



Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

**Análisis numérico de la Tecnología de obtención del Ferromanganeso
en horno de Cubilote en HOLMECA.**

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Autor: PABLO ENRIQUE ZALDIVAR GONZÁLEZ

**HOLGUÍN
2022**





Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Análisis numérico de la Tecnología de obtención del Ferromanganeso en horno de Cubilote en HOLMECA

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Autor: PABLO ENRIQUE ZALDIVAR GONZÁLEZ

Tutores: Dr. C. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo (Prof. Tit)

M.Sc. Ing. Lisandra Pupo Salazar (Prof. Asis)

HOLGUÍN
2022



Dedicatoria

Esta investigación se la dedico a mi madre que siempre estuvo ahí para mí y gracias a ella estoy hoy aquí, a mi esposa Betty que me acompañó todo el camino y a mis suegros Yaquelín y Emirlán quienes me apoyaron en todo momento.



RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo establecer una tecnología de obtención de ferromanganeso competente en horno de cubilote de 700 mm de diámetro perteneciente al taller de fundiciones ferrosas de HOLMECA y analizar numéricamente el proceso de fusión, utilizando el software *SolidWorks*. Se determinó una secuencia de pasos para la carga y posterior fusión del ferromanganeso en horno de cubilote, se aplicó un estudio térmico que corroboró la factibilidad de la utilización de este tipo de horno para la obtención de ferromanganeso, por lo que fundamenta el establecimiento de una línea de producción industrial de FeMn en horno de cubilote.



ABSTRACT

The objective of this research is to establish a competent technology for obtaining ferromanganese in a 700 mm diameter cupola furnace belonging to the HOLMECA ferrous foundry workshop and numerically analyze the melting process using the software *SolidWorks*. A sequence of steps was determined for the loading and subsequent fusion of ferromanganese in a cupola furnace, a thermal study was applied that corroborated the feasibility of using this type of furnace to obtain ferromanganese, for which the establishment of a Industrial FeMn production line in a cupola furnace.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	6
1. Antecedentes de la producción de las ferroaleaciones	6
1.1 Características del ferromanganeso	10
1.2 Variantes Tecnológicas de Obtención de FeMn.....	11
1.3 Tecnología de la fusión del Ferromanganeso	12
1.4 Formación de la escoria	13
1.5 Usos del Ferromanganeso.....	13
1.6 Yacimientos de mineral de manganeso en Cuba.....	14
1.7 Generalidades del Horno de cubilote.....	14
1.8 Tipos de Cubilote.....	15
1.9 Condiciones de Servicio	16
1.10 Partes del Horno de Cubilote	18
1.11 Ventajas y Desventajas.....	20
1.12 La reacción de combustión	20
1.13 Análisis numérico	22
1.14 Historia.....	24
1.15 Fuentes de errores.....	24
1.16 Antecedentes de Análisis Numérico de Fusión en Hornos de Cubilotes.....	26
1.17 Software Utilizado	27
Conclusiones Capítulo 1	28
CAPÍTULO 2	29
2.1 Desarrollo de la Tecnología	29
2.2 Datos Técnicos:.....	32
2.3 Cálculo de la Productividad	32
2.4 Cantidad de Coque necesario por carga:.....	33
2.5 Cálculo de la carga para la producción de Fe Mn.	35
2.6 Instrucción de la fusión de FeMn en horno de cubilote Ø 700mm.....	38
2.7 Análisis numérico de la obtención de ferromanganeso en horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior de “HOLMECA”	39
2.8 Resultados del Estudio Térmico	41
2.9 Análisis del ahorro de portadores energéticos	45
2.10 Valoración Energético – Económica.....	46
2.11 Valoración para la Defensa.....	46





2.12	Valoración Medioambiental	46
	Conclusiones Capítulo 2	47
	Conclusiones Generales	48
	Recomendaciones	49
	Anexo: I. Formulario “Control de fusión y vertido”	1
	Anexo 2. Horno de cubilote de 700 mm de diámetro de HOLMECA.....	6
	Anexo 3. Taller de fundiciones ferrosas perteneciente a HOLMECA.....	7



v



Índice de Figuras y Tablas

Figura 1. Proceso productivo del Ferromanganeso y Silicomanganeso. (Emisiones, 2018).....	8
Figura 2. Localización de las zonas del Horno de cubilote (Aspita, 2007)	22
Figura 3 Modelación del Horno de Cubilote de 700 mm de diámetro.	30
Tabla 1. Factor empírico según la relación carga de Hierro – Coque.	32
Tabla 2. Peso del coque según su tamaño.....	33
Tabla 3. Materias primas para la carga de 1 ton de ferromanganeso	36
Tabla 4. Relación de las altas y bajas de los elementos de fusión	36
Tabla 5. Aprovechamiento de los elementos durante la fusión	36
Tabla 6. Consumo de coque para una relación 1:6	37
Tabla 7. Índice de colores.	37
Figura 4. Resistencia de la capa de refractario y protección de la estructura del horno de cubilote.....	41
Figura 5. Homogeneidad del régimen térmico manteniendo una temperatura de alrededor de los 1 500 oC.	42
Figura 6. Homogeneidad del calentamiento del horno.....	43
Figura 7. La cama de coque o cama de fuerza para el encendido, calentamiento y mantenimiento del régimen interior térmico.....	44



INTRODUCCIÓN

HOLMECA fue inaugurada por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz el 27 de julio del año 1981, ese día se hallaban presentes también Iván Nevkov Grigorov, Peko Takov, miembro del Buró del Partido Comunista de Bulgaria y otros integrantes de su delegación. Dicha empresa se encuentra ubicada en la carretera a San Germán Km 3 ½, Holguín. La misma fue fundada en julio de 1980 y redimensionada en el año 2003 y consta de dos talleres fundamentales para su producción.

Esta empresa es líder en el mercado de Cuba en la fabricación y comercialización de equipos e implementos agrícolas y sus piezas de repuestos, partes, componentes y accesorios avalados por las normas ISO9001:2015, las nuevas tecnologías, y apoyados en un capital humano de experiencia. Contribuye al desarrollo sostenible de la agricultura y la industria cubana, con capacidad para satisfacer necesidades del mercado regional, con profesionalidad, calidad y precios competitivos (Espinosa, 2021).

Esta empresa cubana está dedicada a la producción, reparación y comercialización de máquinas e implementos agrícolas. Piezas fundidas, motores y equipamientos eléctricos. En el 2020 recuperaron 22 camillas y más de 300 camas hospitalarias. Permitieron la continuidad de la producción en diversos centros, incluyendo algunos donde se elaboran alimentos. Establecieron convenios de trabajo con la industria del níquel.

HOLMECA produce, repara, reconvierte y comercializa máquinas e implementos para la agricultura y la industria, remolques y semirremolques de diversos usos, piezas fundidas, motores y equipamientos eléctricos, así como sus partes, piezas, componentes y accesorios. También ejecuta proyectos de innovación, desarrollo y diseño de maquinarias.

Presta servicios de post-venta, montaje y puesta en marcha de los equipos y medios que comercializa. Entre los productos que ofrece se encuentran los



arados, chapeadoras, cultivadores, grada de discos, multiarados, niveladores, subsoladores (Contributors, 2021).

En la empresa HOLMECA se desarrollan diferentes proyectos con el objetivo de evitar importaciones y abaratar los costos y precios de las materias primas y materiales que le cuestan grandes cantidades de dinero al país.

La empresa HOLMECA tiene dentro de sus metas la producción del ferromanganeso en horno de cubilote, dicha empresa cuenta con dos talleres de fundición, uno para metales no ferrosos y otro para metales ferrosos, estos se encuentran ubicados en el kilómetro 3 y medio en la carretera a San Germán.

En la actualidad el ferromanganeso y el ferro silicio que se utilizan son importados, el horno de cubilote utilizado en el taller de producciones ferrosas es de 700 mm de diámetro interior. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica, el MINAZ, el MINTUR, el MINBAS, entre otras. El moldeo se realiza en cajas metálicas de dimensiones 1000 x 800 x 300 mm y 630 x 500 x 200 mm y se utilizan mezclas en verde.

En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición: 70% de chatarra de hierro y 30 % de retorno. Posee un taller secundario para la elaboración y secado de los machos, estos son elaborados con mezclas de arena sílice, bentonita, fuel oíl y melaza secados en estufas a temperaturas de 180 – 220° C. Presenta un sistema de moldeo mecanizado con máquinas neumáticas movidas por un compresor que impulsa de forma estable aire comprimido a seis atmósferas.

Según el grado de prospección geológica realizada hasta el momento, en Cuba existen cerca de 300 manifestaciones y yacimientos de manganeso distribuidos por todo el archipiélago (desde la Isla de la Juventud hasta las provincias orientales). Más del 90 % se distribuyen en las provincias de Santiago de Cuba y Granma y, de forma aislada, en la de Holguín (Simona, 1970; Cruz A, 2003).

Uno de los problemas en HOLMECA es la falta de manganeso debido al bloqueo tecnológico al que es sometida la industria metalmeccánica cubana.



Debido a esto es necesaria la producción nacional de ferromanganeso que es un proceso metalúrgico muy costoso.

Esta particularidad de la industria ha generado un **problema científico** ¿Cómo determinar la factibilidad de una tecnología de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible?

Esta investigación como **objeto de estudio** establecer las tecnologías de obtención de ferromanganeso y como **campo de estudio** el análisis numérico del proceso de fusión.

Como **hipótesis** se plantea que: Si se realiza el análisis numérico del proceso de fusión, se podrá determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible.

Como **objetivo general** de la investigación consiste en: realizar un análisis numérico del proceso de fusión para determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible.

Tareas de investigación

1. Consultas de expertos y búsqueda bibliográfica sobre el antecedente y estado actual del objeto de estudio
2. Análisis numérico de la obtención de ferromanganeso en horno de cubilote.
3. Elaboración una tecnología alternativa que permita la obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA.

Métodos de investigación utilizados

A continuación, se exponen los principales métodos utilizados en la investigación, estos son:

Método histórico-lógico: este se aplicó para establecer el estado del arte con respecto: al análisis numérico del proceso de fusión para determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible. Permite establecer el marco teórico referencial, permitiendo identificar qué se ha investigado sobre



el tema objeto de estudio, a fin de sustentar el objeto y el campo de la presente investigación.

Método de inducción-deducción: se aplicó en la evaluación de los diferentes criterios que intervienen al realizar el análisis numérico del proceso de fusión para determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible.

Método de análisis y síntesis: se utilizó para identificar los factores principales y sus características que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplicó en la identificación de las etapas que intervienen al realizar el análisis numérico del proceso de fusión para determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible.

Método de modelación: se aplicó al modelar el proceso de fusión dentro del horno de cubilote de 700 mm de diámetro de interior de HOLMECA según establecen las normas internacionales ASTM.

Método informático: se utilizó durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir el cálculo, diseño y análisis numérico de los parámetros que intervienen en la tecnología de fusión en horno de cubilote de 700 mm de HOLMECA, (*SolidWorks*).

Aporte tecnológico

Establecer una tecnología alternativa que permite la obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior en HOLMECA.

Aporte teórico

Se realiza el análisis numérico para determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible.

Estructura de la tesis



El contenido de esta tesis se ha organizado en una introducción, dos capítulos, conclusiones generales, recomendaciones, un apartado de referencias bibliográficas y un apartado de anexos.

En la «Introducción» se expone la motivación de la investigación, el objeto de estudio, el problema científico de la investigación, el objetivo, la hipótesis, la importancia y actualidad, del tema el campo de acción, los aportes tecnológicos, teóricos y los métodos de investigación utilizados.

En el Capítulo 1, «Antecedente y estado actual de la producción del ferromanganeso», se expone la revisión bibliográfica realizada, donde se analizan los aspectos esenciales relacionados. Se presenta un análisis de las tendencias actuales en la producción de ferromanganeso, donde también se examinan los aspectos esenciales relacionados con el uso del análisis numérico de la fusión de metales.

En el Capítulo 2, «Materiales y métodos asistir el cálculo, diseño y análisis numérico de la fusión en horno de cubilote», se desarrolla la metodología para asistir el cálculo, diseño y análisis numérico de los parámetros que intervienen en la tecnología de fusión en horno de cubilote de 700 mm de HOLMECA, se exponen los procedimientos y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación.

En las «Conclusiones generales» se establecen las conclusiones de la investigación en correspondencia con el objetivo planteado. En las «Recomendaciones» se establecen aquellos aspectos que permitirán cumplimentar y ampliar la investigación desarrollada. En las referencias bibliográficas se relacionan la literatura consultada para el desarrollo de la investigación. En los «Anexos» se muestran datos complementarios esenciales para facilitar la comprensión de la investigación desarrollada.



