

Primera edición

Memorias de las investigaciones realizadas para el procesamiento siderúrgico de minerales de hierro cubanos

Dr. C. T. Jesús Ortiz Bárcenas
Dr. C. Q. Félix Antonio López Gómez

 editorial cenic

Edición y corrección: Greter Padrón Mujica
Diseño de cubierta: Claudia Ribalta Contreras
Diseño y maquetación: Iris Díaz González
Greter Padrón Mujica
Claudia Ribalta Contreras

© Jesús Ortíz Bárcenas y Félix Antonio López Gómez, Cuba, 2024
© Centro Nacional de Investigaciones Científicas, 2024

ISBN 978-959-7145-24-0 (versión impresa)
ISBN 978-959-7145-25-7 (PDF)
ISBN 978-959-7145-21-9 (Epub)

Editorial CENIC
Ave. 25, Esq. 21 A, No. 15202,
Playa, La Habana, Cuba. CP 11600
editorial.cenic@cnic.cu
Teléfono: +53 7208 5831

AGRADECIMIENTOS

A los colegas que participaron humildemente en las investigaciones relacionados en las referencias bibliográficas y a otros muchos que trabajaron y apoyaron de forma indirecta, aportando conocimientos para establecer los procesos de aprovechamiento más adecuados de los minerales de hierro. Nuestra generación, cumple así modestamente una etapa de este largo camino, conscientes de que esta biografía puede ser aun, enriquecida y mejorada por los que vendrán detrás.

DEDICATORIA

A los que físicamente no están e idearon que se debía hacer un documento que resumiera el trabajo de tantos años de labor. La presente obra es un intento por cumplir esa noble idea para las presentes y futuras generaciones.

PRÓLOGO

La obtención de arrabio en altos hornos, con empleo de coque como reductor y como fuente de energía, para su posterior procesamiento en la obtención de acero, ha sido históricamente el esquema convencional de procesamiento. Sin embargo, dadas las dificultades asociadas a la disponibilidad de coque y la insuficiente disponibilidad de chatarra para garantizar la producción de acero en función de la demanda de muchos países, también se han desarrollado esquemas alternativos, buscando fundamentalmente el uso de combustibles y reductores más accesibles y baratos.

En tal sentido, son múltiples los procesos alternativos a la vía tradicional que se han desarrollado para la obtención de aceros a partir de minerales de hierro; sin embargo, no se ha logrado satisfacer todas las expectativas de aquellos países que no disponen de carbón coquificable. Tal es el caso particular de Cuba, que, pese a las reservas probadas que posee de la materia prima fundamental para el procesamiento siderúrgico (escombros lateríticos y colas de la producción de níquel, minerales magnéticos en diversos sectores del yacimiento Santiago de Cuba, minerales lateríticos en la provincia de Camagüey), hasta la fecha solo produce acero a partir de chatarra, aun cuando la disponibilidad de esta materia prima es insuficiente para satisfacer la demanda de las dos acerías (Antillana de Acero y ACINOX Tunas), en correspondencia con las capacidades instaladas.

Durante décadas, como bien se refleja en el presente libro, se han realizado esfuerzos enfocados al empleo de los minerales de hierro cubanos y de los pasivos ambientales de la producción de níquel, como materia prima en la obtención de semiproductos para la elaboración de acero. Dichos esfuerzos han ido, desde los estudios experimentales (a escalas de laboratorio, de banco y de planta piloto) hasta pruebas en condiciones industriales, abarcando la caracterización de los minerales, el beneficio, la aglomeración, la reducción en estado sólido y la fusión-reducción. De esos esfuerzos, ha quedado técnicamente demostrado que es viable el procesamiento con fines siderúrgicos de dichas materias primas. También, como un valor agregado, a partir de los pasivos ambientales de la producción de níquel (Escombros lateríticos y colas), se ha confirmado la posibilidad de obtención de semiproductos metalizados con significativos contenidos de cromo y níquel y, consecuentemente, se ha validado la posibilidad de la obtención de aceros con estos elementos de aleación.

A la luz de los nuevos enfoques de Desarrollo Sustentable y de la Economía Circular; así como, de las proyecciones de ampliación y diversificación de la matriz energética del país hacia las fuentes renovables de energía, que incluye el consumo de la biomasa, el presente libro, al tiempo que compendia los principales resultados y reconoce a las instituciones y personas que los han obtenido, constituye punto de partida y directriz. En este sentido, se recontextualizan los resultados hasta el presente alcanzados, estableciéndose consideraciones para el futuro procesamiento a escala industrial de los minerales de hierro cubanos y para el enfoque de nuevas investigaciones. Se puntualizan, como aspectos esenciales de dicha contextualización: limitar la generación de nuevos residuales en el procesamiento (no generar residuales del beneficio del mineral y aprovechar las escorias del proceso de fusión como materia prima para otros materiales de ingeniería); aprovechar los calores de salida de los gases y el calor latente de los productos; jerarquizar, dentro de lo posible, el uso de carbón vegetal como reductor y fuente de energía; valorar la incorporación en las cargas a procesar de residuales con alto contenido de hierro, de la producción de acero y sus laminados (povos de acería y cascarilla de laminación).

Por el tema abordado y el enfoque que se ha dado, el libro se considera de imprescindible consulta para investigadores, académicos y estudiantes de pregrado y postgrado que aborden temáticas relacionadas al procesamiento de minerales de hierro. También, constituye un referente a considerar por especialistas y empresarios para la realización de proyecciones de desarrollo del sector siderúrgico.

Dr. C.T. Amado Cruz Crespo

CONTENIDO

PRESENTACIÓN/ 1

PRIMERA PARTE/ 3

SEGUNDA PARTE/ 7

TERCERA PARTE/ 15

CUARTA PARTE/ 29

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS/ 39

SOBRE LOS AUTORES/ 43

PRESENTACIÓN

Estas memorias constituyen una recopilación de información, que humildemente hemos realizado en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS) de Nicaro, Cuba y en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) de España, en aras de dejar una huella del trabajo de muchas personas que entregaron todos los esfuerzos que pudieron para caracterizar minerales originados por procesos tecnológicos metalúrgicos.

Es conocida la utilización de los minerales lateríticos en Cuba para la extracción del níquel y el cobalto por las tecnologías de lixiviación en carbonato amoniacal y de lixiviación ácida. Como resultado de estos procesos tecnológicos se originan dos pasivos ambientales: los mineros (comúnmente nombrados escombros lateríticos) y los industriales (denominados colas níquelíferas), de los cuales existen acumulados millones de toneladas de estas materias primas. Los escombros se depositan en la propia zona donde se ejecuta la minería, las colas se vierten en diques situados en las proximidades de las fábricas. Estos depósitos constituyen de interés para la industria metalúrgica y siderúrgica, motivo por el cual se han estudiado y como resultado existen importantes informaciones sobre los siguientes temas:

1. Obtener arrabio y aceros de baja aleación con níquel y cromo.
2. Recuperar el níquel y el cobalto de estos pasivos mineros e industriales.
3. Estudios de la presencia del escandio y de elementos de tierras raras.
4. Obtención de materiales refractarios y de construcción.

Es difícil resumir en este trabajo el resultado de muchos años de esfuerzos de varias generaciones de ingenieros e investigadores, que han empleado tiempo e importantes recursos materiales en la investigación con el propósito de utilizar estas materias primas. En la actualidad se abren nuevas perspectivas para su utilización, por ejemplo, la presencia de hierro como elemento mayoritario, del cobalto, níquel, escandio y otros elementos. La disminución de los fondos metálicos conduce a definir qué hacer con estos recursos.

El intento de escribir un trabajo sobre las memorias de las investigaciones hubiera podido realizarse antes, colegas con gran experiencia podrían ofrecer una información, tal vez mucho más completa, pero desafortunadamente ya no están, algunos fallecieron, otros se encuentran jubilados o alejados de esta actividad. Los que aún nos encontramos vinculados a estos quehaceres consi-

deramos, que la historia no debe olvidarse, que compilar para tener presentes los resultados precedentes, servirá de premisa a las actuales y futuras generaciones para trazar las rutas más aconsejables de procesamiento de estas particulares materias primas.

Este trabajo constituye una recopilación de informaciones para el conocimiento sobre las colas de Nicaro, los escombros lateríticos de Mina Martí y Pinares de Mayarí, las colas de la lixiviación acida (colas rojas de Moa) y los minerales magnetíticos de Santiago de Cuba para su futura utilización. Muchas de estas informaciones han estado a expensas de olvidarse; sin embargo, hoy se necesitan a partir del propio agotamiento de algunos metales contenidos en estos depósitos y la escasez de chatarra para las acerías. Las informaciones incluidas en este trabajo son referencias que posibilitan no repetir intentos anteriores.

PRIMERA PARTE

Antecedentes sobre el procesamiento de los minerales lateríticos en Cuba para fines siderúrgicos, una contribución

Las informaciones geológicas dan cuenta (Miranda, 2003) que desde el año 1902 comenzaron a explotarse los yacimientos lateríticos de la meseta de Pinares de Mayarí, Provincia de Holguín, caracterizados por un 50 % de hierro total. Desde ese momento comenzó la idea del procesamiento de los minerales lateríticos para fines siderúrgicos en Cuba. En 1910 se extrajeron 698 789 t de mineral con la composición química siguiente: Fe = 47,96 %; Ni + Co = 0,99 %; SiO₂ = 2,08 %; Al₂O₃ = 11,39 % y H₂O = 23,61%. Este mineral era nodulizado en hornos rotatorios de calcinación, con quemadores a base de carbón pulverizado, los nódulos eran exportados hacia los Estados Unidos. Dicha instalación estaba ubicada en el poblado de Felton, Municipio Mayarí, y la composición química de dichos nódulos era la siguiente: Fe = 55,00 %; SiO₂ = 14,00 %; Cr₂O₃ = 2,00 %; Ni = 1,00 %; S = 0,11%; P = 0,02 %; H₂O = 2,60 %. Desde 1910 hasta 1915 se exportaron 2 162 225 t, a partir de las cuales se producía el denominado acero Mayarí por la tecnología de Horno Alto y el proceso Dúplex, mediante las cuales se obtenía un acero de baja aleación con cromo y níquel, con la composición química siguiente: C = 0,12%; Mn = 0,5-1,0 %; P = 0,08 – 0,12 %; S = 0,05 %; Si = 0,10 %; Cr = 0,40 – 1,00 %; Ni = 0,25 - 0,75 %; Cu = 0,20 %, (Bethlehem Steel 1923, 1946; 1966; Ortiz, 2010).

