

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS TÉRMICO PARA CONTROL DE ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE HIERRO NODULAR NTE INEN 2499 EN LA EMPRESA FUNDIRECICLAR SA.

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

RONNY JOSUE QUILUMBA PAUCAR

ronny.quilumba@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. EFRAÍN SOTOMAYOR GÁLVEZ MSC.

oscar.sotomayor@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2024

CERTIFICACIONES

Yo, RONNY JOSUE QUILUMBA PAUCAR declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

RONNY JOSUE QUILUMBA PAUCAR

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por RONNY QUILUMBA, bajo mi supervisión.

OSCAR EFRAIN SOTOMAYOR GALVEZ

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RONNY QUILUMBA

ING. OSCAR SOTOMAYOR MSC.

DEDICATORIA

Para mi familia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todo el equipo de FUNDIRECICLAR quienes supieron brindarme su apoyo durante todo el proceso de ejecución de este proyecto.

Agradezco al laboratorio de análisis metalográfico y desgaste y falla de la Escuela Politécnica Nacional que permitió la realización de análisis metalográfico a las muestras obtenidas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1	Objetivo general.....	2
1.2	Objetivos específicos	2
1.3	Alcance	3
1.4	Marco teórico	3
2	METODOLOGIA.....	18
2.1	Equipamiento	18
2.2	Proceso de fusión de la empresa.....	22
2.3	Estudio del material producido.....	28
2.4	Análisis de datos	29
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
3.1	Resultados	31
3.2	Conclusiones	38
3.3	Recomendaciones	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
5	ANEXOS.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 EJEMPLOS CLASIFICACIÓN FORMA DE GRAFITO [3]	4
FIGURA 2 CLASIFICACIÓN DE GRAFITO SEGÚN SU TAMAÑO [3].....	4
FIGURA 3 EJEMPLOS CLASIFICACIÓN DE GRAFITO SEGÚN SU TAMAÑO [3]	5
FIGURA 4 EJEMPLOS DE NODULARIDAD [3].....	6
FIGURA 5 EJEMPLOS DE CONTEO DE NÓDULOS [3].....	6
FIGURA 6 EJEMPLO CONSTRUCCIÓN DIAGRAMA CU-NI [2].....	7
FIGURA 7 DIAGRAMA DE FASE FE-C [7].....	8
FIGURA 8: CUCHARA PARA NODULIZACIÓN (TUNDISH COVER LADLE) [13]	10
FIGURA 9 CURVA DE ENFRIAMIENTO Y PUNTOS DE INTERÉS PARA ANÁLISIS TÉRMICO [16]	12
FIGURA 10 PREDICCIÓN DE NODULARIDAD Y FORMA DE GRAFITO MEDIANTE ANÁLISIS TÉRMICO [16]	13
FIGURA 11 COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE NUCLEACIÓN CON EL PASO DEL TIEMPO [18].....	14
FIGURA 12 EFECTO DEL INOCULANTE A LO LARGO DEL TIEMPO [15]	15
FIGURA 13 CURVA DE MATERIAL COMPLETAMENTE EUTÉCTICO [9]	16
FIGURA 14 EFECTO DE LA RECALESCENCIA SOBRE EL CONTEO DE NÓDULOS [21]	17
FIGURA 15 EQUIPO PARA ANÁLISIS TÉRMICO CARBOMAX DELTA	18
FIGURA 16 CURVA DE ENFRIAMIENTO MODO CARBONO	19
FIGURA 17 CURVA DE ENFRIAMIENTO MODO MICROESTRUCTURA	20
FIGURA 18 RECEPTÁCULO PARA COPAS.....	21
FIGURA 19 COPAS PARA ANÁLISIS TÉRMICO	21
FIGURA 20 CUCHARA PARA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE HIERRO FUNDIDO	22
FIGURA 21 HORNO CARGADO CON TOCHOS DE RETAZOS DE ACERO	23
FIGURA 22 RETORNO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN	23
FIGURA 23 PIEDRAS DE GRAFITO	23
FIGURA 24 FERROALEACIÓN FESI75%.....	24
FIGURA 25 FERROALEACIÓN FEMNHC.....	24
FIGURA 26 LIGA PARA NODULIZACIÓN FESIMG.....	25
FIGURA 27 CUCHARA CÓNICA PARA TRATAMIENTO DE NODULIZACIÓN.....	25
FIGURA 28 INOCULANTE IM34.....	26
FIGURA 29 CUCHARA DE TRANSPORTE Y VERTIDO DE MATERIAL EN MOLDE	26
FIGURA 30 DIAGRAMA PROCESO DE FUSIÓN FUNDIRECICLAR.....	27
FIGURA 31 INTERFASE SOFTWARE EXTRACTOR CARBOMAX DELTA.....	30
FIGURA 32 COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE NUCLEACIÓN EN HORNO	31
FIGURA 33 COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE SOLIDIFICACIÓN EN HORNO.....	32
FIGURA 34 POTENCIAL DE NUCLEACIÓN EN HORNO Y CUCHARA DE NODULIZACIÓN.....	33
FIGURA 35 POTENCIAL DE NUCLEACIÓN HORNO Y CUCHARAS DE NODULIZACIÓN E INOCULACIÓN	33
FIGURA 36 MÓDULO DE SOLIDIFICACIÓN EN HORNO Y CUCHARA DE NODULIZACIÓN	34
FIGURA 37 VALORES DE RECALESCENCIA EN DIFERENTES MUESTRAS.....	34
FIGURA 38 CONTROL ESTADÍSTICO DE LA RECALESCENCIA	35
FIGURA 39 RELACIÓN POTENCIAL DE NUCLEACIÓN VS CONTEO DE NÓDULOS	36
FIGURA 40 RELACIÓN POTENCIAL DE NUCLEACIÓN VS NODULARIDAD	36
FIGURA 41 COEFICIENTE VS CONTEO DE NÓDULOS	37
FIGURA 42 COEFICIENTE VS NODULARIDAD	37

RESUMEN

El análisis térmico consiste en interpretar la curva de enfriamiento de los materiales para poder predecir la constitución de la aleación. Esta herramienta permite controlar de manera adecuada la configuración final del hierro fundido una vez que ha concluido la solidificación. El equipo de análisis térmico es un dispositivo que, mediante la toma de muestras del material líquido, censa las temperaturas durante la solidificación, grafica la curva temperatura vs tiempo y mide los puntos críticos de esta curva.

En el presente proyecto se realiza una revisión teórica exhaustiva de la información concerniente al análisis térmico y su aplicación para control del proceso productivo de hierro nodular. La mayoría de la información proviene de publicaciones científicas en revistas indexadas y tesis. Además, se contó con capacitaciones impartidas por un experto técnico de la empresa fabricante del equipo. La instrucción consistió en el uso del equipo, indicaciones para la toma de muestras y la interpretación de resultados.

Con la información obtenida se procedió a tomar muestras en etapas críticas del proceso de producción de hierro nodular. Posteriormente, se analizaron las mediciones realizadas para establecer el comportamiento actual de las variables físicas que caracterizan al material y su desviación respecto de las recomendaciones dadas por la bibliografía y fabricante del equipo. Finalmente, se estableció el procedimiento para toma de muestras, análisis de datos y recomendaciones para corrección de desviaciones.

PALABRAS CLAVE: análisis térmico, curva de enfriamiento, hierro dúctil, grafito nodular.

ABSTRACT

Thermal analysis involves interpreting the cooling curve of materials to predict the constitution of the alloy. This tool allows for proper control of the final configuration of cast iron once solidification has concluded. The thermal analysis equipment is a device that, by taking samples of the liquid material, senses the temperatures of the material during solidification, graphs the temperature vs. time curve, and determines the critical points of this curve.

In this project, an exhaustive theoretical review of the information concerning thermal analysis and its application for controlling the production process of ductile iron is carried out. Most of the information comes from scientific publications in indexed journals and theses. Additionally, training sessions were provided by a technical expert from the equipment manufacturing company. The instruction covered the use of the equipment, sampling instructions, and result interpretation.

With the obtained information, samples were taken at critical stages of the ductile iron production process. Subsequently, the measurements were analyzed to establish the current behavior of the physical variables that characterize the material and its deviation from the recommendations given by the literature and the equipment manufacturer. Finally, the procedure for sampling, data analysis, and recommendations for correcting deviations was established.

KEYWORDS: thermal analysis, cooling curve, ductile iron, nodular graphite.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Fundireciclar es una empresa que diseña, desarrolla, produce y comercializa piezas y conjuntos fundidos principalmente en aleaciones ferrosas. Con la finalidad de asegurar el cumplimiento con normativas nacionales e internacionales y su compromiso con la satisfacción del cliente, la empresa ha implementado controles que aseguran la calidad del material producido. Actualmente, la compañía cuenta con un laboratorio en el que se realizan ensayos de tracción, composición química y análisis metalográfico. Estos análisis han permitido a la empresa medir, evaluar y determinar los materiales necesarios para elaborar productos de alta calidad. Actualmente, la empresa identifica el material usando espectrometría por arco y, en caso de detectar alguna diferencia con el producto final deseado, realiza los ajustes necesarios. Este ensayo permite determinar la composición química del material; sin embargo, no proporciona información sobre el estado físico ni posibles interacciones o compuestos formados por estos elementos. Gracias a la investigación continua del personal de Fundireciclar, se ha encontrado que el control del material y la información mencionada puede mejorarse con la implementación del análisis térmico.

El análisis térmico es una tecnología que consiste en interpretar la curva de enfriamiento característica de los materiales durante su proceso de solidificación, correlacionando la forma del enfriamiento con los diagramas de fase de la aleación, pues es un hecho bien conocido que los diagramas de fase son dibujados usando curvas de enfriamiento. La curva permite identificar el momento en el cual las tasas de enfriamiento cambian radicalmente y se puede correlacionar esto con los cambios de fase. Los puntos críticos donde las tasas de enfriamiento cambian drásticamente proporcionan información sobre el estado metalúrgico del material, mostrando el momento donde inicia y termina la presencia de una determinada fase. Esto permite observar fenómenos propios de las fundiciones de hierro como la recalcancia. Con la información obtenida es posible determinar variables físicas del material como el potencial de nucleación, módulo de solidificación, entre otras, las mismas que son clave para determinar la calidad final del material. Para realizar estas mediciones es necesario utilizar un dispositivo especializado para este tipo de análisis. Por este motivo Fundireciclar ha invertido en el equipo Carbomax Delta de Italterm.

El equipo Carbomax Delta usa termocuplas conectadas para monitorear durante un tiempo establecido la temperatura del material vertido en recolectores de muestras especializados llamados copas. Con la información obtenida, su paquete computacional grafica en tiempo real la relación temperatura vs tiempo del proceso de solidificación del material y muestra sus puntos críticos (cambios de pendiente). El equipo permite hacer dos tipos de ensayos

y cuenta con un muestreador diferente para cada uno. El primer ensayo es el de composición y el segundo el de microestructura, para los cuales se usan las copas con telurio y sin telurio respectivamente. Cada ensayo brinda información diferente y complementaria sobre el estado del material en sus distintas fases de fabricación.

El fabricante del equipo Carbomax Delta ha apoyado a Fundireciclar con una capacitación encargada a un experto técnico especializado en análisis térmico. El apoyo brindado fue dividido en 4 capacitaciones en las cuales se revisaron conceptos, se pidió la toma de muestras y se discutieron resultados. La primera clase consistió en una revisión teórica sobre la producción de hierro fundido y la aplicación del análisis térmico como herramienta de control dentro del proceso, también se mostraron nuevos conceptos y propiedades que determinan la calidad final del hierro y se explicó el uso del equipo. En la segunda capacitación se revisó el proceso de fusión de la empresa para determinar posibles desviaciones y como se las puede corregir con el análisis térmico. Se pidió realizar análisis del metal en el horno durante el proceso de vaciado del horno. Para analizar el material en el horno se tomaron 5 muestras por cada colada de metal producido. La primera muestra sería el ensayo de composición con copa con telurio. Para las siguientes 4 se hizo el ensayo de microestructura y se tomaron antes de pasar el metal del horno a la cuchara de nodulización, una por cada cuchara necesaria para vaciar completamente el horno. Con la información recogida se dio paso a la tercera clase, esta consistió en revisar los datos obtenidos y establecer el estado actual del material en el horno. Se pidió la recolección de más datos, esta vez se incluirían muestras tomadas en las cucharas de nodulización y transporte. En la última capacitación se revisaron los datos obtenidos y se establecieron las estrategias a tomar para corregir posibles desviaciones.

Finalmente, ya con la información recopilada, se ha establecido el procedimiento a seguir para tomar datos y analizar resultados obtenidos mediante análisis térmico. Una vez tomada una cantidad significativa de datos se procede a establecer estrategias para corregir y mejorar el proceso productivo.

1.1 Objetivo general

Implementar un procedimiento de análisis térmico para control de estructura y composición de hierro nodular NTE INEN 2499 producido en la empresa Fundireciclar SA.

1.2 Objetivos específicos

1. Determinar las variables físicas del material que pueden ser controladas mediante análisis térmico.

2. Establecer si existe una correlación entre los resultados obtenidos mediante las curvas de enfriamiento y las propiedades físicas y químicas del material producido.
3. Establecer procedimientos para el muestreo, análisis e interpretación de los resultados obtenidos mediante análisis térmico.

1.3 Alcance

El presente proyecto busca implementar la tecnología de análisis de térmico al proceso productivo de la empresa Fundireciclar SA. Para ello, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura concerniente al análisis de curvas de enfriamiento, posteriormente, con el uso del equipo Carbomax Delta, se tomarán muestras del material preparado en la fábrica y se realizará el respectivo análisis de los datos obtenidos, finalmente, se establecerá el proceso para la toma de muestras, análisis de resultados y correlación con las propiedades físicas del material. El proyecto se enfoca en el control del material producido en Fundireciclar para la fabricación de productos en base a hierro nodular HD-80-55-06 bajo las normas NTE INEN 2499 y ASTM A 536.

1.4 Marco teórico

Hierro nodular

También conocido como Hierro dúctil, este material es una aleación ferrosa muy versátil ya que ofrece una variedad de propiedades mecánicas. El hierro nodular está constituido por grafito que se precipita en forma de esferas dentro de una matriz de hierro. La morfología esferoidal del grafito favorece la continuidad de la matriz, por lo tanto, el material presenta una alta ductilidad. [1]

Teniendo en cuenta la química del material, el hierro nodular presenta una composición muy similar a la del hierro gris, de 3% a 4% de carbono y 1,8% a 2,8% de silicio. En estos materiales el grafito que no puede disolverse en austenita se precipita en forma de hojuelas. Mediante la adición de pequeñas cantidades de magnesio, el grafito es capaz de cambiar la forma en que se agrupa formando esferas. Este cambio en la configuración hace que las propiedades mecánicas del hierro dúctil se alejen de las del hierro gris y se asemejen a las propiedades de los aceros. [2]

La calidad de la microestructura de la fundición nodular suele evaluarse mediante la clasificación de la forma del grafito, su tamaño, nodularidad y conteo de nódulos.

Forma del Grafito

Se determina mediante comparación visual con un gráfico estándar de referencia. Se hace una clasificación en 7 niveles que se identifican con números romanos. El nivel 1 corresponde a grafito en forma esferoidal y el nivel 7 a grafito en forma de hojuelas típicas del hierro gris. Para fundiciones de hierro dúctil es deseable tener grafito de tipo 1 (Tipo I). [3] Se muestran dos ejemplos de clasificación del grafito según su forma en la Figura 1.

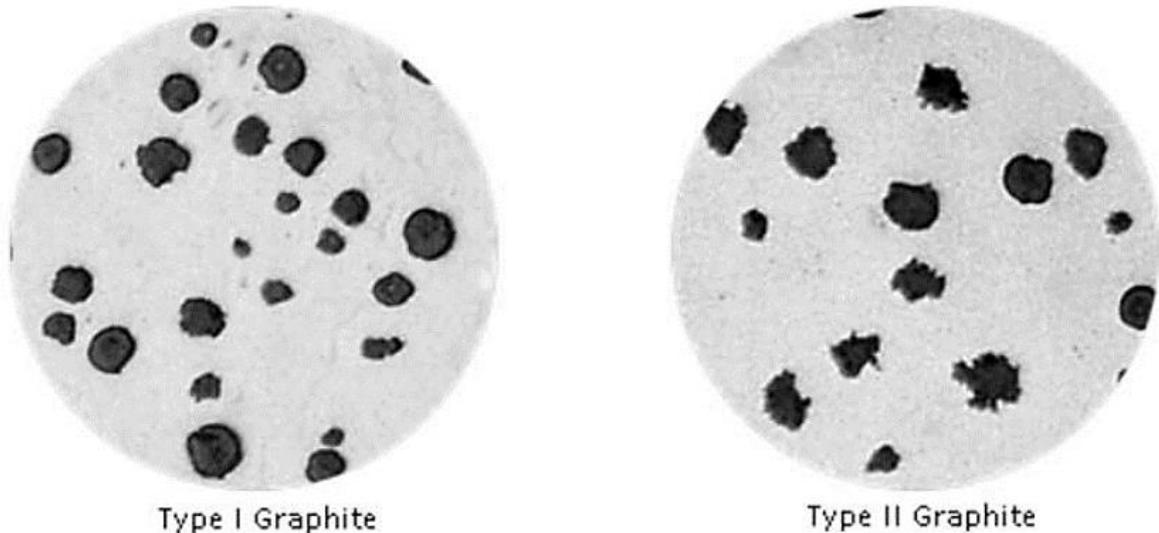


Figura 1 Ejemplos clasificación Forma de grafito [3]

Tamaño de Grafito

Se determina mediante comparación visual con un gráfico estándar de referencia. Se hace una clasificación en 8 clases. Para realizar la evaluación comparativa, el espécimen a analizar debe ser visto bajo una maximización de 100X. Si existe una mezcla de tamaños en una misma muestra se deben expresar en forma de porcentaje. [3]

Size Class	Actual Dimension (μm) ^A
1	≥ 640
2	320 to <640
3	160 to <320
4	80 to <160
5	40 to <80
6	20 to <40
7	10 to <20
8	<10

Figura 2 Clasificación de Grafito según su tamaño [3]

En la Figura 2 se muestra las clases de hierro nodular según su conteo de nódulos y el rango que abarca cada clase [3], mientras que en la Figura 3 se observan dos ejemplos de estas clases.

