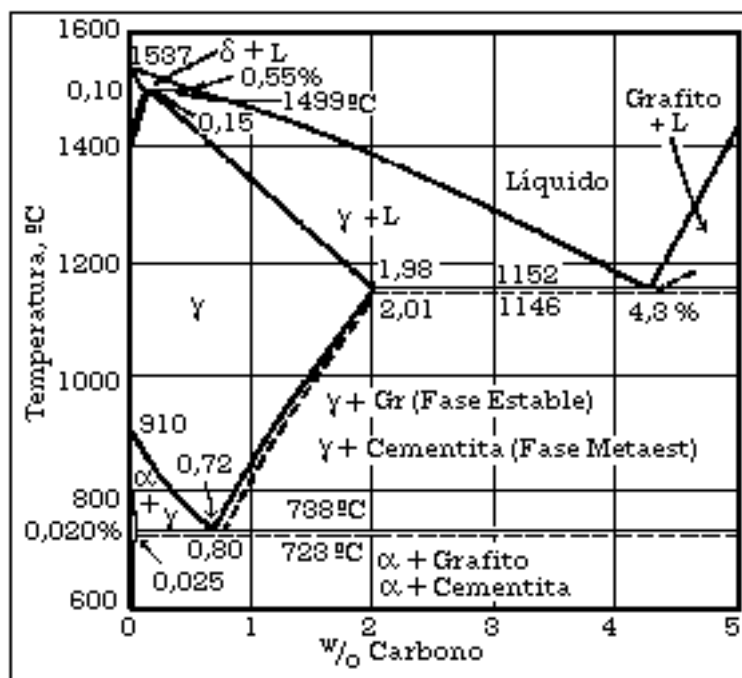


Figura 2.1 Diagrama hierro carbono metaestable (líneas continuas), y diagrama estable (líneas punteadas)^[1].

2.2 Efecto del Silicio en el Diagrama de Fase Fe-C

El silicio genera cambios sustanciales en el diagrama binario hierro-carbono; en la figura 2.2 se muestra los efectos producidos por el silicio sobre el rango de temperaturas eutécticas ΔT_{G-C} . En la figura 2.2 se considera cómo la adición de silicio amplifica dicho rango de temperaturas, y es fácil observar que el ΔT_{G-C} varía desde 6 °C para el sistema binario hierro-carbono hasta unos 38 °C para el sistema hierro-carbono- 2% en peso de silicio.^[1]

La figura 2.3 muestra cómo varían tanto la reacción eutéctica estable como la reacción eutéctica metaestable en función de la velocidad de crecimiento del eutéctico; obsérvese que la temperatura de la intercara eutéctico-líquido para la velocidad de crecimiento según la solidificación eutéctica estable a la metaestable decrece con el incremento en dicha velocidad. También se aprecia que la transición en las velocidades de crecimiento de la interfaz líquido-sólido para solidificación según el sistema estable al metaestable aumenta a mayores valores con el incremento en silicio; esto indica, que la velocidad de crecimiento de la intercara líquido sólido donde en el sistema binario se produce una microestructura eutéctica dual, al aumentar el contenido de silicio

producirá una microestructura eutéctica según el sistema estable. Esto se debe a que, de acuerdo a la figura 2.4, para velocidades de crecimiento de la intercara del eutéctico que sean menores a la crítica, se producirá la solidificación del eutéctico según el sistema estable; y para mayores velocidades a la crítica, la solidificación eutéctica será según el sistema metaestable.^[1]

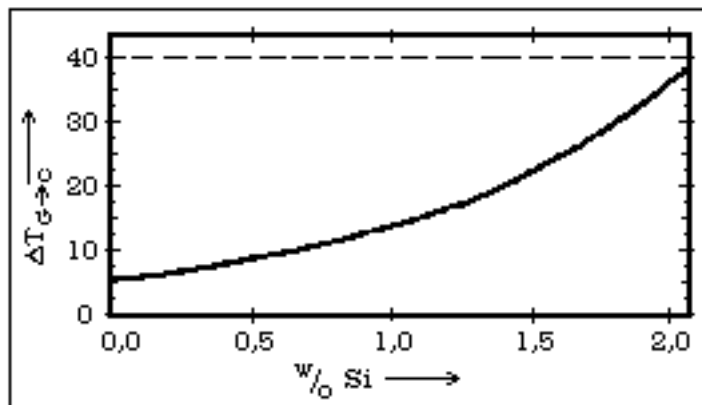


Figura 2.2 Efecto del silicio sobre el rango de temperaturas eutécticas ΔT_{G-C} .^[1]

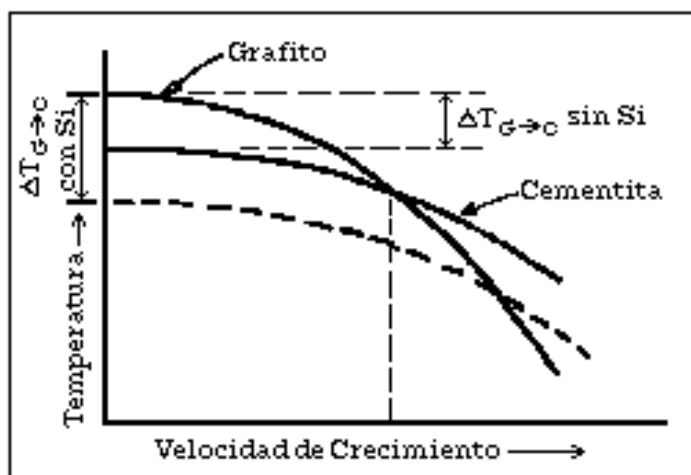


Figura 2.3 Variación de la reacción eutéctica estable como la reacción eutéctica metaestable en función de la velocidad de crecimiento del eutéctico.^[1]

El silicio es importante para estabilizar el grafito, y propiamente dicho este diagrama viene a ser Fe-C-Si.

Observando un diagrama ternario y parcial de Fe-C-Si el diagrama metaestable Fe-Fe₃C corresponde al ternario cuando el porcentaje de silicio es cero. La composición eutéctica para el diagrama metaestable es 4,3% de carbono (Figura 2.4).

A mayor porcentaje de silicio que se adiciona a la aleación Fe-C-Si, de las fundiciones, la composición del eutéctico y del eutectoide se mueven hacia la izquierda y hacia arriba, así la temperatura del eutéctico y del eutectoide se incrementan.^[1]

Cada nivel de carbono y de silicio en el sistema estable hierro-carbono-silicio posee su propio corte del diagrama de equilibrio de fases, definido por una composición eutéctica particular y por unas líneas de liquidus hipoeutéticas e hipereutéticas y de solidus particulares, como se ve en la figura 2.4.^[1]

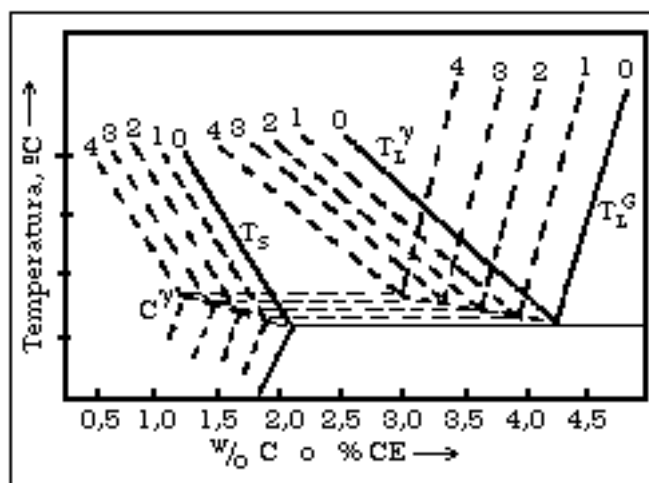


Figura 2.4 Sección vertical del diagrama ternario Fe-Si-C.^[1]

2.3 Carbono Equivalente

Los contenidos de carbono, de silicio y de fósforo pueden ser considerados juntos en un solo valor denominado carbono equivalente (CE), que sirve de guía útil para estudiar el comportamiento y algunas propiedades de la fundición. El valor de carbono equivalente viene dado por la siguiente fórmula:

$$\%CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (2.1)$$

Cuando el carbono equivalente CE es igual a 4.3, la aleación se comporta como una aleación eutéctica. Por lo tanto, en fundiciones, en vez de hablarse desde el punto de vista de diagrama de equilibrio, en tenores de carbono y de silicio, se usa el concepto de carbono equivalente. Este valor indica cuan próximo está un análisis dado de la composición eutéctica.^[2, 3]

2.4 Fundiciones

Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio que generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, etc. Son de mayor contenido en carbono que los aceros (2 a 4,5 %) y adquieren su forma definitiva directamente por colada.^[4]

2.5 Clasificación de las Fundiciones

2.5.1 Clasificación de las fundiciones por su microestructura.

Se denomina carbono libre al carbono que estando en el líquido de composición eutéctica produce grafito; se llama carbono combinado a la porción del carbono total contenido en la aleación, que forma cementita ya sea por reacción eutéctica como por reacción eutectoide. El carbono total es el determinado mediante análisis químico convencional y corresponde a la cantidad total de carbono presente en la aleación.^[4]

Las fundiciones se pueden clasificar de acuerdo a su microestructura en tres grandes grupos:

- Fundiciones en las que todo el carbono se encuentra combinado, formando cementita y que al romperse presentan fractura de fundición blanca.
- Fundiciones en las que todo el carbono se encuentra en estado libre, formando grafito. Estas son fundiciones grises y nodulares ferríticas, y se pueden apreciar en la figura 2.5
- Fundiciones en las que parte de carbono se encuentra combinado formando cementita y parte libre en forma de grafito. A este grupo, que es el más

importante de todos, pertenecen la mayoría de las fundiciones que se fabrican y utilizan normalmente, como son las fundiciones grises y nodulares perlíticas y se pueden observar en la figura 2.5 ^[2]

2.5.2 Clasificación de las fundiciones por su fractura

Por el aspecto de las fracturas que presentan las piezas al romperse, las fundiciones se clasifican en fundiciones grises, nodulares, moteadas y blancas. Las fundiciones grises y nodulares, contienen alta cantidad de silicio (1,5 a 3.5 %), las fundiciones blancas contienen por lo general menos de 1 % de silicio, y las moteadas tiene generalmente un contenido de silicio intermedio, entre 0.6 a 1,5 %. El color oscuro que tienen las fracturas de las fundiciones grises, y moteadas atruchadas, se debe a la presencia en las mismas de gran cantidad de láminas de grafito. ^[4]

2.6 Hierro Nodular

Las aplicaciones de fundiciones esferoidales, continúan aumentando notablemente en los últimos años debido a su bajo costo de producción y a la variedad de microestructuras obtenibles, con las que se obtiene buenas propiedades mecánicas. ^[5]

El hierro nodular ha sido conocido desde 1940, y hoy en día ha tomado gran importancia hasta el punto de alcanzar alrededor del 30 % de las fundiciones que se producen en diferentes países. La fundición nodular se conoce también como hierro dúctil o hierro con grafito esferoidal. El hierro nodular es un tipo de aleación del sistema hierro-carbono-silicio de composición químicamente similar a la de la fundición gris, excepto que se le añade al líquido materiales especiales denominados nodulizantes, que conducen a que durante la solidificación, el grafito eutéctico crezca con una morfología esferoidal. Estos esferoides son compactos y por supuesto interrumpen la continuidad de la matriz, pero esa interrupción es menos severa que la ocasionada por las láminas del grafito en la fundición gris, lo que va a mejorar la resistencia y la tenacidad; por eso se le conoce como hierro dúctil o hierro con grafito esferoidal. De

ello resulta que la resistencia de la fundición nodular queda principalmente determinada por la resistencia de la matriz (figura 2.6).^[1,3,6]

El hierro nodular es fabricado mediante un tratamiento a la aleación líquida de composición química a la del hierro gris con aditivos denominados nodulizantes, que contienen magnesio (ocasionalmente cerio) que oscila entre 0.02% a 0.04%, donde necesariamente el contenido de azufre debe ser menor a 0.02% bajo estas condiciones, durante el proceso de crecimiento, la presencia de estos elementos que son superficialmente activos, conducen a que la cinética del adosamiento atómico del carbono cambie la dirección de crecimiento desde el polo del plano prismático hacia el polo del plano basal, lo cual hace que se produzca la morfología de crecimiento esquematizada en la figura 2.7, donde cada nódulo es facetado con un alto grado de cristalinidad. La diferencia entre el grafito laminar y el nodular, es que el laminar es monocristalino mientras que el nodular es un policristal. Si además se añade al baño de fundición un material grafitizante como el ferro-silicio o el silicio-calcio, la proporción de carbono que aparece en forma esferoidal aumenta.^[1,3]

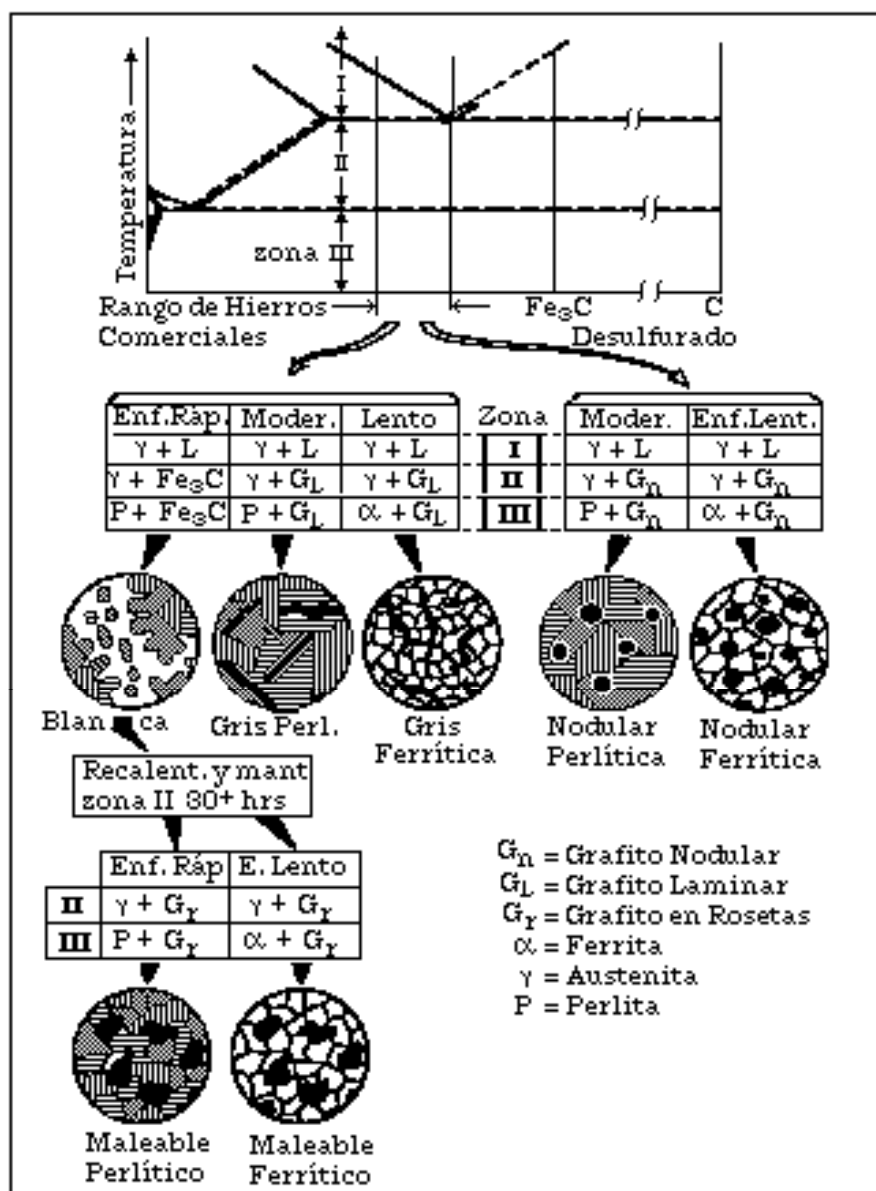


Figura 2.5 Microestructuras de las fundiciones de acuerdo a su velocidad de enfriamiento y por el tratamiento térmico aplicado. ^[1]

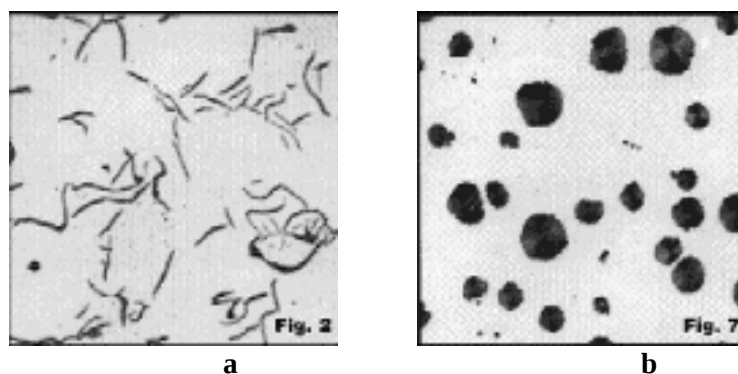


Figura 2.6 a). Fundición gris ordinaria con el grafito en forma laminar. b) La misma fundición con adición de magnesio para obtener grafito en forma nodular. ^[7]

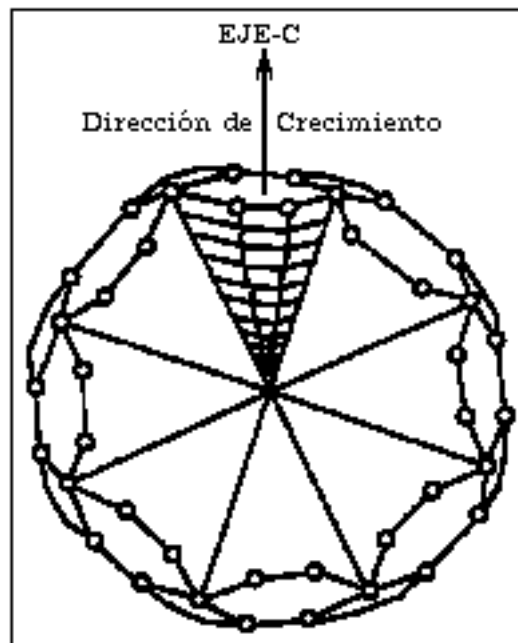


Figura 2.7 Grafito eutéctico con morfología esférica. ^[1]

2.7 Características de los Agentes Nodulizantes

Las características de los agentes nodulizantes son las siguientes:

a) El agente nodulizante debe tener una alta afinidad por elementos superficialmente activos en el líquido como el azufre y el oxígeno, de manera que su reacción genere productos estables, con lo cual se está reduciendo la cantidad y los efectos de los elementos no deseados en el líquido; sin embargo no todo el agente nodulizante se debe consumir, tiene que quedar libre en el líquido una cierta cantidad para que haga su efecto nodulizante. ^[1]

b) El elemento característico fundamental del nodulizante debe tener:

- Una baja solubilidad en el hierro para que su efecto de disolución no afecte la nodulización.
- Una marcada tendencia a segregarse durante la solidificación.
- Una cierta afinidad por el carbono junto a una baja solubilidad en el retículo cristalino del grafito. Los factores que afectan a la formación de las esferulitas o

nódulos de grafito son: la composición química; la velocidad de enfriamiento; el subenfriamiento; y el tiempo de solidificación.

2.8 Principales Constituyentes del Hierro Nodular

2.8.1 Carbono.

El rango óptimo para este elemento es usualmente entre 3.4 a 3.8 %, dependiendo del contenido de silicio. Siendo el carbono la base para la formación de esferoides de grafito, a mayor cantidad de carbono corresponderá la formación de un mayor número de esferoides, aunque no debe sobrepasar ciertos límites por encima de los cuales se puede presentar la flotación del carbono. Este fenómeno se presenta debido a que la densidad del grafito es menor que la del hierro, lo que hace que los nódulos floten segregándose en la parte superior de la pieza.^[1,3,8]

2.8.2 Azufre.

El azufre es derivado de la carga metálica o de la chatarra. Es necesario que antes de efectuar el tratamiento con esferoidizantes bajar el contenido de azufre al orden del 0.02%. Cuando se adiciona Mg a un baño alto en azufre se producen formas de grafito interdendrítico. La necesidad primordial de reducir el azufre a porcentajes tan bajos radica en la gran afinidad entre este elemento y el magnesio dado que este último se utiliza como esferoidizante para formar sulfuros estables, (MgS). Si el contenido de azufre es muy alto durante la inoculación gran parte del magnesio irá a la escoria en forma de sulfuro. El azufre ejerce un efecto antiesferoidizante cuando supera cierto límite en composición; ya que el azufre y el oxígeno disueltos en el hierro inhiben la nucleación.