La compañía que se encargó de desarrollar el programa fue la Bethlehem Steel Co. Los elevados contenidos de níquel detectados por Bethlehem Steel en el mineral de Pinares de Mayarí, fue la motivación para que se trazara un programa de prospección geológica más amplio en la región, obteniéndose resultados alentadores que justificaron la construcción de la planta, ubicada en Nicaro, Provincia Holguín. Dicha planta estaba basada en la tecnología de lixiviación en carbonato amoniacal para obtener como producto comercial sinter de níquel, la misma terminó sus operaciones en el año 2012.

Con el pasar de los años se establecieron los siguientes yacimientos de minerales lateríticos, localizados en Pinares de Mayarí, Nicaro y Moa, en los

cuales existen importantes reservas de mineral de hierro, níquel, cobalto y otros elementos (Rodríguez et al, 1987).

Las investigaciones geológicas justificaron construir dos plantas situadas en Moa, Provincia de Holguín. Una que inició sus operaciones en 1959 por la tecnología de lixiviación ácida que produce sulfuro de níquel más cobalto; la otra, comenzó sus operaciones en la década de los años 80 del siglo pasado por la tecnología de lixiviación en carbonato amoniacal obteniendo como producto comercial sínter de níquel. Ambas plantas se encuentran en funcionamiento. En las proximidades de estas se depositan las denominadas colas niquelíferas, que constituyen pasivos ambientales con millones de toneladas, ubicadas en diques construidos para su conservación, hasta hoy las mismas no se utilizan. Además, como resultado del laboreo minero en las minas se originan los denominados escombros lateríticos, que son la parte del mineral que no cumple con los requisitos exigidos para ser procesados por las tecnologías dispuestas en las plantas, por lo que también constituyen pasivos ambientales. En los yacimientos también existen depósitos de minerales lateríticos ferruginosos con altos contenidos de hierro, hasta 55 % que tampoco son utilizados por la industria del níquel. (Informe geológico GEO-0-105, 1962)

De esta forma, la utilización de los minerales lateríticos cubanos solo ha sido en las industrias del níquel y el cobalto, quedando pendiente la posible utilización de los mismos para procesos siderúrgicos.

A partir de los años 1960 del pasado siglo, se determina que las colas de Nicaro constituyen una reserva importante de materia prima siderúrgica, se desarrollaron varias investigaciones en distintos países, empleando procedimientos y equipos de altas tecnologías dirigidas a su aprovechamiento, sobre lo cual en el contenido de este trabajo se detallaran los resultados que desde nuestro punto de vista son los más aconsejables a tener en cuenta para la utilización siderúrgica de estos minerales. Como definición se ha determinado que las colas de Nicaro son una magnetita artificial (CIS, 1972) resultado del proceso industrial, se definen como un mineral de hierro no convencional, que cuando se le aplica un proceso de separación magnética húmeda se puede elevar su contenido de hierro hasta el 55 % aproximadamente.

Las experiencias acumuladas, condujeron a construir en 1980 una Planta Piloto para el beneficio por separación magnética húmeda en Nicaro, en las instalaciones del Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS-Nicaró). Un resultado notable de esta institución fue la obtención de 12 000 toneladas de concentrado de hierro con una concentración desde 53 hasta 55 % de hierro, de las cuales se obtuvo arrabio con contenidos de cromo y níquel en un mini horno alto según refieren las informaciones del fondo bibliográfico (CIS, 1983).

Otra investigación, abordó la obtención de lupias de arrabio con cromo y níquel a nivel industrial por un proceso de reducción directa en hornos rotatorios (Mojena et al, 2011), en el cual se concluyó que puede ser una ruta viable utilizando la tecnología Krupp- Reen mejorada.

Años más tarde, a nivel de laboratorio (Ferreiro, 2015) logró demostrar la viabilidad de obtención de lupias de arrabio, simulando un proceso de reducción directa al horno circular rotatorio indicando que la ruta tecnológica a seguir puede ser en instalaciones de tipo ITKM-3 de forma rentable.

Sobre los pasivos ambientales (escombros lateríticos de los yacimientos de Mina Martí y Pinares de Mayarí) se han realizado varios estudios de caracterización y preparación premetalúrgica para fines siderúrgicos en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) y el CIS- Nicaro). Los resultados preliminares indican la posibilidad de obtención de níquel pig iron como producto más viable para la industria siderúrgica (Díaz y Mojena, 1989), (López et al, 1988), (Ortiz, 2015). Investigaciones actuales han demostrado que no solo es importante la investigación del hierro en estos minerales, también son atractivos los contenidos de níquel, cobalto y elementos de tierras raras como el escandio.

Recientemente se ha abordado el estudio de la fusión reductora en horno de corriente continua de colas de Ni

caro sin beneficiar (Cruz-Crespo et al, 2023). Se ha demostrado la posibilidad técnica de obtener arrabio aleado con níquel y cromo con esta vía de procesamiento.

SEGUNDA PARTE

Pasivos ambientales originados por la minería (los denominados escombros lateríticos de Mina Martí), una caracterización para su utilización siderúrgica

2.1 Breve descripción de algunas investigaciones realizadas

Desde 1982 existen antecedentes en la investigación de estos pasivos ambientales para fines siderúrgicos, en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME) en Cuba, un grupo de investigadores bajo la dirección del Dr. Widodo Suwardjo desarrollaron un trabajo a escala de laboratorio relacionado con el beneficio y posibilidad de utilización siderúrgica de esta materia prima (Suwardjo, 1982). Se logró obtener concentrados de hierro con un contenido de 60,00 %. La principal dificultad de este esquema es que incluye un ciclo de tostación magnetizante, molienda y separación magnética y no se logra una alta recuperaciones del hierro. Adicionalmente, se obtiene un rechazo de la separación magnética que forma un nuevo residuo, que daña el medio ambiente. El trabajo publicado no aborda aspectos mineralógicos del mineral.

Con el objetivo de profundizar en el conocimiento de los aspectos mineralógicos y estudiar el beneficio del mineral, en el periodo desde 1986 hasta 1992, fue realizado un convenio de colaboración entre el CENIM y el CIS – Nicaro. El mismo fue auspiciado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC) y el CIS- Nicaro, con el objetivo de estudiar alternativas al fondo metálico de la industria siderúrgica, motivado por la creciente disminución de la chatarra de acero. Los jefes de este convenio fueron el Dr. Antonio Formoso Prego, quien fuera director del CENIM y por la parte cubana el Ingeniero Loreto Mojena Beltrán y el Dr. Luis García Sánchez, director del CIS- Nicaro y director de Investigaciones, respectivamente.

El mineral, ubicado en el yacimiento de Mina Martí, resultó de interés, dado que se localizaba próximo a las colas de Nicaro, que constituía la principal fuente para el desarrollo del programa siderúrgico, que en la década de los años 1980 del pasado siglo se proyectaba en la zona de Cajimaya, Municipio de Mayarí, Provincia de Holguín.

El referido convenio de colaboración permitió ejecutar un programa de investigación, donde se utilizaron varias técnicas analíticas para la caracterización química física y mineralógica, dentro de las que se pueden mencionar: Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA), Difracción de rayos X (DRX), Análisis Termogravimétricos (ATG) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

La composición química promedio de los pasivos ambientales (escombros lateríticos de Mina Martí), según el informe de exploración geológica del yacimiento (GEO-0-105, 1962) y los trabajos realizados por la Empresa Geológica en Cuba (Rodríguez et al, 1987) se enmarca alrededor de los valores medios que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química promedio de los pasivos ambientales (escombros lateríticos de Mina Martí)

Denominación del pasivo	Contenido de elementos y en forma de óxidos (%)									
	Fet	Ni	Co	Cr2O3	Al2O3	SiO2	MnO	MgO	CaO	Otros
Escombros Mina Martí	42,75	0,64	0,04	1,92	5,92	8,00	0,35	6,56	0,81	12,2

En dependencia de los sitios donde se tomen las muestras en el yacimiento los contenidos de los elementos pueden tener ligeras variaciones. En la tabla 2.1 se muestran los resultados de los laboratorios del CENIM y del CIS-Nicaragua, que en general coinciden con los reportados por varios investigadores (Suwardjo, 1982; Cubillo, 1987; García et al, 1989; Ortiz y Llópez, 2014).

2.2 Caracterización granulométrica y química

Este mineral tiene tendencia a la degradación durante su manipulación, es de color marrón oscuro y posee en ocasiones perdigones (nódulos) y restos de materia orgánica en descomposición. Al tacto posee la capacidad de adherirse fácilmente. Su densidad específica es de 3,57 g/cm³, la volumétrica de 1,12 g/cm³ y la de reposo de 1,27 g/cm³. En la composición granulométrica, se distinguen tres grupos de fracciones: 12,83 % de las partículas desde - 6,3 hasta + 3,3 mm, el 61,00 %; desde - 3,3 mm hasta + 0,21 mm el 26 %, y el 13 % inferior a esta clasificación.

Esta composición granulométrica puede ser utilizada para la formación de nódulos de variada e irregular composición granulométrica en granuladores rotatorios basado en la experiencia industrial que existió en la Planta de Nodulización de Felton desde 1910 hasta 1915 del pasado siglo, donde se empleaba un mineral con similares características. (Awad, 1966 y Nacer, 1974).

La composición química, es uniforme. El contenido de hierro se incrementa a partir de las fracciones desde + 0,83 mm hasta + 6,30 mm. Esta característica es positiva para su posterior utilización en el proceso de aglomeración, debido a que contribuye a la formación de granos primarios que disminuyen la formación de polvos, al poseer nódulos y perdigones de forma natural (Ortiz, 2010).

Los contenidos medios sumados de los óxidos de aluminio y silicio es de 13,95 %, se considera una ganga ácida, lo que indica que para su posterior tratamiento metalúrgico es necesario la adición de fundentes para su aglomeración y posterior fusión.

El contenido de cromo es uniforme en todas las fracciones, y una parte del mismo puede recuperarse en los procesos de reducción y fusión (Ferreiro, 2015) para la obtención de arrabio y acero.