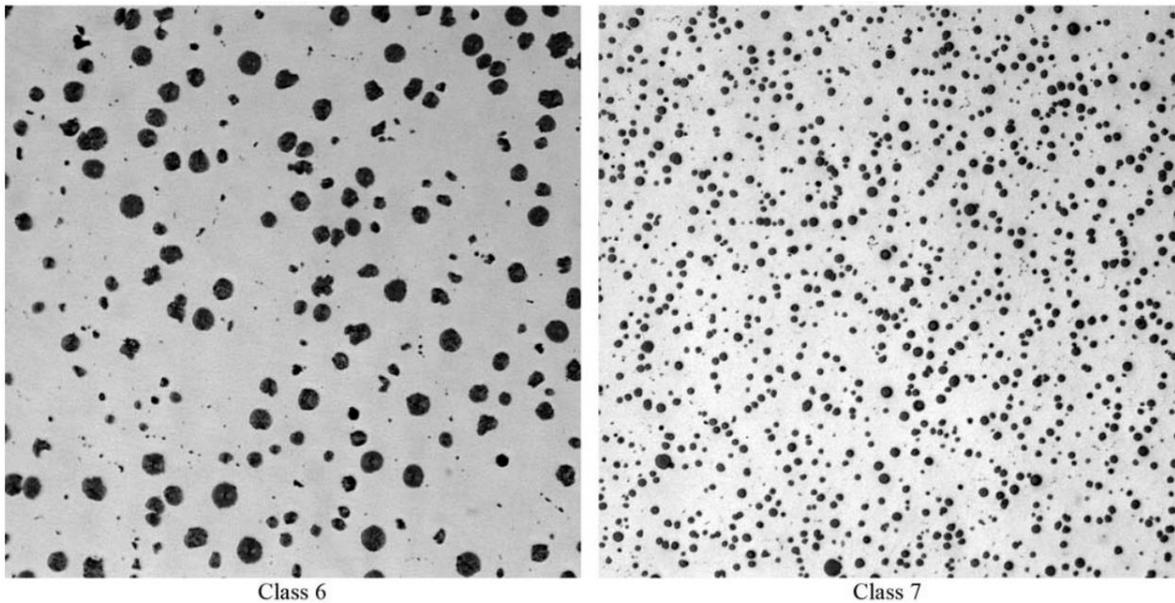


Figura 3 Ejemplos clasificación de grafito según su tamaño [3]

Nodularidad

Propiedad del hierro nodular que expresa en porcentaje la cantidad de partículas en forma de nódulos respecto de la cantidad total de partículas de grafito presente en la microestructura de la matriz metálica. El hierro dúctil presenta una nodularidad entre 80% y 100%. [3] La medición se lleva a cabo evaluando un mínimo de 500 partículas de grafito, aquellas que califican como nódulos, para luego compararlas con el total de la muestra y determinar el porcentaje. Para calificar los precipitados de grafito se establece un modelo matemático que permite obtener un factor de forma, aquellos que tengan un factor mayor a 0,6 califican como nódulos. La nodularidad puede expresarse como porcentaje directamente del conteo de partículas (nodularidad por conteo) o como nodularidad en porcentaje del área de partículas que cumplen con el criterio sobre el área total de partículas evaluadas (nodularidad por área) [4], (ver Figura 4).

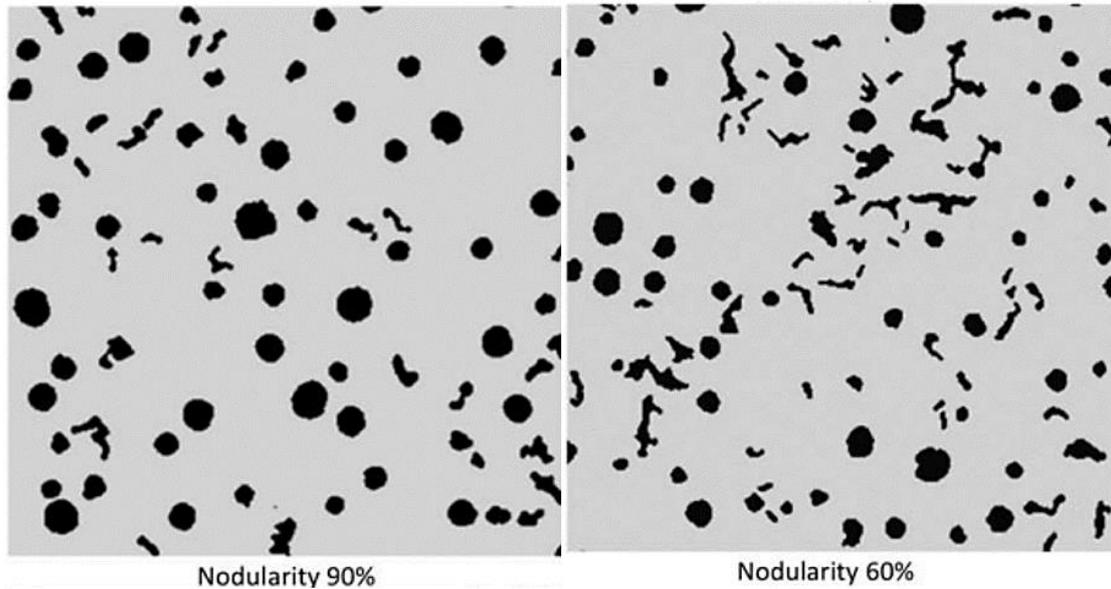


Figura 4 Ejemplos de nodularidad [3]

Conteo de nódulos

Esta propiedad se expresa como la cantidad total de grafito en forma nodular por milímetro cuadrado, esta medición se realiza haciendo un análisis metalográfico a una magnificación de 100X (Figura 5). Un conteo de nódulos alto indica una calidad metalúrgica buena, sin embargo, existe una cantidad óptima de nódulos por milímetro cuadrado acorde al tamaño de la sección del producto. [3] El control del conteo de nódulos es importante ya que tiene un impacto directo en las propiedades del material. Una cantidad mayor de nódulos por milímetro cuadrado se relaciona con una mayor resistencia de fluencia y a la rotura. [5]

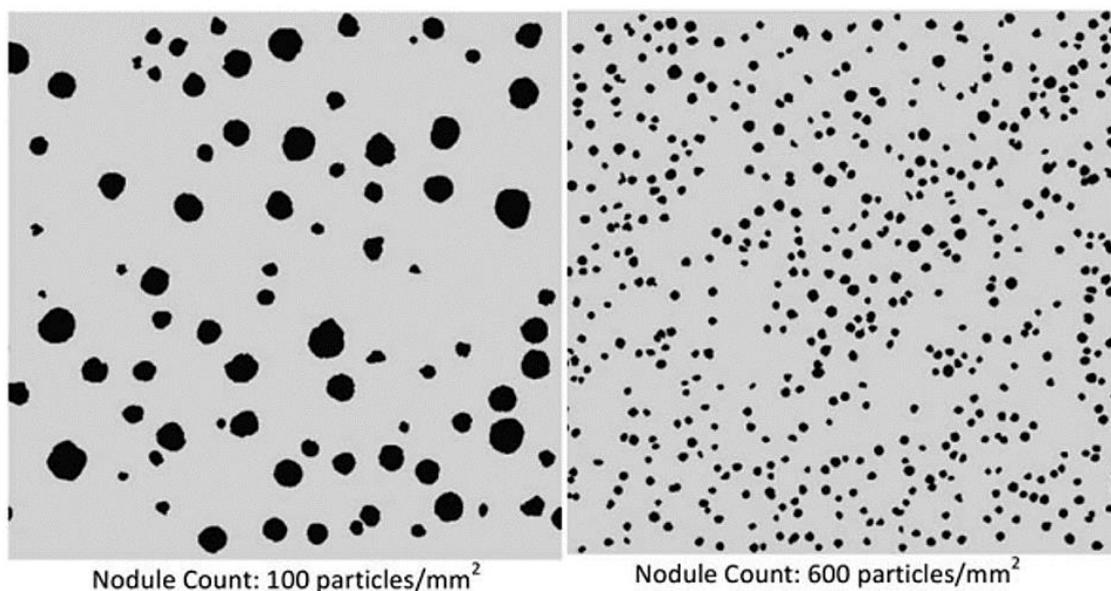


Figura 5 Ejemplos de conteo de nódulos [3]

Diagramas de fase

La fase en un material es una región en la cual presenta propiedades, estructura y composición uniformes que se diferencian de las fases aledañas. Un diagrama de fase es una representación gráfica de las diferentes zonas por las cuales pasa un sistema de materiales dependiendo de su temperatura y composición. Los sistemas pueden ser de un material puro o de aleaciones de dos materiales, en este caso el diagrama es binario. Estos gráficos son obtenidos de manera experimental en condiciones de equilibrio y permiten predecir y entender el comportamiento de los materiales durante su solidificación. [2]

Curvas de enfriamiento

Son usadas para determinar temperaturas de cambio de fase en metales puros o aleaciones. Se trata de una gráfica temperatura vs tiempo de un material que se enfría hasta llegar a temperatura ambiente. Los diagramas de fase (Figura 6) se construyen a partir de curvas de enfriamiento de las distintas composiciones de los materiales. [2]

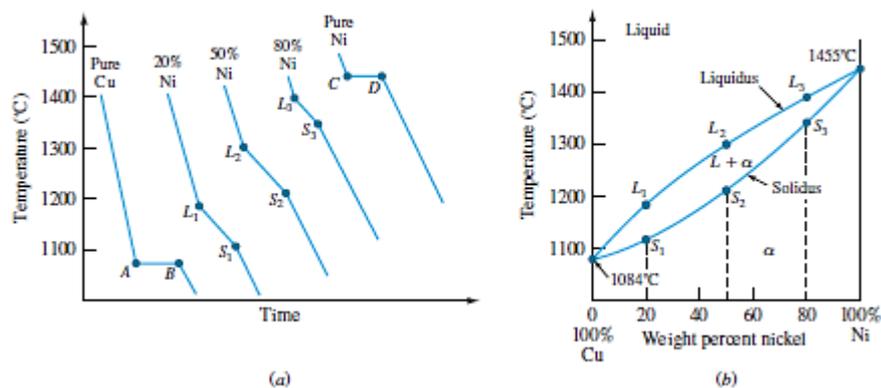


Figura 6 Ejemplo construcción diagrama Cu-Ni [2]

Sistema hierro-carbono

Este sistema binario (Figura 7) es uno de los más importantes en la ingeniería y la industria ya que tanto aceros como fundiciones de hierro son materiales ampliamente usados en nuestra infraestructura y maquinaria. [6]

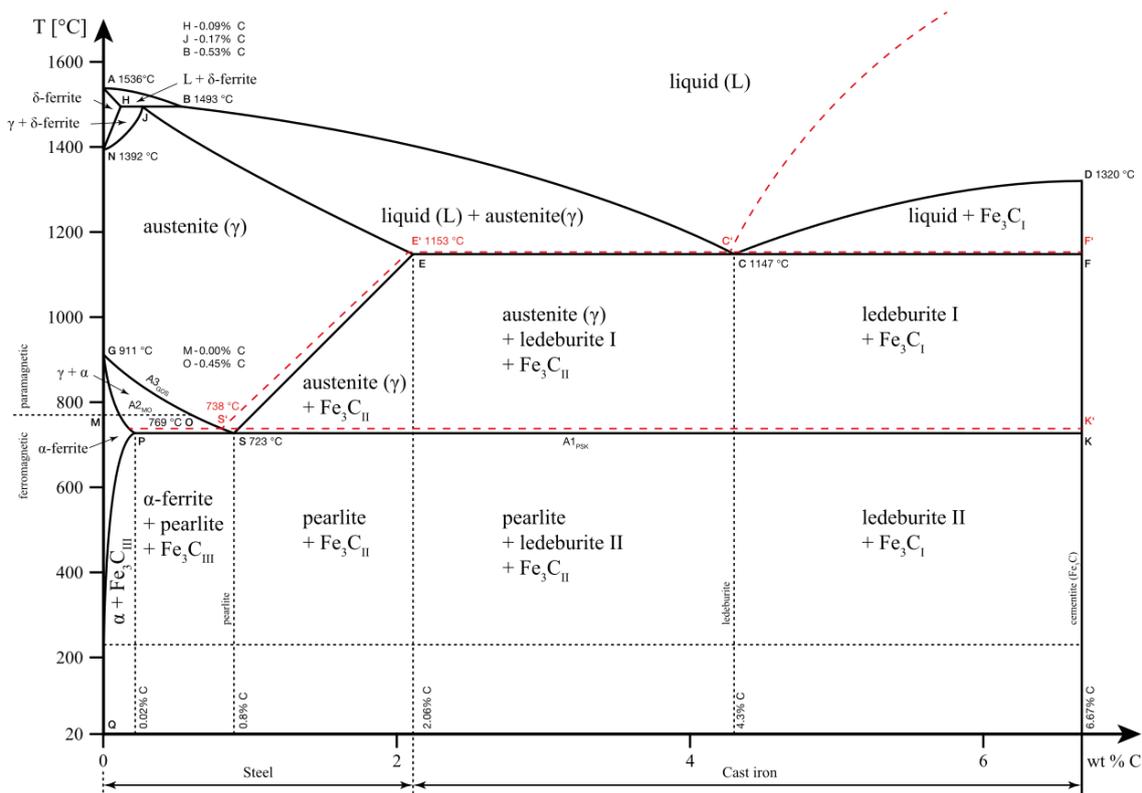


Figura 7 Diagrama de Fase Fe-C [7]

A partir de este diagrama se desprenden los siguientes conceptos, mismos que son claves para usarlo adecuadamente.

Temperatura de Liquidus: se llama así a la temperatura a la cual la aleación comienza su proceso de solidificación. Cualquier punto del diagrama sobre la línea de liquidus estará en estado líquido

Temperatura de solidus: temperatura a la cual finaliza el proceso de solidificación de la aleación. Cualquier punto en el diagrama bajo la línea de solidus estará en estado sólido.

Punto eutéctico: reacción en la que un líquido se transforma simultáneamente en dos sólidos. Específicamente para el hierro se solidifica formando cementita y austenita simultáneamente. [8]

Carbono equivalente

El hierro fundido simple es una aleación de hierro, carbono y silicio. El diagrama de fases para una aleación ternaria Fe-C-Si es complejo. La representación del diagrama de fases se vuelve aún más compleja cuando están presentes el fósforo y otros elementos. Por esta razón, se define y utiliza comúnmente en la industria una fórmula simplificada y conveniente

de Carbono Equivalente (CE). El método estima un número equivalente al efecto del carbono para cada uno de estos elementos. [9]

Los equivalentes aparentes se usan para estudiar sistemas multicomponentes mediante la reducción de la completa composición de una aleación a un valor equivalente de un componente determinado [10]. El carbono equivalente expresa el contenido aparente de carbono en hierros de composición química compleja. El contenido de carbono obtenido de esta forma facilita la evaluación estructural de los hierros mediante el sistema Fe-C. Se lo suele expresar con la siguiente fórmula.

$$CE = C_c + \sum_i^n G_c^i C_i$$

Ecuación 1: Definición de equivalentes de carbono

Donde C_c representa la concentración de carbono, C_i la concentración de otros elementos y G_c^i es el equivalente de carbono de cada elemento. [11]

La influencia de los equivalentes se establece según la aplicación que se va a dar. Para fundición, la AFS establece que:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3}$$

Ecuación 2: Carbono equivalente

El punto en el cual los fundidores pueden diferenciar si su material es hipo o hiper eutéctico es cuando el carbono equivalente tiene un valor de 4,26%. [8]

Fases del proceso de obtención de hierro dúctil

Para la producción de hierro dúctil se realizan tratamientos de nodulización e inoculación, estos favorecen la precipitación del grafito y su configuración en forma de nódulos. [12]. Cabe destacar que para obtener un material de buena calidad es necesario tener controles rigurosos de la química, temperatura y tiempos de espera. [8]

Fusión: se emplea un horno de inducción para cambiar de estado sólido a líquido el material base. El material de carga típico consta de chatarra de acero, grafito para alcanzar el porcentaje de carbono deseado y retorno de producción. Es importante controlar la composición química del material en este punto ya que a partir de esto se agregan los aleantes que permitirán alcanzar las propiedades deseadas del material. [8]

Nodulización: consiste en la aplicación de elementos aleantes que promueven la formación de grafito esferoidal. El elemento más común en la industria es el magnesio [12]. Durante este proceso el metal reacciona de manera agresiva con el magnesio debido a su relativamente bajo punto de fusión. [1] Para limitar la pérdida de calor y reducir las reacciones de oxidación durante este tratamiento suele utilizarse una cuchara especial (Figura 8) que presenta dos compartimientos. En uno se coloca la aleación nodulizante y en el otro se vierte el material, de este modo se tiene cierto control sobre la mezcla y su posterior reacción. [13]