2.8.3 Silicio

El rango normal del silicio en el hierro esferoidal oscila entre 1.3 y 3.0%. Debido a que el silicio afecta al carbono equivalente, también afecta el número de esferoides y la flotación del grafito, el incremento del porcentaje de silicio desplaza el eutéctico hacia la izquierda. Cuando se enfría una aleación hipoeutéctica fundida, se precipitan dendritas de austenita hasta que se llega a la temperatura eutéctica, el líquido

restante puede solidificar como eutéctico metaestable de austenita y cementita, o como un eutéctico estable de austenita y grafito. Un silicio alto trae consigo la formación directa del grafito del producto estable.

2.8.4 Manganeso

El manganeso es derivado principalmente de la chatarra usada en la carga metálica. El manganeso es un estabilizador de los carburos por tender a que el carbono esté en forma combinada; sin embargo, sus efectos son menores cuando se les compara con los del azufre. Los elementos azufre y manganeso de manera combinada, actúan de la siguiente manera: los efectos del azufre están íntimamente asociados al manganeso presente y al solvente hierro. Con el hierro forma Sulfuro de Hierro, FeS, que tiende a segregarse en la interfase líquido-sólido durante la solidificación y precipita en las últimas etapas de dicho proceso. Cuando hay presencia de manganeso, se forma MnS o sulfuro complejo hierro-manganeso, que depende del contenido de este elemento. Los sulfuros de manganeso empiezan a precipitar en las etapas primarias de la solidificación y continúan haciéndolo durante todo el proceso, y por lo tanto, se encontrará distribuido al azar en la microestructura. Como MnS, el azufre fuertemente pierde su acción estabilizadora de la perlita. El manganeso como elemento, tiene efectos aleantes que promueven la resistencia a la grafitización; por lo tanto, el contenido de manganeso por sobre el necesario para reaccionar con azufre sirve para retener la microestructura perlitita.

2.8.5 Fósforo

El fósforo no afecta ni la forma ni el tamaño de la fundición esferoidal, las porosidades pueden presentarse con exceso de fósforo, debiéndose limitar su contenido por el incremento del carbono y del silicio. El aumento de la porosidad se explica por el aumento del eutéctico fosforoso, de modo que este es el último en solidificar, produciendo la formación de microporosidades en los cristales, en las proximidades a las zonas eutécticas.

El fósforo forma el eutéctico hierro-fosfuro de hierro denominado Esteadita, que posee temperatura de fusión entre 955 y 982 °C. Sus principales características son de relativa fragilidad y baja tenacidad; también aumenta la fluidez y amplía el intervalo

de solidificación del eutéctico, lo cual incrementa la grafitización eutéctica cuando el contenido de silicio es alto y el fósforo es bajo. ^[1]

2.8.6 Magnesio

Es el responsable de la esferoidización del grafito en los hierros hipo e hipereutécticos, es un poderoso desulfurante y desoxidante. Si el contenido de O_2 y/o S en el baño es muy alto, una cantidad apreciable de Mg se consumirá en la formación de óxidos y de sulfuros de Mg. Las teorías hasta el momento estudiadas dan por hecho que el Mg es el centro de nucleación y el que produce dicha nucleación en forma esferoidal. Una de las teorías más aceptadas propone que existe una caída en el potencial de ionización de átomos de Mg lo que acompañado a la alta afinidad que existe en este estado entre el Mg y el C, y a la alta temperatura del baño, conduce a una interacción donador-receptor entre átomos de carbono y de Mg, con la formación del complejo Mg^+-C^- . Este servirá como núcleo o punto de partida para que el grafito se reúna a su alrededor, de esta manera la célula crece y forma un nódulo, esto explica en cierta forma la alta concentración en el centro de estos nódulos. La cantidad de Mg a adicionar en el baño debe ser bien dosificada para evitar formas indeseadas de grafito y variaciones imprevistas en la matriz; pues se sabe que el **Mg residual** (Mg total agregado como aleación menos el consumido en el proceso de desulfuración y de desoxidación) que excede la cantidad requerida actúa como un estabilizador de carburos, promoviendo la formación de carburos primarios en piezas de sección delgada o restringiendo la formación de estructura ferrítica en piezas de sección gruesa. Además, los contenidos excesivos de magnesio residual tienden a formar espumas y escorias con la consecuencia de poros en las piezas fundidas, el contenido de Magnesio residual oscila entre 0.05 y 0.08%, aunque existen otras teorías que afirman que la cantidad óptima está entre 0.03 y 0.06%. Hay que tener en cuenta, además, que el rendimiento del Magnesio no es del 100%, este depende de la temperatura del baño, del proceso empleado y de la concentración del Magnesio en la aleación. ^[8]

Al aumentar el porcentaje de magnesio residual se aumenta de igual forma la producción de nódulos y aparecen a veces formas muy variadas de grafito, tales como rosetas, láminas, etc. Cuando el Magnesio residual se encuentra en cantidades muy altas (por encima de 0.18%) ocasiona la aparición de grafito en forma de espiga, diseminado

entre los nódulos deformados. Cuando el Magnesio residual se encuentra en la proporción adecuada se presenta solo grafito en forma nodular y la presencia de otras formas de grafito es casi nula. ^[8]

2.9 Inoculación del Hierro Nodular

Se llama inoculación a la adición al hierro de una pequeña cantidad de material, generalmente de silicio, y/o grafito en presencia de otros elementos, para provocar una desoxidación y aumentar el grado de nucleación del grafito eutéctico y minimizar por consiguiente, la tendencia al temple y a la formación de tipos de grafitos indeseables que afectan desfavorablemente a la maquinabilidad y a las propiedades mecánicas del hierro colado. El silicio, calcio, bario y aluminio, llamados inoculantes, son capaces de influir sobre la transformación del carbono en grafito cristalizado. ^[9,10]

La inoculación consiste en la interacción entre los inoculantes y algunos elementos presentes en el baño metálico, dando lugar a productos de corta duración, cuya misión será promover la solidificación según el diagrama estable hierro-grafito, y que una vez solidificado el metal, no ejerce ninguna acción aunque vuelva al estado líquido.

La inoculación no es más que una nucleación heterogénea, y se debe cumplir en principio, las mismas leyes generales de la solidificación. ^[10]

Los efectos que pueden esperarse de un tratamiento de inoculación practicado en las mejores condiciones, son en primer lugar, las siguientes: ^[9,10]

- Favorecer la nucleación de celdas eutécticas.
- Composición química inalterada.
- Mayor homogeneidad de la estructura cristalina entre los distintos espesores.
- Solidificación según el sistema estable.
- Reducción de templabilidad en todas las composiciones del hierro.
- Evitar la formación de grafito subenfriado.
- Influencia favorable en las características mecánicas del hierro.
- Máxima duración del efecto inoculante.

- Actuar incluso en hierros de bajo contenido de azufre.
- No formar escorias o residuos difíciles de extraer.
- Efectividad inoculante, aunque sea a baja temperatura.
- Contener poco aluminio.

Con respecto a las propiedades mecánicas, los productos inoculantes a base de grafito no provocan ninguna mejora considerable. Como los productos a base de ferrosilicio si lo consiguen, resulta a menudo interesante utilizar una mezcla de ambos productos (los inoculantes a la venta son generalmente mezclas o combinaciones complejas). Si se emplea adecuadamente, la inoculación mejora la mayoría de las propiedades mecánicas de la fundición.

2.10 Mecanismo de Inoculación

La fase grafito es un cristal facetado que está limitado por planos de bajos índices de Miller como lo son los (0001) y $\langle 10\bar{1}0 \rangle$. En la figura 2.8 se aprecia la estructura cristalina del grafito. En las aleaciones líquidas del sistema hierro-carbono-silicio, el grafito tiene una estructura de capas con fuertes enlaces covalentes entre los átomos de la misma capa y enlace débil de Vander Waals entre capas. El plano prismático es de alta energía donde preferentemente se absorben los átomos de impurezas; y las direcciones de crecimiento a partir del líquido es en la dirección del polo del plano prismático. ^[1]

La completa disolución de la estructura del grafito ocurre a 4000°C, lo cual es posible que existan agregados de grafito en el líquido a temperaturas por encima de la del liquidus. Estos hechos conducen a establecer la improbabilidad de la nucleación homogénea del grafito a partir del líquido; sin embargo, los racimos de grafito no disueltos pueden servir de nucleantes heterogéneos. ^[1]

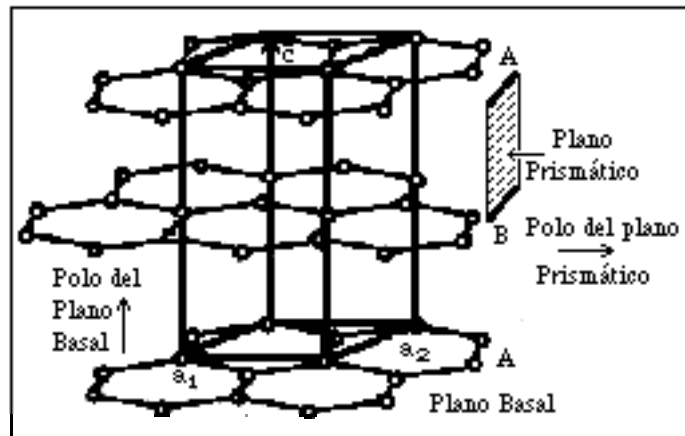


Figura 2.8 Estructura cristalina del grafito. ^[1]

La adición al líquido de elementos formadores de carburos tipo sal que contengan el ion C_2^{2-} , figura 2.9, incrementa el número de celdas eutécticas. Cuando el líquido es inoculado con un elemento inoculante puro como el calcio, parte se funde y debido a su baja solubilidad forma gotas donde a su alrededor el metal líquido está desulfurado y desoxidado; el remanente de calcio forma carburo de calcio con una estructura como la mostrada en la figura 2.9, estructura que permite el crecimiento epitaxial del grafito laminar a partir del líquido como lo esquematiza la figura 2.10. ^[1]

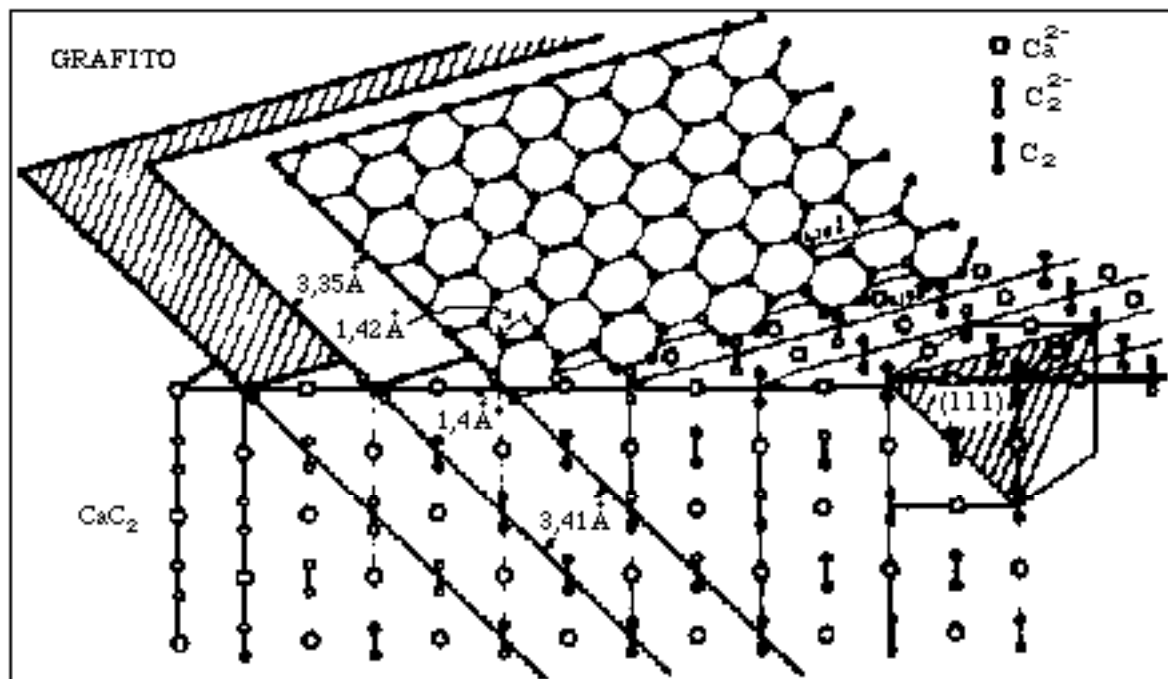


Figura 2.10 Crecimiento epitaxial del grafito. ^[1]

2.11 Procedimientos de Inoculación

2.11.1 Inoculación en la cuchara (pre-inoculación)

- Introducir mediante espolvoreo, remoción o proyección de un inoculante en el chorro de metal durante el llenado de la cuchara de colada o de transporte.
- Inyección de una colada con ayuda de un gas portador.
- Dilución en un baño desescoriado.
- Adición en una cuchara vacía o poco llena y colada del resto del baño a inocular.

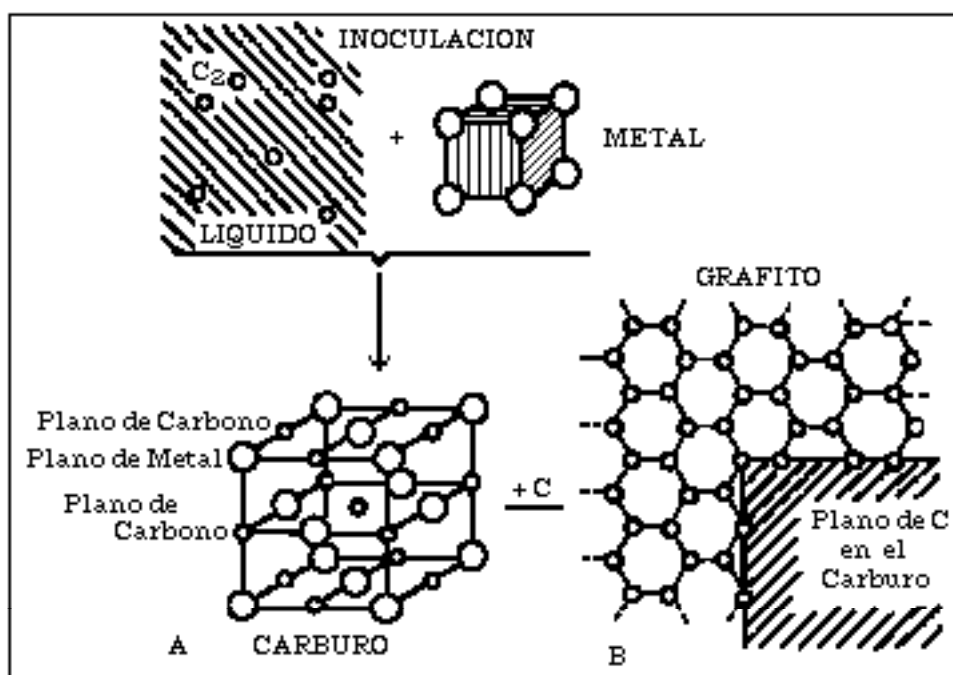


Figura 2.9 Estructura del grafito donde se aprecia la formación de carburos tipo sal. ^[1]

2.11.2 Inoculación en el molde (post-inoculación)

- Espolvoreo de un inoculante en el chorro de colada.
- Espolvoreo en el molde antes de la colada.
- Proyección sobre las paredes del embudo de colada de un inoculante en polvo.
- Colocación de núcleos o de pastillas de inoculante en los sistemas de alimentación del molde.
- Colocación de un inoculante en el molde ante un dispositivo de paso, introducido en el sistema de alimentación de forma especial.

La eficacia del tratamiento va ligada a la velocidad de colada, así como a la idoneidad del sistema de alimentación del molde.^[10]

2.12 Tratamiento de Nodulización

Es un proceso que sigue normalmente a la fusión o a la desulfuración, que consiste en añadir al baño metálico preacondicionado, elementos esferoidizantes tales como: magnesio, cerio, calcio, litio, sodio, y/o bario, para ayudar a la esferoidización del grafito.^[10]

En la práctica industrial, el magnesio es el esferoidizante del grafito que más se utiliza. Tal como se dijo antes, otros elementos son capaces de producir el mismo efecto. Algunos de ellos forman parte de las aleaciones en que el magnesio es el principal esferoidizante. Estos componentes suelen añadirse para minimizar la violencia de la reacción; pero también, suelen tener como objetivo la obtención de un estado metalúrgico óptimo.^[11]

2.13 Adición de Magnesio al Baño Metálico

No es conveniente añadir el magnesio en forma metálica al baño de fundición, porque da lugar a una reacción violenta con desprendimiento de humos, de proyecciones de metal y de pérdidas importantes de magnesio, con lo cual se minimiza la formación de los nódulos de grafito.^[2]

Usualmente el magnesio es introducido al baño de fundición por la adición de una aleación de ferro-silicio-magnesio (MgFeSi o FeSiMg). Cuando el magnesio es añadido al baño, su primer efecto es combinarse con el azufre y el oxígeno presentes en el baño para formar sulfuros y óxidos. El magnesio no libre puede quedar en solución para promover la formación del grafito esferoidal hasta que todo el oxígeno y el azufre hayan sido consumidos. Con las cantidades de oxígeno y de azufre en el baño metálico, se realiza una adición de magnesio mayor a la necesaria. Esta adición es hecha para compensar las pérdidas por la evaporación durante la adición. Solo una fracción del magnesio es disuelta en el hierro después que la reacción de nodulización se completa.^[12]

El magnesio residual contenido en el hierro líquido inmediatamente después del tratamiento se presenta de la siguiente forma:

- Magnesio disuelto.
- Micro inclusiones de magnesio (óxidos y sulfuros).
- Magnesio contenido en escorias.

Estas contribuciones de magnesio reaccionarán en diferentes formas en el hierro. Un ejemplo esquemático del magnesio contenido en el metal se puede apreciar en la figura 2.11. No es posible separar estas tres contribuciones de magnesio en el metal por métodos analíticos convencionales, solo se puede obtener el magnesio contenido en la fundición nodular.

2.14 Métodos de Nodulización.

2.14.1 Cuchara de reacción utilizada para la adición del magnesio

Existen diferentes métodos o procesos para añadir el magnesio al baño metálico para promover el hierro nodular. La cuchara reacción (método de trasiego) es el método más empleado en la mayoría de los procesos. Este sistema provee un alto recubrimiento del magnesio, con una eficiencia de alrededor del 60 a 80 % de recubrimiento, con un costo mucho más bajo que otros procesos comerciales. La cuchara reacción minimiza o reduce la llama o destello que produce la reacción del magnesio, también evita el desbordamiento o salpicado de metal, y reduce las pérdidas de temperatura. En la figura 2.12 se muestra la cuchara reacción.^[13]

La mayor cantidad de fundición con grafito nodular se está produciendo con el método del trasiego. Su principal ventaja es la sencillez. Previo a verter la fundición líquida en la cuchara de reacción, se coloca en el fondo de la misma, la aleación nodulizante de magnesio (ver figura 2.12). La corriente de hierro líquido debe dirigirse lejos del emplazamiento de la aleación y la cuchara debe llenarse con rapidez.

