



Instituto Superior Minero Metalúrgico



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de

INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Estandarización de los procesos de fabricación de los tramos del árbol central de los Hornos de Reducción de las empresas Cdte. Ernesto Che Guevara y la René Ramos Latour (Nicaro).

AUTOR: Adriel Estrada Favier

TUTORES: M.Sc. Isnel Rodríguez Gonzáles

M.Sc. Rafael Castillo Díaz.

Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Adriel Estrada Favier** autor de este trabajo de Diploma y los tutores M.Sc. Isnel Rodríguez Gonzáles, M.Sc. Rafael Castillo Díaz y el Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Adriel Estrada Favier

M.Sc. Isnel Rodríguez Gonzáles

M.Sc. Rafael Castillo Díaz

Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez



DEDICATORIA

Dedico la culminación de este trabajo a:

- *A nuestro invencible líder de la Revolución Cubana, el compañero Fidel Castro Ruz.*
- *A mis padres, Ana Mercedes Favier del Pozo y Diógenes Estrada Nelson.*
- *A mis compañeros de estudio que me acompañaron siempre en los momentos buenos y malos de mi carrera.*
- *A E. M. B.*

A todos muchas gracias...



AGRADECIMIENTOS

- *Quiero agradecer a la revolución cubana, Fidel, por haberme dado la oportunidad de estudiar y graduarme satisfactoriamente algo que no hubiera sido posible sin la formación profesional con que cuento hoy.*
- *A mis tutores el M.Sc. Rafael Castillo Díaz, el Ing. Ramón Renato Rodríguez Rodríguez y al M.Sc. Isnel Rodríguez Gonzáles.*
- *Al personal de la biblioteca de la Universidad que siempre estuvieron dispuestos a brindarme su ayuda, en especial a Emma, Elisa, Mariela, Mileydis, Dignora, Odet y Margarita.*
- *A mi prima Meglis Rivero Favier por su importante contribución para la búsqueda de la información.*
- *A todas aquellas personas que de una manera u otra supieron darme lo mejor de si para contribuir con el desarrollo de este trabajo.*



PENSAMIENTO

“...soñamos con un mundo, un mundo más justo, un mundo realmente más humano por el cual todos tenemos el deber de luchar. El futuro de ustedes y de los hijos de ustedes será el futuro que esta humanidad sea capaz de construir...”

“Fidel Castro Ruz”



RESUMEN

El tema central del presente trabajo investigativo trata acerca de la estandarización de los procesos de fabricación de los tramos del árbol central de los Hornos de Reducción de las empresas Cdte. Ernesto Che Guevara y la René Ramos Latour (Nicaro). De los mismos se busca una estandarización en cuanto a material se refiere para reducir costos de fabricación y mantenimiento. Después de determinar el material que posee mejores propiedades para la homogenización se da paso a efectuar el proceso de fundición mediante cálculo de la tecnología de moldeo. Se realiza la simulación por el Método de Elementos Finitos utilizando el software ANSYS versión 10.0, para visualizar el proceso de solidificación de la pieza obteniéndose los gráficos y curvas característicos del proceso de solidificación. En los anexos se muestran tablas, dibujos, esquemas y otros aspectos que posibilitan un mejor entendimiento de la temática tratada y finalmente se realizan la valoración técnico-económica y ambiental.



ABSTRACT

The central topic of the present investigative work tries about the standardization of the processes of production of the tracts of the central tree of the Ovens of Reduction of the companies Cdte. Ernesto Che Guevara and the René Fields Latour (Nicaro). Of the same ones a standardization is looked for as for material he/she refers to reduce costs of production and maintenance. After determining the material that possesses better properties for the standardization step it is given to make the foundry process by means of calculation of the technology of I model. He/she is carried out the simulation for the Method of Finite Elements using the software ANSYS version 10.0, to visualize the process of solidification of the piece being obtained the graphics and curved characteristic of the solidification process. In the annexes charts are shown, drawings, outlines and other aspects that facilitate a treated better understanding of the thematic one and finally they are carried out the technician-economic and environmental valuation.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción	1
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Estado del arte y Trabajos precedentes.....	5
1.3 La técnica de los Hornos Metalúrgicos.....	7
1.3.1- Clasificación de los Hornos Metalúrgicos.....	8
1.3.2- Hornos para la Tostación y Secado de materias primas.....	8
1.3.3- Características y funcionamiento de los Hornos de Reducción.....	9
1.3.3.1- Ventajas y desventajas de los Hornos de Soleras Múltiples	12
1.3.3.1.1- Ventajas de los Hornos de Soleras Múltiples	12
1.3.3.1.2- Desventajas de los Hornos de Soleras Múltiples	12
1.4 Características y funcionamiento del árbol central.....	13
1.4.1- Influencia de las altas y bajas temperaturas en los tramos del árbol central.....	14
1.5 Aspectos generales de fundición.....	15
1.5.1- Defectos de la pieza fundida.....	16
1.5.1.1- Tipos de defectos de las piezas fundidas.....	16
1.5.2- Flujo tecnológico del taller de fundición.....	17
1.6 Conclusiones del Capítulo I.....	20
Capítulo II Materiales y Métodos.....	22
2.1 Introducción.....	22
2.2 Material de los tramos.....	22
2.2.1- Influencia de los elementos de la aleación.....	23
2.3 Establecer la tecnología de fundición.....	23
2.3.1- Mezcla autofraguantes para la producción de moldes y machos.....	25
2.3.2.- Materiales usados.....	25
2.3.2.1- Arenas de Moldeo.....	26
2.3.2.2- Mezclas para la producción de los Moldes y Machos.....	27
2.3.2.3- Características de las resinas.....	27
2.3.2.4- Características de los catalizadores.....	28
2.3.2.5- Hornos para la fusión de la aleación	28
2.3.3- Análisis del diseño de la pieza.....	30
2.3.3.1- Calculo de los espesores mínimos.....	30



2.3.4-	Determinación de los orificios a realizarse por fundición.....	31
2.3.5-	Análisis de la contracción de (E).....	31
2.3.6-	Determinar el plano divisor de la plantilla y el molde.....	31
2.3.6.1-	Determinación de la inclinación de la plantilla de fundición.....	32
2.3.7-	Análisis de las sobremedidas de maquinado.....	32
2.3.8-	Determinación de la posición del macho y sus portadas.....	33
2.3.9-	Determinación de las dimensiones de las cajas de moldeo.....	33
2.3.10-	Cálculo y diseño de las mazarotas.....	33
2.3.10.1-	Cálculo del rechupe específico en el hierro fundido.....	34
2.3.10.2-	Cálculo del número de mazarotas	34
2.3.10.3-	Método de los módulos.....	35
2.3.10.4-	Cálculo del volumen de la mazarota y pieza	36
2.3.10.5-	Cálculo de las dimensiones de la mazarota.....	37
2.3.11-	Cálculo y diseño del sistema de alimentación.....	38
2.3.11.1-	Cálculo de las áreas del sistema de alimentación.....	40
2.3.12-	Determinación de los parámetros para el llenado del molde el tiempo de enfriamiento y de desmoldeo.....	40
2.3.12.1-	Determinación de la duración de los tiempos de enfriamiento.....	41
2.3.12.1.1-	Cálculo de los tiempos de enfriamiento.....	41
2.3.12.1.2-	Etapas de enfriamiento de una pieza en un molde arena-arcilla.....	42
2.3.13-	Recomendaciones para el desmoldeo y limpieza de la pieza.....	44
2.4	Modelación y simulación por el método de Elemento Finito de la pieza (temperatura y mazarota).....	45
2.4.1-	Base del Método de Elementos Finitos.....	45
2.4.2-	ANSYS versión 10.0.....	47
2.4.3-	Aplicación de la Simulación al proceso de solidificación.....	48
2.4.3.1-	Pasos para la simulación del proceso.....	48
2.5	Conclusiones del capítulo II.....	49
Capítulo III	Resultados y Discusión.....	50
3.1	Introducción.....	50
3.2	Definición de los materiales de los tramos del árbol central.....	50
3.3	Resultados de los cálculos de la tecnología de fundición.....	51
3.3.1-	Materiales usados.....	51
3.3.1.1-	Arena de Moldeo.....	51
3.3.1.2-	Tipo de Mezcla.....	51



3.3.1.3-	Tipo de Resina.....	52
3.3.1.4-	Tipo de Catalizador.....	52
3.3.1.5-	Horno de Inducción utilizado para la fusión del hierro nodular	53
3.3.2-	Análisis de los resultados en la fundición.....	54
3.3.2.1-	Espesores Mínimos a realizar por fundición	54
3.3.2.2-	Dimensión de los orificios fundidos.....	54
3.3.2.3-	Contracción para el hierro nodular.....	54
3.3.2.4-	Plano divisor de la Plantilla y el molde.....	55
3.3.2.4.1-	Inclinación de salida de la plantilla.....	55
3.3.2.5-	Sobremedida de maquinado.....	55
3.3.2.6-	Dimensión de la portada del macho.....	56
3.3.2.7-	Caja de moldeo.....	56
3.3.2.8-	Análisis de las mazarotas.....	56
3.3.2.8.1-	Rechupe específico del material.....	57
3.3.2.8.2-	Números de Mazarotas.....	57
3.3.2.8.3-	Método de los módulos	58
3.3.2.8.4-	Volumen de las mazarotas y la pieza.....	58
3.3.2.8.5-	Dimensiones de las mazarotas.....	58
3.3.2.9-	Dimensiones del sistema de alimentación.....	59
3.3.2.9.1-	Áreas del sistema de alimentación.....	60
3.3.3-	Resultado de los parámetros para el llenado del molde el tiempo de enfriamiento y de desmoldeo.....	60
3.3.3.1-	Resultados de los tiempos de enfriamiento.....	61
3.3.3.2-	Resultados de los cálculos de las etapas de enfriamiento de la pieza en un molde arena-arcilla.....	61
3.3.3.2.1-	Tiempo de enfriamiento para la pieza.....	61
3.3.3.2.2-	Tiempos de enfriamiento para la mazarota.....	62
3.4	Resultados de la Modelación por Elementos Finitos.....	63
3.5	Valoración económica y Medioambiental.....	64
3.5.1-	Valoración económica.....	64
3.5.2-	Impacto Medioambiental.....	65
3.6	Conclusiones del capítulo III.....	66
Conclusiones		68
Recomendaciones		69
Bibliografía.		70



INTRODUCCIÓN

El proceso tecnológico de las empresas “Comandante Ernesto Che Guevara” del municipio de Moa y la “René Ramos Latour” de Nicaro está basado en el esquema de la lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido (proceso **CARON**) según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. También en Australia y en Brasil están operando fábricas cuyo esquema, en lo fundamental, es análogo.

La decisión de utilizar este proceso se explica por las ventajas propias de esta tecnología ya que es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos (Hornos de Soleras Múltiples, espesadores, columnas de destilación, etc.). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal permite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentínicos, mientras que el de lixiviación de ácido sulfúrico permite la elaboración de la fracción laterítica.

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal.

La mezcla de minerales antes de ser sometido a proceso de reducción se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de Preparación del Mineral. En esta planta a los minerales se le elimina la humedad hasta un 5 % aproximadamente y se muele hasta una fineza de 0,074 mm de (85 a 87) % de la masa de minerales. Después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos cuya función, además de homogeneizar los minerales es la de almacenarlo. En la sección de los silos se encuentran las bombas mediante las cuales la mezcla de minerales es bombeada hasta las tolvas de los hornos, dispuestas una para cada dos hornos.

Una vez la mezcla de minerales en las tolvas, esta pasa a los dosificadores de pesaje automático que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno de acuerdo a la productividad fijada. Después que la mezcla de minerales es pesada, se produce la descarga de la misma al sinfín alimentador, el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.



La mezcla de minerales una vez dentro del horno es sometida al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores ($\text{CO} + \text{H}_2$), para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, el cual permite además de lograr el perfil de temperatura enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples tipo ΠM 17 K- 6,8, de 23.5 metros de alto y 6.8 metros de diámetro, con 17 hogares ó soleras. Además, el horno cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos diente o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de la mezcla de minerales de un hogar a otro. El movimiento o traslado de la mezcla de minerales dentro del horno se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Los árboles centrales de los Hornos de Reducción de Solera Múltiple están diseñados para remover el mineral por medio de los brazos colocados radialmente en toda su longitud. Este árbol tiene un motor, un reductor y una transmisión cónica donde la rueda conducida coincide con el eje geométrico del árbol.

SITUACIÓN PROBLÉMICA

Los árboles centrales de los Hornos de Reducción están compuestos de brazos en cada tramo. Estos se rompen con determinada frecuencia así como los tramos. Las dimensiones de los árboles centrales y el material de estos son diferentes en ambas empresas, sin embargo, el horno y las cámaras de combustión son de similares características. Esto, en cuanto a proceso de fabricación se refiere, conduce a tener tecnología de fundición y maquinado diferentes lo que genera gastos adicionales (mano de obra, materiales, herramientas de corte, etc.).

A partir de las deficiencias expresadas se define como **problema de la investigación:**

Los tramos de los árboles centrales de los Hornos de Reducción de las empresas Cdte. Ernesto Che Guevara y la Rene Ramos Latour de Nicaro son diferentes en materiales y dimensiones aun cuando las dimensiones de los hornos y los procesos son similares.



Teniendo en cuenta la problemática planteada y el problema de la investigación se define como **objeto de estudio**:

Árbol central de los Hornos de Reducción de las empresas Cdte. Ernesto Che Guevara y la Rene Ramos Latour (Nicaro).

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis científica**:

Es posible obtener la tecnología de fabricación por fundición para estandarizar los tramos del árbol central de los Hornos de Reducción de ambas empresas.

En correspondencia con la hipótesis planteada se define como **objetivo general del trabajo**:

Obtener la tecnología de fabricación por fundición que permita estandarizar los tramos y el material del árbol central de los Hornos de Reducción de las empresas Cdte. Ernesto Che Guevara y la Rene Ramos Latour (Nicaro).

Para dar cumplimiento al objetivo general de la investigación se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Seleccionar un material que sea de uso común para la obtención de los tramos de árbol central empleados en los Hornos de Reducción.
2. Proponer una tecnología de fabricación por fundición para estandarizar el proceso de fabricación de los tramos del árbol central empleados en los Hornos de Reducción.
3. Simular por el Método de Elementos Finitos el proceso de solidificación de la pieza.

Para garantizar el cumplimiento del objetivo de la investigación se proponen las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del análisis bibliográfico y estado del arte.
2. Análisis de los materiales empleados para la fabricación de los tramos de árbol central en el proceso de reducción de mineral así como la selección del idóneo.
3. Establecer la tecnología de fundición para la obtención de los tramos del árbol central.
4. Simulación del proceso de enfriamiento y formación del rechupe.



5. Análisis de los resultados y valoración técnico – económica e impacto ambiental de dicha fabricación en el medio en que se realizara.

Para garantizar el desarrollo del presente trabajo investigativo contamos con los siguientes **aseguramientos**:

- ✓ Computadora.
- ✓ Material de oficina.
- ✓ Reportes de fundición de los tramos de árbol central fabricados para la Cdte. Ernesto Che Guevara y la Rene Ramos Latour (Nicaro).

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

En el presente capítulo se mostrarán una serie de aspectos relacionados con la temática que se tratará en este trabajo de diploma, los mismos son resultado de una búsqueda bibliográfica basada en la obtención de información acerca del proceso de fabricación por fundición de los tramos del árbol central de los Hornos de Reducción. Este capítulo tiene como objetivo:

Establecer los fundamentos teóricos para un posterior análisis y solución del problema en cuestión.

1.2 Estado del arte y Trabajos precedentes

Estado del arte.

La fundición ha tenido una tremenda evolución desde sus orígenes, es una de las actividades humanas más antiguas, e históricamente se cree se inició hace unos cuarenta siglos a.n.e., en la parte del mundo que fue conocida como la Estepa Euro-Asiática, donde están las montañas de Los Cárpatos, en territorio de lo que fue la Unión Soviética. El bronce fue el primer metal ampliamente usado en campanas, estatuas y armas. Al igual que en las épocas precedentes, las Revoluciones Industriales en Europa y en Norteamérica, son históricamente sinónimas del desarrollo del proceso de fundición; en estos casos, son el hierro y el acero. La tremenda expansión en la industria de los metales vaciados, dieron como resultado la necesidad de producir nueva maquinaria de diferentes tipos para cubrir la demanda de las crecientes industrias manufactureras y de transporte.

La Fundición ha tenido una marcada influencia en el progreso de los pueblos, hasta el punto de que normalmente se toma como "Índice del Estado de Desarrollo de una Nación" al progreso que posee la Industria de la Fundición en ese país. Debido a su importancia, es muy frecuente tomarla como un barómetro que mide el estado económico de una sociedad, basándose en que los metales son la clave del desarrollo de nuestra era industrial; y el proceso inicial y básico para producir los bienes materiales a ser usados en las demás industrias; es decir, es un bien de capital.



En nuestros días, los talleres de fundición de los países desarrollados, al calor de la revolución científico-técnica contemporánea, acometen las tareas de mecanización y automatización de los procesos industriales de más alta complejidad.

La Industria de la Fundición en nuestro país ha adquirido un mayor desarrollo en los últimos años destacándose de manera significativa la empresa Antillana de Acero (ACINOX), la cual cuenta con una amplia gama de producción.

La Provincia de Holguín, específicamente en el municipio de Moa, cuenta con uno de los organismos empresariales que más aporta a la economía nacional, el combinado mecánico de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNI) Cdte. Gustavo Machin de Beche, en el que se fabrican la mayoría de los elementos (maquinarias y equipos) que funcionan en las empresas, no solo del territorio sino también del resto de la provincia. Ejemplo están los tramos del árbol central de los hornos de reducción de las empresas ECG y RRL, los cuales se obtienen mediante el proceso de fundición.

Autores como Goyos. L y Martínez. H, (1985) profundizaron sobre todo el proceso de fundición, los cuales abordaron el estudio de una serie de parámetros para el cálculo tecnológico del proceso de fundición.

Trabajos Precedentes.

Durante el desarrollo de la investigación se estudiaron diferentes bibliografías, su revisión estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: (a) los trabajos sobre el tema de los tramos del árbol central de los hornos de reducción de mineral en ambas empresas que desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han realizado en los últimos años y (b) la información relacionada con el enfoque de los métodos de fundición.

Datos de gran importancia fueron los ofrecidos por (Belay G. E. 1970) de la que se extrajo parte de la metodología para la realización de los cálculos de fundición.

De acuerdo con las normas establecidas por (Jiménez M. Francisco, 1976) se pueden normalizar y adoptar los diferentes parámetros para la realización de los cálculos de la metodología del proceso de fundición.

En los conceptos aportados por (Chang Cardona, 1986), se hace referencia a varios de los procesos esenciales que se deben tener en cuenta para desarrollar una fundición,



así como se describen de manera explícita algunos de los equipos fundamentales para desarrollar la fusión.

En el artículo publicado por (Sánchez González Alfredo, López Granados Adriana y Rebollar Martínez Irene X, 1988) se hace referencia a la producción del Hierro nodular donde se pudo obtener información referida al tipo de horno para la fusión de la aleación.