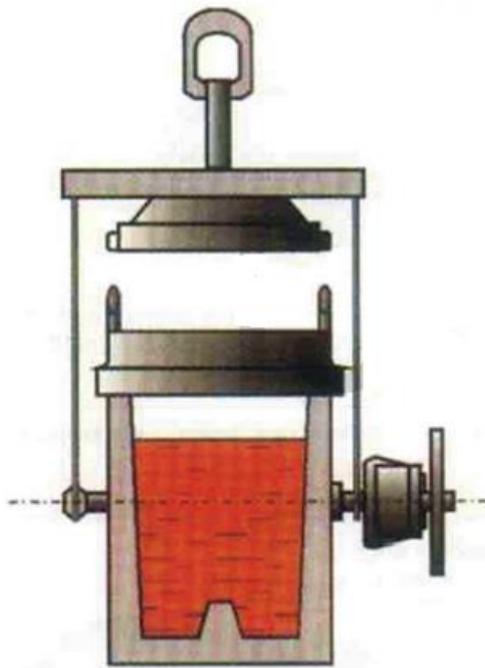


Figura 8: Cuchara para Nodulización (Tundish cover ladle) [13]

Inoculación: la inoculación es un tratamiento que promueve la grafitización del grafito en la estructura del hierro fundido y tiene como objetivo obtener una estructura sin carburos y con grafito de alta calidad. Generalmente, este tratamiento se aplica para prevenir la solidificación a un grado de subenfriamiento eutéctico excesivo, lo cual es favorable para la aparición de carburos y/o morfologías de grafito no deseadas, como el grafito laminar tipo D. Las aleaciones de FeSiAlX que incluyen elementos inoculantes, como Ca, Ba, Sr, Zr, Ce, actúan para promover y participar en la creación de compuestos activos que actúan como sitios efectivos de nucleación del grafito [14]. En la práctica, consiste en agregar partículas de ferroaleación al chorro metálico mientras este es vertido para asegurar su mezcla. Este proceso facilita la formación de inclusiones donde se tienden a formar centros de nucleación que permiten la generación de células eutécticas. [1] El efecto del inoculante

tiende a disminuir con el tiempo de espera del material, este proceso se lo conoce como desvanecimiento (fading). [15]

Análisis térmico

El análisis térmico consiste en registrar e interpretar el comportamiento de la temperatura durante el calentamiento o enfriamiento de un material. La forma más sencilla de aplicar el análisis térmico es empleando una termocupla, esta se inserta en un molde de prueba llamado copa o taza. El metal se vierte dentro de este molde y se deja enfriar y solidificar [16]. La forma de la copa tiene un efecto significativo en los resultados obtenidos, es decir, afecta la forma de la curva de enfriamiento. Esta curva se obtiene mediante un balance entre el calor latente liberado durante la solidificación y el calor perdido en los alrededores de la copa. Especialmente en la industria de la fundición de hierro, se ha aplicado el análisis de las curvas de enfriamiento para predecir la composición de la aleación, susceptibilidad a la formación de rechupes, estimar el subenfriamiento, etc. [15]

Para el análisis de la curva de enfriamiento se han definido ciertos puntos de interés, estos se obtienen cada vez que existe un cambio de pendiente (Figura 9). La terminología estándar utilizada para el análisis de la curva es el siguiente:

- TL: temperatura de liquidus
- TE: temperatura eutéctica
- T_{LA} : temperatura de detenimiento líquido
- TE_{min} : temperatura de subenfriamiento eutéctico
- TE_{max} : temperatura de recalcancia eutéctica
- ΔT : recalcancia
- ΔT_{max} : subenfriamiento máximo
- ΔT : subenfriamiento mínimo

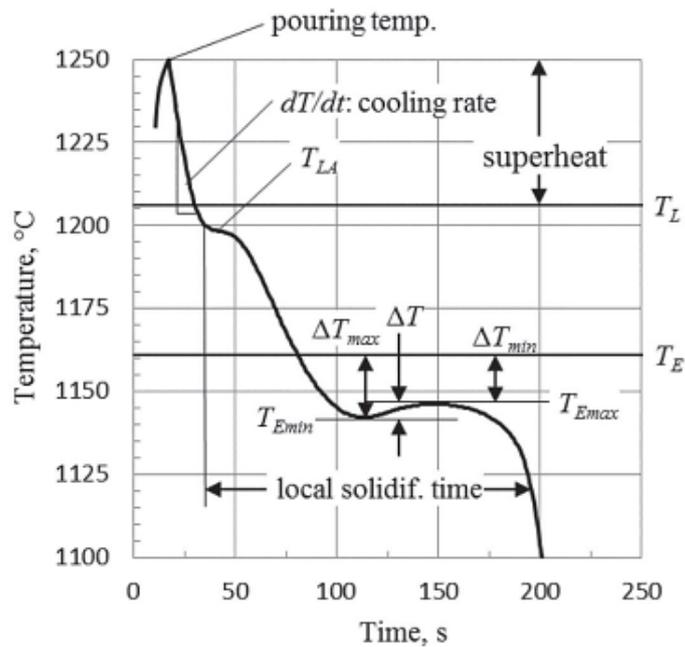


Figura 9 Curva de enfriamiento y puntos de interés para análisis térmico [16]

Aplicaciones del análisis térmico

Estimación de la composición química

Se establece una correlación entre la composición del material y la temperatura de detenimiento líquido.

$$T_{LA} = 1669 - 124 * CE$$

Ecuación 3: Temperatura de liquidus en función del carbono equivalente

Para medir el carbono equivalente se tiene que:

$$CE = 14,45 - 0,0089 * T_{LA}$$

Ecuación 4: Carbono equivalente en función de temperatura de liquidus

Es posible forzar la solidificación blanca (metaestable) en el hierro fundido. La solidificación promueve la formación de carburos en lugar de facilitar la formación de grafito, este fenómeno ocurre a un alto subenfriamiento donde $T_{EU} = T_{ER}$. En la curva de solidificación blanca se da el nombre de temperatura eutéctica metaestable T_{met} a la temperatura a donde ocurre la reacción eutéctica. [14] La temperatura eutéctica metaestable permite predecir el contenido de carbono y silicio a través de las siguientes ecuaciones.

$$\%C = -6,51 - 0,084T_{LA} + 0,0178T_{met}$$

Ecuación 5: Porcentaje de carbono en función de T_{LA} y T_{met}

$$\%Si = 78,411 - 4,28087Si_{adj} - 0,06831T_{met}$$

Ecuación 6: Porcentaje de silicio en función de T_{LA} y T_{met}

Donde Si_{adj} es el contenido de Si con un factor de corrección que depende del contenido de fósforo. [17]

Predicción de la forma del grafito

La predicción de la nodularidad del hierro dúctil es uno de los principales objetivos del análisis térmico. Se ha determinado que la forma de la curva de enfriamiento permite predecir a breves rasgos el porcentaje de nodularidad del material. Del mismo modo, la recalcancia permite pronosticar la forma de los precipitados de grafito (Figura 10). Estos fenómenos pueden observarse en las siguientes gráficas. [16]

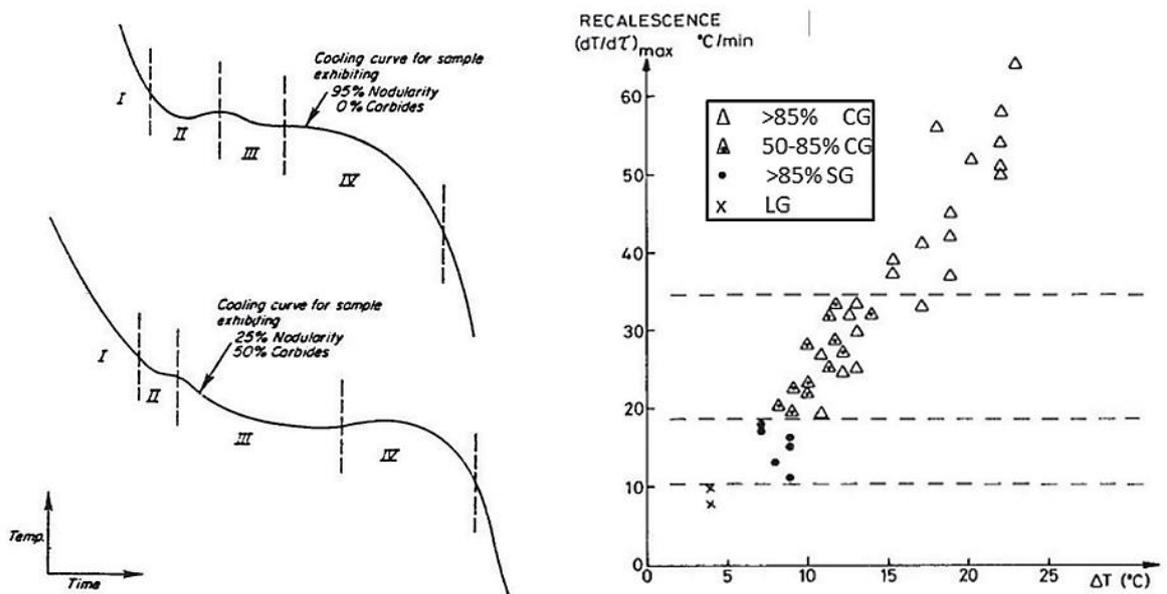


Figura 10 Predicción de nodularidad y forma de grafito mediante análisis térmico [16]

En la figura 10 la nomenclatura corresponde a siglas en inglés de las siguientes estructuras conocidas de grafito; LG corresponde a grafito lamelar (Lamellar Graphite), SG es grafito esferoidal (Spheroidal graphite) y CG significa grafito compactado (compacted graphite). [16]

Telurio

Elemento químico que promueve la solidificación metaestable de los hierros fundidos, por lo tanto, promueve la formación de carburos. La determinación de la temperatura metaestable permite estimar el contenido de carbono y silicio. El material expuesto a este elemento no presenta subenfriamiento eutéctico. [16]

Potencial de nucleación

La transición de carbono a grafito es uno de los principales objetivos en la producción de hierro fundido. Esto se logra sometiendo al material a un proceso de inoculación. El potencial de nucleación mide la capacidad del material de formar núcleos de grafito, es decir, la facilidad que tiene el grafito de agruparse y se define como la diferencia entre la temperatura de subenfriamiento eutéctico TE_{min} y la temperatura eutéctica metaestable T_{met} , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Nuc = TE_{min} - T_{met}$$

Ecuación 7: Definición potencial de nucleación

El objetivo es que el potencial de nucleación sea lo más alto posible, esto indica una mejor calidad metalúrgica del material [18]. El potencial para la formación de grafito durante la solidificación tiende a disminuir a medida que aumenta el intervalo de tiempo entre la inoculación y el momento que se vierte el material en el molde, a este fenómeno se lo conoce como fading (Figura 11). [19] El fading está definido como la pérdida del efecto de la inoculación con el paso del tiempo (Figura 12). [20]

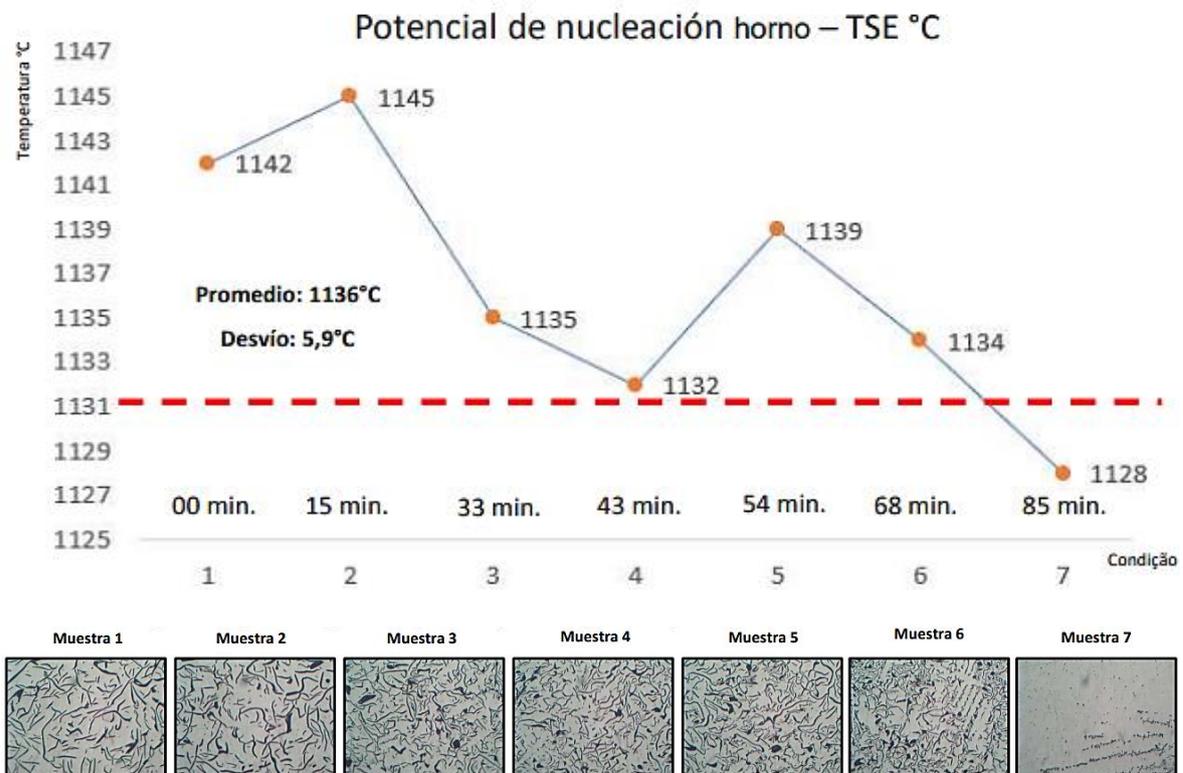


Figura 11 Comportamiento del potencial de nucleación con el paso del tiempo [18]

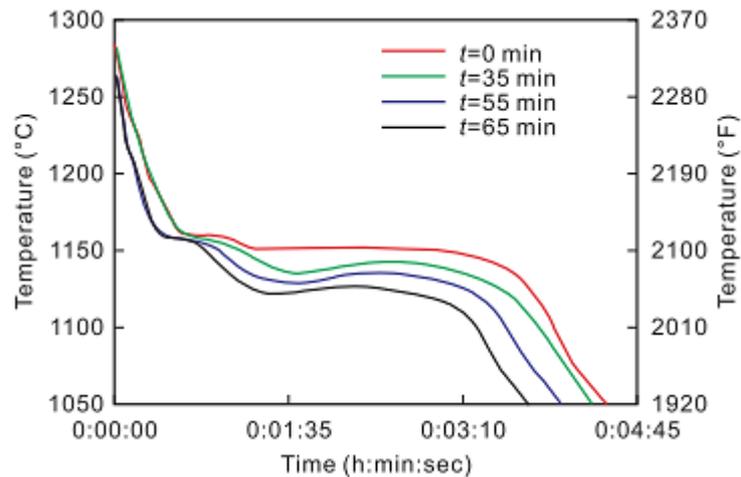


Figura 12 Efecto del inoculante a lo largo del tiempo [15]

Módulo de solidificación

El concepto tradicional de Carbono equivalente es ampliamente aceptado en la industria, a pesar de ser muy simplificado. Se ha demostrado que el CE calculado a partir del análisis químico no siempre coincide con el obtenido a partir de la temperatura de liquidus. Esto se debe a la influencia de otros elementos en dicha temperatura. Usar el CE calculado a partir de la composición química y asumir que el punto eutéctico está en 4.3% como base para el control del proceso de hierro gris y nodular puede ser engañoso y conducir a errores costosos. Calcularlo basándose en la temperatura de liquidus es más preciso. El verdadero punto eutéctico es un valor dinámico que depende de la composición química, la velocidad de enfriamiento y el nivel de nucleación. [9]