2.3 Estudio de la descomposición térmica

Los estudios realizados en el laboratorio de Siderurgia del CENIM (Cubillo, 1987) de análisis térmico gravimétrico (A.T.G.), del análisis termogravimétrico diferencial (D.T.G) y del análisis térmico diferencial (A.T.D) demostraron que en las curvas ATD y DTG se observan desde 453 K (180°C) hasta 673 K (400°C) un efecto endotérmico, producidos por la pérdida de agua de constitución, débilmente enlazada, de la Goethita (2a- FeOOH), transformándose en hematita (a- Fe₂O₃) según la siguiente ecuación.



Luego, desde los 673 K (400°C) hasta 943 K (670°C), por efecto del desprendimiento del agua fuertemente ligada de la goethita, se produce una pérdida de peso igual al 10,00 %. La pérdida de peso total hasta 1 473 K(1200°C) es de 11,84 %. Estos resultados confirman la presencia del hidróxido de hierro y de la hematita (Cubillo, 1987).

2.4 Caracterización mineralógica

El resultado del análisis por difracción de rayos X a una muestra representativa del mineral, confirmó como fases fundamentales la hematita, la maghemita y la goethita. La hematita (Fe₂O₃) constituye la fase principal, con contenidos entre 10,00 % y 70,00 % y la goethita α FeO(OH) desde 11,55 % hasta 30,00 %. La presencia de hematita confirma la existencia mayoritaria del contenido de hierro en el mineral.

Los resultados del estudio por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) confirman que los componentes fundamentales son: aglomerados hematíticos, goethitas, serpentinas y espinelas cromíferas, lo cual coincide con los resultados del Informe Geológico (GEO-0-105,1962). Los aglomerados hematíticos están compuestos fundamentalmente por goethitas y serpentinas englobadas por una matriz hematítica. Las espinelas cromíferas se presentan incluidas, tanto en las serpentinas como en las masas hematíticas. Acorde a estos resultados, se estudiada cada uno de los componentes de forma individual en los trabajos de (García, 1989; Díaz y Mojena, 1989). En los aglomerados hematíticos como es conocido, el elemento fundamental es el hierro. El silicio y el aluminio corresponden a las impurezas en la matriz hematítica, la cual está constituida prácticamente por hierro, aunque presenta pequeñas cantidades de titanio y cromo. Las goethitas aparecen englobadas en el aglomerado hematítico, según (García, 1989) y (Díaz y Mojena, 1989).

Los aglomerados hematíticos corresponden a las tonalidades más oscuras en la imagen de MEB de la figura 2.1.

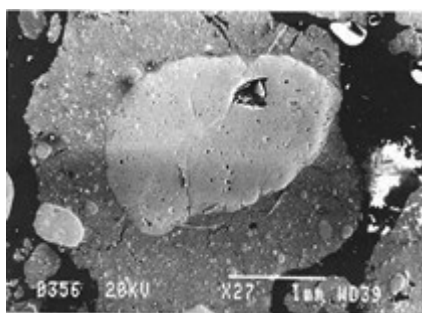


Figura 2.1 Imagen de MEB que muestra la presencia de aglomerado de hematita en los escombros lateríticos de Mina Martí.

Las gangas presentes en el mineral son la serpentina y las cromitas. La serpentina por su contenido de níquel es la más abundante desde el punto de vista para su utilización en la siderurgia y se presentan en granos aislados. Sus componentes fundamentales son el silicio y el magnesio, aunque presentan también pequeñas cantidades de aluminio, hierro y níquel (García, 1989; Díaz y Mojena, 1989).

Las espinelas cromíferas muestran una superficie limpia y pulida, generalmente agrietada, como se aprecia en la figura 2.2. Estas están constituidas fundamentalmente por aluminio y cromo, aunque no son despreciables los contenidos de hierro y magnesio, escasamente se encuentran liberadas por completo, con mayor frecuencia incluidas en las serpentinas (Díaz y Mojena, 1989).

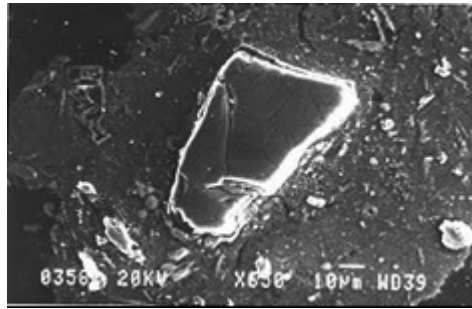


Figura 2.2 Espínela cromífera.

Los resultados de las técnicas de análisis empleadas (difracción de rayos X y MEB), mostraron que la composición fundamental de este mineral es la siguiente: aglomerados de hematita, goethitas, serpentinas y espínelas cromíferas, que lo ubican como un mineral de hierro complejo para su elaboración siderúrgica, aspectos verificados por varios autores (Ortiz, 1988; García L, 1989; Días, y Mojena, 1989).

2.5 Preparación premetalúrgica del mineral, una contribución

Por su composición química resulta atractivo este mineral para la producción de Nickel Pig Iron- NPI, esta aleación es ampliamente conocida como base para la producción de aceros aleados. (López et al, 1987), trabajaron en la determinación de los parámetros energéticos en un proceso de molienda de este mineral, lo cual permitió un análisis cualitativo y cuantitativo del grado de liberación de cada componente en la masa mineral. De forma selectiva e independientes, se identificaron la cromita, las serpentinas y la hematita. El esquema planteado conduce a pensar en una posible ruta de procesamiento para la extracción hacia la aleación del hierro y el níquel. El mineral posibilita la fabricación de nódulos para utilizarlo como material de carga a hornos rotatorios y de arcos eléctricos y obtener Nickel Pig Iron- NPI. Por razones de costo y para eliminar procesos tecnológicos se plantea (Ortiz J, 2015) un procedimiento para la nodulización de este mineral que consiste en lo siguiente:

1. El mineral se expone al sol en una superficie seca, se remueve hasta lograr un mínimo de humedad.
2. El mineral se mezcla y homogeniza durante 30 min con una cantidad determinada de aglomerante y fundentes.
3. El mineral se dosifica a un peletizador de tambor hasta obtener los nódulos, que se clasifican desde 4 mm hasta 12 mm de diámetro.

4. Luego pasa a un proceso de calcinación y pre reducción en hornos rotatorios, utilizando carbón como reductor.
5. El material pre reducido se dosifica al horno de fusión para la obtención de *Nickel Pig Iron- NPI*.

Este procedimiento fue desarrollado en el CENIM a escala de laboratorio, hasta llegar a la pre reducción del mineral (Ortiz, 2015), se obtuvieron nódulos metalizados con una composición adecuada en un horno rotatorio denominado SALVIS, ubicado en el laboratorio del Departamento de Siderurgia.

El procedimiento utilizado fue el siguiente: Una carga de nódulos de mineral más carbón antracita, estequiométricamente calculado se calienta en una atmosfera de nitrógeno hasta 1373 K (1100°C), se obtuvieron nódulos metalizados (prereducidos) con la siguiente composición química. (Tabla 2.2). Un análisis por microscopía óptica del metalizado permitió obtener la representada en la figura 2.3.

Tabla 2.2 Composición química en % en masa, de los pre reducidos obtenidos a partir del mineral (escombros lateríticos de Mina Martí)

Fe_t	Fe^0	Ni^0	Cr_2O_3	MnO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
64,58	48.60	0,90	2,56	0,44	10.20	7.68	6,45	5,30

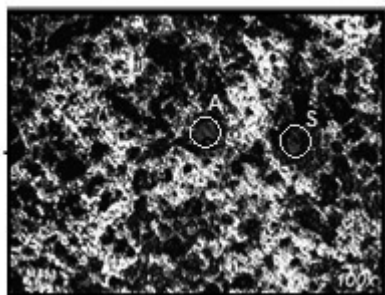


Figura 2.3 Análisis por microscopía óptica de un pre reducido.
S - grano de serpentina; A- grano de aluminocromita.

Se observa una distribución homogénea y porosa del hierro metal en toda la superficie del pre reducido (partes grises en la fotografía de la figura 2.3). Se identifica por su brillo característico un grano de cromita, representada por la letra A y un grano aislado de serpentina más tenue al foco del microscopio, representado por la letra S. Este prereducido posee calidad para ser alimentado a los procesos *RKEF– Rotatory Kiln Electric Furnace*, (Jiang, 2013).

Ha sido notable en China la producción de NPI en los últimos años, dada la escasez de minerales de níquel, varios autores se han referido al tema, (Jiang, 2013) reportó el amplio desarrollo de la producción de (NPI) a partir de lateritas con bajos contenidos de níquel, hasta de 0,90 %, por la tecnología horno rotatorio y horno de arco eléctrico (*RKEF– Rotatory Kiln Electric Furnace*). Se muestra que esta tecnología ha crecido con relación a los procesos tradicionales de obtención de ferroníquel, dada la poca disponibilidad de minerales de níquel con una ley superior a 1,50 % y la gran versatilidad del proceso, el que minimiza pasos tecnológicos y utiliza el NPI como arrabio en caliente (Jiang, 2013 y Pons, 2013). La compañía *Zhejiang Tsings Iron Steel Co. LTD*, opera sus instalaciones con un mineral de similares características importado, en su proceso incluyen la etapa de pre reducción y luego fusión en un horno de arco eléctrico, también es posible realizar el proceso en mini hornos altos.

Con un mineral de similar composición a los escombros, pero con mayor contenido de níquel, en 1960 se realizó un trabajo de investigación por el Buro de Minas de los Estados Unidos para la obtención de lupias de hierro y níquel a partir del mineral laterítico del yacimiento de Mina Ocuja en Nicaro (Warren, 1960). La tecnología, similar al proceso *Krupp Renn*, consistía en procesar en un horno rotatorio una carga de mineral laterítico en su forma natural con el carbón antracita necesario como reductor. En el horno se obtuvo una fase metálica con un contenido de níquel desde 1,00 % hasta 5,00 % como promedio, y de hierro desde 88,00 % hasta 93,00 %, y contenidos variables de Cr = 0,15 - 0,84 %; C = 1,52 - 4,45 % y S = 0,13 - 0,38 %, además de la fase de escorias.

Luego de realizadas 121 pruebas a escala piloto se consideró que era posible el procesamiento del mineral laterítico por esta tecnología, se destaca que una pequeña planta se podía amortizar en un período de 10 años para las condiciones económicas de Cuba en el año 1957. (Warren, 1960). Esta tecnología tiene un alto consumo calórico y de carbón y puede representar una alternativa para procesar los escombros lateríticos. Un ejemplo típico de la escoria obtenida fue: SiO₂ = 38,95 %; Al₂O₃ = 6,65 %; CaO = 1,05 %; MgO = 29,46 %; Ni = 0,06 % y Cr = 5,32 %. El metal obtenido contenía: Fe = 93,64 %; Ni = 2,94 %; Cr = 0,35 %; C = 2,72 %; S = 0,35 %, por lo que se consideró como una lupia de arrabio. Los costos energéticos son mínimos y se puede generar electricidad a partir de la recirculación de los gases.