Otro aporte importante lo ofreció el documento elaborado por los ingenieros (Hernández Costa, Gómez Gonzáles, Córdova Téllez y Antonio Urgellés, 2004) en el que se pudo destacar algunas de las causas más usuales que provocan las roturas de los tramos de árbol central ya que las aleaciones con que están hechos, al soportar temperaturas superiores a los 600°C, sus propiedades mecánicas disminuyen en un 30%.

Para encaminar los estudios sobre los métodos de fundición se revisaron los trabajos realizados por (Rodríguez, 2005) en los cuales se da una panorámica del estado actual del flujo tecnológico del taller de fundición 08 del combinado mecánico Gustavo Machin donde se realizará el proceso de fabricación de la pieza.

Es de gran importancia el trabajo realizado por (Rodríguez Domínguez, 2006) el mismo hace una recopilación de los datos principales de los procesos y equipos de la empresa ECG.

Para el desarrollo de esta primera parte del Manual de operaciones de la planta de Hornos de Reducción de la empresa ECG elaborado por (Rodríguez Serrano, 2007), se pudo reunir valiosa información acerca de las características generales de los hornos.

1.3 La técnica de los Hornos Metalúrgicos

El primer horno conocido por el hombre fue la hoguera, utilizada en la etapa primitiva. Hornos especiales surgieron aproximadamente en los años 2000 a.n.e., los cuales no eran más que pequeños crisoles para la fundición de menas ricas de metales con bajo punto de fusión como el cobre, estaño y plomo (Chang Cardona, 1986).

Los primeros hornos en Cuba (cubilote) surgieron en los siglos del **XII al XIII**.



Los altos hornos para la fundición del arrabio fueron construidos por primera vez en el siglo XIV en Europa. Prototipos de hornos de reverbero modernos, solamente aparecieron en el año 1700.

Un desarrollo intenso de la técnica de hornos se observa en el siglo XIX. En la exURSS esta técnica obtuvo un gran desarrollo después del año 1917.

En la exURSS, la metalurgia ha superado a los países más desarrollados en una serie de índices técnico-económicos.

1.3.1 Clasificación de los Hornos Metalúrgicos

Los hornos de la metalurgia no ferrosa se pueden clasificar por los siguientes indicios (Chang Cardona, 1986):

1. Por su aplicación tecnológica: Hornos de secado, de tostación, de fusión, de refinación, de colado, de tratamiento térmico, de calentamiento.
2. Por la fuente de energía: Hornos de combustible carbónico, hornos que trabajan con la energía desprendida por las reacciones exotérmicas, hornos eléctricos.
3. Por el método de transferencia de calor: Hornos en los cuales el calor se desprende directamente en la masa del material calentado, hornos en los cuales el desprendimiento de calor ocurre separadamente del material procesado y se transmite a este por intercambio de calor, hornos de desprendimiento de calor aislado.
4. Por la forma de la zona de trabajo: Hornos con la zona de trabajo vertical – hornos de cubilote, con la zona de trabajo horizontal – hornos de llama, hornos redondos rectangulares y otros.
5. Por el método de trabajo: Hornos de operación periódica y continua.
6. Por la utilización de calor de los gases salientes: Hornos recuperadores y regeneradores, hornos con calderas, hornos con calentamiento de la carga.

1.3.2 Hornos para la Tostación y Secado de la materia prima y semiproductos

Tostación son todas las transformaciones físico-químicas de los materiales, que ocurren durante su calentamiento sin llevarlo hasta su total fusión. En nuestro país es



de gran importancia la tostación reductora y aglomerante de la producción de níquel por el proceso de "caron" así como la calcinación.

Los cuatro tipos de hornos más propagados para este proceso son los siguientes:

- ✓ Horno para la Tostación de Cámara Fluidizada: Representa una cámara con 2 – 8m de sección transversal y de 3 – 15m de altura. El aire entrante en el horno a través de la solera con un gran número de orificios, mantiene el material procesado en estado de movimiento continuo muy parecido a un líquido en estado de ebullición.
- ✓ Máquinas de Aglomeración: Compuesta por una estera que se mueve continuamente, la cual tiene la longitud de 10 – 15m y un ancho de 1 – 4m; dicha estera se construye con láminas de acero. La carga se suministra en forma de capas uniformes sobre las superficies de las parrillas en la cabeza de la máquina; el aire, necesario para el proceso de tostación, se succiona a través de la capa de material sobre las parrillas.
- ✓ Hornos de Tambor Rotatorios: Es un cilindro de 2 – 5m de diámetro y 20 – 200m de largo, el cual rota sobre un eje bajo un pequeño ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, la carga y el combustible se suministran al horno generalmente a contracorriente.
- ✓ Hornos de Soleras Múltiples: Es un cilindro vertical de 4 – 8m de diámetro y 4 – 12m de alto dividido verticalmente en soleras horizontales. La carga inicial la suministran en la solera superior y continuamente es agitada de solera en solera por los brazos con rastrillo. El combustible y el aire en el horno lo suministran a través de las ventanas que se tienen en cada solera.

1.3.3 Características y funcionamiento de los Hornos de Reducción

Los Hornos de Reducción de la empresa Ernesto Che Guevara (ECG) y la Rene Ramos Latour (RRL) de Nicaro pertenecen al último grupo de Hornos para la Tostación y Secado de materia prima, o sea, a los de Soleras Múltiples, ellos están compuestos por un cilindro metálico vertical revestido interiormente con ladrillos refractarios, chamota o alta alumina y exteriormente con una carcasa metálica, sistemas de alimentación, barrido, descarga y cámaras de combustión.

El cuerpo metálico de hierro del horno tiene una altura de 3 – 5m y un espesor de 10 – 12mm. Por la altura del cuerpo se sostiene una gran cantidad de ventanas de arrabio, distribuidas circularmente frente a cada solera. El revestimiento del horno está compuesto de una capa cilíndrica de chamota, con ladrillos, de un espesor de 150 – 250mm, y una capa termo-aislante de 10 – 50mm, distribuida entre el cuerpo y el revestimiento de chamota. Las soleras tienen forma de bóvedas esféricas (arqueadas) de piezas de chamota, de un espesor de 150 – 250mm en las soleras se encuentran orificios para el derrame del material y el paso de los gases, distribuidos alternamente por el centro y por la periferia. El número de soleras (hogares) puede ser de 6 hasta 16.

El proceso de reducción en la ECG se efectúa en un Horno de Hogares Múltiples tipo ПМ 17 К – 6.8, de 23.5 metros de alto y 6.8 metros de diámetro, con 17 hogares ó soleras en forma de bóvedas esféricas a través de los cuales circula la carga. El movimiento o traslado de la mezcla de minerales dentro del horno se realiza en forma de zigzag por medio de un árbol central, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro. El número de hogares ha sido un factor de importancia en el desarrollo de los hornos modernos, ya que fue detectado que el número de caídas de un hogar a otro influía directamente en los resultados de la reducción debido a que en el momento de las caídas ocurre mayor contacto entre las fases, y las partículas son bañadas completamente por el gas, calentándolas a las temperaturas indicadas y reduciendo el níquel. Una descripción más detallada de las características de estos hornos aparece en la tabla 1.1 del anexo 1.

La mezcla de minerales secados y molidos se transporta neumáticamente desde los silos hasta las tolvas de recepción de los Hornos de Múltiples Hogares y luego se dosifica a estos donde es sometida al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura en su interior y una concentración determinada de gases reductores ($\text{CO} + \text{H}_2$).

La carga del horno realimenta por la parte superior con ayuda de un alimentador conectado a una romana. La instalación para a agitación se compone de un árbol central hueco al cual se fijan brazos con rastrillos en cada solera. Los gases que salen del horno succionados por un extractor arrastran consigo partículas muy finas de minerales, las cuales se hacen necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, la planta cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por



un grupo de 6 ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electrofiltro en la sección de los silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas. Los minerales recuperados en la batería de ciclones caen por gravedad al horno a través del hogar 0. Los minerales que se recuperan en los electrofiltros son transportados hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas las que envían los minerales hacia las tolvas de producto final de la sección de molienda de la planta para más tarde ser bombeado hacia los silos, formando así el reciclo de hornos.

El proceso de reducción es eminentemente endotérmico. Por este motivo el horno dispone de 10 cámaras de combustión del tipo PRIOR dispuestas en los hogares 6, 8, 10, 12 y 14 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases calientes para el calentamiento de la mezcla de minerales, a la vez que enriquece la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta. La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa (ver Anexo 1).

Un perfil típico de temperatura es como sigue:

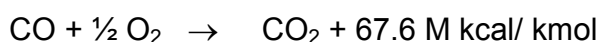
<u>Hogar:</u>	<u>T. Gas:</u>	<u>T. Minerales:</u>
H0	350 °C	100 °C
H4	740 °C	350 °C
H6	690 °C	410 °C
H7	695 °C	440 °C
H9	710 °C	500 °C
H11	720 °C	580 °C
H13	740 °C	650 °C
H15	760 °C	730 °C

En estas condiciones, es posible el desarrollo de las reacciones de reducción a pesar del corto tiempo de retención del mineral en el horno (45 minutos).

1. $\text{NiO}_{(s)} + \text{CO}_{(H2)} \rightarrow \text{Ni met} + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$
2. $3\text{Fe}_2\text{O}_3_{(s)} + \text{CO}_{(H2)} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$
3. $\text{Fe}_3\text{O}_4_{(s)} + \text{CO}_{(H2)} \rightarrow 3 \text{FeO} + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$
4. $\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{(H2)} \rightarrow \text{Fe met} + \text{CO}_2 \text{ (H}_2\text{O)}_{(g)}$



Esta operación se complementa con la introducción de aire en los hogares 4 y 6 (2000 m³/h) para la postcombustión, por medio de un ventilador, de los gases con un cierto contenido de CO y H₂ no consumidos en la reacción química, para evitar un incremento de las concentraciones de los mismos en el sistema de limpieza de gases (precipitador electrostático) al mismo tiempo se aprovecha el calor de reacción exotérmica liberado en la combustión para facilitar el perfil de temperatura ideal en el horno.



Después de reducido el óxido de níquel y los óxidos superiores de hierro a níquel metálico y hierro metálico según las reacciones anteriores (1, 2, 3, 4), la mezcla de minerales es descargada del horno al transportador rotatorio, a su vez, este entrega el mineral a una temperatura de (690 a 730) °C al enfriador.

1.3.3.1 Ventajas y desventajas de los Hornos de Hogares Múltiples

El movimiento de los materiales en el Horno de Soleras Múltiples, la agitación y “derrame” de los materiales influyen determinantemente sobre la productividad e índices de trabajo de estos tipos de hornos (Chang Cardona, 1986).

1.3.3.1.1 Ventajas de los Hornos de Hogares Múltiples

Dentro de las ventajas de estos hornos se pueden citar las facilidades de regulación del perfil de temperatura, lo que permite lograr un aumento gradual de la misma mejorando las extracciones para los minerales silicatos.

En él se conjugan las dos formas de tostación, en capa y en suspensión, que ocurre en los momentos de la caída que es donde se obtiene mayor contacto entre las fases. Por esto la altura de los hogares es variable, para que el tiempo de contacto sea el mayor posible.

El arrastre de polvo en este equipo es pequeño en comparación con los hornos de cama fluida. Por este motivo no es necesario reciclar mucho polvo.

1.3.3.1.2 Desventajas de los Hornos de Hogares Múltiples

Las desventajas fundamentales de este horno son la cantidad tan grandes de piezas cambiables (brazos y dientes, refractarios de cámaras, piezas de quemadores, etc.) que ocasionan pérdida de tiempo y de eficiencia.

Otra de las desventajas es la baja productividad, que es de 17 t/h, mientras que en equipos más modernos llega hasta 30 t/h. Desde el punto de vista tecnológico, la reacción en la cama de mineral ocurre sustancialmente en la superficie de contacto y en el material que está en la profundidad de este, gracias a la introducción del petróleo aditivo que en este caso es muy determinante como agente reductor para una buena reducción.

1.4. Características y funcionamiento del árbol central

La palabra árbol es utilizada para referirse a un dispositivo giratorio que a una velocidad de rotación determinada transmite una potencia. Un árbol de transmisión llamado también árbol principal es aquel que recibe la potencia de una máquina motriz y la transmite a máquinas conectadas a él por medio de poleas, cadenas o engranajes. El hecho de transmitir una potencia desde un motor implica una velocidad angular y un par que genera en el árbol que se le denomina torsión.

Después que la mezcla de minerales es secada y molida se transporta de forma neumática a los hornos de reducción, ya en estos comienza el proceso de reducción por medio del árbol central hueco donde su función principal es remover este mineral.

El movimiento del árbol central se garantiza por una transmisión cónica accionada por un electromotor de 20 kW que proporciona una frecuencia de rotación de 1.4 a 1.5 rev/min a través de un reductor. A este árbol se le articulan 68 brazos los cuales están dispuestos en 17 hogares (4 en cada hogar). Estos brazos tienen incluidos dientes o paletas inclinadas, el número de rastrillos en cada brazo es de 12 a 20 con los que, mediante la rotación del árbol central, facilitan el traslado de la mezcla de minerales de un hogar a otro por la periferia o por el centro del horno en forma de zigzag. El árbol central se enfría por la succión del aire del medio ambiente de la parte inferior hueca hacia arriba de forma natural. El mismo tiene una capa de recubrimiento aislante que evita su deformación por las altas temperaturas a las que trabaja, esta se compone de una capa de asbesto o alumina, aunque pueden ser los dos materiales, la capa de asbesto primero y la alumina después (Rodríguez Serrano 2007).



En el árbol central los tramos se parten por diferentes causas que a continuación se relacionan:

- ✓ Cuando el esfuerzo a que está sometido es mayor que la resistencia mecánica del material del árbol, esto puede ser ocasionado por un tranque en algunas de las partes móviles del árbol.
- ✓ Puede estar provocado también por defectos de fundición no visibles, otro factor que incide en este fenómeno es la acción directa del quemador de la cámara de combustión sobre el árbol.
- ✓ Una sobrecarga también puede afectar en este caso, ya sea en el momento de arranque si existe algún tranque en el árbol.
- ✓ El tiempo de vida útil del árbol, ya que la estructura de la red cristalina puede variar producto a la acción del calor y los gases y pasar a estructuras más débiles, favoreciendo el incremento de tensiones en el metal.

1.4.1 Influencia de las altas y bajas temperaturas en los tramos del árbol central

Durante las operaciones de los hornos las temperaturas en los tramos de los árboles alcanzan valores que favorecen termodinámicamente la precipitación de estos bajo los efectos del envejecimiento de la aleación como resultado del mantenimiento de las temperaturas en valores más o menos estables durante períodos prolongados de tiempo.

Sin embargo, a temperaturas elevadas la resistencia mecánica depende mucho de la magnitud y velocidad de aplicación de la carga y del tiempo de exposición. A elevadas temperaturas, gran cantidad de materiales metálicos se comporta como materiales viscoelásticos, por lo que al ser sometidos a la acción de cargas, por ejemplo, de tracción, el metal “fluye” lentamente y surge un aumento de su longitud en el transcurso del tiempo. Por esta razón, en los cálculos de ingeniería tiene especial significación los resultados que proporcionan los ensayos que describen el mecanismo de deformación de una aleación a temperaturas elevadas (Boyle y Spence, 1989).

Las altas temperaturas de los hornos propician que se añada energía térmica de activación a las oscilaciones de los átomos alrededor de su núcleo, disminuyendo la energía de enlace en las fronteras sigma/carburos. De esta manera, los átomos se desprenden con mayor facilidad de la estructura cristalina, originándose vacíos que al



difundirse y concentrarse bajo los efectos de las elevadas temperaturas y cargas de trabajo, se convierten en focos potenciales para el surgimiento de grietas.

Los efectos de sobrecargas se acentúan bajo la influencia del incremento de las temperaturas de operación, pues, los aumentos en la carga requieren aumentos en los valores de temperatura para mantener las condiciones de reducción, los que en ocasiones pueden alcanzar los 850°C.

1.5 Aspectos generales de la fundición

El vaciado o fundición de metales ha tenido una tremenda evolución desde sus orígenes en la prehistoria. Los primeros objetos metálicos fueron trabajados hace aproximadamente 5.000 años, después de haber sido fabricados mediante el proceso de vaciado.

Fundición es el proceso térmico de manufactura donde se procesan los metales y aleaciones a elevadas temperaturas para luego ser vaciados sobre un molde que contiene la geometría del producto a fabricar donde se le deja solidificar y enfriar. El término Proceso de Vaciado implica, en el sentido amplio, al proceso de moldeo, al método de introducir el metal en la cavidad del molde y a todos los procesos de hacer las piezas. Se entiende por Moldear una pieza, a la actividad de atacar una mezcla de moldeo sobre un determinado modelo, de manera que cuando se retire dicho modelo, quede perfectamente reproducida su forma. Además, la masa moldeada debe poseer propiedades que le permitan mantener dicha perfección hasta que la pieza solidifique y se enfríe completamente.

Uno de los aspectos más importantes al proyectar el proceso tecnológico, consiste en elegir de todos los métodos de moldeo conocidos, el que brinde los mejores índices técnicos-económicos y la calidad necesaria en la obtención de la pieza moldeada.

Para la elección del proceso tecnológico más adecuado para una pieza fundida se debe tener en cuenta una serie de aspectos como son: calidad de piezas a obtener, dimensiones y complejidad de la pieza, tipo de aleación, propiedades mecánicas, peso de la pieza y costo de producción.



1.5.1 Defectos de las piezas fundidas

Al igual que en cualquier producto metalúrgico, es normal que las piezas vaciadas contengan huecos, inclusiones y otras imperfecciones que contribuyen a una variación de calidad. A estas desviaciones en piezas algo menos que perfectas, el fundidor normalmente las denomina discontinuidades. Se define como defecto de fundición a cualquier imperfección en la pieza vaciada que no satisface una o más de las especificaciones de diseño o de calidad; limitándose usualmente este término a imperfecciones formadas por inadecuadas condiciones de vaciado y de solidificación de las piezas. A esas imperfecciones se les empieza a considerar como defectos o fallas solamente cuando la función satisfactoria o la apariencia del producto es cuestionada; sin embargo, hay que tener en mente que ese producto pueda ser salvado o en los casos más serios sea rechazado y reemplazado. Este tipo de decisión no solamente depende del tipo de defecto sino de su significado con respecto a su función en servicio; por lo tanto, hay que tener en cuenta la necesidad de aplicar normas de calidad y de inspección.

1.5.1.1 Tipos de Defectos de las piezas fundidas

En el lenguaje tradicional del fundidor hay confusión en cuanto a la denominación de los defectos, que entre los más usados para describir imperfecciones de vaciado están: colas de rata (rattail), costras (scabs), bucles (buckles), y falta de unión (shut); por lo tanto, es necesario establecer la etimología de términos. Un defecto es la carencia o la falta de las cualidades propias y naturales de un producto; mientras que una falla se le puede definir como una pérdida de resistencia que conduce a que ese producto se rompa y deje de servir. En fundición, la experiencia ha demostrado que los defectos representan un cierto porcentaje de las piezas vaciadas; por lo tanto, cuando las piezas son rechazadas o deben rehacerse, exige entre otras cosas: mano de obra; materiales y metal líquido.