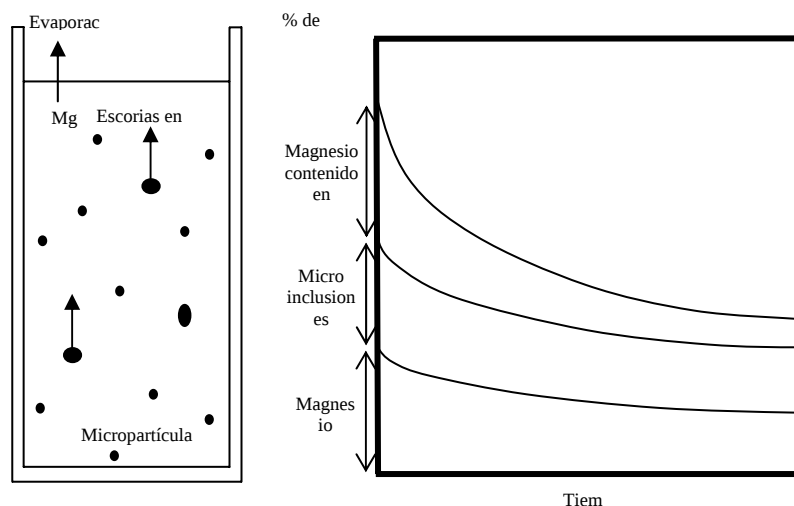


Figura 2.11 Diferentes formas en la que se presenta el magnesio en el metal. ^[12]

Una variante de este método, consiste en cubrir la aleación de magnesio con pequeños trozos de acero. Dicha cobertura de acero retrasa el comienzo de la reacción de vaporización y de calcinación de los elementos nodulizantes, así como la reducción local de la temperatura del líquido en torno a la aleación nodulizante, lo cual aumentaría en cierto grado la recuperación del magnesio, ya que esta depende en gran medida de la temperatura de tratamiento. ^[10]

2.15 Aleación de magnesio utilizada en la cuchara Tundish

En la cuchara Tundish pueden ser usados la mayoría de las aleaciones de Ferro-Silicio-Magnesio que contienen entre 3 y 12 % de magnesio, pero generalmente las aleaciones usadas contienen entre 4 y 6 %. Una aleación de la marca ELKEM presenta la siguiente composición en peso:

- 45 % Silicio.
- 5 % Magnesio

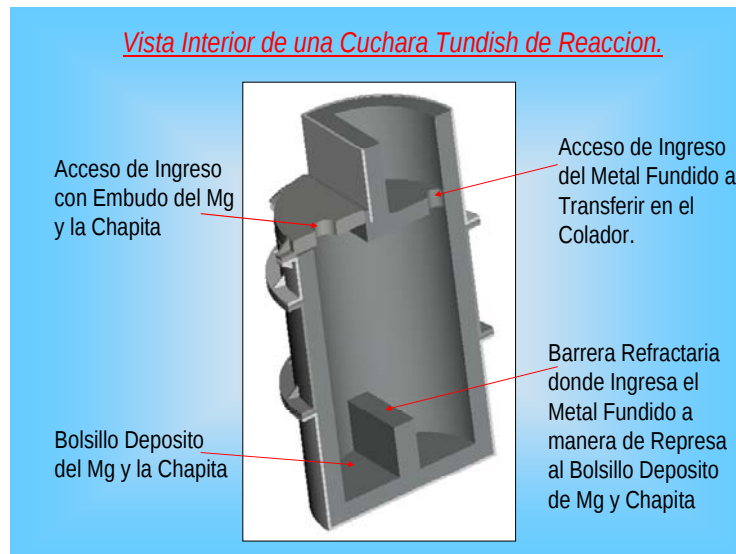


Figura 2.12 Cuchara Tundish utilizada en la inoculación del metal.

Mientras que otra aleación nodulizante de la marca Italmagnesio tiene cierto porcentaje de tierras raras (cerio, lantano y otros). La composición es la siguiente:

- 45 % Silicio.
- 5 % Magnesio.
- 2.5 % Lantano.
- 0.5 % Cerio.
- 0.35 % Lantánidos (neodimio, praseodimio, itrio, samario y otros).

2.16 Material para cubrir la aleación de magnesio

Como ya se mencionó anteriormente, es recomendable usar un material para cubrir la aleación de magnesio en la cámara de reacción de manera de obtener el máximo rendimiento. La cubierta de metal debe retener la aleación de magnesio en la cámara por el mayor tiempo posible antes que la reacción comience. La cubierta metálica comúnmente consiste de trozos o de recortes de acero similar al que se usa en la carga para fundir. ^[13]

Para el caso de la empresa S. H. Fundiciones, el material utilizado para recubrir consiste en pequeñas pletinas de acero de aproximadamente 4 o 5 cm. de largo por 2 cm. de ancho, al cual se llaman chapita; por lo tanto, cuando se esté hablando de

chapita, se estará refiriendo al material que recubre la aleación de magnesio en la cámara de reacción.

2.17 Solidificación del hierro nodular

El proceso de solidificación siguiendo el diagrama estable de una aleación de composición eutéctica del sistema hierro-carbono-silicio produce celdas eutécticas bifásicas de grafito laminar y de austenita de composición eutéctica; esa morfología es monocristalina donde la fase facetada ha tenido un solo punto de nucleación. El enfriamiento muy lento de esta aleación requiere de muy poco subenfriamiento cinético para producir la nucleación de un relativamente bajo número de celdas eutécticas que crecen lentamente; estos eventos conducen a la generación de una microestructura de solidificación de largas y delgadas láminas de grafito tipo A. Para reducir el tamaño y mejorar la distribución de esas celdas eutécticas, se añaden al líquido pequeñas cantidades de materiales que producen nucleación heterogénea, denominados inoculantes; estos materiales producen mejora en las condiciones de nucleación y, en consecuencia se crea un aumento en el número de las celdas eutécticas sin producir cambios apreciables en la morfología del grafito. ^[1]

La solidificación del hierro nodular es un proceso similar a la solidificación de la fundición gris, excepto por la considerable controversia sobre las fuerzas que causan el crecimiento del grafito eutéctico en una dirección cristalográfica diferente para obtener una morfología final diferente con nódulos de grafito en vez de grafito laminar. ^[14] Como ya ha sido mencionado, los elementos nodulizantes como el magnesio, son superficialmente activos, y conducen a que la cinética del adosamiento atómico del carbono cambie la dirección de crecimiento desde el polo del plano prismático hacia el polo del plano basal, lo cual hace que se produzca la morfología de crecimiento esquematizada en la figura 2.7 ^[1]

Después de la solidificación, la difusión de carbono hacia los nódulos preexistentes de grafito continúa porque la solubilidad del carbono en la austenita disminuye con la temperatura. En esta etapa, la austenita se transforma en ferrita y más átomos de carbono difunden a los nódulos, ya que la solubilidad del carbono es más

baja en la ferrita que en la austenita (0.025 %). La microestructura de equilibrio resultante es una matriz ferrítica con nódulos de grafito. ^[3]

2.18 Colabilidad

En fundición, la colabilidad se define como la capacidad que tiene el metal o aleación líquida de llenar completamente un molde de dimensiones estandarizadas. ^[15] Esta capacidad de los metales y sus aleaciones, de fluir libremente antes de solidificarse para producir fielmente los detalles del molde, es una de las etapas más críticas del proceso de fabricación de la pieza moldeada.

La colabilidad fue una de las primeras propiedades de fundición establecida, y tal vez, ha sido la más estudiada. La razón de esta afirmación radica en su complejidad y en el deseo de muchos investigadores en querer identificarla con una característica física en particular. La viscosidad, por ejemplo, no permite definir adecuadamente la colabilidad, en virtud a que los metales en estado líquido son poco viscosos y se comportan en régimen turbulento como el agua a temperatura ambiente. En la figura 2.13 se aprecia como varía la viscosidad en función de la composición química a diferentes temperaturas. En el trabajo de Hoart y Atterton (1950), y en otros de apariciones más reciente (Hecht, 1986), se demuestra que el comportamiento del metal líquido a través del enjambre de dendritas, la copia de detalles del molde y de los ángulos, están notoriamente influenciados por la tensión superficial. En dichos estudios se establece la existencia de una relación directa entre la tensión superficial y la presión necesaria para que el metal líquido penetre en los pequeños vacíos de las paredes de los moldes de arena. ^[14]

Otra característica física con la cual se ha querido definir la colabilidad, y que en efecto está mas directamente relacionada con la capacidad de un líquido para fluir bajo una determinada presión, es la viscosidad cinemática. ^[14]

2.19 Métodos de Determinación de la Colabilidad

La gran mayoría de los métodos de medida de colabilidad conocidos presentan un defecto común, es que los resultados obtenidos son de naturaleza empírica y comparativa. La representación cuantitativa de la colabilidad por medio de una escala de longitud, es válida únicamente si las condiciones del ensayo permanecen invariables. Como esto es muy difícil de realizar en la práctica, se presenta una gran dispersión en los resultados. Esta manera poco representativa de definir la colabilidad indujo a investigadores como *Malesevic* y *Olivier*, a diseñar métodos que permitieran caracterizar la colabilidad de una manera absoluta. Es decir, representado por ejemplo, en la capacidad del metal en estado líquido de utilizar la energía disponible del sistema; o en el área alimentada de una serie de segmentos rectilíneos de secciones diferentes. Esto permite definir la colabilidad mediante un índice numérico, sin dimensiones, lo cual es a todas luces más representativo. ^[14]

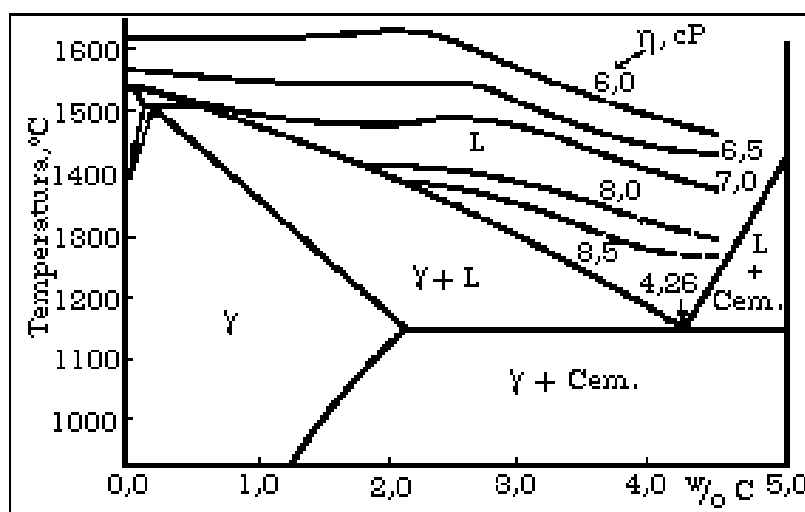


Figura 2.13 Variación de la viscosidad en función de la composición química. ^[1]

Desde los trabajos de *West* (1902) y *Cury* (1924), hasta los de *Malesevic* y *Olivier* ya referenciados, se puede indicar que los métodos seguidos en las investigaciones para medir la colabilidad se reducen a:

- Colada del metal en una probeta recta bajo presión metalostática.
- Colada del metal en una probeta en espiral, también bajo presión metalostática.

- Colada del metal bajo presión metalostática en un recipiente en forma de U.
- Ensayo al vacío en el cual el metal es aspirado en un canal de vidrio horizontal recto de sección redonda.
- Ensayo al vacío en el cual el metal es aspirado en un tubo de vidrio vertical de sección circular.
- Colada del metal bajo presión metalostática en una probeta constituida por una serie de segmentos rectos de secciones cuadradas, dispuestos en forma de parrilla (*probeta de Olivier*).

Muy pronto se constató, que el método de la colada del metal en una probeta recta y bajo presión metalostática, no convenía por su excesiva longitud. La probeta en espiral, llamada por algunos probeta de *Cury*, es de uso frecuente en las fundiciones. Existen varias versiones estandarizadas de esta probeta, siendo la más conocida la realizada por Taylor. ^[14] Esta fue la probeta utilizada para realizar los ensayos de colabilidad en la empresa Dana división S.H. Fundiciones.

La fluidez de la fundición se determina con mayor frecuencia por la prueba de la espiral con sección trapezoidal con un área de $0,56 \text{ cm}^2$. Después se mide la longitud de la parte llenada de la espiral, que caracteriza la fluidez. ^[15] En la figura 2.14 se muestra el dibujo de la espiral utilizada en los ensayos.

2.20 Parámetros que Afectan la Colabilidad

La colabilidad está influenciada por diversos factores, entre los cuales destacan:

- La naturaleza de la aleación, de la cual depende la temperatura del líquido, el modo de solidificación, la tensión superficial y la mayor o menor aptitud a la formación de capas de óxidos.
- La naturaleza del molde, su temperatura, tipo de arena, aglomerantes, etc.
- Factores propios de la colada: temperatura del metal, velocidad de colada, presión del metal relacionada con el sistema de alimentación y llenado.
- Tratamientos del metal líquido en la cuchara.
- La forma de la pieza. ^[14]

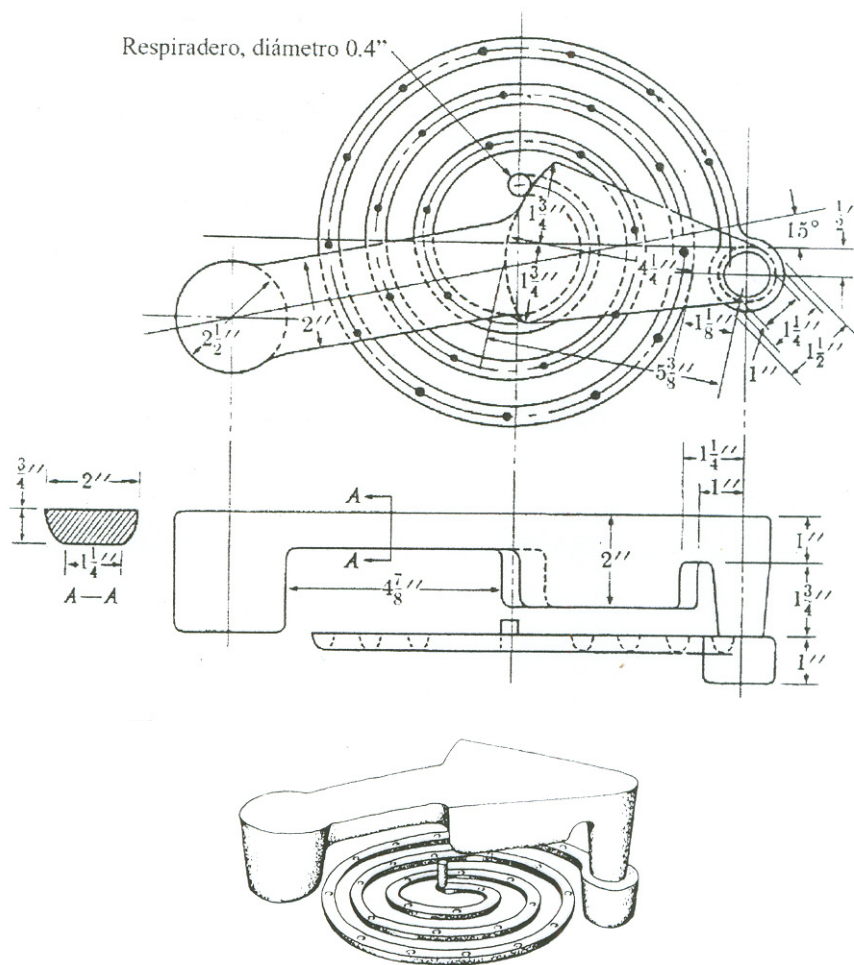


Figura 2.14 Espiral utilizada en los ensayos de colabilidad. ^[12]

De los factores indicados, la temperatura de colada y la naturaleza de la aleación, son los que ejercen la mayor influencia en el comportamiento de la colabilidad. La temperatura en el momento de la colada, determina la cantidad de calor que se debe disipar, antes de que se inicie la solidificación. El otro factor que incide notoriamente en la colabilidad, es la naturaleza de la aleación. Altos valores de colabilidad se encuentran en los metales puros y en las aleaciones de composiciones eutécticas; mientras que aquellas que forman soluciones sólidas, en especial las que tienen un amplio rango de solidificación, presentan una baja colabilidad, (Figura 3.15). Los profesores *Portevin* y *Bastien*, encontraron una relación inversa entre el valor de colabilidad y el rango de solidificación de algunas aleaciones. Dicha relación fue confirmada posteriormente en aleaciones no ferrosas (Figura 2.15). ^[14]

Para un grado de sobrecalentamiento equivalente, las diferencias encontradas en el comportamiento de la colabilidad de algunas aleaciones se atribuyen a la forma como solidifican. Sin embargo, en virtud que el tiempo de enfriamiento de la aleación está influenciado por factores como: (a), variables del metal: temperatura, viscosidad, y calor de fusión; (b), variables del molde y del sistema metal-molde que incluyen a: resistencia en la interfaz al flujo de calor, conductividad térmica del molde, densidad del metal líquido, calor específico del mismo, y presencia de inclusiones en el líquido; y (c), variables experimentales como altura de presión y diámetro de los canales. Parámetros como las inclusiones, gases disueltos, también afectan la medida de colabilidad. El clásico ejemplo de la influencia que sobre la colabilidad ejerce el tratamiento que se hace al metal líquido en la cuchara, se observa en las fundiciones con grafito laminar y en las fundiciones con grafito esferoidal de igual composición química. La presencia de numerosas inclusiones en suspensión en el metal líquido de estas fundiciones, conduce a una disminución de su colabilidad; en condiciones de experimentación, naturalmente idénticas. ^[2,14]

2.21 Influencia de la Composición Química

La fluidez de la fundición se incrementa al aumentar el contenido de silicio, de fósforo y especialmente de carbono, alcanzando el máximo en las fundiciones de composición eutéctica, determinada por la suma $\%C + \%Si/3 + \%P/2$, tal y como se aprecia en la figura 2.16.

El fósforo mejora la fluidez de la fundición, reduce su tensión superficial y viscosidad. Tiene una gran importancia el elevado contenido de fósforo (hasta 1- 1.5%) para la fundición artística, cuando se requiere una fluidez elevada. El azufre y el manganeso por separado influyen poco en la fluidez, pero al combinarse estos elementos se crea el sulfuro de manganeso, que reduce considerablemente la fluidez.

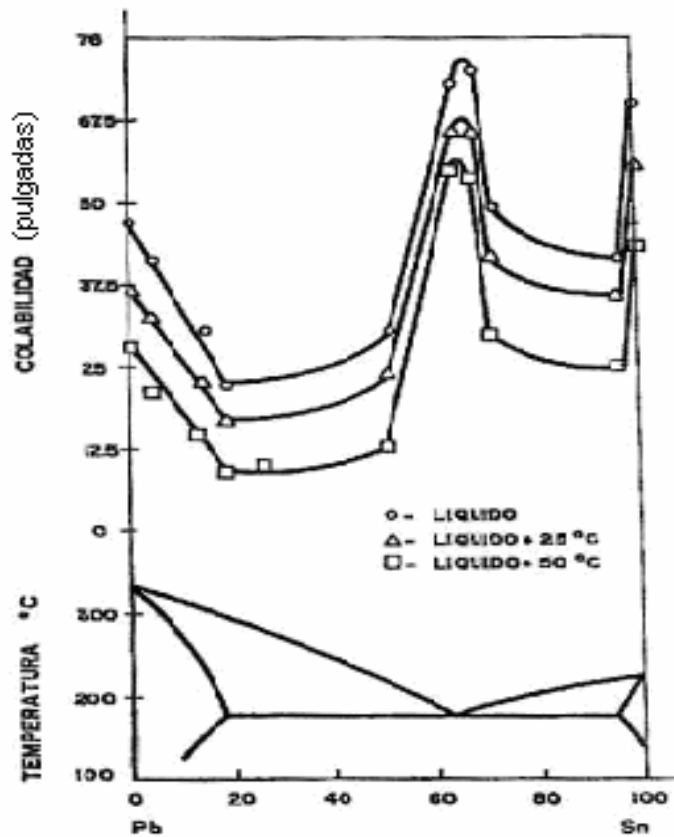


Figura 2.15 Relación entre la composición química y la colabilidad. ^[14]

La fluidez específica, F_e , está determinada por la expresión:

$$F_e \text{ (pulg.)} = 14,9 F_c + 0,05 T - 155 \quad (2)$$

Donde T está en $^{\circ}\text{F}$ y F_c es el factor de composición y está dado por siguiente expresión:

$$F_c = \%C + 0,25 \%Si + 0,50 \%P \quad (3)$$

Un valor del factor de composición $F_c = 4.55$ es indicativo de máxima fluidez donde la ecuación (3) expresa la naturaleza eutéctica de la fundición gris para propósitos de fluidez. Se obtiene máxima fluidez cuando simultáneamente la temperatura de vaciado es máxima y la composición es la eutéctica. Los hierros grises de composición hipereutéctica sufren una extrema pérdida de fluidez debido a la presencia del carbono precipitado como grafito primario. ^[2]

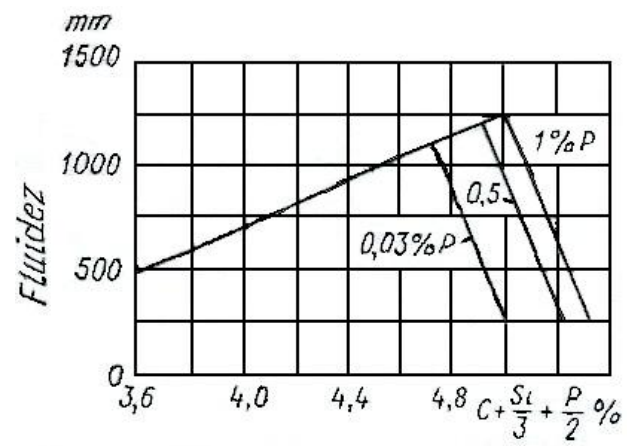


Figura 2.16 Influencia del carbono, silicio y fósforo en la fluidez de la fundición. ^[15]

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.1 Elaboración del Molde de la Probeta en Espiral

Para elaborar el molde de la probeta en espiral, se procede a preparar la arena de moldeo en el molino mezclador, Figura 3.1. Esta arena de moldeo es una mezcla de arena sílice, una resina (CHEM REZ 220) y un catalizador (CHEM REZ 2205). El proceso de preparación de la arena de moldeo se inicia con la mezcla de arena sílice con la resina, utilizando el molino. Al transcurrir 4 minutos aproximadamente, la mezcla toma un color rosado pálido y en ese momento se agrega al molino el catalizador, dejándolo por 2 minutos hasta que la mezcla tomó un color verde claro. Las proporciones de arena sílice, resina y catalizador se muestran en la Tabla 3.1



Figura 3.1 Molino Mezclador

Tabla 3.1 Proporción de mezcla para la preparación de arena fenólica.

