

**Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica
Departamento Mecánica**

OBTENCIÓN DE UN CONCENTRADO DE HIERRO PARA LA PRODUCCIÓN DE ACERO AL CARBONO

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Roberto Chaveco Castillo

Tutores: Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Prof. Auxiliar. Emilio Leyva Ramírez, Ms. C.
Investigador Auxiliar DSIT y Adjunto CUM Mayarí

Moa - 2017



Declaración de autoridad:

Yo: Roberto Chaveco Castillo

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Roberto Chaveco Castillo

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

Ms. C. Emilio Leyva Ramírez.



Agradecimientos

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo el Dr. C. Tomás Fernández Columbié.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis compañeros de trabajo que siempre creyeron en mí y me ayudaron cuando más los necesitaba.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional.

A todos

Muchas Gracias.



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

A mi madre: Olga Castillo Rodríguez

A mi padre: Roberto Chaveco Sablón

A mis hermanas: Mallelin, Yumara y Yaimaris

A mi padrastro: Juan Carlos

A mi novia: Lilibet Zaldívar Hernández

A mis amigos

***que estuvieron a mi lado durante los 6 años de mi
carrera***

***A nuestra revolución, por las posibilidades que me
ofrece***



RESUMEN

El objetivo del trabajo es realizar el análisis del Yacimiento Hierro Santiago y las características de las colas negras de la empresa “Comandante René ramos Latour”, con el objetivo de obtener un concentrado de hierro para ser empleado en la producción de acero al carbono en las acerías cubanas. Para realizar el análisis se consideró una muestra de 525 kg, considerada representativa del Yacimiento Hierro Santiago y con 25 kg de cola negra, las que luego de ser sometida a proceso de beneficio metalúrgico, se obtuvo que para el primero se obtiene un 63 % de Fe y con el segundo un 42 % de concentrado de hierro, que indica que pueden ser empleado para la obtención de acero al carbono. En el proceso de beneficio al que fue sometido el Yacimiento Hierro Santiago en el que se incluye el de separación magnética seca a baja intensidad, la separación magnética húmeda a baja intensidad, se obtuvo una concentración magnética donde se recuperó el 72,94 % en peso de las colas en forma de concentrado con un contenido de hierro del 58,34 %, para una recuperación del hierro del 78,81 %. Se determinó que por la ley minera, con un 1,5 % de concentración, el Yacimiento Hierro Santiago puede ser empleado en la obtención de concentrado de hierro y se clasifica como mena del tipo duro. Se realiza la valoración económica y el impacto medio ambiental relacionado con los procesos de explotación minera.



ABSTRACT

The objective of the work is to carry out the analysis of the Location Iron Santiago and the characteristics of the black lines of the company "Major René Ramos Latour", with the objective of obtaining an iron concentrate to be an employee in the steel production to the carbon in the Cuban steel. To carry out the analysis it was considered a sample of 525 kg, considered representative of the Location Iron Santiago and with 25 kg of black line, those that after being subjected to process of benefit metallurgist, it was obtained that for the first one 63 % of Fe is obtained and with the second 42 % of concentrated of iron that it indicates that they can be an employee for the steel obtaining to the carbon. In the process of benefit to the one that was subjected the Location Iron Santiago in which the one is included from dry magnetic separation to low intensity, the humid magnetic separation to low intensity, a magnetic concentration was obtained where he recovered 72,94 % in weight of the lines in form of concentrated with a content of iron of 58,34 %, for a recovery of the iron of 78,81 %. it was determined that for the mining law, with 1,5 concentration percent, the Location Iron Santiago can be an employee in the obtaining of concentrated of iron and it is classified as one of the hard type. He is carried out the economic valuation and the half environmental impact related with the processes of mining exploitation.



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción	5
1.2. Procesos de la metalurgia	5
1.2. Reducción carbotérmica de menas y minerales de hierro cubanos	6
1.3. Cinética del proceso de reducción carbotérmica	12
1.4. Generalidades acerca del proceso de molienda	15
1.4.1. Consumo de energía en el proceso de molienda	17
1.4.2. Índice de Bond en los procesos de molienda	18
1.5. Concentración magnética	19
1.6. Conclusiones del capítulo 1	22

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción	23
2.2. Análisis químico	23
2.3. Materiales y equipos empleados	24
2.4. Toma y preparación de la muestra en el yacimiento	24
2.4.1. Determinación de las características de grosor	25
2.4.2. Preparación y selección de las muestras para los ensayos en el DSIT	25
2.5. Preparación mecánica	27
2.5.1. Separación magnética seca	29
2.5.2. Separación magnética húmeda	30
2.5.3. Determinación del índice de trabajo de Bond	34
2.6. Conclusiones del capítulo 2	35

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción	37
3.2. Resultados análisis químicos a la muestra inicial	37
3.3. Análisis de los elementos moledores	38
3.3. Característica del grosor de la muestra inicial	40



3.3.1. Resultados de la trituración de la muestra inicial	41
3.4. Análisis de la molienda para la muestra inicial	42
3.5. Análisis de la separación magnética seca a baja intensidad	43
3.5.1. Separación magnética húmeda a baja intensidad	44
3.6. Caracterización del concentrado final	45
3.7. Caracterización del reducto, carbón antracita	46
3.7.1. Caracterización del reducto, pet coke	46
3.7.2. Caracterización de las colas negras	47
3.8. Valoración económica	48
3.9. Impacto medioambiental	49
3.10. Conclusiones del capítulo 3	51
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍAS	



INTRODUCCIÓN

A partir del año 2018 el Ministerio de la Industria de Cuba (MINDUS) debe importar chatarra ferrosa por la producción de acero al carbono en sus dos plantas, el nivel de importación irá en ascenso según se incremente dicha producción; una alternativa para paliar la dependencia del mercado exterior es la producción en el país de una materia prima ferrosa metalizada capaz de sustituir la chatarra necesaria para los hornos de arco eléctricos de ambas acerías.

Buscar un sustituto al déficit de chatarra ferrosa es el principal problema que enfrenta la industria siderúrgica cubana que espera incrementar la producción de acero, tarea primordial del grupo empresarial siderúrgico GESIME, una alternativa importante lo constituye la obtención de una materia prima ferrosa a partir de minerales cubanos; que además de solucionar la falta de chatarra, contribuirá a mitigar algunos de los principales problemas ambientales surgidos como consecuencia de los vertimientos de las industrias que recuperan el níquel de los minerales lateríticos.

Cuba posee toneladas de minerales de hierro que pudieran servir de materia prima para la obtención de la materia prima ferrosa metalizada necesaria para sustituir la chatarra en los hornos de arco eléctricos de ambas acerías, dichos minerales se distribuyen principalmente en tres fuentes: dos constituyen residuales de la industria del níquel: los escombros lateríticos, desecho de la minería y las colas, residuales de las plantas; la tercer fuente son las menas del Yacimiento Hierro Santiago.

Para la producción de acero al carbono, la fuente más importante por sus características morfológicas, la de mejor calidad, son las menas del Yacimiento Hierro Santiago, ya que las otras dos, pese a dar cobertura para la producción por decenas de años, aportarían metales de aleación no deseables en la materia prima para la producción de dicho acero.

Por lo antes expuesto las menas del Yacimiento Hierro Santiago, en el contexto actual, adquieren gran relevancia, no obstante, sus reservas restringidas limitan su explotación a unos pocos años. Para tratar de eludir estas dos limitaciones, una alternativa es la mezcla de ambas fuentes de materias primas, es decir mineral del Yacimiento Hierro Santiago con residuos de la industria cubana del níquel.



Según Leyva (2007), el mineral metalífero principal es la magnetita. El contenido de hierro difiere de un sector a otro desde 35, 30 % en el sector "Folía" hasta 62, 90 % en el sector "El Descanso", con una media del 43, 39 % para el yacimiento. Agrega Leyva (2007), que en general los cuerpos minerales se caracterizan por una composición magnetítica; la textura de la mena es diseminada, donde además de hierro se puede encontrar, cromo, níquel, cobalto, silicio, aluminio, magnesio, manganeso, cobre, vanadio, potasio, titanio, sodio, azufre y fósforo.

Lo antes expuesto muestra que para obtener una materia prima con mayor contenido de Fe es necesario la concentración de dicho elemento, por la morfología enunciada por este autor y la experiencia de Figueredo (1988, 1990) y Santisteban (1990), para la obtención de un concentrado de alta ley, más del 66,0 % de Fe a partir de la mena de dicho yacimiento es necesario mantener la siguiente secuencia: trituración seca de la materia prima - separación magnética seca - molienda húmeda del producto magnético - separación magnética húmeda.

Situación problemática

La producción de acero en Cuba está limitada por la tenencia de equipos que permitan el procesamiento de la materia prima presente en los suelos cubanos, no obstante a esto, existen yacimientos como el de Hierro Santiago que ofrece perspectiva para garantizar suministro de concentrado de hierro que permite ser procesado para obtener un concentrado de hierro para la producción de acero al carbono y garantizar producciones de este tipo en la fabricación de materiales para los diferentes sectores del país, situación que garantizaría un mejor aprovechamiento de los recursos, la limitación de las importaciones y un mejoramiento al proceso productivo.

Problema

Necesidad de una materia prima enriquecida en hierro, como el concentrado de hierro obtenido a partir de las menas del Yacimiento Hierro Santiago, para mezclar con las colas para la obtención de una materia prima ferrosa capaz de cubrir, aunque sea de forma parcial, el déficit de chatarra ferrosa en la producción de acero al carbono en los hornos de arco eléctricos de las acerías Cubana.



Objetivo general

Obtener un concentrado de hierro a partir del mineral del sector Yuca, del Yacimiento Hierro Santiago, para mezclado con las colas posibilitar la producción una materia prima ferrosa capaz de cubrir, aunque sea de forma parcial, el déficit de chatarra ferrosa en la producción de acero al carbono en los hornos de arco eléctricos de las acerías Cubana.

Hipótesis

El mineral del Sector Yuca del Yacimiento Hierro Santiago procesado mediante la trituración seca, la molienda húmeda y la concentración magnética por vía seca y húmeda, permitirá la obtención de un concentrado de hierro apto para la producción de acero al carbono.

Objeto de la investigación: materia prima ferrosa del Sector Yuca del Yacimiento Hierro Santiago y colas negra de la empresa "Comandante René ramos Latour".

Campo de acción: concentrado de hierro para producir mezclas de minerales con vista a utilizarla en la producción de acero al carbono.

Objetivos específicos

1. Establecer los procedimientos metodológicos empleados en el proceso de producción de concentrado de hierro en correspondencia con las características que presentan los mismos.
2. Determinar las propiedades de las materias primas empleadas en el proceso de obtención del concentrado de hierro según las condiciones del Yacimiento Santiago.
3. Analizar los resultados obtenidos del proceso de elaboración del concentrado de hierro a partir de los métodos empleados y en correspondencia con las exigencias del proceso de producción de la materia prima.

Tareas de investigación

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el objeto de estudio.
2. Realización de experimentos.
3. Análisis de resultados obtenidos de los procesos de trituración seca, la molienda húmeda y la concentración magnética por vía seca y húmeda empleados en la obtención del concentrado de hierro.



4. Fundamentación de las propiedades del concentrado de hierro obtenido del mineral del Sector Yuca del Yacimiento Hierro Santiago.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de producción de concentrados de minerales.

Capítulo 1

Marco teórico de la investigación



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

Existen dos rutas de fabricación de acero: el proceso siderúrgico integral, en el que se parte de mineral de hierro, carbón y fundentes. Estas materias primas han de pasar por diferentes instalaciones para su transformación. La más característica de ellas es el horno alto, de donde ya se obtiene una aleación de hierro y carbono en estado líquido y la acería eléctrica, en la que se parte principalmente de chatarra y en un solo paso se obtiene ya acero, que posteriormente se somete a tratamientos de transformación.

El objetivo del capítulo es realizar la búsqueda de información relacionada con el proceso de obtención del hierro a partir de los constituyentes residuales de la industria del níquel: los escombros lateríticos, desecho de la minería y las colas, residuales de las plantas procesadoras de níquel.

1.2. Procesos de la metalurgia

Metalurgia es el arte y la ciencia de obtener los metales a partir de sus minerales y adaptarlos a las necesidades del hombre, existen dos grandes divisiones de la metalurgia: la obtención de los metales a partir de sus minerales, que es la metalurgia extractiva o metalurgia química y la adaptación a las necesidades del hombre (Valencia, 1987).

El hierro ha sido uno de los primeros metales conocido por las personas. Se han encontrado en Mesopotamia y en Egipto objetos de hierro sin trabajar que datan del cuarto milenio antes de Cristo. La técnica de obtención del hierro data desde los egipcios, los cuales extraían mineral de hierro, pero la metalurgia de este metal era más difícil que la del cobre, ya que funde a una temperatura mayor y debe ser forjado para que los objetos adquieran cierta dureza.

Al principio se utilizaba mucho menos que el bronce; sin embargo, la mayor abundancia de hierro en muchas regiones propició que se impusiera sobre el bronce, que necesitaba para su elaboración cobre, un metal más escaso. Se cree que la siderurgia apareció hacia en el segundo milenio antes de Cristo en el Cáucaso y se extendió luego por la península griega. La metalurgia del hierro fue uno de los artífices del nacimiento de la cultura griega.

1.2. Reducción carbotérmica de menas y minerales de hierro cubanos

Los depósitos de lateritas en Cuba constituyen una de las mayores reservas de níquel en el mundo. En el año 1905, la Bethlehem Cuban Iron Co, en la planta de Pensylvania obtuvo el primer acero del mineral del yacimiento actual "Pinares de Mayarí"; este mineral era nodulizado en hornos rotatorios de calcinación con quemadores a base de carbón pulverizado y exportado hacia los Estados Unidos de América (2 162, 2 t entre el 1910 y el 1915), donde eran fundidos en altos hornos, se produjo entonces una aleación que se llamó arrabio Mayarí con la siguiente composición química: C: entre 3,8 y 4,5 %; Si: entre 0,25 y 2,25; P: máximo 0,10 %; S: máximo 0,05 %; Mn: entre 0,6 y 1,0 %; Cr: entre 1,6 y 2,5 %; Ni: entre 0,8 y 1,25 %; Ti: entre 0,10 y 0,20 %; V: entre 0,05 y 0,08 % (Awad, 1966).

En 1923 la Bethlehem Steel Co impulsó las ventas del hierro Mayarí para ser empleados en las fundiciones, mezclado con chatarras y arrabio corrientes en cantidades que variaron entre 10 y 40 % de la carga total de hierro, dicha fundición resultó ser más resistente, más dura, más tenaz y más resistente al calor y a la abrasión que las fundiciones corrientes de hierro (Bethlehem Archive, 1966).