2.6 Consideraciones para proponer una tecnología de procesamiento

Existen importantes reservas de estos minerales no utilizables por la industria del níquel, debido a que el contenido de este elemento es bajo (inferior a

0,8 %) y no es atractivo para esa industria. Estos minerales poseen apreciables contenidos de hierro, generalmente superiores al 45 % de hierro total en varios depósitos de cada yacimiento.

1. Se ha demostrado que a partir de estas lateritas es posible obtener arrabio, Nickel Pig Iron y acero con contenidos de cromo y níquel apreciables. Ello significa, que los escombros se pueden comercializar en el mercado internacional o ser utilizados por las tecnologías de reducción directa (en hornos rotatorios y en hornos de hogares rotatorios), empleando carbones de bajo costo.
2. Existe gran experiencia en operar hornos rotatorios metalúrgicos y una industria mecánica que puede fabricar gran parte de los componentes de estas instalaciones lo cual conduciría a tener una industria productora de un metal sustituto de chatarra con total independencia para la obtención de aceros de baja aleación.

TERCERA PARTE

Resultado de las principales investigaciones para el procesamiento de las Colas de Nícaro con fines siderúrgicos

3.1 Caracterización Químico Física de las colas de Nicaro

Las colas de la producción del níquel de la extinta fábrica de Nicaro se originaron durante aproximadamente 70 años de operaciones. La materia prima suministrada a esta planta era una mezcla de mineral limonítico (70 %) y serpentina (30 %) procedentes de los yacimientos de Pinares de Mayarí y Nicaro, lo que dio origen a un dique de colas con más de 90 millones de toneladas, que representa una gran reserva de mineral de hierro y otros metales.

El contenido de hierro de las colas de Nicaro oscila entre 38,40 y 44,20 %. Estas han sido estudiadas con el objetivo de concentrar el hierro en varios países, se crea el CIS – Nicaro y una Planta Piloto en 1983 para centrar estos trabajos (Ferreiro, 2015). Se ha reportado en estas, además, del hierro, níquel y cobalto como elementos de interés, la presencia de escandio y otros elementos. La composición química se representa en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química elementos y óxidos en la Colas de Nícaro

ELEMENTOS y ÓXIDOS.	CONTENIDO %	ELEMENTOS y ÓXIDOS.	CONTENIDO %
Fetotal	38,40 – 44,20	SiO ₂	15,40 – 20,54
FeO	13,17 – 18,50	CaO	0,40
Fe ₂ O ₃	37,65 - 45,10	MnO	0,67 – 2,22
Al ₂ O ₃	3,25 – 5,30	NiO	0,37 – 0,57
MgO	9,54 – 13,80	P ₂ O ₅	0,03 – 0,06
Cr ₂ O ₃	2,35 – 4,00	Cl	0,06 – 0,50
S	0,07 – 0,20	Na ₂ O	0,021 – 0,27
CoO	0,09 – 0,12	K ₂ O	0,01 – 0,35
CuO	0,006 - <0,01	As	<0,01
Fe ₀	0,13 – 0,43	PPI	0,96 – 2,90

Según varios estudios, se definen como un mineral de hierro no común, además del hierro que varía desde 30 % hasta 45 %, contiene cromo (1,6-2,3 %) y contenidos de níquel y cobalto que oscilan desde 0,3 % y 0,5 % en dependencia de la relación de la materia prima alimentada a la fábrica y al propio proceso de extracción de esos metales durante el procesamiento tecnológico. Las colas se consideran un mineral de hierro de tipo magnetita artificial de granulometría fina, donde el 85 % de las fracciones son inferiores a 0,0074 mm, por lo que se pueden beneficiar directamente por separación magnética húmeda a baja intensidad.

A partir de la década del 70 del pasado siglo se realizaron varias investigaciones, utilizando la vía de separación magnética húmeda de baja intensidad (SMH-BI), desde la escala de laboratorio hasta pruebas industriales, se han obtenido concentrados de hierro que varían desde 52,8% hasta 57,10 % de hierro total (Ferreiro, 2015). Se definió que las colas constituyen un mineral de hierro pobre, polimetálico, que necesita beneficiarse para su aprovechamiento integral.

3.2 Resultados de los estudios de la composición mineralógica

Un estudio efectuado por la (Nippon Steel Corporation, 1977) identificó mediante la difracción por rayos X (DRX) la presencia de los siguientes minerales (CIS, 1988; 2005) representados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición mineralógica de las Colas de Nicaro (*Nippon Steel Corporation, 1977*)

FASE MINERALÓGICA.	FÓRMULA.	CONTENIDO %.
Magnetita.	FeO. Fe ₂ O ₃	51,20
Cromita.	(Fe, Mg) O. (Cr, Al) ₂ O ₃	8,20
Forsterita.	2(Mg _{0,96} Fe _{0,04}) O.SiO ₂	25,10
Andalucita	Al ₂ O ₃ . SiO ₂	4,80
Fase Desconocida.	Fe – Si Mineral.	8,00

El examen al microscopio reveló la presencia de las llamadas pseudopartículas, en las cuales la magnetita o la cromita forman el núcleo, rodeadas por finas partículas de ganga adheridas a este.

Informes técnicos en los archivos del CIS en Nicaro (CIS, 1988; 2005), refieren que desde 1979 se corroboraron la existencia de dos fases cristalinas principales mediante DRX:

1. magnetita polifásica, con parámetro de la red cristalina α = desde 8,380 hasta 8,252 Å.

2. olivino polifásico de la familia de la fayalita, o sea, una serie de minerales de composición variable que corresponden a la fórmula media $(\text{Mg.Fe}_{2+})_2\text{SiO}_4$.

Se estableció que, el déficit de óxido ferroso y la entrada de los iones de aluminio y cromo a la red de la magnetita provocan una disminución de la susceptibilidad magnética del mineral formado.

Fue estudiada la composición de las fases magnética y se determinaron los parámetros de sus redes cristalinas, se separaron fracciones a intensidades magnéticas progresivas, en un analizador similar al tubo Davis, acompañado dicho estudio de difractogramas de las partículas con relación a la intensidad de campo aplicada.

De este estudio resultaron las siguientes consideraciones. Prevalece la fase con $\alpha = 8,368 \text{ \AA}$ en el óxido de hierro, cuyo parámetro difiere con el de la magnetita pura ($\alpha = 8,398 \text{ \AA}$). Las fracciones incluyen una serie de fases de composición variable con parámetros de hasta $\alpha = 8,304 \text{ \AA}$, lo cual influye negativamente sobre los resultados del proceso de separación magnética.

Resumiendo, del resultado de varios trabajos de investigaciones se confirma que las Colas de Nicaro presentan a la magnetita como su principal componente mineral, acompañada de forsterita y cromita, además de otros minerales en pequeñas cantidades. El contenido de la magnetita es de 51,20 %.

Las partículas magnéticas examinadas al microscopio electrónico contienen hasta 1% de cromo y el contenido de hierro es hasta un 63,62 %, magnitudes considerablemente elevadas para el Cr y relativamente bajo para el Fe. Estos valores fueron corroborados por (Leyva et al, 1991), así como, el estudio de las cromitas que se obtienen como resultado del proceso de separación gravimétrica de las mismas hasta la obtención de un concentrado de cromo (Carthy, 1993; 2008). Se comprobó, que las partículas de cromita presentan magnesio y aluminio en solución sólida y el contenido de cromo varía desde de 25 % hasta 34 %. La superficie de las cromitas es muy limpia y pulida debido al tratamiento metalúrgico recibido en los procesos de la planta de níquel, comparada a otras cromitas tradicionales lo que la hacen atractivas para la producción de ácido crómico.

3.3 Propiedades Físicas

Los resultados de las propiedades físicas de las colas de Nicaro se muestran detalladamente por varios autores, los cuales coinciden en los estudios realizados (Carthy, 1993; 2008; Ferreiro, 2015).

Composición granulométrica

La tabla 3.3 muestra la composición granulométrica de las colas de Nicaro, y el contenido y la distribución de Fe, Cr₂O₃ y Al₂O₃ por clases de tamaño.

Tabla 3.3 Composición granulométrica de las colas de Nicaro

Tamaño de las clases, mm.	Rendimiento %	Contenidos, %.			Distribución, %.		
		Fe	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe total	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
+ 0,20	2,20	32, 1,83	3,55	1,70	1,70	2,30	
- 0,20 + 0,125	2,30	34, 1,26	3,25	1,80	1,50	2,20	
- 0,125 + 0,070	22,30	36, 2,74	3,81	18,70	24,60	24,30	
-0,070 + 0,040	11,18	40, 3,65	3,44	11,10	17,60	11,70	
-0,040 + 0,030	11,40	45, 4,20	3,58	12,10	19,50	11,80	
- 0,030 + 0,020	13,50	44, 2,13	3,15	13,90	11,80	12,30	
-0,020 + 0,010	11,60	45, 1,83	3,10	12,40	8,70	10,40	
-0,010 + 0,00	25,20	48, 1,42	3,44	28,30	14,60	25,00	
TOTAL.	100,00	42, 2,45	3,46	100,00	100,00	100,00	

Como ya había sido declarado antes, es un mineral de granulometría fina, a causa de que el mineral de cabeza procesado en la planta de níquel es previamente triturado hasta el 80% de las partículas menores a 0,074mm.

El contenido y la distribución del Fe aumenta con la disminución del tamaño de las partículas, mientras que para el cromo los mayores contenidos y distribución están entre 0,125 mm y 0,030 mm; los contenidos de Al₂O₃ no presentan una regularidad bien definida.

Porosidad y Gravedad específica y peso volumétrico

Del análisis pignométrico, resulta que las colas poseen un 42,50 % de poros, y una humedad molecular capilar de 42,40 %. Esto se debe a que, en los hornos de la planta de níquel, la hematita (fase ferrosa fundamental) se reduce a magnetita, liberando parte del oxígeno contenido, lo que provoca una configuración esponjosa en los granos.

La gravedad específica se encuentra en el rango desde 3,60 hasta 3,85 t/m³ y su peso volumétrico desde 1,30 hasta 1,46 t/m³.