Materia Prima	Cantidad requerida (%)
Arena sílice	97.5
Resina fenólica	2
Catalizador	0.5

Posteriormente se vacía la arena de moldeo en una placa modelo con la forma de la espiral (Figura 3.2.a), luego se compacta hasta llenar completamente la placa con la caja. Luego de secarse la arena se procede a retirar la placa modelo para obtener lo que

se denomina la parte inferior del molde (figura3.2.b). El tiempo de secado de la arena es de 30 minutos aproximadamente.

Al secarse completamente la parte inferior del molde, se llena con arena sílice la cavidad del mismo que contiene la forma de espiral, para proceder a colocar el bacín, que es un implemento con el que se obtiene la entrada de metal en el molde y luego se procede a vaciar la arena de moldeo para obtener la parte superior del molde.

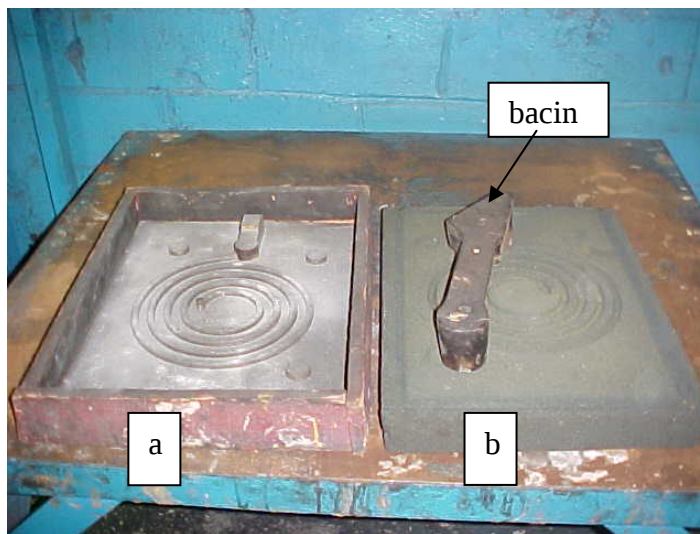


Figura 3.2 (a) Placa modelo con la forma de la espiral **(b)** la parte inferior del molde.

Una vez seca la parte superior del molde, se procede a retirar el bacín quedando así la entrada de metal, para posteriormente separar ambas partes (superior e inferior), para luego retirar la arena contenida en la cavidad, para que así pueda fluir el metal en dicha cavidad que es la que dará la espiral, previamente debe estar preparada un termopar en cuyo extremo se le coloca un noyo con el fin de colocarla en la parte inferior del molde y obtener la curva de enfriamiento del metal durante la colada en el molde.

Luego se arman ambas partes del molde y se coloca un sellador entre ambas, para así asegurarse la completa unión del molde, de manera de evitar la infiltración del metal.



Figura 3.3 Parte inferior del molde con termopar

3.2 Colada de la Espiral

El volumen de metal en la cuchara Tundish es ajustado en función de la pieza que se este colando, el operador debe añadir la cantidad necesaria a la cuchara de reacción de tal manera que pueda colar 12 moldes por cada cuchara. Por esta razón es necesario ajustar la cantidad de todos los aditivos y ferroaleaciones para cada volumen de metal.

Para minimizar el número de variables en este estudio todos los espirales fueron colados junto con el número de parte 47777 (COCO 80) en donde las cantidades utilizadas están referidas en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Cantidades añadidas en la cuchara de reacción

	Cantidad en Kg.
Metal	1200
FeSiMgCe	10
Chapita	7.5-16
Grafito	1
FeSi	3.5-5
IM75B	1

El operador de la torre de pre-inoculación (chapitero) remueve el tapón de la cuchara Tundish y agrega primeramente el magnesio y este es depositado en el bolsillo al fondo de la cuchara utilizando un embudo metálico, seguidamente se añade la chapita a la

cuchara utilizando el mismo embudo, de tal manera que esta quede sobre el magnesio a fin de retardar la reacción del magnesio con el metal líquido.



Figura 3.4 Torre de pre-inoculación

Se coloca nuevamente el tapón de la cuchara y se procede a cargarla con metal, el grafito, IMB75B y FeSi, se agregan en la boca del horno de mantenimiento en el momento de cargar la cuchara de reacción, para dar lugar a una buena agitación del baño. Figura 3.5



Figura 3.5 Carga de la cuchara Tundish

Una vez cargada la cuchara se transfiere el metal al colador de la línea Osborn para iniciar la colada de los moldes, Figura 3.6. Para colocar los moldes de la espiral se interrumpe la foto celda de la línea de colada en el 4to molde de tal manera que todos los espirales colados en este estudio correspondan al 5to molde de la colada, y así garantizar que todos los moldes se cuelen bajo las mismas condiciones. Al interrumpir la foto celda el sistema deja de pasar un molde, creando un espacio en el que se coloca

una plataforma diseñada de tal manera que se apoye sobre los moldes vecinos, sobre esta plataforma se coloca el molde de la espiral, obteniéndose muestras del metal que se cuela en la línea para ese momento. Es importante acotar que en el termopar del molde se conecta un equipo registrador de temperatura capaz de almacenar datos en 6 líneas distintas por cada segundo, este equipo siempre debe ir debajo de la plataforma para evitar que se derrame metal líquido sobre este, Figura 3.7.



Figura 3.6 Transferencia del metal de la cuchara de reacción al colador

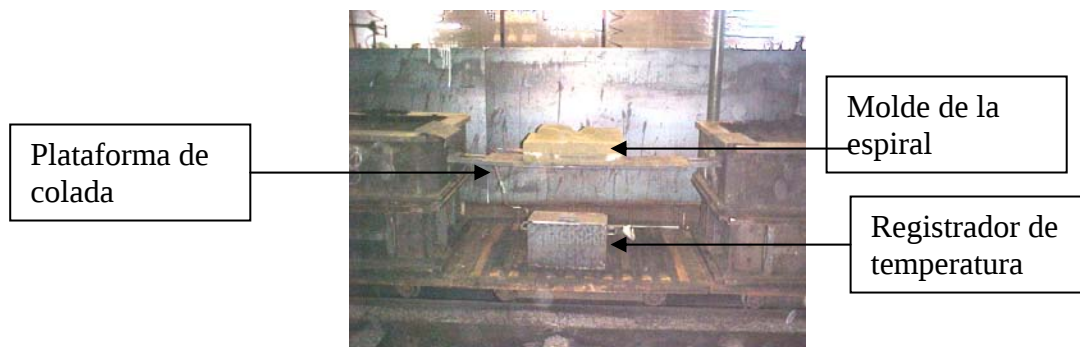


Figura 3.7 Montaje del molde de las espirales en la línea de colada.

El operador del colador cuela uno a uno los moldes del sistema hasta llegar a la plataforma de colada de la espiral y vierte el metal líquido en el bacín del molde agregando simultáneamente post-inoculante desde una tolva en el carro de colada.

Una vez colada una espiral se procede a repetir inmediatamente el ensayo en donde se variará la cantidad de chapita o el tipo de chapita. Es importante que todas las

espirales sean coladas del mismo metal del horno tambor para evitar la influencia de otras variables en este ensayo.

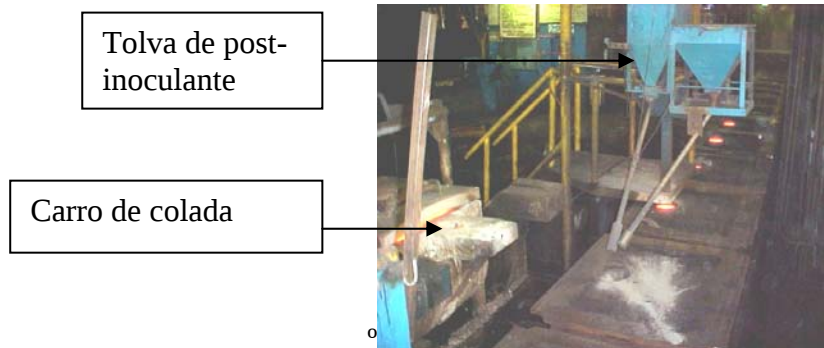


Figura 3.8 Línea de colada Osborn

3.3 Toma de Pastilla

Cuando se terminan de colar todos los moldes correspondientes a una cuchara se procede a tomar una muestra de metal líquido que queda en el colador utilizando un cucharín metálico. Se introduce el cucharín en el colador para tomar la muestra de metal y con rapidez se vierte en el molde metálico para conformar la pastilla, es necesario triturar un pequeño pedazo de la pastilla para analizarlo en el carbonómetro y la pastilla que queda debe ser rectificada por una cara para analizarla en el espectrómetro de masa. Es importante que todas las pastillas sean tomadas al final de la colada de todos los moldes para determinar el magnesio remanente en la aleación.



Fig. 3.9 Cuchara para obtención del metal líquido



Fig. 3.10 Molde metálico para pastilla

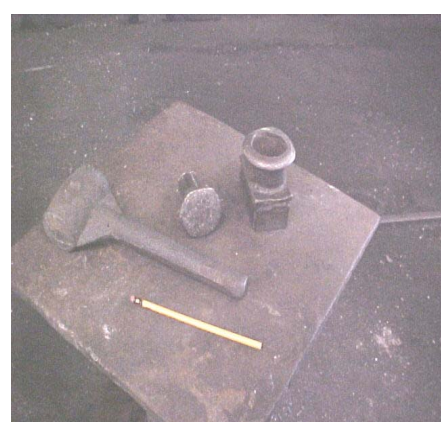


Fig. 3.11 Herramientas de trituración de pastillas

3.4 Retiro de los Moldes del Sistema

Los moldes de los espirales son retirados de la línea justo antes de entrar al sistema de enfriamiento para darle el mayor tiempo de registro de datos posible antes de desmoldear los espirales y de esta manera obtener la mayor cantidad de datos en el registrador. Se rompe el molde de arena, y se procede a retirar cada espiral, donde luego se cuenta la longitud recorrida por el metal (colabilidad), para facilitar la determinación de la longitud del espiral este posee unos puntos a lo largo de toda la longitud espaciados a 2 pulgadas de separación.

3.5 Análisis Metalográfico

Para el análisis Metalográfico, se corta un trozo de metal de la espiral, la muestra obtenida es pulida siguiendo el método mecánico convencional de desbaste grueso, desbaste fino y pulido con alúmina 0.3 μm .

Posteriormente se coloca la pieza en un microscopio óptico (marca Willson), para hacer el conteo de nódulos de una sección definida, que luego se multiplica por un factor de 30, (factor del microscopio que representa el área de los nódulos contados), cuyo resultado representa la densidad de nódulos (nod/mm^2). Cabe resaltar que el conteo de nódulos se realizaba a un aumento de 200X. Las muestras de espirales no requieren de ataque químico ya que los nódulos de grafito pueden ser vistos sin atacar la muestra.

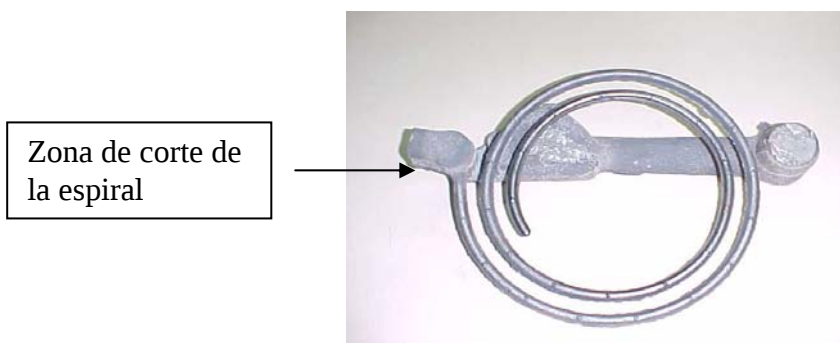


Figura 3.12 Espiral



Figura 3.13 Microscopio óptico (Wilson)

3.6 Análisis Químico

La pastilla rectificada y la pastilla triturada deben ser llevadas al laboratorio donde se determinara la composición química de la aleación en el espectrómetro de masa y el contenido de carbono en el carbonómetro.



Figura 3.14 Espectrómetro de masa

3.7 Ensayo de Esparcimiento de la Chatarra en el Bolsillo de la Cuchara Tundish

Se presume que los diferentes tipos de geometría de la chatarra generan diferencias en el esparcimiento o acomodamiento que puede alcanzar una u otra chatarra sobre el magnesio contenido en el bolsillo de la cuchara Tundish. Para determinar el

grado de efectividad del esparcimiento de la chatarra en el bolsillo se ha ideado un ensayo llamado (ensayo de esparcimiento).



Figura 3.15 Carbonómetro

Una cuchara Tundish tiene 3 partes principales: la base, donde se encuentran el bolsillo y la barrera de refractario, la tapa, parte superior de la cuchara y el cuerpo, que es la sección que une la base y la tapa, Figura 2.12. Para la realización del ensayo de esparcimiento se utilizó una cuchara Tundish en mantenimiento armada sola entre el cuerpo y la tapa, y con una grúa puente se puede quitar y poner en la base cuantas veces fuese necesario.

Se pintaron 10Kg. de magnesio con pintura roja con la única intención de que este pueda ser visto con facilidad en la fotografía, y utilizando el mismo embudo de la cuchara se cargo el magnesio en el bolsillo de la cuchara desde el tapón de la tapa, seguidamente se añade a la cuchara Tundish la cantidad de Chatarra deseada (7,5 o 12)Kg utilizando el mismo embudo, luego con la ayuda de la grúa puente se retira el cuerpo y la tapa de la cuchara y se toma la fotografía para registrar el grado de recubrimiento del tipo y cantidad de la chatarra sobre el magnesio.

Se retira la chatarra del bolsillo y se vuelve a armar el conjunto de la cuchara Tundish y se repite nuevamente el ensayo variando la cantidad de chapita y el tipo de chatarra utilizando el magnesio añadido en el primer ensayo. Es importante tomar la fotografía de cada ensayo para el registro.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados Chatarra Parish Cuadra, Rudebeca Triangular

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en este trabajo, esta sección está referida al estudio comparativo entre la utilización de la chatarra Parish, que es la chatarra que se utiliza actualmente en la preparación de la aleación de hierro nodular de S.H. Fundiciones Vs. la chatarra Rudebeca (triangular).

Tabla 4.1.1 Pruebas de Colabilidad con Chapita Rudebeca y Chapita Parish

	Rudebeca	Parish	Rudebeca	Parish	Rudebeca	Parish	Rudebeca	Parish
Fecha	10/01/2005	10/01/2005	11/01/2005	11/01/2005	12/01/2005	12/01/2005	13/01/2005	13/01/2005
Temp. Colada(°C)	1438	1431	1425	1420	1425	1420	1425	1420
Colab.(pul)	61	52	63	52	60	52	62	54
D.Nód (nod/mm^2)	705	720	720	750	720	690	720	670
Peso del Metal (Kg)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
%C	3.680	3.750	3.640	3.580	3.640	3.580	3,550	3,560
%Mn	0.660	0,66	0.520	0.530	0.520	0.530	0,550	0,550
%Si	2.500	2.560	2.600	2.760	2.600	2.760	2,650	2,640
%S	0.013	0.014	0.012	0.012	0.012	0.012	0,012	0,012
%P	0.025	0.026	0.021	0.022	0.021	0.022	0,021	0,022
%Ni	0.017	0.020	0.016	0.015	0.016	0.015	0,015	0,015
%Cr	0.039	0.047	0.026	0.026	0.026	0.026	0,030	0,,030
%Cu	0.370	0.380	0.040	0.040	0.040	0.040	0,035	0,035
%Mg	0,037	0,035	0,039	0,036	0,038	0,037	0,039	0,037
%Ce	0.005	0.008	0.005	0,005	0.005	0.005	3,550	3,560
%Sn	0.006	0.009	0.006	0.006	0.006	0.006	0,006	0,006

En la tabla 4.1.1 se puede apreciar que la utilización de la chatarra Parish y la Rudebeca tienen efectos diferentes sobre el hierro nodular, principalmente en cuanto a la colabilidad y el magnesio residual presente en la aleación, a continuación

analizaremos el efecto de cada una de las variables presentes para determinar el porque de esta situación.

Las diferencias principales entre la chatarra Parish y la la Rudebeca son:

- La composición química.
- El espesor
- La geometría.
-

4.2 Análisis Químico de la Chatarra Rudebeca y Parish

Una de las variables entre los tipos de chatarra es la composición química, la chatarra Parish proviene de tiras de ejes que son cortadas manualmente en una cizalla hidráulica, la chatarra Rudebeca proviene de material de desecho del troquelado de acero en la elaboración de rines para vehículos. Ambas chatarras se le ha colocado el nombre según la fuente de suministro, la chatarra rudebeca existe en diferentes geometrías pero todas tienen la misma composición química. Tanto la chatarra Parish como la Rudebeca fueron analizadas en el espectrómetro de masa y los resultados se muestran en la Tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1 Análisis químico de Chapita Parish y Rudebeca

%Elemento	Cha. Parish	Cha. Rudebeca
Mn	0.980	0.32
Si	0.030	0.015
S	0.010	0.014
P	0.016	0.020
Ni	0.019	0.025
Cr	0.022	0.031
Cu	0.045	0.043
Mg	1.000	1.000
Al	0.020	0.020
Sn	0.005	0.006

Se calculó el porcentaje de cada elemento en el metal de la cuchara Tundish adicionado por 7Kg de Chapita por cuchara, utilizando la chatarra Parish y Rudebeca en las Tablas 4.2.2 y 4.2.3

Tabla 4.2.2 porcentaje de cada Elemento en el metal de la cuchara Tundish adicionado por 7 Kg. de chatarra Parish

	% Elemento	Masa para 7Kg Chatarra Parish	% Agregado a la cuchara por la chatarra Parish
Mn	0.980	0,06860	0,00572
Si	0.030	0,00210	0,00018
S	0.010	0,00070	0,00006
P	0.016	0,00112	0,00009
Ni	0.019	0,00133	0,00011
Cr	0.022	0,00154	0,00013
Cu	0.045	0,00315	0,00026
Mg	1.000	0,07000	0,00583
Al	0.020	0,00140	0,00012
Sn	0.005	0,00035	0,00003

En la tabla 4.2.1 se observa la composición química de cada tipo de chatarra, en donde la diferencia principal es el contenido de manganeso entre una y otra, la chatarra Parish contiene 0.98% de Mn mientras que la chatarra Rudebeca contiene 0.32% de Mn, en donde la chatarra Parish contiene mas de 3 veces el % de Mn que la chatarra Rudebeca, en las tablas 4.2.2 y 4.2.3 se puede apreciar el aporte que hacen a la química del metal la chatarra Paris y Rudebeca en la cuchara de reacción para 1200Kg de metal y en ninguno de los casos existe una aporte significativo de los elementos de la chatarra en el metal de la cuchara de reacción.

Tabla 4.2.3 porcentaje de cada Elemento en el metal de la cuchara
Tundish adicionado por 7 Kg. de chatarra Rudebeca

	% Elemento	Masa para 7Kg Chatarra Parish	% Agregado a la cuchara por la chatarra Rudebeca
Mn	0.032	0,0022	0,00019
Si	0.015	0,0011	0,00009
S	0.014	0,0010	0,00008
P	0.020	0,0014	0,00012
Ni	0.025	0,0018	0,00015
Cr	0.031	0,0022	0,00018
Cu	0.043	0,0030	0,00025
Mg	1.000	0,0700	0,00583
Al	0.020	0,0014	0,00012
Sn	0.006	0,0004	0,00004

4.3 Resultados con 7 kg de Chatarra Cuadrada Rudebeca variando el Espesor

Esta sección tiene como objetivo determinar el efecto del espesor de la chatarra en la fundición nodular, para esto se utilizó tiras rectangulares del mismo material (tiras de rines Rudebeca) de 5mm y 6,5mm de espesor. En todas las espirales realizadas se utilizó un equipo registrador de temperaturas para determinar la curva de enfriamiento en la espiral mientras este solidifica. Los resultados generales se muestran en las Tablas 4.3.1 y 4.3.2 en donde se puede apreciar: temperatura de colada, colabilidad, densidad de nódulos y el porcentaje de magnesio residual de cada probeta de la espiral.