La pennsylvania Steel Co y la Maryland Steell Company, predecesoras de la Bethelhem Steell Co hicieron aleaciones de acero a partir del arrabio Mayarí por el proceso Duplex, oxidando primeramente la mayor parte del cromo e incorporando a la escoria en un convertidor Bessemer y después terminando el proceso en un horno de hogar abierto. Obteniéndose de esta forma el acero Mayarí (nombre que se le dio debido al lugar de procedencia del mineral), cuya composición química se muestra a continuación: Ni: entre 1,0 y 1,5 %; Cr: entre 0,2 y 0,75 %; S: hasta 0,05 %; P: hasta 0,03 % y C: entre 0,03 y 1,5 % según se deseara (Bethlehem Archive, 1966).

Antes de comercializarse en los Estados Unidos de América la compañía Bethlehem había demostrado completamente la eficacia de este acero probándolo dentro de su propia organización. Fabricó una gran variedad de productos, bajo la fuerza de la demanda comercial (Ferreiro, 2005), este acero mostró ser práctico y prontamente fue utilizado y puesto a prueba en distintas condiciones de trabajo.

Entre 1911 y 1920 los aceros con bajos contenidos de níquel se habían empleado poco, excepto como municiones y en instalaciones navales; aparentemente el acero Mayarí no fue

aceptado comercialmente por lo que su manufactura se paralizó en 1921, no obstante luego de varios años de explotación se demostró que su resistencia a la corrosión era superior al acero al carbono tradicional (Bethlehem Archive, 1966).

En Cuba se han establecido yacimientos de minerales lateríticos localizados en Pinares de Mayarí, Levisa y en Moa, actualmente se encuentran en explotación solamente los yacimientos de Moa. En ellos el mineral aparece como un manto sobre pendientes de suave inclinación. El espesor de este manto generalmente no excede los 25 m. Las capas superiores de la sección de las lateritas, son pobres en níquel (menos de 0,9 %), por lo que son descartadas como no útiles para la industria niquelífera (Ferreiro, 2006).

A partir de la clase + 0,83 mm existente en los escombros lateríticos del yacimiento "Pinares de Mayarí", utilizando reductores gaseosos Leyva *et al.* (1989) obtuvieron pelets prereducidos, la temperatura a la que se realizaron los ensayos fue de 850, 920, 985 y 1 050 °C; los mejores resultados fueron alcanzados a la mayor temperatura. A pesar de lograr un grado de reducción del 94,0 % el contenido de hierro metálico obtenido fue sólo de 59,62 %.

Estos autores demostraron que es posible obtener un material con ley de hierro y metalización aproximada de un 60,0 % empleando combustibles sólidos y gaseosos, por lo que el aprovechamiento siderúrgico que se le podría dar a este producto sería como carga en hornos altos, debido a la baja metalización y ley de hierro obtenidas, lo que lo imposibilitaría como un material apto para ser utilizado en los hornos de arco eléctrico, para la sustitución parcial de chatarras en la industria siderúrgica; debido a lo planteado y a la escasa valoración económica realizada por los investigadores, es que el autor de la presente investigación descartó a los escombros lateríticos como una posible fuente de sustitución de las chatarras de acero.

En Cuba la recuperación del níquel a partir del mineral laterítico se lleva a cabo por las tecnologías: Lixiviación Ácida a Presión (Empresa Comandante Pedro Soto Alba) y Carbonato Amoniacal (empresa Comandante Ernesto Ché Guevara) teniendo en cuenta que la Empresa Comandante René Ramos Latour que empleaba esta tecnología cerró en el año 2013. Las características de los residuales sólidos de estas tecnologías están en dependencia de las características del mineral alimentado a las plantas de extracción de níquel y de su

eficiencia, las cuales inciden en la composición química de las colas que se generan (Ferreiro, 2012) (c).

Las colas de la empresa "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro, constituyen una gran fuente de contaminación del medio ambiente. Decenas de millones de toneladas de este residuo sólido industrial se han almacenado en represas de colas, durante las seis décadas de explotación que lleva esta empresa, lo que ha traído un impacto negativo en el medio ambiente, como la obstrucción de cauces de ríos, la contaminación atmosférica y de la bahía de Levisa.

El análisis pignométrico de las colas de Nicaro demuestra que poseen 42,5 % de poros, una humedad molecular capilar de 42,4 %. Esto es debido a que en los hornos de la planta de níquel la hematita (fase ferrosa fundamental) se reduce a magnetita, producto de esta reducción escapa del mineral parte del oxígeno contenido, deja pequeños poros en los granos de magnetita, lo que provoca una configuración esponjosa en los granos (Leyva, 2007)

El residual en estudio es un polvo muy fino que posee 42,50 % de poros y una humedad molecular capilar de 42,40 % (Leyva, 2007), el cual es arrastrado en suspensión por el viento en período de seca varias decenas de kilómetros, contamina el aire, no sólo del poblado de Nicaro, sino que afecta directamente a los pobladores del municipio de Mayarí y otras zonas aledañas y en estado más crítico al poblado de Corua; recientemente se ha comenzado a cubrir parte de esta represa de colas con arcillas, permitiendo el posterior crecimiento de plantas que impiden el arrastre del polvo (Ferreiro, 2011).

Del análisis espectral se aprecia que las colas de Nicaro están constituidas fundamentalmente por Fe, Si, Al, Mg, Cr, en menor cantidad existe níquel y pequeñas cantidades de Bi, Co, Cd, Ti, Mo, y P. Fernández (1979) y Ponce *et al.* (1983) encontraron otros elementos más: K, Na, S, y C, en el orden de las centésimas el potasio y en el de las décimas los restantes.

En Mejanoabr, Leningrado, en el año 1961 a partir de las colas de Nicaro con 41,22 % de hierro y 0,87 % de cromo se propuso un esquema de separación magnética de baja intensidad con 8 etapas, obteniéndose un concentrado con 77,0 % de recuperación en peso, y contenidos de hierro del 58,0 % y de cromo del 0,93 %, el concentrado tuvo un 77,6 % de recuperación en peso, a partir de las colas con un 41,22 % de hierro y 0,87 % de cromo (CIS, 1970). Como se puede apreciar, el contenido de hierro del concentrado magnético no



alcanzó el 60,0 %, además de ello, las experiencias obtenidas en la práctica en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas empleando instalaciones a escala de banco no superan el 55,0 % de hierro.

En Corea, 1970, se realizaron investigaciones para la obtención de semiacero a partir de 3 000 t de colas de Nicaro, se obtuvo lupias con 92,5 % de Fe total, 0,86 % de Cr y 0,65 % de Ni. La tecnología de obtención de semiacero consiste en la reducción de pelets calcinados (a 1 373 K), en un horno de tambor rotatorio hasta la obtención de lupias, luego se procede en el horno de semiacero (fusión y desulfuración). El semiacero obtenido presentó de 1,94 a 2,38 % de C, de 0,72 a 0,92 % de Cr y de 0,61 a 0,7 % de Ni (CIS, 1970).

La formación de las lupias primeramente se vio limitada debido a la escoria corta que generaban las colas, provocando problemas de operación, debido a que las mismas se adherían en la salida del horno, por lo que hubo necesidad de añadirle de 17 a 20 % de arena para separar las lupias de la escoria, obteniendo una basicidad de la escoria entre 0,22 y 0,25; según los especialistas que llevaron a cabo esta investigación, para los hornos rotatorios la basicidad de la escoria es conveniente entre 0,24 y 0,25 (CIS, 1970).

Sobre la base de los resultados obtenidos se elaboró un anteproyecto de la planta de semiacero en Cuba con una capacidad de 150 000 t anuales, el cual fue desechado en primer orden debido a la formación de anillos de escoria en el horno rotatorio y al alto gasto energético. En segundo orden, debido al problema de la calidad del producto o sea, alto contenido de azufre y cromo y dificultades en las operaciones de fusión en el horno Martin (CIS, 2005).

Aunque en el proceso señalado se logra una separación de las fases metal - escoria, el hecho de que la investigación haya tenido que hacerse a partir de las colas y no del concentrado como estaba planificado, influyó de forma negativa en los parámetros tecnológicos durante la corrida experimental.

En el 1971 en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de España, se realizaron investigaciones a escala de laboratorio, a petición del Ministerio de la Industria Básica de Cuba, con el objetivo de obtener super concentrados a partir de las colas de Nicaro, descartándose la imposibilidad de su obtención, la ley máxima de hierro obtenida fue de 59,4 %, partiendo de 45,1 % de hierro total, por lo que el posible aprovechamiento

siderúrgico que se le podría dar a este material sería su empleo en la carga de horno alto y Horno Eléctrico de Cuba Baja (Leyva, 2007).

En Mejanoobr, Leningrado (CIS, 1972) los investigadores demostraron la posibilidad de obtener un material aglomerado mezclando las colas de Nicaro con minerales del grupo de Yacimientos Hierro Santiago, la variante de la sinterización sería de gran utilidad e imprescindible para un posterior tratamiento en horno alto o mini alto horno, pero teniendo en cuenta que en Cuba no se cuenta con reservas de carbón coquificable y debido a su elevado precio en el mercado internacional, unido a lo complicado de la explotación de los yacimientos de Santiago es que esta variante no resultó atractiva.

Durante toda la década del 70 continuaron las investigaciones de los residuos sólidos de la industria del níquel y los minerales del Grupo de Yacimientos Hierro Santiago con fines siderúrgicos, tanto en el país como en el extranjero (Moscú, Leningrado, España, Japón, Rumanía, México, Polonia, Dinamarca). Todas ellas contribuyeron para que se construyera una planta piloto para el beneficio de las colas de Nicaro, con la cual fueron obtenidas y enviadas entre los años 1982 y 1983 hacia la antigua Unión Soviética, 12 000 toneladas de concentrado de hierro (CIS, 1988).

En el informe técnico "Síntesis de las investigaciones con colas de Nicaro" (CIS, 2005) partiendo de las investigaciones realizadas en la planta de beneficio de las colas de Nicaro en los años 1982 y 1983 se concluyó que en comparación con los minerales de hierro convencionales que se procesaban entonces para la producción de acero al carbono, las colas de Nicaro constituyeron un mineral poco común, debido a los contenidos de cromo y residuos de níquel y cobalto, una granulometría muy fina y propiedades magnéticas más débiles que la magnetita natural.

En el Informe sobre las corridas industriales de concentrado de hierro cubano en Horno Alto y obtención de acero en oxiconvertidores, realizadas con especialistas cubanos y soviéticos en instalaciones de la antigua Unión Soviética (CIS. 1983), se aprecia que el contenido de hierro total del concentrado enviado fue de 52,1 %, a partir del cual fueron obtenidas 3 100 t de sínter con un contenido promedio de hierro total de 51,2 %. Todo el sínter fue procesado en un Horno Alto de 258 m³ obteniéndose 1 650 t de arrabio de aleación al cromo níquel con

la siguiente composición química: Si 0,98 %, Cr 1,38 %, Mn 0,84 %, S 0,029 %, Co 0,08 %, P 0,08 %, C 4,40 % y Ni 0,30.

El arrabio obtenido fue procesado para producir acero en un oxiconvertidor semindustrial de 10 toneladas de capacidad, demostrándose la posibilidad de obtención de aceros bajo al carbono (entre 0,05 y 0,07 %), pero con contenidos residuales de cromo altos (entre 0,15 y 0,30 %) por lo que no respondieron a los requerimientos de las normas GOST para ser destinados a la producción de hojalata blanca y estañada pero si para la elaboración de bobinas y chapas laminadas en caliente y en frío.

A finales del 1989 e inicios de la década del 90 continuaron las investigaciones en Cuba encaminadas a obtener un material capaz de sustituir las chatarras de acero en las acerías cubanas. García *et al.* (1989), estudiaron el empleo de pelets metalizados para la producción de acero en Horno Eléctrico de Arco. Figueredo *et al.* (1989) valoraron las perspectivas de utilización de minerales magnetíticos del Grupo de Yacimientos Hierro Santiago en la industria siderúrgica nacional.

Santiesteban (1990), realizó la caracterización y preparación premetalúrgica de la muestra tecnológica del sector "Chiquita" del Grupo de Yacimientos Hierro Santiago; continuando estudios Figueredo *et al.* (1990) con el beneficio por separación magnética de los minerales de los yacimientos "Chiquita", "Chicharrones" y "Descanso", pertenecientes al Grupo de Yacimientos Hierro Santiago.

Teniendo en cuenta que no en todos los sectores los depósitos están representados por cuerpos de minerales únicos y compactos, sino que existen otros en que se encuentran en forma de cuerpos minerales aislados, el hecho de encontrarse en una zona de elevada biodiversidad como es el parque Baconao y debido a que las reservas minerales no son suficientes como para justificar la construcción de instalaciones industriales, son los motivos para que no se estén explotando actualmente estos yacimientos.

Por su parte Suárez *et al.* (1990) estudiaron las perspectivas de las fuentes metálicas cubanas en la industria siderúrgica nacional, vía reducción directa; el bajo contenido de hierro metálico, debido al elevado contenido de ganga presente en los prerreducidos, eleva los costos de aceración, es por ello que se descartó esta variante.

Empleando los residuales industriales (colas) de la empresa "Comandante Pedro Sotillo Alba" Swuardjo (1985) realizó su tesis doctoral sobre el proceso de piroconsolidación de los pelets obtenidos, así como la elaboración de una tecnología para su producción. En dicha tecnología, unido al proceso de tostación oxidante, el cual encarece el proceso, sólo se logró obtener un grado de reducción del 82,9 %, así como un contenido de hierro total del 76,72 % y un contenido de hierro metálico del 63,63 %.

Por lo antes expuesto se considera que las colas de Nicaro es la reserva de hierro cubana que más ha sido estudiada a todas las escalas, desde el laboratorio a la industrial, por lo que se ha demostrado la posibilidad de obtener acero a partir de ellas. Teniendo en cuenta que Cuba no cuenta con reservas de coque metalúrgico, se imposibilita el empleo de este material por la vía convencional de Alto o Mini Alto Horno.

1.3. Cinética del proceso de reducción carbotérmica

El objetivo de la mayoría de las investigaciones sobre la cinética de la reducción de los óxidos de hierro, ha sido la determinación de los efectos de distintos parámetros (temperatura, presión parcial de reactivo, tamaño de partícula) y la interpretación e interpolación de los datos experimentales en términos de una etapa controlante de la cinética o quizá de una combinación de tales etapas (Sohn, 1986).