Los defectos por fundición se encuentran normalizados en algunos países, lo cual facilita su clasificación. Según estas normas se pueden agrupar como aparece en la tabla 1.2 del anexo 4.



En general, considerando la influencia del defecto sobre las posibilidades de uso de las piezas, estos pueden agruparse en:

- ✓ *Defectos permisibles*: No disminuyen el valor de una pieza, la cual puede ser considerada como buena: Esto depende principalmente del destino posterior de las piezas.
- ✓ *Defectos eliminables*: Son, generalmente, defectos superficiales y de forma como rebabas, nudos, los cuales pueden eliminarse en el proceso de limpieza y acabado o durante la elaboración mecánica.
- ✓ *Defectos reparables*: Se pueden eliminar por soldadura, esmerilado, hermetizado, etcétera.
- ✓ *Defectos no reparables*: Son principalmente defectos del material y defectos internos, por ejemplo, dimensiones inadecuadas o composición química diferente a la especificada. Estos defectos no se pueden reparar o bien su eliminación es demasiado cara.

Las causas principales de la aparición de estos defectos son:

- ✓ Los errores de fabricación del moldeo.
- ✓ Errores de fabricación de cajas de moldeo.
- ✓ Errores de fabricación de moldes y machos.
- ✓ Errores de ensamble de moldes y machos.
- ✓ Deformaciones de cavidad del molde durante el vertido.
- ✓ Errores durante el acabado de las piezas.

El método de evitar la aparición de defectos a causa de los errores mencionados, es ejercer un control preciso sobre los parámetros tecnológicos de ejecución del proceso de fundición, desde el adecuado proyecto y fabricación de moldes y cajas de machos, hasta los parámetros de moldeo.

1.5.2 Flujo tecnológico del taller de fundición

La fundición de los tramos de árbol central se realizará en el taller 08 de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel Cdte. Gustavo Machin del que a continuación se describen algunas de sus características más generales (Rodríguez, 2005).



Descripción del flujo productivo.

El proceso de obtención de piezas fundidas comienza con la preparación de los materiales de carga para la fundición y obtención de la aleación deseada en los hornos instalados y la preparación de los materiales de moldeo y mezclas para la elaboración de moldes y machos. Para ello la UEB del taller de fundición cuenta con las siguientes áreas tecnológicas.

Área para la fabricación del juego de modelos (Plantillería): esta área esta destinada a la fabricación de plantillas y cajas de machos (juego de modelo) necesarios para la obtención de los moldes de fundición. Para la elaboración de las plantillas el área se encuentra equipada con dos sierras circulares, dos sierras sinfín, una plana, un cepillo reguesador, dos tornos y una fresadora universal.

Área de preparación de materiales de moldeo: aquí se recepcionan las arenas y son secadas en el tambor secador rotatorio con enfriador. Después de este proceso con ayuda de un elevador de cangilones se traslada hasta el tamiz poligonal donde la arena es tamizada y por medio de un transportador de banda se traslada a las tolvas de almacenamiento de arena seca, la cual mediante los dosificadores y el sistema de transporte neumático la traslada hacia el área de preparación de mezcla para el moldeo mecanizado en verde y hacia la tolva de recepción del sistema de Moldeo Químico Autofraguante.

Área de Moldeo: la elaboración de moldes por el método conocido como moldeo en verde de forma mecanizada se prevé mediante dos pares de máquinas moldeadoras modelo 233M y 271BM. El suministro de mezcla de moldeo se efectúa a través de la tolva de alimentación de cada máquina respectivamente y la alimentación de cajas de moldeo se realiza con ayuda de la grúa eléctrica de puente desde la zona de recepción de estas. La elaboración de los moldes por el proceso autofraguante se realiza por medio de la instalación de mezclado y moldeo que cuenta para ello con un mezclador continuo y mesa compactadora donde se lleva a cabo la preparación de la mezcla y el moldeo como operaciones continuas.

En esta área se realiza también la Machería, por medio de esta operación se fabrican los machos para obtener las cavidades, orificios y superficies externas de las piezas cuya configuración no permite obtenerla mediante la plantilla. Los machos se elaboran a



partir de mezcla autofraguante en los bancos de macheros con ayuda de pisones manuales. Después de este proceso los machos se recubren con pintura antiostra base alcohol. También se prevé la preparación de los herrajes de moldeo y machería, la cual se encuentra equipada con una guillotina.

Área de fusión: en esta área se realizan todas las marcas de las aleaciones de hierro en un horno de inducción con crisol de frecuencia industrial; para la fusión de las marcas de acero se realiza en dos hornos de inducción con crisol de alta frecuencia y un horno de arco eléctrico.

Área de preparación de la carga: en esta área se prevé la trituración y molienda de las ferro-aleaciones y materiales refractarios a las dimensiones adecuadas para realizar la fundición, para ello cuenta con un molino triturador de mandíbula y un molino de rodillo, así como también se efectúa el revestimiento refractario de hornos y cazuelas. La carga metálica para realizar la fusión de las diferentes aleaciones en los hornos de inducción se transporta con ayuda de la grúa eléctrica de puente en los cestos hasta la plataforma de los mismos, donde de forma manual se suministran los materiales componentes de la carga. Las ferro-aleaciones, carburantes y formadores de escoria se trasladan en pequeños recipientes hasta la zona de trabajo.

La preparación de carga es la operación mediante la cual se prepara la carga metálica que se va a fundir. La carga metálica se realiza teniendo en cuenta el cálculo de carga, donde se refleja la cantidad necesaria de cada uno de los materiales a cargar para garantizar la composición química de la aleación deseada.

Para la fusión de las aleaciones de metales ferrosos se prevé la realización del análisis de la composición química de los elementos del metal líquido, para ello se cuenta con un laboratorio de análisis químico, equipado con lo último de la técnica moderna, computarizado, capaz de analizar hasta 21 elementos a la vez. El metal líquido obtenido se vierte en cazuelas precalentadas en el banco de secado para ser trasladado al área de vertido.

Área de vertido: para el ensamble y vertido los moldes elaborados son recepcionados en área de fusión para la colocación de los machos y el pintado de los moldes preparados, los cuales son ensamblados con ayuda de las guías de moldeo y la grúa

eléctrica de puente. Durante la realización de estas operaciones los moldes son controlados.

Área de desmoldeo: Los moldes fundidos se trasladan usando grúas eléctricas de puentes para el área de desmoldeo donde se sacuden en una zaranda vibratoria para eliminar la arena, la pieza fundida se transporta en contenedores usando una carretilla eléctrica sobre rieles al área de desbarbado y limpieza y la arena se reincorpora al sistema de preparación de mezcla de acuerdo al tipo de proceso utilizado durante el moldeo. Al efectuar el desmoldeo de los moldes sobre la base del proceso convencional la arena se traslada mediante un transportador de banda, en el cual se realiza la separación de las partículas magnéticas y otro de cangilones hacia la instalación de recuperación, la cual mediante transportadores de banda la envía al área de preparación de mezclas de moldeo en verde. Los moldes sobre la base del proceso autofraguante son recepcionados en la instalación de desmoldeo autofraguante, donde la arena se recupera por método mecánico y se traslada hacia el silo de almacenamiento mediante transportadores neumáticos de donde se alimenta la tolva de recepción de arena recuperada del mezclador continuo, este proceso se efectúa todo de forma automática, este es el equipo más moderno que existe en nuestro país.

Área de limpieza y acabado: En esta área se efectúa el desmoldeo de machos de las piezas fundidas, el rebabado, el tratamiento térmico, la limpieza final y la recuperación de los defectos de las piezas fundidas, las cuales se trasladan para la zona de corte del sistema de alimentación y mazarotas con ayuda de los equipos dispuestos en el área. La extracción de los machos, así como la limpieza de las piezas fundidas se prevé en dos tambores de acción periódica y en una cámara de granallado, los tambores rebabadores se encuentran situados en un local aislado, el cual se equipa con una grúa monorraíl y una carretilla eléctrica y la cámara de granallado se equipa con una grúa monorraíl, la cual se introduce hasta el interior de la cámara.

1.6. Conclusiones del Capítulo

- Existe poca información bibliográfica referida a los tramos de árbol central los Hornos Reducción de las empresas lo que dificulta la realización del trabajo investigativo.



- Se comprobó que con los trabajos precedentes que avalan la propuesta de tecnología de fabricación por fundición de la pieza se puede desarrollar una tecnología adecuada para lograr una mayor eficiencia en la elaboración de los tramos de árbol central.



CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción.

Según previas investigaciones el problema de averías en los tramos de árbol central de los hornos de reducción de minerales ha ido en aumento en los últimos años teniendo mayor incidencia los de la empresa René Ramos Latour de Nicaro (RRL). Se han buscado soluciones para contrarrestar esta situación que afecta de manera significativa la productividad de la misma pero aun no se ha encontrado la solución idónea para ponerle fin a tal situación. Por tanto este capítulo tiene como objetivo:

Exposición de los materiales que componen los tramos de árbol central así como el establecimiento de una tecnología de fundición que satisfaga el problema en cuestión, también plantear la metodología de la simulación por el Método de los Elementos Finitos para una mejor calidad en el proceso de obtención de la pieza por fundición.

2.2 Material de los tramos del árbol central

Para el material de estos tramos en la ECG se tiene la aleación de fabricación rusa (URSS) de hierro fundido de Ni - Mo con matriz Perlita - Cementita y grafito nodular (marca de la fundición ЧН1МШ) según la norma GOST 1849 - 87.

Según análisis químicos y metalográficos realizados se determinó que esta fundición tiene características mecánicas y de resistencia en diferentes medios muy superior a las restantes aleaciones las cuales se pueden apreciar en las tablas 2.1 y 2.2 de los anexos 3 y 4 respectivamente (Hernández Costa, Gómez Gonzáles, Córdova Téllez y Antonio Urgellés, 2004).

Para la fabricación de los tramos de la empresa RRL (Nicaro) se rigen por la norma (Gost 1849 - 87) americana para la selección del material (B4 – 50-2), esta aleación presenta características similares a su homóloga rusa las cuales se observan en las tablas 2.3 y 2.4 respectivamente del anexo 4.

Las condiciones de trabajo a la que están sometidas estas piezas en los hornos de reducción son más severas atendiendo a temperatura y atmósfera gaseosa independientemente del aislamiento térmico que la protege del medio, pero con respecto a esto está el inconveniente de que su cara fría puede alcanzar hasta los

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico *autor: Adriel Estrada Favier*

600°C según las instrucciones del fabricante, y estas aleaciones están recomendadas para trabajar hasta los 500°C en atmósfera oxidante o aireadas. Debemos indicar de esta aleación que a estas temperaturas, sus propiedades mecánicas disminuyen considerablemente, un 30 % o más. Por lo que el tiempo de reparaciones planificado está fijado para un período de 6 a 7 años.

En las figuras 1 y 2 se muestran ejemplos donde en el tramo del árbol central del horno 18 de la empresa ECG surge una grieta en el cuerpo, sacado antes que se completara la fractura. Este tipo de rotura se desarrolla gradualmente y no de forma inmediata.

En las tablas 2.5 y 2.6 que se muestran en el anexo 5 se exponen algunas de las características generales de los tramos de árbol central de la ECG y RRL de Nicaro.

2.2.1 Influencia de los elementos químicos en la aleación

Cada elemento químico que compone una aleación influye de manera significativa en las propiedades físico-mecánicas del material, es por esto que se debe tener un estricto control sobre estos a la hora de realizar la fusión de la mezcla (Rodríguez, 2005 y Enrique, 1986).

A continuación se muestran la influencia que tienen algunos elementos químicos sobre las aleaciones que estos pueden formar:

Carbono: Está combinado como componente del Carburo de Hierro, determinan las propiedades del hierro fundido, como son: resistencia y dureza.

Este elemento en forma de grafito disminuye la temperatura de solidificación y aumenta la fluidez líquida.

Silicio: Este componente hasta un 2% aproximadamente disminuye también la temperatura de solidificación y aumenta la fluidez líquida.

Además favorece la precipitación del grafito. Su presencia aumenta algo la resistencia del Hierro, pero si su proporción se eleva al 4%, entonces endurece las piezas hasta el punto de que el Hierro se vuelve quebradizo.

Manganeso: Se disuelve en la ferrita y se combina con el carbono creando carburos, y con el azufre el sulfuro manganeso (MnS), lo que eleva la resistencia de la fundición y reduce su viscosidad. Aumenta la tendencia a la formación de rechupes (con un



contenido mayor de 1%), aumenta la resistencia a la flexión y a la tracción y eleva un poco la contracción linear, dureza y fragilidad.

El Manganeseo en la fundición neutraliza la influencia nociva del Azufre.

Azufre: Es un elemento perjudicial para la calidad del Hierro, dificulta su fusión y aumenta considerablemente su dureza, fragilidad y contracción, provocando estas últimas, tensiones internas, grietas, etc. La proporción del Azufre debe mantenerse tan baja como sea posible, no exceder en ningún caso por encima de 0.17%.

Fósforo: Es un elemento perjudicial para la calidad del Hierro, resulta este último frágil al sobrepasar la proporción de 0.3 a 1%. Cuando se trata de piezas coladas de alta calidad, el contenido máximo admisible es de 0,05 %.

Níquel: Actúa como grafitizante, disminuyendo los carburos y afinando el grano de Hierro. Por medio de esta adición se obtiene un aumento de la resistencia mecánica y de la homogeneidad de la pieza fundida. El Níquel es el elemento aleado más importante para mejorar la calidad de la fundición.

Molibdeno: Este en una proporción de 0.25 a 1.25%, disminuye la formación de laminillas de grafito, aumentando la resistencia a la tracción, al impacto y a la flexión.

2.3 Establecer la tecnología de fundición

La fabricación de piezas por fundición tiene gran importancia para la construcción de maquinarias. Este proceso se le aplica fundamentalmente a piezas que por su complejidad no pueden obtenerse por otros métodos de fabricación más simples como la forja, el maquinado y otros.

Una pieza obtenida por fundición debe quedar con la mejor calidad posible, que en esta no aparezcan cavidades de contracción, defectos, porosidades. La posición de ella en el molde es un factor que debemos tener en cuenta y emplearlo correctamente en dependencia de su forma y dimensiones, debemos tener en cuenta la influencia de la gravedad.

La tecnología de moldeo se divide en las siguientes etapas según (Goyos L. y Martínez H. 1985):

1. Análisis del diseño de la pieza para determinar si puede ser obtenida por fundición y selección del método a usar.



2. Determinar la posición de la pieza en el molde.
3. Determinar el plano de división del molde y de la plantilla y su posición en el molde.
4. Determinar la posición del macho y sus portadas.
5. Determinar las dimensiones de la caja de moldeo.
6. Realizar los cálculos, determinar su posición así como los dibujos de los sistemas de alimentación.
7. Argumentar el método escogido de moldeo y para la preparación de los machos. Recomendar las mezclas para el molde y los machos.
8. Determinar los elementos básicos para el receso de llenado del molde, el tiempo de enfriamiento y de desmoldeo.
9. Recomendaciones para el desmoldeo y limpieza de las piezas fundidas.

2.3.1 Método de Moldeo

A continuación se muestran algunas características de los métodos de fundición por los que se puede obtener la pieza, así como su aplicación (Goyos L. y Martínez H. 1985):

Moldeo en arena manual. Aplicación: se emplea en producciones unitarias y en series pequeñas de piezas fundidas para todas las aleaciones. Se obtienen piezas de paredes delgadas de poca exactitud, gran laboriosidad y alto costo de producción.

Moldeo en arena a máquina. Aplicación: se emplea en producciones en serie y en masa para todas las aleaciones, y diferentes pesos y dimensiones. Se obtienen piezas de relativamente poca complejidad y media exactitud.

Moldeo en arena combinado: comprende la combinación de los dos métodos anteriores.

2.3.2 Materiales usados

Para esta operación se utiliza la arena como componente mayoritario a la hora de fabricar el molde. La resina o aglutinante, cuya función principal es unir los granos de arena entre sí (generalmente, con mayor efectividad que la arcilla), se utiliza en base al peso de la arena.



Estos son compuestos orgánicos líquidos que en presencia de un catalizador ácido se polimerizan y se transforman en sólidos.

El catalizador es otro de los materiales que se aplica en base al peso de la resina usada. Existen varios tipos de este material que son: Ácido Toluen Sulfónico, Bencen Sulfónico y Xilen Sulfónico, que son ácidos orgánicos; además el ácido fosfórico es inorgánico, pero su uso es limitado ya que no se puede utilizar la arena recuperada. Es un compuesto líquido que origina que la mezcla de resina y arena fragüe o cure.

2.3.2.1 Arenas de Moldeo

A pesar del desarrollo notable que se observa en la producción por fundición de los llamados métodos especiales de producción de piezas fundidas, en cáscara, etc., aún la forma mas empleada de obtener una pieza fundida es por el método de moldes de arena y esta parece ser la tendencia predominante en el futuro inmediato.

Las piezas vaciadas en arena, generalmente incluyen a todos los procesos de moldeo que emplean una mezcla de un agregado natural refractario, que va a formar la cavidad del molde. El agregado natural puede ser cualquier material refractario, no necesariamente arena, que se debe caracterizar por su estabilidad y por su resistencia a las temperaturas del metal fundido.

Los sistemas de arenas de moldeo, de acuerdo a la cantidad de agua contenida en ella, se les clasifican como *arenas en verde* y *arenas en seco*. Los sistemas de arenas en verde consisten de tres ingredientes funcionales esenciales, que son: arena, compuestos orgánicos, y bentonita. Estos materiales poseen muy diferentes propiedades físicas y químicas y más aún, cada uno de ellos tiene funciones únicas en la producción de piezas fundidas de calidad. Con la adición de una pequeña cantidad de agua, la bentonita desarrolla varias funciones que son muy importantes: como la de enlazar entre sí a otros ingredientes que permiten que sea posible la conformación del molde, que es la geometría básica de la pieza vaciada, lo que quiere decir que desarrolla resistencia en verde; de igual manera, cuando contiene sodio mejora las resistencias en seco y en caliente, junto a la resistencia a la tracción en húmedo.

Tipos de Arenas:

- ✓ Arena silicea.
- ✓ Arena de circonio.



- ✓ Arena de cromita.
- ✓ Arena de olivino.
- ✓ Arenas naturales.

2.3.2.2 Mezcla para la producción de Moldes y Machos

La preparación de mezclas es la operación que forma parte del proceso de moldeo y machería a través de la cual se elaboran las mezclas para la elaboración de moldes y machos para todo tipo de fundición, las cuales son:

- Mezcla de macho para proceso autofraguante.
- Mezcla de moldeo para proceso autofraguante.
- Mezcla de moldeo para proceso convencional.

Las mezclas para el moldeo en verde son suministradas a través de transportadores de banda a las tolvas de alimentación para el moldeo mecanizado y en contenedores para el moldeo manual. La mezcla autofraguante se suministra directamente desde el mezclador continuo a los moldes.

2.3.2.3 Características de las resinas

En la tabla 2.7 del anexo 5 se muestran los tipos de resinas así como algunas de sus propiedades más generales.