Las Tablas 4.3.3 y 4.3.4 corresponden a los resultados obtenidos con 5mm y 6,5mm de espesor de manera independiente, en las mismas se obtiene variaciones de colabilidad, temperatura de colada, densidad de nódulos y magnesio residual diferentes

en cada ensayo, pero en cuanto a los valores promedios son bastante similares para la chatarra de diferentes espesores.

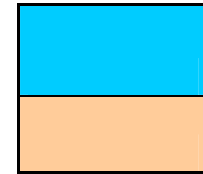
Tabla 4.3.1 Ensayo de colabilidad con 7 Kg de chatarra

	5,0mm Espesor
	6,5mm Espesor

Fecha	03/02/2005	03/02/2005	09/02/2005	09/02/2005	10/02/2005	10/02/2005	15/02/2005	15/02/2005
Temp (±5°C)	1440	1437	1425	1427	1418	1422	1431	1428
Colab (±1pulg)	55	57	52	50	52	51	53	51
(±10 Nod/mm²)	650	580	480	500	530	500	560	600
Grafito (±0,1 Kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi (±0,1 Kg)	3,5	3,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5
FeSiMgCe (±0,1 Kg)	10	10	10	10	10	10	10	10
IM43 (±0,1 Kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita (±0,1 Kg)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Peso del Metal (±10 Kg)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual (±0,001)	0,034	0,035	0,033	0,035	0,036	0,037	0,032	0,035

Tabla 4.3.2 Ensayo de colabilidad con 7 Kg de chatarra

Fecha	17/02/2005	17/02/2005	19/02/2005	19/02/2005	24/02/2005	24/02/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1428	1432	1425	1428	1435	1432
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	55	54	54	54	52	50
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	700	680	580	600	680	650
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10	10	10	10	10	10
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,036	0,037	0,033	0,035	0,034	0,037



5,0mm
Espesor
6,5mm
Espesor

Tabla 4.3.3 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 7Kg de chatarra de 5 mm de espesor

	Temp (±5°C)	Colab (±1pulg)	(±10 Nod/mm²)	±0,001%Mg
03/02/2005	1440	55	650	0,034
09/02/2005	1425	52	480	0,033
10/02/2005	1418	52	530	0,036
15/02/2005	1431	53	560	0,032
17/02/2005	1428	55	700	0,036
19/02/2004	1425	54	580	0,033
24/02/2004	1435	52	680	0,034
Promedio	1429±7	53±1	597±81	0,034±0,002

Tabla 4.3.4 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 7kg de chatarra de 6,5 mm de espesor

	Temp (±5°C)	Colab (±1pulg)	(±10 Nod/mm²)	±0,001%Mg
03/02/2005	1437	57	580	0,035
09/02/2005	1427	50	500	0,033
10/02/2005	1422	51	500	0,037
15/02/2005	1428	51	600	0,033
17/02/2004	1432	54	680	0,037
19/02/2004	1428	54	600	0,035
24/02/2004	1432	50	650	0,037
Promedio	1429±5	52±3	587±68	0,035±0,002

Tabla 4.3.5 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 7Kg de chatarra de 5mm de espesor

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
03/02/2005	1198	18	1153	58	1101	107
09/02/2005	1200	15	1147	55	1108	117
10/02/2005	1194	17	1147	60	1096	125
15/02/2005	1216	19	1150	79	1103	142
17/02/2005	1215	20	1150	75	1106	142
19/02/2004	1188	15	1143	52	1090	98
24/02/2004	1191	15	1147	52	1095	99
Promedio	1199$\pm$11	17$\pm$2	1148$\pm$3	61$\pm$11	1100$\pm$6	117$\pm$19

Tabla 4.3.6 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 7kg de chatarra de 6,5mm de espesor

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (seg)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (seg)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (seg)
03/02/2005	1200	18	1154	60	1110	115
09/02/2005	1205	17	1142	54	1100	118
10/02/2005	1190	15	1145	62	1095	122
15/02/2005	1214	19	1148	69	1100	129
17/02/2005	1210	18	1154	63	1100	113
19/02/2004	1190	16	1148	56	1095	100
24/02/2004	1197	18	1153	54	1106	102
Promedio	1201$\pm$9	18$\pm$1	1147$\pm$5	61$\pm$5	1100$\pm$5	118$\pm$10

4.4 Resultados 7 Kg Chatarra Rudebeca variando la geometría

Para este ensayo se utilizó chatarra del mismo espesor y composición química para minimizar el efecto de estas variables en el ensayo. Se utilizaron tiras cortadas de rines de forma rectangular, chatarra triangular de bordes redondeados y chatarra redonda (todas Rudebeca), en cada uno de los ensayos se utilizó cantidades fijas de chatarra (5Kg). Los resultados generales se muestran en las Tablas 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3 en donde se puede apreciar: temperatura de colada, colabilidad, densidad de nódulos y el porcentaje de magnesio residual de cada probeta de la espiral.

Las Tablas 4.4.4, 4.4.5 y 4.4.6 corresponden a los resultados obtenidos con chatarra cuadrada, triangular y redonda respectivamente, en las mismas se obtiene variaciones de colabilidad, temperatura de colada, densidad de nódulos y magnesio residual diferentes en cada ensayo, pero en cuanto a los valores promedios son bastante similares para la chatarra de diferentes espesores.

En la Tabla 4.4.10 se resume los tiempos y temperaturas de transformación asociados a cada tipo de geometría en donde los valores obtenidos son bastante similares.

En las Figuras 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4 se puede apreciar fácilmente los resultados obtenidos en las espirales correspondientes a 7Kg de chatarra tanto para el ensayo correspondiente a variación de espesor como los resultados obtenidos en la variación de la geometría. En la Figura 4.4.1 se puede apreciar que no existe una pulgada de diferencia en cuanto a la colabilidad promedio utilizando chatarra de 5mm y 6.5mm de espesor (para 7Kg), de la misma manera en este gráfico se pueden apreciar los resultados de colabilidad promedio del ensayo correspondiente a la variación de geometría resultaron iguales. En las Figuras 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4 fácilmente se aprecia que no existen variaciones significativas en cuanto: densidad de nódulos, porcentaje de magnesio residual y temperatura de colada para 7Kg de chatarra en la preparación de la cuchara de reacción.

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Tabla 4.4.1 Ensayo de colabilidad con 7 Kg de chatarra de diferentes geometrías

Fecha	12/01/2005	12/01/2005	12/01/2005	13/01/2005	13/01/2005	13/01/2005	14/01/2005	14/01/2005	14/01/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1430	1428	1435	1440	1445	1438	1425	1425	1430
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	56	55	56	55	56	55	54	55	54
($\pm 10\text{ Nod/mm}^2$)	650	700	620	650	640	620	580	600	590
Grafito ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Peso del Metal ($\pm 10\text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,035	0,036	0,035	0,034	0,034	0,036	0,038	0,037	0,037

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Tabla 4.4.2 Ensayo de colabilidad con 7 Kg de chatarra de diferentes geometrías

Fecha	17/01/2005	17/01/2005	17/01/2005	18/01/2005	18/01/2005	18/01/2005	19/01/2005	19/01/2005	19/01/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1417	1420	1418	1432	1430	1428	1435	1435	1437
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	55	55	55	57	56	57	58	59	58
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	580	600	600	640	620	630	620	640	600
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	5,0	5,0	5,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,038	0,038	0,039	0,035	0,036	0,036	0,037	0,035	0,035

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Tabla 4.4.3 Ensayo de colabilidad con 7 Kg de chatarra de diferentes geometrías

Fecha	25/01/2005	25/01/2005	25/01/2005	27/01/2005	27/01/2005	27/01/2005	28/01/2005	28/01/2005	28/01/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1424	1429	1418	1426	1420	1428	1433	1437	1435
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	54	54	53	52	53	52	54	52	53
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	520	540	550	500	480	510	610	600	580
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,034	0,033	0,034	0,032	0,034	0,033	0,037	0,036	0,035

Tabla 4.4.4 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 7 kg de chatarra cuadrada

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
12/01/2005	1430	56	650	0,035
13/01/2005	1440	55	650	0,034
14/01/2005	1425	54	580	0,038
17/01/2005	1417	55	580	0,038
18/01/2005	1432	57	640	0,035
19/01/2005	1435	58	620	0,037
25/01/2005	1424	54	520	0,034
27/01/2005	1426	52	500	0,032
28/01/2005	1433	54	610	0,037
Promedio	1429$\pm$7	55$\pm$2	594$\pm$55	0,036$\pm$0,002

Tabla 4.4.5 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 7 kg chatarra triangular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
12/01/2005	1428	55	700	0,036
13/01/2005	1445	56	640	0,034
14/01/2005	1425	55	600	0,037
17/01/2005	1420	55	600	0,038
18/01/2005	1430	56	620	0,036
19/01/2005	1435	59	640	0,035
25/01/2005	1429	54	540	0,033
27/01/2005	1420	53	480	0,034
28/01/2005	1437	52	600	0,036
Promedio	1430$\pm$8	55$\pm$2	602$\pm$63	0,035$\pm$0,002

Tabla 4.4.6 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 7 kg de chatarra circular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	(± 10 Nod/mm²)	$\pm 0,001\%\text{Mg}$
12/01/2005	1435	56	620	0,035
13/01/2005	1438	55	620	0,036
14/01/2005	1430	54	590	0,037
17/01/2005	1418	55	600	0,039
18/01/2005	1428	57	630	0,036
19/01/2005	1437	58	600	0,035
25/01/2005	1418	53	550	0,034
27/01/2005	1428	52	510	0,033
28/01/2005	1435	53	580	0,035
Promedio	1430± 8	55± 2	589± 32	0,036$\pm 0,002$

Tabla 4.4.7 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 7 kg de chatarra cuadrada

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
12/01/2005	1211	16	1147	72	1115	120
13/01/2005	1205	17	1148	67	1083	154
14/01/2005	1230	20	1146	80	1100	144
17/01/2005	1210	18	1154	63	1109	113
18/01/2005	1218	19	1147	75	1102	138
19/01/2005	1215	20	1150	75	1106	142
25/01/2005	1202	18	1147	67	1096	131
27/01/2005	1200	18	1145	58	1032	112
Promedio	1211± 10	18± 1	1148± 3	70± 7	1093± 26	132± 15

Tabla 4.4.8 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 7 kg de chatarra triangular

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
12/01/2005	1215	17	1150	70	1118	122
13/01/2005	1194	15	1148	57	1096	115
14/01/2005	1227	19	1146	79	1094	144
17/01/2005	1213	17	1150	60	1109	115
18/01/2005	1222	20	1147	78	1101	140
19/01/2005	1212	19	1150	73	1103	144
25/01/2005	1200	16	1142	65	1092	127
27/01/2005	1194	17	1147	60	1096	117
Promedio	1210$\pm$12	18$\pm$2	1148$\pm$3	68$\pm$9	1101$\pm$9	128$\pm$13

Tabla 4.4.9 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 7 kg de chatarra circular

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
12/01/2005	1212	16	1145	67	1110	118
13/01/2005	1194	16	1151	58	1101	113
14/01/2005	1228	17	1146	80	1092	143
17/01/2005	1210	17	1150	62	1110	112
18/01/2005	1220	19	1149	78	1105	142
19/01/2005	1214	19	1147	71	1100	143
25/01/2005	1200	15	1149	68	1099	131
27/01/2005	1196	18	1147	58	1033	118
Promedio	1209$\pm$12	17$\pm$1	1148$\pm$2	68$\pm$8	1094$\pm$25	128$\pm$14

Tabla 4.4.10 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación promedio obtenidos para 7 kg chatarra de diferentes geometrías

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
Cuadrada	1211 $\pm$ 10	18 $\pm$ 1	1148 $\pm$ 3	70 $\pm$ 7	1093 $\pm$ 26	132 $\pm$ 15
Triangular	1210 $\pm$ 12	18 $\pm$ 2	1148 $\pm$ 3	68 $\pm$ 9	1101 $\pm$ 9	128 $\pm$ 13
Redonda	1209 $\pm$ 12	17 $\pm$ 1	1148 $\pm$ 2	68 $\pm$ 8	1094 $\pm$ 25	128 $\pm$ 14

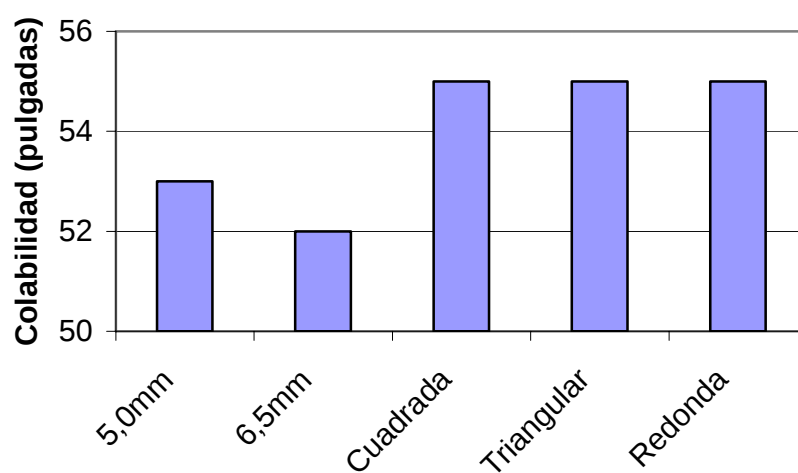


Figura 4.4.1 Colabilidad promedio comparativa con 7kg de chatarra

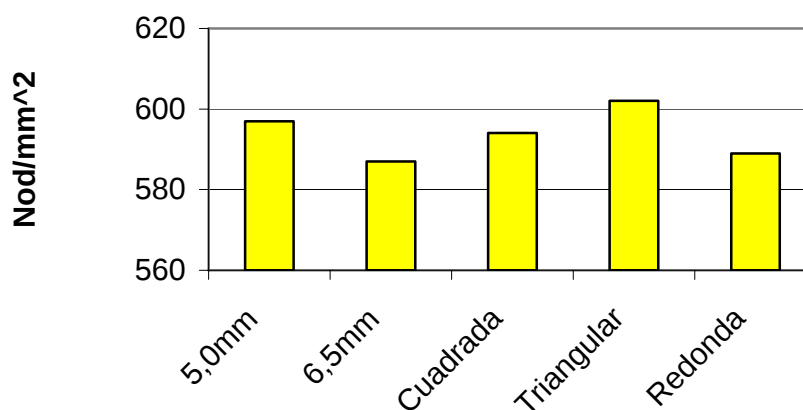


Figura 4.4.2 Densidad de nódulos promedio comparativa con 7kg de chatarra

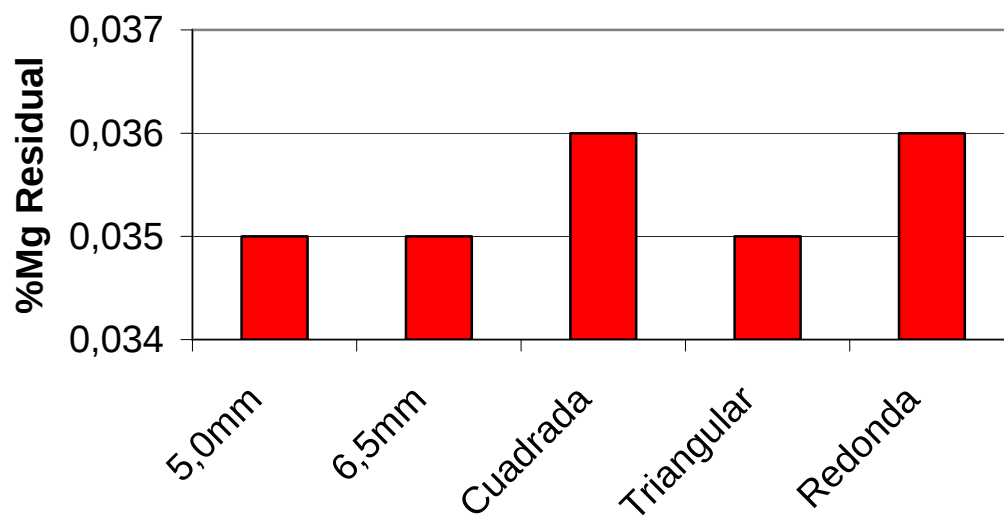


Figura 4.4.3 %Mg Residual promedio comparativo con 7kg de chatarra

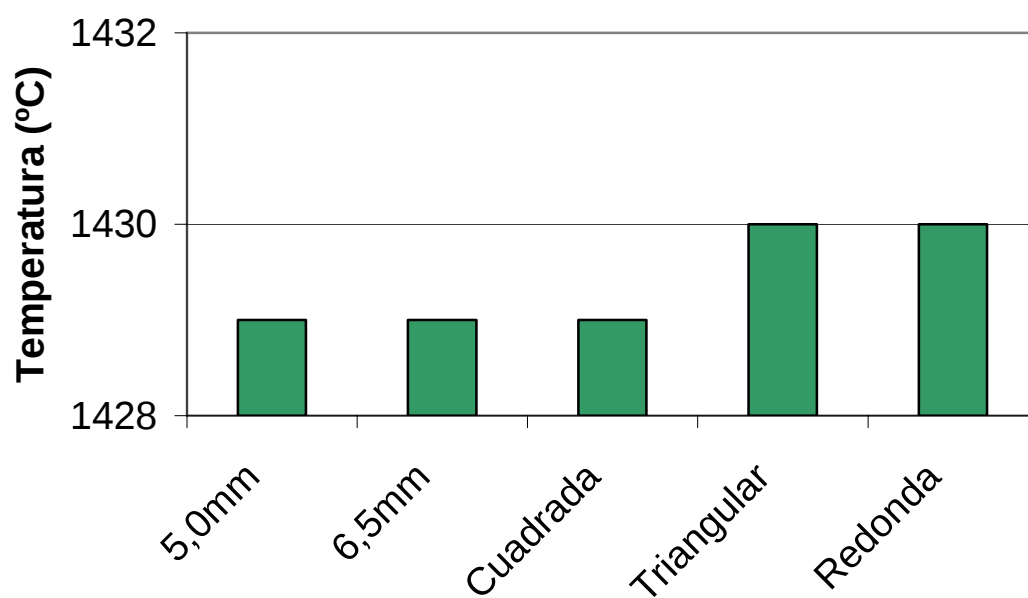


Figura 4.4.4 Temperatura de colada promedio comparativa con 7kg de chatarra

4.5 Resultados del Ensayo de Esparcimiento de los Diferentes Tipos de Chatarra Sobre el Magnesio en el Bolsillo de la Cuchara Tundish



Figura 4.5.1 7,5 Kg. de chatarra Parish



Figura 4.5.2 12 Kg. de chatarra Parish



Figura 4.5.3 7,5 Kg. de chatarra Rudebeca triangular



Figura 4.5.4 12 Kg. de chatarra Rudebeca triangular



Figura 4.3 7,5 Kg. de chatarra Rudebeca circular



Figura 4.4 12 Kg. de chatarra Rudebeca circular

En la **Figura 4.5.1** se puede observar que 7,5Kg, de chatarra cuadrada no realiza un cubrimiento efectivo del magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción y a pesar de incrementar la cantidad de chatarra a 12 Kg tampoco realiza un cubrimiento efectivo del magnesio, **Figura 4.5.2**. Los bordes rectos y filosos de este tipo de chatarra se anclan en el magnesio impidiendo que esta se esparza efectivamente sobre el mismo.

EL cubrimiento del magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción de la chatarra Rudebeca tanto la triangular como la redonda es mucho mayor que el realizado por la chatarra Parish, y además se puede observar que al aumentar la cantidad de chatarra aumenta también el cubrimiento del magnesio.

La chatarra Rudebeca al no poseer ángulos rectos ni bordes filosos no se ancla sobre la superficie del magnesio mejorando considerablemente el cubrimiento del magnesio en la cuchara Tundish.

Los primeros ensayos realizados para determinar el efecto del espesor de la chatarra y la geometría, se realizaron utilizando 7Kg de Chatarra en la preparación de la cuchara de reacción, y como se muestran en las **Figuras 4.5.1, 4.5.3 y 4.5.5** en ninguno de los casos existe un cubrimiento efectivo sobre el magnesio en el bolsillo de la cuchara, por esta razón se decidió repetir el ensayo variando la geometría esta vez utilizando 12 Kg de chatarra en la preparación de la cuchara Tundish, en la **Figura 4.5.2** se observa que la chatarra cuadrada no realiza un cubrimiento efectivo sobre el magnesio, mientras que la chatarra triangular y redonda realizan un cubrimiento cercano al 100% para 12 Kg de material, , **Figuras 4.5.4 y 4.5.6**

Para el ensayo del efecto del espesor de la chatarra sobre el hierro nodular, se dispone solo de chatarra rectangular Rudebeca ya que las otras geometrías no tienen espesor variable, este material al igual que la chatarra Parish posee bordes filosos y ángulos rectos en las esquinas que anclan la chapita sobre el magnesio impidiendo el cubrimiento efectivo del mismo como se demuestra en la **Figura 4.5.1 y 4.5.2** por esta razón no se repitió en ensayo de los espesores aumentando la cantidad de chapita utilizada

4.6 Resultados Chatarra Rudebeca 12 Kg Variando la Geometría

En base a los resultados obtenidos en el ensayo de esparcimiento se decidió realizar nuevamente el estudio de la influencia de la geometría de la chatarra sobre el hierro nodular, una vez demostrado como varía el cubrimiento del magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción al variar la geometría de la chatarra.