A partir de un gráfico en el que se analice el grado de reacción en función del tiempo, se pueden obtener conclusiones válidas con respecto a la etapa controlante de la cinética, un ejemplo de ello lo proporcionaron Quets *et al.* (1957) al reducir placas de magnetita con hidrógeno a una presión de 0,86 atm; la naturaleza lineal de las curvas de reducción, acopladas con la elevada energía de activación, sugiere que el control se debe a la cinética química.

Un método similar fue usado por Lu y Bitsianes (1968) para estudiar la reducción de hematitas densas naturales y sintéticas con hidrógeno y con monóxido de carbono. Los especímenes utilizados tenían la forma de cilindros o de paralelepípedos rectangulares y se les aplicó un recubrimiento impermeable de porcelana en algunas de las superficies exteriores, es decir, la superficie curva en el caso de cilindros. De esta manera, la reacción se limitó a una interfase planar que retrocedió con área constante; en estos experimentos la difusión a través de la capa de ceniza presentó una resistencia significativa.

Estos autores al estudiar la sección pulida de un pelet de hematita sinterizada parcialmente reducida con hidrógeno llegaron a la conclusión que las múltiples reacciones que ocurren durante la reducción de menas de hierro, en el caso de óxidos con baja porosidad, suceden dentro de una estrecha región del pelet o de la mena en trozos; por ello consideraron que la magnetita tuviera casi la misma (baja) porosidad que la hematita inicial, mientras que en la wustita sería ligeramente mayor.

Lo antes planteado explica la dificultad de las interfases de reacción hematita - magnetita y magnetita - wustita para avanzar mucho más allá de la interfase hierro - wustita; hacerlo requeriría de la difusión de reactivo y productos gaseosos a través de una capa más gruesa y de baja porosidad. Spitzer *et al.* (1966) presentaron una extensión del modelo del núcleo que se encoge en el cual se da margen a la existencia de tres interfases de reacción dentro de un pelet de hematita que se está reduciendo a hierro.

Para un pelet esférico no poroso, el tiempo para alcanzar un porcentaje determinado de reducción es proporcional al tamaño del pelet en el caso de control por la etapa química, y proporcional al cuadrado del tamaño del pelet, para el caso de control por difusión; la mayoría de las investigaciones fueron realizadas en mena natural o sintética de baja porosidad.

En la actualidad, las menas naturales con una elevada porosidad, así como los pelets porosos representan una proporción considerable de la alimentación de los agregados de reducción directa, como consecuencia, el interés en la cinética de reducción de los óxidos porosos ha aumentado en los últimos años.

Turkdogan *et al.* (1971, 1972), realizaron en la compañía U. S. Steel una serie de experimentos sobre la reducción de menas de hierro porosas. La atención se enfocó en la reducción con hidrógeno y con monóxido de carbono de una hematita natural venezolana con aproximadamente 30 % de porosidad y $18 \text{ m}^2/\text{g-mol}$ de área superficial de poros. Se estudió un intervalo de temperatura entre 200 y 1 200 °C y tamaños de partícula entre 0,35 y 15 mm, lo cual capacitó a estos investigadores para explorar los regímenes de control químico y control por difusión.

La mayoría de las partículas utilizadas fueron esféricas, pero también se realizaron algunos experimentos de reducción "unidireccional". En ellos el óxido se encerró en un tubo cerrado

por un extremo. Bajo las condiciones de control químico, la velocidad debía permanecer constante en tales experimentos, mientras que para el control por difusión, la velocidad debía disminuir con el transcurso del tiempo (las trayectorias por difusión y por consiguiente, la resistencia difusional, aumentan con el transcurso del tiempo).

Turkdogan *et al.* (1971) encontraron que el tiempo necesario para alcanzar una determinada extensión de reacción no fue proporcional al diámetro de partícula, como sería el caso si la reacción hubiera ocurrido de acuerdo con un modelo de control químico con núcleo que se encoge. Se observaron amplias zonas de reacción para la reducción wustita - hierro, las cuales aumentaron en espesor al aumentar la temperatura y la porosidad, en conformidad con las ideas expuestas en este epígrafe. La reacción de un sólido poroso con un fluido ocurre dentro de una amplia zona de reacción dentro del sólido.

Para el estudio de la cinética de los procesos de reducción hay que tener en cuenta que las reacciones sólido - sólido ocurren vía intermediario gaseoso, por lo que pueden ser consideradas como reacciones gas - sólido acopladas.

En las primeras investigaciones teóricas realizadas por Turkdogan (1978) fue analizada la cinética de las reacciones sólido - sólido para las condiciones específicas en las que una de las reacciones gas - sólido controlaba la reacción global. Así la rapidez de reacción podía representarse a partir de las consideraciones de la velocidad de la mencionada etapa controladora, el criterio para el cual la reacción es controladora de la rapidez bajo esas condiciones no se estableció, se confió en la observación experimental para la determinación de la mencionada etapa controlante.

Los estudios de la reducción carbotérmica de la ilmenita, por El-Guidny y Davenport (1970) y la reacción entre óxido de cromo y carbono por Maru *et al.* (1973), hacen uso de la suposición de la mencionada etapa controlante. Tales estudios representan avances significativos en la presentación cuantitativa de las velocidades de reacciones sólido-sólido, aunque se puede disponer de una base teórica que establezca un criterio para determinar la reacción controlante. Esto resultaría de gran importancia, especialmente para aquellas reacciones cuya etapa controlante puede cambiar bajo diferentes condiciones de reacción.

Un primer avance en esta dirección lo lograron Sohn y Szekely (1973), quienes consideraron reacciones entre sólidos, las cuales ocurren vía intermediarios gaseosos, controladas por la cinética química.

1.4. Generalidades acerca del proceso de molienda

La problemática en torno al proceso de molienda de la mena laterítica ha sido estudiada por varios autores: Lago (1989), Bustamante (1989), Coello y Llorente (1992), Coello (1993a, 1993b), Coello y Tijonov (1996), Aldana y Legrá (1996), Coello y Llorente (2001), Aldana y Legrá (2002), Laborde y Coello (2002), Llorente (2003).

En el molino (figura 1.1) debido a los regímenes de velocidades de trabajo del mismo, existen tres formas de molienda que son: el de catarata, en cascada y la combinación de ambas.

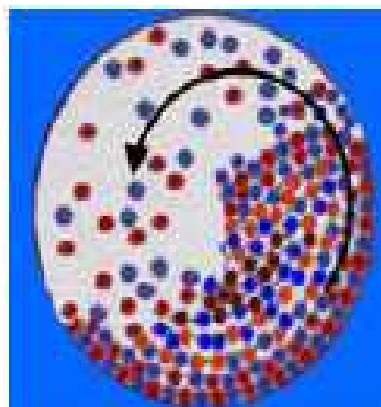
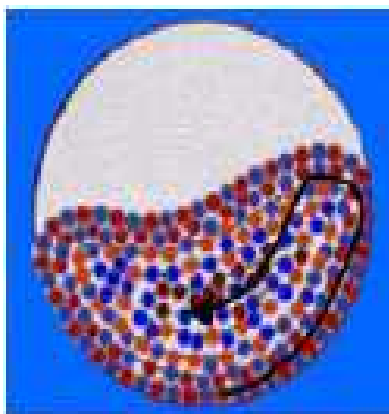


Figura 1.1 (a) Movimiento en cascada. Figura 1.1 (b). Movimiento en catarata.

Las figuras muestran el movimiento de las bolas en el interior del molino en los procesos de molienda seca. El primero ocurre cuando la frecuencia de rotación del molino es baja y se caracteriza por el rodado de unas bolas sobre otras de forma paralela. Aquí la molienda se realiza principalmente por aplastamiento y por frotación de las bolas que ruedan, de aquí que sean afectadas fundamentalmente las partículas pequeñas. El segundo ocurre a medida que se va aumentando la frecuencia de rotación del molino. En este caso las bolas salen de sus trayectorias circulares, y como cuerpos lanzados en ángulos con respecto al horizonte van a caer de nuevo a las trayectorias circulares en forma de cataratas.

Bajo este régimen de cataratas, la molienda se efectúa principalmente por el golpe de las bolas que caen y parcialmente por el desgaste. En los molinos es difícil separar estos dos

movimientos de las bolas, por eso se dice que el proceso de molienda se efectúa bajo el régimen mixto cascada - catarata.

En la molienda, la energía de desmenuzamiento al material ocurre de forma desmedida, el grado de liberación necesario se alcanza a costa de una alta remolienda de uno o varios de los minerales participantes, de ahí su baja eficiencia.

Andreiev *et al.*, (1980), establecieron que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera el 3 % de toda la energía consumida por el molino, Beke (1964) determinó que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no supera el 0,6 %. Independientemente de la diferencia en los resultados de ambos investigadores, la energía que se consume propiamente en el rompimiento de la partícula mineral es sumamente pequeña (Coello, 1992). En la dinámica de la molienda existen muchos trabajos que relacionan la carga de bolas de los molinos con su consumo energético como son los trabajos de Coello (1993) y Laborde (2005), pero existe la posibilidad de seguir investigando sobre la influencia de la carga de bola con relación a la productividad de los molinos y el comportamiento de su eficiencia.

El análisis de la distribución del tamaño de las bolas en el molino ha sido de interés para muchos investigadores y aparecen en la literatura especializada trabajos (Banisi; Farzaneh, 2006) donde se analiza la distribución de tamaño de las bolas en el interior del molino para un proceso de molienda de mineral de cobre, donde se utilizan bolas únicamente de 80 mm de diámetro y luego se experimenta con una combinación de 75 y 25 % de bolas de 80 y de 60 mm respectivamente, llegándose a la conclusión de que con esta combinación era posible obtener un incremento del 4 % en el producto final (mineral con fineza $< 0,074 \mu\text{m}$).

Autores como Kotake *et al.*, (2002), establecen expresiones empíricas que relacionan la constante de la velocidad de la molienda con los diámetros de las bolas y se llegan a las conclusiones que las variaciones de la constante adimensional de la velocidad de molienda con el tamaño de alimentación fue aproximadamente análoga y fue independiente de los diámetros de las bolas y de los tipos de materiales.

La mayoría de los autores coinciden en identificar el tamaño de las partículas, la carga de bolas, el tiempo de molienda, la densidad de las partículas y la velocidad del molino, como los factores más influyentes en el comportamiento del molino. En uno de los trabajos

consultados (Sahoo y Roy, 2008), tratan de correlacionar todas estas variables con la molibilidad sobre la base del análisis dimensional y con el método del diseño factorial fraccionario. Se observa que estos parámetros influyen significativamente sobre el comportamiento del molino, de modo que a partir de las correlaciones obtenidas, se llega a la conclusión de que la cantidad de finos se incrementa bajo el efecto general del incremento de la carga de bolas, el tiempo de molienda y la velocidad del molino.

Sin embargo, con el incremento del tamaño de las partículas y de la densidad de las mismas disminuye la molibilidad. De los factores considerados, el más influyente es la velocidad, por lo que cuando se quiere optimizar el proceso con respecto a otros parámetros debe mantenerse un estricto control sobre la misma.

1.4.1. Consumo de energía en el proceso de molienda

La práctica mundial ha demostrado que en las plantas de Beneficio alrededor del 85 % del consumo de energía corresponde precisamente al desmenuzamiento y a la molienda y aproximadamente 75 % a la molienda. El nivel del grado de eficiencia de la molienda es objeto de controversia, según la definición que se adopte. De acuerdo con interpretaciones muy diversas, la energía que el molino requiere para transformarla en trabajo de desmenuzamiento queda situada entre el 2 y el 20 %, el resto se distribuye en rozamiento de las partículas entre sí, rozamiento de las partículas con las paredes del molino, ruido, calor, vibración, rendimiento del motor y del molino y elevación del mineral en el molino.

El alto consumo de energía en las máquinas de trituración y molienda se considera como uno de los elementos fundamentales dentro del proceso de beneficio. El equipamiento disponible para la trituración y molienda de minerales carece de un principio organizativo que le permita suministrar al máximo la energía suministrada en el rompimiento de las partículas minerales (Coello y Tijonov, 2001).

El grado de utilización de la energía suministrada, teóricamente baja, ofrece más interés en los dispositivos de molienda que para la explotación práctica, en la cual la energía aplicada a la molienda se puede considerar baja en relación con las ventajas del resultado tecnológico que con ella se obtiene. La preparación mecánica de los minerales se puede definir como el conjunto de operaciones, tecnológicamente relacionadas entre sí, cuyo

objetivo principal es preparar el mineral para su ulterior tratamiento mediante la transformación física de la materia prima mineral.

Coello y Llorente (1992) realizaron un estudio acerca de la influencia de las variables operacionales en los indicadores energo - tecnológicos de la planta de molienda con ayuda de un experimento factorial completo.

En este estudio, los autores lograron reducir la carga de bolas en un 5 % con el consecuente ahorro energético. La optimización de las variables operacionales con ayuda de un experimento factorial completo permitió reducir el consumo energético en 0,6 kWh/t (Coello y Llorente, 1993; Coello, 1993b) y productividades por encima de las 100 t/h. Sin embargo, estos resultados se vieron limitados por la introducción del petróleo aditivo en la alimentación de los molinos a finales de 1992.

Stamboliadis (2006), considera que en la teoría de la conminución deben considerarse dos partes, una dedicada a la energía que se requiere para la fractura de la partícula del mineral y otra dedicada a cómo se distribuye esta energía entre las partículas después de la fragmentación. Este autor utiliza el concepto generalmente aceptado en el cual se asume que la parte útil de la energía de la conminución es utilizada para crear nuevas superficies y encuentra una relación entre un tamaño característico del producto del molino y la energía consumida para la molienda, llega a la conclusión de que la energía específica superficial es una propiedad física de los materiales y que puede ser utilizada como un indicador universal que caracteriza su movilidad independiente del tipo de molino y de su eficiencia.

1.4.2. Índice de Bond en los procesos de molienda

Bond (1952) planteó que el trabajo necesario para romper un cubo de lado d es proporcional al volumen d^3 de dicho cubo; pero al formarse la primera grieta, la energía fluye a las nuevas superficies resultantes, que serán proporcionales a d^2 .

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda (Lynch, 1980). El índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del 20 del pasado siglo XX (Mosher y Tague, 2001). En diversos trabajos se dan indicaciones prácticas para facilitar la determinación del índice de Bond, con diferentes tipos de materiales (Deister, 1987; Leving, 1989; Lewis y peral, 1990; Aksani y Sonmez, 2000 y Aguado, 2001).