Este parámetro indica si la composición del material presenta un comportamiento eutéctico. Mientras más cercano se encuentre al cero significa que el material que se está produciendo tiene una composición eutéctica. Se define como la diferencia entre la temperatura de liquidus TL y la temperatura de subenfriamiento eutéctico TE_{min} . La diferencia entre estas temperaturas debe ser lo más baja posible (tender al cero) ya que esto indica que el material trabaja sobre el punto eutéctico. [18]

$$MS = TL - TE_{min}$$

Ecuación 8: Definición de Módulo de solidificación

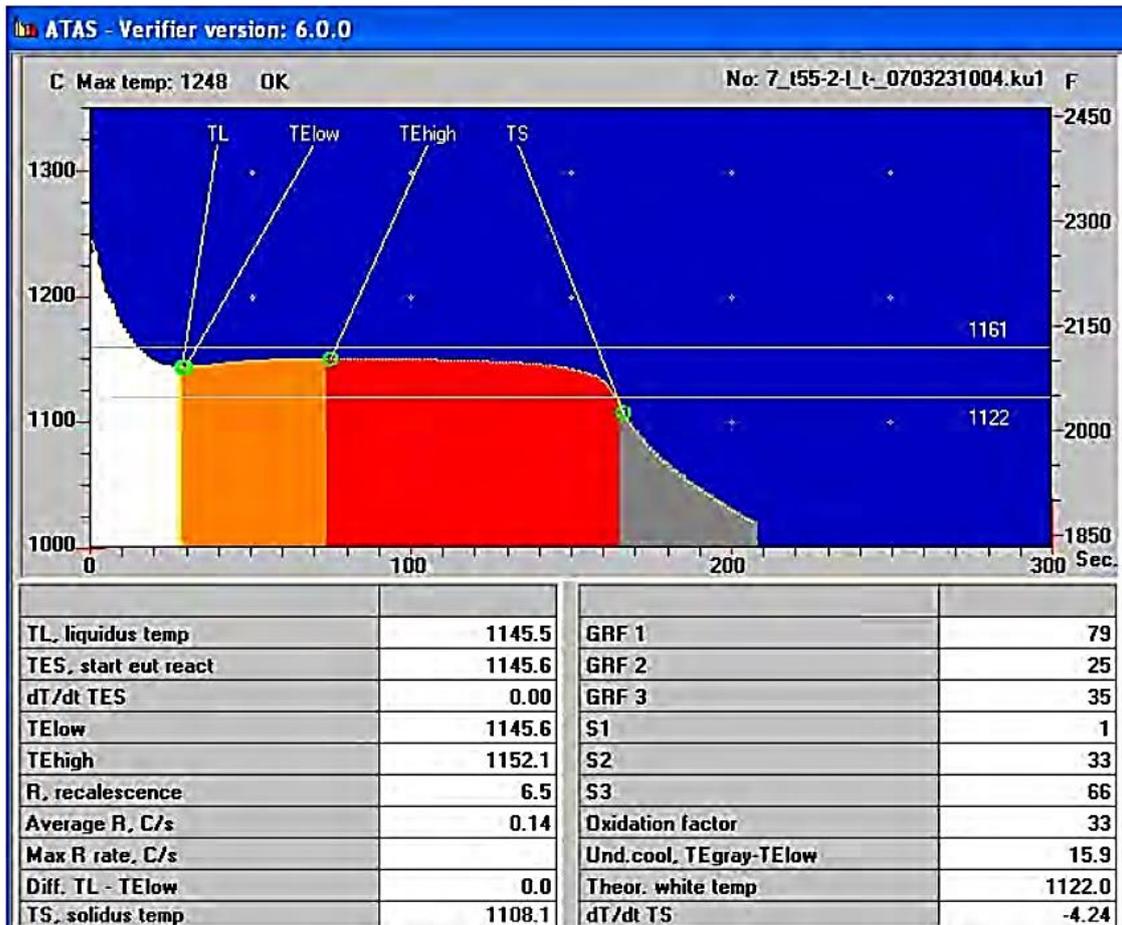


Figura 13 Curva de material completamente eutéctico [9]

La Figura 13 muestra que la temperatura de liquidus TL coincide con la temperatura eutéctica baja TE_{low} (TE_{min} en nuestra nomenclatura en español). Esto indica que el material tiene un comportamiento completamente eutéctico. [9]

Recalescencia

En la curva de solidificación del hierro nodular se aprecia el efecto de la recalescencia. Este efecto consiste en el aumento de la temperatura del material (Figura 14). Cuando se ha alcanzado la temperatura eutéctica baja, la pérdida de calor se encuentra en equilibrio debido a la generación de calor latente y específico, esto conduce a la reacción eutéctica. Luego de este punto se libera energía que hace que la temperatura aumente hasta la temperatura eutéctica máxima. Se ha encontrado que la recalescencia se reduce con el incremento del grado de inoculación. Una recalescencia típica para un hierro nodular adecuadamente inoculado se encuentra entre 2 [°C] a 4 [°C]. [21]

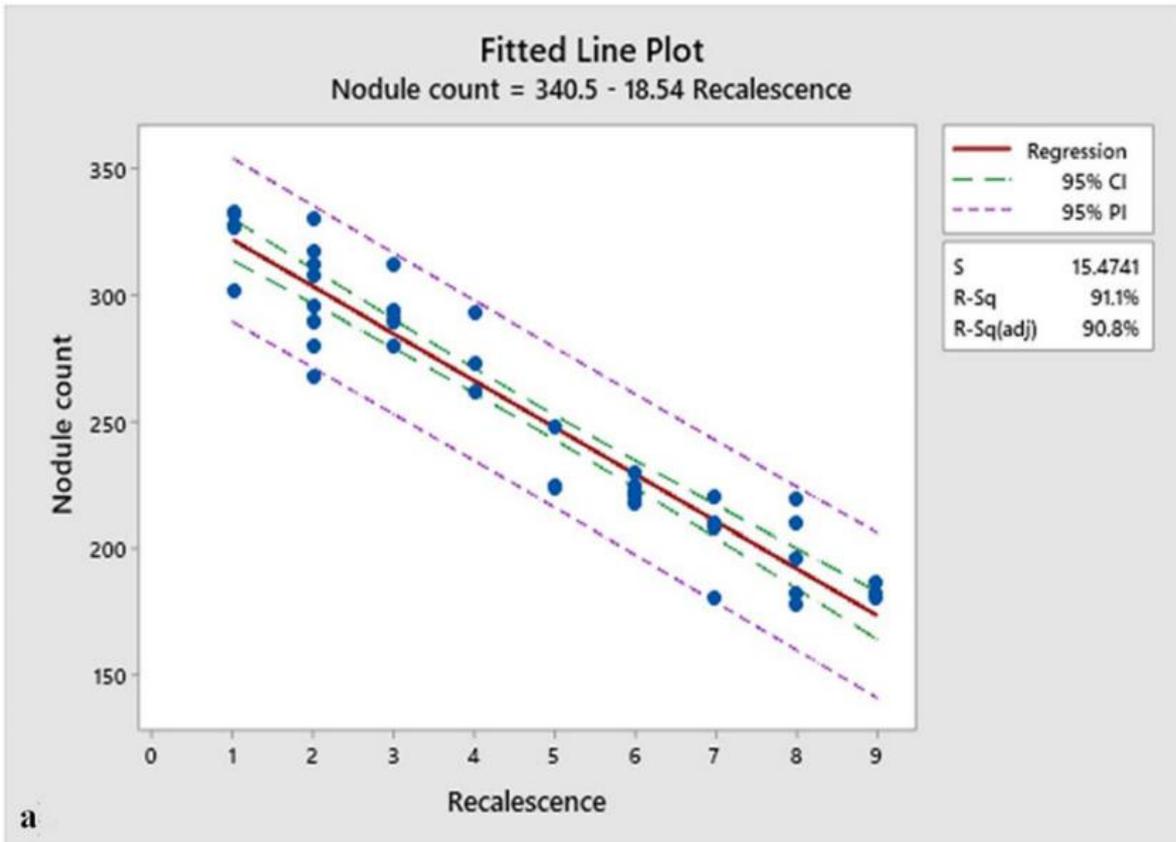


Figura 14 Efecto de la recalescencia sobre el conteo de nódulos [21]

2 METODOLOGIA

Para la ejecución de este proyecto se planteó un enfoque mixto ya que se realizó interpretaciones de los resultados y se propusieron acciones correctivas a partir de análisis estadístico de datos obtenidos de manera experimental y finalmente se evaluaron propiedades cuantitativas para proponer una correlación con la información recolectada mediante experimentos.

2.1 Equipamiento

Para la aplicación del análisis térmico se empleó el equipo Carbomax Delta de la empresa Italterm, este cuenta con varios accesorios y consumibles que permiten la obtención de datos confiables.

Carbomax Delta

Es una computadora con una interfaz sencilla de usar. Recibe señal del receptáculo para dibujar en tiempo real la curva de enfriamiento del material analizado. El equipo tiene su propia terminología en cuanto al análisis térmico se refiere, sin embargo, a efectos prácticos su aplicación es igual. Consta de dos modalidades que permiten medir parámetros diferentes. El equipo tiene 4 conexiones (canales) para termocupas, dos para cada uno de los modos disponibles (Figura 15).



Figura 15 Equipo para análisis térmico Carbomax Delta

Modo Carbono: configuración del equipo Carbomax delta que permite medir la composición del metal base. Para usarlo se deben emplear los canales 1 o 2 y usar la copa con telurio. En la Figura 16, se muestran los parámetros que muestra el equipo en esta configuración.

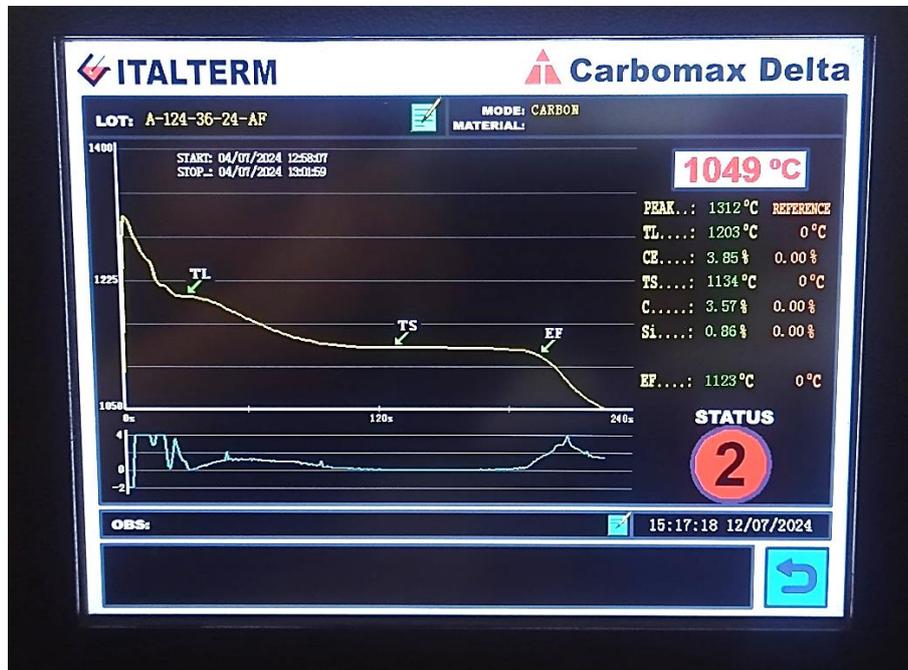


Figura 16 Curva de enfriamiento modo Carbono

En la Figura 16 se muestra la curva obtenida en modo Carbono (copa con telurio), esta curva indica los siguientes parámetros de interés:

PEAK: temperatura máxima alcanzada por el material en la copa

TL: temperatura de Liquidus

CE: porcentaje de carbono equivalente

TS: temperatura eutéctica metaestable

C: porcentaje de carbono

Si: porcentaje de silicio

EF: Temperatura de solidus

Modo Microestructura: configuración del equipo Carbomax delta que permite determinar el comportamiento físico del material. Para esta configuración se debe conectar la termocupla a los canales 3 o 4 y usar copas sin telurio. En la Figura 17, se muestran los parámetros que mide el equipo.

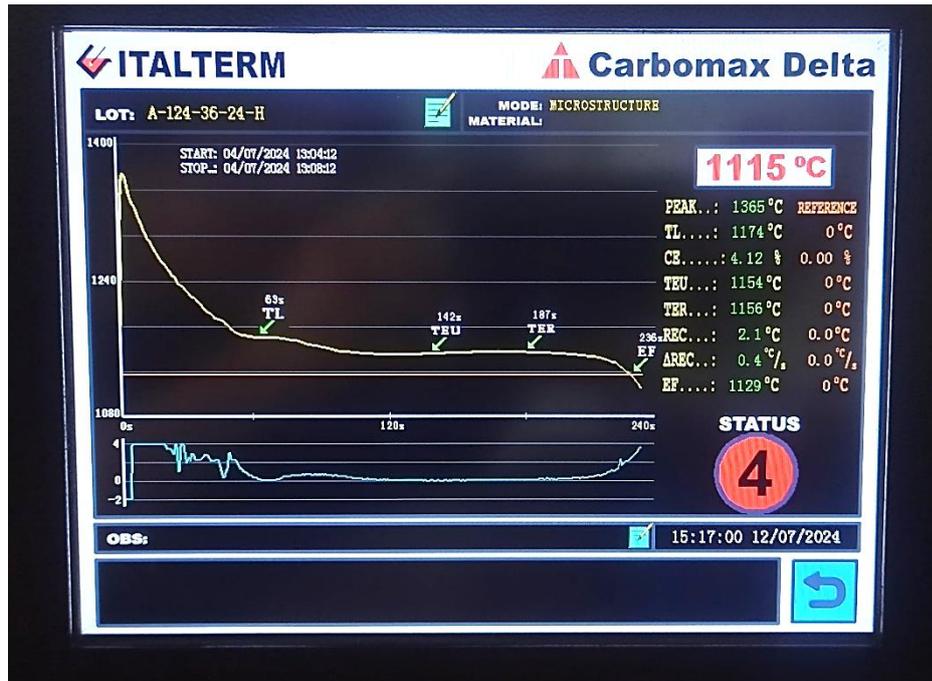


Figura 17 Curva de enfriamiento modo Microestructura

En la Figura 17 se muestra la curva obtenida en modo microestructura (copa sin telurio), esta curva indica los siguientes parámetros de interés:

PEAK: temperatura máxima alcanzada por el material en la copa

TL: temperatura de liquidus

CE: porcentaje de carbono equivalente

TEU: temperatura eutéctica baja

TER: temperatura eutéctica alta

REC: recalcancia

AREC: velocidad de la recalcancia

EF: temperatura de solidus

A partir de este punto se usará la nomenclatura del equipo Carbomax Delta para hacer referencia a las variables de análisis térmico.

Receptáculo

El receptáculo es el accesorio que conecta la termocupla de las copas hasta la interfaz (Figura 18).



Figura 18 Receptáculo para copas

Las copas son moldes estandarizados. El metal se vierte en las copas para ser analizado. Hay dos tipos de copas que corresponden a cada modo de trabajo del equipo. Para el modo carbono se usan copas con telurio y para el modo microestructura se usan copas sin telurio. Estos moldes tienen un volumen estándar que permiten tener una tasa de enfriamiento repetible y confiable (Figura 19). [15]



Figura 19 Copas para análisis térmico

Cuchara

Recipiente de material refractario que permite la recolección de muestras de metal líquido. La cuchara reduce la pérdida de calor del material (Figura 20).



Figura 20 Cuchara para recolección de muestras de hierro fundido

2.2 Proceso de fusión de la empresa

En Fundireciclar el proceso de fusión se realiza en un horno de inducción de capacidad de una tonelada. La fusión consta de 5 procesos principales, estos son el de preparación de material base, afino, nodulización, inoculación y colado. La capacidad de las cucharas de nodulización y transporte es de 250 Kg, por lo tanto, se requiere verter el material del horno cuatro veces para vaciarlo por completo y dar inicio a un nuevo proceso de carga. Cada proceso de carga del horno se llama colada y cada una lleva un código único. Ejemplo: A-128-35-23

Metal base

El proceso de fusión inicia al cargar el horno con chatarra de acero. Luego se carga grafito a la colada para aumentar el porcentaje de carbono en la mezcla. Finalmente, se agrega retornos del mismo proceso productivo, estos en presentación de lingotes de material sobrante, alimentadores de moldes y producto no conforme (Figura 21, Figura 22 y Figura 23).



Figura 21 Horno cargado con tochos de retazos de acero



Figura 22 Retorno del proceso de fundición



Figura 23 Piedras de grafito

Afino

El proceso de afinado consiste en ajustar la composición química del material en el horno (metal base). Para esto se toma una muestra y se le aplica un ensayo de composición química por espectrometría óptica. Con los resultados del ensayo se procede a verter elementos aleantes para alcanzar la composición deseada. Se usa FeSi75% y FeMnHC. Dependiendo del grado de Hierro dúctil deseado también se suele agregar chatarra de cobre (Figura 24 y Figura 25).



Figura 24 Ferroaleación FeSi75%



Figura 25 Ferroaleación FeMnHC

Nodulización

Consiste en agregar una aleación de magnesio para promover la formación de grafito nodular. La aleación usada es FeSiMg (Figura 26). Cuando el material entra en contacto con la aleación, se genera una reacción exotérmica agresiva. Para reducir el impacto de esta reacción y mejorar el rendimiento de los insumos se usa una cuchara especial que permite la ejecución de este proceso de la manera más adecuada (Figura 27).



Figura 26 Liga para Nodulización FeSiMg



Figura 27 Cuchara cónica para tratamiento de nodulización

Inoculación

La inoculación se realiza al verter el material en la cuchara de transporte (Figura 28). Para garantizar que la mezcla sea lo más uniforme posible, se vierte el inoculante en el chorro que cae desde la cuchara de nodulización. Este es el punto final del proceso de fusión, a partir de este punto se vierte el material en los moldes. En la primera cuchara de inoculación se toman las muestras para composición química y para fabricación de probeta de tracción.



Figura 28 Inoculante IM34

Colado

Consiste en verter el material final en los moldes de arena. Los procesos de nodulización, inoculación y colado se repiten 4 veces para vaciar por completo el horno e iniciar un nuevo proceso de carga del horno (Figura 29).



Figura 29 Cuchara de transporte y vertido de material en molde

El proceso se describe de manera gráfica en el diagrama de la Figura 30.

