

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTUDIO Y OBTENCIÓN DE METAL DE HIERRO A PARTIR DE ARENAS FERRUGINOSAS**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**MARITZA GABRIELA CHUQUIRIMA RAMOS**

maritza17041989@hotmail.com

**LENIN PATRICIO CORTEZ CHULDE**

lenincortez89@gmail.com

**DIRECTOR: ING. FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO MSC.**

fausto.oviedo@epn.edu.ec

**Quito, Marzo 2014**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Maritza Gabriela Chuquirima Ramos y Lenin Patricio Cortez Chulde, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos el derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Maritza Gabriela Chuquirima R.**

---

**Lenin Patricio Cortez Ch.**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Maritza Gabriela Chuquirima Ramos y Lenin Patricio Cortez Chulde, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Fausto Oviedo F. MSc.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la salud y fortaleza para cumplir con esta meta, pero sobre todo por protegerme y nunca abandonarme en las situaciones más difíciles.

A mis padres y hermanos, por su cariño, motivación y apoyo incondicional en todo momento.

A mis amigos y compañeros, con quienes compartí buenos y malos momentos.

Al M.Sc. Fausto Oviedo por la dirección de este proyecto y al Tglo. Fabián Peñaloza por su acertada ayuda.

A todas las personas que de alguna u otra manera me ayudaron desinteresadamente a lo largo de mi formación académica.

**Maritza**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme el maravilloso regalo de la vida y la oportunidad de descubrir su magnificencia expresada en cada una de las persona presentes a mi alrededor, encomendando cada paso a su infinita sabiduría y protección.

A mis padres, Fabián Cortez y Nanci Chulde, por su abnegado amor y apoyo durante toda la vida. A mi madre por su desprendida presencia y ayuda a lo largo de mi formación estudiantil. A mi padre por guiar mi senda con sabias exhortaciones e impulsarme cada día a ser mejor persona.

A mis hermanos, Alexandra, Christian y Sebastián, por su existencia e ilimitado cariño, por ser mi inspiración en los momentos de flaqueza y con su presencia alegrar mi alma.

A mis abuelas, Carlina y Amada, por demostrarme el cariño y la devoción más pura por la familia.

A mi familia, por compartir conmigo momentos memorables y por su infalible ayuda.

A mis amigos, Carlos, Luis, Gerardo y Jorge, por brindarme su sincera amistad y ser partícipes de mis momentos de alegría y tristeza durante todos estos años.

A mis maestros, cuyos sapientes consejos y enseñanzas han inspirado mi anhelo de superación. Al M.Sc. Fausto Oviedo por su guía y contribución en el proyecto. Al Tlgo. Fabián Peñaloza por su valiosa aportación en el desarrollo del proyecto.

**Lenin**

## DEDICATORIA

A mis padres, Marco y María, quienes confiaron en mí y me brindaron la oportunidad de estudiar y seguir adelante con mis sueños.

A mis hermanos, Darwin, Lady, Rony y Tatiana, que esta meta sea una motivación para cumplir las suyas.

**Maritza**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente proyecto a Fabián y Nanci, pilares fundamentales en la consecución de todos mis logros.

A mis hermanos, Alexandra, Christian y Sebastián, que inspire en su ser el deseo de trabajo y superación sobre las adversidades que les devengan.

**Lenin**

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	ii
CERTIFICACIÓN .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA.....	vi
CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
RESUMEN .....	xvi
PRESENTACIÓN .....	xviii
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 ARENAS FERRUGINOSAS.....	2
1.2.1 ORIGEN.....	2
1.2.2 EXPLOTACIÓN MUNDIAL .....	4
1.2.3 ENTORNO REGIONAL.....	5
1.3 ARENAS FERRUGINOSAS EN EL ECUADOR .....	8
1.3.1 ANTECEDENTES.....	8
1.3.2 EXPLOTACIÓN MINERA.....	10
1.3.2.1 Localización .....	11
1.3.2.2 Aspecto geológico minero.....	12
1.3.2.3 Actividades de explotación .....	13
1.4 CARACTERÍSTICAS ARENAS NEGRAS DE MOMPICHE .....	14
1.5 APLICACIONES .....	17
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>19</b>
<b>ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE HIERRO .....</b>	<b>19</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	19
2.2 MATERIA PRIMA.....	20
2.2.1 MINERAL DE HIERRO .....	20



2.2.1.1	Liberación del mineral.....	22
2.2.1.2	Concentración de mineral de hierro.....	23
2.2.1.2.1	<i>Uso de métodos químicos</i> .....	23
2.2.1.2.2	<i>Uso de métodos físicos</i> .....	24
2.2.1.3	Aglomeración del mineral.....	26
2.2.2	COQUE.....	29
2.2.3	FUNDENTES.....	30
2.2.3.1	Piedra caliza.....	30
2.2.3.2	Dolomita.....	31
2.3	PRODUCCIÓN DE HIERRO.....	31
2.3.1	SIDERÚRGIA BASADA EN MINERAL.....	33
2.3.1.1	Alto horno.....	34
2.3.1.1.1	<i>Descripción del equipo</i> .....	35
2.3.1.1.2	<i>Reacciones químicas</i> .....	38
2.3.1.2	Reducción directa.....	40
2.3.1.2.1	<i>Procesos de reducción directa</i> .....	41
2.3.2	SIDERURGIA BASADA EN CHATARRA.....	46
2.3.2.1	Horno de Cubilote.....	47
2.3.2.2	Zonas del cubilote.....	48
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>.....</b>	<b>50</b>
METOLOGÍA EXPERIMENTAL	.....	50
3.1	MATERIALES.....	50
3.1.1	ARENAS NEGRAS.....	50
3.1.1.1	Tamizado.....	53
3.1.1.2	Secado.....	56
3.1.1.3	Concentración.....	58
3.1.1.4	Aglomerado.....	60
3.1.2	COQUE.....	63
3.1.3	PIEDRA CALIZA.....	63
3.2	EQUIPOS.....	64
3.2.1	HORNOS.....	64
3.2.1.1	Mufla.....	65

3.2.1.2	Horno estático de crisol fijo calentado con diésel .....	66
3.2.1.3	Horno estático de crisol fijo calentado a gas.....	67
3.2.1.4	Horno de foso .....	68
3.2.1.5	Horno de Cubilote .....	69
3.2.2	INSTRUMENTOS .....	70
3.2.2.1	Crisol de grafito.....	71
3.2.2.2	Pirómetro .....	72
3.3	REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS .....	73
3.3.1	PROCESO CON HORNO ESTÁTICO DE CRISOL FIJO .....	73
3.3.1.1	Proceso con horno de crisol a diésel .....	73
3.3.1.2	Proceso con horno de crisol a gas.....	74
3.3.2	PROCESO CON HORNO DE FOSO.....	76
3.3.3	PROCESO CON HORNO CUBILOTE .....	77
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>82</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>		<b>82</b>
4.1	REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS .....	82
4.1.1	PROCESO CON HORNO ESTÁTICO DE CRISOL FIJO .....	83
4.1.1.1	Proceso con horno de crisol a diésel .....	83
4.1.1.2	Proceso con horno de crisol a gas.....	84
4.1.2	PROCESO CON HORNO DE FOSO.....	86
4.1.3	PROCESO CON HORNO DE CUBILOTE .....	87
4.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	89
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>94</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>94</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	94
5.2	RECOMENDACIONES.....	97
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>100</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
ANEXO 1. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS ARENAS.....	A
ANEXO 2. INSTRUCTIVOS TECNOLÓGICOS .....	B
ANEXO 3. PLAN OPERATIVO DEL TERMÓMETRO INFRARROJO OS524E .....	C
ANEXO 4. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN CON HORNO DE CUBILOTE .....	D

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Arenas negras de origen volcánico. ....	3
Figura 1. 2. Playa de arenas negras en Uruguay. ....	6
Figura 1. 3. Vista al detalle del contenido de Fe en las arenas. ....	7
Figura 1. 4. Imagen satelital de la Playa Negra a 2 Km de Mompiche. ....	11
Figura 1. 5. Mapa de riesgos del área ostional bloque 1. ....	12
Figura 1. 6. Sitio de recolección de muestras. ....	12
Figura 1. 7. Centro de acopio de arenas. ....	13
Figura 1. 8. Esquema de explotación de arenas negras. ....	14
Figura 1. 9. Playa de arenas negras de Mompiche. ....	15
Figura 1. 10. Aplicación de arenas ferruginosas en industria cementera. ....	17
Figura 1. 11. Dióxido de titanio. ....	18
Figura 2. 1. Óxidos de hierro. ....	21
Figura 2. 2 Diagrama de flujo del procesamiento del mineral de hierro. ....	22
Figura 2. 3. Planta de trituración de mineral de hierro. ....	22
Figura 2. 4. Esquema del proceso de pelletización del mineral de hierro. ....	28
Figura 2. 5. Materia prima aglomerada. ....	29
Figura 2. 6. Piedra caliza. ....	30
Figura 2. 7. Dolomita. ....	31
Figura 2. 8. Clasificación de los hornos de fundición. ....	32
Figura 2. 9. Siderurgia a partir del mineral. ....	33
Figura 2. 10. Esquema de un alto horno. ....	37
Figura 2. 11. Esquema de las reacciones químicas. ....	39
Figura 2. 12. Esquema del proceso MIDREX. ....	44
Figura 2. 13. Esquema del proceso HyL. ....	45
Figura 2. 14. Siderurgia a partir de chatarra. ....	46
Figura 2. 19. Esquema de la estructura de un cubilote. ....	47
Figura 2. 20. Localización de las zonas en el cubilote. ....	49
Figura 3. 1. Sitio de extracción. ....	50
Figura 3. 2. Lugar de recolección de muestras. ....	51
Figura 3. 3. Muestra de arena extraída de la playa. ....	53

Figura 3. 4. Instrumentos de tamizado.....	54
Figura 3. 5. Resultados de muestras tamizadas .....	55
Figura 3. 6. Medición de la masa de muestra de arena. ....	57
Figura 3. 7. Secado de arena en la mufla. ....	57
Figura 3. 8. Medios de separación magnética.....	58
Figura 3. 9. Separación magnética con diferentes medios.....	59
Figura 3. 10. Pellets de arena con melaza. ....	61
Figura 3. 11. Pellets de arena con silicato de sodio. ....	61
Figura 3. 12. Briqueta de arena ferruginosa.....	62
Figura 3. 13. Coque metalúrgico. ....	63
Figura 3. 14. Muestra de caliza. ....	64
Figura 3. 15. Mufla. ....	66
Figura 3. 16. Horno fijo del Laboratorio de Fundición.....	66
Figura 3. 17. Horno de crisol a gas del Laboratorio de Fundición. ....	67
Figura 3. 18. Horno de crisol a gas de la empresa SERVICIOS MECÁNICOS....	68
Figura 3. 19. Elementos del horno de foso.....	68
Figura 3. 20. Horno de foso de la empresa FUNDICIONES ECUADOR.....	69
Figura 3. 21. Horno de cubilote de la empresa TECNO FUNDICIÓN. ....	70
Figura 3. 22. Crisol de grafito. ....	71
Figura 3. 23 Pirómetro de alta temperatura.....	72
Figura 3. 24. Crisol cargado en el interior del horno fijo. ....	73
Figura 3. 25. Medición de la temperatura durante el proceso de reducción.....	74
Figura 3. 26. Horno de crisol a gas en operación.....	75
Figura 3. 27. Suministro de oxígeno en el interior del horno. ....	75
Figura 3. 28. Finalización del proceso con el horno a gas. ....	76
Figura 3. 29. Horno de foso precalentado. ....	76
Figura 3. 30. Vaciado de la colada en el molde.....	77
Figura 3. 31. Carga de pellets de arena. ....	79
Figura 3. 32. Limpieza de las toberas. ....	79
Figura 3. 33. Salida de la arena reducida por la piquera de escoriado. ....	80
Figura 3. 34. Salida de las arenas reducidas por la piquera de sangrado.....	80
Figura 3. 35. Descarga completa del horno de cubilote. ....	81

Figura 4. 1. Extracción del crisol del horno a diésel. ....	83
Figura 4. 2. Producto del proceso de reducción en horno a diésel.....	83
Figura 4. 3. Muestra obtenida en el horno fijo a diésel.....	84
Figura 4. 4. Crisol extraído del horno a gas. ....	84
Figura 4. 5. Arena luego del proceso de reducción en horno de crisol a gas. ....	85
Figura 4. 6. Muestras obtenidas en el horno a gas. ....	85
Figura 4. 7. Vertido de colada en el molde.....	86
Figura 4. 8. Hierro fundido y arena.....	86
Figura 4. 9. Muestra obtenida en el horno de foso.....	87
Figura 4. 10. Descarga de arenas reducidas.....	87
Figura 4. 11. Producto del proceso de reducción en horno de cubilote.....	88
Figura 4. 12. Muestra obtenidas en el horno de cubilote.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Reservas probadas de minerales (toneladas). .....	10
Tabla 1. 2. Datos del área minera. ....	11
Tabla 1. 3. Resultados del análisis de las muestras de los suelos. ....	16
Tabla 1. 4. Resultados del análisis difracción de rayos X. ....	16
Tabla 2. 1. Principales minerales de hierro. ....	21
Tabla 2. 2 Intensidad magnética requerida en la separación magnética. ....	25
Tabla 2. 3. Ligantes orgánicos e inorgánicos empleados en aglomeración. ....	27
Tabla 2. 4 Composición típica del coque. ....	29
Tabla 2. 5. Reacciones químicas que tienen lugar en el alto horno. ....	38
Tabla 3. 1. Propiedades físicas de la ilmenita .....	52
Tabla 3. 2. Propiedades físicas de la magnetita .....	52
Tabla 3. 3. Medidas de tamices. ....	54
Tabla 3. 4. Pruebas de separación magnética. ....	59
Tabla 3. 5. Pruebas de aglomeración. ....	62
Tabla 3. 6. Características de la mufla. ....	65
Tabla 3. 7. Características pirómetro. ....	72
Tabla 3. 8. Medidas de la temperatura en el crisol. ....	74
Tabla 3. 9. Medidas de la temperatura en el horno de cubilote. ....	81
Tabla 4. 1. Resumen de los resultados obtenidos en los procesos realizados. ...	89
Tabla 4. 2. Metalografías de la muestra metálica. ....	90
Tabla 4. 3. Resultados del tratamiento de hierro. ....	92
Tabla 4. 4. Resultados por Espectrometría de Chispa .....	93
Tabla 4. 5. Resultados por Microscopía Electrónica de Barrido .....	93

## RESUMEN

El presente proyecto es un estudio de las arenas ferruginosas en el país, particularmente del área minera ubicada en la Provincia de Esmeraldas, Cantón Muisne, Parroquia Bolívar, Recinto Mompiche, en el sitio denominado Playa Negra, dicha arena ha sido analizada presentando un alto contenido de óxidos de hierro, por tanto se identificará la idoneidad de la misma para la obtención de metal de hierro mediante una serie de ensayos tecnológicos acorde a la materia prima y los recursos existentes.

En el primer capítulo se aborda la revisión teórica de la materia prima que se manipulará en el presente proyecto de investigación. Se realiza un estudio detallado de la trascendencia a nivel regional y local de las arenas ferruginosas. Además se indica las aplicaciones y beneficios que conllevaría la explotación adecuada de este recurso para el desarrollo del país.

El segundo capítulo plantea el estudio de los métodos tradicionales y modernos para la obtención de hierro dentro y fuera del país, orientado principalmente al hierro metálico basado en el mineral. Se indican ciertos conceptos necesarios para la comprensión del proceso, de tal manera que se pueda determinar los parámetros adecuados aplicables al proceso de obtención de metal de hierro.

En el tercer capítulo se indican las características de los materiales y equipos empleados para realizar la reducción de las arenas, describiendo su elaboración y especificaciones. A continuación, se presentan los diferentes ensayos, donde se precisan las diversas configuraciones para el adecuado aprovechamiento de las arenas. Seguidamente se particulariza los procedimientos experimentales de reducción realizados en función de las características de la materia prima y de los recursos disponibles.

Para el cuarto capítulo, se detallan los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados a lo largo del estudio, dichos resultados requieren ser cuantificados y evaluados. Además se indica de manera sucinta las características de las arenas reducidas en el horno de cubilote.



En el quinto capítulo se precisan las conclusiones y recomendaciones inferidas a partir de la realización del estudio y de los resultados obtenidos procedentes de los ensayos.

## PRESENTACIÓN

En la actualidad, la Industria Siderúrgica en Ecuador no se ha desarrollado en el campo de la producción de acero, para suplir la demanda requerida. Una de las razones es el abastecimiento de materias primas, debido a que en el país no existen suficientes reservas probadas de mineral de hierro, al igual que reservas de coque y caliza requeridas para instalar una planta siderúrgica rentable.

Por tanto la producción nacional se limita a la refundición a partir de la chatarra y a los derivados de un producto semielaborado como es la palanquilla. Siendo necesaria la importación de varios cientos de millones de dólares anuales de otros productos como el tocho y el planchón para cubrir los requerimientos existentes.

Por tal motivo es de gran importancia buscar estrategias efectivas y de bajo costo que garanticen la producción nacional de acero y disminuyan las salidas de divisas por este concepto. Una alternativa son las arenas negras que se depositan a lo largo de la costa ecuatoriana por estar acompañadas principalmente de óxidos de hierro y titanio, cuyo comportamiento se ha investigado, estudiado y analizado desde hace varios años.

Actualmente la arena ferruginosa extraída de la mina ubicada en la provincia de Esmeraldas es utilizada para aumentar el porcentaje de hierro en el cemento Portland por el Grupo Lafarge, cuya planta se encuentra ubicada en Otavalo, provincia de Imbabura.

La presente investigación pretende identificar un método de obtención de metal de hierro, partiendo de arenas ferrotitaníferas procedentes de la Playa Negra localizada en el Recinto Mompiche, las cuales fueron caracterizadas previamente por la técnica de Difracción de Rayos X, indicando un alto porcentaje de óxidos de hierro.

Las arenas se someten a un proceso de tamizado y secado. Posteriormente se concentran aplicando un campo magnético y se identifica el método de

aglomeración más adecuado. A continuación se esgrimieron algunos hornos de fundición de metales aplicando el principio de obtención de hierro fundido a partir del mineral. Finalmente se logra la reducción de las arenas negras en el horno de cubilote.

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

En el primer capítulo se aborda la revisión teórica de la materia prima que se manipulará en el proyecto de investigación. Se realiza un estudio detallado de la trascendencia a nivel regional y local de las arenas ferruginosas. Además se indican las aplicaciones y beneficios que conllevaría la explotación adecuada de este recurso para el desarrollo del país.

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

En primera instancia se realiza un estudio de las arenas ferruginosas, a partir de investigaciones previamente realizadas a nivel mundial, de tal manera que se establece un precedente. A continuación se establece una breve revisión de los antecedentes de las arenas en el país.

De manera específica se estudia las arenas de las zonas costeras del Ecuador, concretamente en Mompiche, donde existe una mina activa de arenas ferruginosas; investigaciones preliminares realizadas por FUNGEOMINE, han demostrado la trascendencia que puede tener la explotación adecuada de la mina, con el fin de darle un valor agregado.

En el país no existen minas de hierro en explotación ni se produce ningún tipo de metal de hierro, de tal manera que se realiza una revisión de las principales aplicaciones de este mineral y su trascendencia en la industria siderúrgica del país.

La capacidad de beneficio de las arenas ferruginosas y los métodos de aprovechamiento integral, así como su implementación a través de procesos eficientes y económicos, son estudios que plantean una serie de inquietudes, ya que estos requieren de una recopilación minuciosa de diversas fuentes, que a

menudo resultan hasta discordantes, así como la elaboración de numerosos ensayos multidisciplinarios.

## **1.2 ARENAS FERRUGINOSAS**

Las arenas ferruginosas, mezclas naturales de óxidos metálicos de hierro con trazas de metales (aluminio, titanio y cobre) originadas por su naturaleza sedimentaria y por la predominancia de material de color muy oscuro, toman también el nombre de arenas negras o arenas ferrotitaníferas. La arena presenta una estructura redondeada debido al desgaste por el transporte fluvial.

Los minerales principales de las arenas negras son magnetita, titanatos de cobalto, níquel, manganeso, magnesio y en menor cantidad se encuentra zircón en estos depósitos. Los análisis químicos permiten cuantificar el contenido de óxidos de hierro y titanio; posteriormente para confirmar los demás elementos se efectúan los respectivos análisis mineralógicos.

Ciertas rocas volcánicas que se componen de pequeños fragmentos de lava, al disgregarse vienen a acumularse en las playas de los mares. En la arena negra se concentran a menudo objetos de valor adicional, salvo los metales preciosos: elementos de tierras raras, torio, titanio, tungsteno, circonio y otros se han fraccionado en procesos ígneos en una gama de minerales comunes que se convierten en arenas negras después de la erosión.

### **1.2.1 ORIGEN**

Los depósitos de arenas ferruginosas se encuentran ubicados en la zona de contacto de las arenas con la marisma, particularmente en los alrededores de los cauces principales y en general alrededor del litoral de ciertas zonas. En la génesis de dichas formaciones intervienen una serie de procesos que parten del hierro libre que se encuentra recubriendo los granos de arena.

El encharcamiento estacional trae consigo variaciones del potencial redox que conduce a la reducción del hierro, favorecido por los compuestos resultantes de la alteración de la materia orgánica. Dichos compuestos forman complejos y/o

quelatos con los cationes pesados que permiten su movilización con la circulación de la capa freática hacia la marisma. En las proximidades de esta, el aumento de la salinidad, el aumento de la carga catiónica y otros factores determinan la precipitación y acumulación de óxidos de hierro.<sup>1</sup>

Los óxidos hidratados acumulados a una profundidad que coincide con el nivel superior de la capa freática, envejecen y cristalizan condicionados por los diferentes parámetros climatológicos, determinando la formación de la costra ferruginosa.



Figura 1. 1. Arenas negras de origen volcánico.<sup>2</sup>

En el Ecuador se tiene como fuente primaria de los minerales indicados, las formaciones de las cordilleras de los Andes y de la costa ecuatoriana.

Las concentraciones de arena en la playa se forman a lo largo de las costas debido a los efectos concentradores de la acción de las olas. Las corrientes costeras acumulan materiales en todo el litoral, y los más ligeros son desplazados con mayor velocidad y a mayor distancia que los pesados, con lo cual estos se concentran. Al mismo tiempo, la acción de las olas y el embate de estas arrojan materiales a las playas; el salto del agua y la resaca arrastran los más ligeros y

---

<sup>1</sup> Salas, C. (1981). *Génesis y evolución de las costras ferruginosas*. España: Universidad de Sevilla. Pág. 2

<sup>2</sup> <http://www.pasapastenerife.com/wp-content/uploads/2011/02/Arenas-Negras-5.jpg>

finos, estos se desplazan a lo largo de las costas y los de mayor tamaño y peso se concentran en las playas libres. Un ejemplo frecuente de este fenómeno son las playas de grava o cantos rodados de los cuales ha sido eliminada la arena. Si hay presencia de minerales pesados en la playa se concentrarán de modo similar.

La aportación de minerales de placer para su concentración en playas puede efectuarse por los siguientes agentes:

- Ríos que desembocan en la costa.
- Erosión de las olas sobre las terrazas o planicie de gravas.
- Cruce de corrientes sobre antiguas terrazas fluviales próximas a la costa.

### **1.2.2 EXPLOTACIÓN MUNDIAL**

En otras regiones del planeta, los yacimientos primarios y secundarios totalizan 600 millones de toneladas de ilmenita, existiendo en Canadá y Noruega la mayor parte, aproximadamente 300 millones de toneladas de yacimientos primarios que ensayan en un 40 % de óxido de titanio ( $TiO_2$ ). En cambio, los yacimientos secundarios de Estados Unidos y Australia suman más de 100 millones de toneladas con un 20 % de  $TiO_2$ .

En cuanto al rutilo, limitado únicamente a tres yacimientos secundarios. Las reservas totalizan 11,8 millones de toneladas de 90 a 96 % de  $TiO_2$ , de las cuales más de 7 millones se encuentran en Australia y más de 2 millones en Sierra Leona.

Yacimientos primarios de ilmenita son explotados actualmente en los siguientes países: Estados Unidos, Canadá, Finlandia y Noruega. Adicionalmente Brasil cuenta con depósitos potencialmente importantes del mineral anatasa, que es el polimorfo del rutilo de igual fórmula química.

Desde aproximadamente un poco más de 50 años se inició la recuperación de los minerales de titanio a partir de las arenas negras ubicadas en las playas y terrazas marinas, así como en las arenas y gravas de los ríos.

La explotación minera se la realiza en algunos casos mediante dragas, y en otros se utiliza una combinación de tractores, buldócer, entre otros. Por otro lado, el tratamiento se limita a la separación gravitacional, magnética o eléctrica.

### 1.2.3 ENTORNO REGIONAL

A lo largo de la región costera de los países sudamericanos se encuentran diversos depósitos de arenas negras con diferentes concentraciones de hierro y titanio, a continuación se indican algunos de ellos:

En Colombia, se localizan depósitos de arenas negras con concentraciones considerables de minerales de titanio; estos se sitúan en los Departamentos del Atlántico, Bolívar, Vaupés y Tolima. Los estudios efectuados en estos departamentos han dado como resultado que el depósito más significativo es el de Puerto Colombia (Atlántico), un largo estrecho entre Cartagena y Barranquilla.

En Uruguay se ha realizado varios estudios para determinar la factibilidad de la explotación a gran escala de las arenas negras; según el estudio realizado la mayor parte de las arenas del Uruguay contiene concentraciones de hierro y titanio pero en baja proporción. Un yacimiento posee unos treinta y cinco kilómetros de longitud, que se extiende desde La Paloma hasta el Chuy. En esta área se encuentran definidas varias zonas según el nivel de extracción que se realizará. La zona de La Paloma abarca una superficie de 600 hectáreas, la zona de Valizas 6.805 hectáreas, la zona de La Angostura y Laguna Negra 250 hectáreas, Punta Loberos 1.800 hectáreas y Coronilla - Chuy 10.000 hectáreas. Sumando la totalidad de estas zonas, se tendría 19.455 hectáreas que serían explotadas, ante lo cual los técnicos han asegurado un nulo daño ecológico.<sup>3</sup>

Otro estudio que se ha realizado en Uruguay sobre arenas negras de la zona de Aguas Dulces, analiza la prefactibilidad de su explotación hasta lograr la separación y concentración de cada uno de los minerales. El análisis de los datos con criterios geológicos permitió redefinir los principales parámetros del

---

<sup>3</sup> <http://www.nodo50.org/fau/revista/lucha11-03/17.htm>



yacimiento, limitado entre una paleocosta barrancosa y la costa actual con una potencia media explotable de 10 m y un tenor de 2 % de minerales útiles.

Las reservas expresadas en miles de toneladas son las siguientes: probadas 3.600, probables 5.500 y posibles 16.000. El yacimiento produciría ilmenita (1,2 %), circón (0,1%), rutilo (0,02 %) y monacita (0,01 %). A los efectos del cálculo de la inversión necesaria para la explotación se consideró una planta capaz de procesar entre 6 y 8 millones de toneladas de arena bruta anuales en una cifra estimada de USS 13 millones. La producción a pleno generaría una facturación anual aproximada de USS 8 millones.<sup>4</sup>



Figura 1. 2. Playa de arenas negras en Uruguay.<sup>5</sup>

En Venezuela se han localizado arenas negras en los drenajes activos de los grandes ríos del Estado Bolívar, especialmente ubicados en la región central y oriental, presentan arenas negras con alto contenido de titanio principalmente en forma de ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ); hasta el momento el único depósito de titanio en Venezuela que se ha delimitado, investigado y evaluado, se asocia con rocas anortosíticas del Complejo de San Quintín, Estado Yaracuy, ubicado a más de 25 Km al noreste de San Felipe. Investigaciones ejecutadas por el Ministerio de

<sup>4</sup> Sociedad Uruguaya de Geología, Resumen Revista N.- 10, 2003

<sup>5</sup> [http://2.bp.blogspot.com/-hUkgyk5wN4/UEVfylefUXI/AAAAAAAAAW8/V\\_jO20UiDhE/s1600/puprin1.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-hUkgyk5wN4/UEVfylefUXI/AAAAAAAAAW8/V_jO20UiDhE/s1600/puprin1.jpg)

Energía y Minas de Venezuela han permitido determinar una extensa zona con enriquecimiento de Ilmenita-Hematita-Magnetita.<sup>6</sup>

En Perú se ha realizado el proyecto de arenas de Guadalupe, en el departamento de la Libertad ejecutado por la minera MAPSA S. A., es un área con una extensión de 43.000 Ha. El área del proyecto consiste en terrenos bajos desde la costa formada por restos de terraza marina y dunas recientes; también se puede encontrar pequeñas áreas que solían ser zonas de inundaciones, rodeadas por colinas, que son las últimas escarpas de la orilla.