CAPITULO I

1. Antecedentes de la producción de las ferroaleaciones

Las ferroaleaciones son varias aleaciones de hierro que contienen una cantidad significativa de uno o más elementos, como manganeso, carbono o silicio. El término ferro, o férrico, se refiere a un compuesto que contiene o se relaciona con el hierro. Una ferroaleación tiene hierro como elemento base, en muchos casos menos del 50%, combinado con uno o más de otros elementos reactivos utilizados durante la producción de acero. Una ferroaleación introducirá físicamente y llevará estos elementos al metal fundido, a medida que se producen el acero y el hierro fundido.

Las ferroaleaciones confieren a los productos de hierro o acero diferentes calidades y presentan diferentes funciones durante los ciclos de producción. Dependiendo de las materias primas utilizadas, la producción se realizará mediante un proceso primario o secundario. Las reacciones químicas básicas que se da en ambos procesos son las siguientes:

Proceso Primario:

Metal oxidado + Hierro mineral/chatarra + Reductor Ferroaleación + Oxido de reductor + escorias

Proceso Secundario:

Chatarra metálica + Chatarra de hierro Ferroaleación

Las principales ferroaleaciones son las de manganeso y silicio. Sin embargo, es común en el mercado la producción de ferroaleaciones basándose en otros elementos químicos como: bario, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, fósforo, titanio, tungsteno, vanadio y zirconio entre otros. La fabricación de ferroaleaciones, es un proceso donde se consume mucha energía debido a las altas temperaturas que se necesitan. Es también una fuente potencial de contaminación del aire, agua y en menor medida del suelo (Rodriguez, 2018).

El proceso productivo de las ferroaleaciones es común a todas ellas, con pequeñas variaciones y consiste, básicamente, en mezclar los minerales en bruto, los reductores carbonosos y los fundentes en un horno de arco eléctrico, donde se calientan a altas temperaturas para su reducción y fundición. Este proceso se puede resumir según la siguiente forma:

- **Minerales metálicos:** La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza formando parte de minerales, en formas oxidadas, por lo que para su obtención se hace necesario someterlos a un proceso de reducción.
- **Reductores:** Son generalmente carbones (hulla y antracita) y coques, pero el biocarbono (carbón vegetal y madera) también es ampliamente utilizado. El carbono de estos agentes es capaz de unirse al oxígeno y liberar los metales, generando monóxido de carbono en el proceso que, posteriormente, puede convertirse en CO₂.
- **Fundentes:** Los más empleados son la caliza y dolomía. Su función principal es ayudar a disminuir el punto de fusión de la mezcla, así como formar una escoria que recoja las impurezas que acompañan a los minerales, haciendo que este flote por encima del material fundido y se pueda eliminar fácilmente. Además de las emisiones procedentes de los agentes reductores y electrodos, la calcinación de los carbonatos da lugar a CO₂ por descarbonatación (Emisiones, 2018).

Las ferroaleaciones más frecuentemente adicionadas, como elemento de aleación, son el ferrocromo y el ferromanganeso y como desoxidante el ferrosilicio y el propio ferromanganeso, las cuales son capaces de cumplir ambas funciones, el ferromanganeso también actúa (a través del Mn) como desulfurante efectivo (González *et al.* 2014, 2016).

Ferrosilicio: Se utiliza como desoxidante y descarburizante. Mejora las características mecánicas de las piezas fundidas. En la fundición de acero inoxidable ayuda a mantener el nivel de inclusiones y el contenido de carbono final en niveles muy bajos.



El consumo de ferroaleaciones de silicio está impulsado por la fundición de hierro y la producción de acero, donde las aleaciones de silicio se utilizan como desoxidantes. También se ha usado algo de silicio como agente de aleación con el hierro (Lisa, 2010).

Ferromanganeso: Se utiliza también como desoxidante y desulfurante. El manganeso mejora la resistencia a la tracción, la maniobrabilidad, la resistencia mecánica, la dureza y la resistencia a la abrasión. Además, mejora enormemente la capacidad de soldadura. Dos ferroaleaciones de manganeso, el ferromanganeso y el silicomanganeso, son ingredientes clave para la fabricación de acero (Lisa, 2010).

A continuación, se presenta un esquema que ilustra los procesos productivos del ferromanganeso y silicomanganeso:

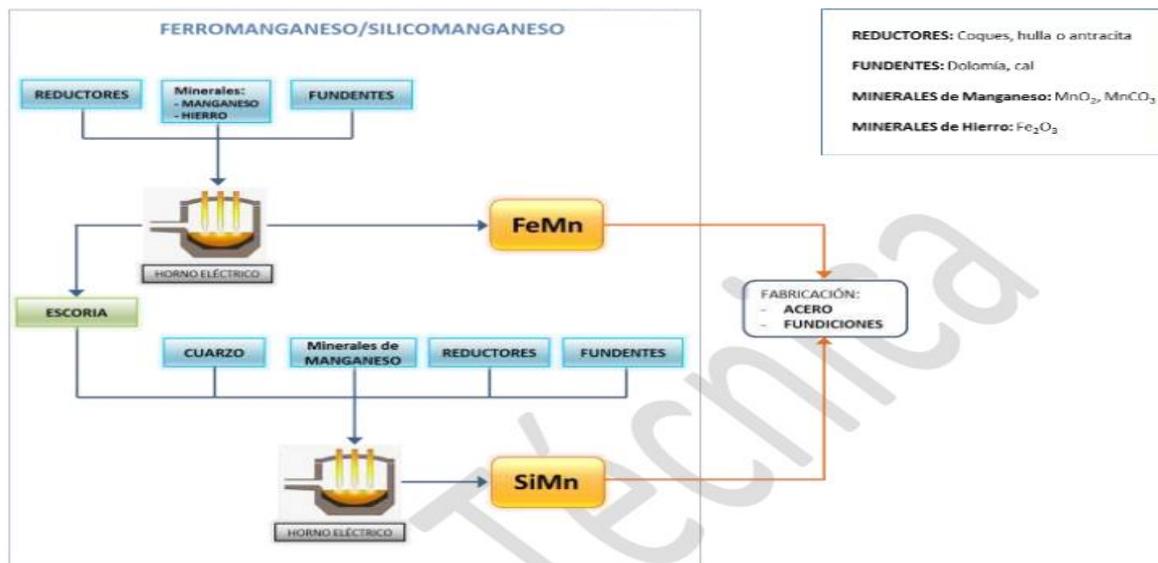


Figura 1. Proceso productivo del Ferromanganeso y Silicomanganeso. (Emisiones, 2018)

China es el principal productor mundial de ferroaleaciones de manganeso (2,7 Mt), con un volumen mucho mayor que la suma combinada de los siguientes tres mayores productores: Brasil (0,34 Mt), Sudáfrica (0,61 Mt) y Ucrania (0,38 Mt) (Lisa, 2010).

Silicomanganeso: Aporta las cualidades del manganeso y del silicio en una sola ferroaleación. Ambos, silicio y manganeso, son buenos agentes

desoxidantes, pero combinados en forma de SiMn su efecto desoxidante es mayor y se produce un acero más limpio (George M et al, 2014).

Ferrocromo: El cromo proporciona resistencia a la corrosión y a la oxidación. También mejora la resistencia al desgaste. Los productores de acero son los mayores consumidores de ferrocromo, especialmente los productores de acero inoxidable, cuyo contenido en cromo se encuentra entre el 10 y el 20. Los principales países productores de mineral de cromita en el mundo en 2014 fueron Sudáfrica (12 Mt), Kazajistán (3,7 Mt), India (3,5 Mt) y Turquía (2,6 Mt) (George M et al, 2014).

La mayor parte de la producción de mineral de cromita se fundió en hornos de arco eléctrico para producir ferrocromo para la industria metalúrgica. Los principales países productores de ferrocromo del mundo en 2014 fueron China (4,5 Mt), Sudáfrica (3,6 Mt), Kazajistán (1,2 Mt) e India (0,9 Mt). La mayor parte de las 11,7 Mt de ferrocromo producido a nivel mundial se consumió en la fabricación de acero inoxidable que totalizó 41,7 Mt en 2014 (George M et al, 2014).

Las emisiones principales en la producción de ferroaleaciones son el CO, el CO₂ y las partículas. Las emisiones primarias en los hornos de arco cubiertos consisten casi completamente en CO, en contraposición al CO₂, debido a la intensidad del medio reductor. Este CO se emplea para producir energía en calderas, o bien se quema en antorcha. Se supone que la energía producida se utiliza internamente en la planta y que el contenido de carbono del CO se convierte ulteriormente en CO₂ dentro de la planta (Emisiones, 2018).

Las ferroaleaciones se producen generalmente por dos métodos: en un alto horno o en un horno de arco eléctrico. La producción de altos hornos disminuyó continuamente durante el siglo XX, mientras que la producción de arco eléctrico sigue aumentando. Hoy en día, el ferromanganeso aún se puede producir de manera eficiente en un alto horno, pero, incluso en este caso, los hornos de arco eléctrico se están extendiendo. Más comúnmente, las ferroaleaciones son producidas por reacción carbotérmicas, lo que implica la reducción de óxidos con carbono (como coque) en presencia de hierro.

Algunas ferroaleaciones se producen mediante la adición de elementos al hierro fundido (Akira, 2000). También es posible producir algunas ferroaleaciones mediante procesos de reducción directa. Por ejemplo, el proceso Krupp-Renn se usa en Japón para producir ferroníquel (Akira, 2000).

1.1 Características del ferromanganeso

El ferromanganeso es una ferroaleación obtenida a partir de la reducción carbotérmica de minerales a base de óxidos de manganeso. Es utilizado para fabricar varios tipos de acero como desulfurante, eliminando las burbujas de nitrógeno que se pueden formar y reduciendo la cantidad de óxido de hierro producida durante la fabricación del acero.

El contacto con la humedad, agentes oxidantes o ácidos forma óxidos metálicos. Existen yacimientos en Catamarca, Córdoba y Salta en Argentina; En Nueva Gales del Sur, Tasmania, Australia; Bahía, Goiás y Minas de Gerais en Brasil y muchos otros. Es un elemento característico de numerosos fondos oceánicos, donde aparece formando parte de los nódulos de manganeso ("Ferromanganeso," 2022).

El subsuelo contiene concentraciones naturales de ferromanganeso de importancia local, así como algunos paleosuelos (como en Saint-Pierre-lès-Elbeuf) en el Sena Marítimo, pero es especialmente en el relieve oceánico donde es abundante y de fácil acceso (Lautridou, 1970).

Las propiedades del hierro y del acero se modifican, por completo, cuando se adiciona manganeso. El manganeso mejora la resistencia a la tracción, la maniobrabilidad, la resistencia mecánica, la dureza y la resistencia a la abrasión. Más aún, el manganeso mejora enormemente la capacidad de soldadura. A pesar de que es un metal, el manganeso no se utiliza nunca como tal, sino que es una materia prima necesaria en un gran número de aplicaciones ("Ferro manganeso," 2022).

La mayoría de la producción mundial de manganeso se utiliza en forma de ferroaleación principalmente en la industria del acero, donde se utiliza tanto en



el proceso en sí mismo como componente de la aleación como un agente de desulfuración y desoxidante, haciendo la escoria más fluida. Casi todos los aceros contienen Mn, en proporciones que varían de 0,05% a 2%, alcanzando un 12% en algunos casos ("Ferro manganeso," 2022).

Tienen una acción desgasificante por el hecho de tener afinidad química por N evitando de esa manera la formación de porosidades características, en piezas fundidas. Los Fe Mn medio carbono y bajo carbono minimizan la formación de carburos y son agentes desoxidantes poderoso. Los de medio carbono y bajo carbono tienen una acción desulfurante muy útil en fabricación de aceros ("Ferro manganeso," 2022).

Propiedades Físicas

Punto de fusión: 1150 ° C a 1350 ° C

Gravedad específica: 4,5 a 5,5 TM / m³(SOM, 2022)

1.2 Variantes Tecnológicas de Obtención de FeMn

Para el procesamiento metalúrgico extractivo de minerales de Mn en la obtención de aleaciones de manganeso alto carbono existen dos tendencias mundiales ampliamente difundidas:

- La tecnología con fundente (con adición de caliza).
- La tecnología sin fundente (con empleo de virutas de acero).

La primera tecnología persigue la obtención de una aleación con valores de fósforo lo más pequeño posible y, sobre todo, la máxima recuperación del Mn. En el segundo caso se persigue obtener una escoria rica en Mn y pobre en fósforo, que posibilite la posterior obtención de aleaciones al Mn con bajos valores de este elemento (Amado Cruz-Crespo, 2020).

En los inicios la producción de FeMn alto carbono se realizaba en altos hornos, pero a causa de los grandes consumos energéticos (consumo de reductor sólido, coque) esta fue desplazada hacia los hornos electro térmicos y en la

actualidad prácticamente la producción de esta aleación solo se realiza por vías carbotérmicas (Tsankov, 1990).

Durante la producción de FeMn en horno de arco, el proceso se realiza de manera continua con la adición de los componentes de carga alrededor de los electrodos, creando con los minerales que entran directamente en las zonas activas del horno un cono, que realiza la función de barrera mecánica no permitiendo el escape de metal por volatilización (Tsankov, 1990).