De acuerdo con la resistencia a la tensión y compresión las resinas AF/UF, AF/FF, AF/FF/UF, desarrollan resistencias similares y las F/F, ligeramente inferiores. Acorde a la fragilidad las más frágiles son las fenólicas (moldes quebradizos), las furánicas resisten más el manejo para ser más flexibles. La colapsibilidad es la propiedad de los moldes o machos para desmoldear, según esta podemos clasificarlas como: FF – baja, AF/UF y AF/FF/UF – media, y AF/FF – alta.

Nota: la urea es del material que contiene nitrógeno.

En este proceso las resinas utilizadas son las conocidas comúnmente con el nombre de *resinas furánicas* y vendidas con seudónimos comerciales variados. Estas son resinas sintéticas en cuya fabricación entra el alcohol furfúrico y una o varias sustancias tales como:

- Formol.



- Resinas urea formol.
- Resinas fenol formol.
- Silanos.

Las resinas furánicas se suministran en forma de líquido. A través del contenido de urea puede influirse sobre las propiedades de la resina (fragilidad, tiempo de endurecimiento, resistencia, contenido de agua). Las arenas aglomeradas con resinas ricas en urea se desmoronan fácilmente tras la colada y la solidificación de las fundiciones. Las resinas furánicas puras no suelen emplearse como aglomerantes, debido a su alto grado de fragilidad.

2.3.2.4 Características de los catalizadores

El catalizador es el compuesto más importante de este proceso. Debe permanecer inactivo a temperatura ambiente, pero se descompone rápidamente al entrar en contacto con el molde caliente liberando el ácido necesario para que se produzca la reacción de poli-condensación. Los componentes principales son las sales de amonio de ácidos minerales (clorhídrico, sulfúrico, nítrico), a las que se les puede añadir urea para bloquear el formol libre y disminuir el olor de la cocción.

2.3.2.5 Hornos para la fusión de la aleación

Según las características del material del tramo del árbol central el método para la fusión del hierro aleado con revestimiento ácido y básico puede ser en hornos de inducción, aunque también se puede realizar en hornos de arco eléctrico.

Hornos de Inducción.

Este tipo de hornos opera el principio en que se basa un transformador de corriente eléctrica. El enrollado del horno hace las veces de primario y la carga, las de secundario. La figura 2.1 del anexo 5 muestra el esquema de este tipo de horno. Se ve que hay varias vueltas del enrollado, mientras que el secundario en realidad es un aro corto-circuitado cuando se le aplica una corriente alterna. Al hacer esto, se genera un campo magnético mucho más grande en la carga; entonces, la resistencia que ofrece la carga a que pase la corriente inducida, genera un efecto de calentamiento. A su vez, este calentamiento se ve aumentado, aunque en pequeñas proporciones, por la permeabilidad magnética de los materiales magnéticos.



Al igual que en un transformador, el campo inducido en la carga se opone al aplicado y se produce la acción repulsiva entre ellas. Como el enrollado es fijo, ya que consiste de una tubería de cobre refrigerada internamente y mantenida rígidamente para contrarrestar fuerzas electromagnéticas y evitar la expansión térmica, la carga se debe mover, lo cual produce un efecto de agitación dentro del baño, tal como se esquematiza en la figura 2.2 del anexo 5.

Para un mejor acoplamiento eléctrico, la profundidad del baño es siempre mayor que el diámetro y por lo tanto, la presión metalostática del líquido ejercida a través del refractario sobre el enrollado es considerable, con lo que se contrarrestan las fuerzas electromagnéticas. La acción agitadora produce un excelente mezclado del baño, lo que conduce a que tanto los elementos aleantes como la carga nueva que se va añadiendo sean absorbidos rápidamente. Este efecto, hace que este tipo de hornos sea ideal para la fusión de aceros altamente aleados; aún cuando, en estos hornos es posible fundir cualquier tipo de metal. Esa acción agitadora es proporcional a la potencia de entrada por unidad de volumen, por lo tanto, representa la limitación que se puede aplicar a un tamaño de baño determinado.

Horno de Arco Eléctrico.

Este tipo de hornos para la fusión de metales es como se muestra en la figura 2.3 del anexo 6. Consiste de una coraza de acero que está revestida con refractario, su forma tiene una sección transversal circular cuya parte inferior es un casquete esférico unido a un cilindro. Posee un techo circular móvil, donde van colocados tres electrodos de grafito por donde pasa la corriente eléctrica hacia el metal que se ha depositado en el horno. La fusión del metal se logra por los arcos que se forman entre los electrodos y el metal cargado; ese arco voltaico junto a la radiación proveniente de las paredes, son los causantes de que el metal se funda. El arco se regula mediante controles automáticos que suben y bajan los electrodos, de manera que el voltaje del arco sea constante.

Normalmente los requerimientos eléctricos para este tipo de hornos, obliga a tener conexiones con una línea principal de alimentación de 33 Kilovoltios. Uno de los más importantes parámetros que gobiernan la economía de operación del horno es el tamaño del transformador en relación al peso teórico de la carga. Desde un punto de vista teórico, se requieren aproximadamente 370 kW/h de electricidad para fundir una



tonelada de acero y sobrecalentarla hasta la temperatura de vaciado; sin embargo, en la práctica lo requerido es un 35% más alto, dependiendo de la potencia de entrada. Al fundir el metal, se forma escoria, la cual se mantiene sobre el baño por las siguientes razones: (a), para reducir la oxidación; (b), para refinar el metal; y (c), para proteger al techo y a las paredes laterales de la excesiva radiación del calor.

2.3.3 Análisis del diseño de la pieza para determinar si puede ser obtenida por fundición

Todas las ecuaciones y tablas de la siguiente metodología corresponden a las propuestas por (Goyos .L y Martínez .H, 1985) y una parte de las utilizadas por (Rodríguez Suares A. 2008).

Para fabricar la pieza primero se debe determinar si la misma se puede obtener por fundición. Para ello primeramente se debe determinar si sus espesores mínimos se pueden lograr por el método de fundición elegido.

2.3.3.1 Cálculo de los espesores mínimos de pared.

Según la metodología implantada por (Goyos .L y Martínez .H, 1985), el cálculo de los espesores mínimos se realiza de la siguiente manera:

$$N = \frac{2L + b + h}{3} \quad (\text{Para pieza vaciada}). \quad (2.1)$$

donde:

N – Espesor de pared.

L – Longitud (m).

b – Ancho (m).

h – Altura (m).

Después de calculado el valor de N se dan algunas recomendaciones para espesores mínimos de diferentes aleaciones.

En el caso de Hierro fundido nodular: el espesor de las paredes se aumenta en un (15 – 20%) en comparación con el hierro fundido gris el que con $N < 0.5m$ el espesor de las paredes puede ser de 1.5 – 2.0mm. Para $N > 8m$ se tomará 30mm, (Goyos. L y Martínez. H, 1985).

2.3.4 Determinación de los orificios a realizarse por fundición

En las piezas fundidas los orificios de dimensiones pequeñas no se hacen generalmente debido a las dificultades que representan en el moldeo y durante el trabajo de limpieza para la eliminación de la mezcla de estos. Para el caso de las piezas de fundición nodular los orificios de dimensiones pequeñas no es necesario tener que obtenerlas por fundición usando la ecuación de (Goyos .L y Martínez .H, 1985):

$$d \leq 0.3h + 10. \quad (2.2)$$

donde:

d - Diámetro del agujero (mm).

h - Profundidad del agujero (mm).

2.3.5 Análisis de la contracción de (E)

Se entiende por contracción de la aleación a la variación de volumen que experimenta esta durante su solidificación y enfriamiento (Goyos .L y Martínez .H, 1985). En la producción se utiliza la siguiente expresión para determinar la contracción de fundición:

$$E = \frac{l_m - l_p}{l_p} \cdot 100 \quad (2.3)$$

donde:

E – Contracción de fundición. (%)

I_m – Dimensión de la plantilla.

I_p – Dimensión de la pieza fundida.

Debe tenerse cuidado a la hora de apisonar el molde ya que si el molde está demasiado compactado puede frenar la contracción lo que trae consigo un aumento de las tensiones internas dando lugar al surgimiento de rajaduras.

2.3.6 Determinar el plano divisor de la plantilla y el molde

El análisis de la colocación de la pieza en el molde se realiza conjuntamente con el análisis del plano de división de la plantilla y el molde. La superficie de división se



determina según la forma de la pieza junto a sus exigencias técnicas y las posibilidades prácticas del taller.

Conjuntamente con la determinación del plano divisor ha de decidirse cuál será la posición de la pieza para la colada. Esta decisión está influida por la forma de alimentar la pieza que se determine. Lo más común resulta realizar la colada en la misma posición que el moldeo, según (Goyos L y Martínez M, 1985).

2.3.6.1 Determinación de la inclinación de la plantilla de fundición

La inclinación se debe dar a diferentes superficies de la plantilla porque es la variación dimensional que se da a las superficies de los modelos, moldes y piezas fundidas para cumplir exigencias de fundición y construcción.

La Inclinación de fundición es la que se le da a las superficies de moldeos y machos para facilitar su extracción después de ser moldeados.

Las inclinaciones se realizarán en las superficies de la pieza que sean perpendiculares al plano de división del molde para facilitar la extracción de la plantilla, deben estar dispuestas en la dirección de extracción de esta, (Goyos L y Martínez M, 1985).

2.3.7 Análisis de las sobremedidas de maquinado

La obtención de una pieza por el proceso de fundición no garantiza el acabado superficial de la misma, por lo que generalmente estas requieren de un maquinado posterior de sus superficies. Es por eso que al diseñar una pieza para ser fundida se debe indicar una sobremedida de maquinado para eliminar los defectos derivados del proceso de fundición.

Las sobremedidas son añadidas a las superficies, para que cuando le apliquemos el maquinado se puedan llevar las dimensiones de la pieza a las medidas establecidas en el diseño. Para obtener estas sobremedidas se tiene en cuenta las dimensiones básicas (b) y determinantes (S). Estas dimensiones se toman a partir de (Goyos L y Martínez H, 1985).

El grado de precisión de la sobremedida de maquinado se indica con el número de NC seguido de las letras A, B, y C, luego se señala el número que define el tipo de aleación (1 para el acero y 2 para otro tipo de aleación fundida).

2.3.8 Determinación de la posición del macho y sus portadas

El macho se debe ubicar en los orificios que salen por fundición, según la condición de la ecuación 2.2. Este debe dar forma acabada a la superficie del agujero de la pieza con la precisión determinada, tiene que garantizar la salida libre de los gases, su fácil construcción y su fácil extracción durante el proceso de limpieza. El macho tiene que poseer gran resistencia mecánica, flexibilidad, resistencia térmica, resistencia a la erosión, según (Goyos L y Martínez M, 1985).

Determinación de la portada del macho.

Las portadas de los machos son las partes salientes de apoyo de los machos, que no entran en contacto con el metal líquido. Las portadas determinan la estabilidad del macho en el molde, la exactitud de su posición y la seguridad de salida de los gases, que se desprenden del macho durante el llenado, (Goyos L. y Martínez H., 1985).

Por sus dimensiones las portadas de los machos tienen que soportar primero las cargas del peso propio del macho y de la presión del metal; en segundo lugar, la presión específica sobre la portada del molde no debe superar lo permisible.

2.3.9 Determinación de las dimensiones de las cajas de moldeo

Se determina por las dimensiones de la pieza fundida, por la cantidad de piezas en la caja de moldeo, por su posición, las dimensiones de las mazarotas, sistema de alimentación y por las dimensiones de la portada de sus machos.

Las dimensiones de la caja de moldeo no deben ser excesivas porque aumenta la laboriosidad de la producción del molde y el consumo de la mezcla de moldeo. Las distancias mínimas entre las diferentes partes de la cavidad del molde y las partes de la caja de moldeo se obtienen según (Goyos. L y Martínez. H, 1985).

2.3.10 Cálculo y diseño de las mazarotas

La determinación de las posiciones de las mazarotas así como la cantidad de las mismas se pueden determinar por la experiencia práctica del diseñador al observar la propia geometría de la pieza y analizar los módulos de las diferentes partes de la



misma, intensificándose este valor en torno a los nudos térmicos. Según el análisis, las mazarotas deben estar en correspondencia con las zonas de mayor masividad (mayor nudo térmico), (Goyos L y Martínez M, 1985).

2.3.10.1 Cálculo del rechupe específico en el hierro fundido

Para el cálculo del rechupe específico nos basaremos sobre la metodología (Goyos L. y Martínez H, 1985).

Es posible evaluar el rechupe del hierro fundido mediante la expresión:

$$RE = 4.9 - \%C \cdot \left(2.9 - \frac{1}{\%Si} \right) + \frac{6.3 - \log d}{\%Si} \quad (2.4)$$

donde:

RE - Rechupe específico (%).

d - Espesor de la pieza (mm).

2.3.10.2 Cálculo del número de mazarotas

Para determinar el número de las mazarotas se puede utilizar la siguiente expresión, según (Goyos L y Martínez M, 1985):

$$i = \frac{L - nDA_{II} - mDA_{III}}{D_{cm} + 2DA_I} \quad (2.5)$$

donde:

i – Número de mazarotas necesarias.

L – Longitud a alimentar de la pieza (mm).

n – Número de extremos libres en la L analizada.

m – Número de enfriadores presentes en la L analizada.

Nota: n = m = 0, porque la pieza no se considera con extremos libres ni tampoco se le instalan enfriadores en el proceso de fusión.

D_{cm} – Dimensión del cuello de la mazarota según el eje de la longitud L (mm).

DA – Distancia de alimentación (mm).



Nota: Los parámetros (DA y Dcm) para materiales de hierro fundido así como las posiciones de las mazarotas y la cantidad de las mismas se toman generalmente de acuerdo con la experiencia que tenga el operador en la fundición al observar la propia geometría de la pieza y analizar los módulos de las diferentes partes de la misma, intensificándose este valor en torno a los nudos térmicos. Según el análisis, las mazarotas deben estar en correspondencia con las zonas de mayor masividad (mayor módulo).

$$D_{cm} = 2 \cdot T \quad (2.6)$$

$$DA = 1.5 \cdot T \quad (2.7)$$

donde:

T – espesor (mm).

2.3.10.3 Métodos de los módulos

El método parte de que la mazarota debe garantizar dos condiciones:

La mazarota debe garantizar que su módulo sea un 20% mayor que el de la pieza para que alimente satisfactoriamente a esta. Por otra parte la mazarota debe contener suficiente estado líquido para alimentar la pieza teniendo en cuenta la utilización del metal en la mazarota y su propio rechupe (Goyos L. y Martínez H, 1985).

Módulo de mazarota:

$$M_M \geq 1.2 \cdot M_p \quad (dm). \quad (2.8)$$

donde:

M_M - Módulo de mazarota.

M_p - Módulo de la pieza.

Módulo de la pieza:

Para el cálculo del módulo de la pieza se dividió la misma en figuras geométricas conocidas diferentes para después sumarlas todas, las ecuaciones se muestran a continuación:

$$M_{tp} = M_c + M_{tn} + M_{tmu} \quad (dm). \quad (2.9)$$

donde:

M_c – Módulo del cilindro.

$$Mc = \frac{H \cdot \delta}{2 \cdot H + \delta} \quad (dm). \quad (2.10)$$

Mtn – Módulo total de los nervios.

$$Mn = \frac{1}{\left(\frac{2}{\ln}\right) + \left(\frac{2}{an}\right) + \left(\frac{2}{hn}\right)} \quad (dm). \quad (2.11)$$

Mtmu – Modulo total de los muñones.

$$Mmu = \frac{H1 \cdot \delta 2}{2 \cdot H1 + \delta 2} \quad (dm). \quad (2.12)$$

En el caso de los nervios y los muñones este valor se multiplica por el número existente en la pieza de cada uno.

2.3.10.4 Cálculo del volumen de la mazarota y pieza

Para la realización de este cálculo se divide la pieza en diferentes secciones, ver figura 2.4 del anexo 7. Aunque las diferentes secciones de la pieza poseen desiguales valores, la solidificación de la misma se efectúa de abajo hacia arriba por lo que, en este caso, la sección II le suministra metal a la sección I, la sección III a la II y así sucesivamente hasta llegar a la sección V que es la última en solidificar por encontrarse en la cima de la pieza. Siguiendo este orden de solidificación tendremos que el volumen del rechupe de la parte I debe ser alimentado por la parte II con lo que esta se comportará a los efectos del cálculo como si su volumen real se incrementara con el volumen de metal necesario para satisfacer el rechupe de I.

De forma similar para determinar el volumen de rechupe de la parte III se considerara el volumen real de la parte incrementado con el rechupe que requiere la parte II y así sucesivamente (Goyos L. y Martínez H, 1985).

Volumen de la parte número 1.

$$V_{p1} = V_1 \cdot \frac{RE}{U - RE} \quad (dm^3). \quad (2.13)$$

Volumen de la parte número 2.

$$V_{p2} = (V_{p1} + V_2) \cdot \frac{RE}{U - RE} \quad (dm^3). \quad (2.14)$$

Volumen de la parte número 3.

$$Vp3 = (Vp2 + V3) \cdot \frac{RE}{U - RE} \quad (dm^3). \quad (2.15)$$

Volumen de la parte número 4.

$$V_{p4} = (V_{p3} + V_4) \cdot \frac{RE}{U - RE} \quad (dm^3). \quad (2.16)$$

Volumen de la mazarota.

La mazarota debe contener suficiente metal en estado líquido para alimentar la pieza y su propio rechupe, por lo que el volumen de la misma se determina por la siguiente expresión:

$$Vm = (Vp4 + V5) \cdot \frac{RE}{U - RE} \quad (dm^3). \quad (2.17)$$

Volumen de la pieza.

$$Vp = V1 + V2 + V3 + V4 + V5 \quad (dm^3). \quad (2.18)$$

donde:

V1, V2..., V5 – Volumen de las diferentes secciones de la pieza.

V_m – Volumen de la mazarota (dm^3).

RE – Rechupe específico (%).

U – Es el porcentaje de utilización del metal en la mazarota depende de la forma de esta, (Goyos. L y Martínez. H, 1985), para mazarotas arriñonadas es de 14%.

2.3.10.5 Cálculos de las dimensiones de la mazarota

La metodología que se emplea a continuación es la utilizada para los hierros fundidos en el taller de fundición del Combinado Mecánico, la misma da los valores más exactos.

Diámetro inferior del cuello de la mazarota.

$$d = 0.8 \cdot N \quad (mm). \quad (2.19)$$

donde:

N – Es la sección del nudo térmico.

Longitud inferior del cuello de la mazarota.

[illegible]

donde:

r – radio, que se calcula por la ecuación: $r = \frac{d}{2}$

Lm – Perímetro del diámetro medio de la sección donde va ubicada la mazarota.

Diámetro superior del cuello de la mazarota.

[illegible]

Altura de corte de la mazarota.

$$k = 0.15 \cdot d \quad (mm). \quad (2.22)$$

Altura del cuello de la mazarota.

$$h = (0.25 \rightarrow 0.3) \cdot D \quad (mm). \quad (2.23)$$

Radio inferior del cuello de la mazarota.

$$ri = 0.3 \cdot d \quad (mm). \quad (2.24)$$

Radio superior del cuello de la mazarota.

$$R = d + (1 \rightarrow 2) \quad (mm). (2.25)$$

Angulo de inclinación del cuello de la mazarota.

$$\beta \approx (45 \rightarrow 60)^0. \quad (2.26)$$

Para la determinación de la altura total de la mazarota se debe tener en cuenta que desde el diámetro superior del cuello de la mazarota hasta la parte más alta, cada 8mm

de altura la dimensión se debe extender o abrir 1mm. Esta consideración se toma de acuerdo a la experiencia de los fundidores en el taller 08 de la Empresa Mecánica del Níquel.