Figura 1. 3. Vista al detalle del contenido de Fe en las arenas.<sup>7</sup>

Se presentan rocas sedimentarias, en las cuales se han identificado varias venas de hierro y plomo, las terrazas están formadas principalmente por arenas inestables compuestas principalmente por granos de cuarzo, feldespato, magnetita, oro, andalucita, ilmenita, rutilo entre otros y en una cantidad menor de granates, epidota, moscovita y esfena. La aparición de minerales metálicos se da en la forma de un manto de arena negra y también de forma diseminada dentro de las terrazas.

En Chile, los cordones dunares de la playa de Santo Domingo presentan arenas negras que se derivan de cenizas volcánicas, dichas formas se relacionan, probablemente, con pulsos sedimentarios espasmódicos sujetos a la actividad

<sup>6</sup> <http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/titanio.htm>

<sup>7</sup> <http://www.mineramapsa.com/guadalupeito.pdf>

eventual del volcán Tinguiririca ubicado aguas arriba en la cuenca del río Rapel. Inmediatamente detrás de la playa que se extiende al sur de Santo Domingo en Chile, se desarrolla una secuencia notable de cordones dunares paralelos, de varios kilómetros de largo, constituidos por arenas negras y separadas entre sí por depresiones alargadas

En Argentina, en el departamento de Rocha, se presentan setenta kilómetros cuadrados que contienen minerales comercializables entre Barra de Valizas y Punta del Diablo. Forman una franja de dos kilómetros de ancho por 35 de largo en cuyo centro está Aguas Dulces. Existe titanio, rutilo, circón y magnetita, pero hay problemas para su explotación debido a que es una zona poblada y se encuentra restringida su explotación en un determinado perímetro, los estudios indican que existen 3.600.000 toneladas de arena mineralizada.

### **1.3 ARENAS FERRUGINOSAS EN EL ECUADOR**

#### **1.3.1 ANTECEDENTES**

En el Ecuador existe una gran extensión de arenas negras distribuidas a lo largo de la franja costera, se conoce que estas arenas tienen un alto contenido de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Se han determinado zonas de posible valor económico en base a inspecciones aéreas realizadas determinando concentraciones de arena explotables.

Desde hace algún tiempo se viene desarrollando el interés por parte de algunos investigadores, para aprovechar las arenas negras que se han depositado y se están depositando a lo largo de la costa ecuatoriana. En función de la disposición de gran cantidad de arena negra se han realizado varios estudios acerca de la factibilidad de explotar este recurso.

En el estudio elaborado por Guillermo Bixby, "Las arenas negras titaníferas en las playas ecuatorianas", realizó una investigación sobre arenas negras en la costa ecuatoriana, destacando su posible aprovechamiento como depósitos explotables para hierro y titanio. En dicho artículo se habla de manera general acerca de la

acumulación de arenas negras, además incluye algunos resultados de análisis químicos efectuados por terceros.

Posteriormente presenta un trabajo proporcionando datos de muestreos realizados desde Punta Ostiones hasta la ciudad de Esmeraldas; sin embargo, no incluye resultados de los análisis de dichas muestras.

La empresa Samadco Ind. (1967), desarrolló métodos para conseguir acero tomando como materia prima las arenas negras, a través el proceso mencionado como "Madrigal".

En el año de 1971 el Dr. A.F. Wilkinson miembro de la Comisión de Asistencia Técnica del Gobierno de Reino Unido en su "Informe preliminar sobre el programa de muestreo de arena de playa de la Costa" también realizó unas investigaciones más detalladas sobre estas arenas y recomienda realizar muestras más a fondo sobre las arenas ferrotitaníferas en la costa ecuatoriana.

F. Mosquera y G. Rúales en el año de 1973, realizaron un reconocimiento aéreo de los sitios de concentración de arenas ferruginosas a lo largo del litoral ecuatoriano, encontrando zonas de acumulación significativa.

Sugerencias para la prospección y beneficio de las arenas negras son presentadas por Aguayo y Erazo en 1982.

G. Mora y F. Rúales (1985), desarrollan su tesis sobre la composición de las arenas negras en la zona de Chanduy y concluyen diciendo que no es de interés económico debido a la escasez del material disponible.

Según el estudio de Ana Saa (1988) realizado en General Villamil playas, los minerales magnéticos provienen de rocas ígneas máficas y por lo tanto de la erosión del basamento (Piñón) los cuales se han depositado también en rocas antiguas.

Bolívar Soledispa y Johnny Villacres en el año de 1990, realizan un estudio composicional de la arenas ferrotitaníferas del sector comprendido entre el estero de Posorja y el monasterio de Santa Teresa de la provincia del Guayas. Se

determinó la composición mineralógica, estas arenas son provenientes de rocas ígneas. La mayoría de los minerales presentan enriquecimiento de hierro y titanio, lo cual permitiría elevar el porcentaje de estos elementos, al momento de que estas arenas sean explotadas. Efectúan ciertas recomendaciones acerca de realizar estudios pirometalúrgicos y geoquímicos para poder evaluar la cantidad de hierro y titanio que se puede obtener a partir de una determinada cantidad de arena.

Un estudio elaborado por el Ministerio de Recursos no renovables en el año 2009 indica las reservas probadas de minerales que se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1. 1. Reservas probadas de minerales (toneladas).<sup>8</sup>

MINERALES METÁLICOS	
Oro	2.000
Plata	4.000
Cobre	30.000.000
MINERALES NO METÁLICOS	
Grava aurífera	4.536.000
Poli metálicos	32.000
Caliza	105.691.000.000
Materiales de construcción	-
Arcilla	13.000.000
Feldespato	57.000
Caolín	11.495.000.000
Sílice	1.293.000.000
Mármol	215.000
Yeso	2.606.000.000
Arenas ferruginosas	12.300.000.000

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

### 1.3.2 EXPLOTACIÓN MINERA

La Concesión minera se denomina OSTIONAL BLOQUE 1 con una superficie de 22 hectáreas, de las cuales el 76 % corresponde a agua del mar, el 8 % a arenas de playa y el 16 % restante a suelos planos e inclinados a manera de escarpas y acantilados, es decir, que se está explotando solo 2 hectáreas del área.

<sup>8</sup> Ministerio de Recursos no renovables, Petroecuador

Este proyecto no causa impactos significativos a la naturaleza debido a la inmediata recuperación natural. La explotación minera puede coexistir tranquilamente con el turismo, la pesca y la agricultura. Actualmente el área minera cuenta con estudios de reservas y recursos minerales cuantificados, diseño de explotación y transporte de arenas negras.

Tabla 1. 2. Datos del área minera.<sup>9</sup>

NOMBRE DEL ÁREA	OSTIONAL BLOQUE 1
CÓDIGO DEL ÁREA	400204.A1
SUPERFICIE DEL ÁREA	22 Ha. MINERAS. Área a explotar 2 Ha
UBICACIÓN	Parroquia Bolívar, Cantón Muisne, Provincia de Esmeraldas
NOMBRE DEL TITULAR	Guillermo Varela Acurio
ASESOR TÉCNICO	Ing. Edgar Pillajo Gavidia

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

### 1.3.2.1 Localización

El área minera se encuentra ubicada en la Provincia de Esmeraldas, perteneciente al Cantón Muisne, Parroquia Bolívar, Recinto Mompiche, en el sitio denominado Playa Negra también conocida como playa del Suspiro.



Figura 1. 4. Imagen satelital de la Playa Negra a 2 Km de Mompiche.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Fundación para la Investigación Geológica, Minera y Ambiental del Ecuador (FUNGEOMINE)

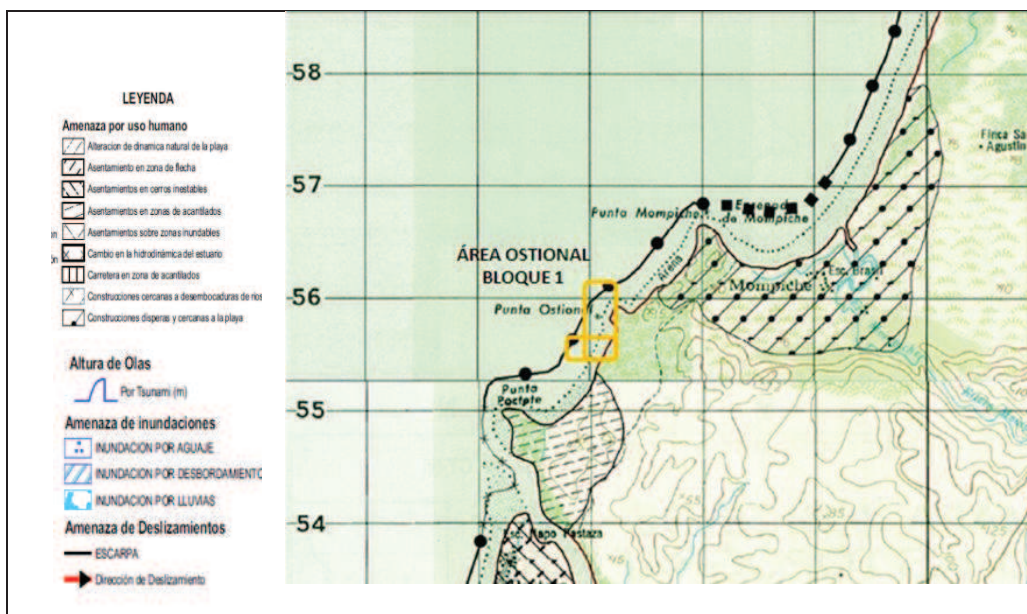


Figura 1. 5. Mapa de riesgos del área ostional bloque 1.<sup>11</sup>

### 1.3.2.2 Aspecto geológico minero

Es una playa de mar con acantilados de 20 metros, con taludes fuertes; la playa de arena negra tiene una extensión de 400 metros, ancho de 50 metros y profundidad de 1 metro como promedio. Las arenas negras son de origen natural arrastradas por las corrientes marinas, mareas y agujajes, de tal manera que la materia prima es aportada permanentemente, por lo cual se ha denominado como un recurso renovable, al igual que las arenas de ríos.



Figura 1. 6. Sitio de recolección de muestras.

<sup>10</sup> <http://www.fungeomine.org/documentos/mineriaverdemopiche.html>

<sup>11</sup> <http://www.snriesgos.gob.ec/faja-costera/mapas-varios/1612-las-manchas.html>

Según el programa de Recursos Costeros presenta una geología monótona compuesta de arcillas tobáceas en paquetes métricos con intercalaciones de areniscas y lutitas de origen marino, la edad de estas rocas es Terciaria.

### 1.3.2.3 Actividades de explotación

La explotación de arenas negras es bajo el régimen de Pequeña Minería, con muy bajo impacto ambiental, a cielo abierto en franjas radiales de 50 metros. El procedimiento es ingresar a la playa cuando la marea está baja (4 a 6 horas en la mañana o tarde), cargar las arenas negras tal como se encuentran en el sitio, en forma manual o con una excavadora tipo gallineta o pala, recogiendo una fina capa de arena a lo largo de la franja planificada, acumulando en el filo de la playa, luego entra el camión 6x6 para el cargado y se transporta con el cajón debidamente protegido hasta el centro de acopio cerca de Mompiche.

La arena negra que se transporta de la playa es acumulada en un terreno cerca de Mompiche (3 Km) en donde se mantiene un stock del mineral para posteriormente ser comercializado. En el sitio para acumulación de arenas extraídas, presenta adecuaciones, el suelo tiene impermeabilización con una capa de arcilla compactada, las arenas negras se mantienen protegidas.



Figura 1. 7. Centro de acopio de arenas.



A continuación se presenta en la figura 1.8 un breve esquema descriptivo de la explotación de las arenas negras en el área de concesión del bloque Ostional.

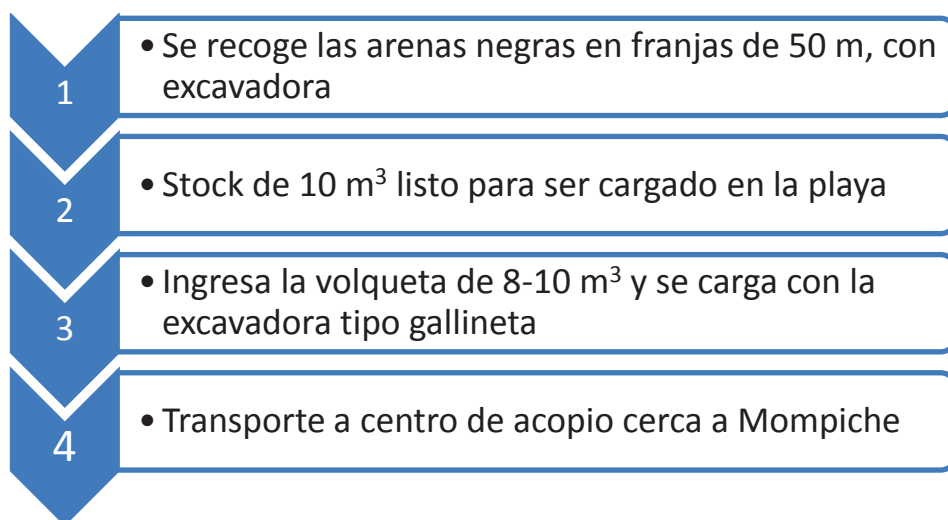


Figura 1. 8. Esquema de explotación de arenas negras.<sup>12</sup>

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

El diseño de explotación aplicado, no genera señales de la extracción de las arenas, de tal manera que la mina activa es imperceptible en el lugar; esto se da debido a que las corrientes marinas y los agujajes continuamente reponen en forma natural el material nuevo a la playa para ser aprovechado.

#### 1.4 CARACTERÍSTICAS ARENAS NEGRAS DE MOMPICHE

En la concesión OSTIONAL BLOQUE 1 las arenas negras forman horizontes lenticulares de potencias no mayores a 1,2 metros, y para el caso de la playa del Suspiro longitudes de 300 a 400 metros siguiendo la playa con un ancho de 50 m explotable en marea baja. Las arenas se presentan sueltas y son fácilmente erosionables cuando se producen los agujajes.

El origen de estas arenas es por la erosión de rocas conglomeráticas antiguas que contienen cantidades menores de sedimentos negros, las cuales son arrastradas por corrientes marinas y mareas que las concentran naturalmente.

<sup>12</sup> Fundación para la Investigación Geológica, Minera y Ambiental del Ecuador (FUNGEOMINE)



Figura 1. 9. Playa de arenas negras de Mompiche.

Las arenas negras son de grano muy fino en ciertos casos mayor a la malla 200, y por lo tanto a pesar de ser pesadas, son transportadas muy fácilmente a las partes altas de las bermas de playa, de tal forma que se encuentran en sitios elevados y formando franjas alargadas en forma de lentes.

De acuerdo con los resultados de los ensayos con los que se determinó la composición de la arena negra de Mompiche, se demuestra que ellas están compuestas de magnetita, ilmenita y hematita, en menor cantidad arenas de cuarzo, feldespatos con restos de conchas.

El análisis de las arenas negras fue realizado por FUNGEOMINE en la ciudad de Lima en los laboratorios de Bondar Clegg, cuyos resultados pueden ser observados en el Anexo 1. Para ello se tomó una muestra de 5 Kg en varios puntos de concentración de dichas arenas a lo largo y ancho de la concesión minera, en marea baja.

En la tabla 1.3 se indica un resumen de los resultados obtenidos en los exámenes realizados.

Tabla 1. 3. Resultados del análisis de las muestras de los suelos.<sup>13</sup>

ELEMENTOS	MUESTRA (%)
TiO <sub>2</sub>	28,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69,23
SiO <sub>2</sub>	1,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6
MnO	0,2
MgO	1,45
CaO	0,49
NaO <sub>2</sub>	0,33
K <sub>2</sub> O	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

Los resultados del análisis de difracción de rayos X realizados en la Escuela Politécnica Nacional por el Departamento de Metalurgia Extractiva se detallan en la tabla 1.4.

Tabla 1. 4. Resultados del análisis difracción de rayos X.<sup>14</sup>

MINERAL	FÓRMULA	MUESTRA MAGNÉTICA CONTENIDO (%)	MUESTRA NO MAGNÉTICA CONTENIDO (%)
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	52	50
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38	37
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10	10
Quartz	SiO <sub>2</sub>	-	3

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

<sup>13</sup> Fundación para la Investigación Geológica, Minera y Ambiental del Ecuador (FUNGEOMINE)

En términos generales estas arenas negras tienen un buen contenido de ilmenita, hematita y magnetita, las cuales por movimiento de las olas se concentran previamente de manera natural.

## 1.5 APLICACIONES

Actualmente las arenas negras son utilizadas por la industria cementera nacional, aprovechando su alto contenido de hierro, para incrementar el porcentaje de este elemento en el cemento Portland el cual al ser fabricado con arenas negras muestra mayor resistencia que el elaborado con áridos claros.

Los yacimientos de placeres secundarios ubicados en Manabí, cerca de Bahía de Caráquez, y el de Guayas en Chanduy son explotados para ser utilizados en la fabricación del cemento en Ibarra y Guayaquil, debido a su contenido de hierro.



Figura 1. 10. Aplicación de arenas ferruginosas en industria cementera.<sup>14</sup>

Otro producto que se produciría a partir de la explotación de las arenas negras es el dióxido de titanio, el cual es ampliamente utilizado en la industria, cuyas aplicaciones más comunes son para la producción de: pinturas, papel, caucho, plásticos, cueros y sus acabados, tintas, tejidos revestidos, cerámica, gránulos para tejados, revestimientos para barras de soldar y cubiertas para suelos.

<sup>14</sup> [http://1.bp.blogspot.com/-3l\\_MyU-XVFQ/UTn5uCb8e6I/g0l\\_gywigI/s1600/cemento\\_planta\\_productora.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-3l_MyU-XVFQ/UTn5uCb8e6I/g0l_gywigI/s1600/cemento_planta_productora.jpg)

Las arenas negras de la Península de Santa Elena son utilizadas en la fabricación de pigmento blanco, que resulta de la separación del dióxido de titanio asociado en solución sólida con la magnetita, también para elaborar pigmento negro obtenido a partir de la magnetita.



Figura 1. 11. Dióxido de titanio.<sup>15</sup>

El dióxido de titanio también es utilizado como opacante de vidrios, particularmente en azulejos y artículos sanitarios, en refractarios, arenas de fundición, productos químicos de circonio, e incrementándose rápidamente su demanda se está utilizando para monitores color de televisión y computadoras. Cabe aclarar que el titanio procesado en láminas de metal, es utilizado para la fabricación de satélites y de naves espaciales.

---

<sup>15</sup> <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagens/usos-do-dioxido-de-titanio.jpg>

## CAPÍTULO 2

### ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE HIERRO

En este capítulo se plantea el estudio de los métodos tradicionales y modernos para la obtención de metal de hierro, orientado principalmente al hierro metálico basado en el mineral. Se indican ciertos conceptos necesarios para la comprensión del proceso, de tal manera que se pueda determinar los parámetros adecuados aplicables al proceso de obtención de metal de hierro.

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las primeras piezas de hierro fundido, obtenidas directamente del metal de primera fusión, aunque más baratas, y con posibilidad de producir formas más complicadas y más grandes que las de hierro forjado, eran más frágiles, débiles y duras, por lo que su campo de aplicación era muy limitado.<sup>16</sup>

A inicios del siglo XVIII, llegó la revolución a la industria siderúrgica con el descubrimiento del uso del coque para reemplazar al carbón vegetal, lo cual permitió un rápido desarrollo de dicha industria y fundamentó las bases para los demás avances de la Revolución Industrial.

La producción de hierro de segunda fusión se perfeccionó al comienzo del siglo XIX. En esta época se desarrolló la producción de fundiciones en base a una serie de investigaciones sobre su composición, constitución y estructura.

El consumo mundial de mineral de hierro es cuantificado de manera indirecta mediante indicadores tales como: la producción de acero crudo, la producción de arrabio en altos hornos (BFI) y la producción de hierro metálico obtenido por procesos de reducción directa (DRI).

---

<sup>16</sup> American Society Foundrymen's (1974). *El Horno de Cubilote y su Operación*. México: Continental. Pág. 7.

Según la Asociación Mundial del Acero en el año 2013, la producción de acero crudo se estimó en casi 1.583 millones de toneladas, mientras que la producción de hierro en alto horno se estimó en casi 1.165 millones de toneladas, siendo China el mayor productor en ambos casos; y, la producción de hierro por reducción directa se estimó alrededor de 59 millones de toneladas, donde la India produjo más que el resto de países.

Actualmente, la mina de Carajas, en el estado de Pará, norte de Brasil, es la mayor mina de hierro del mundo, la cual es administrada por la empresa VALE S.A. Esta empresa multinacional brasileña participa en las operaciones mineras de países como Finlandia, Canadá, Australia, China, India, y otros países. Además existe otro enorme yacimiento de hierro en la región de "El Mutún", en el departamento de Santa Cruz, Bolivia, cuyo 50 % es explotado por la estatal Empresa Siderúrgica del Mutún (ESM), el porcentaje restante se encuentra en licitación.

## **2.2 MATERIA PRIMA**

Para la producción de hierro son necesarios tres elementos fundamentales: mineral de hierro, coque y piedra caliza, los cuales se preparan antes de introducirse al horno con la finalidad de obtener la calidad, el tamaño y la temperatura adecuada. Estos materiales son cargados en capas sucesivas y continuas en el horno.

### **2.2.1 MINERAL DE HIERRO**

El hierro es uno de los elementos más abundantes en el mundo, formando aproximadamente 5 % de la corteza terrestre que se presenta en la naturaleza de manera usual combinado químicamente con el oxígeno denominados óxidos de hierro.

El mineral de hierro contiene en combinación: azufre, fósforo, silicio y manganeso que afecta positiva o negativamente, según su proporción y composición, en las propiedades de los materiales férreos. Además, los minerales contienen constituyentes tales como cal, sílice, arcilla y magnesia; a partir de las cuales se

forma escoria durante el proceso de fusión. A continuación se indican en la tabla 2.1 los principales minerales de hierro.

Tabla 2. 1. Principales minerales de hierro.<sup>17</sup>

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	NOMINACIÓN QUÍMICA	CONTENIDO APROXIMADO DE HIERRO EN %
Magnetita	$Fe_3O_4$	Óxido ferroso	60-70
Hematita	$Fe_2O_3$	Óxido férrico	60-70
Limonita	$FeO(OH) \cdot nH_2O$	Óxido hidratado	50-60
Siderita	$FeCO_3$	Carbonato ferroso	40-50

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

Aunque hay una diversidad de minerales de hierro distribuidos sobre la corteza terrestre (óxidos, carbonatos, sulfuras, sulfatos, silicatos, entre otros), son pocos los minerales usados comercialmente como fuente de hierro, lo cual depende de la cantidad de metal o ley que estos contengan. Para utilizar estos minerales en la industria siderúrgica, deben contener un mínimo de 50 % de hierro con el fin de disminuir las impurezas o ganga presentes.

En la figura 2.1 se indican algunas muestras de minerales de hierro, particularmente; a) magnetita, b) hematita, c) limonita y, (c) siderita.

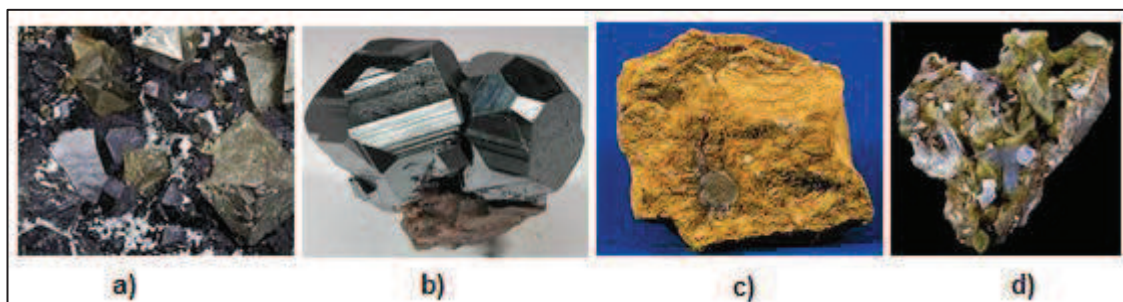


Figura 2. 1. Óxidos de hierro.<sup>18</sup>

El mineral extraído de la mina, se tritura en partículas finas, se elimina las impurezas empleando varios métodos, se forman pellets utilizando aglutinantes y

<sup>17</sup> Leyensetter, A. (1974). *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Reverte. Pág. 54.

<sup>18</sup> <http://www.geovirtual2.cl/>



agua. Algunos minerales ricos en hierro se utilizan directamente sin aglomerarlos. Luego se realiza la reducción del mineral aglomerado por medio de un agente reductor, el cual generalmente es carbono, monóxido de carbono e hidrógeno.



Figura 2. 2 Diagrama de flujo del procesamiento del mineral de hierro.

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

Los minerales explotados de hierro serán tratados después de la perforación, explosión, cargamento y transporte. El procesamiento de estos minerales incluye principalmente dos operaciones: liberación o separación de los minerales valiosos de los minerales de desecho y la concentración de esos valores. Dentro de estas operaciones se encuentran procesos como trituración, cribado, molienda, separación magnética, flotación y secado.

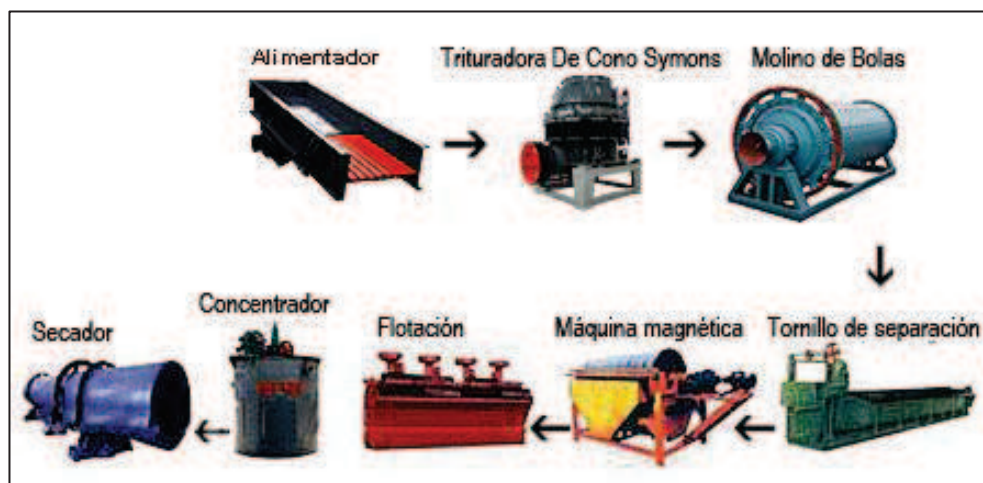


Figura 2. 3. Planta de trituración de mineral de hierro.<sup>19</sup>

### 2.2.1.1 Liberación del mineral

En general los minerales de hierro se encuentran combinados en rocas, por lo que contienen elementos indeseados denominados gangas. La liberación o separación se realiza por medio de la trituración, pulverización o molienda.