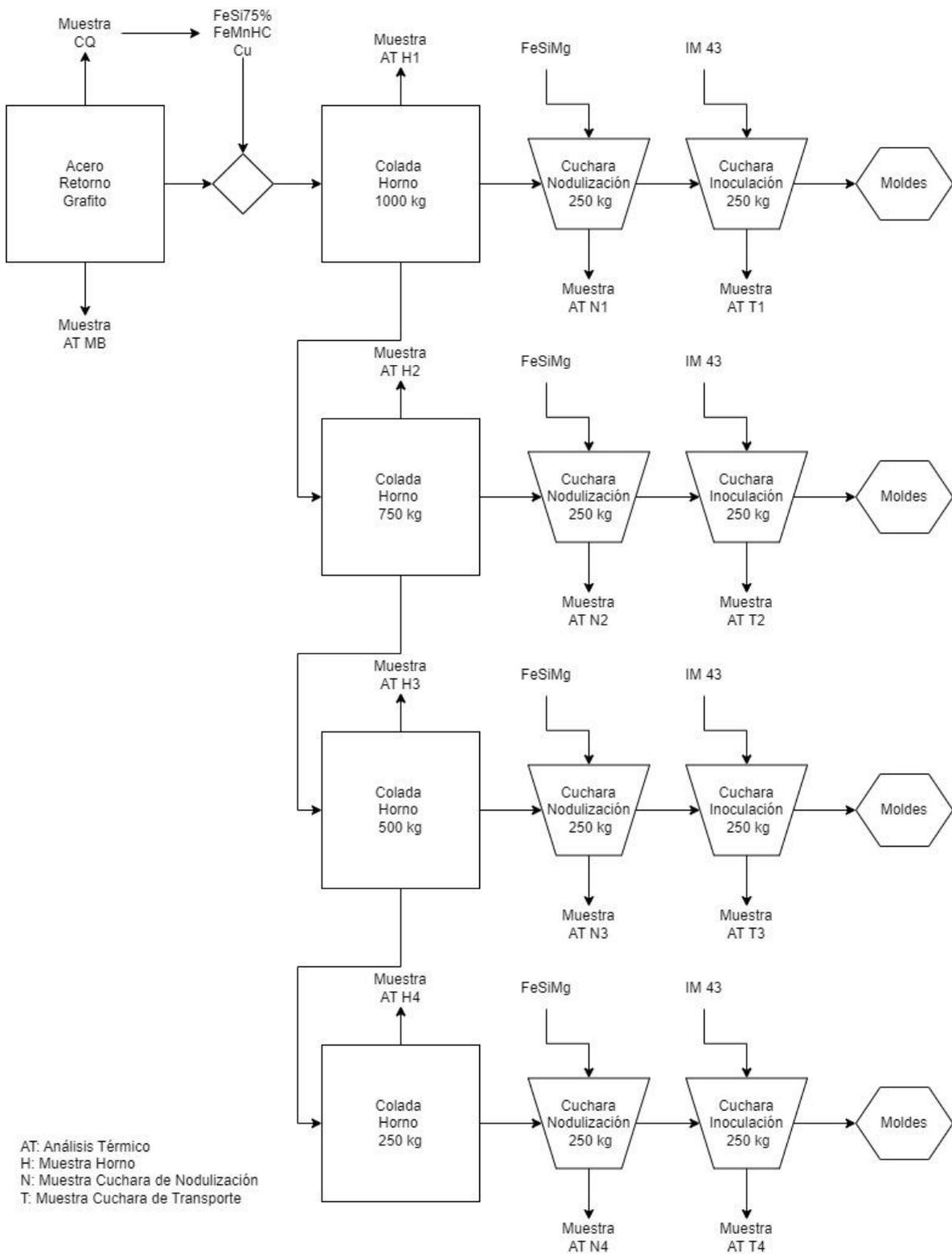


Figura 30 Diagrama proceso de fusión Fundireciclár

2.3 Estudio del material producido

El estudio del material se dividió en dos partes. La primera se enfoca en datos tomados en el horno. Para la segunda toma de datos se extendió el enfoque, esta vez tomando datos de las cucharas luego de los procesos de nodulización e inoculación. Para realizar el análisis térmico del material se aplicó el siguiente procedimiento

1. Encendido del equipo
2. Selección de canal y configuración (modo carbono o modo microestructura)
3. Conexión de la copa adecuada en el receptáculo
4. Toma de muestra de metal líquido y vertido en copa
5. Extracción de muestra sólida del receptáculo
6. Identificación de muestras

Análisis material en horno

Se tomaron un total de 5 muestras por cada colada de material producido. La primera muestra es tomada del material base, antes del proceso de afino. Las siguientes muestras se toman después del ajuste de composición química. Cada análisis se realiza antes de verter el material en la cuchara de nodulización, como se requiere de 4 cucharas para vaciar el horno entonces se toman 4 muestras.

El análisis del material base debe realizarse en modo carbono usando copas con telurio. En este punto se busca conocer la composición del material para posteriormente corregirla con el afino. Con el equipo se obtienen datos de carbono y temperatura eutéctica metaestable TS. Las muestras tomadas en este punto llevan la numeración de la colada y las letras MB para indicar que se trata del metal base. Ejemplo: A-124-35-23 MB.

Luego se toman muestras del metal ya afinado, para esto se usa el modo microestructura con copas sin telurio. Los datos con principal relevancia que se obtienen en este punto son de la temperatura eutéctica baja TEU. Las muestras llevan la codificación de la colada y se agrega la letra H que indica que son tomadas en el horno y un número del 1-4 que indica antes de cuál de las cucharas fue tomada. Ejemplo: A-124-35-23 H 3.

Estos parámetros permiten determinar el potencial de nucleación del material.

Análisis del proceso completo

Para realizar el análisis total del proceso de fusión se tomaron un total de 4 muestras. La primera se toma del metal base, la segunda luego del proceso de afino, la tercera en la cuchara luego del proceso de nodulización el material y la última en la cuchara de transporte después del proceso de inoculación. Las muestras de metal base llevan la misma codificación indicada antes. Para las muestras que se toman después del resto de procesos se sigue las siguientes indicaciones.

- Tomar una muestra por colada luego del afino, una luego de la nodulización y una luego de la inoculación.
- La muestra del horno se toma antes del primer vertido en la cuchara, se la identifica con el código de la colada y la letra H.
- La muestra de la cuchara de nodulización se toma luego del proceso de nodulización en el segundo proceso de vertido, se identifica con el código de colada y la letra N al final.
- La última muestra se toma luego de la inoculación en el tercer proceso de vertido, la muestra se identifica con el código de colada y la letra T al final.

El objetivo es continuar con el control del potencial de nucleación del material del horno, pero además se busca controlar el módulo de solidificación en la cuchara de nodulización y en el horno y controlar la recalcencia en la cuchara de transporte.

2.4 Análisis de datos

Descarga de datos

El equipo Carbomax Delta tiene una memoria interna que permite el almacenamiento de gran cantidad de datos. Para acceder a esta información es necesario establecer una conexión mediante un cable ethernet hacia una computadora. La computadora debe tener instalado el software Extractor Carbomax. Este programa permite obtener los datos en formato pdf y csv (Figura 31).

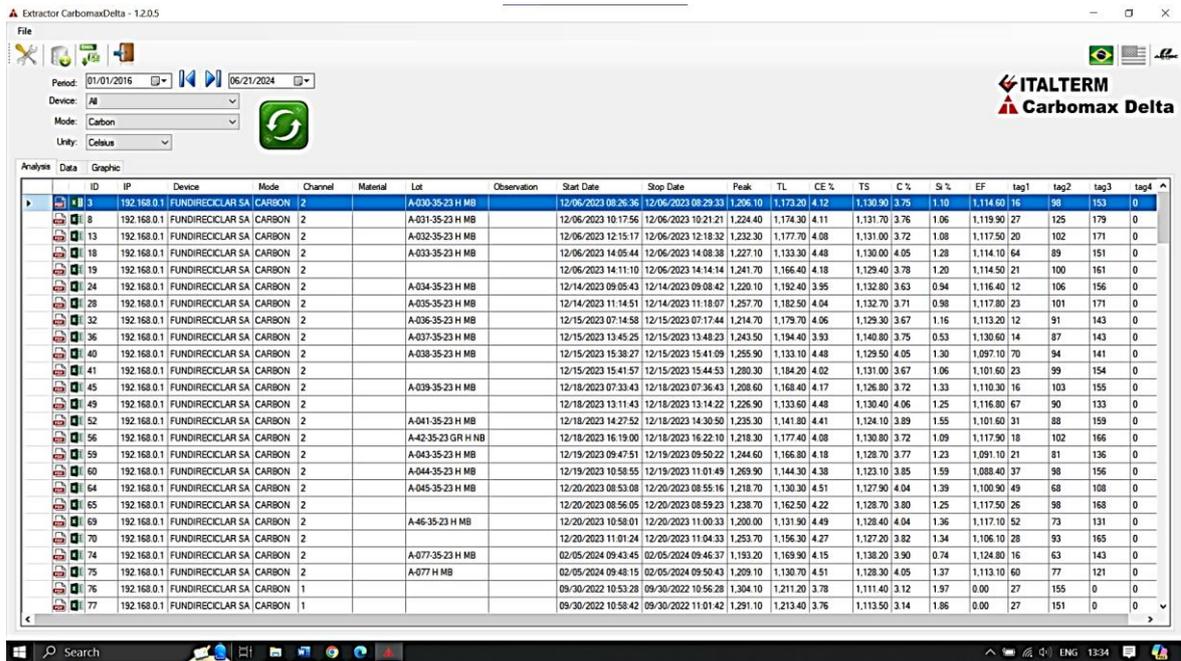


Figura 31 Interfase Software Extractor Carbomax Delta

Análisis estadístico e interpretación

Para el análisis del horno se realiza una comparativa entre los datos obtenidos de una misma colada para determinar si el estado físico del material en el horno cambia con el tiempo. Del mismo modo se analiza la variación de los resultados obtenidos entre las diferentes coladas producidas con la finalidad de determinar si el proceso en este punto es estable.

Para el análisis del proceso completo se analizan las curvas obtenidas para determinar y comparar los diferentes fenómenos físicos que ocurren durante los procesos a los que se somete el material. Primero se analiza el decaimiento del potencial de nucleación del material al ser sometido al proceso de nucleación. También se verifica el módulo de solidificación y finalmente en la cuchara de inoculación se analiza la recalcificación del material.

Con los resultados de los análisis se procede a interpretarlos y correlacionar las variables físicas del material con los datos de composición química tanto de afino como del producto final y los resultados de los ensayos de tracción. También se analiza la relación que existe entre los datos de análisis térmico con análisis metalográficos.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1. ANÁLISIS MATERIAL HORNO

3.1.1.1. Potencial de nucleación horno

Se determina el potencial de nucleación midiendo la temperatura metaestable TS del metal base y la temperatura TEU de las muestras luego del proceso de afino. El potencial de nucleación es el resultado de la diferencia entre estas temperaturas. La Figura 32 muestra el comportamiento de esta propiedad. La nomenclatura “Nuc H (1-4)” indica que se mide el potencial de nucleación del material en el horno y el número de muestra.

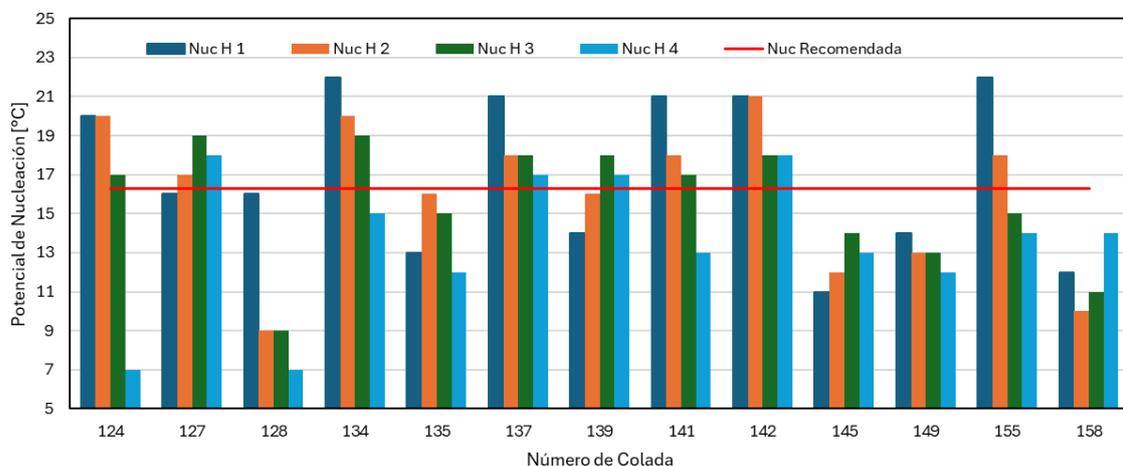


Figura 32 Comportamiento del Potencial de nucleación en Horno

En la Figura 32 se observa que el Potencial de Nucleación no es estable en el proceso productivo, es diferente entre muestras de una misma colada y muestras de distintas coladas. En la mayoría de los casos se ve que el potencial tiende a disminuir en muestras de la misma colada, esto indica que el tiempo de estadía del material en el horno influye en la calidad de esta propiedad. Se ha tomado como referencia de calidad un potencial de nucleación de 16 °C el cual es la media de los resultados obtenidos. Se ve que las muestras de la última cuchara tienden a estar por debajo de este valor, por otro lado, las muestras de la primera cuchara tienden a superar la referencia establecida. Este comportamiento se debe al efecto fading, lo que indica que el inoculante disminuye su eficacia con el tiempo de espera y por lo tanto el carbono pierde su capacidad de agruparse en grafito [19].

3.1.1.2. Módulo de solidificación horno

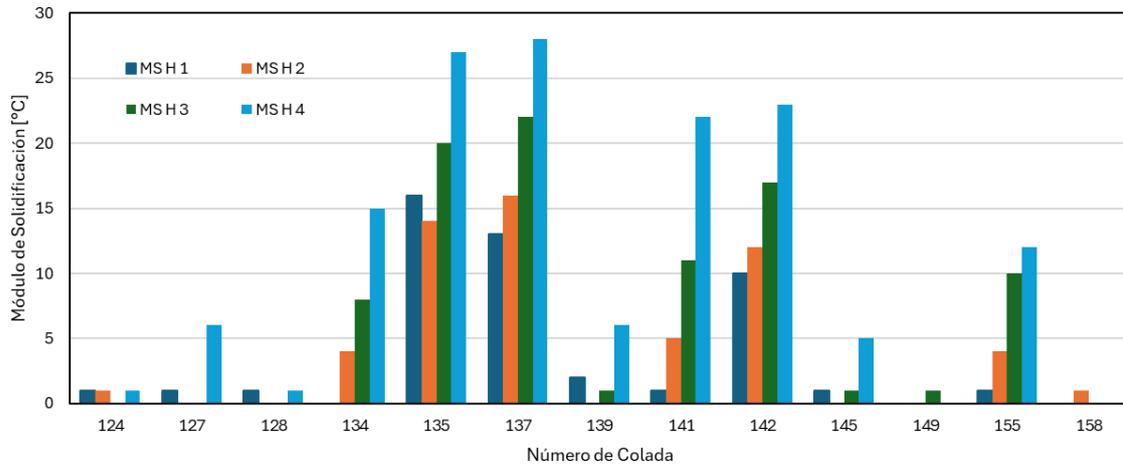


Figura 33 Comportamiento del Módulo de Solidificación en Horno

En la Figura 33 se aprecia una alta variabilidad de los resultados. Se ve que aquellas muestras que tienen un módulo bajo, es decir, trabajan cercanas al punto eutéctico, tienden a mantener este comportamiento entre cucharas. Por otro lado, cuando el módulo de solidificación en la primera cuchara es alto, este tiende a seguir aumentando en las cucharas siguientes. Esto corrobora el comportamiento del potencial de nucleación, ya que el carbono tiende a perderse y por ende el material se aleja del punto eutéctico.

No es deseable tener un material con comportamiento completamente eutéctico en el horno ya que en los procesos de nodulización e inoculación se agregan compuestos de silicio que aumentan el carbono equivalente provocando que la aleación sea clasificada como hiper eutéctica. Una aleación hiper eutéctica no sería deseable ya que al momento de la solidificación se presentarían formaciones de grafito primario el cual no tiene la forma adecuada de nódulo. Se ha encontrado que una nucleación demasiado alta promueve la formación de este grafito primario. [22] Además, trabajar con material hiper eutéctico aumenta el riesgo de generar rechupes debido a que se favorece la formación de carburos libres. [14]

3.1.2. ANÁLISIS PROCESO COMPLETO

Para analizar el proceso completo se separa las 3 variables físicas principales que tienen influencia en la calidad del material. Primero se estudia el comportamiento del potencial de nucleación y posteriormente el módulo de solidificación tanto en horno como en cuchara de nodulización. Finalmente, se analiza la recalcificación luego del proceso de inoculación.

3.1.2.1. Potencial de nucleación durante el proceso

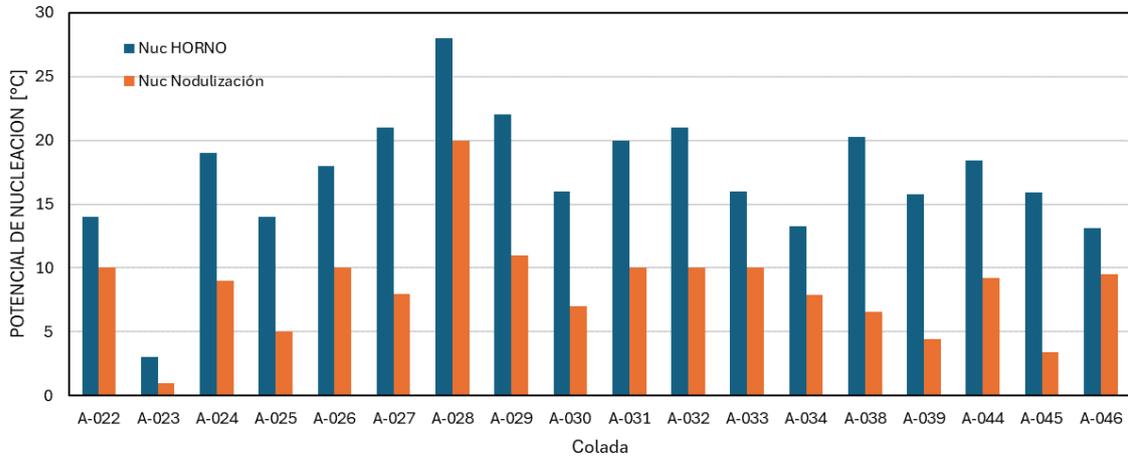


Figura 34 Potencial de nucleación en Horno y cuchara de Nodulización

En la Figura 34 se ve que el potencial de nucleación disminuye al pasar el material del horno a la cuchara de nodulización. Es importante considerar los efectos analizados anteriormente, es decir, la caída de potencial de nucleación con el tiempo. Las cucharas finales podrían tener un potencial de nucleación muy bajo en la cuchara de nodulización.