1.3 Tecnología de la fusión del Ferromanganeso

El ferromanganeso se funde por el procedimiento continuo, introduciendo la carga en el horno a medida de su fusión. La porción de carga consta de 300 kg de mineral de manganeso, de 60 a 70 kg de coque menudo y de 15 a 20 kg de virutas de hierro. Son testigos de una marcha normal del proceso los conos de la carga de 300 a 400 mm de altura junto a los electrodos, una profunda disposición de los electrodos en la carga y el deslizamiento de la carga de los declives del horno (Pino Tarragó Julio César et al, 2014).

Los materiales de la carga penetran en la zona de altas temperaturas siendo preparados y calientes (en gran parte ya se eliminan la humedad y los volátiles, los óxidos superiores de manganeso pasan a los inferiores). Los gases durante la fusión deben desprenderse uniformemente por toda la superficie del tragante. Cuando los materiales de la carga son menudos, los gases tienden a salir en forma de sopladuras junto al electrodo (Pino Tarragó Julio César et al, 2014).

La aleación y la escoria se descargan simultáneamente cinco o seis veces por turno de trabajo a través de todas las piqueras por turno. La escoria se crea de la ganga de la mena, la ceniza de coque y los óxidos de manganeso. La multiplicidad de la escoria se halla en los límites de 1,0. Cuando se descarga el producto, la escoria se separa del metal con ayuda de un sifón (Pino Tarragó Julio César et al, 2014).

Las lingoteras se sitúan bajo el canalón en forma escalonada. En la primera lingotera se instala un tabique cuyo borde inferior se halla a 60-70 mm más



abajo del pico de la colada de la lingotera. La escoria, acumulándose junto al tabique en la segunda lingotera y, al llenarse ésta, a la tercera y cuarta (Pino Tarragó Julio César et al, 2014).

1.4 Formación de la escoria

En la producción de FeMn, la escoria se forma a partir de MnO_2 reducido y por la sílice contenida en la ganga del mineral y cenizas del reductor. Otros compuestos que se forman inicialmente son silicatos de manganeso, que reducen la actividad del MnO, haciendo la reducción más difícil. A medida que se eleva la temperatura se va introduciendo el CaO en la escoria, desplazando la sílice ligada al MnO, aumentando la actividad del mismo en la escoria y facilitando su reducción (Mironenko, 1991).

La producción clásica de ferromanganeso, caracterizada por grandes volúmenes de producción y el consecuente alto consumo de capital de inversión y de energía no es viable para algunos países poseedores de reservas significativas de manganeso (Mironenko, 1991).

1.5 Usos del Ferromanganeso

Muchos documentos antiguos atestiguan su antiguo uso como carburo de manganeso u óxido de manganeso para producir una aleación de hierro y manganeso (porque su mineral es muy difícil de reducir), empleado como elemento mejorador del hierro y del acero. El conocimiento de su naturaleza química y metálica data de 1774, pero hasta 1815 su función exacta en las aleaciones de hierro siguió siendo poco conocida, y la producción de aceros de calidad se estancó durante revolución Industrial (Christophe, 1870).

Durante el período de la consolidación de la siderurgia moderna, el manganeso se convirtió en un elemento esencial para la fundición de hierro como elemento de aleación. A partir de 1850 su demanda aumentó considerablemente porque los aceros de calidad y económicos se volvieron esenciales para la construcción de ferrocarriles en particular. El acero al manganeso pasó a producirse mediante pudelación a partir de 1839 (Truffaut, 2000).

1.6 Yacimientos de mineral de manganeso en Cuba

Según el grado de prospección geológica realizada hasta el momento, en Cuba existen cerca de 300 manifestaciones y yacimientos de manganeso distribuidos por todo el archipiélago (desde la Isla de la Juventud hasta las provincias orientales). Más del 90 % se distribuyen en las provincias de Santiago de Cuba y Granma y, de forma aislada, en la de Holguín (Simona F. B, 1970; Cruz A, 2003).

En Cuba los minerales industriales de manganeso son óxidos. Los óxidos presentes se caracterizan por dos fases ricas en manganeso (*Mn*), ellas son la todorokita y el psilomelano y una fase rica en manganeso (*MnO₂*) representada por la pirolusita. La pirolusita es, entre todos, el mineral más estable y predomina en la superficie o cercano a ella, es el principal en los depósitos secundarios y el más utilizado entre estos minerales (Borges M, 1996; Cruz A, 2000 y 2002).

La gran mayoría de la producción de manganeso en el mundo se consume por la industria metalúrgica. En relación con el acero, el manganeso desempeña distintos papeles y para la mayoría de ellos no tiene sustituto, es esencial como desoxidante y desulfurante en la producción de acero crudo, es un agente que permite aumentar la flexibilidad y la dureza de diferentes aleaciones de acero, de aleaciones no ferrosas y del hierro fundido (Borges M, 1996; Cruz A, 2000 y 2002).

1.7 Generalidades del Horno de cubilote

La palabra "cubilota" procede de la palabra latina "cupa", que significa cuba. Un cubilote puede ser definido, sencillamente, como una cavidad revestida de refractario, con las aberturas necesarias en la parte superior para el escape de los gases y para la carga de los materiales, y en el fondo para la entrada del soplado de aire, y para extracción del hierro fundido y de la escoria (R Aristizábal Sierra, 2006).

El horno de cubilote es una unidad de fusión utilizada generalmente para la fabricación de hierros fundidos. Tradicionalmente, el combustible más utilizado



en estas unidades es el coque de fundición; éste se obtiene sometiendo la hulla o carbón mineral a un proceso de coquización, que tiene como finalidad eliminar los materiales volátiles y aumentar el poder calorífico del combustible (R Aristizábal Sierra, 2006).

Es uno de los hornos más antiguos que se conoce en la fundición de hierro, a continuación sus principales características de funcionamiento: es un ducto de acero recubierto interiormente con material refractario, dentro de él se introduce una cantidad determinada de Carbón, Coke lo que le denominamos cama (Moreno, 2018).

Luego capas sucesivas de hierro y coke en cantidades determinadas, hasta llenarlo carga, a la altura de puerta de carga, se introduce a continuación aire a volumen y presión adecuada, aire que producirá la combustión del coque y la consecuente fusión metal que se encuentra dentro del horno (Moreno, 2018).

En principio, es de hecho un pequeño alto horno pero con la particularidad de que el cubilote se usa solamente para fundir y tiene poco cambio en la composición química de la carga durante el proceso (Moreno, 2018).

Un fondo de combustible está dispuesto en el cubilote, y encendido, después de lo cual son cargadas capas alternadas de metal y combustible, e inició del soplado del aire (A Lezama Avendaño, 1991).

Si obedecen unas leyes sencillas, la fusión comienza prontamente y continúa por largo tiempo, si así se desea. Recientemente se ha descrito un cubilote extremadamente sencillo. Fue construido por las fuerzas armadas de los EE. UU, en Nueva Guinea, partiendo de un tambor de aceite, y piezas de desecho, todo ello soldado en el lugar. El cubilote, por mucho, el horno de fusión más sencillo y eficiente (A Lezama Avendaño, 1991).

1.8 Tipos de Cubilote

- Cubilote *Shaw-Walker*: Es un ingenioso pequeño cubilote con un diámetro interior de unos 60 cm, y solamente unos 60 cm de altura sobre las toberas, con un pequeño soplador similar a un pequeño secador de pelo en cada tobera.

Una cubierta sobre el coronamiento, con un pequeño orificio de unos 15 cm de diámetro, ayudaba a B forzar el chorro de aire hacia el centro, al mismo tiempo que irradiaba el calor hacia abajo (A Lezama Avendaño, 1991).

Las cualidades de esta pequeña unidad eran un volumen de producción de hierro fundido de unos 45 a 90 Kg de hierro a intervalos frecuentes, y temperaturas de 1425°C o más (A Lezama Avendaño, 1991).

- Cubilote ovalado: El cubilote ovalado, llamado también cubilote *Mackenzie* tomado de *American Foundry Practice*, de *T.D. West*, 1882, fue diseñado para dar una mejor penetración al chorro de aire en grandes tamaños. Naturalmente, el enladrillado es realmente complicado, pero la idea es buena y la dificultad ha sido vencida haciendo el horno en forma de eslabón, por ejemplo, dos semicírculos con una sección rectangular entre ellos (A Lezama Avendaño, 1991).

- Cubilotes enfriados con agua: Diversos tipos de cubilotes enfriados con agua han sido desarrollados en los Estados Unidos y en otros países. Son iguales en principio, diferente en el método adoptado para el enfriamiento, el que puede llevarse a cabo por medio de camisas de agua internas, o una serie de tubos igualmente instalados, o por medio de un manto de agua fluyendo en el exterior de la coraza (A Lezama Avendaño, 1991).

1.9 Condiciones de Servicio

Desde el punto de vista de las condiciones de servicio, el cubilote está dividido en cuatro zonas que, dispuestas por orden de severidad decreciente, son:

La zona de fusión:

El revestimiento de la zona de fusión se extiende desde las toberas hasta una distancia que depende de la altura de la cama de coque, la velocidad del viento, el tipo de materiales de carga, y otras variables. Aunque toda esta zona está sujeta a temperaturas más altas que en las otras zonas del cubilote, existen en las partes más bajas de esta zona las condiciones más severas (A Lezama Avendaño, 1991).

En esta parte de la zona es donde existen la oxidación de hierro y otros elementos, y los óxidos reaccionan con escoria que ya se ha formado por la acción fundente de la caliza de la carga sobre la ceniza del coque, arena grado, del propio revestimiento refractario tanto, en la zona de alta temperatura, las condiciones son favorables para una mayor acción química y erosión mecánica (A Lezama Avendaño, 1991).

El crisol:

En el crisol del cubilote la temperatura es más baja que en la zona de fusión, y el refractario está en contacto solamente con el hierro fundido, escoria, y coque relativamente estático, de manera que los efectos de la temperatura y a la abrasión producida el aire de soplado y los materiales de carga no son tan graves como la zona de fusión (A Lezama Avendaño, 1991).

La zona de carga:

El revestimiento del cubilote en la zona de carga no está sujeto a temperaturas muy elevadas ni al ataque de la escoria, pero la abrasión es muy severa, tanto por los impactos de la operación de carga como por la fricción de la carga al moverse hacia abajo. Esta condición está influenciada por el método de carga, y quizás es muy poco notable en la carga cuidadosa (A Lezama Avendaño, 1991).

Algunas funciones han ido al uso de bloques de hierro colado de barras planas de acero en la zona de carga, para contrarrestar el elevado grado de abrasión (A Lezama Avendaño, 1991).

La zona sobre la puerta de carga:

Arriba de la puerta de carga las condiciones no son varias, siendo la función del revestimiento meramente la de proteger a la coraza del calor de los gases de escape del cubilote. En esta área tienen una cierta acción los elementos climáticos, los cuales tendrán efecto según el tipo de protección de que dispone la chimenea del cubilote, así como las condiciones climáticas en las que está operando el cubilote (A Lezama Avendaño, 1991).

1.10 Partes del Horno de Cubilote

Cimentación:

Como toda máquina, debe tener un nexo de unión entre la máquina y el suelo, para lo cual es muy importante conocer el peso del horno así como otras consideraciones (A Lezama Avendaño, 1991).

Patas:

Son los elementos de soporte del horno, se debe tomar en consideración para el diseño de las mismas, la operación del horno, es decir si es que será de colada continua o colada intermitente (A Lezama Avendaño, 1991).

Puerta de fondo:

Es un elemento que sirve para descargar el horno. Una vez que se ha terminado la hornada, tanto la cama como los materiales a fundirse deben ser evacuados del horno, para lo cual al abrir la puerta de fondo caerán y el horno quedara vacío (A Lezama Avendaño, 1991).

Piquera:

Es el ducto por el cual es evacuado el hierro, una vez que ha sido fundido.

Puerta de solera:

Es la puerta por donde se prepara la solera o fondo del horno, para iniciar una hornada: una vez que ha sido cerrada la puerta de fondo del horno, se debe rellenar de arena el fondo formando una rampa, que todo material que se funda, busque el orificio de salida o piquera (A Lezama Avendaño, 1991).

Escoriadero:

Es un orificio que marca el fin del crisol del horno , su utilidad es manifiesta, ya que su función es evacuar todos os materiales que sin ser hierro y han sido inmiscuidos en la carga y salgan del cubilote mediante la forma de escoria, la cual está compuesta por residuos de combustión, revestimiento quemado, elementos indeseables, fundente (A Lezama Avendaño, 1991).

Ventilador:



Es la máquina que suministra aire para producir la combustión del coque, de la cantidad de aire que nos suministre resulta el éxito de la hornada, ya que excesos o deficiencias se manifiestan como problemas en la operación (A Lezama Avendaño, 1991).

Caja de viento:

Es el reservorio del aire procedente del ventilador, es el lugar desde donde entrará el aire al cubilote, su función es de un plenum (A Lezama Avendaño, 1991).