<sup>19</sup> [http://es.sbmchina.com/product/products-line/ore\\_crushing\\_line.php](http://es.sbmchina.com/product/products-line/ore_crushing_line.php)

La trituración habitualmente es una operación en seco que se efectúa en dos o tres etapas, en materiales de grandes proporciones hasta tamaños del orden de 3 mm.

En la molienda, se reduce el tamaño de las partículas por una combinación de quebrado de impacto y abrasión, ya sea en seco o en suspensión en agua. En este proceso, se obtienen producto en polvo, partículas de tamaño entre 10 y 300  $\mu\text{m}$ .

El cribado se fundamenta en seleccionar y clasificar los minerales útiles de las gangas, por diferencia de tamaño, obtenidos durante la molienda. Para esta operación es necesario el uso de tamices o cribas, las cuales generalmente se clasifican por el número de mallas o agujeros que existen en una distancia de pulgada lineal.

#### **2.2.1.2 Concentración de mineral de hierro**

Para utilizar el mineral de hierro en la fundición este requiere ser procesado de tal manera que alcance las especificaciones físicas y químicas necesarias. En el pasado, el mineral era clasificado por los productores para cumplir estándares de los altos hornos que demandaban composiciones especiales químicas y particulares como también de estructura. Con el avance de las técnicas de concentración esto se ha tornado más sencillo.

El término enriquecimiento con respecto al mineral de hierro se emplea comúnmente para designar todos aquellos métodos usados para procesar el mineral con objeto de mejorar sus características químicas, físicas o metalúrgicas de modo que se desarrolle una mezcla más deseable para alimentar el horno. Algunos de estos métodos pueden ser químicos o físicos.

##### *2.2.1.2.1 Uso de métodos químicos*

Dentro de los procesos químicos que se pueden emplear para concentrar efectivamente el mineral de hierro se indica la lixiviación selectiva, que consta básicamente en la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida

por procesos corrosivos. Se recurre a la lixiviación controlada en diversos procesos químicos y metalúrgicos.

En el caso de los procesos químicos o metalúrgicos, gracias al proceso de lixiviación selectiva, se disuelven sustancias valiosas cuya recuperación, obtención o beneficio es el fin buscado en el proceso, pero, paralelamente, podrán pasar a la disolución otras sustancias sin valor para el proceso industrial, y que, en resumidas cuentas, son contaminantes de la disolución obtenida mediante la lixiviación. Los procesos de lixiviación y purificación de la solución corresponden a las mismas operaciones que se practican en el análisis químico, únicamente que a escala industrial.

Los reactivos químicos empleados (agentes lixiviantes) deben reunir ciertas propiedades específicas, por ejemplo: costo bajo, reciclable y debe ser bastante selectivo para disolver determinados compuestos. De igual manera se puede producir una lixiviación "natural" de materias y sustancias expuestas, voluntaria o involuntariamente, a la acción de disolventes naturales o artificiales.

Existen principalmente tres etapas en el proceso de lixiviación:

- Disolución del componente deseado presente en la fase sólida.
- Concentración y/o purificación de la solución obtenida.
- Precipitación del metal deseado o sus compuestos.

#### *2.2.1.2.2 Uso de métodos físicos*

El requerimiento de material adecuado para alimentar el horno de fundición conlleva una serie de procesos y procedimientos, dentro de estos procesos se presenta el uso de métodos físicos para concentrar el hierro. Hay una gran variedad de métodos para concentrar materiales y cada uno está particularmente diseñado para un material específico.

Para este estudio se presenta una revisión del método de concentración magnética que aprovecha la diferencia en las propiedades magnéticas de los minerales componentes de las menas.

Los materiales se clasifican en dos amplios grupos, según sean atraídos o repelidos por un campo magnético: paramagnéticos y diamagnéticos. Los materiales paramagnéticos se pueden concentrar en los separadores magnéticos de alta intensidad tales como ilmenita, rutilo, wolframita, monacita, siderita, pirrotita, cromita, hematita y los minerales de manganeso.

El ferromagnetismo se considera como un caso especial de paramagnetismo. Los minerales ferromagnéticos tienen muy alta susceptibilidad magnética para las fuerzas magnéticas y retienen algún magnetismo cuando se alejan del campo (remanencia). Estos materiales se pueden concentrar en los separadores magnéticos de baja intensidad.

Tabla 2. 2 Intensidad magnética requerida en la separación magnética.<sup>20</sup>

INTENSIDAD MAGNÉTICA REQUERIDA PARA LA SEPARACIÓN (G)	MINERAL
500-5000	Fuertemente magnéticos Magnetita, franklinita, leucita, sílice, pirrotita
5000-10000	Moderadamente magnéticos Ilmenita, biotita, granate, wolframita
10000-18000	Débilmente magnéticos Hematita, columbita, limonita, pirolusita. rodocrosita, siderita, manganita
18000-23000	Pobrementemente magnéticos Rutilo, rodonita, dolomita, tantalita. cemsita, epidota, monacita, fergusonita, zircón, cerargiritaz argentita, pirita, esfalerita, molibdenita, bomita, wilemita, tetraedrita, scheelita.

Los principales usos de la separación magnética son: a) eliminación o separación de fragmentos metálicos y, b) procesos de concentración y purificación magnética.

<sup>20</sup> Pavéz, O. (2009). *Apuntes de concentración de minerales II*. Universidad de Atacama.

Los separadores magnéticos y purificadores se dividen en: a) separadores del tipo húmedo o por vía húmeda y, b) separadores del tipo seco o por vía seca.

Existe otro método físico de concentración denominado concentración gravimétrica el cual consiste en la separación de minerales de diferentes densidades utilizando la fuerza de gravedad. Los principales métodos de separación por gravedad se indican a continuación:

Separación por medios densos: las partículas se colocan en un baño que contiene un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas floten y otras se hundan.

Separación por corrientes: la densidad del medio es inferior a las densidades de las partículas que se desean separar. Se produce por la diferencia entre velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas. El inconveniente de este método es que el mineral se humedece siendo esto perjudicial en el proceso siderúrgico, por ello se requiere un proceso de secado.

### **2.2.1.3 Aglomeración del mineral**

Los estudios sobre la aglomeración de minerales de hierro han tenido una influencia decisiva en los aumentos de la producción de los altos hornos, contribuyendo notablemente al aprovechamiento de minerales pobres o de residuos de operaciones metalúrgicas, lo cual era difícil de emplear años atrás.

La aglomeración de los minerales de hierro, de tamaño menudo o en forma de polvo, se realiza con la finalidad de aumentar el contenido de hierro, de separar los materiales acompañantes perjudiciales tales como arcilla suelta, sílice, azufre y fósforo, evitando así inconvenientes en el régimen de funcionamiento de hornos de cuba o altos hornos. Otro objetivo de este proceso es disminuir su tamaño hasta un grano apropiado para su elaboración ulterior, enriqueciendo el mineral, cuyo porcentaje de hierro es relativamente bajo, 25 a 35 % por ejemplo.

La operación se puede realizar empleando diversos procedimientos, entre los que se puede mencionar los siguientes:

- El briqueteado es un proceso de prensado de los minerales a temperaturas ambiente con o sin adición de materia aglomerante, la forma puede variar dependiendo de la maquinaria aplicada. Por tanto el término briqueta se emplea para la materia prima fabricada con diversos materiales compactados, la característica común de todas las briquetas es su alta densidad.

Para la fabricación de briquetas se utilizan prensas, para que las briquetas tengan suficiente consistencia, es necesario, a veces, adicionar al mineral ciertos elementos aglomerantes, que se mezclan con el mineral en proporciones convenientes antes de su prensado. En la tabla 2.3 se indican algunas de las sustancias empleadas como aglomerantes en función de su naturaleza orgánica o inorgánica.

Tabla 2. 3. Ligantes orgánicos e inorgánicos empleados en aglomeración.<sup>21</sup>

INORGÁNICOS	ORGÁNICOS
Silicatos	Lignosulfonatos
Alúmina	Almidón
Arcillas	Melazas
Hidróxido sódico	Polietilenglicol
Sílice	Carboximetilcelulosa
Yeso	Gomas
Bentonita	Caseinatos
Cal	Alginatos

- La nodulización es un tratamiento que se realiza en hornos cilíndricos horizontales, en estos como resultado de la rodadura y la cocción a elevadas temperaturas se consigue un producto de forma nodular.
- La sinterización consiste en mezclar el mineral con una cierta cantidad de combustible y agua y por fusión incipiente de las partículas de mineral y de la ganga, se obtienen masas porosas en forma irregular de 6 a 40 mm de lado, aptas para su posterior reducción en procesos de fundición.

<sup>21</sup> GARCÍA, P; "Avances en aglomeración y compactación de partículas", USC, 2010

- La pelletización consiste en esferoidizar polvo de mineral con menor contenido de hierro, aglomerante (aditivo especial alcalino, como caliza o dolomita) y agua en máquinas rotatorias que pueden ser tambores, platillos o conos. Luego las bolitas formadas (ricas en hierro restante de la ganga) por movimientos de rotación son cocidas y endurecidas en hornos adecuados. Sus dimensiones son de 9 a 16 mm. En la figura 2.4 se indica el proceso de pelletización.

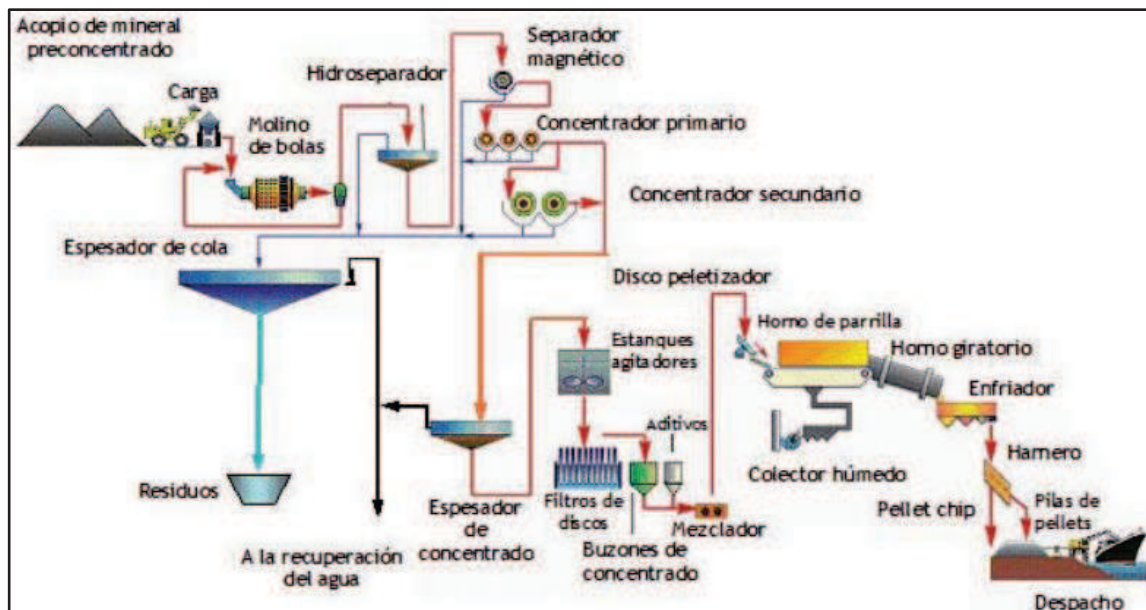


Figura 2. 4. Esquema del proceso de pelletización del mineral de hierro.<sup>22</sup>

De estos procedimientos, el sinterizado y la pelletización son los más utilizados. Con el sinterizado se producen minerales relativamente más gruesos y casi siempre se realiza en las fábricas; mientras que, con la pelletización se obtienen minerales finos homogéneos en las minas. En la figura 2.5 se indican algunas muestras de materia prima aglomerada: a) sinterizados, b) pellets, c) trozos de mineral.

<sup>22</sup> [http://www.inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/05-Minerales\\_de\\_hierro.pdf](http://www.inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/05-Minerales_de_hierro.pdf)



Figura 2. 5. Materia prima aglomerada.<sup>23</sup>

## 2.2.2 COQUE

El coque es un combustible sólido que se obtiene de grados especiales de carbón bituminoso, que se calienta en hornos verticales hasta temperaturas de 1150 °C sin contacto con el aire y luego se enfría con agua en torres de enfriamiento. Su empleo en la industria metalúrgica es preponderante como combustible, puesto que genera el elevado nivel de calor requerido para que ocurran las reacciones químicas en la fabricación del hierro. Además produce monóxido de carbono, que se utiliza para reducir el óxido de hierro a hierro.<sup>24</sup>

Refiriendo el análisis a una muestra seca, como composición química media del coque siderúrgico puede aceptarse la siguiente.

Tabla 2. 4 Composición típica del coque.<sup>25</sup>

COMPONENTE	CONTENIDO EN %
Carbono fijo	84 - 89
Materias volátiles	1 - 2
Cenizas	10 - 14
Azufre	0,5 - 1,5

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez.

Son las características físicas del coque las que, indudablemente, ejercen mayor influencia en la valoración de este producto como materia prima para la industria

<sup>23</sup> Geerdes, M., Toxopeus, H. y Van Der Vliet, C. (2009). *Modern Blast Furnace Ironmaking: An introduction*. Amsterdam, NLD: IOS Press. Pág. 20.

<sup>24</sup> Kalpakjian - Schmid (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación. Pág.138.

<sup>25</sup>[http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/16\\_Clase%20Siderurgia%20Coque%20Reduccion.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/16_Clase%20Siderurgia%20Coque%20Reduccion.pdf)



siderúrgica; entre las que se pueden destacar las siguientes: densidad, solidez y uniformidad.

### 2.2.3 FUNDENTES

Un fundente es una sustancia que baja el punto de fusión y mejora la fluidez de la escoria producida naturalmente durante la operación de fusión.

#### 2.2.3.1 Piedra caliza

La piedra caliza ( $CaCO_3$ , carbonato de calcio) remueve las impurezas del hierro fundido. La caliza que actúa como fundente reacciona químicamente con las impurezas, las cuales se funden a baja temperatura. La caliza se combina con las impurezas y forma una escoria, que es ligera, flota sobre el metal fundido, y se elimina posteriormente.

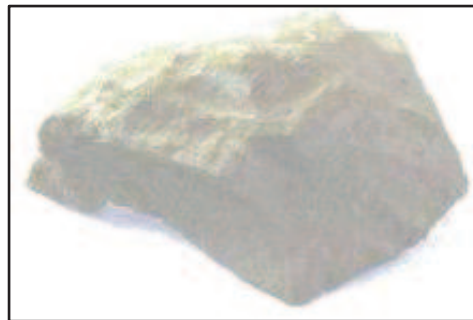


Figura 2. 6. Piedra caliza.<sup>26</sup>

Muchas piedras calizas contienen pequeñas cantidades de sílice, alúmina, magnesia y otros óxidos. La magnesia y la alúmina también mejoran la fluidez de la escoria, mientras que la sílice reduce fuertemente la efectividad de la caliza, por lo que ésta debe contener menos del 2 % de sílice.

La cantidad de piedra caliza que debe introducirse por carga se puede calcular determinando la cantidad de óxido de calcio (CaO) necesaria para reaccionar con la sílice que se prevé acompañará a cada carga. En condiciones normales, se requiere aproximadamente un 20 % en peso de la carga de coque.

---

<sup>26</sup> <http://proyectoelvigia.com/images/piedra.gif>

### 2.2.3.2 Dolomita

La dolomita es una roca natural parecida a la piedra caliza. Contiene carbonato de magnesio y carbonato de calcio. En algunos casos, el óxido de magnesio es comparable al óxido de calcio como fundente, cuya combinación puede ser más efectiva bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, en cubilotes ácidos se prefiere la dolomita a la piedra caliza, mientras que en cubilotes básicos se prefiere piedra caliza ya que se tiene suficiente magnesia de los refractarios.

Las calizas dolomíticas son piedras que contienen algún porcentaje de carbonato de magnesio pero están formadas mayoritariamente de carbonato de calcio.



Figura 2. 7. Dolomita.<sup>27</sup>

## 2.3 PRODUCCIÓN DE HIERRO

El descubrimiento del hierro en Asia Menor data de cuatro a cinco mil años antes de Cristo, luego, se desarrolló con progresiva aceleración en otras partes del planeta, hasta llegar a mediados del siglo XIX, con el inicio de la revolución industrial a su utilización masiva debido a la tecnología del acero.

La elaboración del hierro da nombre a una época, la Edad del Hierro, durante la cual el hombre descubre la utilidad de este metal y comienza a emplearlo masivamente en la fabricación de armas y herramientas.

En la Edad Media se introdujo un procedimiento de obtención de hierro denominado “forja catalana” que consistía en pequeños pozos o en crisoles con

---

<sup>27</sup> [http://www.gmalicante.org/Salidas2011/SALIDA384/FOTOS/DOLOMITA%20\(20\).jpg](http://www.gmalicante.org/Salidas2011/SALIDA384/FOTOS/DOLOMITA%20(20).jpg)

paredes revestidas de arcilla, que quemaba el mineral mediante carbón vegetal mezclado con aire a presión a través de fuelles manuales o accionados a pedal.

En estos hornos no se alcanzaba la temperatura de fusión del hierro, sino que se obtenía una masa metálica esponjosa impregnada en escorias que se separaban mediante un batido enérgico.

Luego se comenzó a utilizar un horno llamado alto fuego, precursor de los actuales hornos de cuba en los cuales se alcanzaba una temperatura más elevada lo que provocaba una fusión parcial del hierro.

Según las técnicas de trabajo, se podía obtener hierro dulce, hierro duro y un material duro, pero frágil llamado arrabio, el cual se comenzó a aprovechar fundiéndolo y colándolo en moldes<sup>28</sup>. En la figura 2.8 se indica una clasificación general de los hornos.

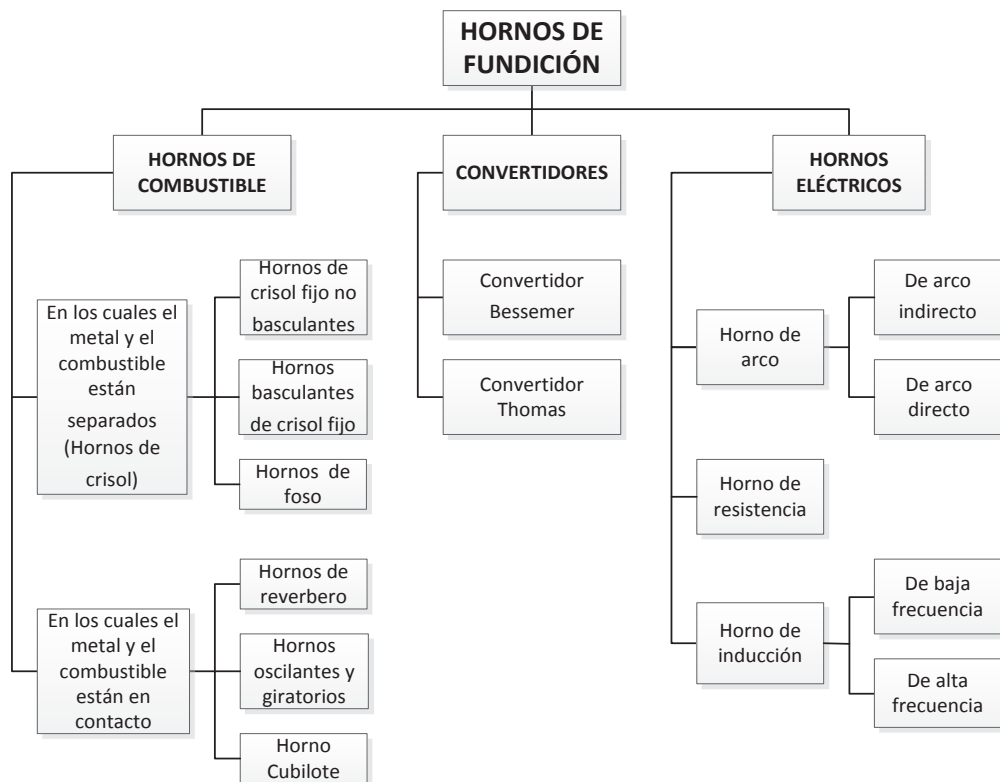


Figura 2. 8. Clasificación de los hornos de fundición.

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez.

<sup>28</sup> inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/05-Minerales\_de\_hierro.pdf

### 2.3.1 SIDERURGIA BASADA EN MINERAL

Los procesos siderúrgicos basados en mineral se desarrollaron a partir del siglo XIX, dando lugar a la fabricación de un sinnúmero de objetos y equipos de acero.

El cuadro de la figura 2.9 representa esquemáticamente las vías siderúrgicas que parten de mineral, en función del equipo y reductor empleados.

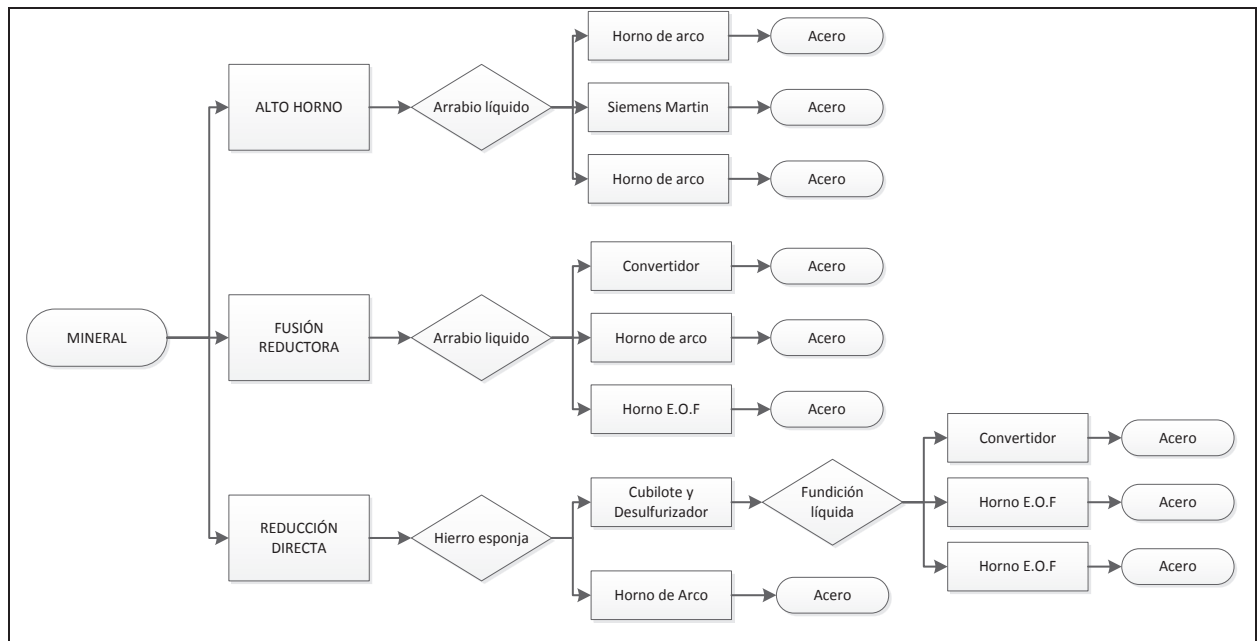


Figura 2. 9. Siderurgia a partir del mineral.<sup>29</sup>

En la primera alternativa, la reducción se realiza en un alto horno mediante coque. En este horno, reducción y fusión proceden de manera prácticamente simultánea. El producto obtenido es el arrabio, altamente carburado (4 - 5 % C) y en estado líquido. Este arrabio se procesa en otros hornos como convertidores y hornos de solera, en los que se descarbura hasta convertirse en acero líquido

En la segunda alternativa, reducción y fusión del mineral se producen en un proceso bastante nuevo denominado “Fusión Reductora” o “Siderurgia del Siglo XXI”. Para cuya reducción se utilizan carbones pobres no coquizables. El producto conseguido es también una fundición altamente carburada y en estado

<sup>29</sup> oa.upm.es/1929/1/Aceria\_electrica\_MONO\_2009.pdf

líquido, que se trata de la misma forma que el obtenido en el alto horno. Esta vía todavía se encuentra en estado de planta piloto.

En la tercera alternativa, el proceso de “Reducción Directa” utiliza como reductor hidrocarburos. Con este proceso se obtiene un producto sólido: polvo, nódulos o briquetas. Su composición es la de un hierro casi puro, con elevado porcentaje de carbono. Dicho producto se conoce como “hierro esponja”, “pellets”, “prerreducidos” o “hierro de reducción directa DRI”.

Es así que, en la actualidad existen dos rutas para la obtención de acero partiendo de mineral de hierro: la ruta alto horno - convertidor, y la ruta reducción directa - horno de arco, cuya diferencia básica se encuentra en la forma de reducción.

En la ruta de alto horno la reducción a hierro metálico es por fusión utilizando carbón y aire para suministrar el calor necesario y generar gas reductor para la reducción desde hematita, que es el estado de mayor oxidación hasta la wustita que es el estado de menor oxidación. La reducción directa se lleva a cabo con un gas reductor generado a partir de la reformación de gas natural, el proceso se ejecuta sin fusión desde la hematita hasta el hierro metálico. El calor se proporciona calentando el gas reductor en un intercambiador de calor.<sup>30</sup>

#### **2.3.1.1 Alto horno**

El alto horno es el primer paso en la producción de acero a partir de óxidos de hierro. Los primeros altos hornos aparecieron en el siglo XIV y producían una tonelada por día. Actualmente, hornos gigantes producen 13.000 toneladas por día.

El alto horno moderno es básicamente una torre de acero revestida con ladrillo refractario resistente al calor, cuyo propósito es reducir químicamente y convertir físicamente los óxidos de hierro en hierro líquido o arrabio caliente.

Se carga el horno en su parte superior con el mineral de hierro, la piedra caliza y el coque. Esta mezcla se funde en una reacción a 1650 °C con aire precalentado

---

<sup>30</sup> [http://grafito.fime.uanl.mx/texto\\_completo/aniac18\\_siumulacion.pdf](http://grafito.fime.uanl.mx/texto_completo/aniac18_siumulacion.pdf)

a aproximadamente 110 °C y soplado en el horno a través de toberas en su parte inferior. Es necesario el precalentamiento del aire de entrada para producir temperaturas suficientemente elevadas para que ocurran las reacciones.

El metal fundido se acumula en la parte inferior del alto horno, en tanto que las impurezas flotan hacia la parte superior del metal.

#### *2.3.1.1.1 Descripción del equipo*

La parte más baja del horno es el crisol o solera, en la cual se ubican canales separados para sangrar el hierro y la escoria fundidos respectivamente. Precisamente arriba de la solera está el etalaje. La parte alta del etalaje es la parte del horno que tiene el mayor diámetro, llamada comúnmente “vientre” (unión de los dos troncos de cono, “cuba” y “etalaje”), tal como se indica en la figura 2.10.

Las zonas de combustión se encuentran en el etalaje, y son las partes con mayor temperatura del horno. Para resguardar el revestimiento contra la erosión de la escoria, el etalaje es enfriado con agua. Las toberas están separadas regularmente alrededor de la circunferencia de la parte baja del etalaje, y conducen al aire de soplado hacia el interior del horno debajo de la zona de combustión.

La salida de las escorias está localizada entre unos 76 y 102 cm bajo las toberas, y el orificio de sangría, o “piquera”, está colocado ligeramente arriba del fondo del crisol.<sup>31</sup>

En la parte superior del horno se encuentran la tolva de carga y las campanas de carga, cuyo conjunto se denomina “tragante”. La carga es trasladada desde el nivel de tierra y elevada por medio de un malacate, y volcada en la tolva de carga. La campana superior es bajada y la carga cae sobre la campana inferior.

El aire empleado en el proceso de fusión es impulsado al interior del horno a través del ducto alimentador y de las toberas bajo una presión de 1 a 2 kg/cm<sup>2</sup>,

---

<sup>31</sup> American Society Foundrymen's (1974). *El Horno de Cubilote y su Operación*. México: Continental. Pág. 532.

por medio de grandes máquinas sopladoras. De aquí se deriva el nombre de “horno de soplado”. Previo a su entrada al horno, el aire es calentado de 650 a 870 °C por medio de estufas. Cada horno está equipado con tres o más estufas o cambiadores. Cada estufa tiene una cámara de combustión y un panel de ladrillo refractario.