López (1988), describe un método de laboratorio para el estudio de los parámetros característicos del proceso de molienda. El estudio se realiza a partir de experimentos en un molino estándar y la aplicación de la tercera teoría de Bond, los que permite obtener los parámetros energéticos del proceso que, posteriormente se utiliza en el dimensionado de los molinos industriales.

Reina (2004), efectúa el cálculo del índice de trabajo de Bond para los minerales lateríticos y se determina el valor real de consumo de energía para la molienda y la influencia que esta tiene sobre la variación del porcentaje de serpentina en la alimentación.

Lafargue (2005), estudia el consumo específico de energía para la laterita del proceso industrial mediante la prueba de Bond. Además determina el índice operacional real de la sección de molienda de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" el cual es comparado con el obtenido mediante la prueba de Bond, con el objetivo de valorar el comportamiento de la eficiencia energética y la productividad de los molinos industriales, analiza la posibilidad de incrementar la productividad de los molinos así como una disminución de los costos de producción.

Núñez y Pérez (2003), realizan una investigación en la cinética de molienda en los minerales lateríticos, para la fragmentación, obteniéndose con estos un modelo matricial que caracteriza el comportamiento de la molibilidad del material analizado, a pesar de la investigación realizada, no se aborda el tema del beneficio de la mena que se alimenta.

Ozkahraman (2005) considera que la friabilidad de rocas y de minerales se puede determinar por las pruebas de la fragilidad. Un aparato de la prueba para determinar valor de la friabilidad ha sido diseñado para satisfacer las características de la fuerza de la piedra caliza usadas en la producción del cemento. Los valores de la friabilidad de la baritina, mármol, piedra caliza y la bauxita se ha determinado y se ha comparado con el (G) en enlace correspondiente del índice del trabajo (W_i) y del índice de abrasividad de éstos materiales. Las características físico mecánicas de los materiales analizados se encontraban con altas correlaciones (0,99 y 0,97).

Menéndez-Aguado (2004), plantean que el índice de trabajo es uno de los parámetros más útiles y más interesantes usados en diseñar equipo de molienda. Sin embargo, debe ser

obtenido bajo condiciones refrenadas, especialmente en respeto al molino estándar de laboratorio.

1.5. Concentración magnética

A los métodos especiales de enriquecimiento habitualmente se refieren los métodos magnético, eléctrico y algunos otros métodos de enriquecimiento, por ejemplo el enriquecimiento por el color, rozamiento, forma, grosor, resistencia. Los métodos magnéticos se usan ampliamente para el enriquecimiento de los minerales de metales ferrosos y raros, la regeneración del ferrosilicio y la magnetita en instalaciones para la separación de los materiales en suspensiones pesadas y virutas de hierro colado; para la extracción de las impurezas ferruginosas de los abrasivos, de las materias primas de vidrio y cerámica; para la extracción de objetos de hierro casuales en distintos materiales con el fin de evitar la rotura de las trituradoras para extraer la chatarra de hierro de las escorias de la producción metalúrgica (Dercach, 1981).

Para el enriquecimiento de los minerales débilmente magnéticos, los métodos magnéticos se emplean más raramente en comparación con el enriquecimiento de los minerales de magnetita, al enriquecimiento magnético en separadores con campo fuerte se someten los minerales manganíferos, de limonita y de siderita los concentrados bastos de minerales de los metales raros, las arenas cuarzosas, pegmatitas, los feldespatos, materiales abrasivos y otros (Dercach, 1981).

El método magnético de enriquecimiento de los minerales está basado en la utilización de la variedad de las propiedades magnéticas de los componentes del mineral o material que se someten a la separación. El enriquecimiento magnético se realiza en separadores magnéticos, sus particularidades características son la existencia de un campo magnético en sus zonas de trabajo. Al moverse el mineral o material a través del campo magnético del separador, bajo la influencia de la fuerza de atracción magnética, las partículas con distintas propiedades magnéticas se desplazan por diferentes trayectorias, lo que permite separar las partículas magnéticas de las partículas amagnéticas, en algunos separadores se prevé la separación de varios productos magnéticos diferentes entre sí (Dercach, 1981).

Considera además de la fuerza de atracción magnética, sobre las partículas de material que se desplazan por la zona de trabajo del separador, influyen las fuerzas mecánicas, la fuerza



de gravedad y en algunas construcciones de las máquinas, también la fuerza centrífuga y la resistencia del medio al movimiento de las partículas. Durante la separación de partículas finas, influye fuertemente la fuerza de cohesión molecular, condicionada por la gran superficie específica del material fino (Dercach, 1981).

Para la separación de las partículas magnéticas y amagnéticas en el campo magnético del separador, la fuerza magnética de atracción que actúa sobre las partículas magnéticas debe superar a la resultante de todas las fuerzas mecánicas, incluyendo también las fuerzas de cohesión y de resistencia del medio (Dercach, 1981).

La separación magnética de las colas por la vía Separación Magnética Húmeda de Baja Intensidad (SMHBI) ha sido ampliamente estudiada desde la escala de laboratorio hasta la piloto (Leyva, 2007).



1.6. Conclusiones del capítulo 1

- ✚ Según las literaturas consultadas, se pudo establecer que las menas y minerales de hierro cubanos, los residuales sólidos de la empresa "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro han sido los más estudiados desde la escala de laboratorio hasta la industrial, no siendo así el Yacimiento Hierro Santiago, que aunque se han realizados estudios, aún los mismos son incipientes.
- ✚ El empleo de la combinación entre el concentrado de Hierro Santiago y las colas negras de las empresas del proceso CARON, se realiza con el objetivo de enriquecer de los minerales débilmente magnéticos, teniendo en cuenta que el primero no es una fuente a largo plazo de extracción de mineral.
- ✚ Para la obtención de concentrado de hierro para ser empleados en las diferentes industrias mundiales, deben ser procesados a través de disímiles procedimientos metalúrgicos para obtener el producto final.

Capítulo 2

Materiales y métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, el desarrollo de los materiales ha ido de la mano con el avance tecnológico y en consecuencia de su desarrollo social, ya que en gran medida el descubrimiento o creación de nuevos materiales inciden sobre el ritmo de vida de la sociedad. Un ejemplo claro es cómo las diferentes épocas de la historia humana han sido definidas con base en los materiales que el hombre podía dominar, como edad de piedra, edad de hierro, edad de bronce.

En el capítulo se plantea como objetivo establecer el procedimiento metodológico para la obtención de un concentrado de hierro para la producción de acero al carbono a partir de los yacimientos minerales de la provincia.

2.2. Análisis químico

Las muestras para análisis químico se prepararon por el grupo de control de calidad del Centro de Investigaciones Siderúrgicas y los análisis químicos se realizaron en el laboratorio del CEDINIQ en Nicaro, a las mismas se les determinaron contenidos de Fe total, S, P y los óxidos CaO, MgO, Cr₂O₃, SiO₂, Al₂O₃ y FeO, a la muestra inicial, a las clases obtenidas en el análisis granulométrico a la muestra del producto de la trituración y a los productos de la concentración magnética. En la tabla 2.1 se muestra la composición química del concentrado en %.

Tabla 2.1. Composición química de los productos elaborados a partir de los concentrados

Concentrado de hierro									
Arrabio									
C	Cr	Si	Mn	Co	Ni	P	S	Cu	Fe
4,40	1,38	0,98	0,84	0,08	0,30	0,088	0,029	0,08	ND
Acero.									
0,064	0,21	0,037	0,04	ND	0,29	0,008	0,023	0,08	ND
0,085	0,15	0,042	0,29	ND	0,26	0,008	0,021	0,074	ND
0,052	0,082	0,036	0,36	ND	0,25	0,008	0,016	0,069	ND
Concentrado de cromita									
Ferrocromo									
6,48	55,20	3,83	ND	ND	ND	ND	0,0132	ND	21

Como se observa en la tabla, los elementos fundamentales que constituyen el concentrado son el carbono y el cromo. En la obtención de la composición química mostrada y para lograr la representatividad de la muestra, se extrajeron 525 kg de mineral de hierro del Sector Yuca del Yacimiento Hierro Santiago mediante la perforación con barrenas de espiral o sinfín de 115 mm de diámetro a 3 m de intervalo de sondeo por muestreo y más del 95 % de recuperación.

2.3. Materiales y equipos empleados

La selección de materiales y equipos empleados se realizaron en correspondencia del proceso de beneficio a realizar con el concentrado obtenido del yacimiento, los mismos fueron los siguientes:

- ✚ Triturador de mandíbulas,
- ✚ Separador magnético de imán permanente.
- ✚ Separador magnético de imán permanente KWD 15.18.
- ✚ Tamices: se seleccionaron según la escala estándar de Taylor con módulo $2^{1/2}$ con base 74 mm,
- ✚ Tanque de preparación de pulpa, $0,144 \text{ m}^3$,
- ✚ Máquina computadora,
- ✚ Cuarteador en cruz,
- ✚ Cuarteador Jones,
- ✚ Brocha,
- ✚ Bandejas de acero inoxidable
- ✚ Pesa digital de hasta 50 kg.

2.4. Toma y preparación de la muestra en el yacimiento

La muestra entregada por la Empresa de Geominera Oriente, de Santiago de Cuba (EGO). Consistió en 20 bultos, los que fueron pesados en una báscula, el peso unitario estuvo entre 25 y 26 kg lo que hizo un total de 525 kg. Posterior a la recepción de la muestra fue suministrado el pasaporte de la misma, coincidiendo la información con lo antes expuesto, además en el pasaporte se plasma que la misma es de 2,27 t, que se considera representativa por las características del yacimiento, correspondiendo en proporción, la cantidad contenida en cada saco, a la proporción del sector donde fue tomada, con relación al volumen del

yacimiento. A continuación se expone el trabajo realizado con dicha muestra en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas (DSIT).

2.4.1. Determinación de las características de grosor

Para determinar las características granulométricas de la muestra inicial, se les median tres dimensiones a los pedazos de rocas: largo (lado de mayor longitud de la roca), alto (lado de menor longitud) y ancho (lado de longitud intermedia entre los dos anteriores) y se determina el tamaño de la partícula como el valor de la media aritmética de las tres mediciones.

Mientras que para la determinación de la característica de grosor de los productos de la trituración y la molienda, se utilizaron tamices seleccionados según la escala estándar de Taylor con módulo $2^{1/2}$ con base 74 μm , en caso de que faltara algunos de los tamices según esta escala, se tomó el de abertura más próximo a la que correspondía. El análisis de tamiz a los productos triturados, se realizó por vía seca y a los productos de la molienda por vía húmeda.

2.4.2. Preparación y selección de las muestras para los ensayos en el DSIT

El contenido del lote de 20 bultos (sacos), se trituró en la trituradora de mandíbulas figura 2.1), para lograr una primera homogeneización a la trituradora se alimentaban indistintamente trozos del material tomados en los sacos al azar. A la par se tomaban trozos aleatoriamente para determinar la característica granulométrica de la muestra. El producto resultante de la trituración, se homogeneizó y por cuarteos sucesivos, esta vez en un divisor de Jones, se seleccionan una muestra de 25 kg para caracterización granulométrica y química.



Figura 2.1. Muestra obtenida del yacimiento triturado.

Posterior a la homogeneización se tomaron cinco muestras para determinar el ángulo de reposo del material triturado, posteriormente las cinco masas de muestras se reincorporan a la muestra general. Para la selección de las muestras para análisis químico y granulométrico, los 25,00 kg de muestra, son sometidos a cuarteo sucesivos, la mitad del primer cuarteo se aparta para la caracterización granulométrica del producto triturado que además servirá para determinar la categoría de triturabilidad de la mena en trituradora de mandíbulas.

La otra mitad del primer cuarteo, en cuarteos sucesivos hasta el quinto cuarteo donde la masa de muestra de 1,56 kg se somete a una reducción de tamaño hasta aproximadamente 2,00 mm, en un molino de disco para pulverizar muestras en el laboratorio (figura 2.2); al producto obtenido después de la reducción, se somete a cuatro cuarteos continuados hasta disminuir la cantidad de muestra hasta 98 g que se pulveriza y se envía al laboratorio para análisis químico cuantitativo, análisis de humedad y determinar el peso específico volumétrico; las porciones que van quedando de los cuatro cuarteos anteriores se unen y se guardan como testigo.



Figura 2.2. Muestra de mineral molido.

El objetivo es obtener, por vía del beneficio magnético, un concentrado de hierro de posible uso en la producción de acero en las condiciones de Cuba. Para ello en primera instancia se concibe el estudio de caracterización de la materia prima, con posterioridad, según el desarrollo de la investigación y la solución paulatina de las necesidades para la ejecución de los ensayos, se planteó el estudio en dos estadios, el de preparación mecánica y el de

beneficio por separación magnética húmeda a baja intensidad. Por lo que la investigación se presenta dividida en cuatro etapas:

I etapa: Caracterización de la materia prima.

II etapa: Preparación mecánica o reducción de tamaño de la materia prima.

III etapa: Concentración magnética a baja intensidad.

IV etapa: Evaluación teórica, de la calidad del concentrado de Fe, para la obtención de acero.

La primera etapa como se muestra en la figura 2.3, contempló la caracterización de la materia prima, a la que se le realizó, análisis químico y determinación de las características de grosor, además se le determinó contenido de humedad, ángulo de reposo, peso específico volumétrico en el picnómetro y densidad de reposo a granel y compactada.

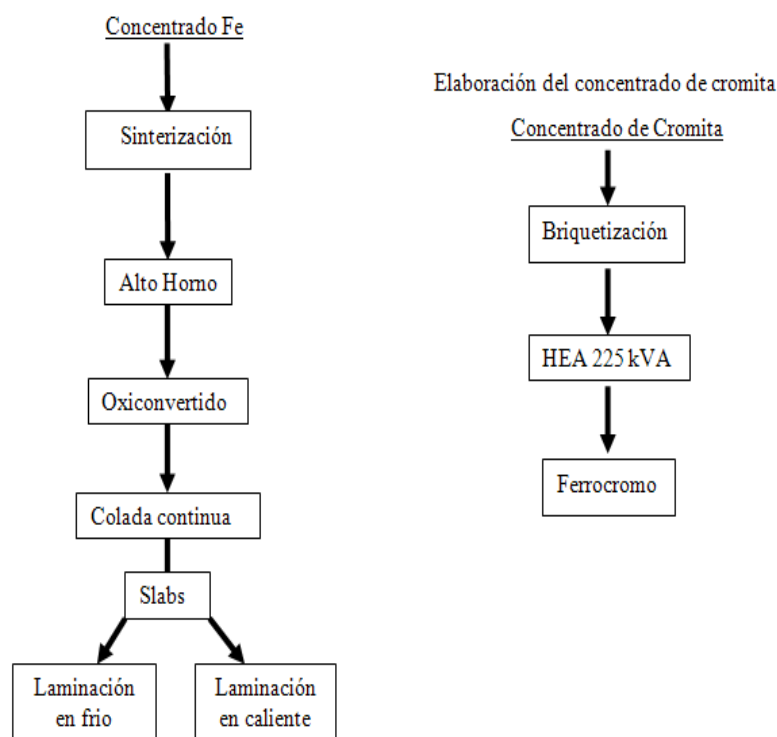


Figura 2.3. Diagrama del proceso para la elaboración de películas delgadas.