Toberas:

Son el vínculo de unión entre el cubilote y caja de viento, ya que a través de ellas circula el aire de la caja de viento al interior del horno, su dimensionamiento es sustancial para el correcto funcionamiento (A Lezama Avendaño, 1991).

Revestimiento:

Como su nombre lo indica, es el material que reviste interiormente a la coraza de hierro, para que el calor generado en el interior, mantenga la temperatura elevada y no tengamos pérdidas por transmisión de calor hacia fuera, es un material impermeable, normalmente se usan ladrillos refractarios de composiciones químicas conocidas, si el horno es ácido, los ladrillos del recubrimiento deben ser de sílice alúmina; si es básico, los ladrillos deben ser de magnesita o dolomía (A Lezama Avendaño, 1991).

Coraza:

Es la plancha de hierro, que envuelve el revestimiento del horno, es en sí el esqueleto, lo que lo mantendrá con su forma y dimensiones (A Lezama Avendaño, 1991).

Puerta de carga:

Es la puerta por donde se alimentará al cubilote, ya que por allí se hará la cama de las cargas sucesivas de hierro y coque, servirá además para controlar cuando sufra un atagantamiento el horno (A Lezama Avendaño, 1991).



1.11 Ventajas y Desventajas

Entre las ventajas que podemos enumerar en este horno están: bajo costo de producción, inversión inicial muy baja comparada con similares en producción eléctrica, capacidad de producción de hierros grises aleados, posibilidad de fabricación local, altas velocidades de producción (R Aristizábal Sierra, 2006).

Entre las desventajas podemos decir: control dificultoso de la composición química, una vez que el metal ha sido fundido podemos alterar su composición química de manera limitada, así mismo una vez que el metal ha sido fundido no podemos elevar más su temperatura (R Aristizábal Sierra, 2006).

1.12 La reacción de combustión

Las reacciones más importantes relacionadas con la combustión son: la reacción de combustión, la reacción de gasificación por CO_2 (conocida como la reacción de *Boudouard*) y la reacción de gasificación por vapor de agua (R Aristizábal Sierra, 2006).

Tanto el balance térmico, como la pérdida por oxidación de los elementos metálicos en la carga, dependen del avance relativo de estas reacciones, el cual se ve reflejado directamente en la calidad de las piezas que se producen, ya que de la temperatura del metal de salida dependerá en gran parte el éxito de los procesos de metalurgia de cuchara y la generación de algunos defectos tales como las contracciones, juntas frías, segregación, mal acabado superficial, etc., de ahí que un estudio térmico sea importante desde el punto de vista económico tanto para la eficiencia del horno como para la producción (R Aristizábal Sierra, 2006).

La energía necesaria para el proceso se genera cuando el coque-incandescente se pone en contacto con el oxígeno que entra en el sople produciendo la reacción de combustión. Los gases calientes producto de la combustión suben por la columna del horno y entran en contacto con la carga metálica fundiéndola (R Aristizábal Sierra, 2006).

Cuando el oxígeno que transporta el aire del sople entra en contacto con el coque incandescente, ocurre esta reacción que es exotérmica y produce la



mayor parte del calor necesario para el proceso. En el horno de cubilote ocurre en una zona muy cercana a las toberas, en donde la temperatura se encuentra por encima de 2.000 °C.

La reacción es de carácter heterogéneo ya que en ella se encuentran involucrados un sólido (coque) y un fluido gaseoso (aire); bajo las condiciones térmicas en las cuales ocurre, la cinética está controlada por el transporte del reactante gaseoso (oxígeno), hasta la superficie del coque (Stanek, 1992).

La reacción de gasificación por CO₂ o reacción de *Boudouard*.

El CO₂ generado durante la reacción de combustión puede reaccionar con el carbono en el coque para producir la reacción. Esta reacción es endotérmica y consume gran parte del calor generado en el proceso. Aunque desde el punto de vista energético podría considerarse indeseable, es importante que durante el proceso avance en cierto grado, ya que disminuye las pérdidas por oxidación de los elementos metálicos en la carga (Seymour, 1982).

La cinética de esta reacción es también de carácter heterogéneo. Los mecanismos cinéticos que la gobiernan dependen de la temperatura. A temperaturas inferiores a 1.000 °C la velocidad está controlada por la reactividad, ésta a su vez depende de la calidad del coque y de las condiciones bajo las cuales se haya llevado a cabo el proceso de coquización (Seymour, 1982).

En el rango de temperaturas entre 1.000 y 1.200 °C la velocidad está limitada por dos mecanismos: el transporte del reactante gaseoso CO₂ hasta la superficie del coque y la difusión de éste a través de los poros, por tanto, la propiedad más importante en este intervalo es el volumen y la estructura de los poros. Por último, cuando la temperatura es mayor a 1.200 °C la reacción se hace muy rápida y el dióxido de carbono no tiene suficiente tiempo para difundirse hacia el interior, por tanto la velocidad de reacción queda limitada por el transporte del reactante en la fase gaseosa y depende del área específica del coque (Seymour, 1982).



Reacción de gasificación por vapor de agua

El agua ingresa al cubilote a través de dos vías. La primera es la humedad presente en los materiales de carga, la segunda es el vapor de agua que ingresa con el aire de soplado. La humedad de los materiales de carga, se evapora luego de ingresar al horno en una zona muy cercana a la puerta y sale con los gases en la chimenea, su efecto es despreciable (Society., 1999).

El vapor de agua que ingresa en el aire de soplado llega directamente a la zona de combustión del horno y reacciona con el coque. De la misma manera como para la reacción de *Boudouard*, la cinética de la gasificación por vapor de agua (Society., 1999).

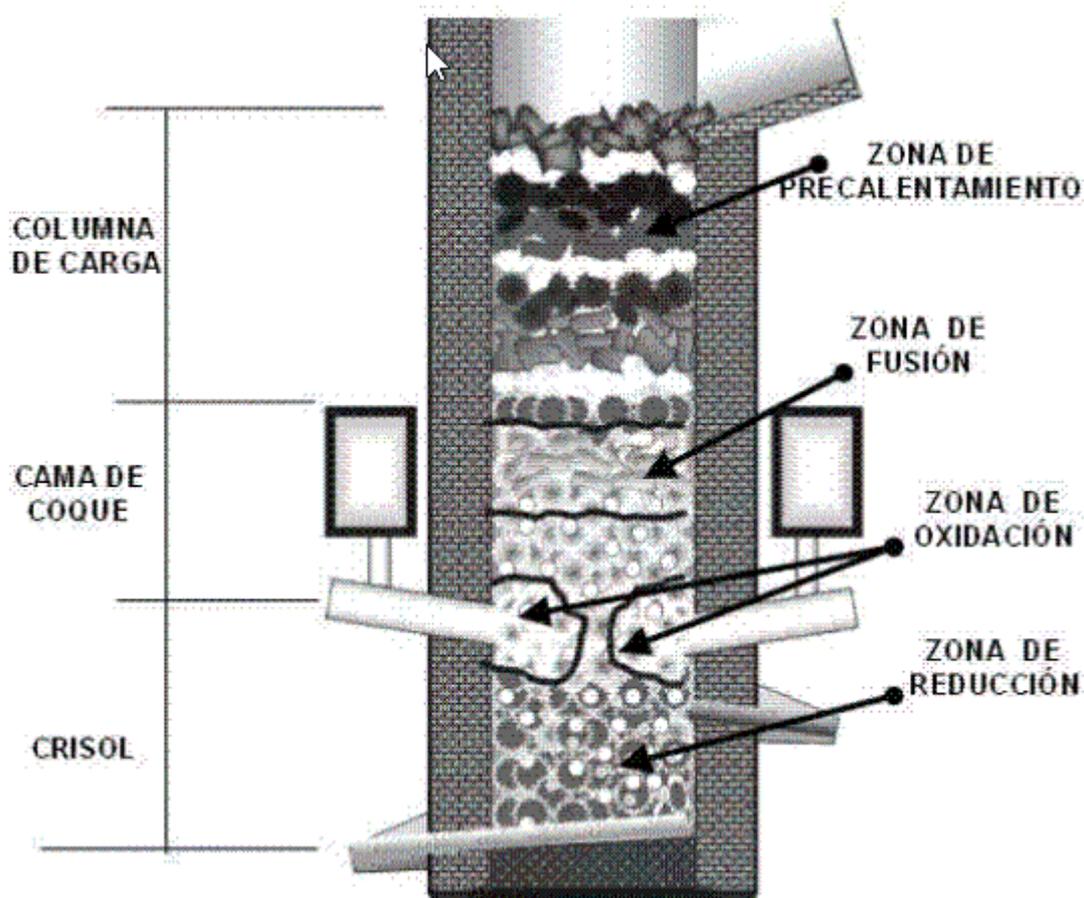


Figura 2. Localización de las zonas del Horno de cubilote (Aspita, 2007)

1.13 Análisis numérico

El análisis o cálculo numérico es la rama de las matemáticas encargada de diseñar algoritmos para simular aproximaciones de solución a problemas en

análisis matemático. Se distingue del cómputo simbólico en que no manipula expresiones algebraicas, sino números (Demmel, 1997).

El análisis numérico constituye un área de las ciencias matemáticas relativamente nueva de esta ciencia, que ha adquirido bastante impulso por el avance vertiginoso de la computación. Una pequeña definición puede ser: el análisis numérico es una rama de las matemáticas cuyos límites no son del todo precisos (G Castillo García, 2010).

El análisis matemático con el surgimiento de otras ramas de esta ciencia empieza a especializarse en análisis real, análisis funcional, análisis armónico, análisis complejo, y el análisis numérico. Es por ello que el estudio de algoritmos de los problemas de matemáticas continuas se llama Análisis Numérico. Un algoritmo es un procedimiento que describe, sin más ambigüedades, una serie finita de pasos a realizar en un orden específico (G Castillo García, 2010).

Por ejemplo, las ecuaciones diferenciales ordinarias aparecen en la mecánica celeste para la predicción de los movimientos de planetas, estrellas y galaxias; el álgebra lineal numérica es importante para el análisis de datos (Demmel, 1997).

El análisis numérico se potencia con la necesidad de exactitud en el cálculo de resultados precisos para la solución de situaciones en la física y sus distintas subdisciplinas y la astronomía, entre otras. Su aplicación a problemas de nuestro mundo real, realza la importancia de esta línea de trabajo, basada en aproximaciones cada vez más exactas, logradas por variados métodos de aproximación a puntos determinados (Demmel, 1997).

Antes de la llegada de los ordenadores modernos, los métodos numéricos dependían a menudo de fórmulas de interpolación manuales aplicadas a los datos de grandes tablas impresas. Desde mediados del siglo XX, los ordenadores calculan las funciones necesarias en su lugar, pero muchas de las mismas fórmulas siguen utilizándose, no obstante, como parte de los algoritmos del software (Brezinski, 2012).



La necesidad de exactitud, hace que las matemáticas y las computadoras (ordenadores) se unan en esta tarea tan importante para el progreso del trabajo de matemáticas aplicadas en los más diversos ámbitos de ingeniería y física (Brezinski, 2012).

Este matrimonio obligado de las matemáticas y los ordenadores a potencializado en pocas décadas, a esta joven ciencia, a un fructífero desarrollo. La cantidad de pasos repetitivos, algoritmos, o procesos iterativos, los han unido aún más, por la facilidad que prestan las computadoras en un trabajo eficiente y eficaz. Por mencionar y para que se comprenda la real importancia de este trabajo unido, es el menor costo en tiempo que se requiere el realizar estos procesos de cálculo. El desarrollo de software es de vital importancia para ayudar a comprender el análisis numérico (G Castillo García, 2010).

1.14 Historia

El campo del análisis numérico es anterior a la invención de los ordenadores modernos en muchos siglos. La interpolación lineal ya se utilizaba hace más de 2000 años. Muchos grandes matemáticos del pasado se preocuparon por el análisis numérico, como se desprende de los nombres de importantes algoritmos como el método de Newton, el polinomio de interpolación de *Lagrange*, la eliminación gaussiana o el método de Euler (Brezinski, 2012).

La calculadora mecánica también se desarrolló como herramienta de cálculo manual. Estas calculadoras evolucionaron hasta convertirse en ordenadores electrónicos en la década de 1940, y entonces se descubrió que estos ordenadores también eran útiles para fines administrativos. Pero la invención del ordenador también influyó en el campo del análisis numérico, ya que ahora se podían hacer cálculos más largos y complicados (Brezinski, 2012).