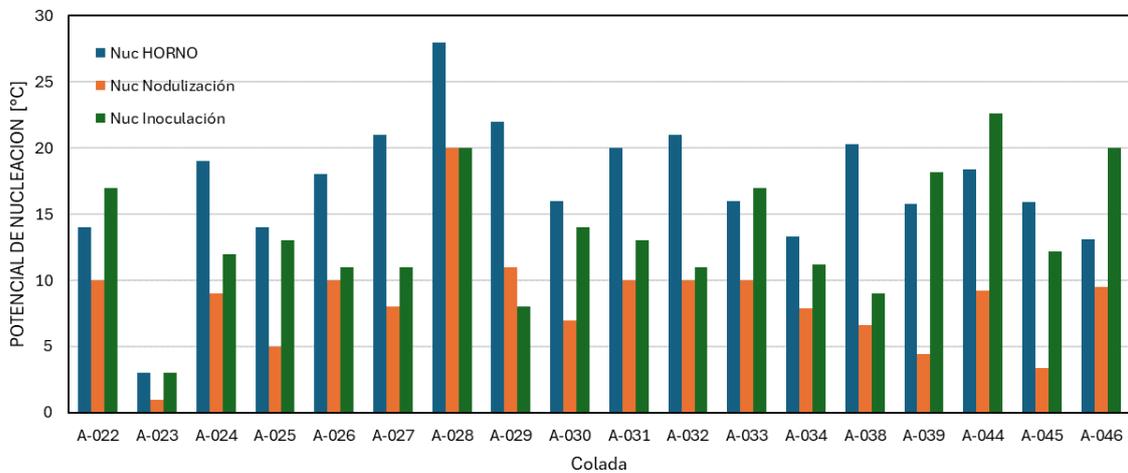


Figura 35 Potencial de nucleación Horno y cucharas de nodulización e inoculación

La figura 35 evidencia el efecto que tiene el inoculante sobre el potencial de nucleación. Se aprecia como el potencial de nucleación del material tiende a aumentar una vez que es tratado con inoculante. Es importante destacar que el proceso de inoculación hace que el potencial de nucleación aumente considerablemente luego de la abrupta pérdida que se da durante el proceso de nodulización. También se ve que en algunos casos el efecto incluso llega a superar al obtenido en el horno.

3.1.2.2. Módulo de solidificación durante el proceso

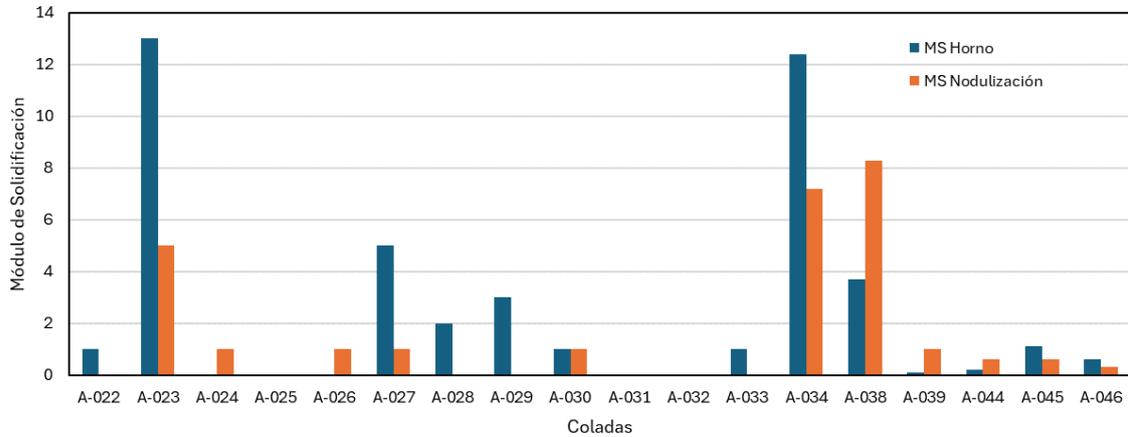


Figura 36 Módulo de Solidificación en horno y cuchara de nodulización

La figura 36 muestra cómo cambia el comportamiento eutéctico del material. Aquellas coladas que inicialmente están hipo eutécticas luego tienden a estar eutécticas o hiper eutécticas. Se corrobora que el comportamiento eutéctico es dinámico y debe predecirse para poder alcanzar el comportamiento deseado en el momento deseado del proceso productivo.

3.1.2.3. Recalescencia proceso

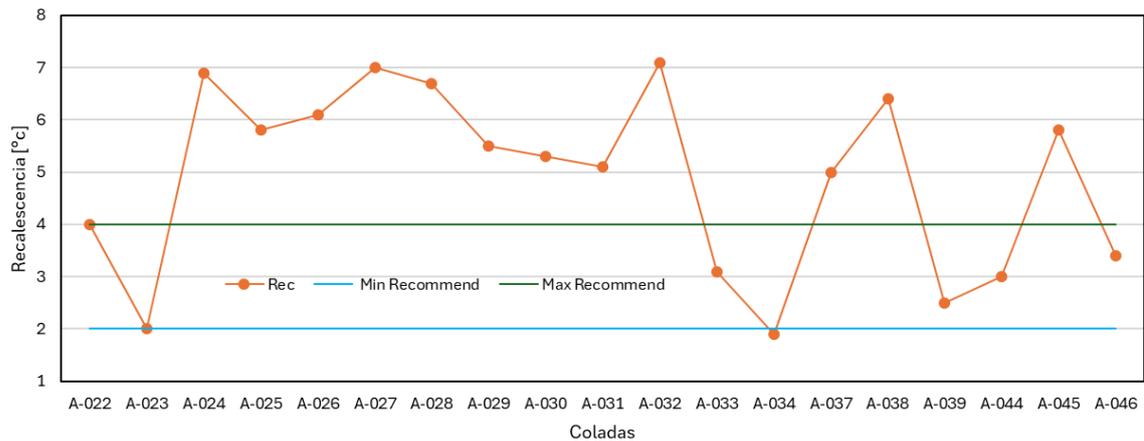


Figura 37 Valores de recalescencia en diferentes muestras

Se ha encontrado que la recalescencia se relaciona inversamente con el conteo de nódulos. Se han establecido límites de control entre 2°C y 4°C [21]. La figura 37 muestra que la mayoría de las muestras tiene una diferencia de temperaturas eutécticas superior al límite superior recomendado. Esto se debe al comportamiento metalúrgico del material.

Cuando la colada sobrepasa el punto eutéctico tiende a presentar altos valores de recalcificación. Se ha encontrado en investigaciones científicas que una recalcificación baja favorece una mejor forma de los nódulos de la aleación, tal como fue indicado en la Figura 10.

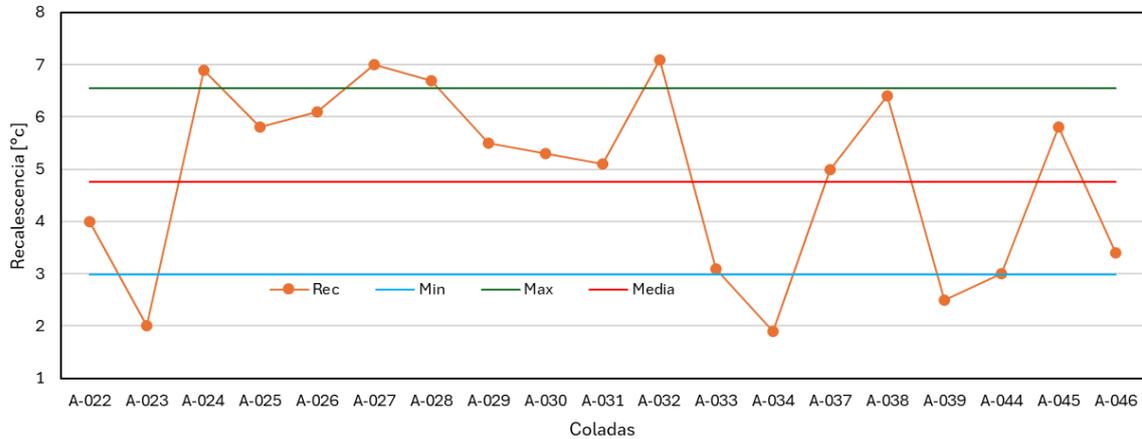


Figura 38 Control estadístico de la recalcificación

También se ha realizado un análisis del comportamiento de este parámetro. Se ha calculado una media de 4,8 °C y una desviación estándar de 1,8 °C. Con estos valores se han establecido límites de control del proceso. La figura 38 muestra que la recalcificación tiende a estar sobre su media la mayoría del tiempo y con ciertas caídas abruptas con varios valores que se encuentran fuera de rango lo que indica que el proceso no se encuentra dentro de control estadístico.

3.1.2.4. Resultados metalográficos

Para determinar la influencia de las propiedades físicas estudiadas mediante análisis térmico se realiza análisis metalográfico a las muestras obtenidas luego del proceso de nodulización. El objetivo es determinar la correlación entre propiedades como la nodularidad y el conteo de nódulos. De las muestras analizadas se deja de lado los valores atípicos que pueden distorsionar la interpretación de los resultados. En el anexo I se muestra un ejemplo de los resultados emitidos en el informe metalográfico emitido por el Laboratorio de Metalografía y Desgaste y Falla de la EPN.

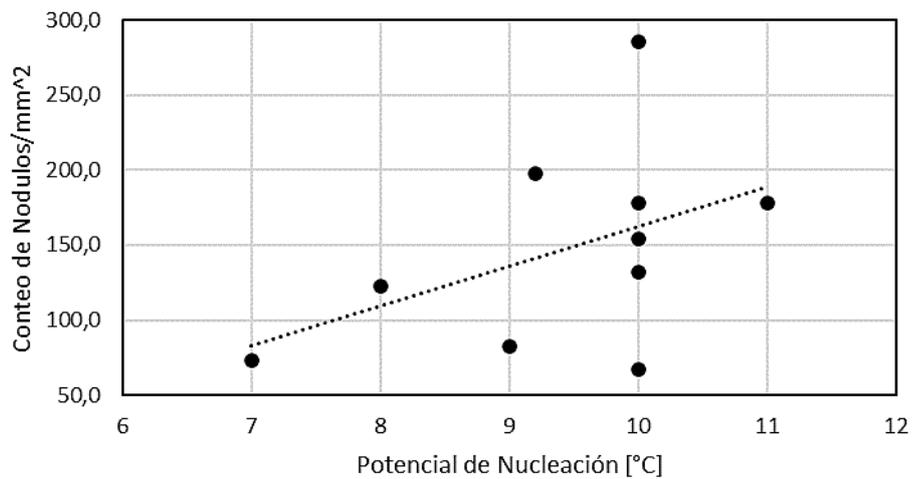


Figura 39 Relación Potencial de Nucleación vs Conteo de Nódulos

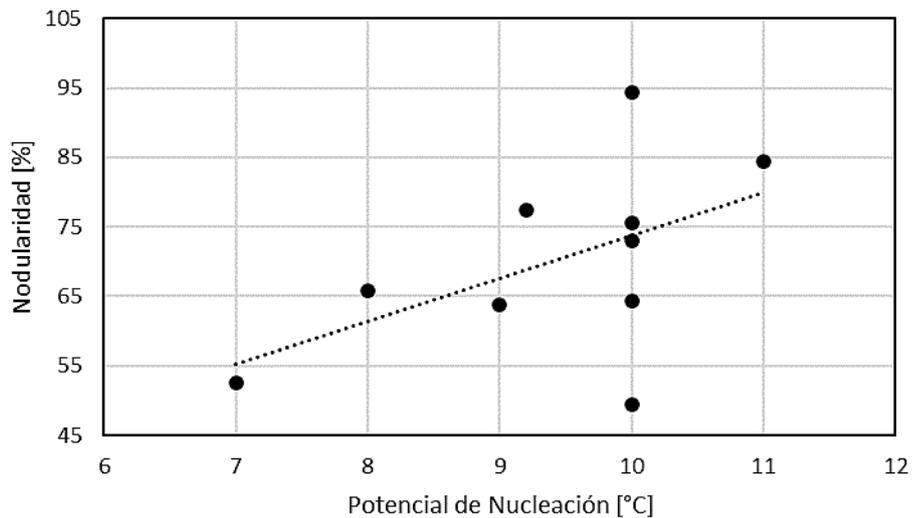


Figura 40 Relación Potencial de Nucleación vs Nodularidad

El conteo de nódulos está estrechamente relacionado con el porcentaje de nodularidad. En la Figura 39 y Figura 40 se puede ver como el potencial de nucleación afecta directamente a estas dos propiedades. Se aprecia una relación directa, es decir, la nodularidad y el conteo de nódulos aumenta cuando el potencial de nucleación también lo hace, de aquí la importancia de implementar técnicas que aseguren el nivel de nucleación del material durante todo el proceso productivo.

Con la finalidad de comprobar la relación de los tres parámetros físicos estudiados y compararlos con las propiedades del material final, se ha propuesto un coeficiente que

combina tanto el potencial de nucleación, módulo de solidificación y recaescencia de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Coef = \frac{MS + \frac{Rec}{10}}{PN}$$

Ecuación 9: Coeficiente de análisis térmico

Donde: MS es el módulo de Solidificación, Rec es la recaescencia y PN es el potencial de nucleación.

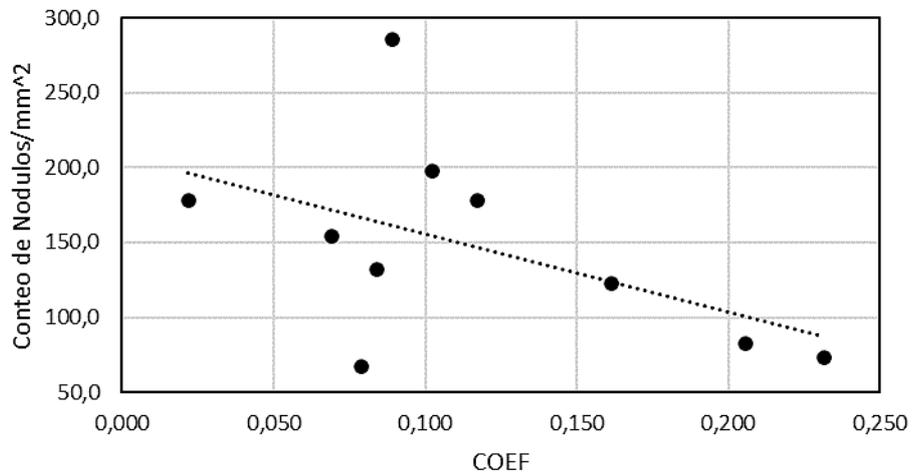


Figura 41 Coeficiente vs Conteo de nódulos

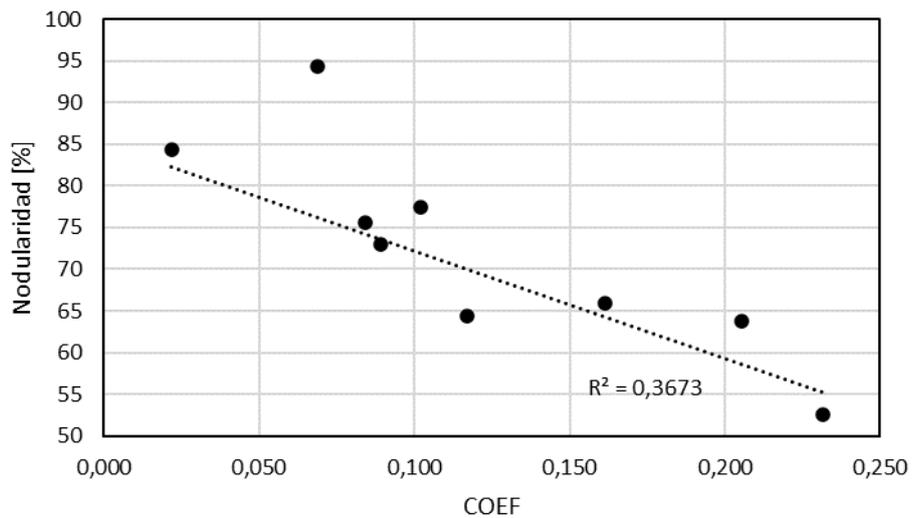


Figura 42 Coeficiente vs Nodularidad

En la Figura 41 y Figura 42 se puede ver que el comportamiento del coeficiente propuesto tiene una relación inversa con las propiedades de nodularidad y conteo de nódulos. Esto es lógico ya que se ha puesto el potencial de nucleación como denominador en la fórmula y las muestras con valor alto de esta propiedad tienden a tener mayor nodularidad y conteo, del mismo modo las muestras que tienen baja recalcencia y módulo de solidificación tienen mejores valores de las propiedades mencionadas. En la figura 42 se aprecia que la correlación entre la nodularidad y el coeficiente es bastante clara. Se ha calculado un factor de correlación R cuadrado igual 0,3673.