Análisis térmico

En las investigaciones realizadas en el CENIM en 1974, se realizaron ensayos de Análisis Térmicos Diferenciales (ATD), como resultado de un calen-

tamiento lineal hasta 1373 K (1100°C), se obtuvo un efecto endotérmico en la región desde 373 K (100 °C) hasta 403 K (130 °C), debido a la pérdida de humedad. En intervalo desde 793 K (520 °C) hasta 833 K (560 °C), se observa un fuerte efecto exotérmico que corresponde a la oxidación de los cristales de magnetita. Luego, desde 1033 K (760 °C) hasta 1053 K (780 °C) aparece otro efecto exotérmico pequeño, el pico es de forma redondeada, que representa el proceso de oxidación de la magnetita remanente, una vez que se transformó la estructura de ésta.

Ángulo de talud y ángulo de fricción interna

Según el análisis granulométrico y la cohesión, el ángulo de talud de las colas es de fricción interna de 15° y 31°. De lo anterior se desprende que, durante las condiciones minero-técnicas de explotación del yacimiento, las inclinaciones de los taludes podrían oscilar desde 30° hasta 40°, aunque esto estaría estructuralmente relacionado al grado de humedad que tenga el material.

3.4 Investigaciones realizadas para la obtención de concentrados de hierro a partir de las colas de Nicaro

Los primeros intentos para la concentración magnética de las colas de Nicaro se reportaron, en el año 1961. A partir de una muestra 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, con contenido de hierro del 58,0 % y de cromo del 0,93 % (CIS, 1970). Según el informe, el contenido de hierro del concentrado magnético no alcanzó el 60,0 %.

En 1974 se realizó una primera cooperación para la investigación de las colas de Nicaro entre el CENIM y el CIME de Cuba, en la cual participaron José A. Bonet y A. Rosell directores de ambos centros respectivamente. Las técnicas utilizadas, que incluían la separación magnética en Tubo Davis, posibilitaron concentrar el hierro hasta 53 % y predecir un futuro optimista para el procesamiento siderúrgico de las Colas de Nicaro. Se determinó la existencia de granos de cromitas de forma independiente, con una composición de cromo de 34 % y de aluminio de 9 %. Fueron investigadas las propiedades magnéticas y se consideró que este mineral es una magnetita artificial, procedente de la reducción de los óxidos superiores de hierro en los hornos de la planta, durante el procesamiento para la obtención de sinter de níquel se obtuvo que mediante un proceso de oxidación del mineral en una atmósfera de CO₂ la presencia de magnetita aumentó, lo cual evidencia la presencia de magnetita

lo cual justifica que existía una importante presencia de FeO, y que, luego de una separación magnética en Tubo Davis, la recuperación del hierro aumentó, motivada por el aumento de la presencia de magnetita. Se demostró, además que las cromitas en las colas pueden llegar a representar el 4,45 % y los contenidos de cromo pueden llegar a 34 %; aluminio 9 % y hierro 17 %.

A partir de los años 70 del pasado siglo, existen antecedentes en la investigación de las colas de Nicaro, en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), se desarrollaron varios trabajos a escala de laboratorio, relacionados con el beneficio de esta materia prima (Suwardjo, 1982). Este autor y su equipo lograron obtener concentrados de 55 % de hierro total, a partir del cual, también obtuvieron sínter de hierro con buenas características para ser utilizado en hornos altos. La instalación utilizada, denominada paila de sinterización, fue especialmente diseñada para este objetivo. Estos estudios fueron la base para la concepción de una planta piloto de beneficio con las colas de Nicaro y la creación del Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS- Nicaro).

De forma práctica (CIS, 1983; Carthy, 1993; 2005), el esquema de beneficio por concentración magnética húmeda a baja intensidad, utilizado para el beneficio de las colas de Nicaro a escala piloto para cada 100 t, se puede representar como lo muestra la figura 3.1.

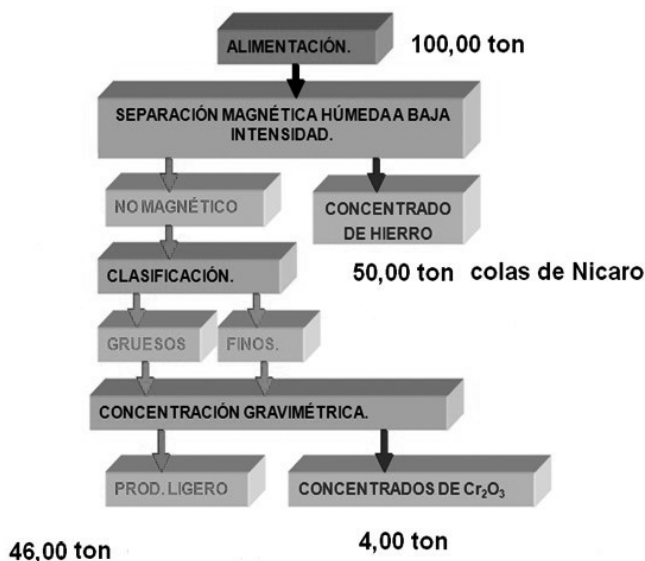


Figura 3.1 Esquema básico para la concentración magnética húmeda a baja intensidad para el beneficio de las colas de Nicaro.

La composición típica del concentrado de hierro que se obtiene por el esquema anterior (CIS, 1983; Carthy, 1993; Ferreiro, 2015), se representa en la tabla 3.4. Se obtiene también un concentrado de cromitas para múltiples usos.

Tabla 3.4 Composición química del concentrado de hierro de las colas de Nicaro.

Fe _T	FeO	Fe ₂ O ₃	Ni	Co	Mn	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	S	Zn	Cu
54,13	14,16	57,78	0,41	0,09	0,73	6,3	0,2	8,96	4,346	1,871	0,145	0,03	0,02

3.5 Resultados de las investigaciones con el propósito de obtener arrabio a partir de las colas de Nicaro

3.5.1 Obtención de lupias de arrabio en hornos rotatorios de reducción

En un resumen presentado (Mojena L, 2011) se reporta que es posible el beneficio y la calcinación reductora con carbón para obtener lupias de hierro con níquel y cromo, a partir de las colas de Nicaro. Se realizaron pruebas industriales, empleando hornos rotatorios de calcinación y reducción “(Proceso Krupp-Reen mejorado)”. La experiencia permitió obtener lupias con la siguiente composición química: Fe= 92,5 %; Ni= 0,65 %; Cr= 0,86 %; Mn= 0,02 %; C= 1,90 %; S = 0,186 %; P = 0,11 %, pese a que los índices de consume, tanto de carbón como de materiales refractarios fueron elevados, es una opción para la obtener metal de forma independiente y escoria como materiales de construcción.

3.5.2 Pruebas a escala industrial con el propósito de lograr arrabio en un horno alto de 258 m3

A principios del año 1983, se culminó en la planta piloto del CIS, la producción de 12 mil toneladas de concentrado de hierro a partir de las colas de Nicaro (CIS, 1983). En este proyecto, se demostró la posibilidad de obtener concentrado de hierro a nivel industrial en la planta piloto del CIS y, luego de una preparación premetalúrgica, se produjeron 3100 t de sinter de mineral de hierro. El sinter se fundió en un horno alto de 258 m3 y se obtuvieron 1 650 t de arrabio de aleación con cromo y níquel de forma experimental, 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 %. Seguidamente, fue creada una tecnología para la fusión de un acero a partir de la composición de este arrabio, como resultado se obtuvo en un oxiconvertidor un acero, para la elaboración

de bobinas y chapas en caliente y en frío según consta en las informaciones técnicas (CIS ,1983).

3.5.3 Obtención de hierro metálico y lupias de arrabio mediante el método de reducción directa

A partir de la década de los años 1950 del pasado siglo se realizaron investigaciones a escala de laboratorio para la posible utilización siderúrgica de las Colas de Nicaro, en el año 1952 la empresa, National Lead Company, estudió el proceso de nodulización de las colas. Los nódulos obtenidos se calcinaron a 1173 K (900 °C), se mezclaron con cisco de coque y carbonato de calcio, se calentaron hasta 1473 K(1200 °C), luego de metalizados y triturados, se aplicó una separación magnética seca, obteniéndose un producto magnético con 71,2 % de hierro total y una recuperación del 83,4 % de este metal (National Lead Company,1952). Se concluyó que el producto metalizado puede constituir una carga metálica para la producción de acero y que, además, puede ser mejorado si durante el proceso de reducción se mezcla con minerales de alta ley en hierro.

En el año 2015 se concluyó una investigación (Ferreiro, 2015) que indicó una nueva ruta para el procesamiento de las colas de Nicaro atemperada a las nuevas circunstancias económicas, financieras, energéticas, ambientales y de infraestructura industrial de Cuba. La investigación surgió en correspondencia con la aparición de nuevos procesos de reducción directa para el tratamiento de menas pobres en hierro, como, por ejemplo, los hornos de hogares rotatorios, siendo el CIS y la Universidad de Moa, los que deciden realizar un nuevo enfoque para la investigación de esta materia prima.

Se demostró (Ferreiro, 2015) la obtención de pelets autoreductores con dimensiones desde 12 mm hasta 18 mm de diámetro y una resistencia mecánica de 20 N, a partir del concentrado de las colas de Nicaro, respondiendo a los requisitos establecidos para el procesamiento. (Kobe Steel Ltd., 2011).

Ferreiro (2015), realizó una serie de experimentos que posibilitaron definir el régimen más adecuado para la reducción de los pelets en un horno de laboratorio estacionario (tipo mufla), con atmosfera Argón a razón de 5l/min y a 1623 K (1400 °C), la cantidad de muestra fue aproximadamente de 50 g ubicada en un crisol. Se apreció que es posible separar el hierro en forma de lupias de la ganga, transformada en escoria. En la figura 3.2 se muestran las fases escoria – lupias, obtenidas a partir de los pellets con relación \dot{u} de 0,28 a la temperatura de 1 623 K (1400°C) (Ferreiro, 2015).