1.15 Fuentes de errores

Los algoritmos de los métodos numéricos suelen implementarse por medio de computadoras (Forsythe, 1970). Estas poseen algunas propiedades que



causan fallas al emplearlas para hallar la solución numérica de problemas matemáticos, entre las que se encuentran las siguientes:

- 1- Las computadoras son capaces de almacenar un número finito de dígitos, por lo que no pueden almacenar el conjunto de los números reales en su totalidad para realizar operaciones numéricas con estos. En cambio, cuentan con un subconjunto de los números reales al cual se conoce como números de punto flotante o números de máquina. Al error al que conlleva esta limitante se le llama error de redondeo (Forsythe, 1970).
- 2- Existen problemas que involucran muchos cálculos para su solución. En ocasiones, las soluciones son sensibles a la precisión de los cálculos intermedios, en cuyo caso se dice que las soluciones pueden haber sido perturbadas por los datos (Forsythe, 1970).
- 3- A mayor número de operaciones realizadas se tendrá un error de redondeo mayor. La velocidad que proveen las computadoras para el procesamiento ha agilizado significativamente la rapidez con la que se calculan operaciones. Sin embargo, la propagación de errores de redondeo por los cálculos realizados por computadoras puede derivar en la inestabilidad de los resultados arrojados por los algoritmos programados en ellas (Forsythe, 1970).

El interés en asegurar cierto nivel de precisión en los resultados numéricos provistos una computadora se debe a sus posibles repercusiones en la práctica. Por ejemplo, en el ámbito académico se han dado casos de artículos de investigación en los que el error de redondeo ha impedido que los resultados sean reproducibles y, en ocasiones, este ha sido incluso motivo de rechazo para su publicación (Altman, 2004).

La limitante en la representación de números reales mediante el punto flotante también tiene repercusiones en las gráficas generadas por medio de una computadora. Cuando un número es menor a lo que se conoce como el ϵ de máquina, la computadora es incapaz de representarlo (McCullough, 2000).

Esto puede hacer que las gráficas asociadas a valores numéricos menores al ϵ presenten falsos comportamientos y afectar la toma de decisiones basadas en ellas, con consecuencias insospechadas, por ejemplo, al realizar



pronósticos, área en la que la precisión juega un papel crucial (McCullough, 2000).

Existen otros tipos de error en el contexto de los métodos numéricos que merecen igual atención y cuidado. Errores de truncamiento y de conversión, entre otros, han dado origen a múltiples catástrofes: la falla del misil *Patriot*, la explosión del cohete *Ariane 5*, el hundimiento de la plataforma petrolera *Sleipner* son solo algunos ejemplos de ello. De ahí la importancia de reconocer estas fuentes de error para anticiparse a ellas y, en su caso, detectarlas y corregirlas.

1.16 Antecedentes de Análisis Numérico de Fusión en Hornos de Cubilotes

Dentro de los últimos avances que se han realizado para el horno de cubilote está la simulación del proceso basado en modelos matemáticos. Esta simulación permite integrar las complejas interacciones, predecir las salidas del cubilote a partir del conocimiento de las variables de entrada y además visualizar lo que sucede en su interior en cuanto a la variación de la composición química de los materiales de carga y de los gases, los perfiles de temperatura y demás variables a lo largo de la columna del horno (Aspita, 2007).

Si bien los resultados de las simulaciones tienen muy buenas aproximaciones, muchos de los procesos han sido simplificados dentro de los modelos matemáticos para facilitar su solución numérica; además algunos de los procesos que ocurren se han descrito sólo de manera aproximada debido a la falta de conocimiento (Aspita, 2007).

En cuanto a la validación experimental de los modelos que describen los cambios en la composición química de la carga metálica se ha tenido para la validación sólo la información del material de carga que ingresa al horno y del metal que sale por la piqueta, dejando incertidumbre de lo que pasa realmente cuando la carga metálica se va aproximando al nivel de las toberas (Aspita, 2007).



1.17 Software Utilizado

SolidWorks es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software que ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño (solid-bi, 2022).

La labor de *SolidWorks* en el proceso de desarrollo del producto es muy específica, las soluciones ayudan a acelerar el proceso ahorrando tiempo y dinero dando paso a la innovación de los productos. *SolidWorks* ofrece soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño (solid-bi, 2022).

Este software cuenta con el producto *SolidWorks Simulation*, el cual somete los diseños a condiciones idénticas que experimentaría en la realidad, aumentando la calidad de los productos al tiempo que reduce el coste de sus prototipos y evalúa el rendimiento de los productos para mejorar la eficacia de éstos desde las primeras fases de diseño y controlar su ciclo de vida. Se perfeccionan los diseños gracias al análisis de simulación y se adapta el producto según los resultados obtenidos (solid-bi, 2022).

Dentro de este producto existe la herramienta de análisis térmico que nos permite predecir el comportamiento del calor en nuestros diseños y así poder hacer cambios en la geometría de nuestros diseños, en el tipo de material, o en cualquier factor físico que esté alterando las condiciones de trabajo de nuestros productos (solidworks, 2022).

Los análisis térmicos son relativamente fáciles de realizar, pero son difíciles de medir físicamente, especialmente cuando se trata de componentes internos. Es por eso que la validación virtual nos facilita mucho las cosas, este nos muestra una serie de resultados como lo son temperatura, gradiente de temperatura, flujo de calor (solidworks, 2022).



Conclusiones Capítulo 1

Realizada la búsqueda bibliográfica y la consulta con expertos no se ha entrado un análisis numérico mediante software de la tecnología de obtención de FeMn en hornos de cubilote.

CAPÍTULO 2

2. Metodología de Cálculo de los Parámetros para la Producción del Ferromanganeso.

La producción de ferroaleaciones en el mundo se realiza financiadas por los consorcios y monopolios metalúrgicos, debido al sobreconsumo de portadores energéticos entre ellos la electricidad equivalente a 5.85 MW/Ton, el ferromanganeso es una de las ferroaleaciones de más demanda por su aplicación en la producción de aceros especiales. En Cuba el ferromanganeso es comercializado por el Grupo Empresarial ACINOX COMERCIAL.SA a un precio de alrededor de \$1550,00 dls la tonelada.

En la empresa de Fundiciones Acero-Hierro de Holguín se desarrolló una tecnología de producción de ferromanganeso en hornos de cubilotes a partir del mineral de manganeso que propicie el ahorro de los portadores energéticos.

2.1 Desarrollo de la Tecnología

Para el desarrollo de esta tecnología utilizaremos el horno de cubilote del taller de fundiciones ferrosas perteneciente a HOLMECA que está compuesto por un cilindro vertical, formado por planchas de acero soldadas de 6 a 13 mm de espesor, montadas por secciones sobre una plancha base, que a su vez es soportada por 4 columnas de apoyo, las cuales están fijadas al cimiento.

En el centro de la plancha base se encuentra una abertura de diámetro 700 mm igual al diámetro interior del refractario del cubilote, donde se coloca la tapa de cierre y es fijada por medio de un puntal.

La Piquera u orificio de descarga se encuentra en la superficie de cilindro, al frente de la posición de trabajo, a una altura de 120 mm sobre la plancha base.

En la misma situación se encuentra el canal de descarga con una inclinación de 10 hacia abajo para que el metal corra libremente.



La bigotera de escoria es un orificio situado a 90° de la boca de descarga a una distancia de 120 mm por debajo de las toberas, con un canal de descarga más corto que el de la piqueta.

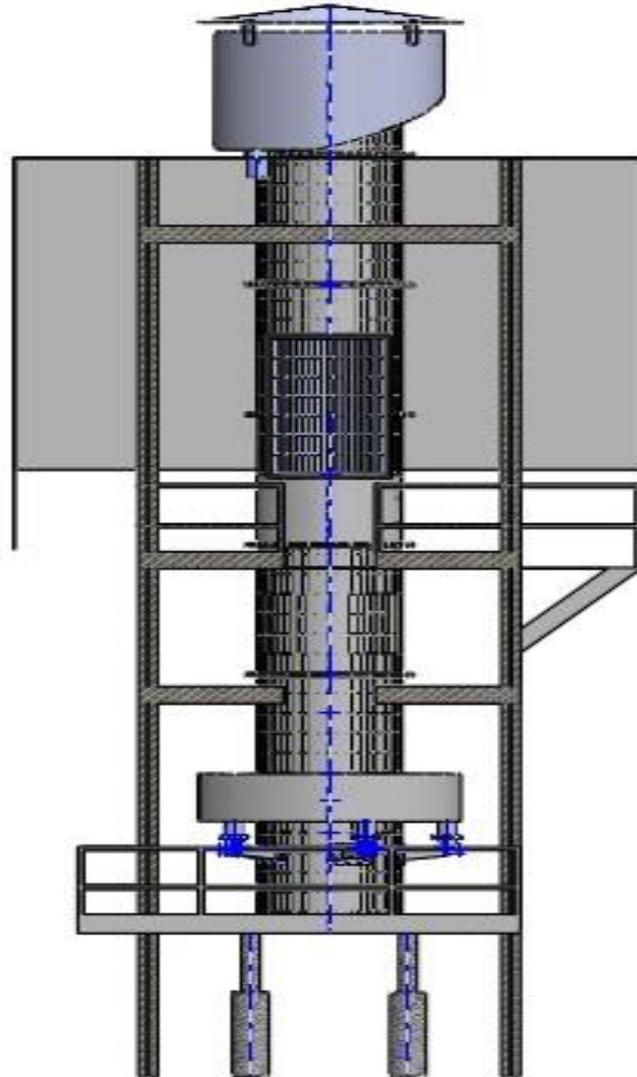


Figura 3 Modelación del Horno de Cubilote de 700 mm de diámetro.

Las toberas son 3 y están situadas a una altura de 617,72 mm desde la plancha base hasta la parte inferior de las mismas; esto constituye la altura de la cuba o crisol colector de metal.

Las toberas son ventanas de mayor ancho que altura, cuya área total (A_{IT}) será igual al 20 % del área interior del cubilote.

$$d = d_t + d_r = 7 + 4,8 = 11,8 \text{ dm}$$

(1)

$$A_{IT} = \pi \times d^2 = 3,1416 \times (11,8)^2 = \mathbf{437,297dm^2} \quad (2)$$

Donde:

d_t = Diámetro de trabajo.

d_r = Diámetro del revestimiento.

$$A_T = 20\% * A_{IT} = (20 * 437,297) / 100 = \mathbf{87,487 dm^2} \quad (3)$$

Por lo tanto, el área de una tobera será igual al área total dividida por 3 toberas.

$$A_T = 87,487 / 3 = \mathbf{29,1530 dm^2} \quad (4)$$

La forma de la tobera será rectangular, con mayor ancho que altura, rectas en la parte exterior del cubilote y cónicas aumentando el ancho y disminuyendo la altura en el interior de cubilote, manteniendo el área con relación al eje tangencial del cubilote, es decir \varnothing 100 mm.

Las mirillas se encuentran en el extremo exterior de las toberas, compuestas por ventanillas de cristal, por donde se observa el proceso de la fusión y a través de ellas se puede barretar el coque para su mejor descenso.

La ventana de trabajo se encuentra a 180° con relación a la piqueta y se protege con refractario durante la fusión a través de la ventana se realiza la reparación del crisol del horno y se construye el piso, las dimensiones de ella serán de 300 x 400 mm.

La caja de aire comienza en la parte superior de las toberas y tendrá una altura de 570 mm y un ancho de 360 mm, separado 100 mm desde la pared del cubilote, el fondo de la caja de aire se comunica con las toberas para el suministro de aire al horno.

La boca de carga se encuentra a 180° con relación a la piqueta, en la parte posterior del horno, a una altura tomada desde el piso o solera hasta su borde inferior igual a 6 veces el diámetro interior del cubilote. Su tamaño varía de acuerdo al método de carga utilizado.

$$H = 700 \text{ mm} \times 6 = 4200 \text{ mm} \quad (5)$$

En la chimenea la altura debe sobresalir el techo del edificio con su correspondiente cobertura a la que algunas veces se adiciona un apaga chispas. 11,0 m

El ventilador puede ser de tipo centrífugo o de émbolo rotatorio, cuya capacidad deberá estar de acuerdo al volumen de aire necesario según la productividad del cubilote.

2.2 Datos Técnicos:

Diámetro interior del cubilote: **7 dm**

Área interior del Cubilote:

$$A_{I\ C} = (7^2 \times 3,1416) : 4 = 38,485 \text{ dm}^2 \quad (6)$$

Altura de la Cuba:

$$H_{\text{Cuba}} = \frac{A_{I\ C}}{d_t} = \frac{38,485 \text{ dm}^2}{7 \text{ dm}} = \mathbf{5,498 \text{ dm}} \quad (7)$$

$$H_{\text{Toberas}} = H_C + H_{\text{Bigotera}} + 120 = 5,498 + 0,50 + 1,20 = \mathbf{7,2 \text{ dm}} \quad (8)$$

2.3 Cálculo de la Productividad

Es igual al Área interior del cubilote por el factor empírico según la relación carga de hierro – coque.

Tabla 1. Factor empírico según la relación carga de Hierro – Coque.