2.3.11 Cálculo y diseño del sistema de alimentación

De acuerdo con la metodología de (Goyos. L y Martínez. H, 1985) para el cálculo de la sección de control se utilizan diferentes métodos de cálculo; los más comunes son la expresión de OSSAN y el Método de las Velocidades Especificas de Vertido.

Para el caso de esta pieza se utiliza el segundo método porque es más cómodo trabajarlo ya que el mismo es una simplificación de las ecuaciones de OSSAN. Este método es el que se utiliza en el taller 08 de la EMNI, según especialista en fundición Ramón Renato Rodríguez.

Cálculo del área de control.

$$Ac = \frac{G}{t \cdot Ke} \quad (cm^2) \dots \dots \dots (2.27)$$

donde:

G – Masa del metal que circula (kg).

t – Tiempo de colada (s).

Ke – Velocidad específica de vertido ($kg/s \cdot cm^2$).

Cálculo de la velocidad específica.

$$Ke = a \cdot \left(\frac{G}{Ve} \right) + b \quad (kg/s \cdot cm^2) \dots \dots \dots (2.28)$$

donde:

a, b – Coeficientes. Estos se determinan de acuerdo a la aleación y las condiciones del molde, según (Goyos L y Martínez M, 1985).

Ve – Volumen espacial (dm^3).

Cálculo del peso del metal líquido:

$$G = (V_m + V_p) \cdot \sigma \quad (kg). \quad (2.29)$$

donde:

$$\sigma = 7.2 \frac{Kg}{dm^3} \quad \text{Peso específico del hierro fundido.}$$

V_m – Volumen de las mazarotas (dm^3).

Vp – Volumen de la pieza (dm^3)

Cálculo del tiempo de colada.

$$t = 0.97 \cdot \sqrt{G} \cdot S \quad (seg.) \quad (\text{Para el caso de hierro nodular}). \quad (2.30)$$

donde:

G – Masa del metal que circula (kg).

S – Coeficiente de espesor, este coeficiente se selecciona en dependencia del espesor predominante en la pieza a fundir.

El espesor predominante (δ), para determinar el coeficiente S, lo escogemos de acuerdo a lo valores de (41 – 80) mm.

Relaciones de colada.

Las relaciones de colada se determinan según (Goyos. L y Martínez. H, 1985). Después de determinadas las relaciones de colada y el área de control se procede al cálculo de las dimensiones de los escoreadores y alimentadores, y a normalizar dichas dimensiones, estas dimensiones se pueden normalizar (Goyos. L y Martínez. H, 1985, pág. 175 – 176) en dependencia de la sección de estos.

2.3.11.1 Cálculo de las áreas del sistema de alimentación

Sección del alimentador:

$$\Sigma Aal = \frac{Ac \cdot Aal}{4} \quad (cm^2). \quad (2.31)$$

Sección del escoriador:

$$\Sigma A_{esc} = \frac{A_c \cdot A_{esc}}{2} \quad (cm^2). \quad (2.32)$$

Sección del tragadero:

$$\Sigma Atrag = Ac \cdot Atrag \quad (cm^2). \quad (2.33)$$

donde:

Aal – Área del alimentador.

Aesc – Área del escoreador.

Atrag – Área del tragadero.

Diámetro del tragadero:

$$di = \sqrt{\frac{4 \cdot \sum Atrag}{\pi}} \quad (mm).(2.34)$$

Diámetro superior del tragadero:

$$ds = 1.5 \cdot dt \quad (mm). \quad (2.35)$$

2.3.12 Determinación de los parámetros para el llenado del molde, el tiempo de enfriamiento y de desmoldeo

Dentro de los parámetros que influyen en el llenado del molde la temperatura de vertido es uno de los esenciales. Para el cálculo de los tiempos de enfriamiento se emplea la metodología de (Belay G. E. 1970).

Temperatura de vertido.

Al llenar los moldes con hierro nodular para evitar la escoria debe utilizarse una cuchara en forma de sifón o con vertido por el fondo. Si se utilizan cucharas normales abiertas o de tambor para evitar que caiga la escoria sobre el metal en el molde se le añade una capa superficial de arena de cuarzo.

Con una temperatura óptima de sobrecalentamiento la aleación tiene menos inclusiones extrañas y aumentan las propiedades mecánicas del hierro. La temperatura de vertido del hierro nodular debe ser mayor que la del hierro gris corriente para asegurar una mayor densidad en la pieza. También se debe tener en cuenta que el aumento del sobrecalentamiento del metal en el horno y del mantenimiento de este en el estado líquido provoca no solo cambios en el estado de agregación sino también en su composición química, influyendo en esto el contenido de gases.

2.3.12.1 Determinación de la duración de los tiempos de enfriamiento

El proceso de enfriamiento de las piezas de hierro fundido presenta algunas particularidades con respecto al acero. Lo fundamental en este caso del hierro es que una extracción prematura de la pieza del molde puede provocar el blanqueamiento de la fundición al entorpecerse la grafitización.



Se recomienda no desmoldear la pieza de hierro hasta que no alcance temperaturas de 700°C o menores.

Según estudios realizados por (Goyos. L y Martínez. H, 1985) el tiempo de enfriamiento para el hierro fundido se recomienda que sea:

Masa de la pieza	Espesor (mm)	Tiempo (horas)
2000 – 5000Kg	50 - 70	12 - 16

2.3.12.1.1 Cálculo de los tiempos de enfriamiento

El cálculo teórico de la duración del enfriamiento de las piezas en el molde es muy complejo y, a causa de un estudio insuficiente de varias constantes físico-químicas necesarias no se garantizan resultados precisos.

Por esto en la práctica, se utilizan métodos simplificados del cálculo de la duración del enfriamiento de la pieza en el molde o se utilizan diferentes tipos de nomogramas y tablas, elaborándose en datos generalizados en la práctica.

Según (Belay G. E. 1970) el enfriamiento del metal en movimiento durante el proceso de vertido en el molde (primera etapa del proceso de enfriamiento) no se estudia aisladamente, ya que es muy difícil descubrirlo analíticamente. Para determinar la duración de la extracción del calor de sobrecalentamiento sin considerables errores en los cálculos, se toma la temperatura al comenzar el enfriamiento, igual a la temperatura vertido. Posteriormente la extracción de calor del sobrecalentamiento lo consideramos como la primera etapa del enfriamiento. Se puede calcular el tiempo necesario para la extracción del calor de sobrecalentamiento determinando el balance térmico de la pieza enfriada durante dt .

Al estudiar el enfriamiento de la pieza en el molde se utilizan las siguientes variables:

F - superficie de la pieza o del molde, m^2

c - capacidad calorífica del material, $kcal/kg\ ^\circ C$

γ - peso específico del material, kg/m^3

V - volumen, m^3

M – Módulo, m

T_v - temperatura del metal durante el vertido, $^\circ C$

T_L - temperatura al principio de la cristalización (líquidus), $^{\circ}C$

T_m - temperatura del molde, °C

T_s - temperatura al final de la temperatura de la cristalización, °C

T_{des} - temperatura de desmoldeo, °C

dt - gradiente de temperatura por la sección de la pieza solidificada que caracteriza la intensidad de su enfriamiento.

x_1 - mitad del espesor de la pieza o radio de la pieza cilíndrica o esférica, m

ρ - calor latente ($kcal/Kg$).

λ - conductividad térmica ($kcal / m h ^{\circ}C$).

v_m - velocidad media de la solidificación, mm/min .

R_1 - dimensión equivalente de la pieza, *mm*

b_m - coeficiente de la acumulación de calor del material, $Kcal/m^{\circ}C h^{0.5}$

2.3.12.1.2 Etapas de enfriamiento de una pieza en un molde arena – arcilla

- Enfriamiento del metal en movimiento en el molde.
- Extracción del calor de sobrecalentamiento del metal líquido inmóvil.
- Extracción del calor de cristalización (solidificación).
- Enfriamiento de la pieza solidificada.

Por el orden de análisis se estudia de la manera siguiente:

1. La extracción del calor de sobrecalentamiento se considera como la primera etapa del enfriamiento y se considera como el principio del proceso de enfriamiento, se supone $\tau = 0$ y la temperatura del metal líquido es igual a la temperatura del vertido $T_1 = T_v$.
2. El tiempo de extracción del calor de sobrecalentamiento τ_2 (tiempo de la segunda etapa de enfriamiento).

Como: $\frac{V}{E} = M$

$$\sqrt{\tau_2} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{M \cdot \gamma \cdot c_1}{bm} \cdot \frac{T_V - T_C}{T_V - T_m} \quad (\text{horas}^{0.5}). \quad (2.36)$$



T_c – Temperatura de cristalización de la pieza, si el material de la pieza es una aleación, entonces la primera aproximación será:

$$T_c = \frac{T_L + T_S}{2}$$

3. La extracción del calor de cristalización, corresponde a la tercera etapa de enfriamiento de la pieza en el molde se determina como:

$$\sqrt{\tau_3} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{M \cdot \gamma \cdot \rho_1}{bm \cdot (T_c - T_m)}} \quad (\text{horas}^{0.5}). \quad (2.37)$$

4. La duración del tiempo enfriamiento de la pieza hasta la temperatura de solidificación se considera la cuarta etapa de enfriamiento (τ_4).

$$\sqrt{\tau_4} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{M \cdot \gamma \cdot c_1}{bm} \cdot \frac{T_S - T_{des}}{T_S - T_m}} \quad (\text{horas}^{0.5}). \quad (2.38)$$

El tiempo total del enfriamiento de la pieza en el molde desde su vertido hasta la solidificación será igual a la suma de la duración de las tres etapas del proceso de enfriamiento.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_2} + \sqrt{\tau_3} + \sqrt{\tau_4} \quad (\text{horas}^{0.5}). \quad (2.39)$$

Velocidad media de la solidificación.

La velocidad media de solidificación depende de la dimensión equivalente de la pieza, esta se determina por la siguiente expresión, según (Belay G. E. 1970):

$$v_m = \frac{R_1}{\tau_3 - \tau_2} \quad (2.40)$$

Control de los procesos de formación de la pieza.

En la formación de las propiedades y de la calidad de una pieza fundida influye el carácter de la solidificación que condiciona los procesos de formación de los rechupes por contracción, porosidad, grietas en caliente y en frío y también las tensiones interiores.

El carácter del proceso de solidificación de la aleación depende de las magnitudes:

- Intervalo de la temperatura de cristalización.



una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

A pesar de su carácter aproximado, el MEF (método aproximado desde múltiples perspectivas: Discreción, Interpolación, Utilización de métodos numéricos.) es una herramienta muy útil que permite realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente por los métodos analíticos clásicos.

2.4.1 Base del Método de los Elementos Finitos

Las aplicaciones prácticas de la mecánica del sólido deformante pueden agruparse en dos grandes familias:

- 1) Los problemas asociados con sistemas discretos.
- 2) Los problemas asociados a sistemas continuos.

En los primeros sistemas que se analizan están divididos de forma natural en elementos claramente definidos. En el caso, por ejemplo, el análisis de estructura de un edificio en el que cada viga constituye una entidad aislada bien definida.

En los segundos el sistema no puede ser dividido en forma natural en unidades simples, por lo que su análisis resulta mucho más complejo, lo que trae consigo que se haga referencia al cálculo estructural.

El principio del método consiste la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (modos).

En el MEF se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento en los que se subdivide, queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad) asociados al los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (modos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los modos a través de una adecuada función de interpolación.

Como puede apreciarse en lo dicho, en el método de los elementos finitos son casi esenciales los conceptos de "discretización" o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de "interpolación", o acción de



aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto el MEF es un método aproximado desde múltiples perspectivas:

- a) Discretización.
- b) Interpolación.
- c) Utilización de métodos numéricos.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura. La discretización correcta depende de diversos factores como son el tipo de información que se desea extraer del modelo o tipo de sollicitación aplicada.

Actualmente el MEF ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física formulable como un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, etc.

2.4.2 ANSYS versión 10.0

El mundo industrializado de hoy exige cada vez más el uso de escenarios complejos de simulación en los que se incluyen simultáneamente varios fenómenos físicos. En el pasado se requería para ello la utilización de varios códigos diferentes y de laboriosos procesos de integración de los resultados.

Ansys versión 10.0 ofrece la posibilidad de realizar de forma acoplada análisis estructurales, térmicos, de fluidos, acústicos y electromagnéticos, y todo ello en un mismo entorno de trabajo, compartiendo modelos matemáticos y accediendo a todas las capacidades de la gama de productos ANSYS. Para conseguirlo este programa incluye la posibilidad de acoplamiento directo (matricial) o secuencial (con vectores de carga), para resolver las magnitudes físicas de las diferentes interacciones: termo-mecánica, electro-mecánica, fluido-estructural, etc. De esta forma puede aplicarse a campos tan diversos como la generación de energía, la biotecnología, los sistemas de enfriamiento, los sistemas MEM, etc.



ANSYS es un revolucionario entorno de trabajo que permite integrar en una sola herramienta desde los análisis preliminares más simples hasta los más complejos estudios de detalle y validación. La eficacia del entorno se basa en tres pilares básicos: la facilidad de manejo, la automatización del proceso de simulación y la transferencia de información. Por tanto es un sistema que permite integrar todas las herramientas necesarias a lo largo del desarrollo: generación y modificación de la geometría, simulación de su comportamiento, estudio de modelos de elementos finitos, estudios de sensibilidad y optimización de cualquier parámetro, conexiones con diferentes CAD 3D, PDM e incluso la integración de software propio de una empresa determinada al ser ANSYS Workbench una plataforma abierta y fácilmente programable.

En definitiva toda esta tecnología tiene un único fin: acortar al máximo los tiempos de desarrollo del producto, aumentando de forma significativa el conocimiento de su respuesta a las condiciones de trabajo, el margen de cumplimiento de sus especificaciones y la velocidad de generación de nuevas versiones de producto.

2.4.3 Aplicación de la simulación al proceso de solidificación

Éste es un análisis transitorio de transferencia de calor del proceso de fundición del tramo de árbol central. El objetivo es rastrear la distribución de temperatura en la pieza de hierro fundido y el molde durante el proceso de solidificación que ocurre en un tiempo aproximado de 12 horas de duración. El modelo es hecho en un molde de arena, la convección ocurre entre el molde de arena y el aire ambiente.

Se realiza un análisis en 2D de una sección de la pieza en el molde. Se usa media simetría para reducir el tamaño del modelo, es decir, una sección de la pieza en el molde.

El material del molde (arena) tiene las propiedades de materiales constantes. La pieza de hierro fundido tiene temperatura dependiente de una conductividad térmica y de la entalpía; los dos se entran en una mesa de valores contra la temperatura. La propiedad de la entalpía en la meza de valores captura la capacidad de calor latente del metal de como solidifica. Se ignoran los efectos de la radiación.

El control de la solución se usa para establecer varias opciones del no lineal, incluyendo automáticamente el tiempo. Los tamaños de paso de tiempo más pequeños se usarán durante la transición del metal fundido al estado sólido.



2.4.3.1 Pasos para la simulación del proceso

1. Se prefija el análisis térmico.
2. La Geometría de la entrada la pieza fundida.
3. Se definen las propiedades los materiales.
4. Se definen las propiedades de los materiales contra la temperatura.
5. Se define el tipo del elemento.
6. Se genera la malla del modelo.
7. Se aplican las cargas de la convección en las líneas del límite expuestas.
8. Para obtener la solución se define el tipo del análisis.
9. Se examina el control de solución.
10. Es especifican las condiciones iniciales para la transición.
11. Se pone el tiempo, tamaño de paso de tiempo, y los parámetros relacionados.
12. El control de rendimiento.
13. Se resuelve.
14. Se entra en el procesador y se definen las variables.
15. Se traza la temperatura contra tiempo.
16. Se prepara para animar los resultados.
17. Se anima los resultados.

2.5 Conclusiones del capítulo

- Se puede asegurar que con el diseño adecuado de las mazarotas, sistema de alimentación y selección de los machos se obtienen piezas fundidas de buena calidad.
- El cálculo de los tiempos de enfriamiento y la simulación del proceso de solidificación en el molde por el método de los elementos finitos (ANSYS versión 10.0) garantizará que las tecnologías establecidas cumplan con las premisas y detalles necesarios para la fabricación de la pieza con la mayor calidad y el mayor ahorro de recursos posible.

CAPITULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Introducción

Cualquier inversión realizada en la industria contemporánea solo es posible si se verifica desde el punto de vista económico para garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del entorno. Es una realidad que cada día el desarrollo de la economía a nivel mundial afecta en mayor medida el medio ambiente, por eso se realizan labores encaminadas a frenar este mal que azota al mundo.

Los objetivos del capítulo son: definición de los materiales de los tramos de los árboles centrales de la ECG y RRL de Nicaro. Establecer la comparación de los métodos y materiales empleados así como definir la tecnología de fundición a utilizar. Además de examinar los resultados de la MEF y desarrollar la valoración económica relacionada con el proceso de fabricación por fundición y el análisis de las afectaciones provocadas por éste al medio ambiente.

2.1 Definición de los materiales de los tramos de los árboles centrales de ECG y RRL de Nicaro.

Para la estandarización de los tramos de árbol central de ambas empresas se escoge una aleación de hierro fundido marca FeNiMo según la norma GOST 1849-87 (hierro nodular Ni–Mo con matriz Perlita – Cementita y grafito nodular o esferoidal), cuya temperatura de fusión es de 1370°C y la temperatura de vaciado es de 1450 - 1470°C.

Con esta fundición no solo se pretende una reducción de los costos de fabricación, también reducir los gastos que genera el mantenimiento de las instalaciones donde estas piezas operan debido a la diversidad de equipos y maquinarias.

Para la selección del material se tiene en cuenta las condiciones de trabajo a que esta expuesta la pieza que se analiza como son la Torsión y las Altas temperaturas.

Por tanto los criterios más importantes para la selección del material de la pieza son la Resistencia Mecánica y la Resistencia a elevadas temperaturas.

Además esta aleación es mejor ya que tiene características mecánicas y de resistencia en diferentes medios muy superior a las restantes aleaciones, ejemplo, el hierro fundido



al níquel laminar que posee calidad metalúrgica y mecánica a pesar de que el grafito laminar debilita la matriz de la estructura, es decir la interrumpe más que el nodular por lo que esta aleación es mucho más sensible al agrietamiento producto de las tensiones térmicas y mecánicas a la que están sometidas estas piezas, caso contrario al nodular que absorbe esto con mayor facilidad sin dar lugar al agrietamiento. En las tablas 3.1 y 3.2 del anexo 6 e muestran las características generales de esta aleación.

Efectos de la composición química.