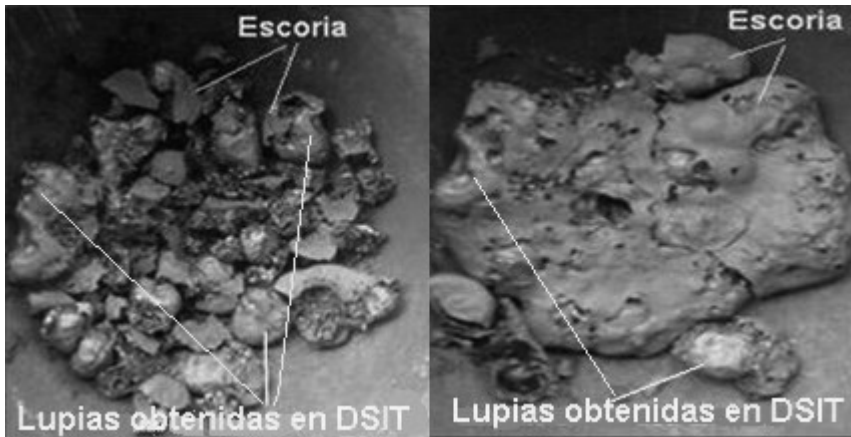


Figura 3.2 Fases lupias – escoria.

Las fases lupia-escoria (Figura 3.2), las cuales fueron exfoliadas sin el empleo de equipo alguno, indica que la viscosidad lograda permitió una correcta formación de las lupias.

La densidad real (pignométrica) de las lupias fue de 7,7 g/cm³, y se encuentra dentro del rango de similares obtenidas en hornos de hogares rotatorios (entre 6,5 – 7,8 g/cm³), de acuerdo a lo reportado por (IMMA, 2013); su tamaño osciló entre 5 y 12 mm de diámetro, por lo que se encuentra dentro del rango de 5 y 25 mm, reportado por (Kobe Steel Ltd., 2010; Ferreiro, 2015). La composición química de las lupias obtenidas se presenta en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Composición química de las lupias de arrabio (Ferreiro, 2015).

% de elementos determinados, en las lupias									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	Cu	Fe
4,76	1,01	0,323	0,026	0,142	1,931	0,615	0,148	0,024	91,35

Dentro de los elementos de aleación más importantes, se tiene la presencia del carbón, entre 4,32 y 5,10 %, estos elevados valores se justifican, debido, fundamentalmente a la presencia del cromo en las lupias (1,931 %), que conduce a que la aleación asimile elevados contenidos de carbono, debido a la formación de un doble carburo de cromo y hierro, contrarrestando el efecto grafitizador del níquel, cuyo contenido en las lupias se enmarcó entre 0,608 y 0,621 %, lo que coincide con los reportes realizados por (Bethlehem, 1923 y Bethlehem archive, 1966).

En las lupias obtenidas el contenido del silicio osciló entre 0,27 y 0,59 %, con este bajo contenido de silicio, considerando su efecto grafitizador, la estructura de las lupias debe ser la de un arrabio blanco, según reporta (Howard, 1962).

Las lupias de arrabio obtenidas se clasifican dentro de la designación "otros arrabios aleados" (Pig-SPA), de la norma europea Euronorm 1- 81 (Ferreiro, 2015). Debido a la presencia de elementos de aleación, el contenido de hierro resulta menor (91,23 %) que el que se obtiene por la tecnología ITMK3 (entre 96 y 97 %) (Kobe Steel LTD, 2010; 2011)

Con la composición química de las lupias obtenidas, sería posible sustituir hasta un 8 % de chatarra de acero por este material en la elaboración de aceros al carbono, por lo que el mayor uso que se le podría dar a este material sería para la obtención del acero Mayarí (Bethlehem, 1923 y Bethlehem archive, 1966), así como para la elaboración de aceros inoxidable o de baja aleación, para los que se podría emplear más del 80 % como material de carga.

La escoria obtenida en el proceso podría ser utilizada en la producción de refractarios, según describe el autor (Ferreiro, 2015).

3.5.4 Obtención de arrabio por reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua (por fusión reductora) de colas de Nicaro sin beneficiar

Se ha publicado un resultado de investigación conjunta (Cruz-Crespo et al., 2023) entre el Centro de Investigaciones de Soldadura de Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas (CIS-UCLV), La Universidad de Moa y el Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS-Nicaró), cuyo objetivo fue: Evaluar la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr, mediante la reducción carbotérmica (fusión reductora) en horno de arco de corriente continua de las colas del proceso de producción de níquel en Nicaro sin beneficiar, empleando carbón antracita como reductor, con vistas a la sustitución de chatarra en el proceso de obtención de aceros aleados. Fueron realizados cálculos para la obtención de arrabio por reducción carbotérmica para establecer la composición de la carga y predecir orientativamente las cantidades y composiciones de los productos de colada. La metodología de cálculo propuesta es válida para aplicar de modo general en la reducción carbotérmica para la obtención de arrabio líquido a partir de minerales de hierro, independientemente de la fuente aportadora de carbono que se utilice (coque, carbones no coquificables, carbón vegetal) y de la fuente de energía de calentamiento del horno; o sea, que es aplicable su extrapolación a la reducción, por ejemplo, en minialtos hornos.

Fueron realizadas corridas experimentales en el Laboratorio de Materiales para Soldar del CIS-UCLV (Cruz-Crespo et al., 2023), obteniéndose arrabio aleado al cromo y níquel, con un contenido promedio de hierro igual a 86,875 % (Tabla

3.6). El recobrado fue de 81,84 % para el hierro, de 76,31 % para el cromo y de 82,81 % para el níquel, enmarcándose en el entorno de los valores reportados por diferentes autores en la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr (Yildrian et al., 2013; Astuti et al., 2018; Gou et al., 2021).

Tabla 3.6 Composición química del arrabio obtenido experimentalmente de la reducción carbotérmica de colas de Nicaro en horno de arco de corriente continua (% en masa).

Colada	C	Mn	Si	Ni	Cr	Co	P	S
1	4,383	1,192	2,732	0,72	3,735	0,141	0,052	0,127
2	4,471	1,205	2,674	0,743	3,746	0,135	0,050	0,116
3	4,452	1,189	2,723	0,739	3,729	0,139	0,053	0,128
Media	4,435	1,195	2,710	0,734	3,737	0,138	0,052	0,124
Desv. estándar	0,046	0,009	0,031	0,012	0,009	0,003	0,002	0,006
Interv. confianza	0,115	0,021	0,078	0,031	0,022	0,008	0,004	0,017
Error estándar	0,027	0,005	0,018	0,007	0,005	0,002	0,001	0,004

Los autores de la investigación (Cruz-Crespo et al., 2023) declaran que debe ser evaluada en estudios futuros la posibilidad de disminuir el azufre mediante, el efecto del aumento de la basicidad en la carga para obtener el arrabio o valorar desulfurar directamente durante la elaboración del acero a partir del arrabio. Declaran, también, que los relativamente altos contenidos de silicio y manganeso favorecen para la elaboración de aceros, ya que son elementos desoxidantes.

La escoria resultante de la fusión-reducción (Cruz-Crespo et al., 2023), se enmarca en el sistema pseudoternario CaO-MgO-SiO₂, con 10 % de Al₂O₃, en la región de la fosterita (2MgOSiO₂), en la vecindad de la melilita [Ca₂Mg(Si,Al)₂O₇] y la monticelita [(Ca,Mg)OMgOSiO₂], en el entorno de la isoterma de 1400 oC, caracterizándose por una basicidad de alrededor de 1.

Desde el enfoque de la sostenibilidad ambiental (Cruz-Crespo et al., 2023), el procesamiento propuesto no genera nuevos residuales sólidos, ya que no se realizó beneficio de las colas, y la escoria del proceso de obtención de arrabio, al presentar una composición cercana al cemento Portland, puede usarse en la obtención de un material cementicio. También se recomendó para la introducción a la práctica industrial, cargar el arrabio líquido al horno de aceración para aprovechar el calor latente y valorar el empleo de los gases de salida del horno

de fusión-reducción en el precalentamiento de la carga a reducir; así como la incorporación en las cargas para la fusión-reducción de polvos de acería y de cascarilla de laminación, que son residuales endógenos de la producción de acero.

3.5.5 Consideraciones para proponer una tecnología de procesamiento

Demostrado que las colas de Nicaro, se consideran una mena de hierro pobre, su contenido de hierro varía desde 38,40 % hasta 44,20 % y por los elevados contenidos de aluminio y silicio, su ganga es ácida. Su extremada finura la definen, además, como un material no convencional, lo cual conduce a tener que aglomerarlas (peletizarlas o briquetearlas) para ser utilizadas. Las labores de minería para la utilización de esta materia prima son sustancialmente menores que para cualquier otro yacimiento de hierro, lo que constituye una gran ventaja.

1. El esquema de concentración magnética definido, permite obtener un concentrado de hierro que no supera establemente el 55 % de hierro total. Por cada tonelada que se concentra se obtienen 400 kg de rechazo, lo que significa que si se explota industrialmente por ese esquema de beneficio se forma otro dique de colas con una ley en hierro desde 30 % hasta 35 %, o sea, que se mantiene similar el problema de los daños al medio ambiente, sumado a los costos de mantenimiento al propio dique. Por ese motivo, se recomienda utilizarlas sin beneficiar partiendo de que el proceso de reducción de los óxidos de hierro hasta hierro metal se comporta de forma similar, según reportan las investigaciones, además se pueden aprovechar totalmente los residuales.
2. Las investigaciones realizadas han permitido demostrar la obtención de arrabio o lupias de arrabio (con níquel y cromo). Si se parte de que el precio de una tonelada de colas es sumamente bajo (50 % inferior a una tonelada de mineral de hierro comercial), no cabe dudas que se puede obtener hierro comercialmente atractivo para la obtención de aceros de baja aleación o inoxidables.
3. La tecnología que se defina debe considerar el aprovechamiento integral de las colas para que sea técnica y económicamente sustentable el procesamiento. Son significativos los contenidos de materiales estériles, de los cuales se pueden obtener refractarios y materiales de construcción a bajo costo, como se ha definido en varios trabajos. En el mismo sentido de la sustentabilidad, como sugieren algunos de los estudios realizados, la tecnología de procesamiento debe considerar el mayor aprovechamiento

posible del calor de los gases de salida (en el precalentamiento de cargas) y del calor latente de los productos.