3.2 Conclusiones

- Se identifica que el potencial de nucleación tiende a disminuir considerablemente con el paso del tiempo, esto es resultado del efecto fading durante el proceso productivo, por lo tanto, es importante controlar el tiempo de espera del material.
- El módulo de solidificación medido en el horno presenta una alta variabilidad, mostrando que varias coladas se encuentran completamente eutécticas mientras que otras se alejan de comportamiento eutéctico. Esto indica que se requiere ajustar de manera más precisa el cálculo de carga para asegurar alcanzar el comportamiento eutéctico del material. Del mismo modo se encontró que el módulo de solidificación cambia luego del proceso de nodulización, esto es debido a la adición de ferroaleaciones, por lo tanto, es necesario considerar estas adiciones en el cálculo de cargas.
- Se ha encontrado que la recalcencia medida es relativamente alta. Esto se debe a que la solidificación del material no es completamente eutéctica, de hecho, se ha identificado que el material producido en la empresa se encuentra hiper eutéctico en la mayoría de los casos. Por lo tanto, existe la oportunidad de reducir el uso de inoculante para de este modo reducir el carbono equivalente final lo que beneficia la calidad del producto ya que evita la formación de rechupes, generación de grafito primario y carburos, además de la subsecuente reducción de costos.
- Se encontró que la propiedad física que mayor efecto tiene sobre las propiedades mecánicas del material es el potencial de nucleación ya que este influye directamente a la nodularidad y el conteo de nódulos. La resistencia a la fluencia y tracción se relacionan directamente con la nodularidad y el conteo de nódulos, por lo tanto, es importante controlar el potencial de nucleación. Las mediciones indican que la empresa tiende a presentar valores adecuados de potencial de nucleación,

sin embargo, no considera su decaimiento con el paso del tiempo. Para lograr aumentar el potencial se debe agregar elementos inoculantes tales como el silicio.

- Aplicando el coeficiente que combina el comportamiento de las propiedades se confirma que el material tiene una mejor nodularidad cuando el módulo de solidificación y la recalcencia son lo más bajos posibles y el potencial de nucleación es alto. Se ha calculado un coeficiente de correlación R cuadrado igual 0,3673 lo cual indica la importancia de controlar estos tres parámetros físicos medidos gracias al análisis térmico.
- Se ha implementado el procedimiento DP-AD-13 (nomenclatura interna de la empresa) con la finalidad de dar directrices de cómo y cuándo se deben tomar las muestras de análisis térmico. También cubre aspectos como la operación del equipo y la descarga de datos. Finalmente, tiene indicaciones de las acciones correctivas a tomar en caso de reconocer desviaciones como potencial de nucleación bajo, recalcencia alta o módulo de solidificación alto. Este procedimiento se encuentra en el anexo II.

3.3 Recomendaciones

El proceso productivo presenta una alta presencia de variaciones que no han sido consideradas en sus procedimientos, esto puede afectar los resultados de las acciones tomadas basadas en la información obtenida mediante análisis térmico, por lo tanto, es recomendable estandarizar el proceso para asegurar una mejor repetitividad.

Se recomienda continuar con la toma de muestras de análisis térmico, ya que esto facilitaría el corroborar los resultados actuales e igualmente identificar el resultado de una estandarización del proceso y la subsecuente toma de acciones correctivas. La empresa usa retornos del proceso de producción para alimentar la parte de la carga del horno. Es necesario tener en cuenta esto ya que las acciones tomadas mediante análisis térmico pueden afectar a producciones posteriores y generar efectos indeseados.

Para el presente trabajo se realizaron 104 experimentos para el estudio del material en el horno y 100 para el estudio del comportamiento del material durante el proceso completo, siendo en total 204 experimentos de los cuales se estima que solo el 70% fueron usados para los análisis de este estudio, por lo que tomando en cuenta un nivel de confianza de 95% y un error de estimación mínimo aceptado de 3% se calcula que con una muestra de 896 experimentos se podría obtener un análisis de los datos más completo.

Debido a la alta recalescencia que presenta el material producido en la empresa, se recomienda la reducción de la cantidad de inoculante utilizado. Se conoce que se usa 3,2 kg por colada (0,8 kg/cuchara) con un costo de \$9,86 por colada (2,47 \$/cuchara). El gasto anual es de \$7690. Suponiendo una mínima reducción de inoculante por cuchara de 0,8 kg a 0,6 kg significaría un ahorro anual de \$1926 aproximadamente. Hay que considerar que la reducción de inoculante podría ser mayor. Cualquier ajuste al procedimiento debe sustentarse con un cálculo de carga que tenga como objetivo alcanzar el punto eutéctico en la pieza.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

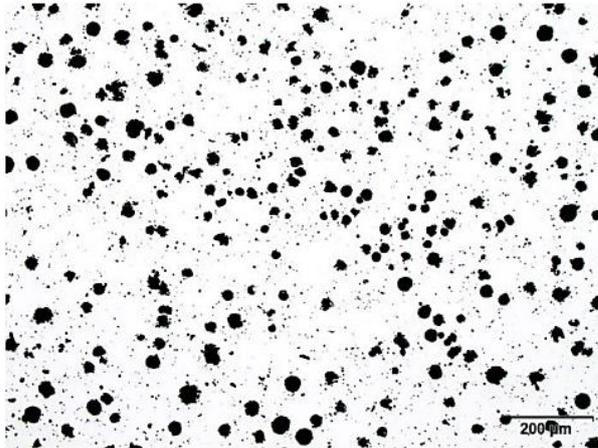
- [1] O. M. Olea, *Estudio del efecto de la densidad de nódulos sobre las propiedades mecánicas del hierro dúctil*, Mexico D. F., 2010.
- [2] W. Smith y J. Hashemi, *Foundations of material science and engineering*, New York: Mc Graw Hill, 2019.
- [3] A. International, «Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings,» *ASTM*, 2019.
- [4] A. International, «Standard Test Method for Determining Nodularity And Nodule Count In Ductile Iron Using Image Analysis,» *ASTM*, 2023.
- [5] E. Colin Garcia, A. Cruz Ramirez, J. A. Romero Serrano, R. G. Sanchez alvarado , V. H. Gutierrez Perez y G. Reyes Castellanos, «Nodule Count Effect on Microestructure and Mechanical Properties of Hypo-Eutectic ADI Alloyed with Nickel,» *Journal of Mining and Metallurgy*, vol. 57, nº 1, pp. 115-124, 2021.
- [6] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, Iowa: John Wiley & Sons, INC., 1940.
- [7] «Eisen-Kohlenstoff-Diagramm,» [En línea]. Available: https://www.chemie.de/lexikon/Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.html#Darstellung_der_Phasen_im_Eisen-Kohlenstoff-Diagramm. [Último acceso: 06 05 2024].
- [8] A. F. S. Inc., *Ductile Iron Handbook*, Illinois, 1993.
- [9] R. Sillen, «Finding the True Eutectic Point-An essential task for efficient process control of ductile iron,» *American Foundry Society/Ductile Iron Society*, vol. 1, pp. 100-104, 2008.
- [10] S. G. I., «Carbon equivalents of elements in cast iron,» *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 44, nº 1, pp. 26-29, 2002.
- [11] V. E. Bazhenov y M. V. Pikunov, «Determinig the Carbon Equivalent of Cast Iron by the Thermo-Calc Program,» *Steel in translation*, vol. 41, nº 11, pp. 896-899, 2011.
- [12] S. Lekakh, V. Richards y K. Peaslee, «Thermo-Chemistry of non-metallic inclusions in ductile iron,» *International Journal of Metalcasting*, vol. 9, pp. 25-37, 2009.
- [13] J. O. Olawale, S. A. Ibitoye y K. M. Oluwasegun, «Processing Techniques and Productions of Ductile Iron: A Review,» *International Journal of Scientific & Ingeniering Research*, vol. 7, nº 9, pp. 397-423, 2016.
- [14] E. L. Neacsu, I. Riposan, A. M. Cojocar, S. Stan y I. Stan, «Carbide to Graphite transition control by Thermal Analysis in grey cast irons,» *Metals*, vol. 10, nº 993, pp. 1-18, 2020.
- [15] D. M. Stefanescu, R. Suarez y S. Bin Kim, «90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron,» *China Foundry*, vol. 17, nº 2, pp. 69-84, 2020.

- [16] D. M. Stefanescu, «Thermal Analysis-Theory and applications in metalcasting,» *International Journal of metalcasting*, vol. 9, nº 1, 2015.
- [17] H. Fredriksson y D. M. Stefanescu, «Principles of thermal analysis,» *ASM Handbook*, vol. 1, pp. 81-87, 2017.
- [18] R. Bueno, *Análisis Térmico de Solidificación en la producción de hierro fundido*, Italterm, 2023.
- [19] M. I. Oinsoien, O. Grong, O. Gundersen y T. Skaland, «A process Model for the Microstructure Evolution in Ductile Cast Iron,» *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 30, pp. 1053-1068, 1999.
- [20] H. Machado Gonzáles, P. Pérez Espitia y R. Aristizábal Sierra, «Fading and graphite nucleation sites in grey iron inoculated using silicon carbide,» *Revista MAteria*, vol. 22, nº 2, 2017.
- [21] M. Nadeem Bhat, D. M. Afzal Khan y K. K. Singh, «Speed of recalescence as a measure of graphite nucleation in spheroidal graphite cast irons,» *International Journal of Metalcasting*, 2020.
- [22] J. Lacaze, N. Valle, K. Theuwissen, J. Sertucha, B. El Adib y L. Laffont, «Redistribution and effect of various elements on the morphology of primary graphite in Cast iron,» *Advances in Materials and Engineering*, pp. 1-9, 2013.
- [23] D. R. Askeland y W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Cengage Learning Editores, 2016.

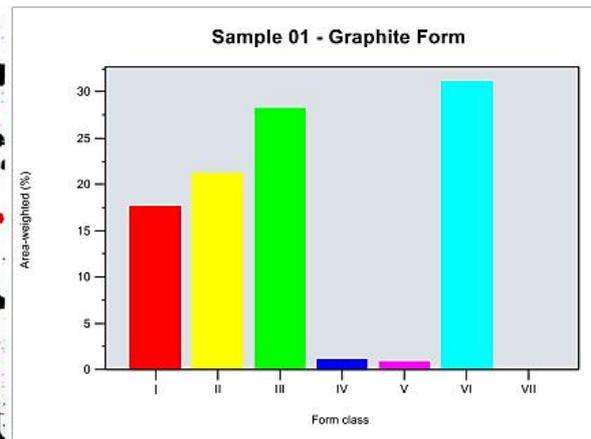
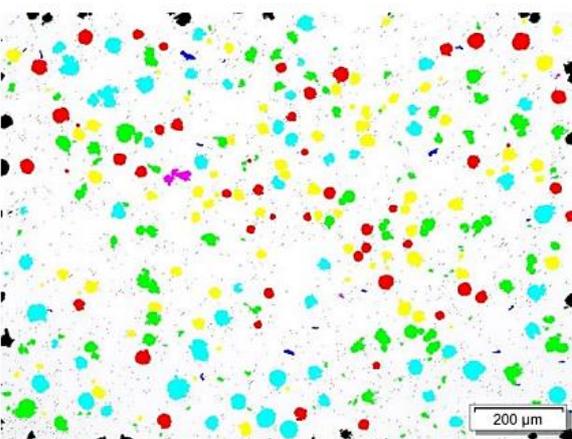
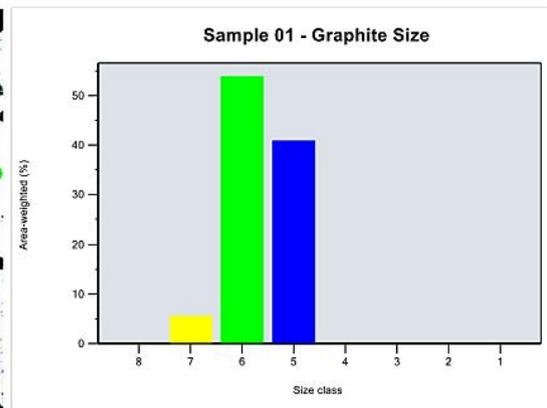
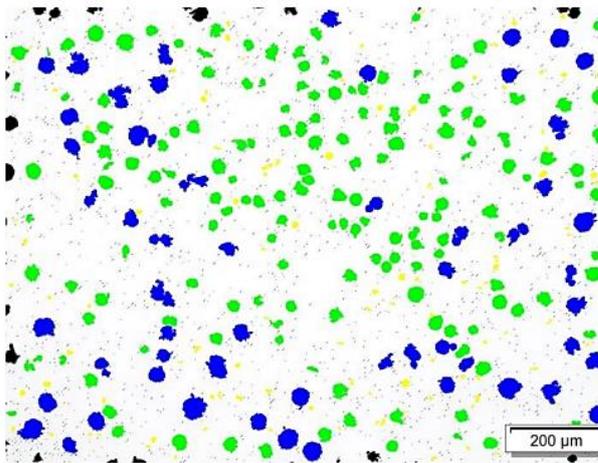
5 ANEXOS

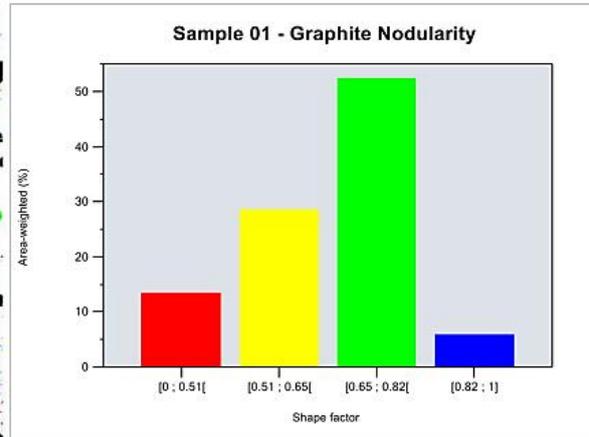
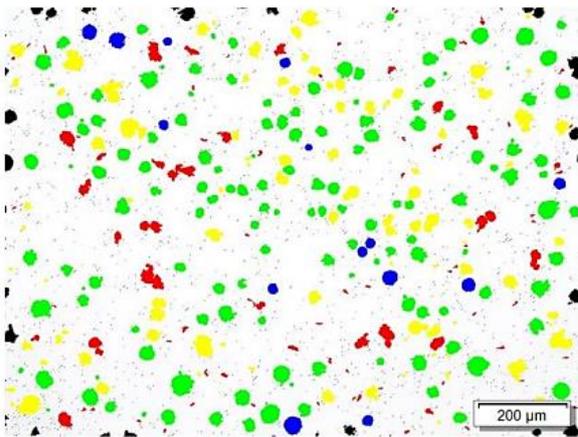
ANEXO I

EJEMPLO RESULTADOS METALOGRAFICOS

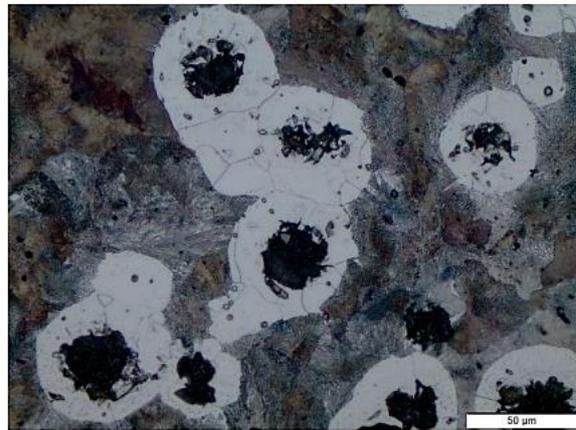
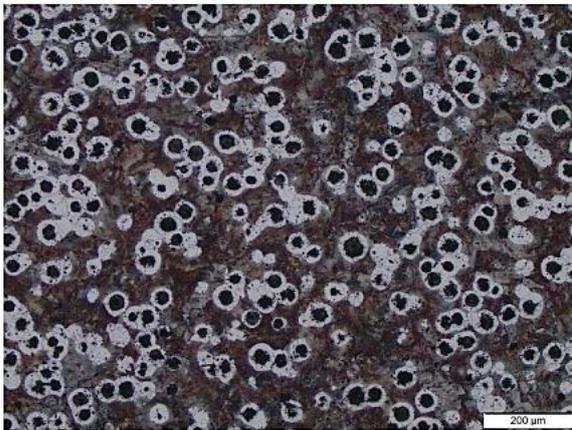


Total Number of Images	1
Total Sample Area	1.29 mm ²
Unetched Sample Area	1.29 mm ²
Graphite Fraction	14.8 %
Graphite Size	6
Graphite Form	III(39%) II(28%) VI(18%) I(16%)
Nodularity by Area (ASTM E2567)	87.0 %
Nodularity by Count (ASTM E2567)	76.1 %
Particles per mm ²	260.673
Nodular particles per mm ²	105.047





La fundición nodular es de tipo ferrítico - perlítica:



El mapeo de fases presentes en la fundición nodular analizada tiene una distribución correspondiente a:

Ferrita: 21 %.

Perlita: 79 %.

ANEXO II

PROCEDIMIENTO PARA ANALISIS TERMICO SEGUN FORMATO FUNDIRECICLAR SA

	PROCEDIMIENTO PARA DESCARGA DE DATOS DE CARBOMAX	CÓDIGO: DP-AD-13
		VERSIÓN: 01
		Página 45 de 62

1. OBJETIVO

Definir una metodología para hacer análisis térmico y obtener las curvas de enfriamiento con el equipo Carbomax Delta del material producido en FUNDIRECICLAR S.A.

2. APLICACIÓN

Este procedimiento es de aplicación interna y debe cumplirse de acuerdo con lo indicado en el mismo.

Este procedimiento cubre la toma de muestras, ensayo y descarga de datos del equipo Carbomax Delta.

Este procedimiento está escrito con base al manual del equipo Carbomax Delta indicado por Italterm.