El fundidor tiene muy pocas posibilidades de influir sobre la velocidad de enfriamiento durante la solidificación de las piezas. Sin embargo, puede controlar, considerablemente, la composición química de la pieza la cual tiene vital importancia. Entre los elementos que aparecen en esta, los principales grafitizantes son, en orden descendente: el carbono, el silicio, y el níquel. El elemento antigrafitizante es el manganeso. Las piezas hechas con grafito esferoidal son, en la mayoría de los casos, de estructura gris. Este resultado es apenas imposible sin la presencia de 1 a 3% de silicio. Por tanto se puede considerar que la fundición de hierro nodular es, en realidad, una aleación de hierro, carbono, manganeso y, también, de silicio (Enrique, 1986).

3.3 Resultado de los cálculos de la tecnología de fundición

De la metodología empleada en el capítulo II se obtienen los siguientes resultados:

3.3.1 Materiales usados

A continuación se muestran los diferentes materiales que se van a usar para la fusión de la aleación.

3.3.1.1 Arena de moldeo

La arena que se utiliza para la confección del molde es la arena sílice que es la más abundante y la más barata. La sílice se encuentra comúnmente en la naturaleza bajo la forma de granos de cuarzo.

3.3.1.2 Tipo de Mezcla

El tipo de mezcla que se va a usar es la mezcla autofraguante la producción de Moldes y Machos. En la industria de la fundición este es uno de tantos sistemas que se utilizan y se caracteriza por fraguar o curar a temperatura ambiente, sin la necesidad de aplicar calor ni hacer pasar ningún gas como catalizador.

3.3.1.3 Tipo de Resina

La resina que se utiliza para el moldeo de esta aleación es la resina furánica de marca CHEM – REZ 211. La misma es una resina furánica autofraguante a temperatura ambiente en presencia de un catalizador ácido (CHEM – REZ 2009, 2011, 2014). La elección del catalizador depende de la rapidez de curado que se desee y la economía de la mezcla de arena.

La temperatura optima de almacenaje para el CHEM – REZ 211, es la comprendida entre los 15 y 30 °C.

- a) Densidad: 1.135 – 1.150 g/cm³ a 20 °C.
- b) Contenido de alcohol fulfurílico: 70 %.
- c) Color: amarillo marrón.

3.3.1.4 Tipo de Catalizador

El catalizador que se utiliza en la mezcla de moldeo para la fabricación del tramo de árbol central es CHEM – REZ 2011. Este catalizador está especialmente elaborado para la utilización como endurecedores de las resinas furánicas, recomendado tanto para arena nueva como para arena recuperada. El tiempo de endurecimiento puede variar dependiendo de la temperatura de la arena y la calidad del catalizador a utilizar. Se puede utilizar entre el 25 y el 70%, aunque su diapasón normal es de 30 a 50%, dependiendo de la arena nueva o recuperada. Este producto es un líquido de color marrón. Se trata de una solución orgánica en base ácido. Según se plantea en la investigación de (Rodríguez Suares A. 2008).

Propiedades físicas y químicas del catalizador.

- Estado líquido.
- Aspecto líquido viscoso, amarillento.
- Olor fenólico.
- Punto de ebullición es a 200 °C.
- Su punto de inflamación es a 108 °C.
- Es insoluble en agua.



La composición de los componentes de la mezcla autofraguante utilizada para el moldeo es:

- De 1- 3% de resina furánica CHEM – REZ 211 (2%).
- Dentro de este por ciento de resina existe un 30 - 50% de catalizador CHEM – REZ 2011.
- Un 98% de arena de sílice.
- Dentro de este por ciento de arena existe un 85% de arena de retorno.

2.3.2.5 Horno de Inducción utilizado para la fusión del hierro nodular

El horno que se utiliza para la fusión del hierro nodular es el de inducción debido a que el tiempo de fusión es menor, es menos contaminante, se produce un hierro más limpio, además de un control más estricto de la composición química del baño metálico. Para obtener estas condiciones deberá partirse de una materia prima de alta calidad, con el menor contenido de elementos perjudiciales como azufre, fósforo, manganeso. El uso de un horno de arco eléctrico traería como consecuencia todo lo contrario a lo expuesto por el horno de inducción.

La desventaja que podría presentar este horno es el intenso desgaste del refractario, debido a la gran turbulencia del baño metálico, de aquí que se requiera un refractario de alta alumina.

El horno de inducción utilizado es de la marca Magnethermic Europe de fabricación inglesa, en el mismo se pueden fundir aleaciones de hierro y aceros, tiene además las siguientes características técnicas:

- Potencia de trabajo: 500 kW.
- Frecuencia: 1000 Hz.
- Temperatura hasta 1700 °C.
- Consumo: 860 kW / h por tonelada de metal
- Capacidad: 1000 kg

3.3.2 Análisis de los resultados en la fundición

A continuación se muestra una relación de los resultados obtenidos mediante el desarrollo de esta metodología, cuya referencia bibliográfica pertenece a (Goyos. L y Martínez. H, 1985).

3.3.2.1 Espesor mínimo a realizar por fundición

Con la realización del cálculo del espesor mínimo de la pieza se determinó la dimensión equivalente (N), para una pieza vaciada.

De ahí que:

[illegible]

Para este resultado, como espesor mínimo de pared correspondiente al hierro fundido nodular se escogió, según el gráfico de espesores mínimos de piezas (Goyos. L y Martínez. H, 1985), un valor de 13 *mm*.

3.3.2.2 Dimensión de los orificios fundidos

En el cálculo para la obtención de los agujeros por fundición se tuvo en cuenta que la pieza posee 8 agujeros de diámetro $d_1 = 170\text{ mm}$ y $h_1 = 55\text{ mm}$, 8 agujeros de diámetro $d_2 = 220\text{ mm}$ y $h_2 = 165\text{ mm}$,

por tanto:

Para Agujero 1:

[illegible]

Para Agujero 2:

$$d \leq 59.5$$

$$200 \leq 59.5$$

Nota: como no se cumplen las condiciones se pueden obtener estos agujeros por fundición.

$$E = 0.239 \% \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .(2.3)$$

Para fundir el tramo de árbol central el plano de división se ubica a la mitad de la caja de moldeo, la plantilla se ubica de forma horizontal utilizando solo la mitad de la pieza, marcando mitad y mitad.

3.3.2.4.1 Inclinação de saída de la plantilla

En la figura 3.2 muestra el tipo de inclinación que debe llevar las superficies señaladas (ver anexo 7).

3.3.2.5 Sobremedidas de maquinado

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico

autor: Adriel Estrada Favier



observar los valores de las sobremedidas de maquinado de las superficies en la figura 3.2 del anexo 7.

3.3.2.6 Dimensiones de la portada del macho

Mediante un análisis de las dimensiones de la pieza se pudo determinar los valores y dimensiones de los juegos de portadas de acuerdo con las tablas de (Goyos L. y Martínez H., 1985), ver tabla 3.5 y 3.6 del anexo 8.

Nota: Esta longitud de trabajo se determina tomando en consideración las sobremedidas de maquinado de la pieza.

Inclinación de la portada del macho.

En el proceso de desmoldeo de la pieza, las portadas de los macho deben tener un ángulo de inclinación que permita la fácil extracción de la pieza del molde. En la figura 3.3 y la tabla 3.7 se representan estos ángulos o inclinaciones de salida (ver anexo 9).

Nota: Para los machos que son simétricos en relación con su eje horizontal, los ángulos de las portadas superiores e inferiores pueden ser iguales.

Proyección de los machos.

El macho estará ubicado de forma horizontal, y este presenta forma cilíndrica. Sus dimensiones de la longitud de trabajo (D x L) son 1218 x 2054mm.

3.3.2.7 Caja de moldeo

La caja de moldeo debe cumplir con los requisitos y dimensiones de la pieza que se va a fundir, es por ello que su construcción se hace muy importante a la hora de determinar los demás parámetros como el sistema de alimentación.

En dependencia de las distancias de la pieza al de los bordes de la caja, $a = 125 \text{ mm}$, $b = 200 \text{ mm}$, $B = 180 \text{ mm}$, $c = 75 \text{ mm}$, $K_1 = k = 60 \text{ mm}$ como se muestra en la figura 3.4 del anexo 10.

Según las longitudes normalizadas en (Goyos L. y Martínez H., 1985) la caja de moldeo presenta las siguientes dimensiones para la caja superior: Altura: 1000 mm; ancho: 1500 mm; largo: 3000 mm. Para el caso de la caja inferior del molde la altura es de 800mm.

3.3.2.8 Análisis de las mazarotas

Los tipos de mazarota que se van a utilizar son del tipo *arriñonada* ya que estas mazarotas van a ocupar mayor área en la superficie a alimentar, tarda más en solidificar y garantiza mayor solidificación permitiendo que no existan defectos por la acción del rechupe.

3.3.2.8.1 Rechupe específico del material

Para los cálculos del rehepe se tuvo en cuenta el rehepe específico de la aleación que presenta los tramos de árbol central que están instalados en estos momentos en la empresa ECG según el plano 304-470-34-005.

$REC = 1.5\%$

Resultado del cálculo:

[illegible]

RE – Rechupe específico (%).

REC – Rechufe de la aleación (%).

Nota: los valores de %Si y %C en este cálculo son aproximados ya que se encuentran dentro del rango establecido.

Con este resultado se demuestra que con la composición química de la aleación estandarizada se cumple con los requisitos técnicos durante el proceso de fabricación de la pieza. La misma al ser de hierro fundido nodular resulta poco significativo este cálculo debido al poco rechupe que experimentan estos materiales, menor que los ya instalados.

3.3.2.8.2 Número de mazarotas

[illegible]

[illegible]

[illegible]

De acuerdo al resultado que aparece en los anexos se asume que el número de mazarotas real a utilizar sean 5 ya que el porciento que falta se considera que de acuerdo con las dimensiones reales de las mazarotas se satisfaga este porciento.

Las mazarotas van distribuidas de acuerdo a las zonas de mayor masividad. Para las bridas y el espacio entre los muñones se utilizan mazarotas ovales y para los muñones se utilizan arriñonadas.

3.3.2.8.3 Método de los módulos de las mazarotas y la pieza

Según la metodología por (Goyos L. y Martínez H., 1985):

Módulo de la mazarota $Mm \geq 5.28dm$ (2.8)

El módulo de la pieza $M_p = 4.4 dm$ (2.9)

3.3.2.8.4 Volumen de las mazarotas y la pieza

Según (Goyos L. y Martínez H., 1985) tomando en consideración lo expuesto en el capítulo II como $U = 14\%$ para mazarotas arriñonadas y ovales, obtenemos los resultados siguientes:

Volumen de la parte número 1. $V_{p1} = 98.65 \quad (dm^3)$.
 .(2.13)

Volumen de la parte número 2. $V_{p2} = 130.1 \quad (dm^3)$ (2.14)

Volumen de la parte número 3. $V_{p3} = 98.65 \quad (dm^3)$ (2.15)

Volumen de la parte número 4. $V_{p4} = 130.1 \quad (dm^3)$ (2.16)

El volumen de la mazarota $V_m \geq 11.95 dm^3$ (dm^3). (2.17)

El volumen de la pieza $V_p = 556.15 dm^3$ (dm^3) (2.18)

3.3.2.8.5 Dimensiones de las mazarotas

Para el cálculo de las dimensiones de las mazarotas la sección del nudo térmico es:

$$N = 56mm$$

Diámetro inferior de la mazarota.

[illegible]

Longitud inferior del cuello de la mazarota.

$$D_{cm} = 64.3mm \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .(2.20)$$

Diámetro superior del cuello de la mazarota.

[illegible]

Altura de corte de la mazarota.

[illegible]

Altura del cuello de la mazarota.

$$h = 25\text{mm} \quad (2.23)$$

Radio inferior del cuello de la mazarota.

$$r_i = 13.5 \text{ mm} \quad (2.24)$$

Radio superior del cuello de la mazarota.

[illegible]

Angulo de inclinación del cuello de la mazarota.

$$\beta = 45^0. \quad (2.26)$$

De acuerdo con lo asumido en el Capítulo II la altura total de la mazarota varía de acuerdo a la altura de la sección a alimentar.

3.3.2.9 Dimensiones del sistema de alimentación

Como se puede observar en la expresión (2.26) se sustituyen las diferentes variables dando como resultado:

$b = 0.4$ y $a = 0.16$: para hierro gris (Goyos L. y Martínez H., 1985).

$$Ke = 0.87 \text{ kg} / \text{s} \cdot \text{cm}^2 \quad (2.28)$$

[illegible]

[illegible]

por tanto:

$$Ac = 44.49 \text{ cm}^2 \approx 45 \text{ cm}^2 \quad (2.27)$$

Las diferentes áreas normalizadas de los alimentadores y los escoriadores así como la relación de colada se establecen en las tablas 3.8 y 3.9 del anexo 9.

Nota: Esos valores fueron escogidos para un sistema con presión debido a que la sucesiva disminución de las áreas conduce a un aumento de la velocidad del flujo que garantiza que todo el sistema de alimentación se mantenga lleno de metal. Este caso permite un trabajo adecuado del escoriador, ya que este se mantiene lleno. No se utiliza el sistema sin presión debido a que este es para aleaciones que poseen baja fluidez como es el caso de algunas aleaciones no ferrosas.

3.3.2.9.1 Áreas del sistema de alimentación

El área de los alimentadores se divide entre los cuatro que lleva, por tanto:

[illegible]

Para el scoreador se divide también por el número de estos lo que da como resultado:

[illegible]

En el caso del tragadero:

[illegible]

Dimensión del diámetro inferior del tragadero del sistema de alimentación.

$$d_i = 8.46\text{cm} \approx 85\text{mm}(2.34)$$

Dimensión del diámetro superior del tragadero del sistema de alimentación.

[illegible]

Según las dimensiones normalizadas por (Francisco Jiménez M. 1976) los escoreadores y los alimentadores tienen las dimensiones que se muestran en las figuras 3.5 y 3.6 respectivamente (ver anexo 10). Estas dimensiones se normalizaron en (Jiménez M. Francisco, 1976), debido a que con las medidas que posee el sistema de alimentación los valores que aparecen en (Goyos L. y Martínez H., 1985) no satisfacen los resultados.

3.3.3 Resultado de los parámetros para el llenado del molde, el tiempo de enfriamiento y de desmoldeo

Temperatura de vertido.

$$T = (1450 - 1470)^{\circ}C$$

T – temperaturas de vertido.

El material del tramo de árbol central es un hierro nodular, según el especialista en fundición del taller 08 de la Empresa Mecánica del Níquel Ing. Ramón Renato Rodríguez la temperatura de vertido de esta aleación tiene el rango establecido.

3.3.3.1 Resultado de los tiempos de enfriamiento

Según Salsines Meriño C. 1985; las propiedades termo-físicas para la aleación son las siguientes:

$$c = 0.11 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\gamma = 7200 \text{ kg/m}^3$$

$$b_m = 185 \text{ kcal/m}^2$$

$$M = 4.4 \text{ dm (para la pieza).}$$

$$M = 5.28 \text{ dm (para la mazarota).}$$

$$T_v = 1450 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_L = 1310 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_s = 1147 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_m = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 43 \text{ kcal/m } ^\circ\text{C h}$$

$$\rho = 50 \text{ kcal/kg}$$

$$T_{des} = 550 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.3.3.2 Resultado del cálculo de las etapas de enfriamiento de la pieza en un molde arena – arcilla

Las propiedades termo-físicas se utilizan para obtener los resultados de los tiempos de enfriamiento en las diferentes etapas según (Rodríguez Suares A., 2008). Estos tiempos de enfriamiento se calculan para una temperatura de cristalización:

$$T_c = 1228.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En los cálculos que se realizaron se asumió una variación en las fórmulas 2.36, 2.37 y 2.38 las cuales aparecen en el anexo 13, con esta variación se comprobó que los resultados son los mismos lo que ayuda a simplificar un poco la realización de estos cálculos:

3.3.3.2.1 Tiempos de enfriamiento para la pieza

Tiempo de extracción de calor de sobrecalentamiento.

[illegible]

Tiempo de extracción de calor de sobrecalentamiento.

[illegible]

Tiempo de enfriamiento de la pieza hasta la temperatura de solidificación.

[illegible]

Tiempo total de enfriamiento.

$$\tau = 2.68h \quad (2.39)$$

Velocidad media de la solidificación.

$$v_m = 1.325 \text{ mm/min} \quad (2.40)$$

El pequeño valor de la velocidad media de solidificación expresa que la pieza tiene un enfriamiento lento debido a sus dimensiones.

Intervalo de la temperatura de cristalización.

$$\Delta T_c = 163 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.41)$$

Gradiente de temperatura por la sección de la pieza solidificada.

$$dt = 0.000086 \text{ } ^\circ C(2.42)$$

Por tanto se cumple: $dt < \Delta T_C$ se puede obtener formación volumétrica, de no dirigirse la solidificación se forma porosidad dispersa.

3.3.3.2.2 Tiempo de enfriamiento para la mazarota

Para el caso de las mazarotas se utilizan las mismas ecuaciones lo que cambia es la relación del Volumen y la superficie en m^2 del elemento (mazarota).

Tiempo de extracción de calor de sobrecalentamiento.

[illegible]

Tiempo de extracción de calor de sobrecalentamiento.

[illegible]

Tiempo de enfriamiento de la pieza hasta la temperatura de solidificación.

[illegible]

Tiempo total de enfriamiento.



cantidad de metal suficiente para alimentar toda la pieza logrando con ello que exista la mínima posibilidad de formación de cavidades de contracción (rechupes).

Los datos que se utilizaron en el análisis transitorio para la pieza están en la tabla 3.8 para el hierro fundido y la tabla 3.9 para el molde de arena (ver anexo 10).

3.5 Valoración económica y Medioambiental

En toda producción de piezas por fundición se genera un costo de fabricación así como problemas relacionados con el medio ambiente debido a la influencia de elementos nocivos que se encuentran dentro del mismo proceso de fusión de la aleación. A continuación se hace una valoración en ambos campos de los efectos de esta tecnología de fundición.

3.5.1 Valoración Económica

Al abordar la valoración técnica - económica del proceso tecnológico de fundición de los tramos de árbol central se toma en cuenta la importancia del ahorro en el proceso de elaboración de estas piezas en el taller donde se fabricarán, que en este caso es el taller 08 de la Empresa Mecánica del Níquel Cdte. Gustavo Machin Hoed de Beche de Moa.

En cualquier empresa productora de piezas para los costos de producción se tienen presentes fundamentalmente la mano de obra y los materiales de producción. Acabada la pieza, es necesario determinar el costo de fabricación. El mismo viene dado por el gasto de materiales fundamentales y auxiliares, energía eléctrica y salario de la fuerza de trabajo en la elaboración de la pieza.

Teniendo en cuenta la incidencia de gastos por máquinas, materiales, operarios, energía eléctrica, etc., el costo de fabricación de la pieza por el proceso tecnológico de fundición de acuerdo con el Ministerio de Finanzas y Precios (MFP), para una tonelada de material, es de 6513.71 MN y su equivalente en divisa es de 3098.55 CUC, lo que representa un ahorro de 112.41 MN y CUC debido a que anteriormente se gastaba 6626.12 MN y 3210.96 CUC.

Por tanto, para la cantidad de material que debe circular en el molde de fundición que es de 4090.46 Kg el costo para el taller de fundición es de 26644 MN y su equivalente en divisa sería de 12674 CUC lo que representa un ahorro de **459.87 MN y CUC**.