Relación	Factor
6 : 1	0,047
8 : 1	0,0622
10 : 1	0,072
12 : 1	0,0925

Tomando una relación de **6:1** nuestro cubilote de 7 dm de diámetro con un área de 38,485dm² podrá producir:

$$38,485\text{dm}^2 * 0,047 = \mathbf{1,808 \text{ t/h}} \quad (9)$$



Tomando una relación de 10:1 tendremos:

$$38,485\text{dm}^2 \times 0,072 = \mathbf{2,77 \text{ t/h}} \quad (10)$$

La carga de coque del cubilote es fija y determinada, variando solo el tamaño del coque de acuerdo con el diámetro del horno. En la práctica se ha demostrado que la mejor operación se obtiene cuando el tamaño del coque es de 1/12 hasta 1/10 del diámetro del cubilote.

El tamaño del coque será de 700/12 hasta 700/10, o sea, 58,33 hasta 70 mm respectivamente, pero en la práctica se utiliza de 50 hasta 120 mm.

2.4 Cantidad de Coque necesario por carga:

La altura de la carga de coque debe estar entre 1 dm y 1,3 dm. La media será de 1,2 dm. El volumen de coque será:

$$V_{\text{Coque}} = 38,485\text{dm}^2 \times 1,2 \text{ dm} = \mathbf{46,2 \text{ dm}^3} \quad (11)$$

En la práctica se utiliza para cargar el coque un recipiente con la capacidad volumétrica obtenida, sin la necesidad de pesar el mismo en repetidas ocasiones.

Si se desea determinar el peso de la carga de coque hay que tomar en consideración que el peso del mismo varía según su tamaño, para un volumen determinado en la forma siguiente:

Tabla 2. Peso del coque según su tamaño.

Tamaño del Coque	Peso (Kg./ dm ³)
25 a 60 mm	0,53
60 a 90 mm	0,48
75 a 100 mm	0,45
100 a 175 mm	0,43

Para un tamaño del coque entre 50 a 120 mm corresponde al grupo 1, cuyo peso es de $\approx 0,53 \text{ Kg} / \text{dm}^3$.

El peso de la carga de coque será de:



$$46,2\text{dm}^3 \times 0,53 \text{ Kg/ dm}^3 = \mathbf{24,47 \text{ Kg}} \quad (12)$$

La cantidad de coque debe estar dentro de los parámetros siguientes:

Carbón fijo	-- Sobre 86 %
Cenizas	-- Menor del 12 %
Azufre	-- Menor del 0.8 %
Materias Volátiles	-- Menor del 2 %
Humedad	-- Menor del 3 %

La Cantidad de Carga Metálica por Carga, la carga de coque se mantendrá fija, variándose siempre el mineral de manganeso.

Como la relación que hemos seleccionado es de 6:1 nuestra carga metálica será de:

$$Q_{\text{Metálica}} = 24,47 \times 6 = 146,8 \text{ Kg} \quad (13)$$

El fundente se utiliza generalmente de 1,5 a 2,5 % por Kg de metal cargado, dependiendo del grado de oxidación de los materiales de la carga metálica.

$$Q_{\text{Fundente}} = 146,5 \times 0,025 = \mathbf{3,67 \text{ kg}} \quad (14)$$

El tamaño del fundente debe estar entre 25 y 75 mm y se colocará sobre la carga metálica. Como fundente se utiliza generalmente la Caliza de 56 a 85 % de CaCO_3 .

El gasto de aire en m^3 se calcula de acuerdo al peso de la carga de coque. Teóricamente para la combustión completa de 1 Kg de coque se requieren 8 m^3 de aire, referido a 0 °C y 760 mm de la columna de mercurio. En la práctica se prevé un ligero exceso referido a una temperatura media de 15 °C y se toman 9 m^3 , considerando la resistencia y las fugas en el sistema.

En nuestro caso, necesitamos un volumen de aire de:

$$V_{\text{Aire}} = 24,47 \text{ Kg} \times 9 \text{ m}^3 / \text{Kg} = \mathbf{220,23 \text{ m}^3} \quad (15)$$

Por tanto, para producir 1 t/h de metal líquido, necesitamos un volumen de aire de:

Cargas / h de coque

$$\frac{1000 \frac{kg}{h}}{146.8 kg} = 6.81 \frac{Cargas}{h} \quad (16)$$

Volumen de aire / h

$$V_{Aire / ton} = 6,81 \times 220,23 m^3 = \mathbf{1500 m^3} \quad (17)$$

Altura de la Cama de Coque:

Esta puede variar desde 710 hasta 1345 mm sobre el borde superior de las toberas. La altura depende de la presión de aire en cm. de H₂O, medida en la caja de aire que puede variar desde 38 a 55 para cubilotes de 700 mm de diámetro, por lo que la altura de la cama de coque podrá obtenerse por la siguiente fórmula empírica:

$$(\sqrt{P} \times 124) + 150 \text{ mm} \quad (18)$$

Para el cálculo tomamos las 2 presiones.

$$(\sqrt{55} \times 124) + 150 = \mathbf{1069,6 \text{ mm}}$$

En la práctica es preferible tomar siempre la **altura mayor**.

$$\mathbf{H \text{ Total Cama de Coque} = H_{Toberas} + H \text{ Cama de Coque}} \quad (19)$$

$$\mathbf{H \text{ Total Cama de Coque} = 7,2 \text{ dm} + 10,696 \text{ dm}}$$

$$\mathbf{H \text{ Total Cama de Coque} = 17,89 \text{ dm}}$$

$$\mathbf{Q \text{ Cama de Coque} = 38,485 \text{ dm}^2 \times 17,89 \text{ dm} \times 0,53 \text{ kg} / \text{dm}^3} \quad (20)$$

$$\mathbf{Q \text{ Cama de Coque} = 365 \text{ kg}}$$

2.5 Cálculo de la carga para la producción de Fe Mn.

El cálculo de la carga se realiza teniendo en cuenta las materias primas, materiales y parámetros tecnológicos que intervienen en la fusión y obtención del ferromanganeso que se incorporaran a las tablas 1, 2 ,3, 4 y 5.



Tabla 3. Materias primas para la carga de 1 ton de ferromanganeso

Materia Prima	Cant. Kg	C		Si		Mn		S		P		Consumo para 1 t
		%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	
Mineral Mn	146.8	0,00 0	0,0 00	9,5 00	1,3 90	68,0 00	79,5 87	0,0 50	0,1 02	0,0 40	0,0 59	2005,2 08
Virutas Fe	9,747	3,30 0	0,1 29	2,3 00	0,0 22	0,60 0	0,04 7	0,0 80	0,0 11	0,2 00	0,0 19	133,59 4
Coque	24.47	85,0 00	6,4 60									260,41 7
Sub Total	190,0 00		6,5 89		1,4 12		79,6 34		0,1 13		0,0 78	2399,2 19
Total	114,0 00	5,78 0	6,5 89	1,2 39	1,4 12	69,8 54	79,6 34	0,0 99	0,1 13	0,0 68	0,0 78	2399,2 19

En la tabla 4 se incorpora la relación de las altas y bajas de los elementos durante la fusión en el horno de cubilote.

Tabla 4. Relación de las altas y bajas de los elementos de fusión

Elementos	Perdidas	Aumentos		
Si	75 ... 85			90
Mn	15...25			20
S		40....60		40
C		10....20		10
P				

En la tabla 5 se relaciona el aprovechamiento de los elementos durante la fusión en el horno de cubilote.

Tabla 5. Aprovechamiento de los elementos durante la fusión

% Aprovechamiento	
Para el Si	0,10
Para el Mn	0,80
Para el S	1,40
Para el C	0,40

Tabla 6. Consumo de coque para una relación 1:6

No.	Lugar	Para 1 000 Kg.		Para 5 000 Kg.	
		Cantidad de cargas (U)	Peso del coque (Kg)	Cantidad de cargas (U)	Peso del coque (Kg)
1	Cama de coque	1	223,0	1	223,0
2	Cargas	19	361,0	33	627,0
Total		20	584,0	34	850,0

En la tabla 7 se muestra el índice de los colores de los diferentes parámetros que componen la tecnología.

Tabla 7. Índice de colores.

Colores	Descripción
	Datos obtenidos de los parámetros del horno cubilote
	Resultado final de los cálculos
	Datos del desglose en % de la materia prima
	Variación de las pérdidas

2.6 Instrucción de la fusión de FeMn en horno de cubilote Ø 700mm

Para la obtención de FeMn en el horno de cubilote del taller de fundiciones ferrosas y no ferrosas de “HOLMECA” se establece la siguiente instrucción tecnológica.

ÍNDICE

- 1.0 Objetivo.
- 2.0 Alcance.
- 3.0 Definiciones.
- 4.0 Referencias.
- 5.0 Desarrollo.
 - 5.1 Materiales a utilizar y su preparación.
 - 5.2 Preparación para comenzar la actividad.
 - 5.3 Secuencia de las operaciones a realizar.
- 6.0 Registros

Los detalles de cómo es procesada esta instrucción tecnológica se muestra en el **Anexo I**

2.7 Análisis numérico de la obtención de ferromanganeso en horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior de “HOLMECA”

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos de tal forma que puedan resolverse usando operaciones aritméticas. Los métodos numéricos nos vuelven aptos para entender esquemas numéricos a fin de resolver problemas matemáticos, de ingeniería y científicos en una computadora, reducir esquemas numéricos básicos, escribir programas y resolverlos en una computadora y usar correctamente el software existente para dichos métodos y no solo aumenta nuestra habilidad para el uso de computadoras, sino que también amplía la pericia matemática y la comprensión de los principios científicos básicos.

El análisis numérico trata de diseñar métodos para “aproximar” de una manera eficiente las soluciones de problemas expresados matemáticamente. El objetivo principal del análisis numérico es encontrar soluciones “aproximadas” a problemas complejos utilizando sólo las operaciones más simples de la aritmética. Se requiere de una secuencia de operaciones algebraicas y lógicas que producen la aproximación al problema matemático.

En ingeniería, ciencia, industria, estadística, exactitud y precisión no son equivalentes. Es importante resaltar que la automatización de diferentes pruebas o técnicas puede producir un aumento de la precisión. Esto se debe a que, con dicha automatización, lo que logramos es una disminución de los errores manuales o su corrección inmediata.

Precisión: se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella.

Exactitud: se refiere a cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacto es una estimación.

También se refiere a la aproximación de un número o de una medida al valor verdadero que se supone representa. Cuando expresamos la exactitud de un

resultado se expresa mediante el error absoluto que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero. También es la mínima variación de magnitud que puede apreciar un instrumento.

Teniendo en cuenta los planteamientos anteriores se realiza el análisis numérico a la obtención o fusión del mineral de manganeso en el horno de cubilote de 700mm de diámetro interior del taller de fundiciones de HOLMECA. Dicho análisis consiste en un estudio térmico a la obtención o fusión del mineral de manganeso en el horno de cubilote de 700mm de diámetro interior utilizando el software *SolidWorks* para verificar si es factible la obtención del ferromanganeso en horno de cubilote.



2.8 Resultados del Estudio Térmico

En la Figura 4 se observa que al aplicar la temperatura de 1500°C necesaria para la fusión del mineral de manganeso la capa de revestimiento compuesta por chapa metálica de 6 mm de espesor, cartón de amianto de 8 mm de espesor, doble hilada de ladrillos refractarios de chamota es adecuada, solo permite llegar a la superficie exterior aproximadamente 10 °C, lo cual cumple con las medidas de protección e higiene del trabajo.

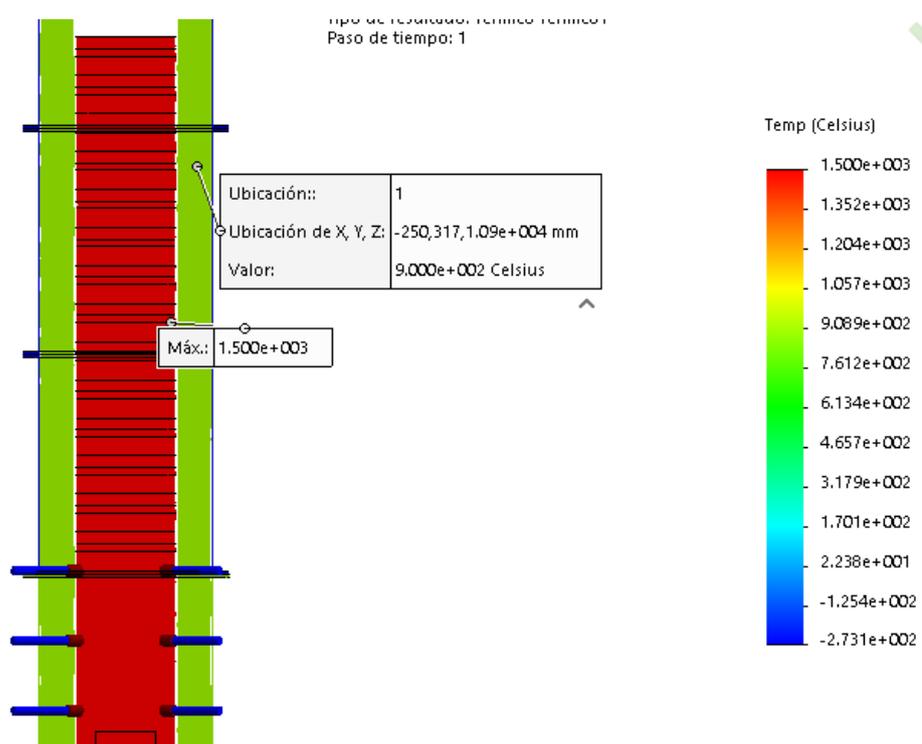


Figura 4. Resistencia de la capa de refractario y protección de la estructura del horno de cubilote.