Las Tablas 4.6.1, 4.6.2, 4.6.3 y 4.6.4 corresponden a los resultados generales, en donde se pueden apreciar los resultados obtenidos en cada colada de la espiral como: temperatura de colada, densidad de nódulos, porcentaje de magnesio residual y colabilidad. En las tablas 4.6.5, 4.6.6 y 4.6.7 podemos encontrar resumida la información correspondiente a cada tipo de geometría además de los resultados promedios obtenidos.

En la Tabla 4.6.11 se resume los tiempos y temperaturas de transformación asociados a cada tipo de geometría en donde se puede determinar que la geometría de la chatarra no es una variable en cuanto a los tiempos y temperaturas de transformación ya que al igual que los ensayos anteriores estos valores resultan ser bastante similares independientemente del tipo de chatarra utilizada.

Efectivamente al aumentar la cantidad de chatarra se pudieron observar diferencias en el hierro nodular, en la Figura 4.4.1 se puede apreciar que la menor colabilidad promedio corresponde a aquellos espirales colados con chatarra cuadrada (54 pulgadas) resultado muy similar a las 53 y 52 pulgadas obtenidas como promedio en el ensayo 4.3 correspondiente al estudio del efecto del espesor de la chatarra (7 kg).

La colabilidad promedio de la chatarra cuadrada en el ensayo 4.4 correspondiente al efecto de la geometría (7Kg) fue de 55 pulgadas, lo que demuestra que independientemente de la cantidad de chatarra cuadrada utilizada e inclusive el espesor de la misma los resultados en cuanto a colabilidad son bastante similares.

La colabilidad promedio de las espirales correspondientes a chatarra triangular y circular son iguales (58 pulgadas) 4 pulgadas más que aquellas espirales coladas con chatarra cuadrada, y 3 pulgadas más que aquellas espirales coladas con el mismo tipo de chatarra pero utilizando 7Kg. No existen diferencias en la composición química de los tipos de chatarra utilizados en este ensayo ya que los tres tipos de geometría provienen de la fábrica de rines Rudebeca. En el ensayo de esparcimiento (sección 4.5) se demostró que la chatarra triangular y redonda tiene un cubrimiento mucho mayor que la cuadrada, y que al aumentar la cantidad de este material aumenta también el grado de efectividad del cubrimiento sobre el magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción.

En la Figura 4.6.3 se puede apreciar que al aumentar la cantidad de chatarra en el bolsillo de la cuchara de reacción aumenta también el magnesio residual siempre que la chatarra este realizando un cubrimiento efectivo sobre el, por esta razón el menor porcentaje de magnesio residual corresponde a aquellos espirales colados con chatarra cuadrada.

Tabla 4.6.1 Ensayo de colabilidad con 12 Kg de chatarra de diferentes geometrías

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Fecha	03/03/2005	03/03/2005	03/03/2005	04/03/2005	04/03/2005	04/03/2005	08/03/2005	08/03/2005	08/03/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1417	1420	1420	1425	1430	1430	1423	1431	1429
Colab (± 1 pulg)	53	58	58	55	55	59	55	62	62
(± 10 Nod/mm²)	500	580	590	650	640	680	580	600	590
Grafito ($\pm 0,1$ Kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1$ Kg)	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1$ Kg)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1$ Kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chatarra ($\pm 0,1$ Kg)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Peso del Metal (± 10 Kg)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,033	0,035	0,041	0,035	0,039	0,039	0,041	0,044	0,044

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Tabla 4.6.2 Ensayo de colabilidad con 12 Kg de chatarra de diferentes geometrías

Fecha	09/03/2005	09/03/2005	09/03/2005	10/03/2005	10/03/2005	10/03/2005	11/03/2005	11/03/2005	11/03/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1418	1425	1423	1422	1423	1424	1435	1436	1438
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	56	59	58	52	58	56	53	57	59
($\pm 10\text{ Nod/mm}^2$)	480	470	540	460	450	430	540	580	600
Grafito ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1\text{ Kg}$)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Peso del Metal ($\pm 10\text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,032	0,039	0,036	0,036	0,041	0,039	0,033	0,035	0,037

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Tabla 4.6.3 Ensayo de colabilidad con 12 Kg de chatarra de diferentes geometrías

Fecha	14/03/2005	14/03/2005	14/03/2005	17/03/2005	17/03/2005	17/03/2005	18/03/2005	18/03/058	18/03/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1438	1435	1436	1430	1438	1436	1420	1425	1419
Colab (± 1 pulg)	57	57	59	52	55	52	52	52	51
(± 10 Nod/mm²)	600	580	620	680	600	620	480	430	500
Grafito ($\pm 0,1$ Kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1$ Kg)	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1$ Kg)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1$ Kg)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1$ Kg)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Peso del Metal (± 10 Kg)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,035	0,039	0,036	0,037	0,039	0,04	0,032	0,037	0,042

	Cuadrada
	Triangular
	Redonda

Tabla 4.6.4 Ensayo de colabilidad con 12 Kg de chatarra de diferentes geometrías

Fecha	21/03/2005	21/03/2005	21/03/2005	22/03/2005	22/03/2005	22/03/2005	29/03/2005	29/03/2005	29/03/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1441	1438	1435	1419	1415	1414	1432	1435	1337
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	55	63	60	55	54	58	56	60	58
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	400	500	480	520	500	580	420	450	470
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,033	0,036	0,041	0,037	0,043	0,039	0,033	0,040	0,043

Tabla 4.6.5 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 12Kg de chatarra cuadrada

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
03/03/2005	1417	53	500	0,033
04/03/2005	1425	55	650	0,035
08/03/2005	1423	55	580	0,041
09/03/2005	1418	56	480	0,032
10/03/2005	1422	52	460	0,036
11/03/2005	1435	53	540	0,033
14/03/2005	1438	57	600	0,035
17/03/2005	1430	52	680	0,037
18/03/2005	1420	52	480	0,032
21/03/2005	1432	55	400	0,033
22/03/2005	1419	55	520	0,037
29/03/2005	1432	56	420	0,033
Promedio	1426$\pm$7	54$\pm$2	520$\pm$89	0,035$\pm$0,003

Tabla 4.6.6 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 12Kg de chatarra triangular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
03/03/2005	1420	58	580	0,035
04/03/2005	1430	55	640	0,039
08/03/2005	1431	62	600	0,044
09/03/2005	1425	59	470	0,039
10/03/2005	1423	58	450	0,041
11/03/2005	1436	57	580	0,035
14/03/2005	1435	57	580	0,039
17/03/2005	1438	55	600	0,039
18/03/2005	1425	52	430	0,037
21/03/2005	1428	63	500	0,036
22/03/2005	1415	54	500	0,043
29/03/2005	1435	60	450	0,040
Promedio	1428$\pm$6	58$\pm$3	550$\pm$73	0,040$\pm$0,003

Tabla 4.6.7 Resumen de valores obtenidos en los ensayos de colabilidad para 12Kg de chatarra circular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
03/03/2005	1420	58	590	0,041
04/03/2005	1430	59	680	0,039
08/03/2005	1429	62	590	0,044
09/03/2005	1423	58	540	0,036
10/03/2005	1424	56	430	0,039
11/03/2005	1438	59	600	0,037
14/03/2005	1436	59	620	0,036
17/03/2005	1436	52	620	0,04
18/03/2005	1419	51	500	0,042
21/03/2005	1427	60	480	0,041
22/03/2005	1414	58	580	0,039
29/03/2005	1437	58	470	0,043
Promedio	1428$\pm$7	58$\pm$3	558$\pm$76	0,040$\pm$0,003

Tabla 4.6.8 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 12Kg de chatarra cuadrada

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
03/03/2005	1211	17	1145	71	1117	118
04/03/2005	1210	18	1138	70	1115	117
08/03/2005	1210	16	1140	68	1111	117
09/03/2005	1235	19	1147	75	1124	120
10/03/2005	1219	18	1138	69	1110	119
11/03/2005	1203	17	1137	58	1034	112
17/03/2005	1218	17	1135	61	1115	116
18/03/2005	1240	20	1145	74	1127	126
21/03/2005	1214	17	1139	65	1119	118
22/03/2005	1217	17	1142	62	1111	119
Promedio	1218$\pm$12	18$\pm$1	1141$\pm$4	67$\pm$6	1108$\pm$27	118$\pm$4

Tabla 4.6.9 Resumen de valores de temperaturas y tiempos de transformación obtenidos para los ensayos de 12kg de chatarra triangular

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
03/03/2005	1210	16	1140	69	1115	117
04/03/2005	1210	14	1138	65	1110	114
08/03/2005	1212	18	1135	67	1098	125
09/03/2005	1237	17	1152	74	1127	125
10/03/2005	1222	18	1142	71	1114	122
11/03/2005	1207	18	1135	59	1038	115
17/03/2005	1222	19	1133	60	1117	117
18/03/2005	1239	21	1148	72	1125	124
21/03/2005	1217	17	1140	66	1122	120
22/03/2005	1225	19	1148	68	1119	124
Promedio	1220$\pm$11	18$\pm$2	1141$\pm$6	67$\pm$5	1109$\pm$26	120$\pm$4

Tabla 4.6.10 Temperaturas y tiempos de transformación 12Kg chatarra redonda

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
03/03/2005	1210	17	1143	71	1117	118
04/03/2005	1217	16	1135	68	1114	115
08/03/2005	1217	17	1130	64	1105	122
09/03/2005	1234	18	1149	72	1118	123
10/03/2005	1217	19	1137	68	1115	124
11/03/2005	1205	17	1138	61	1040	117
17/03/2005	1218	18	1129	58	1119	118
18/03/2005	1242	22	1139	68	1122	123
21/03/2005	1216	18	1135	65	1120	121
22/03/2005	1227	19	1147	67	1123	125
Promedio	1220$\pm$11	18$\pm$2	1138$\pm$7	66$\pm$4	1109$\pm$25	121$\pm$3

Tabla 4.6.11 Resumen de temperaturas y tiempos de transformación promedios 12Kg chapita de diferentes geometrías

	Inicio de Sólido		Eutéctico		Final de Líquido	
	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Tiempo ($\pm 1\text{seg}$)
Promedio	1218 $\pm$ 12	18 $\pm$ 1	1141 $\pm$ 4	67 $\pm$ 6	1108 $\pm$ 27	118 $\pm$ 4
Promedio	1220 $\pm$ 11	18 $\pm$ 2	1141 $\pm$ 6	67 $\pm$ 5	1109 $\pm$ 26	120 $\pm$ 4
Promedio	1220 $\pm$ 11	18 $\pm$ 2	1138 $\pm$ 7	66 $\pm$ 4	1109 $\pm$ 25	121 $\pm$ 3

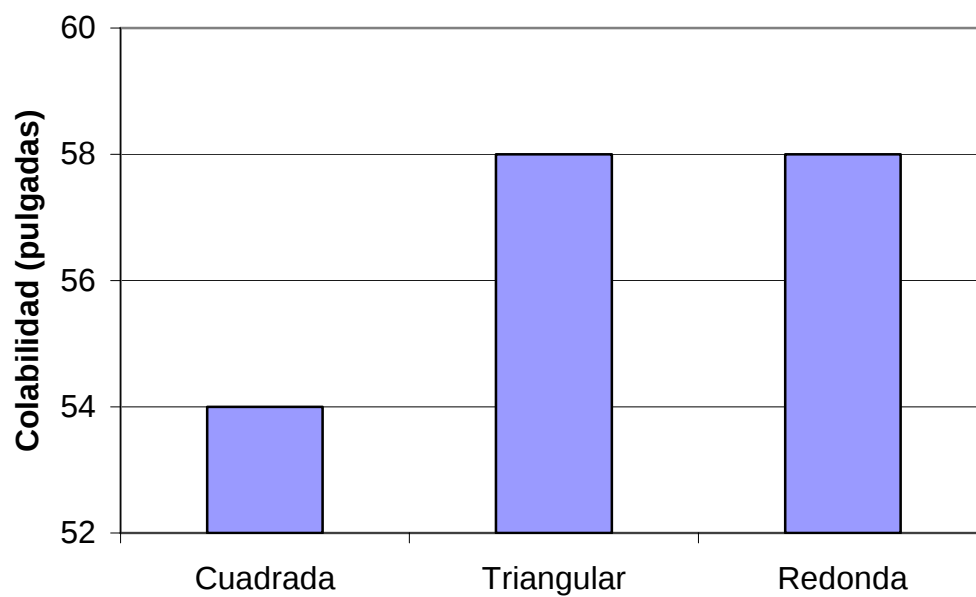


Figura 4.6.1 Colabilidad promedio comparativa con 12Kg de chatarra

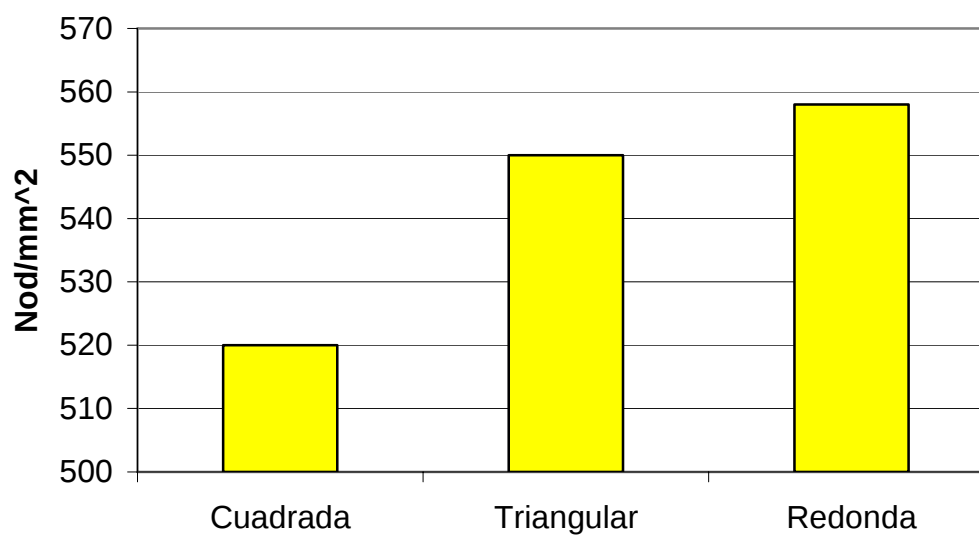


Figura 4.6.2 Densidad de nódulos promedio comparativa con 12Kg de chatarra

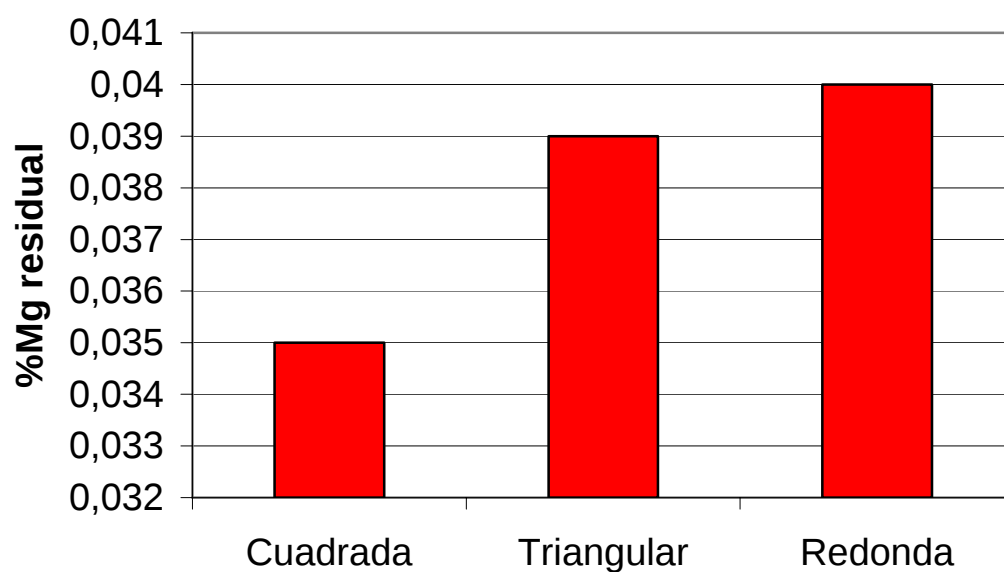


Figura 4.6.3 %Mg residual promedio comparativo con 12Kg de chatarra

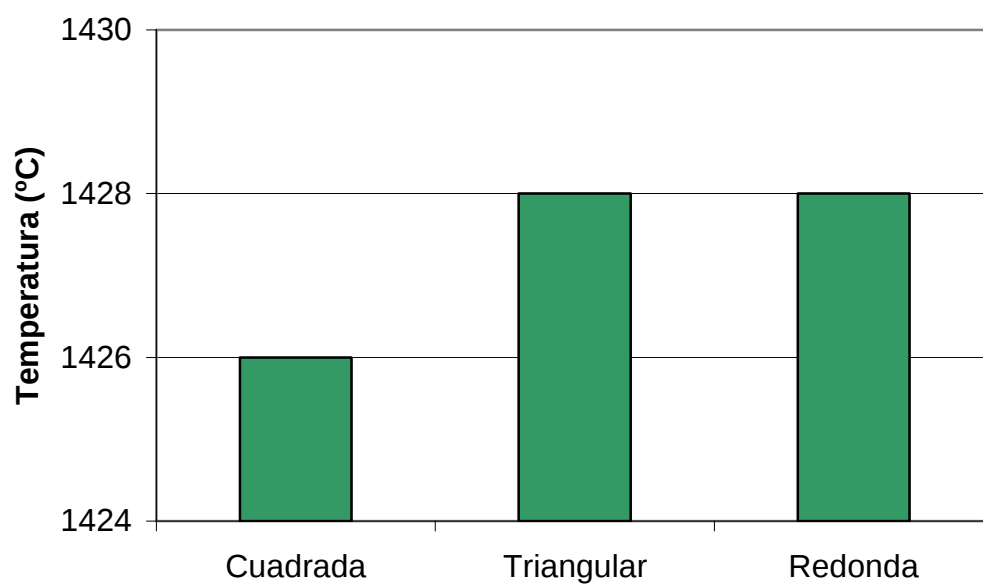


Figura 4.6.4 Temperatura de colada promedio comparativa con 12Kg de chatarra

4.7 Resultados Variando la Cantidad de Chatarra Utilizando Rudebeca Triangular

El objetivo de este ensayo es determinar cual es la cantidad óptima de chatarra a añadir en la preparación de la cuchara de reacción, para estos se realizaron pruebas con tres cantidades diferentes de chatarra 8kg, 12 Kg y 16Kg, todas Rudebeca para garantizar un cubrimiento efectivo y de forma triangular ya que esta es la de mas fácil acceso.

Los resultados generales se muestran en las Tablas 4.7.1, 4.7.2 y 4.7.3 en donde se puede apreciar los distintos valores obtenidos para cada uno de los ensayos en cuanto a colabilidad, temperatura de colada, densidad de nódulos y porcentaje de magnesio residual. En las Tablas 4.7.4, 4.7.5 y 4.7.6 se encuentran los valores obtenidos de manera independiente para cada cantidad de chatarra añadida en la cuchara Tundish, además de los valores promedios obtenidos.

En la Figura 4.7.1 se puede apreciar que la menor colabilidad corresponde a las espirales coladas con 8Kg de chatarra, esta situación es similar al ensayo de la sección 4.4 en donde se estudió el efecto del tipo de la geometría en el hierro nodular donde se obtuvieron 55 pulgadas de longitud promedio de la espiral utilizando 7Kg de chatarra (Figura 4.4.1)

Los resultados de aquellas espirales colados con 12Kg y 16Kg de chatarra son bastante similares, 59 pulgadas de colabilidad promedio para la chatarra triangular y 58 pulgadas de colabilidad promedio respectivamente.

El mayor porcentaje de magnesio residual (0,040%) corresponde a las espirales coladas con 12 y 16Kg de chatarra, por lo que se puede demostrar que una vez alcanzado el cubrimiento efectivo del magnesio en la cuchara de reacción no ocurrirá incrementos en la colabilidad ni en el porcentaje del magnesio residual.

En la Figura 4.7.4 queda demostrado que al incrementar la cantidad de chatarra en la preparación de la cuchara se produce una caída de la temperatura del metal con una diferencia de hasta 10°C.