En las tablas que aparecen en el anexo 11 se muestran de forma general los diferentes gastos para los materiales que se emplearon en la elaboración de esta pieza.

3.5.2 Impacto Ambiental

En la Industria de Fundición, los procesos más contaminantes son los de fusión del metal o de las aleaciones; de allí que sea importante hacer el mayor énfasis en mantener un estricto control del proceso. Los demás procesos de la fundición donde no hay fusión de metales generan contaminación por partículas, pero no se considera que constituyan severas formas de contaminación del aire en términos de sus efectos sobre el vecindario a ella. La operación del cubilote es la mayor fuente de contaminación de emisiones de partículas, tanto en términos de fuentes de contaminación como de la intensidad de emisión de cada fuente; en segundo lugar está el proceso de fusión mediante horno de arco eléctrico; y en tercer lugar está la fusión con hornos de inducción.

Por estas razones es la importancia de establecer legislación que efectivamente controlen las emisiones industriales contaminantes del ambiente. Las Normas ISO 14000 proveen la implantación o la planificación para establecer el monitoreo y mejora del Sistema de Gerencia Ambiental, conocido como Environmental Management System, EMS.

La "Empresa Mecánica del Níquel Cdte. Gustavo Machin de Beche", es altamente generadora de residuos sólidos y gaseosos, provenientes fundamentalmente de los procesos de fundición y del proceso mecánico de maquinado. Las arenas de moldeo que se derraman poseen varios componentes como aglutinantes, melaza, que de cierta manera inciden en los suelos.

Sin embargo, existen en todas las fundiciones determinados departamentos que se encuentran con mayor o menor grado de desarrollo en todas ellas, cada uno de los cuales presentan su problema peculiar para la depuración de polvos. Estos departamentos son los de; fabricación de moldes y machos, fusión, vertido, limpiezas de piezas, fabricación de modelos, reparación de piezas fundidas y mantenimiento.

Las mezclas de moldeo que se derraman, poseen varios componentes como aglutinantes, melaza, etc, que de cierta manera inciden en los suelos. En el caso de la resina autofraguante, esta contiene alcohol fulfurílico que es nocivo por inhalación,



nocivo en contacto con la piel y por ingestión, también contiene formaldehído que es tóxico por inhalación, tóxico en contacto con la piel, tóxico por ingestión, provoca quemaduras y posibilidad de efectos irreversibles.

El CHEM-REZ 211 contiene ingredientes que pueden ser perjudiciales si se manejan mal. Por lo tanto, se recomienda precaución en su uso y manejo. Deberá evitarse el contacto con el mismo, utilizando equipo protector adecuado. La ropa contaminada debe ser lavada antes de volverla a usar.

Identificación de los peligros que producen la resina y el catalizador de las mezclas autofraguantes:

- Riesgos para el medio ambiente: Es un producto nocivo para el medio ambiente. Evitar su vertido en agua o terreno.
- Riesgos físicos y riesgos – químicos de explosión e incendio: El producto aunque no se clasifica como inflamable, los vapores en contacto con chispas o llamas pueden provocar incendios o explosiones.

Medidas a tomar en caso de vertido accidental.

Pequeños derrames: absorber con vermiculita, papel, aserrín, etc. y pasara a contenedor cerrado.

Derrames: evitar la extensión de la fuga. Bombear, si es posible a un tanque de recogida. Absorber restos con arena, tierra, aserrín, etc y pasar a contenedor cerrado. (Utilizar equipo protector).

Medidas de protección para personas: utilizar equipo de protección adecuados (gafas), guantes impermeables, ropa y botas impermeables, y si es necesario, mascarilla respiratoria adecuada.

Método para limpieza y recogida: los sólidos recogidos deben ser tratados (como residuos peligrosos).

3.6 Conclusiones del Capítulo

- Los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos, lo que indica que la metodología de cálculo es correcta.



- Los cálculos de los tiempos de enfriamiento realizados dentro del proceso de solidificación demuestran que la mazarota es lo último en solidificar posibilitando la alimentación suficiente de las cavidades de contracción.
- La simulación en ANSYS del proceso de solidificación de la pieza permite observar detenidamente como se efectúa el proceso de solidificación de la sección de la pieza
- La valoración económica realizada aportó el valor económico que representa la fabricación de la pieza por fundición el cuál fue de 26644 MN y su equivalente en divisa sería de 12674 CUC.



CONCLUSIONES GENERALES

Con el desarrollo de la investigación se pudo comprobar que:

- Con la homogenización del material de los tramos de árbol central de los Hornos de Reducción se garantizaría mejor calidad de los mismos y facilitaría los trabajos de fabricación instalación y mantenimiento.
- Con los cálculos de los tiempos de enfriamiento y la simulación de la solidificación se demuestra que la mazarota solidifica último que la sección de la pieza, indicando que las mazarotas están correctamente diseñadas para alimentar los rechupes.
- La valoración técnico-económica demuestra que con la fabricación del tramo de árbol central con material de base nodular se obtiene un ahorro considerable en los costos en cuanto a tecnología de fundición se refiere.



RECOMENDACIONES

Se establecen las siguientes recomendaciones para una mejora en futuras investigaciones:

- La composición química del metal analizado debe contener los elementos establecidos para obtener las propiedades adecuadas del material.
- Que se cumplan los pasos a seguir en la tecnología de fabricación de la pieza por fundición descrita en el presente trabajo.
- Cumplir estrictamente con las normas establecida para el proceso de moldeo de la pieza ya que de no ser así traería consigo defectos por fundición.



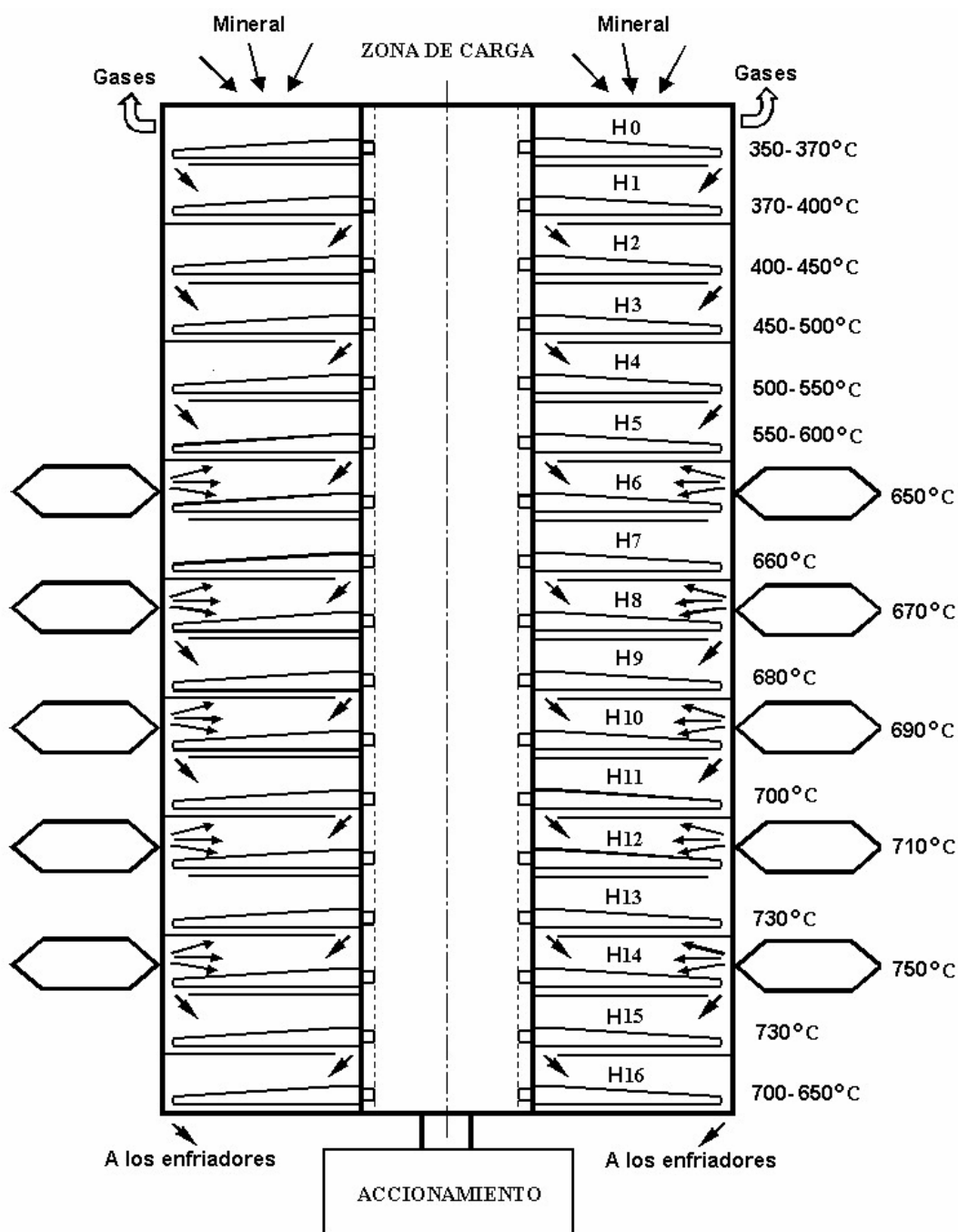
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Belay. G. E. Guía Tecnológica de Fundición. Universidad Central de las Villas. Facultad de tecnología. 1970.
2. Boyle, J. y J. Spence. *Stress analysis for creep*. Londres. Butteerwoths, 1989.
3. Chang Cardona Antonio R. *Hornos Metalúrgicos*. Ministerio de Educación Superior. ISMMMOA. 1986.
4. Enrique Gómez Fernando. *Manual del fundidor*. Ministerio de cultura. Editorial Científico – Técnica. Ciudad de la Habana. 1986.
5. García de la Figal Costales. *El método de los elementos finitos*. Ediciones Mecánica. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (ISPJAE).Ciudad de La Habana. 2002.
6. Goyos.L y Martínez. H. *Tecnología de la fundición II*. Editorial Pueblo y educación. Ciudad de la habana. 1985.
7. Hernández Costa R., Gómez Gonzáles A., Córdova Téllez y Urgellés A. *Avería del eje central del Horno 18*. Moa.2004.
8. Jiménez M. Francisco. *Compendio de tablas, gráficos y normas*. Nicaro. 1976.
9. Rodríguez Domínguez José Israel. *Procesos y equipos de la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara*. Moa. 2006.
10. Rodríguez Ramón R. *Curso de capacitación a fundidores*. Moa. 2005.
11. Rodríguez Serrano J. *Manual de operaciones de la UBP Planta de Hornos de Reducción*. Moa. 2007. 73p.
12. Rodríguez Suárez Ariana. *Solidificación en piezas fundidas de acero de medio contenido de carbono del tipo 55 Γ*. Tesis en opción al Título de Master en Electromecánica. ISMM de Moa. 2008.
13. Salsines Meriño Claro Misael. *Tecnología de Fundición*. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana. 1985.
14. Sánchez González Alfredo, López Granados Adriana y Rebollar Martínez Irene X. *Control de la calidad de Hierro Nodular en el Método Sándwich*. Artículo Técnico



- No. 2. Revista Técnica de la Sociedad Mexicana de Fundidores A. E. Junio 1988.
No. 57.
15. Software ANSYS. Version 10.0. Users Guide. Swanson Analysis Systems, Inc. 2006
16. Software AutoCAD 2000.
17. Software Matcad 2001 profesional versión 7.1
18. Velásquez del Rosario A. *Fragilización de la aleación HH por precipitación de las fases sigma*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Moa. 2002.107p.
19. Yoemmy, Ricardo. *Evaluación de la Tecnología de Fabricación de la Llanta del Transportador Rotatorio*. Trabajo de Diploma. Moa. 2007. 63p.
20. www.monografias.com

ANEXOS



Anexo 1: Esquema general de la instalación de un Horno de Reducción.

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico

autor: Adriel Estrada Favier

Se puede apreciar el inicio de una grieta transversal en uno de los tramos de eje central



Figura 1.1: Muestra del inicio de una rotura en un tramo de árbol central.



Figura 1.2: Tramo del eje central del horno fracturado por fallo de la estructura cristalográfica del material, pertenece a la zona donde se averió el horno 18.

Anexo 2: Tramos del árbol central.

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico

autor: Adriel Estrada Favier



Tabla 1.1: Datos Generales de los Hornos de Reducción.

Parámetros		U. M.	Valor
Volumen del horno		m ³	387
Rendimiento según el material		t/h	19.66
Aire para la post- combustión	En el hogar 6	m ³	2000
	En el hogar 4	m ³	1200
Presión:	En H-16	mm de H2O	1.5- 3
	En H-0	mm de H2O	10-12
Temperatura:	De gases a la salida del horno	°C	350 –380
	De gases en el horno (en H-15)	°C	760 -780
Diámetro del horno (interior)		mm	6 048
Diámetro del horno (exterior)		mm	6 800
Diámetro del eje central		mm	980
Altura de la parte cilíndrica del horno		mm	18 890
Espesor del aislamiento del árbol		mm	75
Espesor de revestimiento del horno		mm	342
Cantidad de soleras		u	17
Altura total		mm	23 500
Consumo de fuel oil	En cámara	Kg/t min	50
	Aditivo	Kg/t min	25

Tabla 1.2: Defectos de las piezas fundidas.

Grupo	Anomalías
Defectos deforma	No llenado, rebabas. Nudos, uniones irregulares.
Defectos Superficiales	Vetas, erosión, costuras, etcétera.
Perdida de continuidad	Grietas en caliente y en frío.
Defectos Internos	Poros, agujeros de rechupe, gotas frías.
Defectos del material	Estructura inadecuada, análisis químico incorrecto, etcétera.

Tabla 2.1: Composición Química del Hierro fundido de la ECG.

Marca de	Composición Química en %
----------	--------------------------



la Fundición	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo
ЧН1МШ	3.2/3.8	1.8/2.8	0.8/1.2	Hasta0.1	0.8/1.4	≤0.15	≤0.02	0.3/0.6

Anexo 3: Tablas descriptivas.

Tabla 2.2: Propiedades Mecánicas del Hierro fundido de la ECG.

Marca de la Fundición	Propiedades Mecánicas				Matriz Estructural
	Resistencia a la rotura (σ_B) Kg/mm^2	Resistencia a la flexión δ %	Módulo de elasticidad (E) Kgf/mm^2	Dureza HB	
ЧН1МШ	>25 (46.4)	>1.5	14000 - 15000	220 - 286	P, C Nodular

Tabla 2.3: Composición perlítica para la empresa RRL.

Marca de la fundición	Composición química en %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Mg
B4 – 50-2	3.6	2.43	≤0.47	≤0.1	0.90	0.80	0.05	0.08	0.05

Tabla 2.4: Propiedades Mecánicas del material de la RRL.

Marca de la fundición	Propiedades Mecánicas				
	Resistencia a la rotura (σ_B) kg/mm^2	Límite de fluencia kg/mm^2	Resistencia a la flexión δ %	Módulo de elasticidad (E) kg/mm^2	Dureza HB
B4 – 50-2	50	38	2	14000-15000	220-280

Tabla 2.5: Principales características técnicas del tramo 2030 (ECG).

• Temperatura a la que trabaja	100 - 800°C
• Cantidad de brazos por tramo	8
• Peso del cuerpo del equipo	3077Kg
• Espesor del aislamiento del eje	75
• Rotación	1.4 - 1.5 rev/min
• Dimensiones	
Largo de un tramo	2255mm
Diámetro hasta la superficie de los agujeros	1207mm



Tabla 2.6: Principales características técnicas del tramo B159A (RRL).

• Temperatura a la que trabaja	100 - 800°C
• Cantidad de brazos por tramo	8
• Peso del cuerpo del equipo	3573.3Kg
• Espesor del aislamiento del eje	75
• Rotación	1.4 - 1.5 rev/min
• Dimensiones	
Largo de un tramo	2230 mm
Diámetro hasta la superficie de los agujeros	1105 mm

Anexo 4: Tablas descriptivas.

Tabla 2.7 Propiedades según el tipo de resina.

Tipo Resina	Nitrógeno (%)	Viscosidad (CP-S)	PH	Resina	Costo
FF	sin N ₂	300 - 400	5.5 - 6.3	fenólica	barata
AF/FF	sin N ₂	120 - 130	7.5 - 8.00	furánica	alto
AF/FFUF	bajo	130 - 140	7.5 - 8.00	furánica	medio
AF/UF	medio y alto	120 - 130	6.5 - 7.3	furánica	medio

donde:

FF: copolimero fenol – formaldehído (formol).

AF: alcohol furfurílico.

UF: copolimero urea – formaldehído (formol).

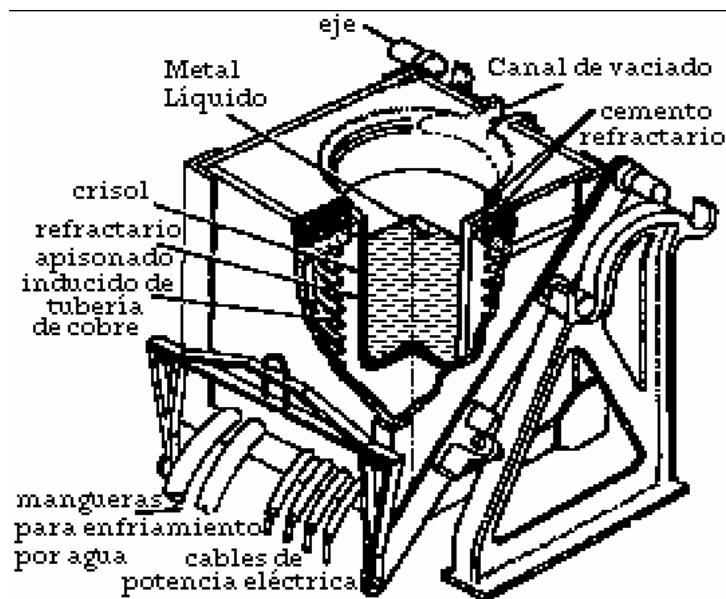


Figura. 2.1

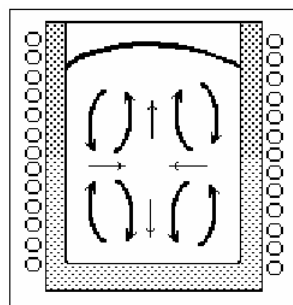


Figura. 2.2: Esquema del Horno de inducción.

Anexo 5: Tablas y figuras descriptivas (Esquema del Horno de inducción.).

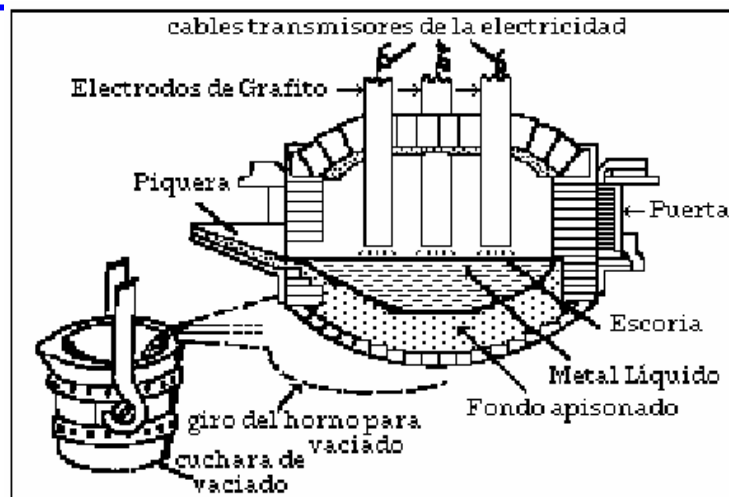


Figura 2.3: Esquema de la estructura del horno de arco eléctrico.