3. RESPONSABLES

Tesista: Persona que va a ejecutar este procedimiento.

Asistente del Sistema de Gestión Integrado: Divulgar y hacer cumplir el contenido de este procedimiento.

4. DESCRIPCIÓN

4.1 Definiciones

- **Análisis Térmico:** registro e interpretación de la curva de enfriamiento de un material.
- **Curva de enfriamiento:** Grafica que se dibuja a partir de medir el comportamiento de la temperatura de un material a lo largo del tiempo.
- **Nucleación:** formación a través de fluctuaciones térmicas, de partículas pequeñas y estables de una fase nueva.
- **Nodularidad:** se expresa por el conteo de nódulos y reportando el resultado como porcentaje de la cantidad total de grafito presenta en la microestructura.
- **Conteo de Nódulos:** se expresa como la cantidad de grafito (nódulos/mm²) y se lo cuenta con una ampliación de 100X.

4.2. Equipos, materiales y requisitos

4.2.1 Carbomax Delta



Figura 1 Carbomax Delta

4.2.1.2 Requisitos

Este instrumento debe cumplir las especificaciones técnicas dadas por el fabricante:

4.2.2 Receptáculo tipo k



Figura 2 Receptáculo de copas

4.2.2.1 Requisitos

El instrumento debe tener protección de los circuitos internos y el cable debe estar protegido con material aislante.

4.2.3 Copas para análisis térmico



Figura 3 Copas de arena con y sin telurio

4.2.3.1 Requisitos

Las copas deben ser fabricadas con arena a base de silicio y tener dimensiones uniformes. Se emplean copas con telurio para analizar composición química y copas sin telurio para analizar microestructura.

4.2.4 Cuchara para recolección de muestras

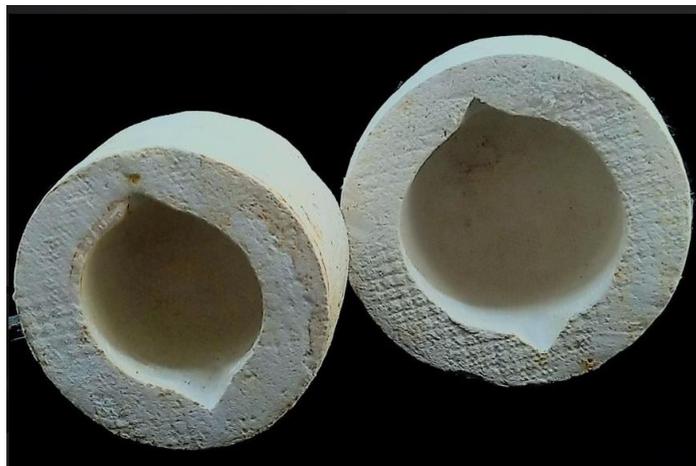


Figura 4 Cuchara refractaria para toma de muestras

4.2.4.1 Requisitos

Debe ser fabricada de material refractario.

4.3. Procedimientos

4.3.1. Análisis térmico Composición:

El equipo Carbomax Delta permite una estimación altamente precisa del contenido de carbono en la colada. También muestra la curva de enfriamiento de la muestra de metal, tanto en la solidificación de hierro metaestable (copa con Telurio) como en estable (copa

sin Telurio). El equipo cuenta con cuatro entradas independientes, dos para medir la condición metaestable (modo Carbono) y dos para medir condición estable (modo Microestructura).

Al encender el equipo Carbomax Delta, se muestra la siguiente pantalla:

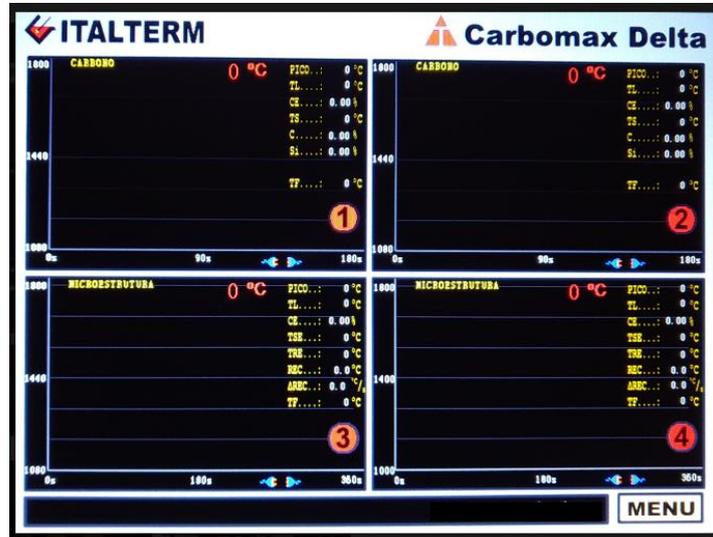


Figura 5 Pantalla de inicio Carbomax delta

Las divisiones superiores corresponden a los canales 1 y 2 que están configurados modo CARBONO, mientras que las divisiones inferiores corresponden a los canales 3 y 4 que están configurados en modo MICROESTRUTURA. Los números que identifican cada canal también son botones que permiten ingresar a su pantalla individual y también sirven como indicadores del estado de trabajo del equipo. Al usar el botón con el número de uno de los canales (canal 1 en este caso) se muestra la siguiente pantalla.

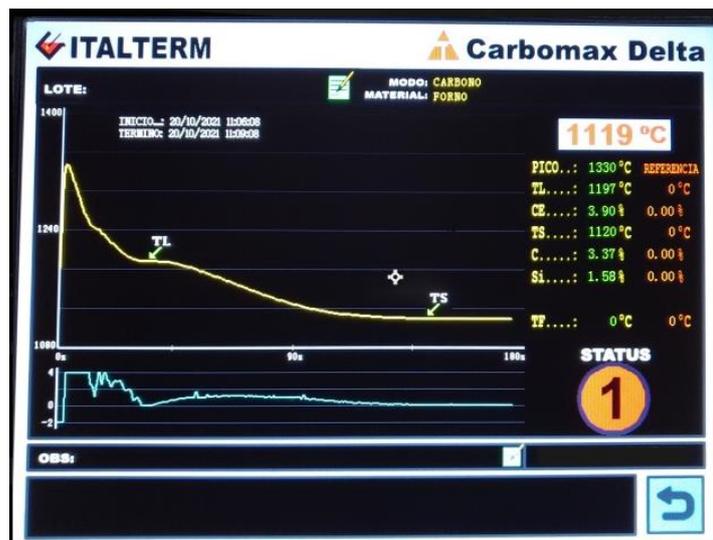


Figura 6 Pantalla de canal 1

En esta pantalla es posible agregar una identificación y observaciones (de ser necesario) para el ensayo que va a realizarse. Para esto se usa el botón . El ícono ubicado en la parte superior es para ingresar una identificación para el ensayo, el de la parte inferior

permite agregar observaciones si es que se necesita.

El número que identifica al canal también sirve como indicador de estatus. Cuando es de color rojo, significa que no hay ninguna conexión en ese canal. Se torna color verde cuando se conecta una copa y es de color amarillo cuando se lleva a cabo un ensayo. Vuelve a ser de color rojo una vez se ha finalizado de dibujar la curva de enfriamiento.

El equipo es capaz de guardar las curvas de los últimos 20 análisis. Para acceder a estos datos se debe seguir el procedimiento descrito en el manual del equipo.

4.3.2. Análisis Térmico Microestructura:

El equipo Carbomax Delta permite analizar composición química con el modo carbono y la microestructura en el modo del mismo nombre. La microestructura se puede medir en el horno para determinar el nivel de nucleación o en la cuchara para medir nodularidad y conteo de nódulos.

1. Encender equipo Carbomax Delta.
2. Colocar la copa sobre el receptáculo K. Para hacer análisis de composición química se debe usar el receptáculo conectado al canal 1 o 2 (modo carbono) y debe ser usada la copa con telurio. Si se requiere analizar microestructura se usa el receptáculo conectado al canal 3 o 4 y se usa la copa si telurio.
3. Identificar el ensayo que va a realizarse. En la pantalla del equipo seleccionar el canal que va a utilizarse, luego elegir el icono de libreta que aparece en la parte superior. Escribir el código de la colada que se va a analizar y agregar la siguiente codificación:
 - a. Letra H para muestras que fueron tomadas en el horno o letra N si se tomaran muestras del material ya inoculado en la cuchara.
 - b. Para los análisis de composición química se coloca el código MB o AF para identificar entre ensayos realizados al metal base o al metal ya afinado.
 - c. Para análisis de microestructura se usa la letra C junto al número que identifica la cuchara de la cual se toma la muestra.

Ejemplos: A-135-34-23 H MB (muestra tomada en el horno para análisis de composición del metal base), A-135-34-23 N C2 (muestra tomada en la segunda cuchara para análisis de microestructura).

4. Tomar la muestra del material y verterlo en la copa de análisis. Las muestras para análisis de composición siempre se las toma del horno. Las muestras para microestructura pueden ser tomadas en el horno antes de verter el material en las cucharas o ya en las cucharas cuando se ha hecho el proceso de inoculación.
5. Aguardar a que la curva de enfriamiento termine de dibujarse. El número del canal que se está usando cambia a color amarillo durante el análisis y se vuelve de color rojo una vez concluye el censo de temperatura.
6. Retirar la copa del receptáculo y apagar el equipo.

4.3.3. Descarga de datos:

El equipo Carbomax delta almacena todos los análisis realizados. Para acceder a las curvas se sigue los siguientes pasos:

1. Conectar el equipo Carbomax Delta a un computador vía ethernet.
2. Ingresar al software "Extractor". En la pantalla inicial se debe elegir el periodo de tiempo del cual se quiere descargar los datos, el equipo del cual se quiere descargar, el modo (análisis de carbono o microestructura) y las unidades de los análisis.

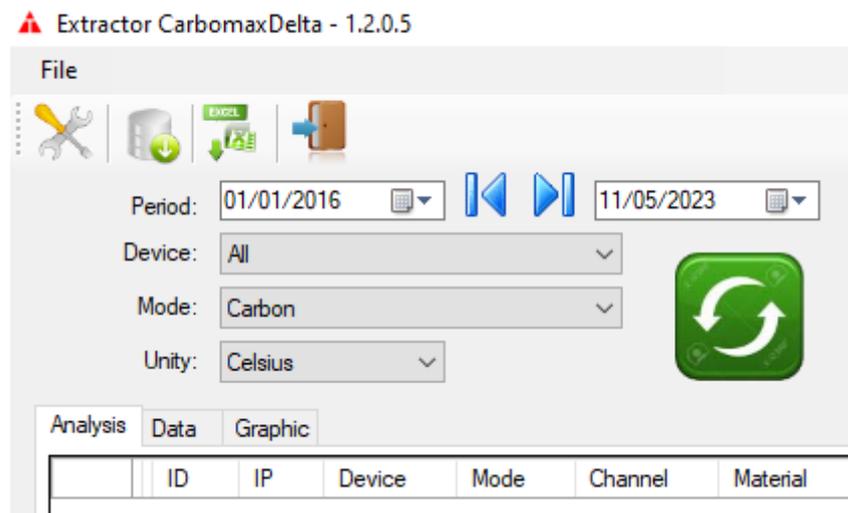


Figura 7 Ajustes software Extractor Carbomax

3. Para descargar se usa el botón . Se muestra la siguiente pantalla.

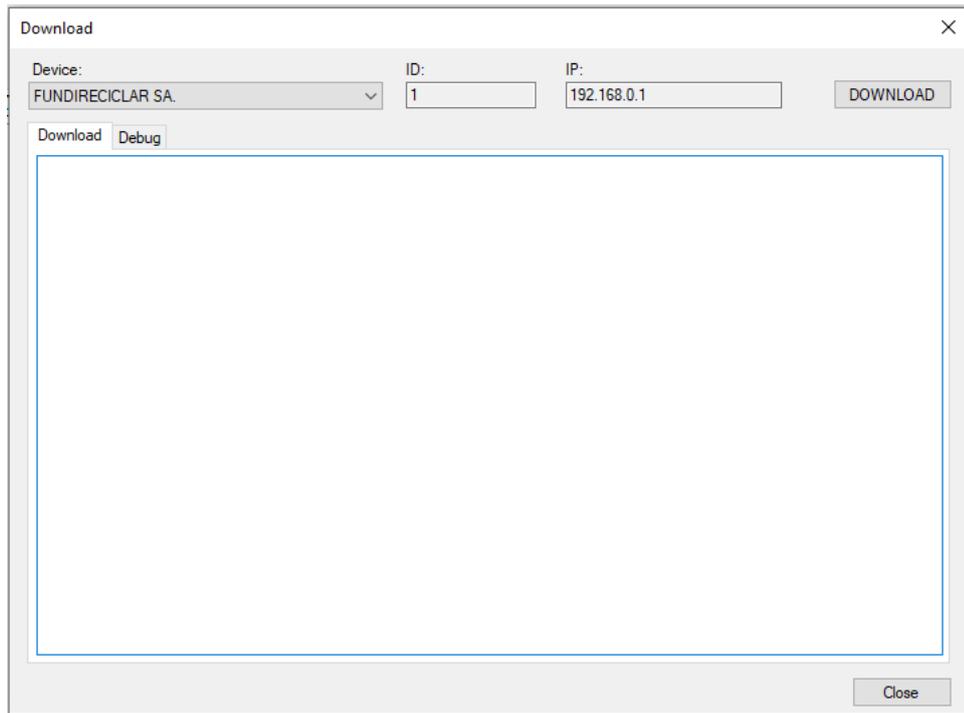


Figura 8 Pantalla de descarga software Extractor Carbomax

Aquí se verifica el nombre del equipo, su ID y dirección IP, entonces se presiona el botón “DOWNLOAD”.

- Al finalizar la descarga aparecerán los datos descargados de la siguiente manera:

Periodo: 01/01/2016 21/10/2023

Equipo: Todos

Modo: Carbono

Unidad: Celsius

ITALTERM
Carbomax Delta

	ID	IP	Equipo	Modo	Canal	Material	Lote	Observación	Dt Inicio	Dt Término	Pico	TL	CE %	TS	C %	S %	TF	tag1	tag2	ta
	6	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				24/06/2022 16:03:30	24/06/2022 16:09:30	1.295.00	1.218.70	3.71	1.124.30	3.28	1.29	0.00	24	115	0
	7	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				24/06/2022 16:09:36	24/06/2022 16:09:36	1.308.10	1.216.60	3.73	1.116.80	3.16	1.70	0.00	25	137	0
	8	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				24/06/2022 18:38:56	24/06/2022 18:41:56	1.832.20	1.812.80	-1.64	0.00	-20.47	56.50	0.00	8	0	0
	9	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				29/06/2022 18:53:33	29/06/2022 18:56:33	1.844.40	1.828.30	-1.78	0.00	-20.60	56.45	0.00	43	0	0
	10	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				01/07/2022 17:30:38	01/07/2022 17:32:17	1.860.70	0.00	14.71	0.00	-6.05	62.29	0.00	0	0	0
	11	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				04/07/2022 18:54:40	04/07/2022 18:57:02	1.835.30	0.00	14.71	0.00	-6.05	62.29	0.00	0	0	0
	12	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				18/07/2022 14:21:29	18/07/2022 14:24:29	1.309.40	1.216.90	3.73	1.116.80	3.17	1.68	0.00	28	154	0
	13	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1				24/06/2022 14:10:00	24/06/2022 14:13:00	1.294.50	1.217.20	3.72	1.116.20	3.15	1.71	0.00	23	143	0
	14	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	2				24/06/2022 14:14:04	24/06/2022 14:17:04	1.295.20	1.217.70	3.72	1.116.50	3.15	1.69	0.00	24	143	0
	17	192.168.0.1	DELTA	CARBONO	1		FORNO 05	CORRIDA 855	30/06/2022 10:11:47	30/06/2022 10:14:47	1.349.60	1.194.60	3.93	1.125.70	3.49	1.30	0.00	47	155	0

Figura 9 Pantalla de archivos descargados

En esta pantalla es posible descargar los datos en formato PDF o Excel.

4.3.3. Análisis de resultados

Se deben registrar los datos obtenidos en la hoja de Excel “Registro Análisis térmico”, en este archivo se generan las respectivas graficas de control.

Control del proceso

A partir de los datos se establece las siguientes estrategias para ajustar el comportamiento del material.

Potencial de Nucleación

Se debe verificar que se encuentre dentro del rango de 16 ± 4 °C. Si el potencial medido en el horno se encuentra por debajo de estos rangos indica que el material requiere de un proceso de inoculación más fuerte, es decir, se requiere aumentar la cantidad de inoculante.

Módulo de solidificación

Se busca que su valor sea cero en muestras medidas en la cuchara de transporte (luego de la inoculación). Si el valor está por encima del cero se requiere ajustar el cálculo de carga ya que se puede estar incurriendo en exceso de grafito o ferroaleaciones.

Recalescencia

La recalescencia debe estar dentro de un rango de 1 a 4 °C. si se encuentra fuera de estos rangos significa que el material es hiper eutéctico. Para contrarrestar este efecto se debe ajustar el cálculo de carga y/o reducir la cantidad de inoculante usado.

5. DOCUMENTOS ASOCIADOS

Código	Descripción
-	-

6. CONTROL DE CAMBIOS

N° Revisión	Descripción de los Cambios	Página	Fecha (aaaa-mm-dd)	Responsable
1	Creación del Documento	todas	2024-07-15	Tesista

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Italterm. "catálogo Carbomax Delta" 2022.

DISTRIBUCIÓN: Gerencia General, jefe de Operaciones Senior, Asistente SIG, Asistente de Mantenimiento, presidente y Laboratorista		
REALIZADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Laboratorista	Presidente	Gerente General