En la Figura 5 se observa la homogeneidad del régimen térmico manteniendo una temperatura de alrededor de los 1 500 °C a lo largo de toda la altura de la columna de carga del horno, lo cual resulta adecuado para la fusión y vertido del ferromanganeso que oscila su punto de fusión desde 1150 ° C a 1350 ° C con una gravedad específica: 4,5 a 5,5 TM/m³, esta imagen del análisis numérico demuestra que el horno de cubilote es un fusor adecuado para producir el FeMn. Manteniéndose la temperatura alrededor de 10 °C en el exterior del horno lo que no afecta el medioambiente del entorno humano.

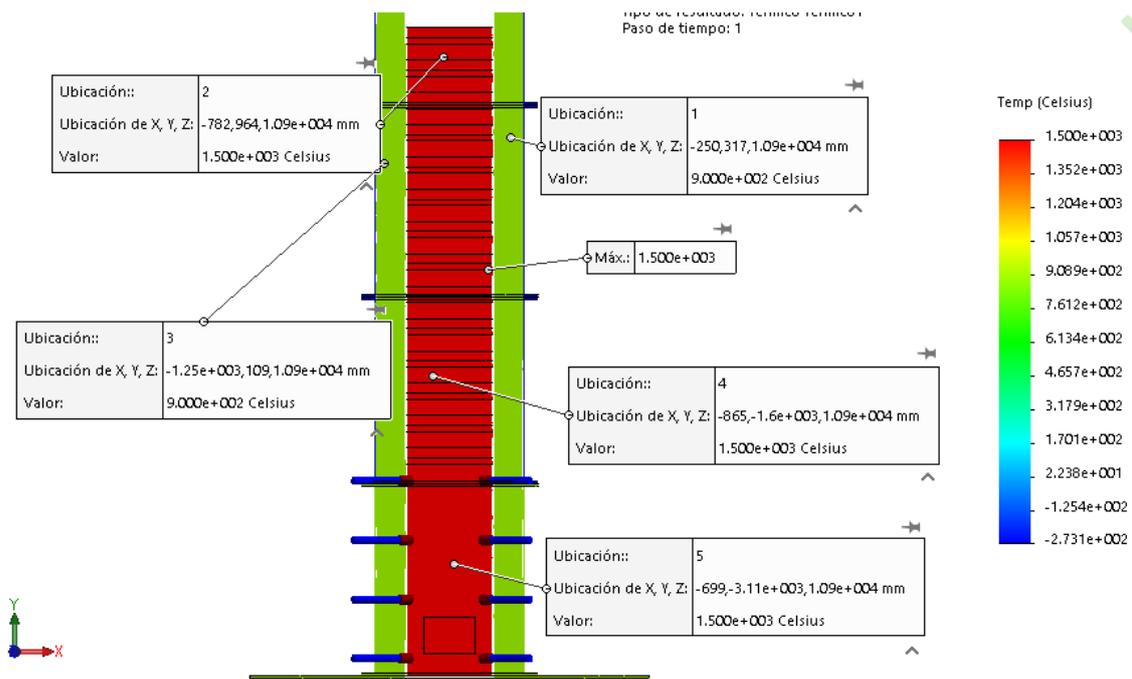


Figura 5. Homogeneidad del régimen térmico manteniendo una temperatura de alrededor de los 1 500 °C.

La Figura 6 también corrobora la homogeneidad del calentamiento del horno demostrando que los parámetros tecnológicos de fusión son adecuados y competitivos para la ejecución de la fusión del mineral de manganeso.

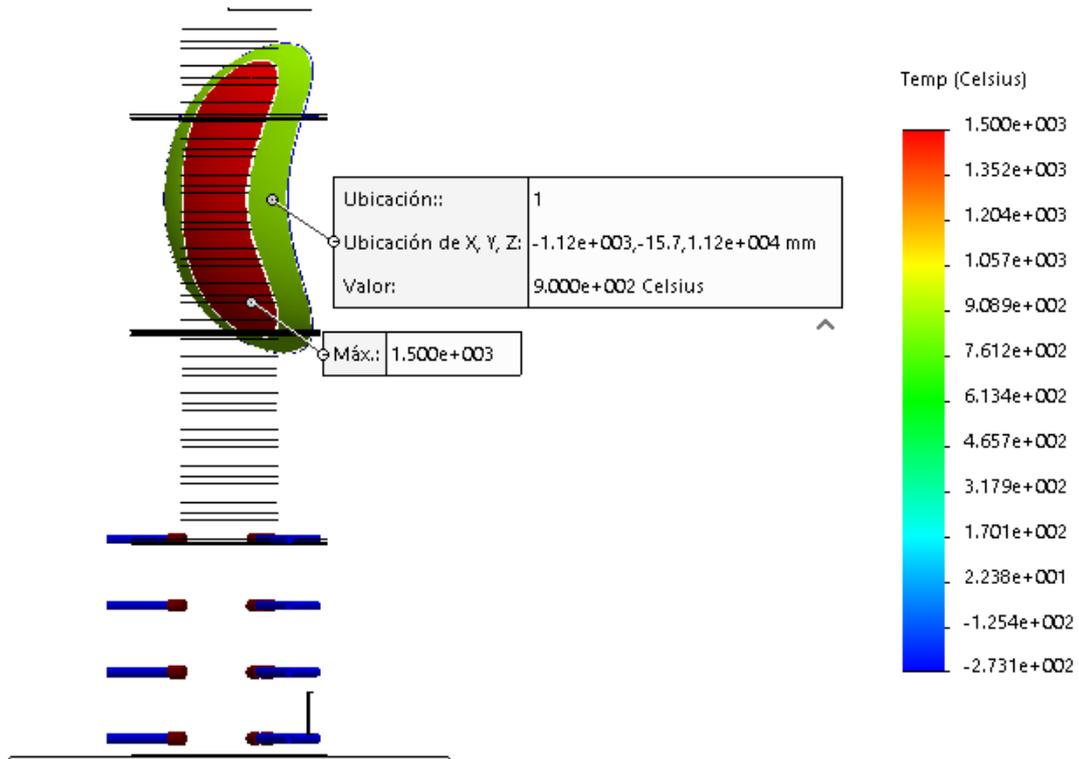


Figura 6. Homogeneidad del calentamiento del horno.

La Figura 7 demuestra que la cama de coque o cama de fuerza para el encendido, calentamiento y mantenimiento del régimen interior térmico de la cámara de combustión del horno para realizar la fusión del mineral de manganeso es la adecuada ya que propicia la temperatura de 1 500 °C sobre la cama de coque.

Nombre del modelo: Ensamblaje1 para el estudio
Nombre de estudio: Térmico 1-(Predeterminado-)
Tipo de resultado: Térmico Térmico1
Paso de tiempo: 1

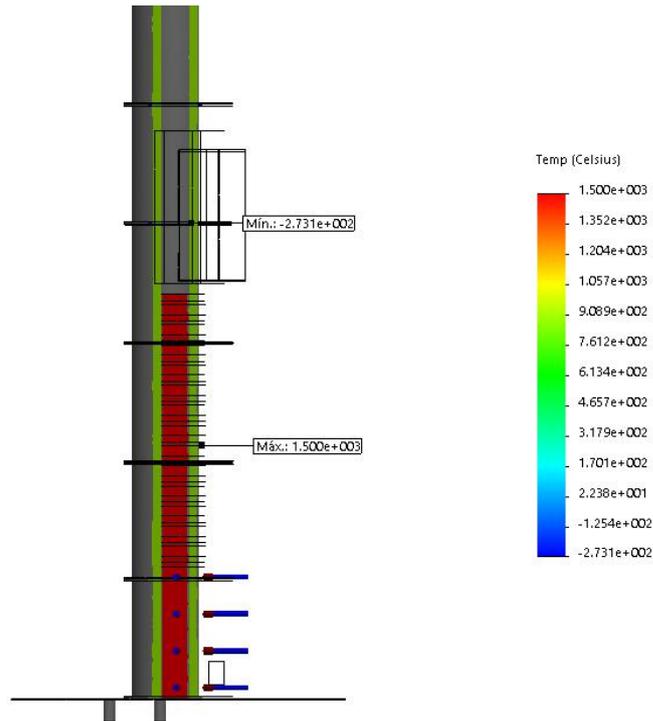


Figura 7. La cama de coque o cama de fuerza para el encendido, calentamiento y mantenimiento del régimen interior térmico.

Este análisis numérico ha demostrado que es acertada y viable el establecimiento de una tecnología de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de “HOLMECA”, lo cual permite establecer una línea de producción industrial.

2.9 Análisis del ahorro de portadores energéticos

Luego de desarrollada la tecnología de producción de FeMn en el horno de cubilote de HOLMECA, incorporamos los datos obtenidos a la tabla 8 comparándola con los parámetros de consumo aplicando la tecnología tradicional de producción de FeMn en hornos de arco eléctrico.

Tabla 8. Comparación de los índices de consumo de portadores energéticos

No.	Portador Energético	Tipo de horno				Ahorro	
		Horno de arco eléctrico		Horno de cubilote			
		Cantidad	MLC (\$)	Cantidad	MLC (\$)	Cantidad	MLC (\$)
1	Energía Eléctrica	5,85 MW/ton	1345,5	0,1666 MW/ton	38,31	5,68332 MW/ton	1307,19
2	Carbón Coque	-	-	0,2711 ton.	228,12	0,2711 ton.	228,12



2.10 Valoración Energético – Económica

Los datos técnico – económicos que se muestran en la tabla 8, nos permiten valorar que con la aplicación de la tecnología de producción de FeMn, bajo las condiciones específicas de HOLMECA, se cumplen los objetivos de esta investigación en cuanto a el ahorro de portadores energéticos en el proceso de producción de FeMn, ya que se disminuye el consumo de energía eléctrica de 5,85 MW/ton produciendo el FeMn en hornos de arco eléctrico hasta solo 0,1666 MW/ton utilizando el horno de cubilote.

Económicamente, aunque se incrementa el consumo de coque en el proceso 0,2711 toneladas por tonelada de fundido a un costo de \$ 228,12, lo cual es factible porque al compararlo al costo de la energía eléctrica utilizada se ahorra \$1079,07.

2.11 Valoración para la Defensa

Esta tecnología se utilizará para la producción de los fundidos que se utilizan como semiproductos en las producciones de las Empresas “Héroes del 26 de Julio” y “60 Aniversario de la Revolución de Octubre” que realizan la reparación de la técnica militar cubana.

2.12 Valoración Medioambiental

Esta tecnología permite disminuir las emisiones de gases y generación de desechos sólidos durante la fusión, con un volumen menor de escorias y otros desechos.



Conclusiones Capítulo 2

El análisis numérico desarrollado por la investigación demostró que la obtención de FeMn a partir de mineral es viable y sostenible en el horno de cubilote del taller de fundiciones ferrosas y no ferrosas de “HOLMECA”, por lo que fundamenta el establecimiento de una línea de producción industrial de FeMn en horno de cubilote.



Conclusiones Generales

1. Se realizó el análisis numérico del proceso de fusión logrando determinar la factibilidad de obtención de ferromanganeso en el horno de cubilote de HOLMECA de una manera competitiva y sostenible.
2. Con el análisis numérico se logra la eliminación de la prueba experimental y la serie "Cero", permitiendo disminuir el costo del proceso de la fusión en el horno de cubilote de HOLMECA.



Recomendaciones

En la actualidad esta tecnología se encuentra en fase experimental, por lo que se recomienda continuar profundizando en esta investigación durante la investigación de la tesis de pregrado, con el objetivo de demostrar su efectividad y recomendar su generalización al resto de las fundiciones del país.