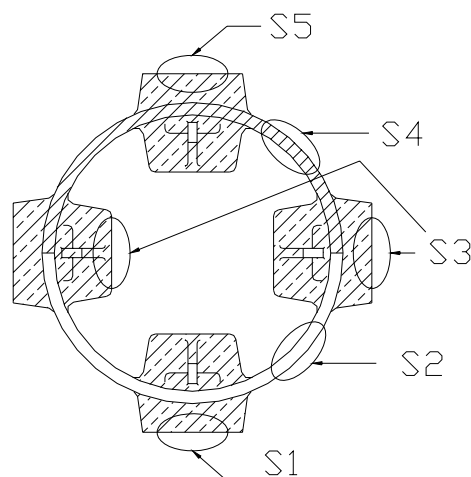


Figura 2.4. Representación de las secciones de la pieza.

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas del material.

Marca de la fundición	Propiedades Mecánicas				Matriz Estructural
	σ_B (Kg/mm ²)	δ %	E (Kgf/mm ²)	HB (HSD)	
FeNiMo	>25 (46.4)	>1.5	14000 - 15000	220 - 286	P, C Nodular

Tabla 3.2: Composición química de la aleación.

Marca de la Aleación	Contenido de los elementos, %					
	C	Si	Mn	Ni	Mo	P
FeNiMo	2,8 a 3,2	1,4 a 1,8	0,8 a 1,2	0,2 a 1,6	0,2 a 0,3	≤ 0,12

Anexo 6: figuras descriptivas.

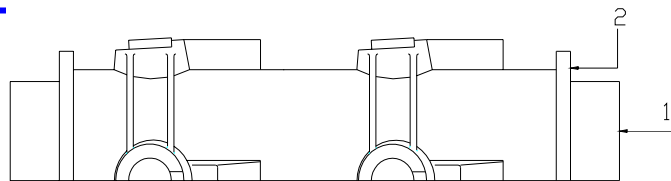


Figura 3.1 Plantilla de la pieza.

Tabla 3.3 Inclinación de salida de la plantilla en el molde.

Superficies	b (mm)	Ángulo α (grados)	a (mm)
1	442	35'	5
2	113	1°30'	2.5

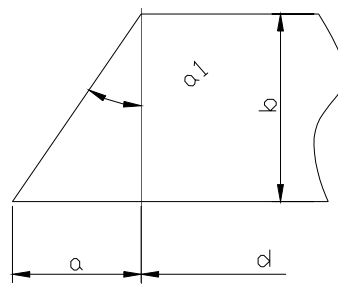


Figura 3.2 Tipo de inclinación.

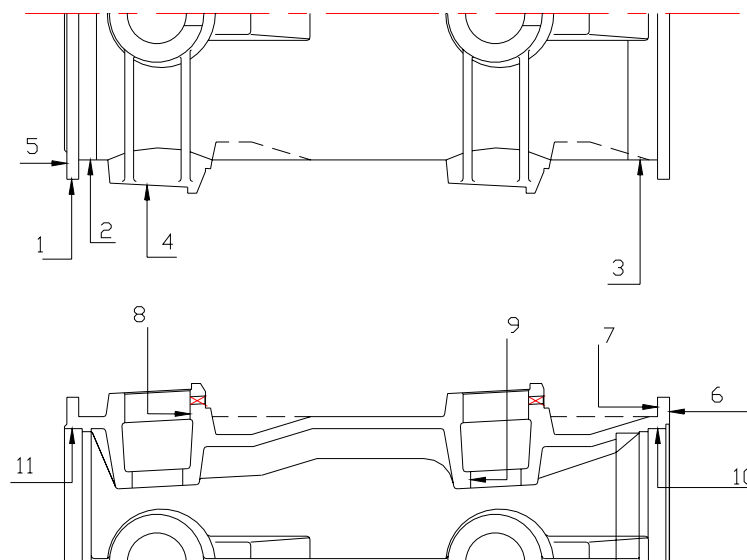


Figura 3.2 Superficies de la pieza para la sobremedidas de maquinado.

Anexo 7: Tablas y figuras descriptivas.

Tabla 3.4 Sobremedidas de maquinado.

Superficies	Dimensión básica D(mm)	Dimensión determinante S(mm)	Sobremedida (mm)
-------------	------------------------	------------------------------	------------------



1	1110	1111	8
2	980	982	8
3	980	985	8
4	0	325	4
5	0	1110	12
6	0	1110	8
7	0	1110	8
8	220	242	4
9	170	230	4
10	900	903	8
11	900	902	8

Tabla 3.5 dimensiones de las portadas

Machos Horizontales	
Diámetro (mm) De – a	Para una longitud de trabajo 2054 mm
	Longitud de la portada (mm)
1001 – 1250	330

Tabla 3.6. Valores de los juegos de portadas.

Altura de la portada h o h₁ (mm)	Para una longitud del macho 2054 mm		
	Holgura en (mm).		
	S1 (máxima)	S2	S3
301 – 500	4.5	6	6

Anexo 8: Tablas y figuras descriptivas.

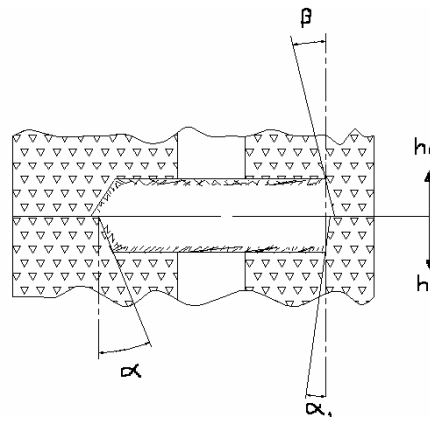


Figura 3.3 Representación gráfica de los ángulos de salida.

Tabla 3.7 Inclinación de la portada del macho.

Altura de la portada del macho h ó h1(mm)	Macho horizontal				
300 – 500	inferior		superior	Plantilla	Caja de machos
	α	α_1	β		
	4^0	30'	5^0	+20'	-20'

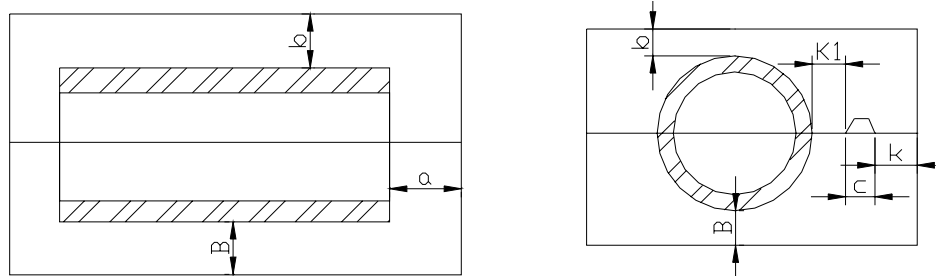


Figura 3.4. Distancias permisibles entre piezas y elementos del molde.

Tabla 3.8 Relación de colada.

Aleación	Tipo de pieza	Sistema	Aal	Aesc	At
Hierro nodular	grandes	Sin presión	1	1.12	1.25

Tabla 3.9 Sistema de alimentación.

Sección del sistema de alimentación			
Aleación	$\Sigma Aa(cm^2)$	$\Sigma Aesc(cm^2)$	$\Sigma At(cm^2)$
Hierro nodular	8.5	19.04	42.5

Anexo 9: Tablas y figuras descriptivas.

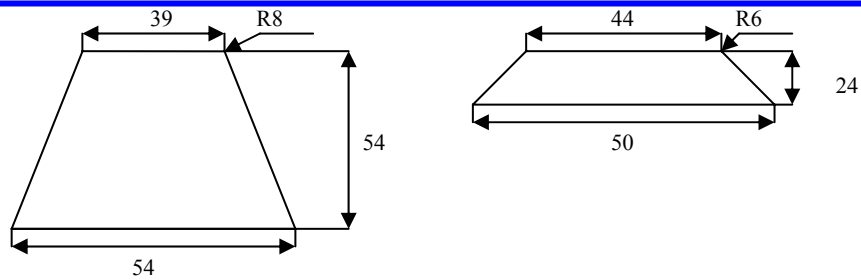


Figura 3.5 Secciones típicas de escoreadores y alimentadores.

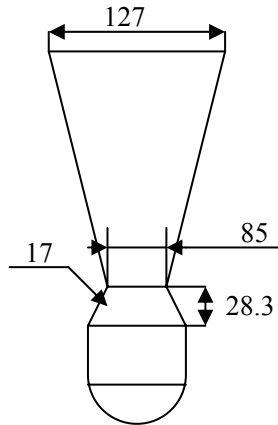


Figura 3.6 Sección típica del tragadero.

Tabla 3.8 Propiedades del material de la pieza. (Estos no son)

Temperatura		Conductividad (Btu/(hr-in-°F))	Entalpía (Btu/in ³)
°C	°F		
1450	2642		
1460	2660		
1470	2678		

Tabla 3.9 Propiedades del molde de arena.

Temperatura. T		Densidad. (lb-in ³)	Calor específico. C (lb-°F)	Conductividad térmica. λ Btu/(hr-in-°F))	Coeficiente de transferencia de calor. h (Btu/hr-in ² -°F)
(°F)	(°C)				
111	44	0.054	0.28	0.025	0.022

donde:

h – Coeficiente de transferencia de calor.

C – Calor específico.

Anexo 10: Tablas y figuras descriptivas.

Aleación: HIERRO ALEADO 08 PARA 1 TON. PIEZAS UTILES.



Designación: FeNiMo	Moneda del cálculo: Moneda Nacional
Taller: Fundición	Fecha elaboración: 12/06/08

Análisis de Elementos de Gastos

Elementos de gasto		TOTAL	CUC
1	Materias Primas y Materiales	2372.34	2372.34
2	Materiales	1819.73	1819.73
3	• Combustibles y lubricantes	41.80	41.80
4	• Energía eléctrica	350.24	350.24
5	• Útiles y Herramientas	153.81	153.81
6	• Agua	6.76	6.76
7	• Otros	0.00	0.00
11	Sub total (Gastos de elaboración)	3451.15	726.22
12	Otros Gastos directos	763.61	236.30
13	• Depreciación	214.08	0.00
14	• Arrendamientos de Equipos	549.53	236.30
15	• Ropa y Calzado (trab. Directos)	0.00	0.00
16	Gastos de fuerza de trabajo	1003.17	38.0
17	• Salarios	636.51	0.00
18	• Vacaciones	57.86	0.00
19	• Contribución Seg. Social, Impuesto/Fza. trabajo	270.80	0.00
20	• Estimulación en Divisas	38.00	38.00
21	Gastos indirectos de producción	1140.15	326.33
22	• Depreciación	122.36	0.00
23	• Mantenimiento y Reparación	1017.79	326.33
24	Gastos generales y de administración	447.16	96.39
Anexo 11: Tablas descriptivas.			
25	• Combustible y lubricantes	3.93	3.93
26	• Energía Eléctrica	2.46	2.46



27	• Depreciación	33.94	0.00
28	• Ropa y Calzado	0.00	0.00
29	• Alimentos	0.00	0.00
30	• Otros	406.83	90.00
31	Gastos de distribución y ventas	0.00	0.00
38	Gastos Bancarios	97.06	29.20
39	Gastos totales o Costos de Producción	5823.48	3098.55
40	Margen utilidad S/ base autorizada	690.23	0.00
41	Precio establecido por MFP	6513.71	3098.55
42	% Sobre los Gastos en divisa	0.00	154.93
43	Componente en Pesos Convertibles	0.00	3253.48

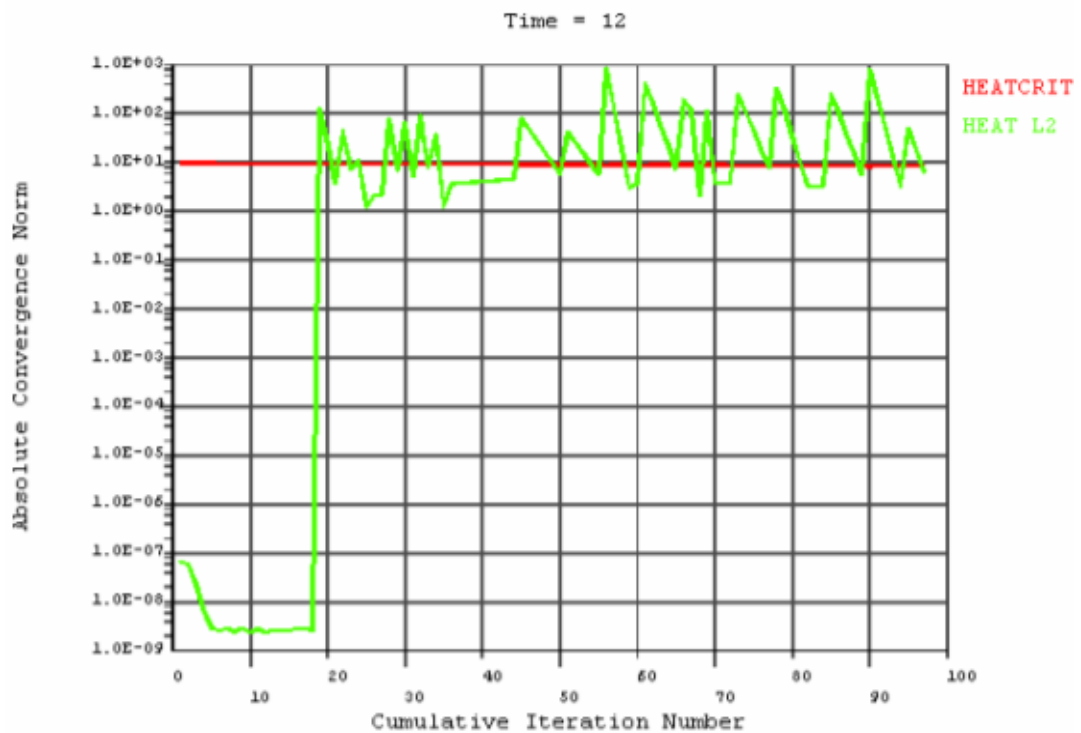


Figura 3.7: Representación de la convergencia.

Anexo 12: Tablas y Gráficos de la Simulación (ANSYS 10.0).

TEMP_2
TEMP_3
TEMP_4

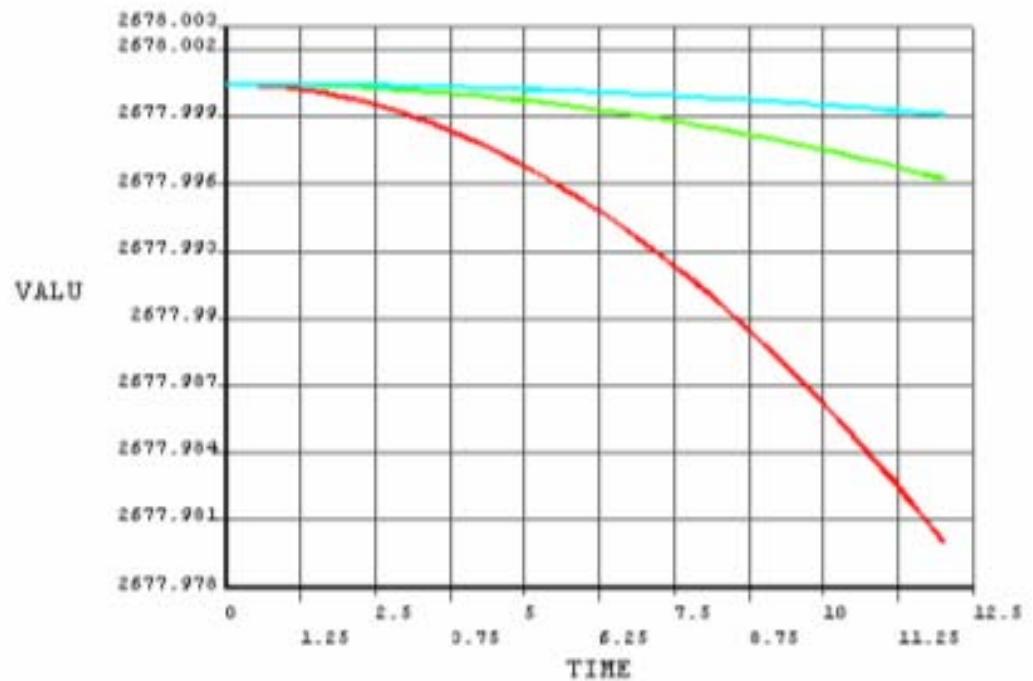


Figura 3.8: Relación de la temperatura con respecto al tiempo. (puntos 2, 3 y 4)

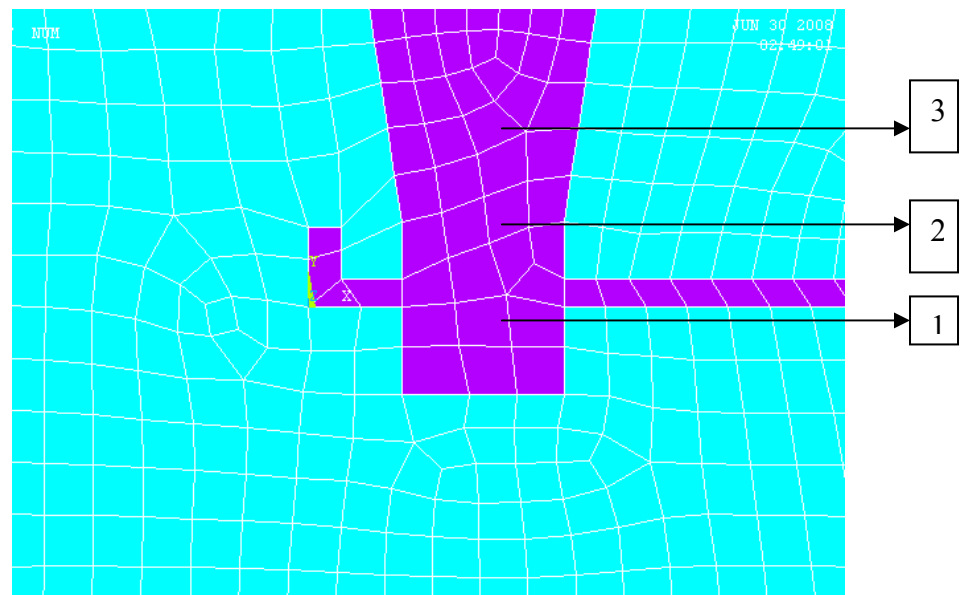


Figura 3.9: Esquema de la sección de la pieza con mazarotas a simular.

Anexo13: Gráficos de la Simulación (ANSYS 10.0).