2.5. Preparación mecánica

Los resultados trabajos realizados por García (1983) y Figueredo (1988), indujeron a utilizar la reducción de tamaño con el fin de alcanzar el tamaño más adecuado para su posterior concentración, por lo que se planteó la segunda etapa de la investigación la que se dividió en dos fases, la primera se realizó con la finalidad de obtener la curva de características tipo de grosor del producto triturado en trituradoras de mandíbulas, que con

posterioridad permita obtener información sobre algunas condiciones que hay que tener en cuenta en la primera operación de preparación mecánica.

El procedimiento seguido fue el siguiente, la muestra preparada, 100 % del tamaño de los trozos superior a 12,70 mm fue sometida al proceso de trituración en una trituradora de mandíbulas de laboratorio como se muestra en la figura 2.4.

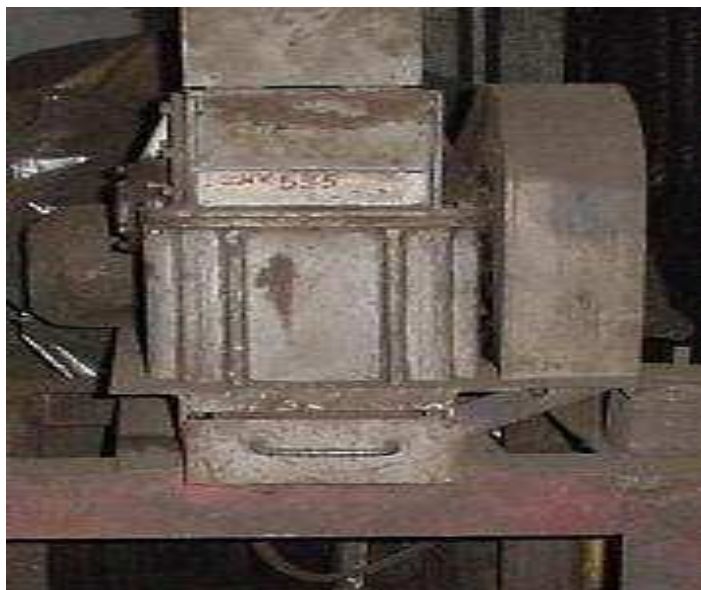


Figura 2.4. Trituradora de mandíbulas.

En la tabla 2.2 se muestran las características de la trituradora de mandíbulas.

Tabla 2.2. Características de la trituradora de mandíbulas

Trituradora de mandíbulas	Dimensiones
Dimensiones de la abertura de alimentación, mm	
- Ancho	60
- Largo	100
Ancho de la rendija de salida, mm	3 - 13
Tamaño máximo de los trozos a fragmentar, mm	menor que 150
Se trabajo con rendija regulada, mm	5

La determinación de la categoría de triturabilidad de la mena se apoyó en el análisis de la característica tipo de grosor de los productos triturados en trituradoras de mandíbulas. Los resultados del análisis granulométrico al producto triturado se llevaron al gráfico de características tipo de grosor de los productos quebrantados en trituradoras de mandíbulas dados por Razumov (1982).

Las condiciones para las que fueron confeccionados los gráficos correspondían al suministro a la trituradora de un material que no contenía granos de tamaño menor que la abertura de la boca de salida de la trituradora o sea, cuando el orificio de la criba estaba en correspondencia con la anchura de la salida de la trituradora ($a = i$), mientras que la eficiencia del cribado (E) se consideraba igual al 100 %. Semejante régimen se mantuvo durante los ensayos, además se procuró mantener que la alimentación a la trituradora fuera constante y que la cámara de la misma se mantuviera siempre con material a triturar, es decir que en ningún momento trabajara en vacío.

En las condiciones descriptas anteriormente se realizó la trituración, se tomó una muestra de 25 kg para análisis químico y análisis granulométrico, del primer cuarteo se seleccionaron 12,5 kg para el análisis granulométrico vía seca. El resto del mineral triturado se envió al CEDINIQ, para su molienda 100 % por debajo de 0,150 mm, a la muestra molida se le realizó análisis granulométrico vía seca.

2.5.1. Separación magnética seca

Para esta operación se empleó un separador magnético de imán permanente vía seca del tipo KAPDHE – 1 como se muestra en la figura 2.5.

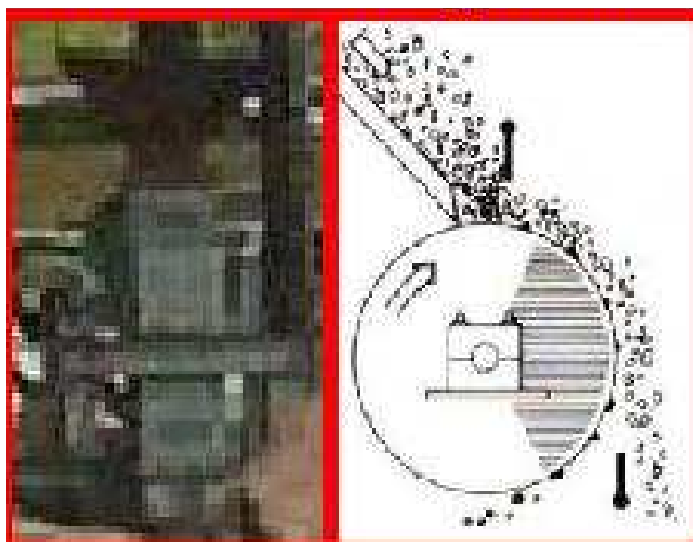


Figura 2.5. Separador magnético vía seca KADE-1

El KAPDHE - 12.6 tiene una intensidad del campo magnético en la superficie del tambor de 67 kA/m. El separador consiste de una unidad de imán permanente estacionaria, que está montada dentro de una estructura cilíndrica giratoria no magnética. Está proyectado para

separar hierro y acero de una variedad de productos industriales y sus polos alternos muy cercanos producen fracciones magnéticas y no magnéticas bien definidas.

Las dimensiones del tambor son: $D \times L = 22,86 \times 25,40$ cm. Está dotado de una unidad de velocidad variable, que da al tambor una gama de velocidades desde 40 hasta 100 rev/min. Se trabajó a 50 rev/min.

Se realizaron cinco ensayos de separación magnética seca, a la muestra de mineral Hierro Santiago triturada.

De los ensayos de trituración y SMS se seleccionaron (tres) muestras para el control del proceso, (alimentación, fracción magnética y fracción no magnética) las que se prepararon convenientemente y se enviaron al laboratorio químico del CEDINIQ para análisis.

2.5.2. Separación magnética húmeda

En la figura 2.6 se muestra el equipo empleado para la obtención del concentrado de Fe. El mismo cuenta de una operación básica, tres limpiezas del concentrado, una de control del rechazo de la operación básica y dos operaciones de control de los productos medios, el producto final es la unión del concentrado de la tercer limpieza con el concentrado de la segunda operación de control de medios.



Figura 2.6. Separador magnético vía húmeda, KWD 15.18.

Como características distintivas de este equipo es que presenta dimensiones como:

$D \times L = 38,10 \times 45,72$ cm e intensidad del campo magnético en la superficie del tambor 87,58 kA/m. Vía húmeda. La velocidad de rotación fue 22,0 rev/min y un caudal máximo en la alimentación 16 m³/h, se trabajó a 5 m³/h.

Se realizaron 5 ensayos variando el contenido de sólido en la pulpa desde 14 hasta 38,4 %, fijada las condiciones de trabajo se realizó la separación magnética con un contenido de sólido en la pulpa de 29,30 %.

En la figura 2.8 se muestra el esquema empleado para la obtención del concentrado de Fe. El mismo cuenta de una operación básica, tres limpiezas del concentrado, una de control del rechazo de la operación básica y dos operaciones de control de los productos medios, el producto final es la unión del concentrado de la tercer limpieza con el concentrado de la segunda operación de control de medios.

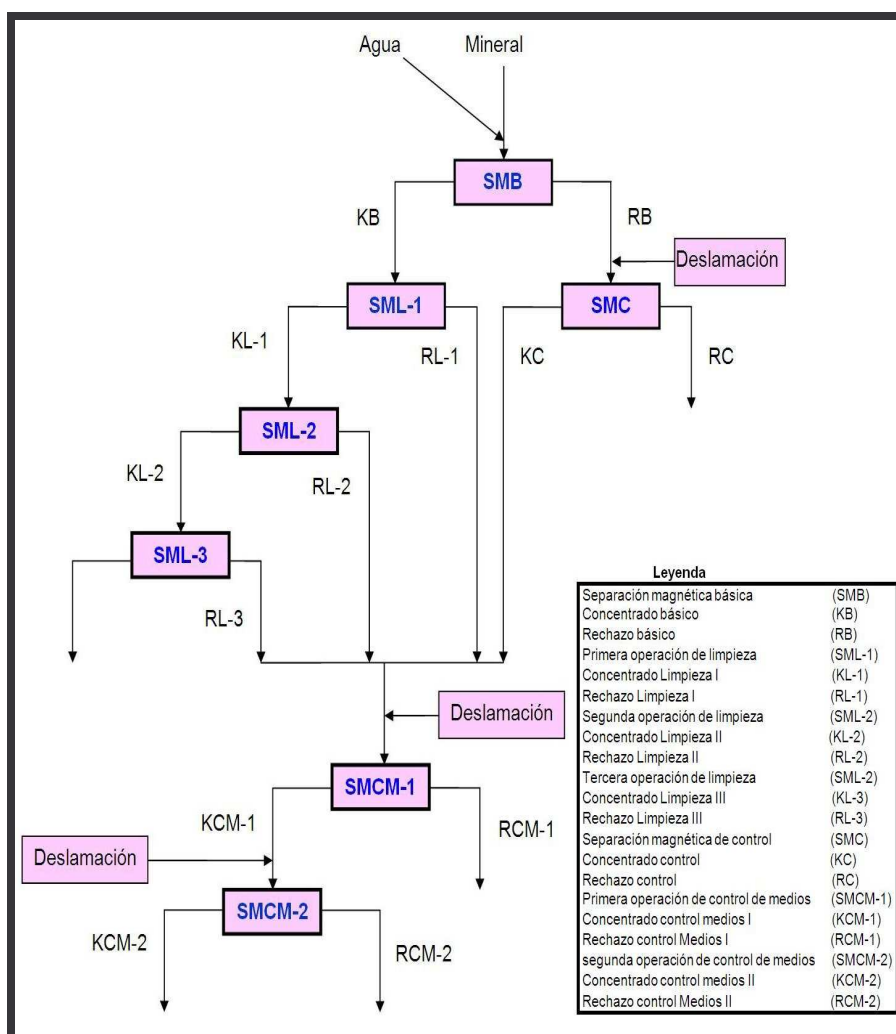


Figura 2.8. Esquema empleado para la obtención del concentrado de Fe.

Por su parte en la molienda fueron objeto de estudios, los parámetros energéticos del proceso deducido mediante la aplicación de la Tercera Teoría de Bond, otro aspecto estudiado fue la cinética del proceso de molienda, vale señalar que los resultados son orientativos, primero: porque el valor del índice de trabajo de Bond, del material de referencia se tomó de la literatura.

Conocidas las características del molino se calcularon, el diámetro máximo del mineral que debíamos alimentar al molino, las cargas de bolas necesarias en el molino, la cantidad de mineral y agua necesarios para preparar las pulpas.

El tamaño máximo de las bolas utilizadas para la molienda, $D_{m\acute{a}x}$, en mm debe corresponderse con el tamaño de los pedazos del mineral que ingresa al molino (d^+ , en mm). Razumov (1982), propone determinar el diámetro máximo de los elementos trituradores por la ecuación siguiente:

$$D_{m\acute{a}x} = 28(d^+)^{1/3} \quad (2.1)$$

Por despeje obtenemos la ecuación 2.2 para calcular el mayor diámetro del mineral que debe ingresar al molino.

$$d^+ = \frac{D_{m\acute{a}x}^3}{28^3} \quad (2.2)$$

Antes de realizar la molienda se preparó el molino, para ello se determinó el volumen del molino (V) igual a 5,5 litros, esta operación se realizó llenando el molino con agua y determinando con una probeta graduada la cantidad de agua que cabe en el mismo.

La operación de molienda se realizó en régimen discontinuo de operación, los cuerpos moledores han sido bolas de acero, a las que se les midieron los diámetros y determinaron las masas de las bolas que se emplearían; a partir de estos datos se calculó el volumen de las bolas considerándolas esferas perfectas y su densidad real, estimándose finalmente la densidad aparente de las mismas, teniendo en cuenta la contribución de cada grupo de ellas al peso total de los cuerpos moledores. En la tabla 2.3 se muestran las dimensiones de las bolas utilizadas.

Tabla 2.3. Dimensiones y peso de las bolas utilizadas.

Diámetro, de las bolas, cm	Peso unitario, kg	Volumen de las bolas, cm ³	Densidad de las bolas, kg/cm ³
4,32	0,34	42,36	7,97
3,607	0,20	24,56	8,09
3,206	0,13	17,24	7,94
2,771	0,11	11,13	8,98
Valor medio			8,24

Conocido el volumen del molino y las características de los cuerpos moledores, se determinó la cantidad de bolas necesarias para completar el coeficiente de llenado del molino. El volumen ocupado por los cuerpos moledores se ha estimado considerando que las bolas forman un lecho que produce un 40 % de huecos (Andreiev, 1982 y López, 1985).