La reducción tiene lugar según baja la carga por la cuba y es substancialmente completa cuando llega a la zona de fusión.

Los gases combustibles son tomados de la parte alta del tragante y a través del ducto descendente del equipo de limpieza, en donde se elimina el polvo, y de allí a las estufas, en donde es mezclado con aire y quemado. Los gases calientes suben a la parte alta de la cámara de la estufa y luego pasan hacia abajo a través de los ductos correspondientes, cediendo su contenido de calor al panel de ladrillo refractario; cuando su temperatura sea lo suficientemente alta, se corta el paso de gas y se hace pasar aire frío procedente de las máquinas soplantes, en la dirección opuesta.<sup>32</sup>

La carga normal del alto horno consiste aproximadamente de dos toneladas de mineral de hierro, una tonelada de carbón de coque, y media tonelada de piedra caliza. Se necesitan alrededor de cuatro toneladas y media de aire para la producción de una tonelada de arrabio. Una carga dada pasa por el horno en aproximadamente nueve horas.

El hierro es sangrado y lingoteado cada cuatro a ocho horas. La escoria formada por la reacción de la caliza con la ganga silícica del mineral, es sangrada cuatro o cinco veces por cada sangría de hierro. En la figura 2.10 se indica el esquema de un alto horno.

---

<sup>32</sup> American Society Foundrymen's (1974). *El Horno de Cubilote y su Operación*. México: Continental. Pág. 533

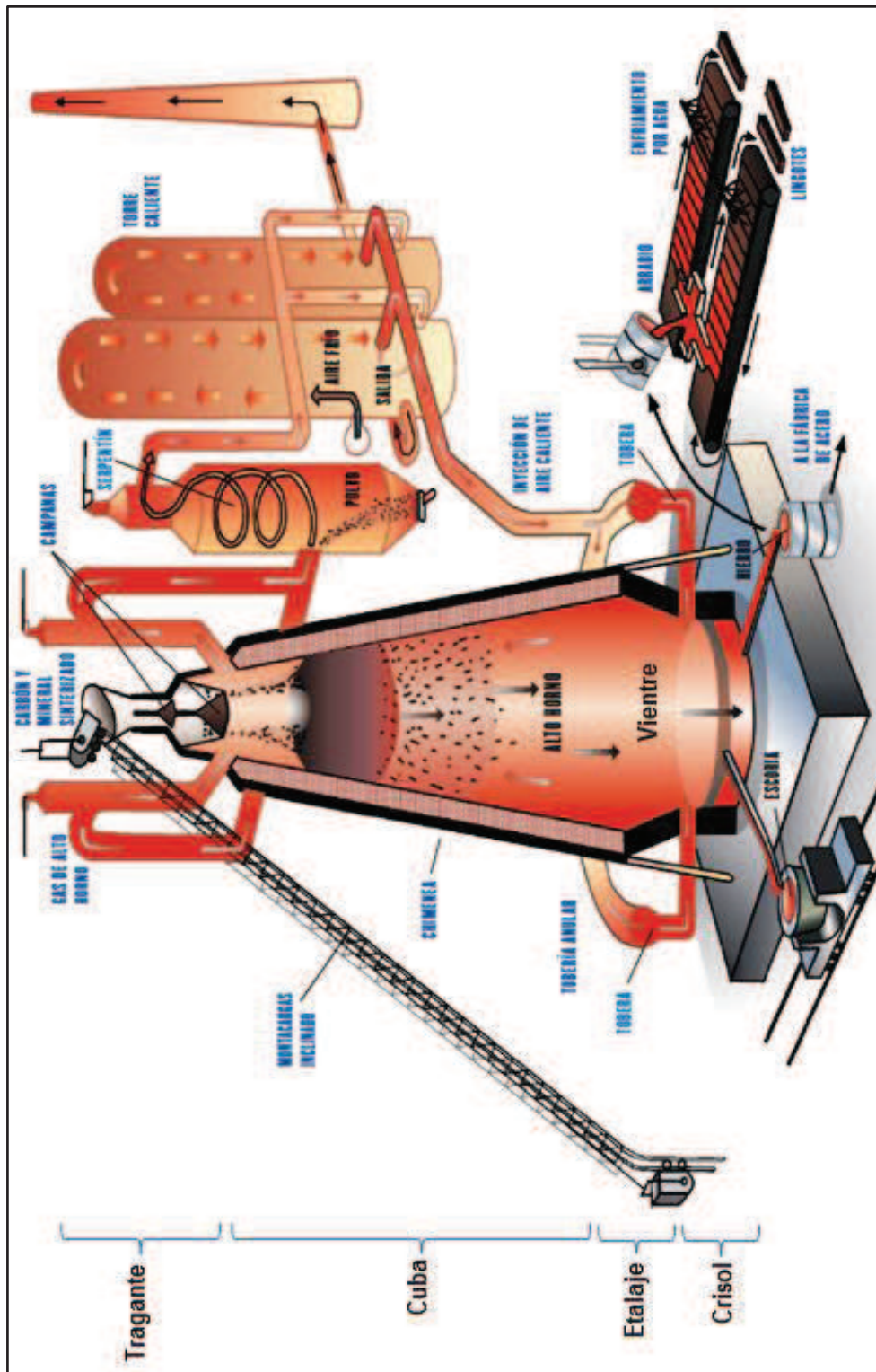


Figura 2. 10. Esquema de un alto horno.<sup>33</sup>

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

<sup>33</sup> <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2010/01/alto-horno-lamina.pdf>



### 2.3.1.1.2 Reacciones químicas

El mineral de hierro en bruto, pellets o sinterizados se reducen, es decir el oxígeno en los óxidos de hierro se elimina mediante un cierto número de reacciones químicas. La reacción básica es la del oxígeno con el carbono, para producir monóxido de carbono, que a su vez reacciona con el óxido de hierro y lo reduce a hierro.

Tabla 2. 5. Reacciones químicas que tienen lugar en el alto horno.<sup>34</sup>

N°	REACCIÓN QUÍMICA	TEMPERATURA A LA QUE INICIA
1	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = \text{CO}_2 + 2 \text{Fe}_3\text{O}_4$	850 °F
2	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = \text{CO}_2 + 3 \text{FeO}$	1100 °F
3	$\text{FeO} + \text{CO} = \text{CO}_2 + \text{Fe}$	1300 °F
	$\text{FeO} + \text{C} = \text{CO} + \text{Fe}$	

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

El coque desciende a la parte inferior del horno hasta el nivel en el que entra el aire precalentado, con el cual se enciende y reacciona inmediatamente para generar calor.



Esta reacción tiene lugar en presencia de exceso de carbono a una alta temperatura del dióxido de carbono, por lo que se reduce a monóxido de carbono, el cual es necesario para reducir los óxidos de hierro.

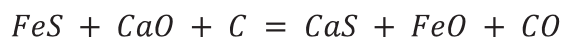


La piedra caliza desciende en el alto horno y sigue siendo un sólido mientras se produce su primera reacción.



<sup>34</sup>[www.steel.org/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/How%20A%20Blast%20Furnace%20Works%20Larry%20says%20to%20delete.aspx](http://www.steel.org/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/How%20A%20Blast%20Furnace%20Works%20Larry%20says%20to%20delete.aspx)

Esta reacción requiere energía y comienza a unos 1600 °F. El CaO formado a partir de esta reacción se utiliza para eliminar el azufre del hierro, cuya reacción es la siguiente:



La CaS se convierte en parte de la escoria. La escoria también se forma a partir de cualquier sílice restante ( $SiO_2$ ), alúmina ( $Al_2O_3$ ), magnesia (MgO) o caliza (CaO) que entró con el mineral de hierro en bruto, pellets, sinterizados o coque. Luego la escoria líquida fluye a través del lecho de coque a la parte inferior del horno, donde flota sobre el hierro líquido, ya que es menos densa. En la figura 2.11 se muestra las reacciones químicas que tiene lugar en el interior de un alto horno.

	FENÓMENOS	REACCIONES DE LOS MINERALES	REACCIONES DE LOS MINERALES CON LOS GASES	REACCIONES DE LAS CORRIENTES GASEOSAS
400 °C	Eliminación de agua higroscópica, de hidratación, etc. Reducción indirecta del mineral.		$Fe_2O_3 + 3CO \rightleftharpoons 2Fe + 3CO_2$	$2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$ $CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO$
700 °C	Depósito de C a partir de CO Descomposición de $CaCO_3$ y $MgCO_3$			
1.350 °C	Reducción directa del mineral Formación de las primeras escorias. Reducción de los óxidos de Mn. Fusión incipiente	$Fe_2O_3 + 3C \rightleftharpoons Fe + 3CO$ $CaCO_3 \rightleftharpoons CaO + CO_2$ $FeO + SiO_2 \rightleftharpoons FeSiO_3$ $FeO \cdot SiO_2 + 2CaO \rightleftharpoons CaO \cdot SiO_2 + FeO$		
1.550 °C	Fusión completa. Reducción de MnO, $SiO_2$ y $P_2O_5$ Carburación y sulfuración	$MnO + C \rightleftharpoons Mn + CO$ $SiO_2 + 2C \rightleftharpoons Si + 2CO$ $P_2O_5 + 5C \rightleftharpoons 2P + 5CO$		
1.800 °C	Combustión de coque. Desulfuración y formación completa de escorias	$CaO + FeS \rightleftharpoons CaS + FeO$ $Mn + FeS \rightleftharpoons MnS + Fe$		$C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$ $CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO$
1.600 °C	Separación del arrabio de la escoria.			

Figura 2. 11. Esquema de las reacciones químicas.<sup>35</sup>

Otro de los productos del proceso de fabricación de hierro, además de hierro fundido y la escoria, son los gases calientes y de desecho. Estos gases salen de la parte superior del alto horno y avanzan a través de equipos de limpieza de gas. Este gas tiene un valor energético considerable por lo que se quema como

<sup>35</sup> [http://www.inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/05-Minerales\\_de\\_hierro.pdf](http://www.inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/05-Minerales_de_hierro.pdf)

combustible en las estufas, "viento caliente", que se utilizan para precalentar el aire que entra en el alto horno. El gas no quemado en las estufas es enviado a la sala de calderos y se utiliza para generar vapor, el cual se convierte en un turboventilador que genera el aire comprimido conocido como "viento frío" que va a las estufas.

### 2.3.1.2 Reducción directa

La reducción del mineral de hierro se ha llevado a cabo desde la antigüedad habiendo existido diversos procedimientos que sin llegar a la fusión del hierro (1200 °C), lograban la reducción del mineral (850 - 1050 °C) eliminando el oxígeno del óxido de hierro (hematita).

La reducción directa fue exitosamente comercializada cuando se desarrolló el proceso Hoganas en Suecia en 1909 seguido por la concesión de una patente para el proceso de Wiberg en 1918, de nuevo en Suecia. Otro proceso de reducción directa (Norks Stahl) fue patentado en 1925 en Bochum (Alemania), pero la reducción directa realmente despegó con la instalación de una planta HYL en México en 1957.<sup>36</sup>

Desde entonces, se han usado varios métodos para producir hierro de reducción directa, pero en la práctica funcionan tres procesos principales: FIOR, HYL y MIDREX, aunque la gran parte del mercado trabaja principalmente con los dos últimos procesos. En la actualidad, se han desarrollado cinco técnicas nuevas: FASTMET, IRON CARBIDE, CIRCORED, INMETCO y FINMET.

En el proceso de reducción directa se remueve el oxígeno de los minerales de hierro por la acción de agentes reductores, que pueden ser sólidos o gaseosos (gas natural, coque, monóxido de carbono, hidrógeno). Como producto de este proceso, se obtiene un sólido poroso llamado hierro esponja, conteniendo carbono y otros residuos minerales, por lo que se le debe refinar mediante un proceso llamado Pudelado.

---

<sup>36</sup> Chatterjee, A. (2010). *Sponge Iron Production by Direct Reduction of Iron Oxide*. New Delhi: PHI Learning Private Limited. Pág. 38.

La reducción directa se efectúa a temperaturas no mayores a 1200 °C, para las cuales el hierro no absorbe carbono de manera inmediata. Tanto el tipo de agente reductor como la temperatura a la que ocurre la reducción varían de proceso en proceso, pero en ningún caso se llega a la temperatura de fusión del sólido.

#### *2.3.1.2.1 Procesos de reducción directa*

Los procesos de reducción directa se pueden clasificar en dos grupos: los que usan como reductor el carbón y los que usan como reductor gas natural reformado

La ventaja principal de los procesos de reducción directa base - carbón es el uso de una fuente de energía barata y abundante. Los procesos que emplean hornos de hogar rotatorio presentan la ventaja adicional de emplear finos de mineral de hierro sin la etapa de aglomeración. Las desventajas que presentan estos procesos son: alto consumo de energía, obtención de un producto mezclado con cenizas, entre otros.

Los procesos base-gas, por el contrario, emplean una fuente de energía costosa y, en general, requieren de la etapa de aglomeración; no obstante, su predominio es evidente, con casi un 93 % de la producción mundial, gracias a la producción de un material más limpio y de una manera más controlada. La decisión para seleccionar el mejor proceso estará influenciada, finalmente, por sus costos de producción y por su flexibilidad.

- Proceso de reducción directa basado en el carbón

En este proceso de reducción generalmente se utiliza un horno rotatorio. Este horno consta de un cilindro horizontal que gira a muy baja velocidad, cuyo interior está cubierto con refractarios. Este horno se alimenta con el mineral de hierro y el carbón como reductor; en algunos casos utiliza un agente desulfurante como caliza.

La carga dentro del horno se mueve en contracorriente con respecto al gas (gasificación del carbón) que fluye sobre ella. Se introduce aire para quemar el monóxido de carbono que emerge del lecho del horno y provee de esta manera

calor para el proceso. En la primera sección longitudinal del horno se realiza el precalentamiento de la carga hasta la temperatura de operación liberándose la mayor parte de los volátiles del carbón llevándose a cabo una parte de la reducción. En el resto de la longitud del horno culmina la reducción del mineral, obteniéndose así la metalización necesaria.<sup>37</sup>

El proceso de reducción directa a carbón en horno rotatorio requiere de una visión integral principalmente del mezclado de las partículas, la transferencia de calor y la cinética de las reacciones de reducción y gasificación que suceden simultáneamente.

- Proceso de reducción directa basado en el gas

Dentro de los tres principales procesos que utilizan el gas como reductor se diferencian por el tipo de horno que utilizan.

El horno de retorta fue utilizado por la empresa mexicana HyL en sus procesos HyL I y HyL II, este tipo de horno requería para la reducción un juego de 4 reactores de los cuales 3 están en operación y el cuarto realiza operaciones de carga y descarga. El proceso se efectúa en ciclos y los tres reactores que están en operación actúan en serie. La reducción de la carga se efectúa en dos etapas: reducción inicial y reducción final, luego se realiza el enfriamiento y la carburación. El sistema es flexible ya que se puede operar los reactores en el orden que se desee.

El horno de lecho fluidizado utiliza finos de mineral de hierro de malla 4 a malla 325, los cuales pasan a través de cuatro reactores de lecho fluidizado que están ubicados en serie. El reactor N°1 calienta el mineral y en los reactores 2, 3 y 4 se lleva a cabo la reducción. El gas reductor pasa en contracorriente a través de los sólidos, comenzando por el reactor N°4, luego el reactor N°3 y finalmente el N°2.

El horno de cuba actualmente es el más utilizado a nivel industrial en la reducción directa del mineral. Los más conocidos son el MIDREX y el HyL.

---

<sup>37</sup> <http://share.pdfonline.com/7b5cc6e192324b91889f043867440192/cap9.pdf>

- Proceso Hoganas y Wiberg

El primer proceso de reducción directa fue el proceso Hoganas, cuya operación comienza por la colocación de los finos de mineral de hierro dentro de tubos cilíndricos, rodeado de capas compuestas por finos de coque y fundente. El material es transportado en el interior de un horno de túnel a una temperatura de 1200 °C. Se genera un producto de alta metalización (porcentaje de hierro metálico dividido entre el porcentaje de hierro total) y, sin embargo, por ser un proceso con un manejo complicado, no es adecuado para la producción a gran escala.

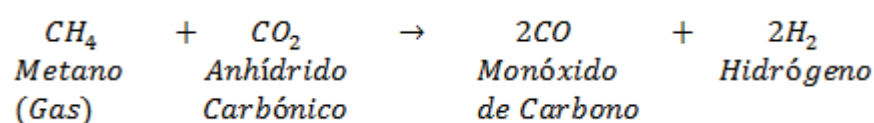
Este proceso se utiliza en la manufactura de polvos de hierro utilizados en metalurgia de polvos. El sueco Martín Wiberg inventó un proceso novedoso empleando hornos verticales. Este proceso es anterior a los procesos modernos tales como el proceso MIDREX.

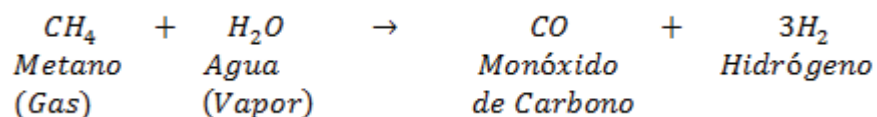
- Proceso MIDREX y HYL

Ambos procesos consisten en reducir el mineral de hierro a hierro metálico en un horno de cuba vertical por medio de un gas reductor, pero existen diferencias. En el proceso MIDREX y en el HyL III se definen principalmente dos partes:

- El sistema de reformado del gas natural.
- El sistema reductor del mineral de hierro o pellets mediante el gas reformado para convertirlo en hierro reducido con una metalización de 92 – 96 %.

El sistema de reformado del gas natural difiere entre los dos procesos MIDREX y HyL III. El MIDREX efectúa el reformado del gas natural utilizando el gas de tope del sistema reductor, este gas de tope que está formado por anhídrido carbónico y agua, fluye hacia el catalizador que se localiza en el reformador y en este se producen las siguientes reacciones químicas:





En el proceso MIDREX el exceso del gas de tope del reductor se utiliza como combustible para los quemadores del reformador y a su vez el gas de escape del reformador se emplea para aumentar la temperatura del aire de combustión para dichos quemadores y adicionalmente para calentar el gas de proceso antes de ser reformado.

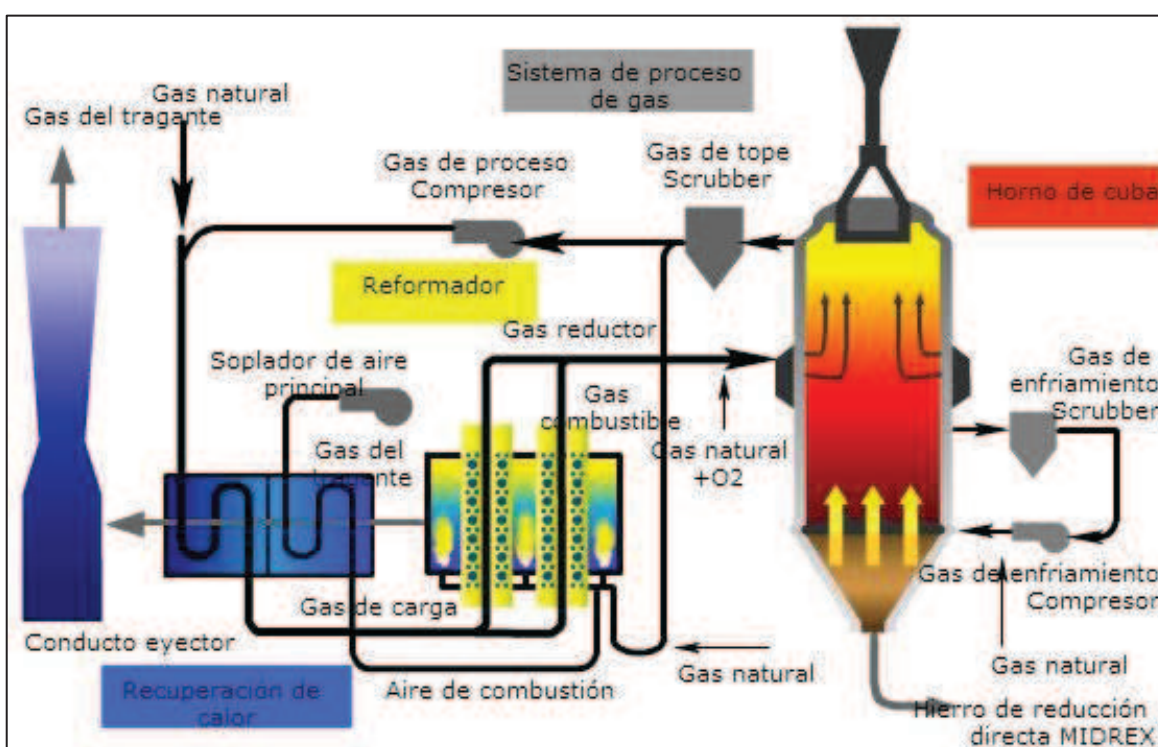
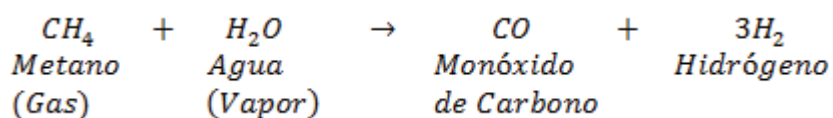


Figura 2. 12. Esquema del proceso MIDREX.<sup>38</sup>

Para el proceso HyL III la reformación catalítica se realiza en base a Níquel, al combinarse el gas natural con vapor antes de ingresar al reformador. Las reacciones químicas que se producen en la reformación del gas natural son:



<sup>38</sup> <http://www.metallics.org.uk/PDF/DRI%20%20Basics.pdf>

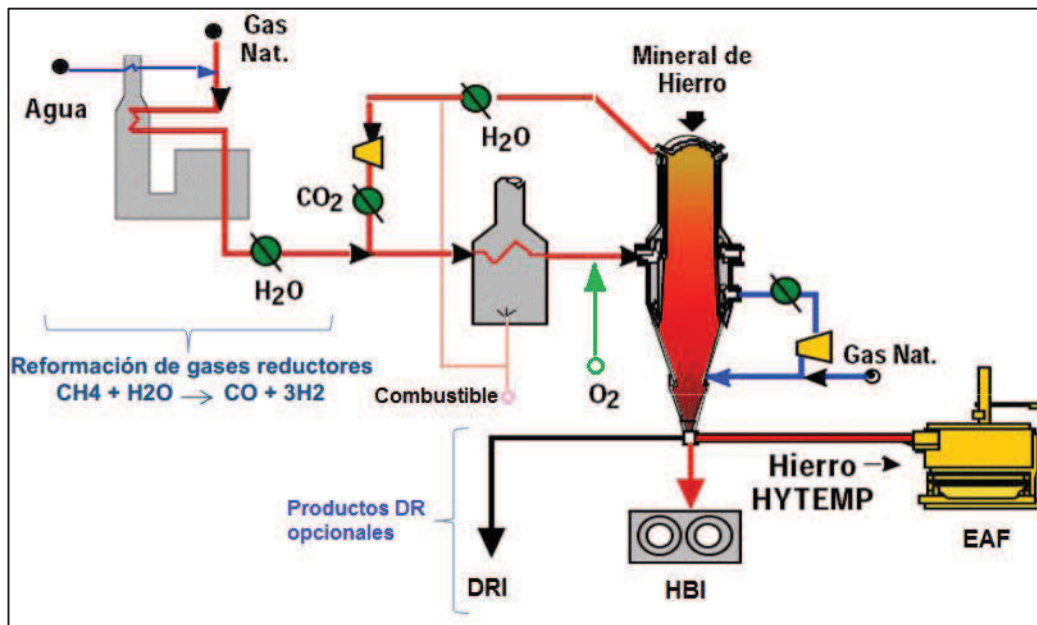
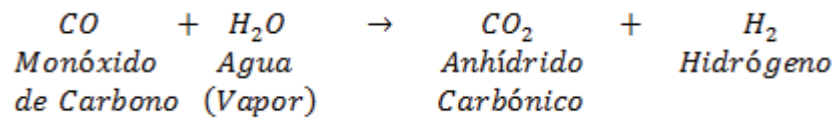
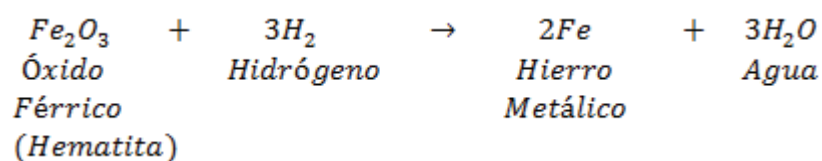


Figura 2. 13. Esquema del proceso HyL.<sup>39</sup>

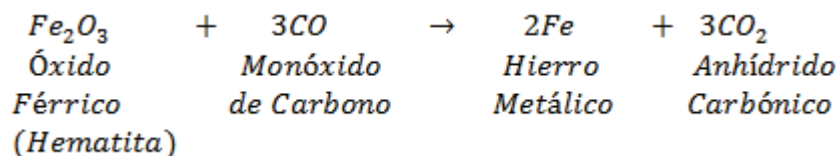
En cuanto al proceso de reducción tanto en el proceso MIDREX como en el HyL III se produce la remoción del oxígeno del mineral. El reactor usado en el MIDREX como en el HyL III es un horno de cuba en el cual el mineral de hierro o los pellets de mineral de hierro descienden por gravedad y el gas reformado asciende en contra corriente produciendo la reducción del mineral. La temperatura del gas reductor es del orden de los 900 °C.

Tanto en el proceso MIDREX como HyL III la metalización que se logra es del orden del 92 %, cuyo consumo calorífico es de sólo 2,5 Gcal/TM en comparación con los sistemas de horno rotatorio a carbón que es del orden de 5 Gcal/TM. Las reacciones químicas que ocurren durante la metalización en el horno de cuba son:



<sup>39</sup> <http://www.metallics.org.uk/PDF/DRI%20%20Basics.pdf>





Una vez concluida la reducción, se obtiene un hierro esponja que presenta ciertos riesgos de ignición espontánea, lo cual implica riesgo en su almacenaje o en el transporte marítimo, razón por la cual se instala a la salida del reactor una briqueteadora en caliente para minimizar dicho riesgo.

### 2.3.2 SIDERURGIA BASADA EN CHATARRA

El envejecimiento de objetos y equipos de acero genera grandes cantidades de chatarra, la cual se viene reciclando por razones económicas y ecológicas.

El cuadro de la figura 2.14 representa esquemáticamente lo procesos que utilizan chatarra para obtener acero líquido.

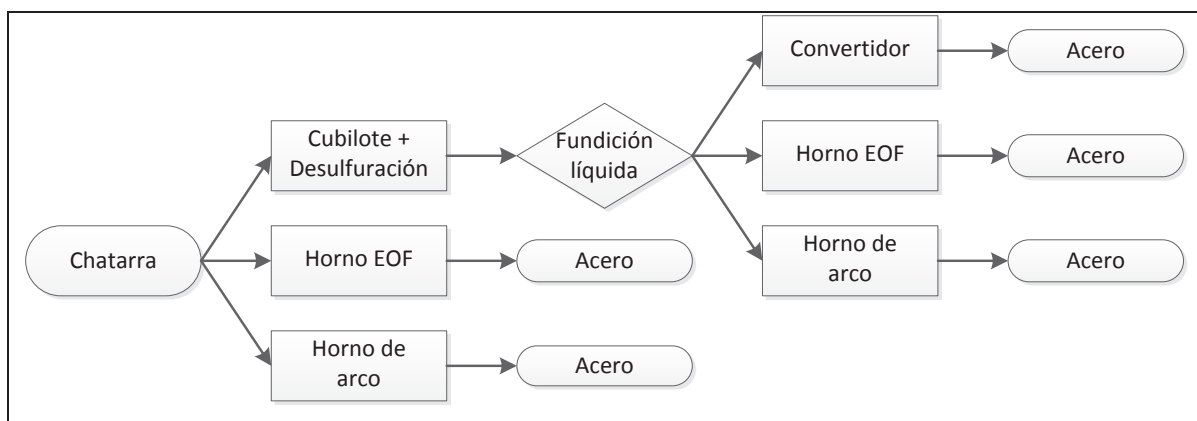


Figura 2. 14. Siderurgia a partir de chatarra.<sup>40</sup>

La primera alternativa consiste en fundir la chatarra en cubilote, desulfurando posteriormente la fundición líquida obtenida. El producto obtenido se pasa a otras unidades para su descarburación y conversión en acero como el horno EOF (Energy Optimizing Furnace) que se encuentra todavía en fase de planta piloto o en horno de reverbero - solera Siemens Martin.