4. Las tecnologías de reducción directa en hornos rotatorios y en hornos de hogares rotatorios indican ser atractivas para su aplicación ya que suelen utilizar carbón antracita e incluso carbón vegetal, la evaluación económica así lo indica. Una inversión para garantizar la demanda de metal de las dos acerías del país por estas tecnologías debe recuperarse en 5 años.
5. La presencia de escandio y otros elementos altamente cotizados en este mineral debe ser objeto de seguimiento lo que contribuye a darle un valor adicional a esta materia prima.
6. Se debe tener en cuenta que la producción de arrabio utilizando carbón vegetal en minialtos hornos puede ser una tecnología atractiva a pequeña escala debido a la existencia de las materias primas próximas a las fábricas, esto puede dar independencia a la producción de acero de baja aleación al poder cerrar ciclo con las acerías. Experiencias sobre este proceso existe en la siderurgia de Brasil.

CUARTA PARTE

Síntesis de otras investigaciones realizadas con minerales de hierro cubanos para fines siderúrgicos

Al proponerse el proyecto de construcción de una Siderúrgica Integrada en Municipio de Mayarí, Provincia de Holguín, en los años 1980 del pasado siglo, se planteó como tarea buscar todas las fuentes posibles y alternativas de minerales de hierro para fines siderúrgicos. Basado en ello, se definió investigar las posibles reservas de los yacimientos de hierro de Pinares de Mayarí, las colas resultantes de la lixiviación ácida, en la Empresa “Pedro Soto Alba” de Moa y el yacimiento de hierro de Santiago de Cuba. Se realizaron los ensayos básicos metalúrgicos, a nivel de laboratorio, en las instalaciones del CENIM (España) del CIME y el CIS-Nicaró de Cuba, para tener una primera caracterización de los minerales disponibles. A continuación, se abordan las informaciones fundamentales reportadas por las fuentes publicadas.

4.1 Escombros lateríticos de Pinares de Mayarí. Una caracterización

Como su nombre lo indica, ubicados en el municipio de Mayarí, provincia de Holguín. En esta zona se localizan varios depósitos de minerales de hierro (GEO-112,1966), que pueden ser considerados para el procesamiento siderúrgico, tal como se realizó en el siglo anterior con la construcción de la planta de nodulización, ubicada en Felton (Bethlehem Steel Company, 1923), a partir del mineral de hierro de Pinares de Mayarí.

Una investigación de las propiedades químico físicas y mineralógicas fue realizada por varios autores (Cubillo C, 1987; García L, Díaz C, Mojena L, 1989) en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), España. La composición química promedio se presenta en la tabla.4.1.

Tabla 4.1 Composición química promedio de los escombros lateríticos de Pinares de Mayarí.

Denominación del pasivo	Contenido de elementos y en forma de óxidos (%)									
	Fet	Ni	Co	Cr2O3	Al2O3	SiO2	MnO	MgO	CaO	Otros
Escombros de Pinares de Mayarí	46,8	0,6	00,7	1,7	7,70	2,45	0,09	0,16	0,09	13,04

En dependencia de los sitios donde se tomen las muestras, los contenidos de hierro y níquel pueden tener ligeras variaciones, se muestran los resultados de los laboratorios del CENIM y el CIS- Nicaro (Cubillo C, 1987; García L, Díaz C, Mojena L, 1989).

El análisis granulométrico mostró que el 100 % de las fracciones se localizan desde 0 hasta 6,3 mm, existiendo una diferencia en los contenidos de Fe, NiO, CoO y Al2O3 principalmente a partir de las granulometrías +0,83 y -0,83 mm. En la fracción +83 mm hay un alto contenido de hierro, mientras en la fracción -0,83 mm es menor, siendo en esta fracción mayores los contenidos de NiO y Al2O3 (Mojena, Castillo, Fernando, 1989). Ello significa que se puede realizar un beneficio mediante clasificación por tamizado.

De lo anterior se deduce que este mineral solo con el análisis granulométrico se observa un enriquecimiento en la fracción +0,83 mm y un empobrecimiento en la fracción -0,83mm con relación al contenido de hierro principalmente (Mojena, L; Castillo, A; Fernando G,1989).

Los estudios realizados en el laboratorio de Siderurgia del CENIM (Cubillo, 1987) de análisis térmico gravimétrico (A.T.G.), del análisis termogravimétrico diferencial (D.T.G) y del análisis térmico diferencial (A.T.D), demostraron que en las curvas ATD y DTG se observa, desde 453 K (180 °C) hasta 673 K (400 °C) un efecto endotérmico, producido por la pérdida de agua de constitución de la Goethita (2a- FeOOH), que por su deshidratación se transforma en hematina (a- Fe2O3).

La descomposición térmica de este mineral es similar a la de los escombros de Mina Martí, solo que el nivel de perdida en peso puede llegar hasta el 14 % (Cubillo, 1987).

En el análisis mineralógico por microanálisis en el MEB de los escombros de Pinares de Mayarí (García, 1989; Díaz y Mojena, 1989) su composición fundamental está dada por masas de goethitas y hematitas, en las que se encuentran localizadas las impurezas en ellos existentes.

Se han estudiado cuatro tipos de impurezas, por ser las más abundantes, pero pueden existir variaciones de composición en las mismas que dan lugar a otras especies mineralógicas.

Las impurezas más abundantes que se encuentran en estas masas son: masas de espinelas de cromo, impurezas de aluminio, aluminocromitas y nontronitas.

Los estudios de reducción gaseosa demostraron la posibilidad de obtener una materia prima metalizada (Mojena, Castillo, Fernando, 1989). Se recomendó considerar esta materia prima para la producción de aceros de baja aleación, por las cantidades disponibles en los depósitos y la evidencia de que en el siglo anterior se produjo arrabio de un mineral del propio yacimiento. Esta constituye una alternativa para la obtención de hierro primario como sustituto de la chatarra, da también la posibilidad producir Níquel Pig Iron con la tecnología de prerreducción en hornos rotatorios y luego fusión en hornos de arcos eléctricos. También se podría explorar la producción directamente de arrabio líquido con un reductor barato y accesible (por reducción carbotérmica en hornos de arco de corriente continua (fusión reductora) con carbón vegetal o, en minialtos hornos con este mismo reductor).

4.2 Los escombros lateríticos y las colas resultantes del proceso de lixiviación ácida. Una caracterización

En el congreso IBEROMET 2006, fue presentado un trabajo sobre la caracterización de los escombros resultantes de la minería por la tecnología por lixiviación ácida (López F; Ramírez C, 2006), se realizó un trabajo de caracterización de esta materia prima, la cual presentaba un tamaño de partículas inferior a 10 mm, se destaca fundamentalmente la presencia de los siguientes elementos a tener en cuenta para procesos siderúrgicos:

Hematites = 72.83 %, óxido de níquel = 0.64 %, óxido de cobalto = 0.16 % y Alúmina = 17.68 %, luego de un estudio utilizando rigurosas técnicas de análisis se presenta la cinética de la descomposición de la goethita. Los resultados se obtienen a partir de las informaciones del análisis termogravimétrico (TG). Los parámetros cinéticos (Energía de Activación, Factor pre-exponencial y orden de reacción) se calculan aplicando el método propuesto por Ozawa y por la Norma ASTM E698. Aplicando el método Ozawa, se obtiene un valor medio de la energía de activación de la goethita de $114.40 \text{ kJ mol} \pm 7.62$ y un valor del factor pre-exponencial de $A = 1.1 \times 10^5$. El valor de la energía de activación obtenido a partir de la Norma ASTM E698 es de 123.66 kJ mol . El modelo cinético que mejor describe la cinética de la descomposición de la goethita es el modelo rotacional bidimensional R2. Los elevados contenidos de aluminio

pueden limitar la utilización siderúrgica de esta materia prima, por lo cual se sugiere un beneficio previo para minimizar el contenido de este elemento.

En 1983, Suwardjo, demostró la posibilidad de obtener pellets calcinados auto fundentes a partir de un mineral de origen laterítico (Colas de Moa). La síntesis de la tecnología es como sigue: desulfuración, tostación magnetizante, separación magnética húmeda y obtención de un concentrado de hierro con ley superior al 60 %. Los pellets obtenidos a partir de este concentrado se consideraron aceptables con relación a las propiedades metalúrgica, pero como elemento desfavorable se considera el rechazo de la separación magnética que origina otro dique de colas. Los pellets calcinados cumplen con las propiedades metalúrgicas, con la adición de cal como aglutinante, escorificante y desulfurante. La continuación de este trabajo, para la reducción gaseosa de los pellets fue abordada por (Frades, 1988), demostrando que el producto metalizado es un material naturalmente aleado base hierro, con hasta un 5,00 % de elementos como manganeso, níquel, cromo y cobalto (Widodo, 1983 y Frades, 1987).

Otra ruta para el procesamiento de este mineral fue desarrollada por (Guerra, 1987), donde se realizó un riguroso estudio mineralógico, seguido por la desulfuración, tostación magnetizante, obtención de un concentrado de hierro, micropelletización y reducción gaseosa de los micropellets. Se obtuvieron micropellets metalizados con características óptimas para la producción de aceros aleados con cromo.

Características de las colas de la lixiviación ácida (rojas) de Moa:

El análisis por difracción de rayos X, permitió determinar que el hierro, además de presentarse en las colas como hematita, también se presenta en forma de magnetita Fe_3O_4 aluminocromita ($FeO(Cr,Al)_2O_3$), cromita ($FeCr_2O_4$), y silicatos complejos. En la tabla 4.2 se incluye el análisis mineralógico de las colas, se observa un elevado contenido de azufre, el cual es consecuencia de la lixiviación con ácido sulfúrico. Este azufre, de acuerdo con los análisis por difracción de rayos X y químico, se presenta, fundamentalmente, como sulfato cálcico hidratado (yeso) ($CaSO_4 \cdot H_2O$), y un compuesto tipo alunita (hidroalunita) ($H_3O \cdot Al(SO_4)_2 (HO)_6$), en los que los iones hidronio (H_3O^+) sustituyen a los iones potasio y sodio que presentan valores muy bajos en las colas, lo que confirma los resultados de otros trabajos (Suwardo, 1983). La granulometría, es inferior de 40 μm y más del 50 % en el mineral, están en fracción menor de 5 μm . Entre otras características físicas y tecnológicas, se destaca el grado de finura, caracterizándose por poseer una alta superficie específica, que oscila entre 8000-10000 cm^2/g . La densidad aparente de la muestra a granel es de 1,04

g/cm³ y la densidad picnométrica es de 4,3 g/cm³. Las muestras de la cola cruda presentan un color pardo-rojizo característico del color de la hematita

Tabla 4.2 Análisis mineralógico de las colas rojas de Moa por difracción de rayos X

Constituyente	%, en masa
Hematita	69,41 – 75,12
Magnetita	0,61 – 1,13
Alunita	8,92 – 14,02
Yeso	2,45 – 5,60
Serpentina	0,63 – 1,35
Espinela cromífera	2,17 – 2,70
Mineral de manganeso	0,50 – 0,67

Obtención de un concentrado de hierro mediante la tostación magnetizante y separación magnética:

La realización de la tostación magnetizante con las colas rojas de Moa, tiene los objetivos siguientes:

1. La transformación de óxido de hierro no magnético (α -Fe₂O₃) en óxidos ferromagnéticos magnetita (Fe₃O₄) y maghemita (γ -Fe₂O₃).
2. La eliminación parcial de azufre de las colas.
3. Obtención de un concentrado con alta capacidad de peletización.