Bibliografía

- A Lezama Avendaño, D. Z. V. (1991). Diseño y construcción de un horno de cubilote *bibdigital.epn.edu.ec*. doi: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6647>
- Akira, K. (2000). Relaciones comerciales entre Japón y Alemania: cooperación y rivalidad en el periodo de entreguerras. 89-108. doi: <http://librarium.org/book/14145/123>
- Altman, M. G., Jeff; McDonald, Michael P. (2004). Problemas numéricos en computación estadística para el científico social (en inglés). *John Wiley e hijos*.
- Amado Cruz-Crespo, L. P., Rafael Quintana Puchol, Carlos R. Gómez, Jorge L. García, Jacomino. (2020). Obtención de ferromanganeso de alto carbono como consumible de materiales para la soldadura. *Centro de Investigación de Soldadura (CIS) de la Universidad Central "Martha abreu" de las Villas*. doi: <https://www.monografias.com/trabajos94/obtencion-ferromanganeso-alto-carbono-como-consumible-materiales-soldadura/obtencion-ferromanganeso-alto-carbono-como-consumible-materiales-soldadura>
- Aspita, P. A. P. (2007). *Evaluación Experimental de los Perfiles de Composición Química del metal en el Horno de Cubilote y Comparación con algunos Modelos Matemáticos*. Universidad de Antioquia.
- Brezinski, C., & Wuytack, L. (2012). *Análisis numérico: Desarrollos históricos en el siglo XX*. Elsevier.
- Contributors, E. (2021). HOLMECA (empresa mecánica). In EcuRed (Ed.).
- Christophe, B. (1870). Ferro-manganeso. Aleación de hierro y manganeso, aplicación a la fabricación de acero. *boletín del museo de la Industria*. doi: https://books.google.fr/books?id=1upGAAAaAAJ&dq=ferromangan%C3%A8se+industrie&lr=&hl=fr&source=gbs_navlinks_s
- Demmel, J. W. (1997). *Algebra Lineal Numérica Aplicada*: SIAM.
- Emisiones, S. E. d. I. d. E. M. d. e. d. (2018). FABRICACIÓN DE FERROALEACIONES (EMISIONES DE PROCESO). doi: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/040302-ferroaleaciones-proceso_tcm30-509727.pdf
- Espinosa, C. A. (2021). El futuro se cultiva con HOLMECA. *Ahora*. doi: <http://www.ahora.cu/es/holguin/13048-el-futuro-se-cultiva-con-HOLMECA>
- Ferro manganeso. (2022). *Euskatfund Maquinaria y producción de fundición*. doi: <http://www.euskatfund.com/es/ferro-manganeso-8-3.html>
- Ferromanganeso. (2022). doi: <https://mineral-s.com/ferromanganeso>
- Forsythe, G. E. (1970). Trampas en la computación, o por qué un libro de matemáticas no es suficiente. *El mensual matemático estadounidense* 77 (9): 931-956.
- G Castillo García, L. F. S., D Rivas Urra (2010). Introducción al análisis numérico *repobib.ubiobio.cl*. doi: repobib.ubiobio.cl
- George M et al, L. A. (2014). Ferroaleaciones. *Anuario de minerales 2014 (U.S. Estudio geológico)*. doi: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70048194>
- Lautridou, J. P. y. V., G. (1970). Paleosuelos de Saint-Pierre-lès-Elbeuf (Sena-marítimo). *Boletín de la Asociación Francesa para el Estudio del Cuaternario*. doi: http://www.persee.fr/articleAsPDF/quate_0004-5500_1970_num_7_2_1156/article_quate_0004-5500_1970_num_7_2_1156.pdf
- Lisa. (2010). Ferroaleaciones. *anuario de minerales 2008 (U.S. Estudio geológico)*. doi: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70048194>
- McCullough, B. (2000). «¿Es seguro asumir que el software es exacto?». *Revista internacional de pronósticos* 16 (3): 349-357. doi: ta.twi.tudelft.nl



- Mironenko, P. F. e. a. (1991). *Influencia del silicio en la distribución del manganeso en la producción de FeMn de alto carbono. Producción de Ferroaleaciones*: Cheliabinsk.
- Moreno, G. (2018). Construcción de un horno de cubilote. *dspace.espol.edu.ec*. doi: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/45338>
- Pino Tarragó Julio César et al, N. M. E. (2014). *Fusión en la Metalurgia*. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10172/4/Fusion%20en%20la%20metalurgia.pdf>.
- R Aristizábal, H. M., C Silva. (2006). Modelo matemático para los fenómenos de combustión en un horno de cubilote *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. doi: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000200006
- Rodrigues, E. (2018). Directiva 96/61 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación. Epigrafe 2.5 Ferroaleaciones. *Fundación Entorno Empresa y Medio Ambiente*. doi: <https://prtr-es.es/Data/images//Gu%C3%ADa%20Tecnol%C3%B3gica%20Ferroaleaciones-FEC2E2FA892CF0A9.pdf>
- Seymour, K. (1982). The Properties of Coke Affecting the Cupola Performance. Society., A. F. (1999). Manual de Copula
- solid-bi. (2022). solidworks. doi: <https://solid-bi.es/solidworks/solidworks>. (2022). analisis termico. doi: https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/simulacion/solidworks_simulation/analisis-termico-con-solidworks/
- SOM, G. (2022). Ficha Técnica | Ferro Manganeso. *som.cl*. doi: <http://som.cl/ferromanganeso/>
- Stanek. (1992). Modelo Matemático de un Horno de Cúpula.
- Truffaut. (2000). *Manganeso y acero: contribución a la historia del hierro y el acero en Francia, 1774-1906*.
- Tsankov, K. (1990). Fábrica de producción de ferroaleaciones en Cuba. *Conferencia Científico-Técnica Nacional*.

Anexo: I. Formulario “Control de fusión y vertido”

1. OBJETIVO

Establecer la metodología para la fusión de FeMn.

2. ALCANCE

Es aplicable al horno de cubilote de diámetro 700 mm.

3. DEFINICIONES

No se aplica.

4. REFERENCIAS

E 7.5.1- “Revestimiento refractario del horno de cubilote”.

5. DESARROLLO

5.1 Materiales a utilizar y su preparación.

5.1.1 Materiales.

a) Carga metálica:

Virutas de Hierro.

b) Carga no metálica:

Mineral de manganeso.

d) Combustible:

Carbón Coque.

Especificaciones de calidad del coque:

Tamaño: Mayor de 40 - 120 mm. (Si tiene impurezas menores de 6 mm se tamizaría con una malla de 10 mm.

- ✓ Carbón fijo mayor del 86%
- ✓ Ceniza menor del 12%
- ✓ Materiales volátiles menores del 2%
- ✓ Azufre menor del 0,8%

5.1.2 Preparación de los materiales.

El Mineral de manganeso debe estar seco y sin impurezas.

- Los desechos de la propia producción se parten con mandarina o pera. No deben contener excesiva cantidad de arena sílice ni machos.
- El tamaño de la carga metálica no debe exceder de 50 x 50 x 15 mm y un peso no mayor de 0,3 kg.

5.2 Preparación para comenzar la actividad.

5.2.1 Preparación del cubilote para la fusión.

a) Recoger los restos de carbón coque, y carga metálica para utilizarlos nuevamente en la próxima fundición.

b) Se limpia de residuos metálicos de hierro, coque y residuos de escorias de la canal de descarga y del escoriador, para ello se utilizan: barreta, mandarina, pala y rastrillo.

c) Limpiar el fondo del horno de los restos de la fusión anterior, utilizando martillo, cincel, barreta, pala, rastrillo y la grúa. Esto se efectúa con golpes fuertes. Se separan el coque, y los restos de carga metálica sobrantes para utilizarlos en la próxima fundición. Se separan los restos de escoria y arena para eliminarlos del proceso.

d) Limpiar las paredes del interior del horno de los restos de la fusión anterior, utilizando un martillo y un cincel. Esto se efectúa con golpes fuertes y cortos para proteger el revestimiento de las sacudidas y conservar la superficie de la capa cristalina del mismo.

e) Reparar los sitios dañados de la cuba, humedeciendo con agua de arcilla refractaria o mezcla refractaria de empaque preparada para ello según E 7.5.1- "Revestimiento refractario del horno de cubilote" y luego se aplica una capa de derretido refractario de un espesor no mayor de 20 a 25 mm, las partes más profundas se tapan con mezcla en la cual se introducen ladrillos refractarios. Se repara con especial cuidado la zona de fusión, a una altura de 700 a 1200 mm sobre las toberas.

f) Reparar con mezcla refractaria y trozos de ladrillos la zona de las toberas.



g) Piso o solera:

Se limpia el ladrillo de la piqueta y el canal. Si no está en buenas condiciones se cambia y se revisten con mezcla refractaria al igual que todos los ladrillos del canal.

- Se cierra la tapa inferior o compuerta, fijándola con un puntal y la llave de fijación.
- Las rendijas entre la compuerta y la solera se tapan con una capa pequeña de mezcla refractaria.
- Para rellenar el piso o solera se utiliza mezcla de moldeo con las siguientes propiedades: resistencia en verde mayor de 0,40 Kg /cm² y humedad de 4 a 6 %.
- La mezcla se apisona por capas de 50 a 60 mm dejando la superficie plana con una pendiente hacia el centro y en dirección al paso del metal al canal de descarga, de 6 a 10 grados.

5.3 Secuencia de las operaciones a realizar.

5.3.1 Encendido:

- Introducir por la boca de carga dos carros de leña (50 Kg), se humedece con petróleo o mazut y se coloca entre la leña por la ventana de trabajo y se enciende.
- Se abren las toberas y se deja la ventana de trabajo con una abertura de 200 mm de ancho (3 ladrillos) x 230 mm de altura para aprovechar el tiro de aire natural en el encendido de la leña.
- Si existen condiciones se adiciona aire comprimido por la piqueta y la bigotera de escoria, si no existen, entonces se conecta el ventilador cada 10 min con un tiempo máximo de 5 – 7 segundos y luego apagarlo.
- Cuando la leña esté encendida se cierra la ventana de trabajo con un derretido refractario y 3 ladrillos CL – 45, luego se adicionan 2 cajas de coque (93 Kg), cuando esté bien encendido (emite una llama azul sin humo) se adicionan 2 cajas de coque (93 Kg) y luego 3 cajas de coque (146 Kg)
- Cuando se encienda la cama se conecta el ventilador de 5 a 7 segundos para eliminar algunas cenizas.

- Medir la cama de coque utilizando una barra o tubo de acero en forma de Z después de haber baqueteado a través de las toberas para facilitar el descenso y acomodamiento del coque.
- Adicionar carbón si faltara.
- Retirar el aire comprimido de la piquera y la bigotera de escoria si se utilizó.

5.3.2 Carga del horno y fusión.

- Se procede a cargar el horno con 5 cargas hasta llegar a la boca de carga alternando coque, Virutas de Hierro y Mineral de manganeso. Primero se adiciona un cesto de carga con el coque (28 Kg), luego se adiciona otro cesto de carga con la carga de Virutas de Hierro (9,747) y luego otro cesto con el Mineral de manganeso (165,18 kg).
- Se esperan 15 min para el calentamiento de la carga y luego cerrar las toberas.
- Conectar el ventilador.
- Se cierra la piquera con un tapón de arcilla refractario con la ayuda de una tapera.
- Todas las lingoteras que son utilizadas en la fundición tienen que estar secas y con temperatura superior a los 200 °C.
- Cuando la masa de aleación líquida comienza a derramarse por la bigotera de escoria indica que el crisol del horno está lleno y se procede a picar o romper el tapón de arcilla con una barreta puntiaguda. (Si tiene tapón de hierro se elimina aplicando O₂ con un tubo de acero de diámetro interior de 12 hasta 30 mm.)
- Toda la masa de Ferromanganeso y escoria sale del horno cae en las lingoteras que están dispuestas de forma escalonadas, o sea una se llena con ayuda de la otra y así sucesivamente.
- Cuando sale toda la masa se procede a tapar el mismo con un tapón de arcilla utilizando para ello la barra de ataque o tapera.
- El horno se carga cada 5 ó 7 min. y se mantiene lleno hasta la parte inferior del umbral de la boca de carga.
- Reforzar la cama de coque con una carga de coque cada 8 cargas (o sea la carga 8, 16, 24, etc.).



- Limpiar las toberas cada 30 min. La presión y el flujo del aire son constantes durante toda la fusión.
- En la fase final de la fundición se puede cerrar un poco la válvula de entrada del aire de la caja de aire para disminuir la presión de aire en unos 200 a 300 mm de la columna de agua.

5.3.3 Final de la fusión.

- Desconectar el ventilador y abrir las toberas.
- Liberar el pestillo tirando de un cable de acero con una longitud no menor de 6 m.
- Extraer todo el Ferromanganeso líquido y otros materiales que quedan dentro del horno.
- Los restos del Ferromanganeso, Mineral de manganeso no fundido, coque, escoria, etc. caen sobre una cama de arena con el fin de evitar incendios y accidentes.

Extinguir los restos antes mencionados, utilizando una cortina de agua.

Anexo 2. Horno de cubilote de 700 mm de diámetro de HOLMECA



Anexo 3. Taller de fundiciones ferrosas perteneciente a HOLMECA



PREGUNTAS DEL Oponente

1. Exponga con más detalle dónde fue desarrollada la metodología que se utiliza en el proceso y cuales son las principales ventajas y desventajas para que su uso no sea extendido.
2. Detalle el procedimiento aplicado para el desarrollo de la simulación en el Sistema elegido.
3. La tabla 7 de la página 37 hace referencia a un índice de colores, lo cual no queda claro su utilización. ¿Puede Usted decir su forma de representación en la Metodología empleada?