<sup>40</sup> oa.upm.es/1929/1/Aceria\_electrica\_MONO\_2009.pdf

Otra alternativa, y la más utilizada, consiste en fundir la chatarra en horno eléctrico de arco. El acero líquido obtenido se pasa a lo que se denomina “Metalurgia Secundaria” o “en cuchara” donde se ajusta su composición y temperatura mejorando extraordinariamente su calidad.

### 2.3.2.1 Horno de Cubilote

El cubilote consiste en un cilindro vertical recubierto en su interior con material refractario, empleado principalmente en la producción de fundición gris. La carga se realiza por la zona superior con capas de coque, chatarra de hierro y piedra caliza. Para la combustión del coque se inyecta aire que transporta el oxígeno necesario, con unos ventiladores de alta presión, el cual accede al interior por las toberas localizadas en la zona inferior del horno.

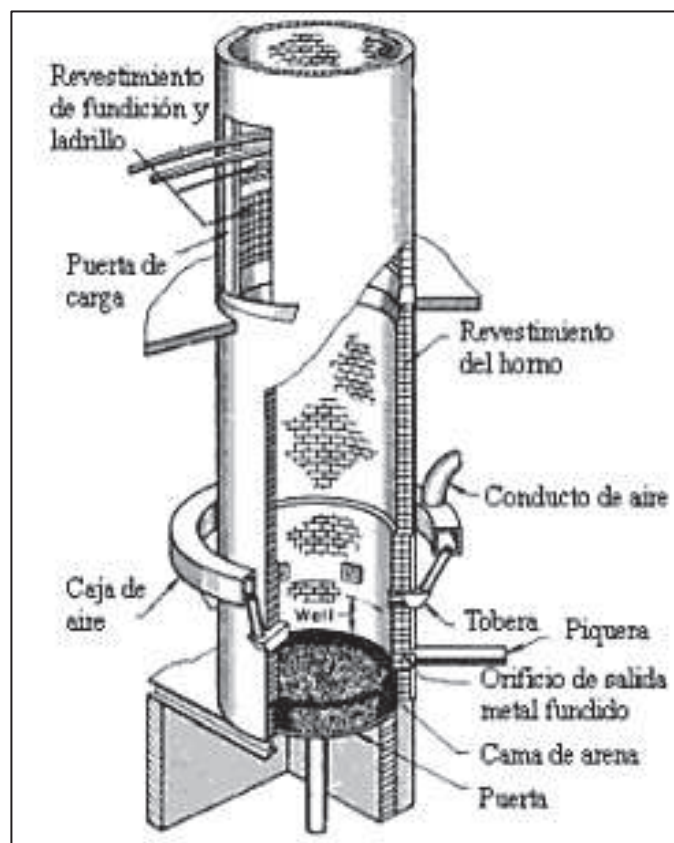


Figura 2. 15. Esquema de la estructura de un cubilote.<sup>41</sup>

<sup>41</sup> Rodríguez, J., Castro, L. y Del Real, J. Procesos industriales para materiales metálicos. Madrid: EDITORIAL VISION NET. Pág. 155.

El cubilote del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica está formado por una envoltura cilíndrica de lámina de acero soldada, envuelta en parte por la cámara de viento, por la que pasa el aire enviado por un ventilador para la combustión. Está recubierto internamente con material refractario y constituido en la parte superior por una chimenea y su correspondiente cobertura.

Posee una placa de fondo de acero, la cual a su vez contiene una puerta por la que se descarga el material para realizar la limpieza del horno. Además posee piqueras de sangría y escoria, toberas y un intercambiador de calor que calienta el aire que ingresa a la zona de fusión, el cual utiliza glp para su funcionamiento.

### 2.3.2.2 Zonas del cubilote <sup>42</sup>

El cubilote está dividido en cuatro zonas, bajo el punto de vista de condiciones de servicio. De abajo hacia arriba se tiene:

#### Zona de fusión

Esta zona se extiende desde arriba de las toberas hacia la parte superior del cubilote, a lo largo de una distancia que depende de la altura de la cama del coque y de la velocidad del aire de soplado. Las condiciones más severas se encuentran precisamente arriba de las toberas, en donde tiene lugar la oxidación del hierro y de otros elementos, y el ataque de la escoria es más destructivo. La penetración del aire soplado en el coque tanto enfrente como arriba del nivel de las toberas afecta el ataque al refractario. La condición es, por lo general, más severa en cubilotes de tamaño reducido.

#### Crisol o solera

La temperatura es 150 o 200 °C más baja que la de la zona de fusión, y el revestimiento está en contacto únicamente con metal fundido, escoria, y coque relativamente estático, de modo que los efectos de la temperatura y de la abrasión no son graves.

---

<sup>42</sup> American Society Foundrymen's (1974). El Horno de Cubilote y su Operación. México: Continental. Pág. 73-75

### 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 el impacto de la operación de carga como por la fricción de la carga sólida en su movimiento descendente. En esta zona a veces ocurre una forma de desintegración, que es causada por un depósito gradual de carbón en las porosidades de los refractarios, como resultado de la descomposición catalítica del monóxido de carbono en presencia de hierro a unos 510 °C.

### Zona superior a la puerta de carga

Arriba de la puerta de carga, las condiciones no son severas, siendo la función del revestimiento meramente la de proteger a la coraza del calor de los gases que suben por la chimenea.

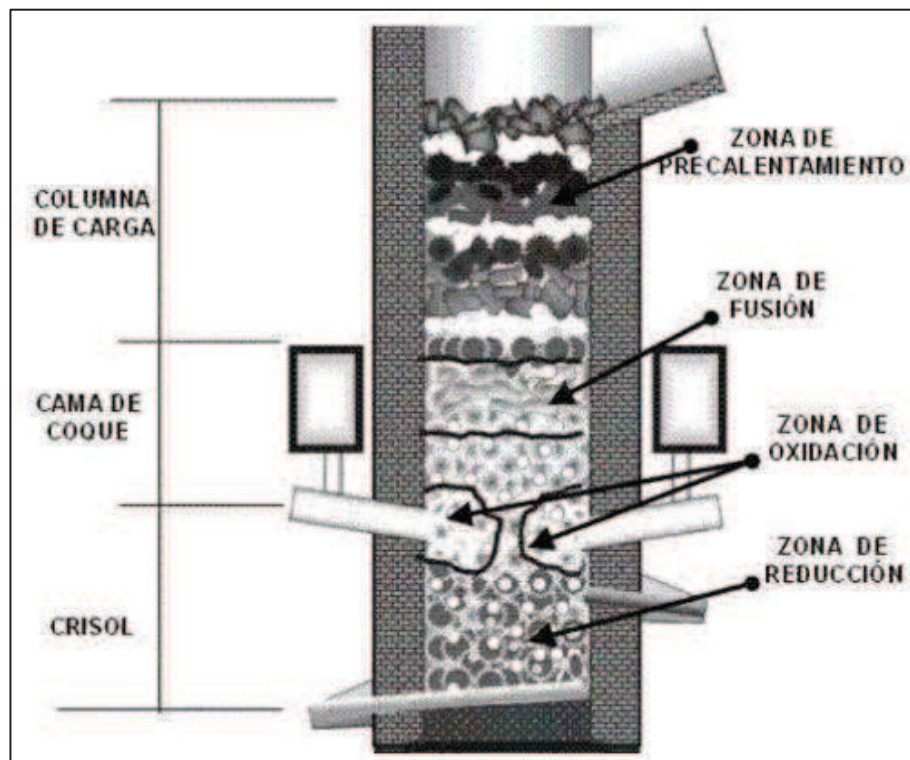


Figura 2. 16. Localización de las zonas en el cubilote.<sup>43</sup>

<sup>43</sup> [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302006000200006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302006000200006&script=sci_arttext)

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen las características de los materiales y equipos empleados para realizar la reducción de las arenas ferruginosas, describiendo su elaboración y especificaciones. A continuación, se precisan los ensayos realizados, donde se establecen las diferentes configuraciones para el adecuado aprovechamiento de las arenas. Seguidamente se particulariza los procedimientos experimentales de reducción en función de las características de la materia prima y de los recursos disponibles.

#### 3.1 MATERIALES

##### 3.1.1 ARENAS NEGRAS

Las arenas negras suministradas por FUNGEOMINE se componen básicamente de magnetita, ilmenita y hematita. En la figura 3.1 se indica el lugar de extracción de las muestras de arenas negras.



Figura 3. 1. Sitio de extracción.

Uno de los componentes de las arenas ferruginosas es la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), este compuesto es un óxido que contiene hierro y titanio, específicamente Fe 36,8 %, Ti 31,6 % y O 31,6 % para la fórmula estequiométrica. Es un mineral de color negro y duro, frecuentemente asociado con la magnetita debido a que se localizan en depósitos similares formados bajo las mismas condiciones; sin embargo la ilmenita no es un material magnético. Es muy común que los dos minerales cristalicen juntos en agregados.

Se escogió un lugar adecuado donde se recoge una serie de muestras, se puede observar en la figura 3.2 claramente la diferencia entre las arenas ferruginosas que presentan una coloración particularmente brillante y la arena común con una coloración de tono café.



Figura 3. 2. Lugar de recolección de muestras.

Las arenas se presentan en forma de cristales normalmente muy finos alrededor de la malla 200, son de forma tubular delgada y tienen ciertas truncaduras romboédricas.

En la tabla 3.1 se resume las principales propiedades de la ilmenita.

Tabla 3. 1. Propiedades de la ilmenita.

ILMENITA	
Categoría	Minerales Óxidos
Color	Negro
Brillo	Metálico a submetálico
Transparencia	Opaco
Sistema cristalino	Hexagonal
Dureza	5,5 – 6,5 (Mohs)
Densidad	4.7 g/cm <sup>3</sup>
Propiedades ópticas	Anisotropismo marcado
Solubilidad	Ácido sulfúrico
Magnetismo	Débil

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez.

La ilmenita puede contener cantidades limitadas de óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), menos del 6 % en peso, a temperaturas ordinarias. Sin embargo, existe una solución sólida completa entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{FeTiO}_3$ , por encima de 950 °C.

Otro componente importante de las arenas ferruginosas que se destaca en las muestras obtenidas es la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), es un óxido de hierro constituido por Fe 72,49 % y O 27,69 %, es una mena del hierro caracterizada principalmente, por su fuerte magnetismo, su color negro y su dureza. Usualmente forma grandes masas de mineral, dichas masas muy titaníferas. En la tabla 3.2 se indica sus principales propiedades físicas.

Tabla 3. 2. Propiedades de la magnetita.

MAGNETITA	
Categoría	Minerales Óxidos
Color	Negro
Brillo	Metálico
Transparencia	Opaco
Sistema cristalino	Isométrico

Tabla 3.2. Continuación.

MAGNETITA	
Fractura	Concoidea irregular
Dureza	6 – 6,5 (Mohs)
Densidad	5,2 g/cm <sup>3</sup>
Propiedades ópticas	Anisotropismo marcado
Tenacidad	Quebradiza
Magnetismo	Fuerte

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez.

En los siguientes apartados se describirá la preparación de las arenas ferruginosas, previo a su utilización en los hornos con la finalidad de que dichas arenas presenten las características adecuadas y sean aprovechadas totalmente.

### 3.1.1.1 Tamizado

Ciertas muestras de arena presentan una serie de impurezas, y no son adecuadas para el proceso de preparación de las arenas, por lo tanto se realiza la depuración de las arenas, se emplea el tamizado para la eliminación de ciertos sólidos de gran tamaño en una primera fase, mediante tamices que presentan cada vez menor tamaño de malla se obtiene una arena más adecuada para el estudio. La filtración de sólidos mediante el tamizado supone una economía clara frente a los procesos de decantación con o sin reactivos.



Figura 3. 3. Muestra de arena extraída de la playa.



Se utilizó ciertos tamices para realizar este proceso, estos se indican a continuación:

Tabla 3. 3. Medidas de tamices.

NÚMERO	APERTURA	
	µm	in
40	420	0,0165
50	300	0,0117
70	210	0,0083

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez



Figura 3. 4. Instrumentos de tamizado.

El objetivo de este tamizado es retener los sólidos de mayor tamaño, principalmente restos orgánicos. Entonces, las muestras de arena se depuran cualitativamente por intervalos de tiempo de diez minutos en cada tamiz, dependiendo del tamaño de los restos.

En el primer tamiz se observa que se retienen los materiales de mayor tamaño, lo que implica que dicho tamiz presente la mayor acumulación de impurezas. En el siguiente tamiz se puede observar muestras de restos orgánicos de menor tamaño. Finalmente en el último tamiz, el más fino de los utilizados, únicamente se retienen ciertos residuos muy finos y en una baja proporción, por lo tanto

requiere un periodo de tiempo prolongado para separar ciertos residuos indeseables.

En la figura 3.5 se indican los resultados obtenidos luego de finalizar el cernido de una muestra tomada.

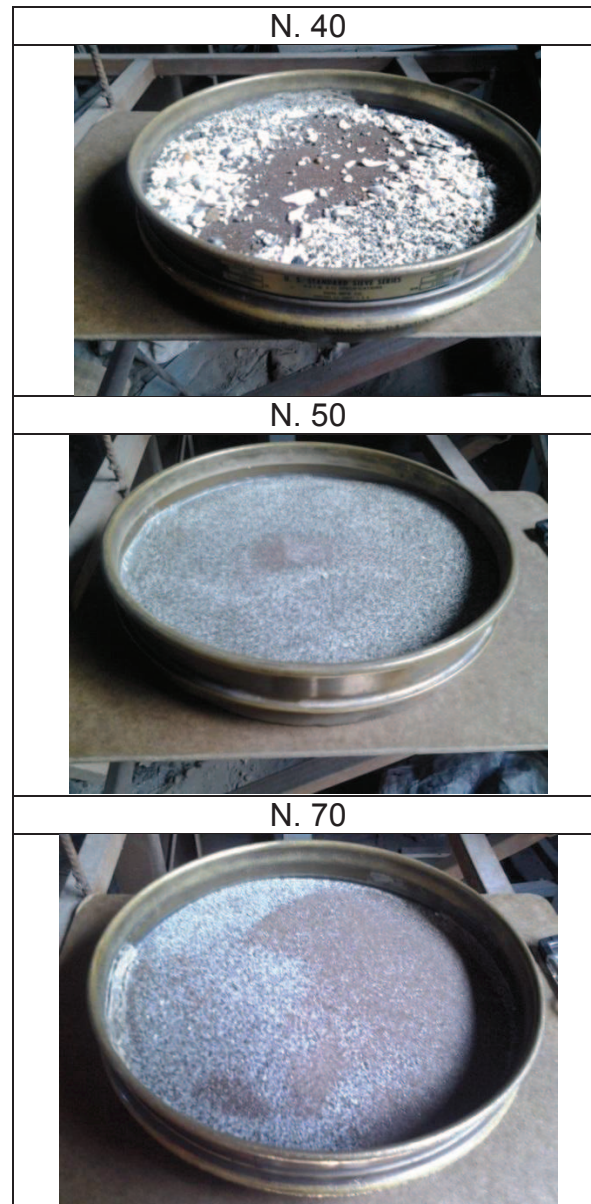


Figura 3. 5. Resultados de muestras tamizadas.

En general, las muestras de arena tomadas del centro de acopio no presentan impurezas de tamaño considerable o restos orgánicos, mientras que en la playa hay ciertos sectores que presentan una mayor proporción de estas

fragmentaciones, por lo que se infiere que se debe seleccionar adecuadamente el sitio de recolección para evitar periodos prolongados de tamizado.

### 3.1.1.2 Secado

El secado es un proceso de preparación de una materia prima, ya sea para la elaboración previa a un proceso o para el acabado de producto, en el presente estudio se utilizó para ambos propósitos.

La muestra de arena extraída de la playa presenta un determinado grado de humedad, siendo relevante para el estudio debido a las siguientes implicaciones: en la separación magnética la muestra húmeda presenta cierto grado de cohesión lo que dificulta la atracción del material magnético, en el proceso de aglomeración permite una mezcla homogénea y consecuentemente deriva en una razón proporcional de aglomerante y arena.

Para determinar el contenido de humedad total en la arena se somete una muestra a un proceso de secado y se compara su masa antes y después del mismo. Este procedimiento es asequible y práctico, siendo válido para los fines que se ha planteado.

Se calcula el contenido de humedad a través de la siguiente fórmula:

$$H \% = \frac{M_h - M_s}{M_h} \times 100$$

Dónde:

$H$  = humedad de la muestra

$M_h$  = masa de la muestra húmeda

$M_s$  = masa de la muestra seca



Figura 3. 6. Medición de la masa de muestra de arena.

El proceso se inició retirando la humedad de 27,67 Kg de arena negra en la mufla, a una temperatura de 150 °C durante doce horas, se aplican estas condiciones debido a la masa empleada y acorde a la observación de las propiedades cualitativas de la arena requerida. La temperatura fue cuidadosamente controlada mediante un pirómetro, se estabilizó en 150 °C luego de dos horas y se mantuvo constante hasta terminar el secado, para asegurar que no se presente ningún cambio en la composición de la arena.



Figura 3. 7. Secado de arena en la mufla.

Entonces el contenido de humedad promedio se cuantificó mediante la medición de la masa antes y después del secado.

$$H = \frac{27,67 - 26,8}{27,67} \times 100$$

$$H = 3,14 \%$$

Esta humedad promedio está representada por una pérdida de peso de 0,87 Kg. Es una humedad relativamente baja debido a que estas arenas han sido almacenadas previamente en un centro de acopio donde son secadas naturalmente al aire libre.

El procedimiento utilizado se encuentra detallado en los instructivos tecnológicos en el Anexo 2 correspondiente.

### 3.1.1.3 Concentración

Se concentró la arena con el fin de obtener el mayor porcentaje de magnetita y hematita debido a sus propiedades magnéticas inherentes, de tal manera que se reduzca al mínimo la ganga presente.

Se realiza una prueba con una muestra de arena que permite cuantificar el porcentaje presente de material magnético, se establece una determinada cantidad de arena y se le aplica un campo magnético, de acuerdo a la diferencia de medidas cuantificadas, se indica el porcentaje de materia prima magnética.

Se aplicaron dos medios de concentración, un yugo magnético y un imán artificial permanente circular como se indica en la figura 3.8.



Figura 3. 8. Medios de separación magnética.

Los resultados de la concentración fueron cuantificados según la siguiente fórmula.

$$M_m \% = \frac{M_{ma} - M_d}{M_d} \times 100$$

Dónde:

$M_m$  = porcentaje de la masa magnética

$M_{ma}$  = masa de la muestra magnética

$M_d$  = masa de la muestra no magnética

En la tabla 3.4, se indican los resultados de las pruebas de separación magnética realizadas.

Tabla 3. 4. Pruebas de separación magnética.

MEDIO DE CONCENTRACION	CANTIDAD INICIAL (g)	CANTIDAD MAGNETICA (%)	CANTIDAD NO MAGNETICA (%)
Yugo magnético	100	30	70
Imanes	100	70	30

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez.

De estos medios de concentración resultó más eficiente el uso de los imanes permanentes, debido a que se evita el precalentamiento y la masa magnética es mucho mayor que con el uso del yugo magnético. Esto se debe a la heterogeneidad de la superficie que presentan estos imanes, la cual al ser mayor que la del yugo magnético, genera un incremento del gradiente del campo magnético. Es decir, se induce un alto gradiente donde las líneas de fuerza convergen.



Figura 3. 9. Separación magnética con diferentes medios.

#### 3.1.1.4 Aglomerado

En la aglomeración de las arenas se realizan básicamente dos procesos: pelletización y briqueteado. La obtención del aglomerado final en formas aproximadamente esféricas exige en general dos etapas: una de conformación y otra de consolidación de la forma obtenida. Entendiéndose por consolidación el proceso que confiere a dichas formas, resistencia a la compresión, al choque y a la abrasión.

Estas formas esféricas pueden ser consolidadas mediante aditivos fraguantes o polimerizantes; también es posible consolidarlas por un efecto de recristalización, utilizando altas temperaturas, o por medio de la aparición de fases fundidas que después solidifican.

Se aplicó ciertos métodos de aglomeración, donde los más adecuados fueron los procesos de aglomeración con melaza y con silicato de sodio.

El proceso con melaza, se realizó con una mezcla de melaza y agua en una relación 2:1 aplicada directamente sobre la arena y moldeada manualmente, luego es secada de manera natural al aire libre con una temperatura ambiental media de 24 °C por una hora aproximadamente.

La mezcla es muy susceptible a la absorción de humedad, por tanto debe ser utilizada a la brevedad posible para evitar que se deformen los pellets y disminuyan notablemente sus propiedades mecánicas; en condiciones libres de humedad estos pellets presentan consistencia adecuada. En la figura 3.10 se indica una muestra de pellets realizado con melaza.



Figura 3. 10. Pellets de arena con melaza.

El segundo tipo de aglomerante utilizado es silicato de sodio líquido (densidad =  $2,2 \text{ gr/cm}^3$ ), suministrado por la empresa PROQUIANDINOS S.A., mediante su canal de ventas QUIMICOTIENDA. Luego de varias pruebas se determinó que la mejor relación de aglomerado arena-silicato es 7:1, obteniéndose pellets de fácil moldeo y buena resistencia.

Posteriormente para garantizar la dureza de los mismos fue necesario acelerar su proceso de secado, utilizando en principio dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pero debido al costo y a la complejidad de su uso por el riesgo ambiental, se optó por introducir los pellets en la mufla a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  durante dos horas y finalmente a un secado lento a temperatura ambiente ( $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ) durante tres horas más.



Figura 3. 11. Pellets de arena con silicato de sodio.

La aglomeración con silicato de sodio proporciona mejores resultados, que a diferencia de la melaza presenta facilidad de moldeo, además de una mayor



resistencia mecánica; adicionalmente este aglomerante resiste altas temperaturas lo que asegura un desenvolvimiento óptimo dentro del horno.

En la tabla 3.5 se indican las cantidades de las mezclas de los pellets obtenidos.

Tabla 3. 5. Pruebas de aglomeración.

AGLOMERANTE	CANTIDAD DE ARENA (g)	CANTIDAD DE AGLOMERANTE (ml)
Melaza	1000	78
Silicato de sodio	1000	65

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez.

Los procedimientos utilizados para la aglomeración se encuentran detallados en los instructivos tecnológicos en el Anexo 2 correspondiente.

Para el proceso de briqueteado se utiliza como aglomerante la melaza con agua en una relación 3:1, mediante la aplicación de presión se conforma dichas briquetas con la consistencia apropiada. Se obtiene briquetas en forma de bloques rectangulares. Al ser elaborados con melaza requieren ser secados durante periodos de tiempo más prolongados, evitando de sobremanera la absorción de humedad, para que dichas briquetas conserven su forma y resistencia.



Figura 3. 12. Briqueta de arena ferruginosa.

### 3.1.2 COQUE

El carbono del coque se mezcla con el oxígeno del aire para formar monóxido de carbono, eliminando el oxígeno presente en el mineral de hierro y liberando finalmente el hierro metálico. El coque utilizado es importado desde Colombia, los mayores productores y exportadores son La Guajira y César.

Para su utilización se procede a fragmentarlo de manera que sea manejable y se pueda cuantificar la masa incluida en la disposición final.



Figura 3. 13. Coque metalúrgico.

### 3.1.3 PIEDRA CALIZA

La caliza es una composición de oxígeno y de calcio. La caliza utilizada para las pruebas de laboratorio tiene una pureza del 98 %, la cual es extraída de la mina de caliza en Selva Alegre en Otavalo y son suministradas por el grupo Lafarge, cuya planta industrial está localizada en el Sector Perugachi, Km 7 ½ en el sector mencionado. Para la utilización de la misma se procede a fragmentarla, para disponer adecuadamente las cargas y cuantificar la cantidad manipulada.



Figura 3. 14. Muestra de caliza.

## 3.2 EQUIPOS

Los equipos deben presentar ciertas características para cumplir el cometido que se ha propuesto, por lo tanto se indica una descripción breve junto a sus especificaciones técnicas.

En primera instancia, se describen los diferentes tipos de hornos de fundición manipulados: los hornos estáticos de crisol fijo calentados a diésel y a gas, el horno de foso y el horno de cubilote. Además se incluye la mufla para el proceso de secado. Posteriormente se indican los principales instrumentos requeridos durante los ensayos de reducción de las arenas.

### 3.2.1 HORNOS

Los hornos que se utilizan presentan diferentes características y cada uno permite realizar distintos ensayos, por lo tanto se indica los principales parámetros de funcionamiento.

Para el presente proyecto se requieren hornos eléctricos ya que estos proporcionan elevadas temperaturas, mayores a 1500 °C. Sin embargo, debido a que no se dispone de este tipo de hornos por su gran capacidad y costo, se realizan los procesos de fundición de las arenas ferruginosas en hornos de combustible tales como hornos de crisol fijo no basculantes (hornos estáticos de crisol fijo) calentados a diésel y gas, horno de foso calentado con aceite quemado y el horno cubilote calentado con combustible sólido (coque).

Según el método de combustión, el rendimiento térmico en la fundición será menor o mayor. Los hornos calentados con gas o aceite tienen mejor rendimiento que los hornos calentados con diésel, pero los crisoles y los refractarios se someten a condiciones más duras por lo que su ciclo de vida se reduce. En cambio en el horno cubilote la carga y el combustible están en íntimo contacto, lo cual implica un intercambio térmico directo y activo, por lo que el rendimiento es elevado.

### 3.2.1.1 Mufla

La mufla es un tipo de horno que consigue temperaturas altas y mantiene dicha temperatura de manera constante, para poder cumplir con una serie de procesos que requieren este tipo de característica dentro de los laboratorios.

Se identificó que el horno de temperatura constante más adecuado, es la mufla del Laboratorio de Fundición que funciona con energía eléctrica, debido a que presenta la capacidad idónea para el secado de la arena necesaria para el estudio.

La mufla presenta los siguientes parámetros de funcionamiento que se indican en la tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Características de la mufla.

MUFLA	
Número de modelo	TG-112
Temperatura máxima	200 °C
Intensidad de corriente	0 – 2 [A]
Voltaje	0 – 200 [V]

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

Se precalienta la mufla por una hora hasta alcanzar la temperatura adecuada y se introduce las muestras de arena en recipientes metálicos por un período de doce horas. En la figura 3.15 se indica la mufla utilizada.



Figura 3. 15. Mufla.

### 3.2.1.2 Horno estático de crisol fijo calentado con diésel

El horno de crisol a diésel del Laboratorio de Fundición contiene un crisol que se coloca en el interior. Entonces el metal se funde en el crisol y con el mismo se lleva mediante pinzas hasta el molde, para colarlo. Otra ventaja de este horno es la limpieza con la que se puede trabajar, ya que al tapar adecuadamente el crisol se pueden separar los gases y las escorias del combustible.

La temperatura que se produce en el interior del horno está alrededor de 1400 °C. La capacidad máxima de este horno son 60 Kg de bronce y 30 Kg de aluminio.



Figura 3. 16. Horno fijo del Laboratorio de Fundición.

### 3.2.1.3 Horno estático de crisol fijo calentado a gas

El funcionamiento del horno de crisol a gas del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica es análogo al tipo de horno anterior, pero con la diferencia de que no posee un quemador de combustible. El aire necesario para producir la combustión se alimenta con un soplador. La temperatura que se produce en el interior del horno está alrededor de 1100 °C. La capacidad máxima de este horno son 9 Kg de aluminio.