La masa del volumen de bolas de acero durante el llenado de la carga que constituye el 60 % según Andreiev (1982), se determina como:

$$\gamma = V_{med} \cdot 0,60 \quad (2.3)$$

Donde:

V_{med} - valor medio de las bolas; kg/cm³

A la masa de carga de bolas (M_{cb}) en el molino con las dimensiones exteriores $D \times L$ (en m) teniendo el grado de llenado de su volumen φ , en parte de la unidad, se determina por la ecuación:

$$M_{cb} = \varphi \left(\frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \right) \gamma \quad (2.4)$$

Siendo $\left(\frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \right)$ igual al volumen del molino; en m³, por tanto:

Para $\varphi = 0,50$

$$M_{cb} = \varphi \cdot V \cdot \gamma \quad (2.5)$$

Para $\varphi = 0,40$

$$M_{cb} = \varphi \cdot V \cdot \gamma \quad (2.6)$$

Para molienda húmeda, la densidad de la pulpa en el molino se calcula como:

$$\Delta = \frac{\delta_p}{(\delta_p - (P(\delta_p - 1)))} \quad (2.7)$$

Siendo

Δ - densidad de la pulpa, t/m^3

δ_p - densidad del mineral, t/m^3

P - contenido de sólido en la pulpa (por la masa) en parte de la unidad.

La masa de la carga total en el molino (M_{CT}) será;

$$M_{CT} = M_{cb} + Q_p \quad (2.8)$$

Donde:

Q_p - masa de mineral alimentada al molino.

Siendo:

$$M_{CT} = \gamma_c \cdot V \cdot \varphi \quad (2.9)$$

Despejando en la ecuación 2.8 tenemos que:

$$Q_p = M_{CT} - M_{cb} \quad (2.10)$$

Siendo:

$$R_p : \frac{L}{S} = \left(\frac{1-p}{p} \right)$$

El volumen de pulpa se calcula como:

$$V_p = Q_p \left(\frac{R_p + 1}{\delta_p} \right) \quad (2.11)$$

La cantidad de agua necesaria para el volumen de pulpa calculado, será:

$$W_p = R_p \cdot Q_p \quad (2.12)$$

La cantidad de agua que acompaña al mineral (L_1 , en l/kg), de acuerdo al contenido de humedad del mismo (p_1):

$$R_1 = \frac{0,024}{(1-0,024)} \quad (2.13)$$

$$L_1 = R_1 \cdot Q_p \quad (2.14)$$

La cantidad de agua que hay que añadir será:

$$W_a = W_p - L_1 \quad (2.15)$$

Al producto después de la molienda, de cada ensayo se le realizó análisis granulométrico por vía húmeda.

2.5.3. Determinación del índice de trabajo de Bond

La facilidad de molienda de la mena se refiere a la sencillez con que los materiales se pueden reducir de tamaño, los datos de las pruebas de facilidad de molienda se usan para evaluar la eficiencia de la trituración y la molienda. El parámetro más ampliamente usado para medir la facilidad de molienda de la mena, sea el índice de trabajo de Bond. Bond ideó varios métodos para anticipar los requerimientos de energía de los molinos de bolas y los molinos de barras, los cuales proporcionan una medida exacta de la facilidad de molienda de la mena.

El índice de trabajo propuesto por Bond se utiliza para la determinación de la potencia requerida en la reducción de tamaño por la ecuación:

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (2.16)$$

Donde W_i es el índice de trabajo expresado en kWh/t, p es la abertura del tamiz a través del cual pasa el 80 % de las partículas del producto reducido, en micrones; F es la abertura del tamiz a través del cual pasa el 80 % del producto alimentado a la reducción.

La tarea por tanto, es determinar W_i , lo que solo puede efectuarse por la vía experimental, existiendo un test standard propuesto y a partir de este se han desarrollado otros.

El Test standard de molibilidad de Bond se ejecuta en un molino especial y bajo condiciones especiales (molino de Bond) de dimensiones 30,5 X 30,5 cm, con las esquinas redondeadas y sin rugosidad en la superficie interior. Tiene una abertura de alimentación de 10,2 X 20,4 cm y el tambor gira a 70 rev/min.

En ausencia de molino con esta características se han implementados varios métodos para determinar el índice de trabajo de Bond aproximado, con un margen de error promedio menor que el 10 % y como promedio de 5 %, comparado con el test estándar de movilidad de Bond (Falcón, 2000).

2.6. Conclusiones del capítulo 2

- Se establecieron las técnicas experimentales, a través de las cuales se le dará cumplimiento al desarrollo del trabajo, así como la caracterización de cada uno de los equipos y máquinas para validar los resultados a obtener.
- Se fundamentaron las propiedades a investigar, definiendo los principales parámetros a medir a partir del proceso de obtención del concentrado de hierro del Yacimiento Hierro Santiago.
- Se establecen los procedimientos como: separación magnética vía seca y húmeda, así como el proceso de trituración y molienda para la obtención del concentrado de hierro del Yacimiento Hierro Santiago.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

Los aceros y las fundiciones de hierro constituyen con gran diferencia el grupo de materiales metálicos industrialmente más utilizado, ya que se pueden fabricar en grandes cantidades y con costos relativamente bajos. Además, sus propiedades en general y las mecánicas en particular abarcan un intervalo muy amplio, que van desde productos con resistencias moderadas (200 - 300 MPa) y ductilidades altas hasta aquellos otros caracterizados por una de las resistencias mecánicas mayores en la gama de las aleaciones metálicas (2 000 MPa).

El objetivo del capítulo es fundamentar las características del concentrado del mineral del Yacimiento de Hierro Santiago para la obtención de un hierro para la producción de acero al carbono.

3.2. Resultados análisis químicos a la muestra inicial

En la tabla 3.1 se plasman los resultados del análisis químico, realizado a la muestra inicial en el laboratorio Elio Trincado de Santiago de Cuba, a cinco muestras tomadas durante la conformación de la muestra tecnológica de 525 kg.

Tabla 3.1. Resultados del análisis químico, % en peso

No Muestra	Fe total	P	S
M-1	52,40	0,014	0,17
M-2	52,90	0,009	0,16
M-3	58,00	0,023	0,12
M-4	52,10	0,001	0,44
Media aritmética	53,85	0,012	0,22

En la tabla se observa que los contenidos de P y S son bajos, se encuentran entre 0,002 y 0,014 % y entre 0,12 y 0,44 %, los cuales para estos tipos de minerales deben encontrarse entre 0,52 y 0,65 respectivamente, mientras que el Fe alcanza un valor medio de 53,85%, valor que corresponde con el del análisis químico de la muestra de control que se realizó en el laboratorio del CEDINIQ que está en un 54 %.

En la tabla 3.2 se presentan los resultados del análisis químico, realizado en el laboratorio químico del CEDINIQ y algunas propiedades determinadas a la muestra inicial del Sector

Yuca. Se puede observar que la misma se caracteriza por los altos contenidos de Fe y SiO₂ y bajos de los otros elementos, principalmente el NiO y el CoO.

Tabla 3.2. Composición química y propiedades determinadas a la muestra inicial del mineral del Sector Yuca.

Elemento u óxido	Fe	NiO	CoO	MgO	CuO	MnO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiO ₂
Contenido, %	54,00	0,032	0,010	0,89	nd	0,30	0,977	0,53	20,09
PPI, %	0,11	Densidad aparente, g/cm ³				nd	Ángulo de talud, °		34,47
PEV, g/cm ³	4,13	Densidad compactada, g/cm ³				nd			

PEV: peso específico volumétrico, en g/cm³

nd: no determinado

Las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro, constituyen una gran fuente de contaminación del medio ambiente. Decenas de millones de toneladas de este residuo sólido industrial se han almacenado en represas de colas. Estas están constituidas fundamentalmente por Fe, Si, Al, Mg, Cr, en menor cantidad Ni pequeñas cantidades de Bi, Co, Cd, Ti, Mo, P, K, Na, S, y C.

En 1983 en instalaciones de la antigua Unión Soviética se realizaron corridas industriales utilizando de concentrado de hierro, obtenido a partir de las colas, fueron obtenidas 3 100 t de sínter. El sínter fue procesado en un horno alto obteniéndose 1 650 t de arrabio de aleación al Cr - Ni con: Si: 0,98 %; Cr: 1,38 %; Mn: 0,84 %; S: 0,029 %; Co: 0,08 %; P: 0,08 %; C: 4,40 % y Ni: 0,30.

El arrabio fue procesado para producir acero en un oxiconvertidor, demostrando la posibilidad de obtención de aceros bajo al carbono (entre 0,05 y 0,07 %), pero con contenidos residuales de cromo altos (entre 0,15 y 0,30 %) por lo que no respondieron a los requerimientos de las normas GOST para ser destinados a la producción de hojalata blanca y estañada pero si para la elaboración de bobinas y chapas laminadas en caliente y en frío.

3.3. Análisis de los elementos moledores

El diámetro del molino, su velocidad y el diámetro de los elementos moledores son los elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplearon

elementos moledores de distintos tamaños, por la ecuación 2.2 se determinó que al calcular el diámetro medio del mineral (d^+) debe de estar próximo a 4 mm.

Por no contar con un tamiz de esta dimensión y el contenido de las clases entre - 12,7 y + 6,7 mm en el producto de la trituradora era de 6,36 %, se alimentó este directamente al molino, por lo que las características granulométricas del mineral alimentado al molino coinciden con la de salida de la trituradora de mandíbulas.

De este modo, la masa de volumen de la carga (γ_c) tomando en cuenta el llenado de los espacios vacíos entre las bolas con la pulpa será; para la carga de bolas con un valor medio de 8,24 kg/cm³ y un 60 %, un volumen ocupado por los cuerpos moledores se ha estimado considerando que las bolas forman un lecho que produce un 40 % de huecos y una densidad de la pulpa de 4,13 g/cm³, el volumen sería de 0,2547 m³.

En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo. Durante este proceso de molienda húmeda, el líquido tendrá además, un efecto refrigerante con los calores generados en el interior, requerirá menos potencia por tonelada tratada, no requerirá equipos adicionales para el tratamiento de polvos, pero tendrá como inconveniente mayor consumo de revestimiento por el efecto de la corrosión.

En la figura 3.1 (a) y 3.1 (b) se muestra la pulpa del mineral Hierro Santiago obtenida luego del proceso de molienda y por separación magnética por vía húmeda.



Figura 3.1 (a) y 3.1 (b). Muestra de pulpa obtenida por separación magnética vía húmeda.

Durante la preparación de la pulpa para la separación magnética se pudo constatar la presencia de residuos de hidrocarburos como se puede observar en las figuras, los cuales fueron separados por reboso en el tanque preparador de pulpas, sin afectar el proceso de separación magnética.

Una vez separados los hidrocarburos se realizó el proceso de separación magnética básica; así como tres operaciones de limpieza al concentrado de hierro y una operación de control al rechazo, realizándose finalmente un control de productos intermedios.

El primer proceso al que fue sometido el Yacimiento Hierro Santiago, la concentración magnética, se alcanzó índices de beneficios, pudiéndose apreciar que luego de una separación magnética básica y tres separaciones de limpieza del concentrado, unido a un control de productos medios, fue recuperado el 72,94 % en peso de las colas en forma de concentrado con un contenido de hierro del 58,34 %, para una recuperación del hierro del 78,81 %.

3.3. Característica del grosor de la muestra inicial

En la figura 3.2 se presenta la curva que describe la característica de grosor de la muestra inicial.

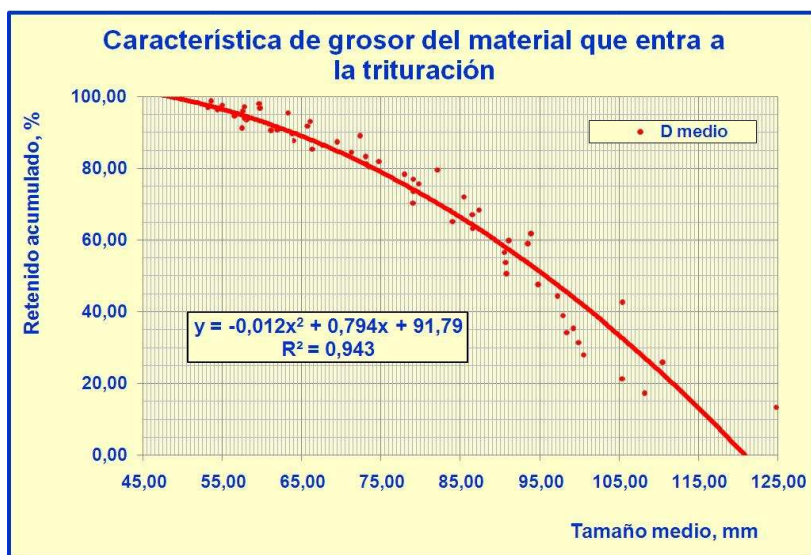


Figura 3.2. Característica de grosor de la muestra inicial.

La forma convexa de la curva es indicio del predominio de granos gruesos. Se puede observar que más del 99 % en peso de las partículas se encuentran entre 45 y 120 mm;

donde el 50 % es superior a 95 mm y el 90 % en peso de las partículas son mayores que el 62,50 mm.

Estos resultados demuestran que la selección del grosor de las muestras seleccionadas cumple con las condiciones establecidas para el análisis del concentrado de hierro en el Yacimiento Hierro Santiago y que luego del proceso, se puede obtener un material con las condiciones requeridas para ser empleado en las acérías cubanas.

3.3.1. Resultados de la trituración de la muestra inicial

En la figura 3.3 se muestra el resultado obtenido del proceso de trituración de la muestra inicial.

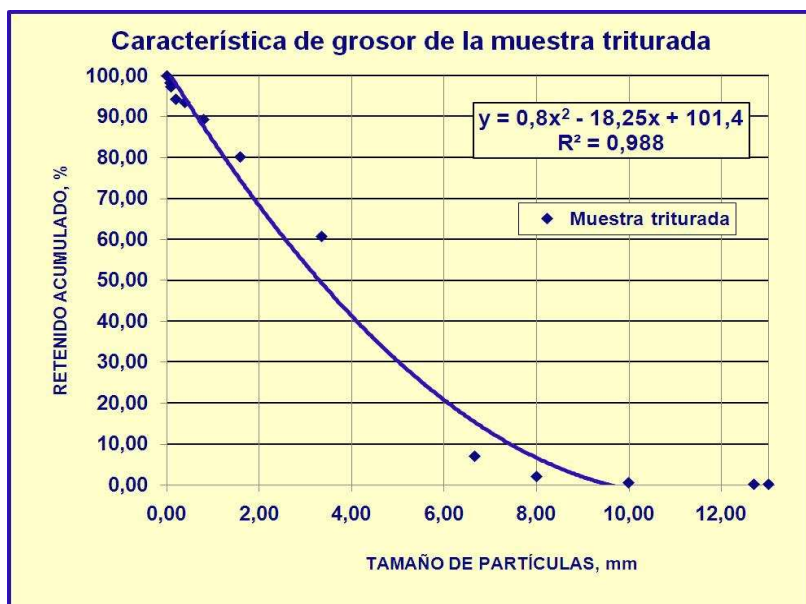


Figura 3.3. Distribución granulométrica del producto de la trituradora de mandíbulas

Los resultados obtenidos en la figura 3.3 de la distribución granulométrica fueron para el 100 % del material triturado en la trituradora de mandíbulas, con abertura de la rendija de salida regulada en 5 mm. Se observa que en correspondencia con el grosor del producto triturado, en las condiciones estudiadas se obtiene un material con tamaño de partículas de 100 % menor que 13 mm.