4.7 Resultados Variando la Cantidad de Chapita Utilizando Rudebeca Triangular

	8 Kg Chatarra
	12 Kg Chatarra
	16Kg Chatarra

Tabla 4.7.1 Ensayo de colabilidad con 8, 12 y 16 Kg de chatarra Rudebeca triangular

Fecha	04/04/2005	04/04/2005	04/04/2005	06/04/2005	06/04/2005	06/04/2005	10/04/2005	10/04/2005	10/04/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1435	1428	1425	1430	1431	1425	1426	1420	1418
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	55	58	58	51	55	54	55	60	60
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	480	620	580	500	600	620	520	610	580
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	3,5	3,5	3,5	4	4	4	4	4	4
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	8,0	12,0	16,0	8,0	12,0	16,0	8,0	12,0	16,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,035	0,039	0,044	0,033	0,036	0,041	0,034	0,039	0,038

	8 Kg Chatarra
	12 Kg Chatarra
	16Kg Chatarra

Tabla 4.7.2 Ensayo de colabilidad con 8, 12 y 16 Kg de chatarra Rudebeca triangular

Fecha	11/04/2005	11/04/2005	11/04/2005	17/04/2005	17/04/2005	17/04/2005	20/04/2005	20/04/2005	20/04/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1424	1415	1418	1438	1429	1430	1442	1441	1440
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	54	60	58	55	57	56	55	64	62
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	500	560	590	480	520	500	420	640	630
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	8,0	12,0	16,0	8,0	12,0	16,0	8,0	12,0	16,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,032	0,041	0,042	0,036	0,039	0,038	0,029	0,042	0,041

	8 Kg Chatarra
	12 Kg Chatarra
	16Kg Chatarra

Tabla 4.7.3 Ensayo de colabilidad con 8, 12 y 16 Kg de chatarra Rudebeca triangular

Fecha	24/04/2005	24/04/2005	24/04/2005	26/04/2005	26/04/2005	26/04/2005	28/04/2005	28/04/2005	28/04/2005
Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	1438	1425	1426	1444	1435	1436	1431	1430	1425
Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	53	59	58	54	60	59	52	58	58
($\pm 10 \text{ Nod/mm}^2$)	430	550	580	500	650	620	520	600	580
Grafito ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FeSi ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4	4	4
FeSiMgCe ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
IM43 ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Chapita ($\pm 0,1 \text{ Kg}$)	8,0	12,0	16,0	8,0	12,0	16,0	8,0	12,0	16,0
Peso del Metal ($\pm 10 \text{ Kg}$)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
%Mn residual ($\pm 0,001$)	0,035	0,038	0,038	0,03	0,041	0,039	0,033	0,043	0,042

Tabla 4.7.4 Resumen 8 Kg chatarra triangular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	(± 10 Nod/mm²)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
04/04/2005	1435	55	480	0,035
06/04/2005	1430	51	500	0,033
10/04/2005	1426	55	520	0,034
11/04/2005	1424	54	500	0,032
17/04/2005	1438	55	480	0,036
20/04/2005	1442	55	420	0,029
24/04/2005	1438	53	430	0,035
26/04/2005	1444	54	500	0,030
28/04/2005	1431	52	520	0,033
Promedio	1434± 7	54± 1	483± 36	0,033$\pm 0,002$

Tabla 4.7.5 Resumen 12 Kg chatarra triangular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	(± 10 Nod/mm²)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
04/04/2005	1428	58	620	0,039
06/04/2005	1431	55	600	0,036
10/04/2005	1420	60	610	0,039
11/04/2005	1415	60	560	0,041
17/04/2005	1429	57	520	0,039
20/04/2005	1441	64	640	0,042
24/04/2005	1425	59	550	0,038
26/04/2005	1435	60	650	0,041
28/04/2005	1430	58	600	0,043
Promedio	1428± 8	59± 3	594± 43	0,040$\pm 0,002$

Tabla 4.7.6 Resumen 16Kg chatarra triangular

	Temp ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	Colab ($\pm 1\text{pulg}$)	(± 10 Nod/mm²)	$\pm 0,001\% \text{Mg}$
04/04/2005	1425	58	580	0,044
06/04/2005	1425	54	620	0,041
10/04/2005	1418	60	580	0,038
11/04/2005	1418	58	590	0,038
17/04/2005	1430	56	500	0,038
20/04/2005	1440	62	630	0,041
24/04/2005	1426	58	580	0,042
26/04/2005	1436	59	620	0,039
28/04/2005	1425	58	580	0,042
Promedio	1427± 7	58± 2	587± 38	0,040$\pm 0,002$

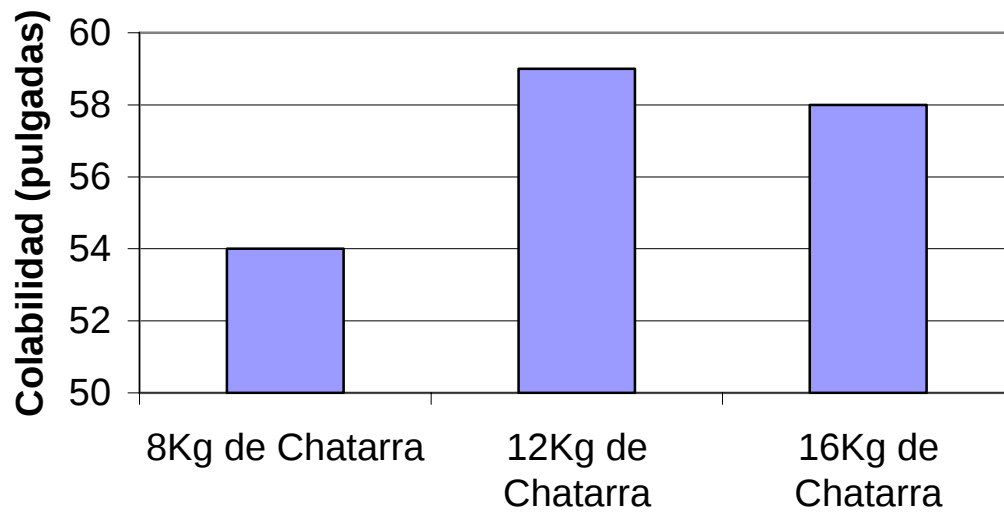


Figura 4.7.1 Colabilidad promedio comparativa variando la carga de chatarra

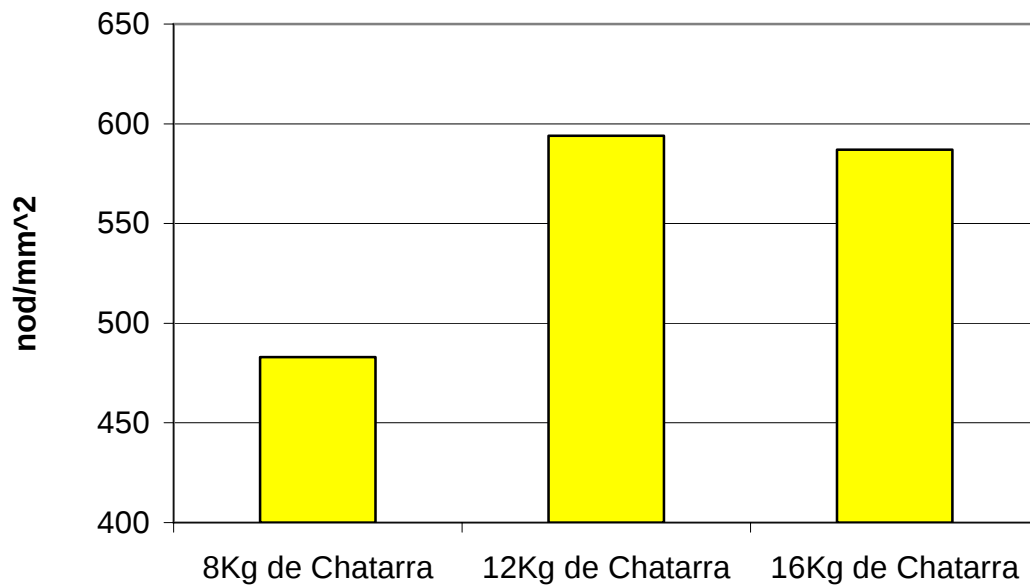


Figura 4.7.2 Densidad de nódulos promedio comparativa variando la carga de chatarra

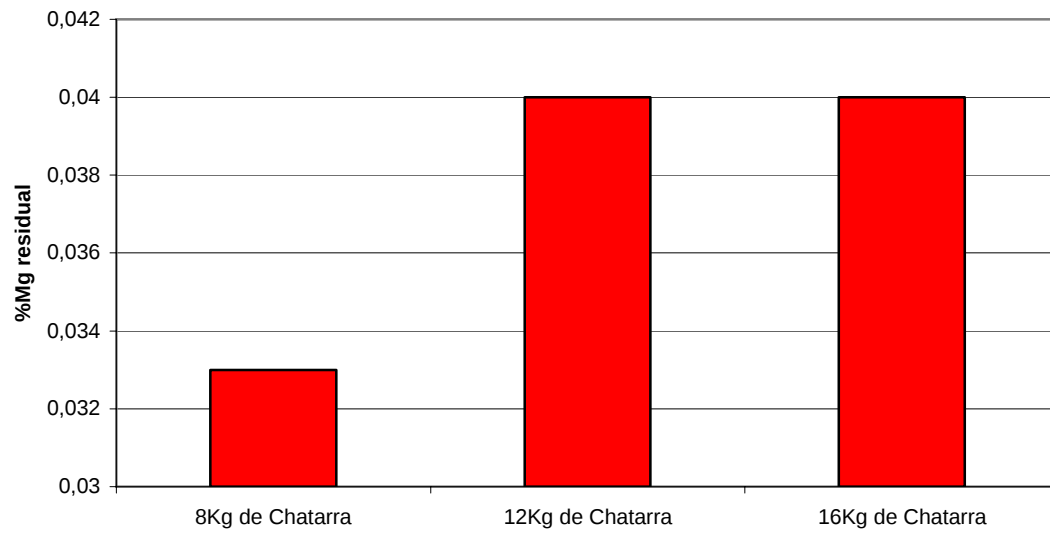


Figura 4.7.3 %Mg residual promedio comparativo variando la carga de chatarra

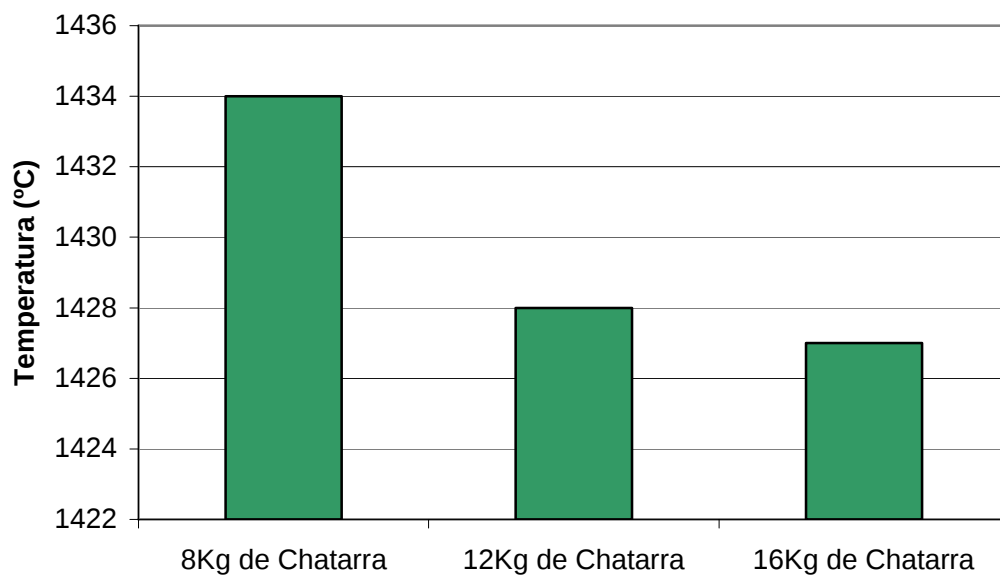


Figura 4.7.4 Temperatura de colada promedio comparativa variando la cantidad de chatarra

4.8 Estudio de Mejoras en Costos de Producción

Un aumento en la cantidad de chatarra de 7,5Kg que se utilizan actualmente a 12Kg generaría un sobre consumo del 60% de chatarra. La tonelada de chatarra Rudebeca cuesta 140\$/ton, si el requerimiento actual es de 23,15Ton/mes a un costo de 3241\$/Ton. Según el sobre consumo se necesitarían 37,04 Ton/mes de chatarra, para lo cual serían necesarios 5185,6\$/mes ocasionando un aumento de 1944\$/mes. Mientras que el aumento del rendimiento de magnesio permite disminuir la cantidad usada del mismo por cuchara en 0,5Kg, disminuyendo el consumo actual en un 5%, actualmente se utilizan 34,72Ton Mg/mes a un costo de 1760\$/Ton, si se reduce la cantidad de magnesio en un 5% se estarían utilizando 32,98 Ton Mg/mes a un costo de 58044.8\$/mes lo que generaría un ahorro de 3062,4\$/mes y un ahorro neto de 1118.4\$/mes.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1. La utilización de chatarra cuadrada no realiza un cubrimiento efectivo del magnesio en la cuchara de reacción, a pesar de que se incremente la cantidad de la misma en la cuchara. Los bordes rectos y filosos anclan el material sobre el magnesio impidiendo que esta se esparza.
2. La chatarra de bordes suavizados no se ancla sobre el magnesio generando un cubrimiento mucho mayor que la chapita cuadrada. La chatarra redonda es ideal ya que su forma le permite un mayor acomodamiento sobre la superficie de la capa de magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción.
3. La geometría de la chatarra es importante en cuanto al grado de cubrimiento de esta sobre el magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción.
4. Si no existe un cubrimiento efectivo del magnesio en la cuchara de reacción desmejoran las propiedades del hierro nodular como; la colabilidad, la densidad de nódulos y el porcentaje de magnesio residual. La chatarra que genera un mayor cubrimiento del magnesio es aquella que no posea bordes filosos ni puntas, como es el caso de la chapita triangular y redonda Rudebeca.
5. Es necesario añadir la cantidad mínima en la cuchara de reacción para garantizar que exista un cubrimiento efectivo sobre el magnesio, según los resultados obtenidos la cantidad óptima de chatarra es 12 Kg .
6. El exceso de chatarra en la cuchara de reacción no produce mejoras en el hierro nodular, una vez alcanzado el cubrimiento efectivo no se requiere agregar más chatarra.
7. Al aumentar el cubrimiento del magnesio en la cuchara Tundish aumenta el rendimiento del mismo y por ende aumenta también el porcentaje de magnesio

residual, lo que implica aumentar la cantidad de chatarra utilizada por cuchara de 7,5Kg que se usan actualmente a un mínimo de 12 Kg de chatarra por cuchara.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere la utilización de chatarra Rudebeca o cualquier otro tipo de recorte de acero que posean bordes suavizados en la preparación de la carga de la cuchara de reacción a fin de evitar el anclaje de este en el bolsillo de la cuchara Tundish.
2. Se debe incrementar la cantidad de chatarra a un mínimo de 12 Kg por cuchara para garantizar un cubrimiento efectivo del magnesio en el bolsillo de la cuchara de reacción.
3. Es conveniente realizar un estudio del rendimiento de FeSiMgCe variando gradualmente la cantidad de este en la preparación de la carga de la cuchara de reacción, tomando como principales variables: la densidad de nódulos y el porcentaje de magnesio residual por cada cuchara.

APENDICE

Apéndice A

Curvas de Enfriamiento

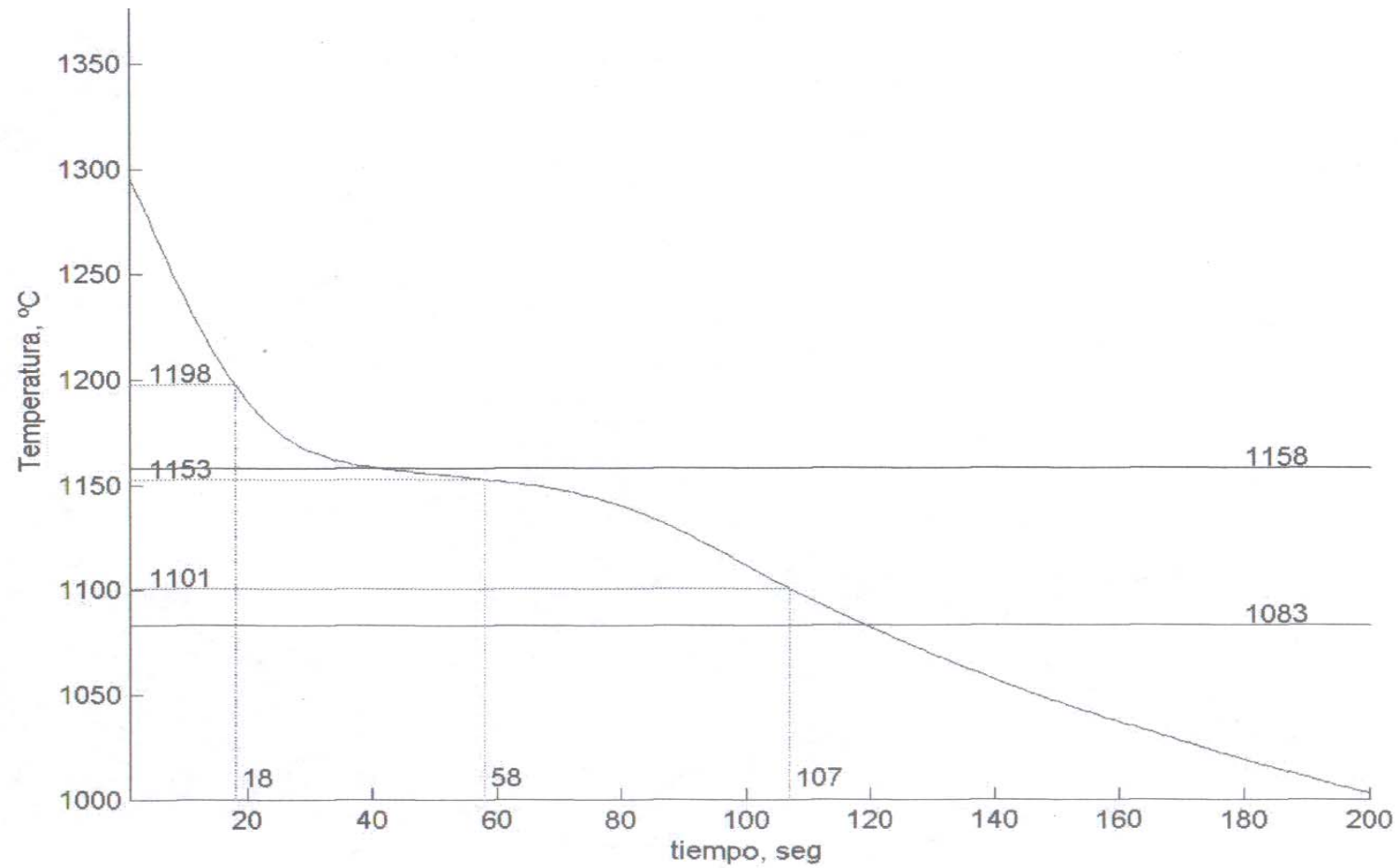


Figura A.1 Curva de enfriamiento del 03/02/05 para 7 Kg de chatarra rectangular de 5mm de espesor