Figura 3. 17. Horno de crisol a gas del Laboratorio de Fundición.

La temperatura proporcionada por el horno de crisol a gas del Laboratorio de Fundición no es suficiente para fundir las arenas ferruginosas, razón por la cual se utilizó el horno de crisol a gas de la empresa SERVICIOS MECÁNICOS ubicada en Otavalo.

El horno funciona con tanques de glp de 15 Kg, el cual se alimenta de aire provisto por dos sopladores de 5". El crisol es ubicado en el interior del horno y la capacidad máxima es de 40 Kg de bronce y 20 Kg de aluminio.



Figura 3. 18. Horno de crisol a gas de la empresa SERVICIOS MECÁNICOS.

#### 3.2.1.4 Horno de foso

Un horno de foso, es una fosa vertical por debajo del nivel del piso (con una cubierta) en el cual se ubican los componentes.

El horno utilizado pertenece a la empresa FUNDICIONES ECUADOR ubicada en el barrio La Luz, el cual consta de un cuerpo cilíndrico interno revestido con ladrillo refractario, el combustible suministrado es aceite de motor usado, ubicado en un recipiente el cual se precalienta para mejorar el desempeño del aceite en la combustión.

El comburente es proveído por un soplador eléctrico de aire de 5" y la mezcla aire-combustible se regula mediante una válvula acoplada en el extremo de las tuberías. En la figura 3.19 se indica el soplador y el tanque de combustible.

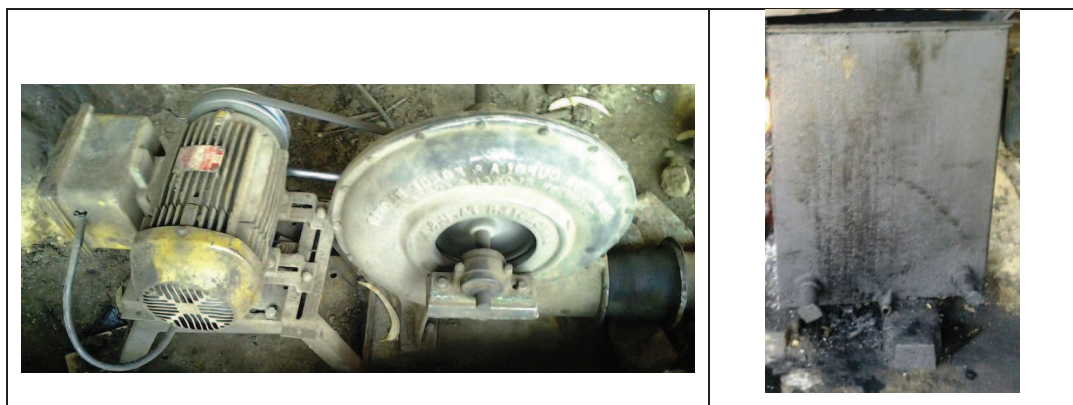


Figura 3. 19. Elementos del horno de foso.

En la figura 3.20 se observa el horno en pleno funcionamiento durante la fundición del hierro gris.



Figura 3. 20. Horno de foso de la empresa FUNDICIONES ECUADOR.

#### **3.2.1.5 Horno de Cubilote**

En la actualidad, la empresa TECNO FUNDICIÓN cuenta con dos hornos cubilotes, uno de ellos se encuentra en proceso de adecuación y tiene una capacidad nominal de 500 Kg/h, el segundo horno está en plena capacidad operativa y tiene una capacidad promedio de 400 Kg/h.

El propósito principal de su uso, es el aprovechamiento de la chatarra de hierro y acero para fabricar partes para maquinaria y accesorios para agua potable como tapas de alcantarillado.

El cubilote de la empresa TECNO FUNDICIÓN consiste en una coraza cilíndrica de lámina de acero soldada revestida internamente con material refractario, rodeada en parte por la cámara de viento. Además está constituido por cuatro soportes en la base y en la parte superior por una chimenea y su correspondiente cobertura.

El cubilote posee un diámetro interior de 600 mm y una altura de 5 m a partir de las piqueras. La producción está dada por las relaciones coque-metal.





Figura 3. 21. Horno de cubilote de la empresa TECNO FUNDICIÓN.

### 3.2.2 INSTRUMENTOS

Para realizar los ensayos propuestos se requiere de ciertos instrumentos con características específicas y de una disposición preliminar para asegurar la precisión durante el proceso.

En la reducción de las arenas en los hornos estáticos de crisol fijo a diésel y a gas, y el horno de foso se producen altas temperaturas, por lo que es necesario el uso de crisoles de grafito de un tamaño y capacidad adecuada para soportar las cargas durante el proceso de fundición. Además se requiere la utilización de un pirómetro para medir la temperatura generada en el interior de los hornos, especialmente en el horno de cubilote, en el cual la fusión dependerá de la uniformidad de la cama de coque.

### 3.2.2.1 Crisol de grafito

Los crisoles de grafito son especialmente diseñados para cada aplicación en específico; el grafito por ser un material con excelentes propiedades antiadherentes, los acabados de los crisoles son lisos facilitando así la reducción de mermas por incrustaciones de material fundido.

El crisol nuevo que se utilizó en las pruebas de laboratorio está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla; con antelación a su uso, éste fue sometido a un proceso de curado, con el fin de evitar su agrietamiento y garantizar su máxima durabilidad.

El proceso de curado se realizó en el Laboratorio de Fundición durante tres días consecutivos en el horno estático de crisol fijo a diésel, calentando progresivamente el crisol vacío hasta que llegue al rojo cereza, alrededor de 900 °C en aproximadamente 45 minutos (temperatura y tiempo en función al tamaño del crisol), y luego dejar enfriar en el interior del horno por un día.



Figura 3. 22. Crisol de grafito.

### 3.2.2.2 Pirómetro

Para el desarrollo de los ensayos se requiere cuantificar de forma precisa los cambios de temperatura, por lo tanto se emplea un pirómetro de alta temperatura, en la figura 3.23 se indica el pirómetro utilizado.



Figura 3. 23 Pirómetro de alta temperatura.

En la siguiente tabla se indica las características principales de dicho pirómetro.

Tabla 3. 7. Características del pirómetro.

TERMÓMETRO INFRARROJO OS524E	
PRECISIÓN	$\pm 1\%$ (2 °C)
RANGOS DE TEMPERATURA	538 a 2482 °C (1000 a 4500 °F)
EMISIVIDAD	De 0,1 a 1 (ajustable)
DISTANCIA PARA MEDIDAS	De 0,9 a 9 m
TIEMPO DE RESPUESTA	100 ms

Elaborado por: Chuquirima M. y L. Cortez

Para el correcto uso del termómetro infrarrojo provisto por el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, se ha considerado el objeto de estudio (pellets de arena negra) y el campo de visión del equipo. La cuantificación de la temperatura puede realizarse desde una distancia mínima de 13 mm hasta una distancia máxima de 25 m, creándose varios diámetros del cono del campo de visión; sin embargo se debe considerar que dicho cono deberá caer dentro de los pellets de arena negra, cuyo diámetro está alrededor de 50 mm.

En el Anexo 3 se muestra un plan operativo de este termómetro infrarrojo, específicamente para la cuantificación de la temperatura en el horno de cubilote

### **3.3 REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS**

En la reducción de las arenas negras se emplea diversos tipos de hornos para identificar el proceso adecuado que permita obtener el mayor aprovechamiento de dichas arenas. Los procedimientos utilizados se detallan en los instructivos tecnológicos en el Anexo 2 correspondiente.

#### **3.3.1 PROCESO CON HORNO ESTÁTICO DE CRISOL FIJO**

##### **3.3.1.1 Proceso con horno de crisol a diésel**

La reducción de las arenas se realizó en un horno fijo a diésel, utilizando coque metalúrgico y piedra caliza. El crisol de grafito utilizado fue de capacidad 6 Kg, que según cálculos para 5 Kg de arena fueron necesarios 0,1 Kg de caliza y 0,35 Kg de coque. Entonces se cargó consecutivamente la arena, la caliza y el coque.

A continuación se llevó dicho crisol al horno fijo. Seguidamente se rodeó el crisol con 1 Kg de coque con la finalidad de aumentar el punto de fusión de las arenas. Finalmente se abrió la válvula de combustible, se encendió el ventilador y el quemador.



Figura 3. 24. Crisol cargado en el interior del horno fijo.

Luego de iniciar la reducción de las arenas, con la ayuda del pirómetro se midió la temperatura en el interior del crisol y a su alrededor, en varios intervalos de tiempo, tal como se muestra en la figura 3.25.



Figura 3. 25. Medición de la temperatura durante el proceso de reducción.

En la siguiente tabla se indica la temperatura que se toma cada cierto intervalo de tiempo.

Tabla 3. 8. Medidas de la temperatura en el crisol.

TIEMPO (min)	TEMPERATURA (°C)	
	Interior del crisol	Alrededor del crisol
16	1100	800
26	1185	900
90	1340	1240
98	1365	1260
111	1370	1265

### 3.3.1.2 Proceso con horno de crisol a gas

Otro horno de fundición empleado para la reducción de las arenas negras fue el horno de crisol a gas de la empresa SERVICIOS MECÁNICOS ubicada en Otavalo.

En el interior del horno se colocó un crisol de capacidad 6 Kg, cargado con 2 Kg de arena y 1 Kg de piedra caliza. A continuación se abrió la válvula de paso del

gas y se encendieron los dos sopladores del horno a más de un tercer soplador con el fin de aumentar la temperatura en el interior del horno.



Figura 3. 26. Horno de crisol a gas en operación.

Luego de una hora y cuarenta y cinco minutos de haber iniciado la reducción de las arenas, no se produjo la reacción, razón por la cual se suministró oxígeno durante quince minutos.



Figura 3. 27. Suministro de oxígeno en el interior del horno.

Al final, luego de dos horas y media se apaga el horno, y se extrae el crisol del interior.



Figura 3. 28. Finalización del proceso con el horno a gas.

### 3.3.2 PROCESO CON HORNO DE FOSO

En este horno se realizó una prueba alterna para identificar el comportamiento de las arenas al incluirlas dentro de una fundición de hierro previa. Se predispone una proporción mínima de arena para la prueba. Como recipiente se utiliza un crisol de grafito curado durante cuatro días. Se dispone de un horno de foso de llama directa, dicho horno funciona con aceite de motor usado, como combustible, el cual es previamente calentado durante un período de una hora con la finalidad de evitar su pulverización.



Figura 3. 29. Horno de foso precalentado.

Se plantea inicialmente 18 Kg de cada material, teniendo en cuenta la reacción que se presente al momento de agregar la porción de arena. Se realiza la fundición de 18 Kg de chatarra de hierro fundido fragmentada, durante dos horas aproximadamente hasta obtener la colada, luego se coloca paquetes de 0,5 Kg de arena y se identifica la reacción producida.

Se observa que al introducir la arena en la colada, se produce una masa viscosa como una pasta. Entonces se mantiene el horno encendido durante cierto intervalo de tiempo para realizar otra observación a la reacción, sin embargo los resultados no variaron, por lo que se procedió a extraer el crisol y verter la colada en un molde preparado previamente.



Figura 3. 30. Vaciado de la colada en el molde.

### 3.3.3 PROCESO CON HORNO CUBILOTE

El horno de cubilote utilizado pertenece a la empresa TECNO FUNDICIÓN, en el cual la arena negra y el coque están en contacto.

Previo a la utilización del horno se plantean los siguientes requerimientos: de dos a tres horas, se limpia el horno de escoria y desechos de coladas anteriores y luego se repara cualquier zona deteriorada con arcilla y arena de sílice. A continuación se cierra la puerta del fondo de la solera y se coloca una capa de arena de moldeo con una pendiente hacia el vertedero.



A continuación se calienta gradualmente mediante la combustión de una cantidad predeterminada de leña en el crisol con la ayuda de gasolina u otro elemento inflamable, para quemar la primera cama de coque la cual debe ser adecuada ya que determina la zona de fusión. Conjuntamente las tapas de las toberas se mantienen abiertas.

Una vez encendida la cama de coque, durante una hora aproximadamente hasta que llega a un color rojo cereza, y que arde fácilmente por las toberas, se comienza a cargar el horno alternadamente con coque, caliza y chatarra. Luego se coloca una segunda carga de coque con caliza y la segunda carga metálica, y así sucesivamente hasta llenar el horno.

Luego de lo cual se comienza el soplado por el ventilador y a los diez minutos aproximadamente, a través de las toberas, se debe observar la caída del metal fundido, el cual se sangra retirando el tapón con una barra metálica.

Esta fundición de hierro gris se realizó para cumplir con la demanda de la empresa. Al terminar dicho proceso se descargó completamente el metal fundido y se procedió a la reducción de las arenas negras. Se empezó colocando una carga de coque (17 Kg) para cumplir con la altura necesaria de la cama, la cual se midió con una barra de medida introducida por la puerta de carga.

A continuación se colocaron consecutivamente las cargas respectivas: 17 Kg de coque, 5 Kg de caliza, 75 Kg de pellets de arena negra, 5 Kg de caliza y 17 Kg de coque, para la primera carga; e inmediatamente se colocó la segunda carga con 75 Kg de pellets de arena negra, 5 Kg de caliza y 17 Kg de coque. Luego se mide la temperatura mediante el pirómetro en la puerta de carga del horno.



Figura 3. 31. Carga de pellets de arena.

Se espera aproximadamente cinco minutos para observar la caída de la arena reducida a través de las toberas, luego se inicia el picado de la masa mediante piquetas metálicas a través de las toberas, con la finalidad de evitar su obstrucción debido a la escoria producida por la carga y enfriada por la corriente de aire. Además se mide la temperatura.



Figura 3. 32. Limpieza de las toberas.

Posteriormente, alrededor de tres minutos se comienza a perforar el orificio de la piqueta de escoriado.



Figura 3. 33. Salida de la arena reducida por la piquera de escoriado.

Después de cinco minutos aproximadamente, la arena reducida se acumula en el crisol y se comienza a sangrar, una vez que se haya retirado el tapón mediante una barra puntiaguda. Consecuentemente se cola el producto en la cayana, se cuantifica la temperatura y se retira la escoria de la superficie, para luego vaciarlo en el molde previsto.



Figura 3. 34. Salida de las arenas reducidas por la piquera de sangrado.

Una vez que se observa que toda la arena se ha reducido, se suspende el soplado y se apaga el horno.

Finalmente, se abre la puerta del fondo de la solera para descargar completamente los residuos de la reducción, que inmediatamente son enfriados bruscamente con agua para evitar que los soportes del horno se destruyan.



Figura 3. 35. Descarga completa del horno de cubilote.

En la tabla 3. 9 se indica la temperatura cuantificada durante la reducción de las arenas, en algunas partes del horno, según el plan operativo para el uso del termómetro infrarrojo OS524E descrito en el Anexo 3.

Tabla 3. 9. Medidas de la temperatura en el horno de cubilote.

MEDICIÓN	PARTE DEL CUBILOTE	DISTANCIA DE MEDICIÓN (m)	TEMPERATURA (°C)	
1	Puerta de carga	3	Antes de colocar las cargas	875
2	Toberas	2	Durante la reducción de las cargas	1681
3	Piquera de sangrado	2	Luego de la reducción de las cargas	1773

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos de los diferentes procesos realizados para la reducción de las arenas ferruginosas. Estos resultados requieren ser cuantificados y evaluados, por lo que se indica de manera sucinta los porcentajes en peso de los productos obtenidos en cada proceso, así como una descripción cualitativa de las arenas reducidas.

#### **4.1 REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS**

Dentro de la industria siderúrgica destaca por su importancia en el ámbito mundial la ruta reducción directa-horno eléctrico para producir acero. En el presente estudio se plantea la reducción de las arenas ferruginosas, se elaboran pellets y se ensayan en diferentes hornos. Los hornos se alimentan con el mineral de hierro pelletizado y el carbón como reductor; en ciertas pruebas se utiliza la caliza como agente desulfurante.

El proceso requiere que la carga dentro del horno se mueva en contracorriente con respecto al gas (gasificación del carbón) que fluye sobre ella. Se introduce aire para quemar el monóxido de carbono que emerge del lecho del horno y provee de esta manera calor para el proceso.

En la etapa inicial, en el horno se realiza el precalentamiento de la carga hasta la temperatura de operación liberándose la mayor parte de los volátiles del carbón llevándose a cabo una parte de la reducción. En el resto del proceso con el aumento de la temperatura del horno se culmina la reducción del mineral, obteniéndose así cierto grado de metalización.

#### 4.1.1 PROCESO CON HORNO ESTATICO DE CRISOL FIJO

##### 4.1.1.1 Proceso con horno de crisol a diésel

El horno de crisol a diésel se utiliza durante un periodo aproximado de dos horas, luego de lo cual se procede a apagar el horno, se extrae el crisol utilizado e inmediatamente se mide la temperatura del interior del crisol, el pirómetro indica una temperatura de 1365 °C.



Figura 4. 1. Extracción del crisol del horno a diésel.

Al momento de la extracción, en el interior del crisol se observa un producto con elevada temperatura pero sin una consistencia uniforme, que al momento de ser vertida se aprecia que no se produjo la reducción de la arena.



Figura 4. 2. Producto del proceso de reducción en horno a diésel.

En la siguiente imagen se indica una muestra del material obtenido luego de que se enfría, se distingue que la mayoría de la arena no presenta cambios perceptibles. Finalmente como resultado de la reducción se obtuvieron 3,5 Kg de arena sin reducirse, lo cual equivale al 70 % de la carga total de arena



Figura 4. 3. Muestra obtenida en el horno fijo a diésel.

#### 4.1.1.2 Proceso con horno de crisol a gas

El horno de crisol a gas utilizado se esgrimió durante dos horas y media, luego de lo cual se apaga y se extrae el crisol, en la figura 4.4 se indica el crisol extraído inmediatamente del horno.



Figura 4. 4. Crisol extraído del horno a gas.

Se procede a extraer el material obtenido, se observa un aparente inicio de la reducción de las arenas en pequeñas muestras que presentan una mayor consistencia, tal como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4. 5. Arena luego del proceso de reducción en horno de crisol a gas.

En la siguiente imagen se observa que el producto obtenido luego de haberse enfriado incluye principalmente pequeñas muestras de material que se presume se generaron al momento de insuflar oxígeno en el interior del horno con lo cual se aumentó la temperatura durante un corto tiempo. Los resultados indican 1 Kg de arena mezclada con caliza, sin fusión, que equivale aproximadamente al 50 %, y 100 g de las muestras aparentemente fundidas.



Figura 4. 6. Muestras obtenidas en el horno a gas.



#### 4.1.2 PROCESO CON HORNO DE FOSO

El proceso con el horno de foso se realiza con la finalidad de observar la reacción producida al incluir arena negra en una fundición de hierro gris, mientras se encuentra en estado líquido, partiendo de la suposición de que la arena pueda ganar el calor generado por la colada y aumente su punto de fusión.

Luego de un período de dos horas se apaga el horno y al revisar el interior del crisol se observa una reacción desfavorable por lo que se extrae el crisol y se deposita en el molde como se indica en la figura 4.7.



Figura 4. 7. Vertido de colada en el molde.

En la parte superior del crisol se encuentra una mezcla heterogénea de arena y colada la cual es previamente extraída fuera del molde, a continuación se vierte el hierro fundido completamente en el molde, en la figura 4.8 se identifica dicha separación.



Figura 4. 8. Hierro fundido y arena.

Luego de que la temperatura descendió en la muestra, se identifica la reacción producida, particularmente una porción con notable disimilitud en su composición global. En la figura 4.9 se observa la disparidad entre el hierro fundido y la arena.



Figura 4. 9. Muestra obtenida en el horno de foso.

#### 4.1.3 PROCESO CON HORNO DE CUBILOTE

La reducción de las arenas en el horno de cubilote se realiza durante el periodo aproximado de cuarenta minutos. Una vez que se ha sangrado toda la arena reducida, se suspende el soplado de aire, se apaga el horno y se descarga completamente abriendo la puerta del fondo de la solera. En la figura 4.10 se observa la descarga de las arenas reducidas.



Figura 4. 10. Descarga de arenas reducidas.

Se descarga las arenas reducidas procedentes del horno de cubilote, se observa un producto relativamente fluido al momento de ser vertido en un orificio destinado para acumular todas las arenas reducidas, cómo se observa en la figura 4.11.



Figura 4. 11. Producto del proceso de reducción en horno de cubilote

Luego de enfriarse todos los productos de la reducción se cuantificaron los resultados, obteniéndose 76,3 Kg de escoria y 4,2 Kg de hierro. En la figura 4.12 se indican muestras de hierro y escoria, respectivamente.



Figura 4. 12. Muestras obtenidas en el horno de cubilote.

## 4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se resumen los resultados obtenidos en cada proceso y se realiza un análisis general. En la tabla 4.1 se indican los resultados de los procesos realizados.

Tabla 4. 1. Resumen de los resultados obtenidos en los procesos realizados.

PROCESO	CARGA INICIAL	CARGA FINAL	% DE ARENA	
			NO REDUCIDA	REDUCIDA
Horno de crisol a diésel	5 Kg de arena 0,1 Kg de caliza 0,35 Kg de coque	3,5 Kg de arena no reducida	70	----
Horno de crisol a gas	2 Kg de arena 1 Kg de caliza	1 Kg de arena mezclada con caliza 100 g de fragmentos de arena reducida	50	----
Horno de foso	18 Kg de hierro fundido 1 Kg de arena	1 Kg de masa sólida con cierto porcentaje de hierro fundido	----	----
Horno de cubilote	150 Kg de pellets de arena 15 Kg de caliza 68 Kg de coque	76,3 Kg de escoria 4,2 Kg de hierro	---	50,8

Como se observa en la tabla anterior, tanto en el proceso con horno de crisol a diésel como a gas se obtuvo 70 % y 50 % de las cargas iniciales de arena negra, respectivamente, los porcentajes de arena restantes durante cada proceso se desaprovecharon al mezclarse con los otros elementos iniciales de las cargas.

En el proceso realizado en el horno de foso no se pudo cuantificar el porcentaje del producto obtenido ya que se presume que en este se produjo la mezcla entre la arena y el hierro fundido. Mientras que, en el proceso de reducción en el horno de cubilote, de acuerdo a la materia prima empleada en el proceso de reducción y

las muestras recolectadas posteriormente, se infiere un rendimiento del proceso de alrededor de  $\eta = 50 \%$ .

Después de la revisión de los procesos efectuados, se identifica el proceso idóneo para la reducción de las arenas, particularmente el proceso realizado en el horno de cubilote que permite obtener ciertas muestras de arena reducida, por tanto se realiza una serie de pruebas en dicho horno. Se realiza ciertos análisis de las muestras más adecuadas.

Los ensayos metalográficos se realizaron en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Los resultados se resumen en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Metalografías de la muestra metálica.

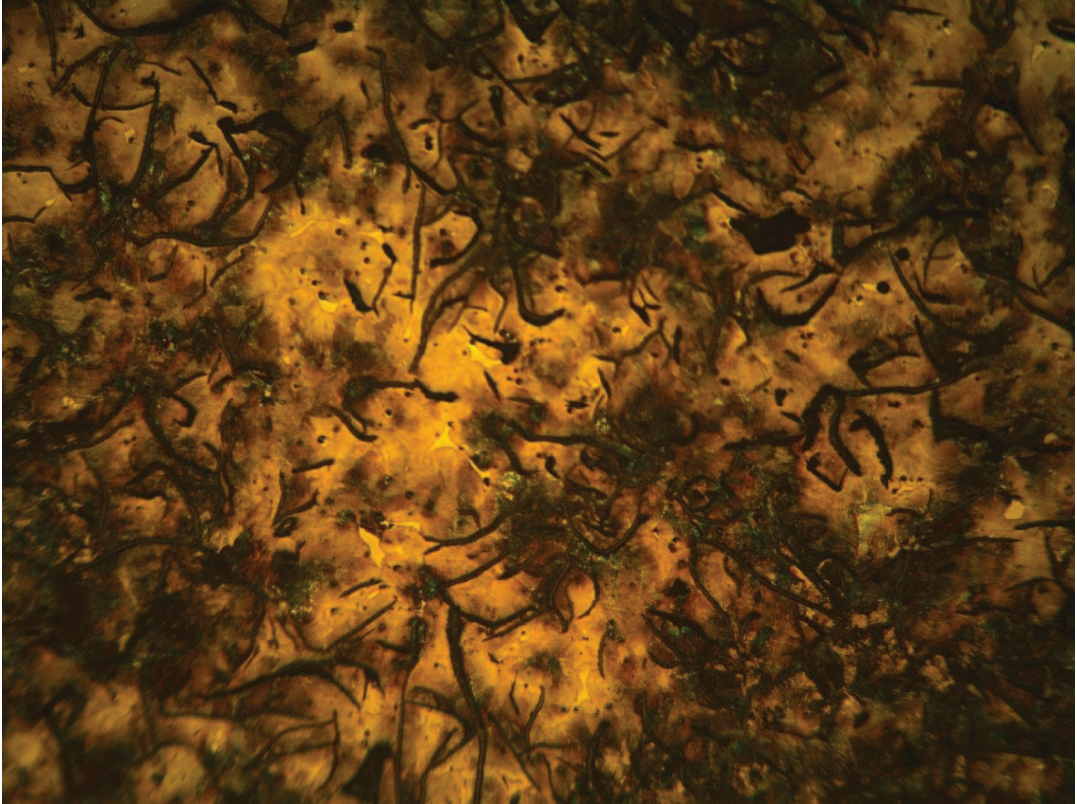
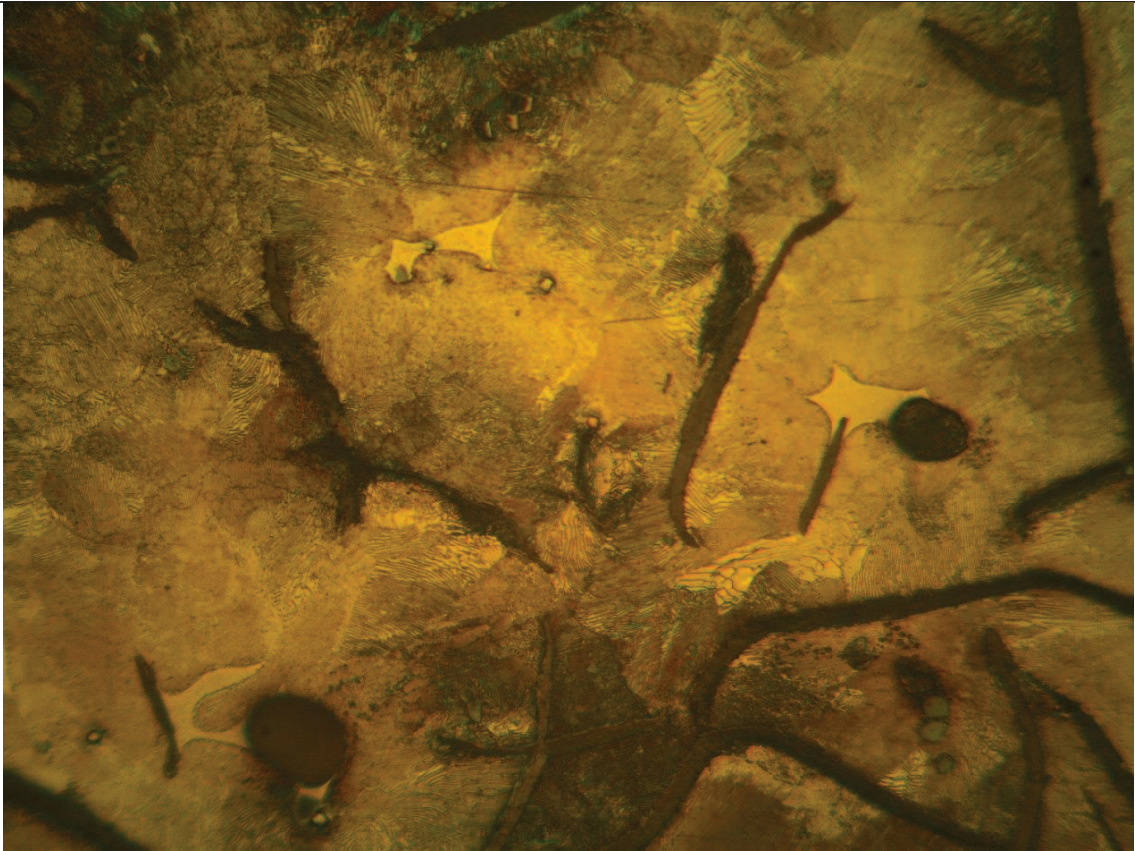



	
Reactivo: Sin ataque	Aumento: 100x
INTERPRETACIÓN	
Fundición gris. Grafito, tamaño 3, tipo A, forma VII.	