El tamaño de partículas permiten afirmar que en el Yacimiento Hierro Santiago, existe un alto nivel de concentración de las partículas gruesas donde a partir del tamaño de 10 mm las mismas se consideran admisibles para muestras trituradas con respecto al por ciento de retenido acumulado. El R^2 para determinar la variabilidad entre estas dos variables es del

98 %, por lo que las muestras trituradas cumplen con los requisitos antes de ser sometidas a procesos de molienda fina.

En la figura 3.4 se muestra las características del grosor de los productos triturados en la trituradora de mandíbulas.

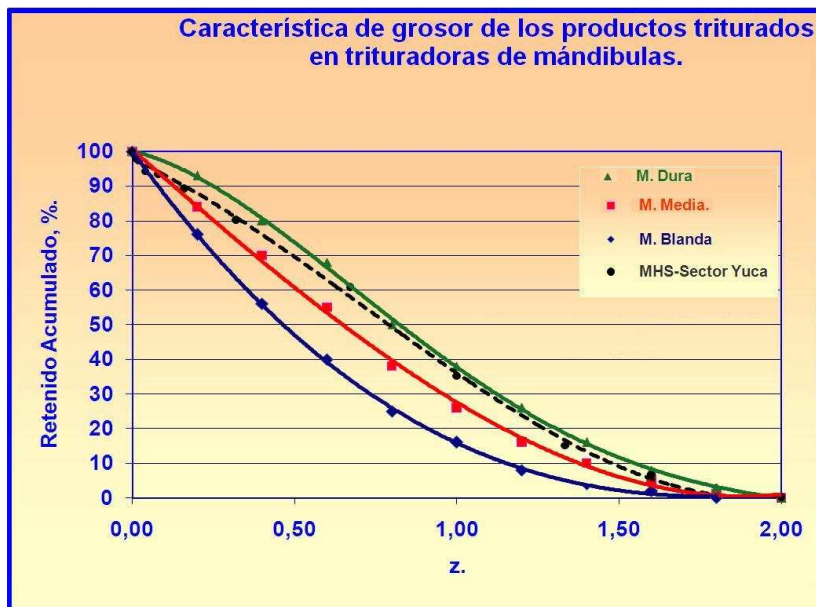


Figura 3.4. Característica de grosor de los productos obtenidos en trituradora de mandíbulas

De acuerdo a las líneas obtenidas en la determinación de las características de grosor de los productos obtenidos en trituradora de mandíbulas, en relación con el retenido acumulado, se puede plantear que la representada por líneas discontinuas que es la curva de la actitud a la trituración en trituradora de mandíbulas de la mena del Sector Yuca, la misma se comporta como mena dura.

De acuerdo con los criterios mineros, el rango de variación de los concentrados de mena, al encontrarse por encima de 1,5 % de concentración, se va a clasificar como mena del tipo duro. El concentrado obtenido del Yacimiento Hierro Santiago, según la figura está en esta clasificación.

3.4. Análisis de la molienda para la muestra inicial

En la figura 3.5 se muestra la función de distribución de tamaño del producto obtenido en un molino de bolas en el CEDINIQ, la misma es una distribución logarítmica con base e .

En la misma se considera el tamaño de las partículas en relación al porcentaje de retenido acumulado, lo cual define las características del grosor de la muestra molida.

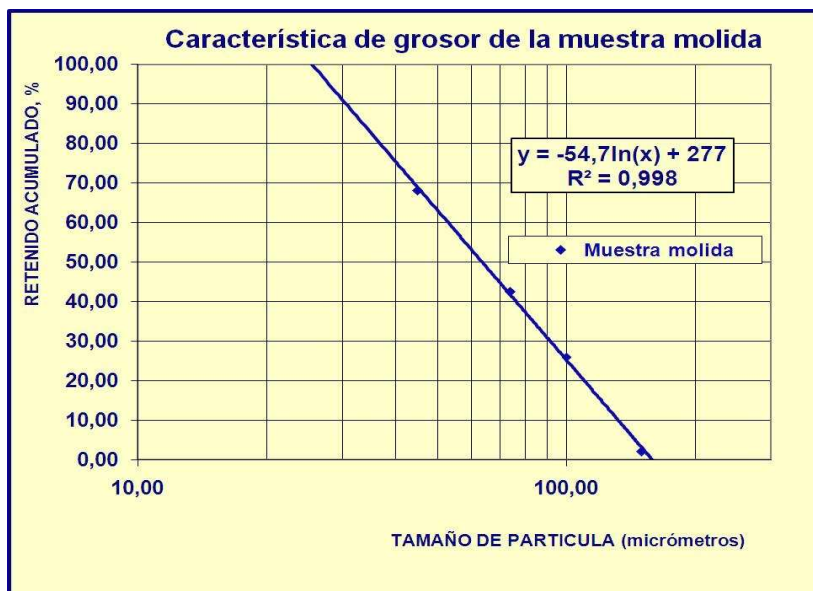


Figura 3.5. Distribución granulométrica del producto molido en molino de bolas

Se observa en la figura que el producto molido se encuentra entre 25,00 y 150,00 μm . Como puede apreciarse el residual estudiado es una mena de fina granulometría, debido a que el mineral de cabeza que se procesa en la planta de níquel es previamente molido hasta 80 % de las partículas menores de 0,074 mm; el rendimiento en peso aumenta con la disminución de la granulometría, exceptuando la clase - 0,075 + 0,045; la que constituye el 9,43 % de la muestra; de igual forma el contenido de hierro aumenta con la disminución del tamaño de las partículas. La mayor diferencia existente se encuentra entre las fracciones mayores y menores que 0,075 mm, pero teniendo en cuenta que la distribución del hierro acumulada en las mayores de 0,075 mm es de sólo 21,58 % no se amerita realizar un tratamiento magnético de estas fracciones por separado.

3.5. Análisis de la separación magnética seca a baja intensidad

El primer proceso al que fueron sometidas las colas fue la concentración magnética. En la tabla 3.3 se muestran los resultados de los cinco ensayos de separación magnética seca, se muestran los índices de beneficios alcanzados, pudiéndose apreciar que luego de una separación magnética básica y tres separaciones de limpieza del concentrado, unido a un control de productos medios.

Tabla 3.3. Resultados de la separación magnética seca

No Ensayo	Masa de los productos, g		Salida, %	
	No magnético	Magnético	No magnético	Magnético
1	303,10	1820,30	14,27	85,73
2	262,40	2319,20	10,16	89,84
3	204,20	2587,20	7,32	92,68
4	499,50	2081,60	19,35	80,65
5	564,10	6330,60	8,18	91,82
Media aritmética			11,86	88,14

Los resultados obtenidos muestran que el valor medio de los cinco rendimientos en pesos de las fracciones magnéticas dieron superior al 80,0 % (88,14 %) valor que no está en correspondencia con los resultados para el procesamiento del concentrado, por lo que se hace necesario realizar la separación magnética seca. Por lo tanto se decidió moler la muestra por debajo de 150 μm y realizar la separación magnética húmeda a baja intensidad.

3.5.1. Separación magnética húmeda a baja intensidad

En la tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos de la separación magnética húmeda.

Tabla 3.4. Resultados de la separación magnética húmeda

Densidad pulpa, g/cm ³	Producto	Rendimiento en peso, %	Contenido de Fe, %	Recuperación del Fe, %
-	Muestra inicial	100,00	54,00	100,00
1,410	Producto magnético	78,20	57,9	83,85
	Producto no magnético	21,80	40,01	16,15
1,320	Producto magnético	77,91	58,39	84,24
	Producto no magnético	22,09	38,52	15,79
1,285	Producto magnético	70,10	57,63	74,81
	Producto no magnético	29,90	45,49	25,19
1,150	Producto magnético	44,56	60,83	50,20
	Producto no magnético	55,44	48,51	49,80
1,120	Producto magnético	71,75	62,04	82,43
	Producto no magnético	28,25	33,58	17,57
1,285	Producto magnético	72,94	58,34	78,81
	Producto no magnético	27,06	42,30	21,19

Según la tabla, se obtienen concentrados en la tercera limpieza con 62,90 % de Fe y en la segunda operación de control de medios de 63,10 % de Fe, por lo que se unen los dos como concentrado final del proceso, dando un valor medio de 63,0 % de Fe total, con

granulometría entre 15 y 150 μm , característica que lo hacen apto para su peletización sólo o en mezcla con colas negras de las plantas de níquel o concentrados de Fe obtenidos a partir de esas.

3.6. Caracterización del concentrado final

En la figura 3.6 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del concentrado final del Yacimiento Hierro Santiago.

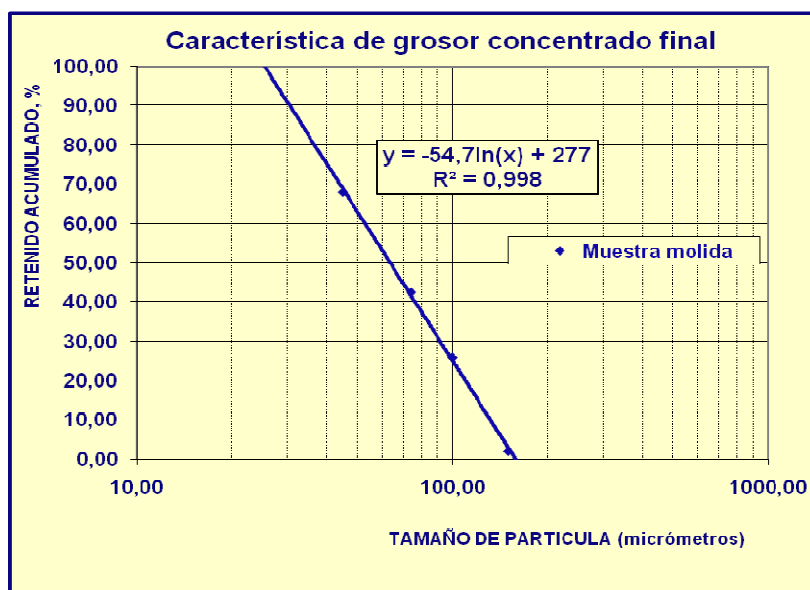


Figura 3.6. Característica de grosor del concentrado final.

Las partículas del concentrado final se hallan entre 25 y 150 μm , encontrándose el d_{50} alrededor de los 65 μm . Como puede apreciarse los contenidos de los principales elementos existentes en el concentrado de hierro obtenido, en todos los casos se encuentran dentro del nivel de confianza evaluado por las investigaciones más importantes realizadas con las colas de Nicaro; lo que demuestra que la representatividad de la muestra tomada para la realización de esta investigación, así como la operación de concentración magnética realizada es adecuada.

En la tabla 3.5 se muestran las características determinadas al concentrado final.

Tabla 3.5. Características determinadas al concentrado de Fe final

Contenido de Fe total, %: 63	Densidad aparente, g/cm^3 : 1,65
Contenido de SiO_2 , %: 9,26	Densidad compactada, g/cm^3 : 2,17
Contenido de MgO , %: 0,56	Ángulo de talud, °: 33,45

3.7. Caracterización del reducto, carbón antracita

El carbón antracita se utilizó como reductor, se muestreó para análisis químico, se consideró el grosor del carbón antracita. En la figura 3.7 se muestran las características obtenidas del grosor del carbón antracita.

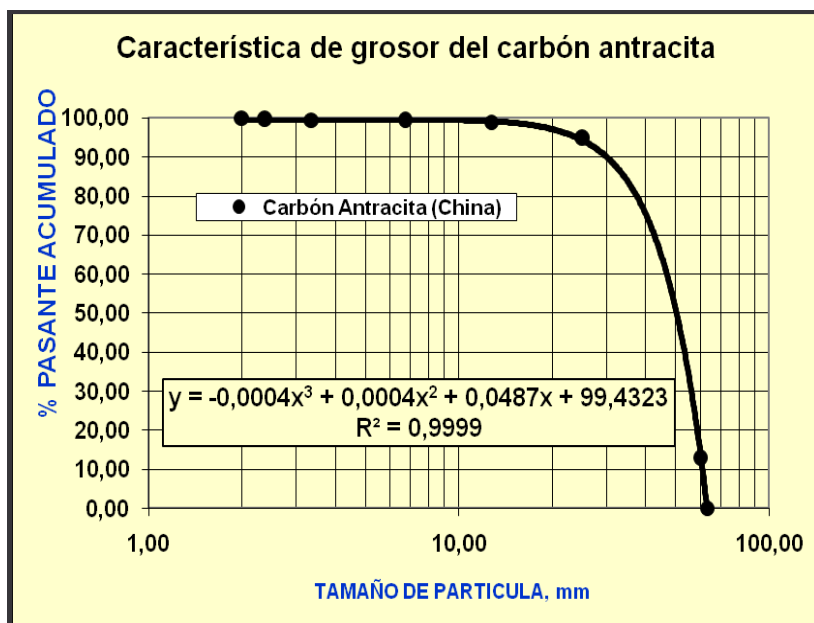


Figura 3.7. Característica de grosor del carbón antracita.

De acuerdo a los resultados obtenidos de este análisis se puede plantear que alrededor del 95 % de las partículas del carbón antracita se hallan entre 25 y 63 mm, encontrándose el d_{50} alrededor de los 50 mm.

Las características determinadas al carbón antracita se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características determinadas al carbón antracita

Contenido de C_{fijo} , %: 84	Densidad aparente, g/cm^3 : 0,87
Contenido de ceniza, %: 6,38	Densidad compactada, g/cm^3 : 0,97
Contenido de material volátil, %: 9,62	Ángulo de talud, °: 34,25

3.7.1. Caracterización del reducto, pet coque

El pet coque que se utilizará como reductor, al igual que el resto de las muestras, se muestreó para análisis químico, además se consideró como propiedad las características de grosor. En la figura 3.8 se muestran los resultados obtenidos de este análisis.