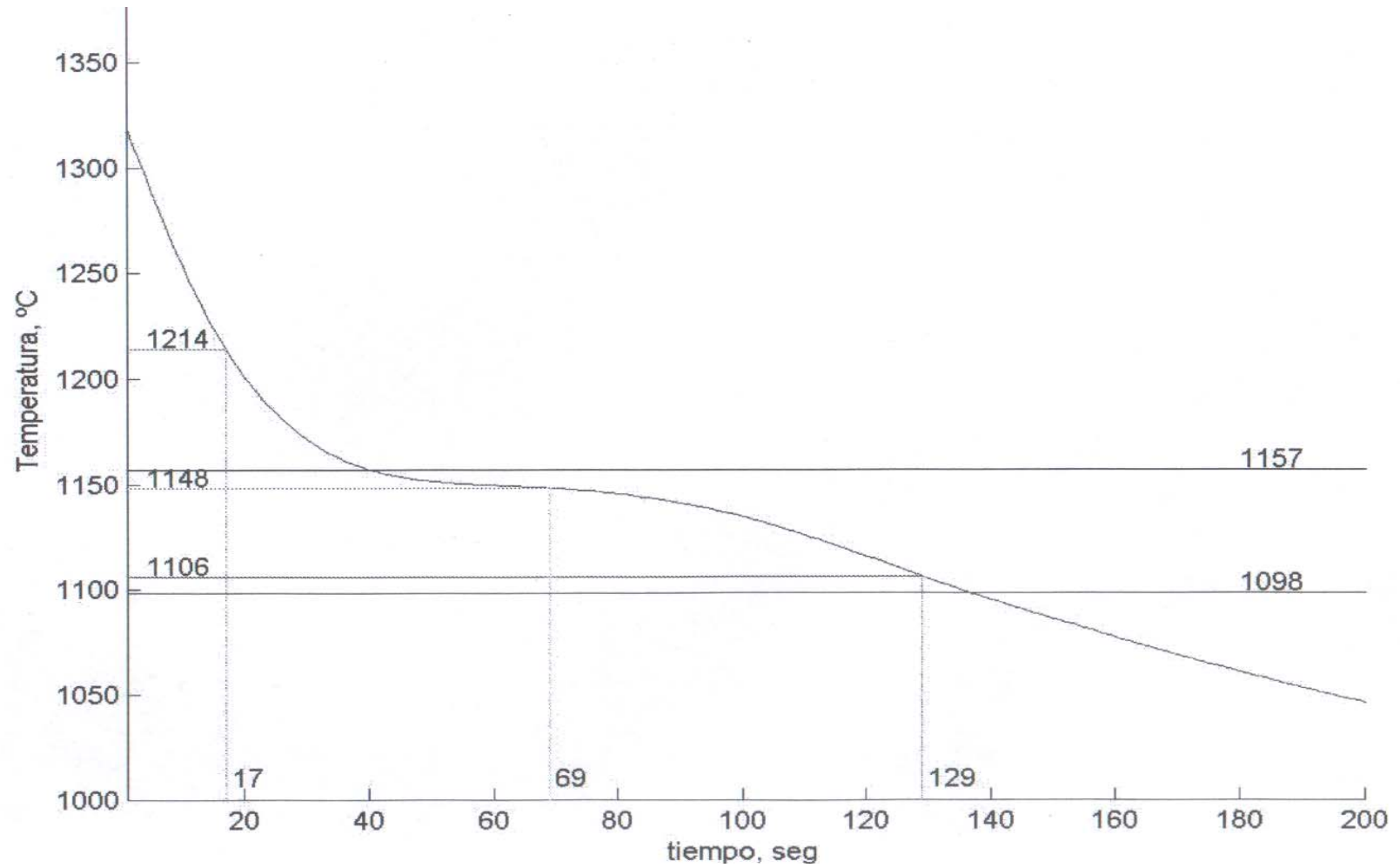


Figura A.2 Curva de enfriamiento del 15/02/05 para 7Kg de chatarra rectangular de 6,5mm de Espesor

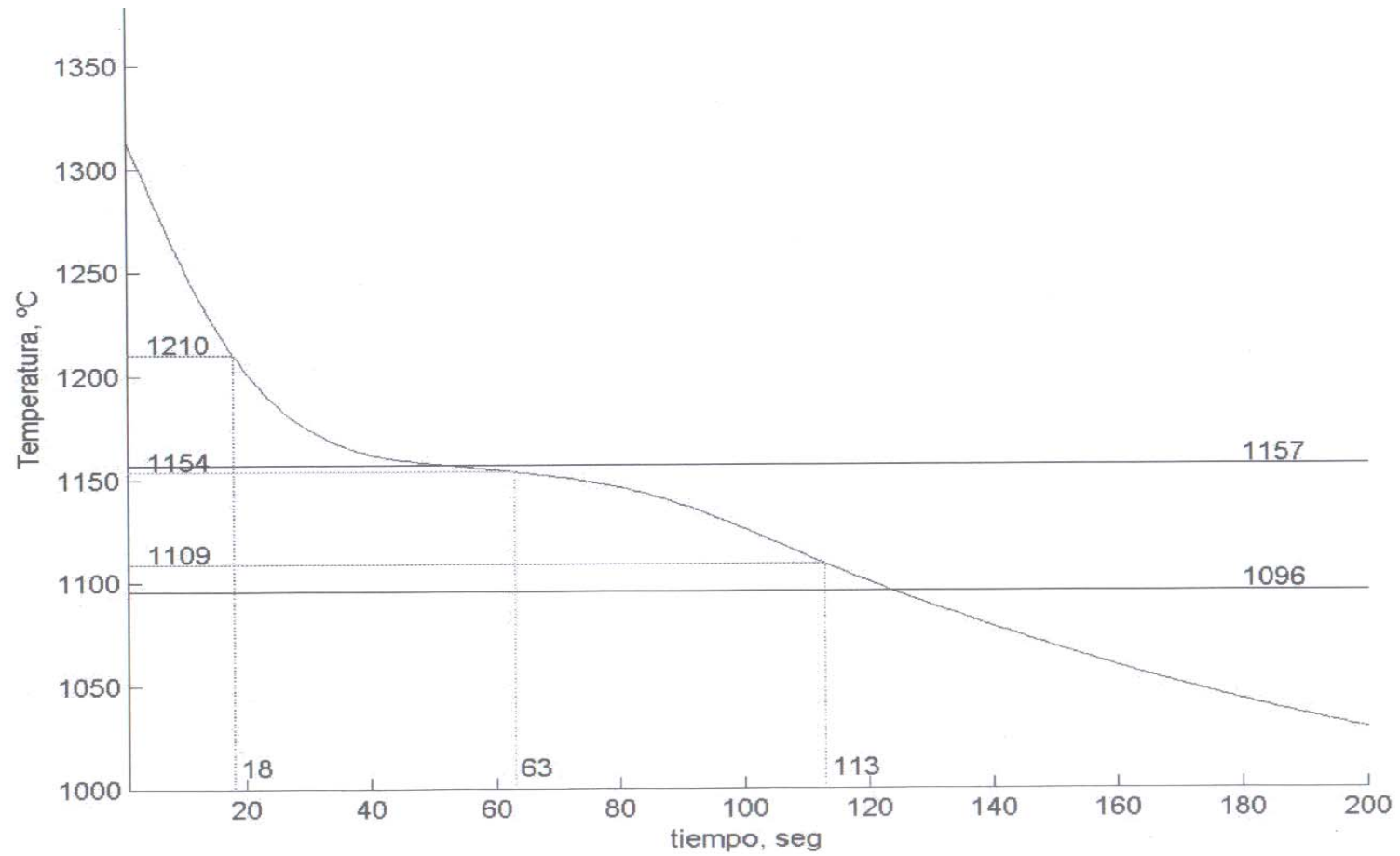


Figura A.3 Curva de enfriamiento del 17/02/05 para 7Kg de chatarra rectangular de 6,5mm de Espesor

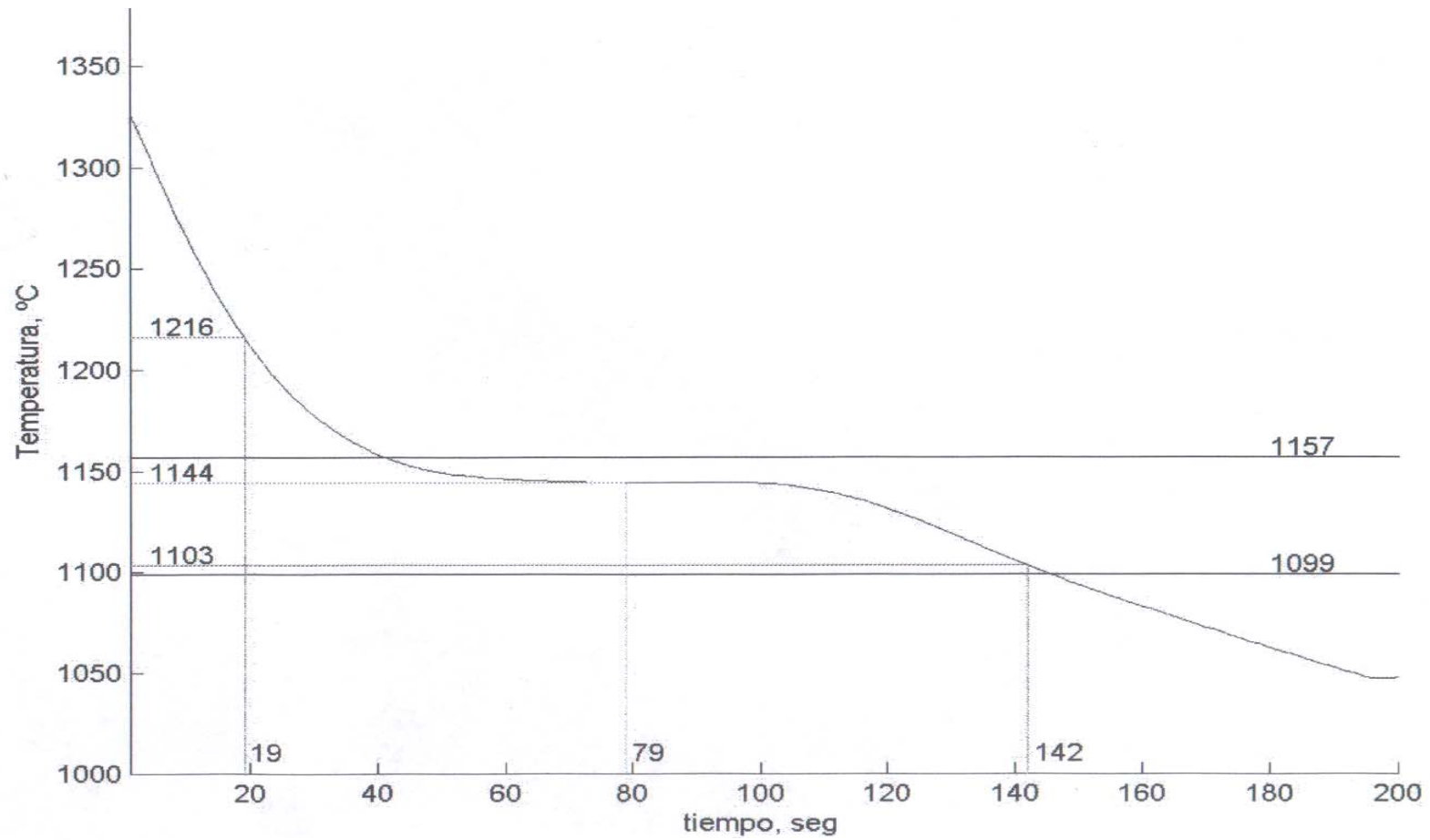


Figura A.4 Curva de enfriamiento del 15/02/05 para 7Kg de chatarra rectangular de 5mm de Espesor

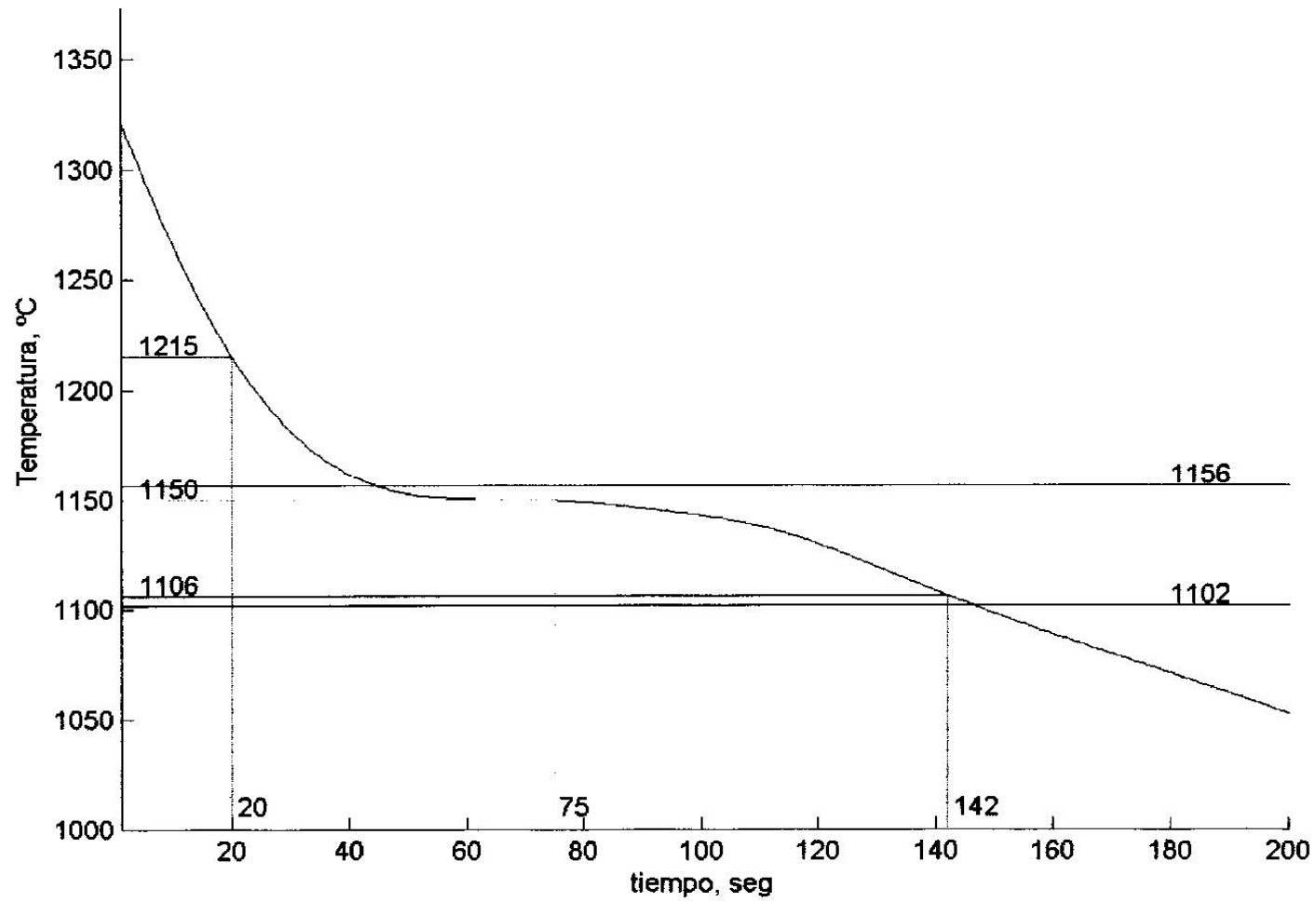


Figura A.5 Curva de enfriamiento del 17/02/05 para 7Kg de chatarra rectangular de 5mm de Espesor

APENDICE B

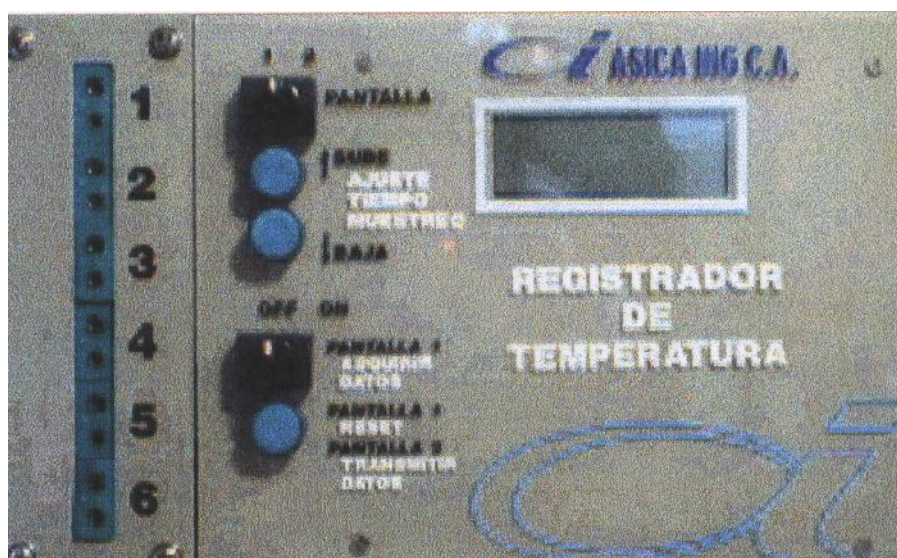


Figura B.1 Panel frontal equipo registrador de temperatura marca ASICA

APENDICE C

tiempo seg	Temperatura °C	tiempo seg	Temperatura °C	tiempo seg	Temperatura °C	tiempo seg	Temperatura °C
0	1322	33	1166	66	1150	199	1053
1	1313	34	1166	67	1150	200	1053
2	1292	35	1162	68	1151	201	1050
3	1283	36	1162	69	1151	202	1049
4	1277	37	1159	70	1151	203	1049
5	1275	38	1158	71	1151	204	1049
6	1276	39	1158	72	1151	205	1046
7	1270	40	1157	73	1151	206	1045
8	1263	41	1156	74	1151	207	1045
9	1260	42	1155	75	1151	208	1045
10	1255	43	1153	76	1151	209	1043
11	1249	44	1152	77	1150	210	1043
12	1245	45	1151	78	1149	211	1042
13	1240	46	1151	79	1149	212	1041
14	1236	47	1151	80	1149	213	1039
15	1231	48	1151	81	1149	214	1038
16	1227	49	1151	82	1149	215	1038
17	1221	50	1151	83	1149	216	1038
18	1213	51	1150	84	1148	217	1037
19	1209	52	1150	85	1148	218	1037
20	1203	53	1150	86	1146	219	1036
21	1201	54	1150	87	1145	220	1035
22	1197	55	1150	88	1145	221	1034
23	1193	56	1150	89	1145	222	1032
24	1191	57	1150	90	1145	223	1032
25	1188	58	1149	91	1145	224	1032
26	1187	59	1149	92	1145	225	1030
27	1186	60	1150	93	1145	226	1030
28	1181	61	1149	94	1143	227	1029
29	1177	62	1149	95	1146	228	1028
30	1173	63	1149	96	1142	229	1027
31	1172	64	1149	97	1144	230	1024
32	1169	65	1150	98	1146	231	1024

Tabla C.1 Datos para la Curva de enfriamiento del 17/02/05 para 7Kg de chatarra rectangular de 5mm de Espesor obtenidos por el equipo registrador

APENDICE D

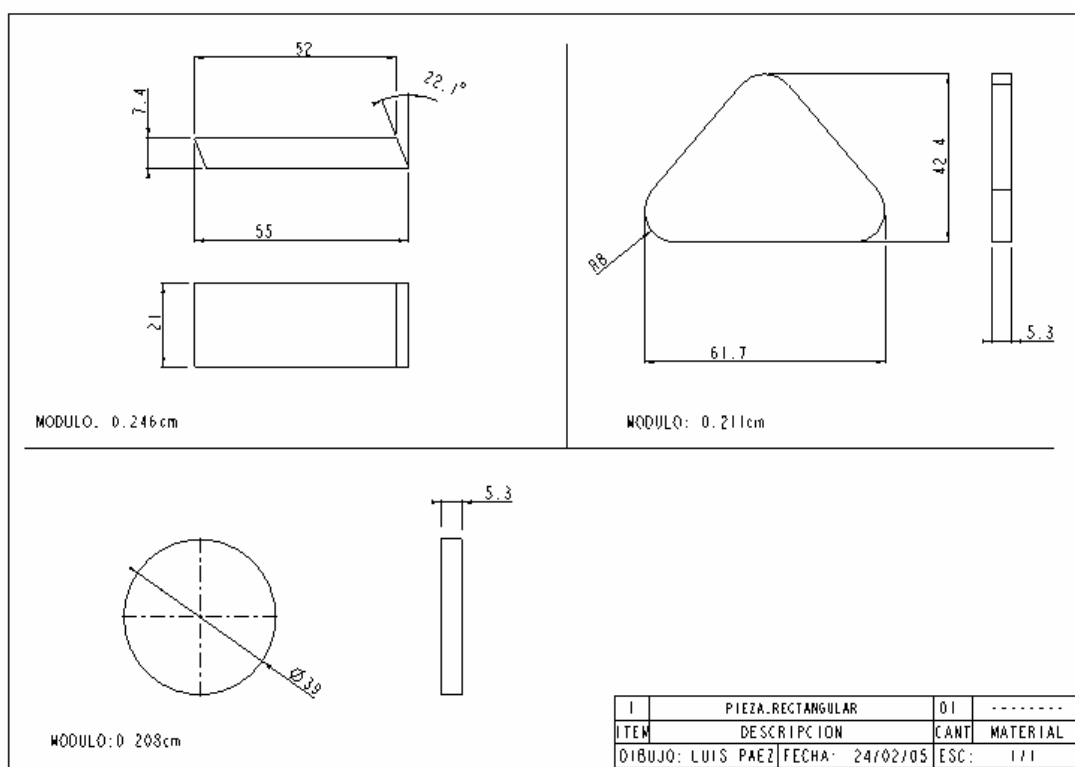


Figura D.1 Vistas de los tipos de chatarra