Tabla 4. 2. Continuación.

	
Reactivo: Nital 2 %	Aumento: 500x
INTERPRETACIÓN	
Matriz ferrítica-perlítica.	

Se realiza una prueba de tratamiento de hierro por el método de Absorción Atómica en el Laboratorio de Química-Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador. Los resultados se resumen en la tabla 4.3.


Tabla 4. 3. Resultados del tratamiento de hierro.

ID.	IMAGEN	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Escoria densa		9,12
Escoria poca densa		10,79
Escoria esponjosa		10,24

Como se observa, los valores obtenidos para las tres muestras son relativamente similares, 10 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promedio.


A continuación, se realiza el análisis por Espectrometría de Chispa en el Departamento de metalurgia extractiva (DEMEX) de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. Los resultados se resumen en la tabla 4.4.

Tabla 4. 4. Resultados por Espectrometría de Chispa.

ID.	IMAGEN	% ELEMENTOS
Muestra metálica		2,327 Carbono 0,164 Silicio 0,049 Manganeso 0,038 Azufre 0,002 Fósforo 96,85 Hierro

Finalmente, se realiza el análisis químico semicuantitativo por Microscopía Electrónica de Barrido con microanálisis de Rayos X en el Departamento de metalurgia extractiva (DEMEX). Los resultados se resumen en la tabla 4.5.

Tabla 4. 5. Resultados por Microscopía Electrónica de Barrido.

ID.	IMAGEN	% ELEMENTOS
Escoria Esponjosa		28,4 Hierro 14,1 Calcio 9,3 Titanio 8,3 Silicio 4,1 Magnesio 2,2 Aluminio 1,2 Sodio

Los informes emitidos se encuentran documentados en el Anexo 4.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- El estudio de factibilidad de la obtención de metal de hierro a partir de las arenas ferruginosas de la concesión minera OSTIONAL 1 en Mompiche - Esmeraldas, se realiza conforme a la premisa de que dichas arenas presentan un alto porcentaje de óxido de hierro, según los análisis químicos realizados por FUNGEOMINE.
- Se realizaron algunos instructivos tecnológicos, tanto de la preparación previa de las arenas, que incluyen: tamizado, secado, concentrado y aglomerado en forma de pellets; como de los procesos de reducción empleados, en hornos de crisol a diésel y a gas, horno de foso y horno de cubilote. Los instructivos detallan las operaciones realizadas durante este estudio y aportan significativamente para posteriores investigaciones.
- Luego de una serie de ensayos, se identificó que el secado previo coayuda a un moldeo más asequible junto al aglomerante adecuado, silicato de sodio, otorgando mayor resistencia y dureza a los pellets, incluyendo su capacidad para soportar altas temperaturas durante el proceso de reducción de las arenas negras.
- Se evaluaron varios hornos de fundición, en función de las características de las arenas negras y de los recursos disponibles; aplicando el principio de la obtención de hierro fundido basado en el mineral, particularmente el proceso de reducción directa, extrapolado a las arenas; y, se experimenta con hornos de combustible tales como hornos estáticos de crisol fijo calentados a diésel y gas, horno de foso calentado con aceite usado de motor y el horno de cubilote; con éste último se consiguió la reducción de las arenas, obteniéndose un alto porcentaje de escoria.

- Para la reducción de las arenas, a partir de hornos estáticos de crisol fijo calentados a diésel y a gas, no se consiguió la reducción de las arenas, además de que se perdió 30 % y 50 % de la carga total de arena, respectivamente. Esto se debe esencialmente a que no se logró una temperatura adecuada para conseguir la separación de las partículas de óxidos de hierro y óxido de titanio.
- En la reducción de las arenas negras en el horno de cubilote, se obtuvieron 76,3 Kg de escoria y 4,2 Kg de hierro. Los análisis de las escorias por el método de absorción atómica y análisis químico semicuantitativo (MEB) indican un promedio de 10 % de óxido de hierro y 28,4 % de hierro, respectivamente; mientras que en las metalografías y el análisis por Espectrometría de Chispa de la muestra metálica indican una fundición gris. La fundición obtenida se debe posiblemente a que quedaron restos de hierro fundido de las cargas anteriores, previas a la reducción de las arenas negras.
- El presente proyecto ha sido un primer paso para diversificar la aplicación de las arenas negras del recinto Mompiche en la Provincia de Esmeraldas. Los resultados obtenidos indican que los hornos fijos de combustible requieren condiciones controladas apropiadas y ciertas adecuaciones que representan costos adicionales en los procesos de reducción.
- Al realizar la relación porcentual entre la carga inicial de pellets de arena negra (150 Kg con 48 % de óxidos de hierro y 52 % de ilmenita), el producto final obtenido (76,3 Kg escoria), y el porcentaje de hierro presente en la escoria (28,4 %) que indica el análisis químico por MEB, se infiere aproximadamente 15 % de hierro metálico obtenido en la reducción. Dicho porcentaje es relativamente bajo debido a que se requieren otros procesos de reducción en hornos de mayor temperatura, debido a que el punto de fusión del titanio está alrededor de 1700 °C.

- Las reacciones entre el carbono y las partículas de óxido de hierro comienzan sólo en los puntos de contacto, y quedan interrumpidos una vez que el hierro metálico se forma como una fase intermedia. A partir de entonces, la reducción puede proceder sólo por la difusión de los átomos de carbono a través de la capa de hierro metálico en el óxido residual. Por lo tanto, en los procesos de reducción directa basados en reductores sólidos, es esencial la dosificación adecuada del carbono y convertirlo completamente en un gas reductor, este proceso aplicado de forma adecuada genera un grado de metalización mayor al 70 %.
- Debido a la termodinámica de las reacciones de reducción directa, a sus relaciones de equilibrio y a que la mayoría de estas reacciones son endotérmicas, es necesario operar los procesos a temperaturas elevadas entre 600 °C y 1100 °C. Entre mayor sea la temperatura de operación de un proceso de reducción directa, se tendrá una mayor velocidad de reacción, y por lo tanto, una mayor productividad del proceso, por lo que se decide utilizar el horno de cubilote debido a las altas temperaturas que provee.
- La reducibilidad del mineral, es la facilidad de los óxidos de hierro del mineral para ceder oxígeno por la acción de los elementos reductores. La reducibilidad depende del proceso empleado, de su temperatura de operación y de la composición del gas reductor. Es fundamental, que en base a las características del mineral se determinen las condiciones de operación del proceso.
- La resistencia de los pellets se encuentra influenciada por la distribución del material sólido y la distribución de los poros. En general, si la materia prima es porosa presenta mayor reducibilidad que los no porosos, debido a que son más permeables a los gases reductores y proporcionan un mayor porcentaje de reducción en un periodo menor, de tal manera que se incrementa la velocidad del proceso y por lo tanto la productividad.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- La franja costera del Ecuador alberga grandes reservas de arenas negras que se depositan continuamente de manera natural, los análisis químicos realizados en los últimos años señalan altos porcentajes de titanio, por lo que se recomienda realizar un estudio complementario para aprovechar las diversas aplicaciones del titanio en la industria.
- No se aconseja utilizar procesos químicos de descomposición de los óxidos presentes en las arenas, como el método de Kroll para el refinado de titanio, ya que implican gastos onerosos y resulta difícil de implementar en el país, debido a que requiere grandes volúmenes de materia prima e involucra una serie de profesionales altamente calificados, sin mencionar que su procesamiento es relativamente lento.
- Se debe seleccionar adecuadamente el emplazamiento para la recolección de las muestras, con el fin de disminuir el tiempo de tamizado.
- Los instructivos tecnológicos son guías detalladas del procedimiento aplicado, los cuales pueden ser utilizados para producir ensayos similares, siempre y cuando sean aplicados y extrapolados adecuadamente para generar resultados satisfactorios.
- El horno de cubilote debe ser precalentado adecuadamente con el propósito de impedir la pérdida de temperatura causada por condiciones climáticas adversas, y generar la máxima temperatura para evitar que se produzca una masa sólida en la caja de aire y lograr la reducción total de las arenas negras.
- La cuantificación de las cargas debe ser adecuada de tal manera que se produzca la reacción requerida en la reducción de la arena. Una de ellas, la carga de caliza debe ser tal que mantenga la escoria fluyendo libremente.

- La escoria obtenida en el presente proyecto presenta un porcentaje de hierro considerable, el cual podría ser mayor si se ensayan las arenas ferruginosas en hornos de elevada temperatura, en los cuales se logre mediante fusión la separación de los metales implícitos en la composición de las arenas.
- El titanio y el hierro se encuentran mezclados como moléculas, es por ello que su separación resulta compleja, siendo necesario una elevada temperatura, mayor a 1700 °C, punto aproximado de fusión del titanio, la cual se puede conseguir en hornos eléctricos, o en un alto horno, en el cual su altura implica una gran eficiencia en la reducción del mineral de hierro.
- Para la planificación de una planta con mayor proyección se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros: capacidad a instalarse, la disponibilidad de agentes reductores (carbón coquizable, gas natural, hidrocarburos) y la disponibilidad de minerales.
- En general, resulta más económica la ruta del alto horno cuando la capacidad a instalarse es superior a los dos millones de toneladas por año, quedando esto condicionado por la disponibilidad de carbón coquizable, por otra parte, cuando la capacidad a instalarse es pequeña resulta más económica la ruta de reducción directa.
- La obtención de hierro esponja no depende únicamente del tipo de proceso y de sus condiciones de operación, sino también, depende en gran parte de las características especiales del mineral alimentado al proceso. Entre los procesos de reducción directa aplicables a las arenas ferruginosas se recomienda el Midrex por proveer un elevado grado de metalización y su capacidad productiva superior.
- Se recomienda ensayar las arenas ferruginosas mediante el procedimiento Midrex de Reducción Directa, en el cual no se llega a producir la fusión de las cargas sino que se obtienen prerreducidos o hierro esponja con un alto

grado de metalización (contenido de hierro metálico de 92 % a 96 %) por acción del gas reductor (CO y H<sub>2</sub>).

- En la actualidad, las rutas para obtener hierro son: alto horno-convertidor de oxígeno y reducción directa-horno de arco eléctrico, debido a las condiciones de desarrollo del país, se recomienda la reducción directa debido principalmente a que el suministro de materia prima es limitado y por ser un proceso que requiere menor inversión, en comparación al alto horno.

## BIBLIOGRAFÍA

- BERNAU, R.; Elementos de metalografía y de acero al carbono; Editorial Andrés Bello; Primera edición; Chile; 2000.
- FALK, GOCKEL; Metalotecnia fundamental; Editorial Reverte; Primera edición; España, 1989.
- ABRIL, E.; Metalurgia técnica y fundición; Editorial Alsina; Primera edición, 1985
- PEZZANO, P.; Siderurgia; Segunda edición; Tecnibook; España; 1986.
- AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN'S. El Horno de Cubilote y su Operación. Continental; México; 1974.
- ENRÍQUEZ, J., TREMPES, E., FERNÁNDEZ, D.; Acería Eléctrica; Universidad Politécnica de Madrid; España; 2009.
- GEERDES, M., TOXOPEUS, H., VAN DER VLIET, C.; Modern Blast Furnace Ironmaking: An introduction; Amsterdam; 2009.
- KALPAKJIAN, S., SCHMID, S.; Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Pearson Educación; México; 2002.
- RODRÍGUEZ, J., CASTRO, L. Y DEL REAL, J.; Procesos industriales para materiales metálicos; Editorial Vision Net; España; 2006.
- CHATTERJEE, A.; Sponge Iron Production By Direct Reduction Of Iron Oxide; Learning Private Limited; India; 2010.
- SARANGI, A., SARANGI, B.; Sponge Iron Production in Rotary Kiln; Learning Private Limited; India; 2011.

**Publicaciones:**

- PAVEZ, O.; Concentración de minerales II; Universidad de Atacama; Chile; 2009.
- SALAS, C.; Génesis y evolución de las costras ferruginosas; Universidad de Sevilla; España; 1982.
- Sociedad Uruguaya de Geología; Arenas Negras: Resumen Revista N.- 10, 2003.
- COELLO, G.; Ensayo de arenas y arcillas para fundición; Tesis ESPOL; 1983.
- SAA, A.; Estudio de la concentración natural y artificial de arenas negras en General Villamil-Playas; Tesis ESPOL; 1988.
- KATZ, M.; Materiales y materias primas: Minerales de hierro; Colección Encuentro Inet; Argentina ; 2011.
- AGUIRRE, L.; Separación hidrometalúrgica del óxido de titanio asociado con magnetita en las arenas negras; Tesis ESPOL; 1996.
- SOLEDISPA, B., VILLACRES, J., Estudio composicional de las arenas ferrotitaníferas del sector comprendido entre el estero data de Posorja y el monasterio de Santa Teresa, provincia del Guayas; INOCAR; Ecuador; 1990.
- VARGAS, J., CASTAÑEDA E.; Obtención de hierro a partir de arenas negras del Atlántico colombiano desembocadura rio Magdalena; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Colombia; 2011.



**Webgrafía:**

- MECHOSO, E. (2003); Arenas Negras; Recuperado el 10 de abril de 2013 del sitio Web de Nodo50: <http://www.nodo50.org/fau/revista/lucha11-03/17.html>
- PDVSA (1997); Titanio; Recuperado el 25 de abril de 2013 del sitio Web de PDVSA: <http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/titanio.htm>
- FUNGEOMINE (2011); Evaluación de recursos y reservas minerales de arenas negras; Recuperado el 28 de abril de 2013 del sitio Web de FUNGEOMINE: <http://www.fungeomine.org/documentos/mineriaverdemopiche.html>
- FIUBA (2013); Procesos siderúrgicos coque y reducción; Recuperado el 27 de junio de 2013 del sitio Web de FIUBA: [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/16\\_Clase%20Siderurgia%20Coque%20Reduccion.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/16_Clase%20Siderurgia%20Coque%20Reduccion.pdf)
- INET (2011); Minerales de hierro; Recuperado el 15 de mayo de 2013 del sitio Web de INET: <http://www.inet.edu.ar/wpcontent/uploads/2012/11/minerales-de-hierro.pdf>
- AGUILAR, J., VIRAMONTES, R.; Simulación de un proceso de reducción aplicado a un mapa tecnológico; Recuperado el 30 de mayo de 2013 del sitio Web de la Universidad Autónoma de Nuevo León; [http://grafito.fime.uanl.mx/texto\\_completo/aniac18\\_siumulacion.pdf](http://grafito.fime.uanl.mx/texto_completo/aniac18_siumulacion.pdf)
- ACEROS AREQUIPA; La reducción directa de mineral de hierro; Recuperado el 6 de junio de 2013 del sitio Web de Aceros Arequipa; <http://share.pdfonline.com/7b5cc6e192324b91889f043867440192/cap9.pdf>

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS ARENAS**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**

**Resultados Análisis Difracción de Rayos X**

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA y TOPAS) para cualificación y cuantificación. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis:

Mineral	Formula	Muestra Magnética* Contenido (%)	Muestra NO magnética* Contenido (%)
Ilmenita	$FeTiO_3$	52	50
Hematita	$Fe_2O_3$	38	37
Magnetita	$Fe_3O_4$	10	10
Quartz	$SiO_2$	---	5

\* Denominación de muestras empleada por el cliente

Nota: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida.

  
Ing. Alicia Guevara  
Jefe de Departamento



  
Ing. Ernesto de la Torre  
Jefe de Laboratorios

EVALUACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS  
ÁREA "OSTIONAL BLOQUE 1" CÓDIGO 400204.A1  
JUNIO 2011



ROCHE MINING (MT) - MARKETING

MUESTRA ex "Ostional Bloque 1", Sector "Mompiche", Canton  
"Muisne", Provincia "Esmeraldas", ECUADOR

Report No. MS.02/30576-561/1  
September 16<sup>th</sup>, 2012

Roche Mining (MT)  
Evans Deskins Pty Ltd ABN 59200 002 031  
11 Elysium Road  
Carrara Queensland 4211  
PO Box 2569  
Nerang Mail Centre QLD 4211  
Australia  
Tel: 61 7 5569 1300  
Fax: 61 7 5525 3810

Email: [sales@roche.com.au](mailto:sales@roche.com.au)  
Internet: [www.mdmintec.com.au](http://www.mdmintec.com.au)



EVALUACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS  
 ÁREA "OSTIONAL BLOQUE 1" CÓDIGO 466204.A1  
 JUNIO 2011

ROCHE MINERAL TECHNOLOGIES  
 for MUESTRA ECUADOR

SAMPLE: Ferro-Titanifera  
 Heavy Mineral % = 100

Fraction	w%	% H.S	Black opaque mineral	% Dark opaque mineral	% Mag Othrs	% N/AI Others	% Possible Mag Black Rutile	% Mag Zircon	% Possible Black Rutile	% Zircon	total
H.S.	42,82	100,00	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00
Mag.1	51,46	-	100,00	-	-	-	-	-	-	-	100,00
Mag.2	5,33	-	-	96,38	3,63	-	-	-	-	-	100,00
Mag.3	0,09	-	-	-	28,55	-	55,84	14,51	-	-	100,00
Non Mag	0,30	-	-	-	-	8,23	-	-	0,37	93,40	100,00
mineral % in sample	100,00	42,82	51,46	5,14	0,22	0,02	0,05	0,01	0,00	0,28	100,00
mineral % in HMA		42,82	51,46	5,14	0,22	0,02	0,05	0,01	0,00	0,28	100,00

EVALUACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS  
ÁREA "OSTIONAL BLOQUE 1" CÓDIGO 400204.A1  
JUNIO 2011

Analisi chimica semi-quantitativa XRF  
(senza riferimento standard)

Identificazione provini: 1165

Data di analisi: 25/10/2007

Operatore tecnico: G. Signori

Strumento: EDAX DX 95 PV 9501/06 senza standard

Risultati dell'analisi:

Elementi in ossidi	1165
RhO	10,75
TiO <sub>2</sub>	30,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,38
totale	100,00

EVALUACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS

ÁREA "OSTIONAL BLOQUE F" CÓDIGO 400204.A1

JUNIO 2011

Sample	TiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	CaO %	MgO %	ZnO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	U ppm	Th ppm	U <sub>2</sub> O <sub>7</sub> %	Mb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SO <sub>3</sub> %	CaO %	K <sub>2</sub> O %	10 <sup>4</sup> ppm %
MIS															
9324	71.5	71.1	0.42	0.48	1.3	0.21	0.193	-10	-10	0.40	0.006	-0.01	0.3	0.017	-2.37
9325	71.7	71.7	0.2	0.43	1.19	0.19	0.197	-10	-10	0.5	-0.006	-0.01	0.28	0.016	-2.21
9326	72.5	72.5	0.39	0.56	1.19	0.21	0.173	-10	-10	0.5	0.005	-0.01	0.29	0.019	-1.99
9326 (b)	72.1	72.1	0.4	0.57	1.19	0.21	0.172	-10	-10	0.5	0.003	-0.01	0.29	0.02	-2.03

Sample Preparation

The samples have been crushed and dried. The whole sample has been pulverized in a ring pulverizer equipped with Tungsten Carbide bowl. A known flux has been inserted to be known exact sample.

analytical Methods

The samples have been analyzed using a 1222 kV with added sodium nitrate, 10 mm glass bead which has been analyzed by XRF.

SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, ZnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, U, Th, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub> (S), K<sub>2</sub>O

has been determined by X-ray fluorescence Spectrometry

U and Th content has been determined by AAS and 1000 degrees Celsius.

U and Th content has been determined Gravimetrically



*EVALUACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS  
ÁREA "OSTIONAL BLOQUE 1" CÓDIGO 400204.A1  
JUNIO 2011*

**MUESTRAS DEL AREA OSTIONAL BLOQUE 1 y BLOQUE 2  
Analizadas por Bordarg Cleg.**

	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO
	27.5	71.1	0.42	0.48	0.072	1.30	0.21
	27.5	71.7	0.20	0.43	0.059	1.19	0.19
	26.00	72.5	0.39	0.55	0.233	1.19	0.21
	26.10	72.7	0.40	0.57	0.228	1.19	0.21
<b>Promedio</b>	26.78	72.00	0.35	0.51	0.148	1.195	0.205

- Un análisis químico no proporciona una imagen clara de los minerales en forma de óxidos que están en la muestra analizada.
- Para la determinación de los diferentes óxidos de Fe y de Ti de los minerales principales de estos elementos presentes en la muestra, se hace un cuadro comparativo, tal como se hace en el cálculo de la Norma, para definir una clase

EVALUACIÓN DE RECÍPES MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS  
 AREA "OSTONAL BLOQUE 1" CODIGO 4002M-A1  
 JUNIO 2011

FILE 30-03-01 09.40.30 V01-85178 0 J. VALDIVIA 23/03/01  
 CLIENT BUENAVENTURA INGENIEROS S.A.  
 PROJECT BGA-029-01 #SAMPLES 1  
 SPECIAL VALUES

IS Insufficient Sample  
 -9 No Value Recorded

Values above the upper limit are shown as +uplimt

Values below the lower limit are shown as -loiml (is not detected)

DETERMINATIONS

ELNAME METHO ECO UNI #SAM LOMT UPLMT COMMENTS

01 SiO2 XRF EC7 PCT 1 0.01 100.00 Results Reported  
 02 TiO2 XRF EC7 PCT 1 0.01 7.00 Results Reported  
 03 TiO2 PCT 1 0.05 100.00 Results Reported  
 04 Al2O3 XRF EC7 PCT 1 0.01 100.00 Results Reported  
 05 Fe2O3 XRF EC7 PCT 1 0.01 100.00 Results Reported  
 06 MnO XRF EC7 PCT 1 0.01 5.00 Results Reported  
 07 MgO XRF EC7 PCT 1 0.01 50.00 Results Reported  
 08 CaO XRF EC7 PCT 1 0.01 100.00 Results Reported  
 09 Na2O XRF EC7 PCT 1 0.01 10.00 Results Reported  
 10 K2O XRF EC7 PCT 1 0.01 20.00 Results Reported  
 11 P2O5 XRF EC7 PCT 1 0.01 35.00 Results Reported  
 12 LOI GRAY EC7 PCT 1 -2.00 100.00 Results Reported  
 13 Total PCT 1 0.01 110.00 Results Reported  
 14 Cr2O3 XRF EC7 PCT 1 0.01 5.00 Results Reported  
 15 LOI 2 GM 3 0.001 00.000 Cancelled  
 16 LOI 3 GM 3 0.001 00.000 Cancelled  
 17 LOI 1 GM 3 0.001 00.000 Cancelled  
 18 Flux GM 1 99.999 Cancelled  
 19 Sample GM 1 99.999 Cancelled

SAMPLE PREPS

40 SAMPLE TYPE-P PREPARED PULP

REMARKS

50 TiO2 results are reported by Assay analysis.

....

FORMAT (1X,A8,3X,A1,3X,A1,3X,A20,1X,19(1X,A7,2X,A1,1X))

BEGIN Type Frac Sample ID SiO2 TiO2 TiO2 7

SE-07 P 2 Limerite-Mag 1.32 28.37 0.6 69.23 MnO 0.2

END

*EVALUACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE ARENAS NEGRAS  
ÁREA "OSTIONAL BLOQUE 1" CÓDIGO 400204.A1  
JUNIO 2011*

Se calcula las arenas negras que existe debajo del agua de mar, largo 400 metros, ancho adicional 75 metros a partir de la línea calculada para reservas probables, se mantiene la misma profundidad promedio: 0,99 metros.

Volumen en metros cúbicos: 29700 m<sup>3</sup>

Densidad: 3,5

Volumen en Toneladas: 103950 Ton de arenas negras



**ANÁLISIS DE ARENAS NEGRAS:**

Las muestras tomadas a inicios del mes de Julio (17 muestras) se encuentran en preparación: separación de fracción pesada y liviana (pesado), y separación con imán de mano (pesado), antes de ser enviados al laboratorio certificado para determinar contenidos de Hierro y Titanio.

Para el cálculo de valores de Oxido de Titanio y Oxido de Hierro se toma como referencia varios otros análisis realizados en el laboratorio de Bondar Cleg con resultados similares, los cuales dan los siguientes valores promedios (Ver anexo No 1 resultados anteriores), estos son:

TiO <sub>2</sub> :	27,5 – 27,5 – 26 – 26,1 Promedio	26,75 %	TiO <sub>2</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	71,1 – 71,7 – 72,5 – 72,7 Promedio	72,00 %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Otros: (Mn, Mg, Ca, Na, K, P, Cr, Si) .....		1,25 %	
TOTAL: .....		100,00 %	

## **ANEXO 2. INSTRUCTIVOS TECNOLÓGICOS**

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>SECADO DE ARENAS FERRUGINOSAS</b>	

## INDICE

**1.0 Objetivo.**

**2.0 Alcance.**

**3.0 Definiciones.**

**4.0 Responsabilidades.**

**5.0 Referencias.**

**6.0 Desarrollo.**

**6.1 Materiales y equipos a utilizar.**



**6.2 Preparación para comenzar la actividad.**

**6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar.**

**6.4 Frecuencia de ejecución.**

**7.0 Registros.**

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>SECADO DE ARENAS FERRUGINOSAS</b>	

### 1. OBJETIVO

Establecer un procedimiento para el proceso de secado de las arenas ferruginosas.

### 2. ALCANCE

Abarca el proceso de secado de arenas en condiciones generales para obtener un contenido mínimo de humedad.

### 3. DEFINICIONES

No se aplica.

### 4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

### 5. REFERENCIAS

No se aplica.

### 6. DESARROLLO

#### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS A UTILIZAR



##### Materiales

Arenas ferruginosas

##### Equipos

- Mufla
- Balanza

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>SECADO DE ARENAS FERRUGINOSAS</b>	

### Instrumentos

- Pala
- Recipiente contenedor de arena

### 6.2 PREPARACIÓN PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

- Pesar 10 Kg de arena negra.

### 6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR

- 1) Se coloca la arena que ha sido pesada en el recipiente adecuado.
- 2) Se calienta la mufla a 150 °C.
- 3) Se introduce el recipiente en la mufla.
- 4) Se deja secar la muestra de arena por 3 horas.
- 5) Se extrae la muestra de arena y se pesa.
- 6) Se dispone la muestra en un recipiente libre de humedad para su posterior tratamiento.



### 6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN

La actividad tiene una periodicidad que depende de la producción que se planea.

### 7. REGISTROS

No se aplica.

<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesisistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>AGLOMERACIÓN DE ARENAS NEGRAS CON MELAZA</b>	

## **INDICE**

**1.0 Objetivo.**

**2.0 Alcance.**

**3.0 Definiciones.**

**4.0 Responsabilidades.**

**5.0 Referencias.**

**6.0 Desarrollo.**

**6.1 Materiales y equipos a utilizar.**

**6.2 Preparación para comenzar la actividad.**



**6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar.**

**6.4 Frecuencia de ejecución.**

**7.0 Registros.**

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--



	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>AGLOMERACIÓN DE ARENAS NEGRAS CON MELAZA</b>	

### 1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento a seguir en el proceso de aglomeración de las arenas ferruginosas.

### 2. ALCANCE

Comprende el proceso de aglomerado de arenas ferruginosas previamente sometidas a un proceso de secado para obtener pellets que se puedan manipular.

### 3. DEFINICIONES

No se aplica.

### 4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

### 5. REFERENCIAS

No se aplica.