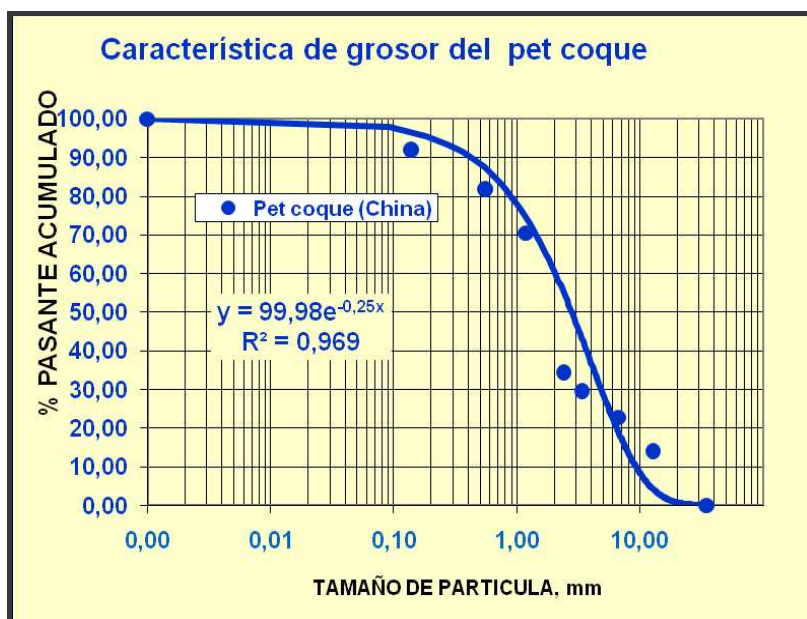


Figura 3.8. Característica de grosor del pet coque.

En la figura 3.8 se puede observar que alrededor del 90 % de las partículas del pet coque, que se utilizará como reductor, se encuentran entre 0,50 y 20 mm, localizándose el d_{50} alrededor de los 2,00 mm.

La tabla 3.7 muestra las características determinadas al pet coque.

Tabla 3.7. Características determinadas al pet coque

Contenido de C_{fijo} , %: 82,28	Densidad aparente, g/cm^3 : 0,74
Contenido de ceniza, %: 2,12	Densidad compactada, g/cm^3 : 0,86
Contenido de material volátil, %: 15,60	Ángulo de talud, °: 32,20

El coque metalúrgico obtenido presenta un contenido de carbono de un 82,28 %, concentrado que permite aseverar que el mismo constituye una potencial fuente de materia prima para el sector siderúrgico, trayendo consigo un impacto positivo para la economía del país. Hay que considerar que este proceso, se torna más costoso para tratar las menas de hierro que los procesos que existen basados en coque, sino se hace un eficiente aprovechamiento de los gases de salida, los cuales tienen un elevado poder calórico, equivalente al 50 % de la energía contenida en el carbón empleado en el proceso.

3.7.2. Caracterización de las colas negras

Se tomaron muestras de las colas negras de las dos plantas, ambas se prepararon para análisis químicos. En la tabla 3.8 se muestran las características obtenidas de las mismas.

Tabla 3.8. Propiedades determinadas a las colas negras

Colas de la planta Cmdte René Ramos Latour	Colas de la planta Cmdte Ernesto Che Guevara
Densidad aparente, g/cm ³ : 1,35	Densidad aparente, g/cm ³ : 1,21
Densidad compactada, g/cm ³ : 1,58	Densidad compactada, g/cm ³ : 1,55
Ángulo de talud, °: 34,07	Ángulo de talud, °: 35,49

Las colas de la tecnología Carón es mezclada con agua en un tanque cilíndrico y agitada con un impelente para facilitar la liberación de las partículas sólidas y la formación de una emulsión homogénea que debe poseer entre 10 y 30 % en peso de sólido. De acuerdo con estas propiedades se pueden emplear en el proceso de reducción carbotérmica.

3.8. Valoración económica

Para la valoración económica se partió de la conferencia de la familia ITMK3 realizada en Kiev, Ucrania. En este estudio se comparó la producción de arrabio mediante el proceso de Horno de Hogar Rotatorio con las tecnologías clásicas existentes en la actualidad.

El análisis financiero realizado incluyó el análisis de impuestos y depreciación, análisis de mantenimiento sustentable y aprovisionamiento para el cierre del proyecto, análisis del impacto y viabilidad del financiamiento del proyecto, evaluados por una estimación del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), basado en el análisis de los de flujos de dinero en efectivo.

Los procesos ITMK3 y la combinación Horno de Hogar Rotatorio + Fundidor fueron seleccionados como las tecnologías más favorables de acuerdo al análisis financiero detallado, concluyéndose que la producción de una tonelada de arrabio por la tecnología convencional (Horno Alto) costaba entre 300 y 325 USD, su precio de venta entre 340 y 360 USD y la inversión de capital de 300 USD por tonelada de capacidad. Para obtener los pelets aptos para su empleo en el Horno Alto es necesario invertir entre 50 y 60 USD por tonelada de capacidad.

Los costos de producción del arrabio a partir del proceso ITMK3 fueron de 150 USD por tonelada, los precios de ventas de 340 USD, y la inversión de capital de 300 USD por tonelada de producción instalada. Por tanto los costos de producción de nódulos de arrabio por el proceso ITMk3 son menos del 50 % de los costos en el Horno Alto y el capital a

invertir por tonelada de arrabio es inferior en un 20 % de la inversión necesaria para el caso del Horno Alto.

Los costos en que se incurren en la obtención de arrabio en Horno Alto, siendo los costos de las materias primas por tonelada de metal caliente de 225,00 USD y el costo de conversión de ellas de 100,90 USD, para un total de 325,90 USD.

Para evaluar la factibilidad del proyecto de inversión de una planta productora de lupias de arrabio mediante la tecnología ITMK3 (500 000 t de lupias anuales), para lo que se necesitaría una inversión de 150 000 000 USD.

3.9. Impacto medioambiental

El Impacto Ambiental es un término definido como el efecto positivo, negativo o no existente que produce una determinada acción humana sobre el medio, efectos que pueden ser: sociales, económicos, tecnológicos - culturales y ecológicos.

El estado cubano, las empresas y la opinión pública en general, dan cada día mayor importancia a la problemática ambiental. Particularmente, las empresas industriales no pueden afrontar una mala imagen por un deficiente manejo ambiental, ya sea por la implantación de proyectos de desarrollo que no preserven el medio ambiente, por una producción exagerada de residuos generados en el proceso productivo o por el vertimiento incontrolado de estos al ambiente.

Desde el punto de vista ambiental, el esquema propuesto en la presente investigación, tiene una gran ventaja teniendo en cuenta que con su implementación se disminuiría la carga contaminante al medio ambiente, debido a la obtención de concentrado de hierro a partir de las colas de Nicaro, para ser empleadas como sustituta de la chatarra de hierro que se utiliza en las acerías, conllevando a un uso racional a este material contaminante del medio.

En comparación con el arrabio producido mediante la tecnología convencional del Horno Alto, en la producción de lupias de arrabio empleando los Hornos de Hogares Rotatorios se emite un 20 % menos de dióxido de carbono debido a la buena eficiencia energética del proceso; unido a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero y a la inversión de capital, el empleo de la tecnología de Hornos de Hogares Rotatorios es muy conveniente



para su desarrollo actual y futuro, considerándose como industrias siderúrgicas con un menor impacto en el medio ambiente en los países en vías de desarrollo.

Para los distintos tipos de combustibles evaluados los resultados del estudio de factibilidad del proyecto arrojan resultados positivos exceptuando la evaluación del escenario pesimista para el combustible carbón coque y semicoque, para los casos evaluados el período de recuperación de la inversión oscila entre dos y cinco años para los distintos tipos de combustibles en el escenario normal.

El nivel de actividad para el cual los ingresos se igualan a los costos de producción para los distintos tipos de combustible son aproximadamente del 50 %, exceptuando la evaluación del carbón térmico para el que con solo un 40 % de nivel de actividad es logrado el punto de equilibrio, apreciándose que el proyecto de inversión posee un elevado nivel de holgura operativa.

3.10. Conclusiones del capítulo 3

- ❖ Los procedimientos metalúrgicos empleados permiten predecir que de acuerdo con las características del Yacimiento hierro Santiago, es posible obtener un concentrado de hierro para ser empleado en la producción de acero en las acerías cubanas.
- ❖ Para obtener el concentrado de hierro del Yacimiento Hierro Santiago se emplearon diferentes técnicas como el de molienda, el de separación magnética seca a baja intensidad, la separación magnética húmeda a baja intensidad, las cuales en su conjunto permitieron el procesamiento del concentrado de hierro del Yacimiento Hierro Santiago.
- ❖ Al realizar la caracterización de las colas negras de la empresa “Comandante René Ramos Latour y la “Comandante Ernesto Che Guevara, se pudo determinar que en correspondencia con las características que presentan las mismas, se pueden emplear en el proceso de reducción carbotérmica.



CONCLUSIONES GENERALES

- ✚ Para una muestra de 525 kg, considerada representativa del Yacimiento Hierro Santiago y con 25 kg de cola negra de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, luego de ser sometida a proceso de beneficio metalúrgico, se obtuvo que para el primero se obtiene un 63 % de Fe y con el segundo un 42 % de concentrado de hierro, lo cual indica que pueden ser empleado para la obtención de acero al carbono en las acerías cubanas.
- ✚ Durante el proceso de beneficio al que fue sometido el Yacimiento Hierro Santiago, se obtuvo una concentración magnética donde se recuperó el 72,94 % en peso de las colas en forma de concentrado con un contenido de hierro del 58,34 %, para una recuperación del hierro del 78,81 %.
- ✚ En correspondencia con el mineral de la mena del Yacimiento Hierro Santiago que se encuentra por encima de 1,5 % de concentración puede ser empleado en la obtención de concentrado de hierro y se clasifica como mena del tipo duro.
- ✚ Los costos en que se incurren en la obtención de arrabio en Horno Alto, siendo los costos de las materias primas por tonelada de metal caliente de 225,00 USD y el costo de conversión de ellas de 100,90 USD, para un total de 325,90 USD.



RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar estudios para valorar la posibilidad de separar las fases presentes en la escoria obtenida para su posible empleo industrial.
- ✚ Evaluar otros agentes reductores como coque de petróleo (petcoke) y asfaltitas en el proceso de reducción carbotérmica.
- ✚ Realizar búsqueda de posibles financistas extranjeros para la realización de ensayos de obtención de lupias de arrabio a escala de banco y piloto empleando la tecnología de Hornos de Hogares Rotatorios.

Referencias bibliográficas



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andréiev, S., Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Editorial pueblo y educación, 1980.
2. Avilov, B. N., Karnaujov y Ziubroski., Ahorro electroenergético en las plantas beneficiadoras de mineral. Niedra. 1987.
3. Bradley, D. J. Pulling, Flow patterns in the hydraulic cyclone and their interpretation in terms of performance Trans. Inst. Chem. Engrs. 37 (1959) 34/35.
4. Brunet, P. Diseño gráfico y modelado geométrico, pp. 55 - 66. Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y fabricación por computador. Serie Mundo electrónico. Marcombo Boixareu editores, 1986.
5. Bugada, G. Utilización de técnicas de estimación de error y generación automática de mallas en procesos de optimización estructural” Tesis doctoral. Escola Tècnica Superior d’Enginyers de Camins, Canals i Ports. Barcelona, 1990.
6. Brennen, Christopher E. Hydrodynamics of pumps, Oxford University Press, Inglaterra, 1994.
7. Blanco-Margota, E., Fernández-Francos, J., Larrondo-Gayo, J.L., Santolaria-Morros, C. “Numerical Simulation of Centrifugal Pumps”. ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, Massachusetts. FEDSM 200 - 11162, 2000.
8. Correa, F., Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande. 1957.
9. Castillo, D., Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado. 1988.
10. Coello, A.; Llorente, V.; García, A., Optimización de la molienda seca de los minerales lateríticos. Informe II. Fac. Metalurgia. ISMM. Moa. Nov.1992.
11. Coello, V., Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos en revista Minería y Geología. Vol.1, Nº 1; Moa, 1993.
12. Coello, V., Mejoramiento de la tecnología de la molienda seca de la laterita. Tesis de doctorado. Rusia: Instituto de Minas de San Petersburgo, 1993.
13. CEPRONIQUEL., Proyecto de extracción del fango coralino al sur de Cayo Moa Grande. 1997.



14. Campos, G., Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande. Holguín. 2001.
15. Coello, A.; Tijonov, O., Molienda de minerales multicomponentes: modelo integrodiferencial para la valoración de la energía. Minería y Geología, (2) 2001.
16. Caballero, Y., Caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su perfeccionamiento en el hidrotransporte. Trabajo de Diploma 2008.
17. Gaudin, A.; Meloy, T., Model and comminution distribution equation for repeated fracture. Trans. AIME. Vol. 223. pág 43-50. 1991.
18. González, J., Santolaria, C., Blanco, E. The Effect of the volute tongue on the pressure oscilations inside a centrifugal pump. Proceedings of the hydraulic machinery and systems 21st IAHR Symposium. Lausanne 9 - 12, 2005.
19. Hernández, L., Cálculo verifcativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
20. Lynch, A., Circuitos de Trituración y Molienda de minerales. Optimización, Diseño y Control. Madrid. Editorial Rocas y Minerales. 1980.
21. Laborde, R.; Coello, A.; Marrero, S., Optimización del proceso de molienda del mineral laterítico en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Memorias SIE. Universidad Central de Las Villas, 2005.
22. Martínez, R., Caracterización de las propiedades físico mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tuberías. Tesis de Maestría. ISMM 2009.
23. Nedved, M., Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande. 1966.
24. Nápoles, E., Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande. 1992.
25. Oriol, G.; Aguilar, P., Máquinas de transporte continuo. Ciudad de la Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988, 235.
26. Romero, J., Maquinas transportadoras. Madrid. C 2108, 2004.
27. Shubin, U., Diseño de maquinas industriales. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1975, Tomo III, 275.



28. Sahoo, A.; Roy, G., Correlations of grindability of the ball mill as a measure of its performance. Chemical Engineering. Volumen 3, No.2 pp.230 - 235, 2008.
29. Suárez, M., Relación entre las características granulométricas, reológicas y coloidesquímicas en suspensiones de laterita y de Cieno Carbonatado. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. 2010.
30. Valderrama, W.; Magne, J., Efecto del diseño de revestimientos sobre el consumo de potencia de molienda”. Cenin. Revista de Metalurgia. Vol 16, 61, 1996.