### 6. DESARROLLO

#### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS A UTILIZAR

##### Materiales

- Arenas ferruginosas previamente secadas
- Melaza

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>AGLOMERACIÓN DE ARENAS NEGRAS CON MELAZA</b>	

### Equipos

- Mufla
- Balanza

### Instrumentos

- Pala
- Recipiente contenedor de arena

### 6.2 PREPARACIÓN PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

- Realizar procedimiento de secado a las arenas ferruginosas

### 6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR

- 1) Se dispone en un recipiente cierta cantidad de agua.
- 2) Se diluye la melaza en agua en una relación 2:1.
- 3) En un recipiente se coloca la arena seca y la mezcla de melaza.
- 4) En la máquina de mezclado se ubica la composición por un determinado periodo.
- 5) Se dispone los pellets para la fundición.



### 6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN

La actividad tiene una frecuencia que depende de la producción que se planifique.

### 7. REGISTROS

No se aplica.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>AGLOMERACIÓN DE ARENAS NEGRAS CON SILICATO DE SODIO</b>	

## **INDICE**

**1.0 Objetivo.**

**2.0 Alcance.**

**3.0 Definiciones.**

**4.0 Responsabilidades.**

**5.0 Referencias.**

**6.0 Desarrollo.**

**6.1 Materiales y equipos a utilizar.**



**6.2 Preparación para comenzar la actividad.**

**6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar.**

**6.4 Frecuencia de ejecución.**

**7.0 Registros**

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>AGLOMERACIÓN DE ARENAS NEGRAS CON SILICATO DE SODIO</b>	

### 1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento a seguir en el proceso de aglomeración de las arenas ferruginosas.

### 2. ALCANCE

Comprende el proceso de aglomerado de arenas ferruginosas previamente sometidas a un proceso de secado para obtener pellets que se puedan manipular.

### 3. DEFINICIONES

No se aplica.

### 4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

### 5. REFERENCIAS

No se aplica.



### 6. DESARROLLO

#### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS A UTILIZAR

##### Materiales

- Arenas ferruginosas previamente secadas
- Silicato de sodio líquido de densidad  $2,2 \text{ g/cm}^3$

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>AGLOMERACIÓN DE ARENAS NEGRAS CON SILICATO DE SODIO</b>	

### Equipos

- Mufla
- Balanza

### Instrumentos

- Pala
- Recipiente contenedor de arena

## 6.2 PREPARACIÓN PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

- Realizar procedimiento de secado a las arenas ferruginosas.

## 6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR

- 1) Pesar la arena seca y el silicato de sodio en una relación 6:1.
- 2) Colocar la arena y el silicato de sodio en la máquina de mezclado.
- 3) Esperar un tiempo adecuado hasta que se observe una mezcla homogénea.
- 4) Se procede manualmente a realizar los pellets del tamaño requerido.
- 5) Colocar los pellets en un recipiente y llevar a la mufla a 150°C por dos horas.
- 6) Retirar el recipiente de la mufla y secar a temperatura ambiente (22°C) hasta que los pellets adquieran la dureza adecuada, tres horas aproximadamente.



## 6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN

La actividad tiene una frecuencia que depende de la producción que se planifique.

## 7. REGISTROS

No se aplica.



<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesisistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A DIÉSEL</b>	

## **ÍNDICE**

- 1.0 Objetivo**
- 2.0 Alcance**
- 3.0 Definiciones**
- 4.0 Responsabilidades**
- 5.0 Referencias**
- 6.0 Desarrollo**
- 6.1 Materiales y equipos a utilizar**
- 6.2 Preparación para comenzar la actividad**
- 6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar**
- 6.4 Frecuencia de ejecución**
- 7.0 Registros**

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A DIÉSEL</b>	

## 1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la reducción de pellets de arenas ferruginosas.

## 2. ALCANCE

Reducir las arenas ferruginosas en el horno estático de crisol fijo a diésel.

## 3. DEFINICIONES

**Horno estático de crisol fijo:** El metal se funde fuera del contacto con el combustible, en un crisol que se coloca en el interior del horno; que se levanta cuando el metal se funde y se lleva mediante pinzas hasta el molde.

**Pirómetro:** Dispositivo capaz de medir temperaturas superiores a los 600°C de una sustancia sin necesidad de estar en contacto con ella.



## 4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

## 5. REFERENCIAS

CAPELLO, E; Tecnología de la Fundición; Editorial G. Gili; 1971.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A DIÉSEL</b>	

## 6. DESARROLLO

### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS

#### Materiales

- 5 Kg de arena negra
- 1,35 Kg de coque
- 0,1 Kg de caliza
- 6 galones de diésel

#### Equipos

- Horno de crisol fijo a diésel

#### Instrumentos



- Crisol de grafito de 6 Kg de capacidad
- Pirómetro de alta temperatura
- Pinza metálica
- Mineral metálico

### 6.2 PREPARACION PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

- 1) Limpiar el horno de desechos de coladas anteriores.
- 2) Revisar el nivel del combustible, el cual debe ser tal que abastezca dos horas de operación del horno (aprox. 6 galones de diésel).

<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesisistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--





	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A DIÉSEL</b>	

### **6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR PARA REDUCIR LA ARENA NEGRA**

#### **Operación del horno de crisol fijo a diésel**

- 1) En el crisol de grafito, cargar consecutivamente 5 Kg de arena, 0,1 Kg de caliza y 0,35 Kg de coque.
- 2) Llevar el crisol al interior del horno.
- 3) Rodear el crisol con 1 Kg de coque.
- 4) Abrir completamente la llave de paso del combustible.
- 5) Conectar y encender la bomba de combustible.
- 6) Conectar el ventilador.
- 7) En el interior del horno, a la entrada del fuego, encender una antorcha (guaípe mojado con diésel).
- 8) Simultáneamente, encender el ventilador y regular el caudal del combustible.
- 9) Regular el grado de inclinación (aprox. 80°) de la entrada del fuego, de tal manera que éste rodee todo el crisol.
- 10) Girar la tapa del crisol en sentido antihorario, y bajarla accionando el pedal ubicado en la parte inferior del horno.
- 11) Medir la temperatura en el interior del crisol y a su alrededor, utilizando el pirómetro cada cierto intervalo de tiempo.
- 12) Luego de dos horas aproximadamente, apagar el horno.
- 13) Alrededor de 3 minutos, subir la tapa del crisol mediante el pedal, girar la tapa en sentido horario, extraer el crisol con la ayuda de la pinza metálica y colocarlo en el agujero del mineral, para facilitar el vaciado del producto obtenido.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A DIÉSEL</b>	

### **Apagado del horno**

- 1) Bajar el caudal del combustible.
- 2) Apagar y desconectar el ventilador y la bomba de combustible.
- 3) Cerrar la llave de paso del combustible.



### **6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN**

La frecuencia de realización está limitada al proceso experimental que se planifique.

### **7. REGISTROS**

Se medirá y registrará la temperatura durante todo el proceso en varios intervalos de tiempo.



<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A GAS</b>	

## ÍNDICE

- 1.0 Objetivo**
- 2.0 Alcance**
- 3.0 Definiciones**
- 4.0 Responsabilidades**
- 5.0 Referencias**
- 6.0 Desarrollo**
- 6.1 Materiales y equipos a utilizar**
- 6.2 Preparación para comenzar la actividad**
- 6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar**
- 6.4 Frecuencia de ejecución**
- 7.0 Registros**

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A GAS</b>	

## 1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la reducción de pellets de arenas ferruginosas.

## 2. ALCANCE

Reducir las arenas ferruginosas en el horno estático de crisol fijo a gas.

## 3. DEFINICIONES

Horno estático de crisol fijo: El metal se funde fuera del contacto con el combustible, en un crisol que se coloca en el interior del horno; que se levanta cuando el metal se funde y se lleva mediante pinzas hasta el molde.

Pirómetro: Dispositivo capaz de medir temperaturas superiores a los 600°C de una sustancia sin necesidad de estar en contacto con ella.



## 4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

## 5. REFERENCIAS

CAPELLO, E; Tecnología de la Fundición; Editorial G. Gili; 1971.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A GAS</b>	

## 6. DESARROLLO

### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS

#### Materiales

- 2 Kg de arena negra
- 1 Kg de caliza
- Un tanque de oxígeno
- Dos tanques de gas de 15 Kg

#### Equipos

- Horno de crisol fijo a gas



#### Instrumentos

- Crisol de grafito de 6 Kg de capacidad
- Pirómetro de alta temperatura
- Pinza metálica
- Mineral metálico

### 6.2 PREPARACION PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

- 1) Limpiar el horno de desechos de coladas anteriores.
- 2) Revisar que el tanque de gas se encuentre lleno y en un recipiente con agua caliente, para evitar que baje su presión y por tanto la temperatura durante el proceso de reducción.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CRISOL A GAS</b>	

### **6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR PARA REDUCIR LA ARENA NEGRA**

#### **Operación del horno de crisol fijo a gas**

- 1) En el crisol de grafito, cargar consecutivamente 2 Kg de arena y 1 Kg de caliza.
- 2) Llevar el crisol al interior del horno.
- 3) Abrir la válvula de paso del gas.
- 4) Encender los sopladores.
- 5) Medir la temperatura en el interior del crisol mediante el pirómetro.
- 6) Luego de una hora y cuarenta y cinco minutos suministrar oxígeno durante quince minutos.
- 7) Luego de dos horas y media aproximadamente, apagar el horno.
- 8) Extraer el crisol con la ayuda de la pinza metálica y colocarlo en el agujero del mineral, para facilitar el vaciado del producto obtenido.

#### **Apagado del horno**

- 1) Apagar los sopladores.
- 2) Cerrar la válvula de paso del gas.



### **6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN**

La frecuencia de realización está limitada al proceso experimental que se planifique.

### **7. REGISTROS**

Se medirá y registrará la temperatura durante todo el proceso en varios intervalos de tiempo.



<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE FOSO</b>	

## ÍNDICE

- 1.0 Objetivo
- 2.0 Alcance
- 3.0 Definiciones
- 4.0 Responsabilidades
- 5.0 Referencias
- 6.0 Desarrollo
  - 6.1 Materiales y equipos a utilizar
  - 6.2 Preparación para comenzar la actividad
  - 6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar
  - 6.4 Frecuencia de ejecución
- 7.0 Registros

<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE FOSO</b>	

## 1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la reducción de pellets de arenas ferruginosas.

## 2. ALCANCE

Reducir las arenas ferruginosas en el horno de foso.

## 3. DEFINICIONES

**Horno de foso:** Es una fosa vertical por debajo del nivel del suelo, con una cubierta. Se pueden usar crisoles de varios tamaños, que pueden ser removidos y llevados hasta los moldes para vaciar el metal fundido.

**Pirómetro:** Dispositivo capaz de medir temperaturas superiores a los 600°C de una sustancia sin necesidad de estar en contacto con ella.

## 4. RESPONSABILIDADES



La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

## 5. REFERENCIAS

No aplica.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--



	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE FOSO</b>	

## 6. DESARROLLO

### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS

#### Materiales

- 18 Kg de hierro fundido.
- 1 Kg de arena negra.

#### Equipos

- Horno de foso.



#### Instrumentos

- Crisol de grafito de 40 Kg de capacidad.
- Pirómetro de alta temperatura.
- Pinza metálica.
- Mineral metálico.

### 6.2 PREPARACION PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

- 1) Limpiar el horno de desechos de coladas anteriores.
- 2) Revisar el nivel del tanque del aceite de motor usado se requiere aproximadamente 6 galones y calentarlo durante una hora aproximadamente para evitar su pulverización.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE FOSO</b>	

### **6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR PARA REDUCIR LA ARENA NEGRA**



#### **Operación del horno de foso**

- 1) Colocar 18 Kg de chatarra de hierro fundido fragmentada en el crisol de grafito.
- 2) Llevar el crisol al interior del horno.
- 3) Encender el soplador.
- 4) Abrir la válvula de paso de la mezcla aire-combustible.
- 5) Para iniciar la combustión, colocar un pedazo de leña encendida con gasolina u otro elemento inflamable en el fondo del interior del horno.
- 6) Medir la temperatura en el interior del crisol mediante el pirómetro.
- 7) Luego de que se haya fundido la chatarra, dos horas aproximadamente, se colocan dos paquetes de 0,5 Kg de arena negra, y se identifica la reacción producida.
- 8) Luego de quince minutos, apagar el horno.
- 9) Extraer el crisol con la ayuda de la pinza metálica y colocarlo en el agujero del mineral.
- 10) Vaciar la colada en un molde preparado previamente, mientras se extrae la mezcla heterogénea generada por la arena, que se deposita en la parte superior de crisol.

#### **Apagado del horno**

- 1) Apagar el soplador.
- 2) Cerrar la válvula de paso del combustible.

<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesisistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE FOSO</b>	



#### **6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN**

La frecuencia de realización está limitada al proceso experimental que se planifique.

#### **7. REGISTROS**

Se medirá y registrará la temperatura durante todo el proceso en varios intervalos de tiempo



<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CUBILOTE</b>	

## ÍNDICE

- 1.0 Objetivo
- 2.0 Alcance
- 3.0 Definiciones
- 4.0 Responsabilidades
- 5.0 Referencias
- 6.0 Desarrollo
  - 6.1 Materiales y equipos a utilizar
  - 6.2 Preparación para comenzar la actividad
  - 6.3 Secuencia ordenada de las operaciones a realizar
  - 6.4 Frecuencia de ejecución
- 7.0 Registros

<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CUBILOTE</b>	

## 1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la reducción de pellets de arenas ferruginosas.

## 2. ALCANCE

Reducir las arenas ferruginosas en el horno de cubilote y determinar la composición química de los productos obtenidos.

## 3. DEFINICIONES

**Horno de cubilote:** Consiste en un cilindro vertical recubierto interiormente con material refractario, empleado principalmente en la producción de fundición gris.

**Pirómetro:** Dispositivo capaz de medir temperaturas superiores a los 600°C de una sustancia sin necesidad de estar en contacto con ella.



## 4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada de llevar a cabo este procedimiento será quien haga cumplir cada una de las instrucciones planteadas.

## 5. REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN'S; El Horno de Cubilote y su Operación; Continental; México; 1974.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CUBILOTE</b>	

## 6. DESARROLLO

### 6.1 MATERIALES Y EQUIPOS

#### Materiales

- 150 Kg de pellets de arena negra
- 68 Kg de coque
- 15 Kg de caliza

#### Equipos

- Horno de cubilote

#### Instrumentos



- Pirómetro de alta temperatura
- Piquetas metálicas para limpiar las toberas
- Barra para aplicar los tapones cónicos
- Barra puntiaguda para romper los puentes
- Barra de hierro para medir la altura de la cama de coque
- Martillo

### 6.2 PREPARACION PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

#### Limpieza del horno

- 1) Limpiar el horno de escoria y desechos de coladas anteriores.
- 2) Reparar cualquier zona deteriorada con arcilla y arena de sílice.
- 3) Cerrar la puerta del fondo de la solera.



<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesisistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto
---	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CUBILOTE</b>	

### **Encendido del horno**

- 1) Colocar una capa de arena arcillosa con una pendiente hacia el vertedero.
- 2) Calentar gradualmente mediante la combustión de una cantidad predeterminada de leña en el crisol con la ayuda de gasolina u otro elemento inflamable. Mantener abiertas las tapas de las toberas.
- 3) Cargar 17 Kg de coque, una vez encendida la cama de coque, durante una hora aproximadamente hasta que llegue a un color rojo cereza, y que arde fácilmente por las toberas, cerrar el agujero de limpieza con una mezcla especial de barro y arena de moldeo, y tapar con una placa de acero.
- 4) Cerrar los orificios de las piqueras de sangrado y de escoria aplicando tapones cónicos de arcilla arcillosa.
- 5) Una vez que la leña se ha consumido y el calor ha llegado hasta arriba del coque, nivelar la cama con otra carga de coque (17 Kg) y medir con una barra de medida introducida por la puerta de carga para cumplir con la altura necesaria.
- 6) Una vez que el lecho está a punto, iniciar inmediatamente la carga de los materiales de fusión hasta el nivel del tragante. Se coloca una carga de caliza (3 Kg), una carga metálica (100 Kg), coque (17 Kg), carga metálica (100 Kg), caliza (3 Kg), coque (17 Kg), y así sucesivamente hasta completar la carga requerida.
- 7) Cuando el horno se encuentra lleno se inicia la inyección de aire por el ventilador y con ello se comienza la fusión de la carga metálica.
- 8) Observar el metal fundido por las mirillas de las toberas a los 8 a 10 minutos.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CUBILOTE</b>	



### **6.3 SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR PARA REDUCIR LOS PELLETS DE ARENA NEGRA**

#### **Operación del horno de cubilote**

- 1) Una vez que se haya completado la carga de hierro fundido requerida por la empresa, sin apagar el horno de cubilote y sin suspender el soplado, se inicia la limpieza del horno vaciando los restos de hierro por ambas piqueras, y picando con varillas metálicas por las mirillas de las toberas.
- 2) Cerrar los agujeros de las piqueras de sangrado y de escoria aplicando tapones cónicos de arcilla arcillosa.
- 3) Nivelar la cama con 17 Kg de coque hasta una altura determinada por una barra de medida introducida por la puerta de carga.
- 4) Medir la temperatura con la ayuda del pirómetro.
- 5) Colocar alternadamente la primera carga en el horno: 17 Kg de coque, 5 Kg de caliza, 75 Kg de pellets de arena negra, 5 Kg de caliza y 17 Kg de coque. Posteriormente colocar la segunda carga con 75 Kg de pellets de arena negra, 5 Kg de caliza y 17 Kg de coque.
- 6) Luego de 5 minutos aproximadamente, observar la caída de la arena reducida a través de las toberas.
- 7) Realizar limpiezas periódicas en las toberas mediante piquetas metálicas.
- 8) Abrir la piquera de escoria.
- 9) Una vez acumulada la arena reducida en el crisol, sangrar el producto retirando el tapón mediante una barra puntiaguda y de ser necesario utilizar un martillo o combo para golpear.
- 10) Colar la arena reducida en la cayana y llenar los moldes preparados previamente.
- 11) Repetir los pasos 5 al 10.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--



	<b>INSTRUCCIÓN</b>	
	<b>REDUCCIÓN DE ARENAS FERRUGINOSAS EN HORNO DE CUBILOTE</b>	

### **Apagado del horno**

- 1) Mantener el soplado hasta que se observe que toda la arena se ha reducido, por inspección a través de las toberas.
- 2) Asegurarse que el piso debajo del horno esté completamente seco.
- 3) Abrir la puerta del fondo y descargar todos los residuos albergados en el horno, y enfriarlos bruscamente con agua.

### **6.4 FRECUENCIA DE EJECUCIÓN**

La frecuencia de realización está limitada al proceso experimental que se planifique y la proporción de arena reducida requerida.

### **7. REGISTROS**

Se medirá y registrará la temperatura antes, durante y después de colocar las cargas en el horno.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>
--	--	--

**ANEXO 3. PLAN OPERATIVO DEL TERMÓMETRO INFRARROJO  
OS524E**

# PLAN OPERATIVO

USO DEL TERMÓMETRO INFRARROJO OS524E  
DURANTE LA REDUCCIÓN DE ARENAS  
FERRUGINOSAS EN EL HORNO DE CUBILOTE



## OBJETO

Medir y registrar la temperatura antes, durante y después de colocar las cargas en el horno de cubilote de la empresa TECNOFUNDICIÓN.

## METODOLOGÍA

Considerando el objeto de estudio y el campo de visión del equipo, se ha visto la necesidad de elaborar el presente plan operativo para el correcto uso del termómetro infrarrojo portátil OS524E provisto por el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Se realizarán las mediciones tanto en la puerta de carga como en las mirillas de las toberas del horno (Fotografías 2 y 3, respectivamente), a una distancia mínima de 13 mm y una distancia máxima de 5 m, generándose un diámetro máximo del cono del campo de visión de 38 mm, según el esquema de la figura 1. Esto permitirá determinar la distancia adecuada, considerando que el campo de visión del termómetro debe caer dentro del propósito cuyo diámetro está alrededor de 50 mm.

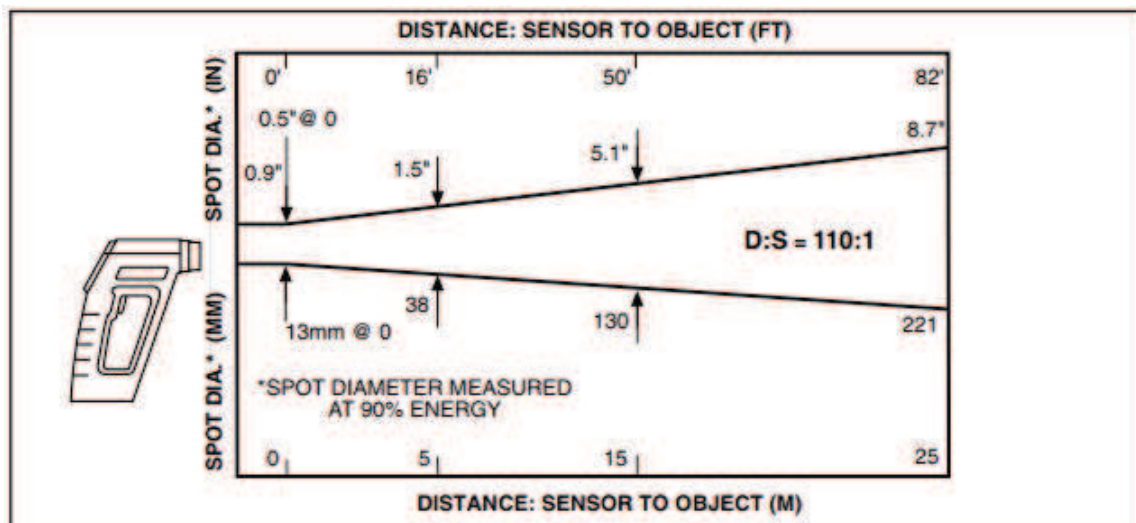


Figura 1. Campo de visión del termómetro OS524E.

En la tabla 1 se indica el protocolo a seguir para realizar las mediciones de temperatura pertinentes.

<b>Elaborado por:</b> <b>Maritza Chuquirima</b> <b>Lenin Cortez</b> <b>Tesistas</b>	<b>Revisado por:</b> <b>Ing. Fausto Oviedo MSc.</b> <b>Director del Proyecto</b>	<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Edgar Cando.</b> <b>Jefe Lab. de Termodinámica</b>
--	--	---

Tabla 1. Mediciones de temperatura con el termómetro OS524E.

MEDICIÓN	PARTE DEL CUBILOTE	DISTANCIA DE MEDICIÓN [m] *	MEDICIÓN DE TEMPERATURA**
1	Puerta de carga	3	Antes de colocar las cargas
2	Toberas	2	Durante la reducción de las cargas
3	Piquera de sangrado	2	Luego de la reducción de las cargas

\*Se ha considerado esta distancia en función del espacio disponible en la instalación, normas de seguridad y el campo de visión del termómetro.

\*\*Se tomarán tres mediciones en cada punto para obtener una temperatura promedio.

<b>Elaborado por:</b> Maritza Chuquirima Lenin Cortez Tesisistas	<b>Revisado por:</b> Ing. Fausto Oviedo MSc. Director del Proyecto	<b>Aprobado por:</b> Ing. Edgar Cando. Jefe Lab. de Termodinámica
---	--	---

**ANEXO 4. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS  
EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN CON HORNO DE CUBILOTE**



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADO

INF-LAB-QAM-33684  
ORDEN DE TRABAJO No 43680

SOLICITADO POR: CHUQUIRINA MARITZA  
DIRECCIÓN: LAS CASAS  
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/02/14  
HORA DE RECEPCIÓN: 14H04  
MUESTRA DE: ESCORIA  
DESCRIPCIÓN: ESCORIA POCO DENSA  
FECHA DE ANÁLISIS: DEL 06/02 AL 14/02/14  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA: 18/02/14  
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS: NEGRO  
ESTADO: SÓLIDO  
CONTENIDO: 1 KILO  
MUESTREO POR: CLIENTE  
OBSERVACIONES: Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

INFORME

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODO
*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%(p/p)	10.79	ABSORCIÓN ATÓMICA



*Christian Paredes*

Quím. Christian Paredes  
JEFE AREA DE QUÍMICA AMBIENTAL





UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADO

INF-LAB-QAM-33685  
ORDEN DE TRABAJO No 43680

SOLICITADO POR: CHUQUIRINA MARITZA  
DIRECCIÓN: LAS CASAS  
FECHA DE RECEPCION: 06/02/14  
HORA DE RECEPCION: 14H04  
MUESTRA DE: ESCORIA  
DESCRIPCION: ESCORIA DENSA  
FECHA DE ANALISIS: DEL 06/02 AL 14/02/14  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: 18/02/14  
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS. NEGRO  
ESTADO: SÓLIDO  
CONTENIDO: 1 KILO  
MUESTREADO POR: CLIENTE  
OBSERVACIONES: Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

INFORME

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODO
*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%(p/p)	9.12	ABSORCIÓN ATÓMICA



*Christian Paredes*

Quím. Christian Paredes  
JEFE AREA DE QUÍMICA AMBIENTAL

3 1/1

RAM-4.1-04



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)







UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADO

INF-LAB-QAM-33683  
ORDEN DE TRABAJO No 43680

SOLICITADO POR:	CHUQUIRINA MARITZA
DIRECCIÓN:	LAS CASAS
FECHA DE RECEPCION:	06/02/14
HORA DE RECEPCION:	14H04
MUESTRA DE:	ESCORIA ESPONJOSA
DESCRIPCION:	ESCORIA ESPONJOSA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 06/02 AL 14/02/14
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	18/02/14
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	NEGRO
ESTADO:	SÓLIDO
CONTENIDO:	1 KILO
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

INFORME

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODO
*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%(p/p)	10.24	ABSORCION ATOMICA



*Christian Paredes*  
Quím. Christian Paredes  
JEFE AREA DE QUÍMICA AMBIENTAL

1 / 1

RAM-4.1-04



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)





**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



**Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa**

**Solicitante** : Maritza Chuquirima  
**No. Referencia** : ST - 6548  
**Fecha** : 18 - 02 - 2014  
**Muestras recibidas** : Una muestra metálica

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	FUNDICION (%)
Carbono (C)	2,327
Silicio (Si)	0,164
Manganeso (Mn)	0,049
Cromo (Cr)	0,097
Molibdeno (Mo)	0,025
Níquel (Ni)	0,071
Fósforo (P)	0,002
Azufre (S)	0,038
Cobre (Cu)	0,300
Aluminio (Al)	0,002
Vanadio (V)	0,009
Hierro (Fe)	96,85

*Ernesto de la Torre*  
 Ing. Ernesto de la Torre  
 Jefe de Departamento



*Evelyn Criollo T.*  
 Lcda. Evelyn Criollo T.  
 Jefe de Laboratorio



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**

**Resultados de Análisis**

**Solicitante:** Maritza Chuquirima

**Referencia:** ST-6548 / RM-7701

**Fecha:** 20/02/2014

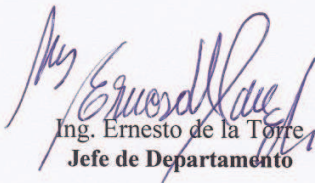
**Muestras recibidas:** Una muestra sólida de escoria de fundición

**Resultados Análisis químico semicuantitativo por  
Microscopía Electrónica de Barrido con microanálisis de Rayos X**


El análisis químico **semicuantitativo** de la muestra se realizó utilizando el microscopio electrónico de barrido Tescan-Vega, con microanalizador de rayos X Bruker.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

<b>Elementos</b>	<b>Análisis Escoria de fundición (%)</b>
Hierro (Fe)	28,4
Calcio (Ca)	14,1
Titanio (Ti)	9,3
Silicio (Si)	8,3
Magnesio (Mg)	4,1
Aluminio (Al)	2,2
Sodio (Na)	1,2

  
Ing. Ernesto de la Torre  
Jefe de Departamento



  
Lcda. Evelyn Criollo  
Jefe de Laboratorio