En dependencia de donde se tome la muestra y de la eficiencia de la planta, la composición química puede ligeramente variar, por lo que se reportan valores promedios (Tabla 4.3) (Suwardo, 1983 y Guerra, 1987). Luego de la realización del proceso de tostación magnetizante a escala de laboratorio, se logró obtener un concentrado de hierro, cuya composición se muestra en la tabla 4.3.

El procedimiento de los ensayos consistió en utilizar distintos tipos de reductor bagazo de caña, carbón vegetal, antracita y mezcla de H₂ con CO₂ en cama fluida.

Se realizó el estudio de tostación magnetizante, donde se obtuvieron concentrados de similares composiciones, independientemente del agente reductor empleado. La temperatura utilizada fue 750 °C para el bagazo, 800 °C para el carbón vegetal, y 850 °C (antracita) en atmósfera de 750 °C (H₂+CO). En superficie de un lecho fluido en un horno de laboratorio. El concentrado utilizado para los estudios de peletización fue el obtenido con antracita.

Tabla 4.3 Composición química de las colas rojas iniciales y el concentrado de hierro obtenido.

Denominación Cola roja de Moa	Contenido de elementos y en forma de óxidos (%)									
	Fer	Ni	S	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	MgO	CaO	Otros
Cola Roja	40-54	0,2	4-6	3,0	6,0	5,0	1,5	0,5	1,0	12,2
Concentrado de hierro Cola Roja	62,0	0,15	2,1	2,0	5,8	5,0	1,0	0,40	0,55	11,9

A partir de los concentrados de hierro obtenidos por los autores (Suwardo, 1983 y Guerra, 1987), se obtuvieron pellets y micropelets piroconsolidados. En ambos casos cumplían las propiedades metalúrgicas para los procesos industriales, aunque el contenido de azufre pudiera considerarse una limitante, dependiendo del proceso que se defina. Como aditivos para la peletización se utilizó cal y bentonita.

Se determinó que los pellets oxidados representan un sistema multifásico, incluyéndose la hematita (fase inicial), la magnetita, la ferrita monocálcica, ferrita aleada, compuesto de silicato, cantidad no considerable de silicatos de calcio y los aluminatos de calcio. La proporción entre las fases se modifica en dependencia de la composición inicial de la muestra y de los regímenes de calcinación (Suwardo, 1983, Guerra, 1987).

Los estudios de reducción gaseosa a escala de laboratorio en una atmósfera reductora compuesta por H₂; CO y CO₂ tanto para los micropelets como los pellets calcinados, muestran que el producto metalizado es hierro metálico que no es puro sino una aleación que contiene hasta 5 % de metales como Mn, Ni, Mg, Cr, Co (Frades, 1983 y Guerra, 1987). El grado de metalización varió desde 75 % hasta el 85 %, en dependencia de las condiciones de los ensayos. Se determine con los micropelets que a temperaturas desde 935 °C hasta 980 °C no mostraban adherencia.

Los resultados muestran una posible ruta de preparación de este mineral para fines siderúrgicos siempre y cuando se garantice una desulfuración adecuada para los procesos, además, la tostación magnetizante supone la creación de otro dique de colas lo que evidentemente daña el medio ambiente y es un problema a tener en cuenta.

4.3 Perspectivas de utilización de los minerales magnetíticos del yacimiento de hierro Santiago

Caracterización de los minerales y obtención de concentrados de hierro de los sectores seleccionados:

Con el propósito de incrementar las reservas de minerales de hierro en el marco del programa de desarrollo siderúrgico, se ejecutó un plan de búsqueda y exploraciones geológicas en el yacimiento de hierro Santiago, que por su composición podrían ser una materia prima utilizable en la producción siderúrgica, a partir de algunos sectores minerales, ya que algunos no son viables de explotación por encontrarse en zonas limitadas para la extracción de mineral por los daños ecológicos que se pueden causar. Los sectores más estudiados son, La Grande, Chiquita, Folia, Concordia y Antoñica, donde se acumula la mayor cantidad de reservas de hierro, existiendo otros sectores que se encuentran en distintas fases de estudio. El mineral o especie principal es la magnetita, las menas poseen un contenido de hierro promedio de 40,5 %, que limita la posibilidad de ser empleadas directamente, requiriendo de beneficio por la separación magnética. Las impurezas nocivas en las menas están representadas por el azufre y el fósforo. En la tabla 4.4 se observan los contenidos de los principales elementos determinados en la composición química. (Figueroa, García L; Cubillo; 1987).

Tabla 4.4 Composición química de los principales elementos de los sectores más estudiados del yacimiento de hierro Santiago.

Sectores	Contenido de elementos y en forma de óxidos (%)									
	Fet	S	P2O5	Cu2O	Al2O3	SiO2	MnO	MgO	CaO	FeO
La Grande	41,6	0,026	0,79	0,022	3,71	18,6	0,8	7,19	8,10	13,10
Chiquita	40,2	0,12	0,05	0,09	1,62	21,9	0,6	2,26	14,61	7,75
Folia	35,3	0,06	0,04	0,045	0,8	25,0	0,64	2,85	21,4	4,44
Concordia	40,22	0,11	0,05	0,05	0,7	19,35	0,4	2,54	1,21	17,37
Antoñica	42,24	0,70	0,002	0,28	1,13	25,79	0,41	1,03	5,20	12,75

Se observa (Tabla 4.4) composición homogénea del hierro, la ganga compuesta fundamentalmente por sílice y alúmina, su relación se puede considerar como silíceas. Estos minerales pueden ser utilizados para su procesamiento siderúrgico, de acuerdo a la composición química presentada, los elementos nocivos detectados no se consideran impedimento.

La composición mineralógica de este yacimiento está representada fundamentalmente por skarno- magnetita, el mineral metalífero principal es la magnetita y su contenido varía de un sector a otro, una información más detallada sobre la mineralogía y el beneficio de estos sectores han sido presentada por los autores (Figueredo, García; Cubillo; 1987).

La granulometría del mineral varía en dependencia del método de la extracción de la muestra en cada sector, desde 12,7 mm hasta 0 mm. Se determine la fracción magnética para cada sector de fracciones inferiores a 0,074 mm, el equipo utilizado fue el Tubo Davis a una intensidad de campo de 80 kA/m, destacándose la obtención de fracciones magnéticas con alta ley en hierro (superiores al 63 %). Este resultado corrobora la posibilidad de utilizar la separación magnética a baja intensidad como vía idónea de beneficio para obtener concentrados de alta ley en hierro.

El resultado más significativo del beneficio combinado por separación magnética vía seca y húmeda a escala de laboratorio para granulometrías desde 6 mm hasta 0,074 mm de los sectores Concordia y Antoñica se representan en la tabla 4.5. Se obtuvo un concentrado de hierro opto para su utilización siderúrgica, con un contenido de magnetita de 57,88 % y 70,86 % respectivamente. Los ensayos de separación magnética seca se realizaron en un separador magnético de imán permanente, equipado con polos alternos, tipo KAPDHE, con alimentación superior y régimen a corriente en intensidades del campo magnético de 64 kA/m y velocidad de tambor de 1,57 m/s. Las operaciones de separación magnética vía húmeda, se realizaron en un separador magnético tipo WEAD 150.190.

Tabla 4.5 Composición química de los concentrados de Hierro de los sectores Concordia y Antoñica.

Sectores	Contenido de elementos y en forma de óxidos (%)									
	Fe _t	Cr	Ni	Cu ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	MgO	CaO	FeO
Concordia	69,5	0,007	0,014	0,001	0,66	0,83	0,34	0,33	0,42	22,07
Antoñica	66,8	0,012	0,013	0,001	0,37	5,13	0,14	0,11	0,75	24,86

El estudio de reblandecimiento y fusión de ambos concentrados permitió definir que los puntos de reblandecimiento para los sectores Antoñica y Concordia son 1544 °C y 1585°C, y los puntos de fusión 1600 °C y 1593 °C respectivamente. Esta información es de suma importancia para la planificación del proceso de piroconsolidación de los pellets. Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de Siderurgia del CENIM, en el Equipo LECO-1600 (Figueredo, García L, Cubillo, 1987). Estos autores confirmaron, mediante un estudio mineralógico de ambos concentrados, la presencia de magnetita como especie predominante, estando presentes mixtos de magnetita y cuarzo.

Las cantidades de concentrados obtenidos de ambos sectores fueron suficientes como para planificar un estudio de peletización y reducción a escala de laboratorio (100 kg) acorde a los procedimientos establecidos por el laboratorio de Siderurgia del CENIM.

Estudio de la peletización y reducción con carbón de pellets obtenidos de los sectores Antoñica y Concordia:

Los ensayos de peletización se realizaron en un plato peletizador de 0,8 m de diámetro y 0,125 m de altura con una velocidad de rotación de 18 r.p.m y un ángulo de inclinación de 47°, régimen de trabajo que por experiencia es el adecuado para minerales de este tipo. El aglutinante empleado fue la bentonita, en cantidades de 1 y 2 %.

Se obtuvieron las cantidades requeridas para la caracterización de los pellets verdes y secos, los cuales presentaron con las propiedades físico químicas establecidas. Una vez ejecutada esta etapa del proceso, los pellets fueron piroconsolidados a 1200 °C durante 2 horas en una mufla de laboratorio, con una velocidad de calentamiento de 0,5 °C/min. La resistencia a la compresión de los pellets piroconsolidados fue de 200 kg/ pellets como promedio y la formación de finos fue de 9,22 y 6,6 % para ambos ensayos, con 1 y 2 % de bentonita, respectivamente. La metodología empleada para realizar los ensayos fueron las Normas ASTM y el ensayo MINIMICUM del CENIM. (Figueredo, García L, Cubillo, 1987).

Se realizaron una serie de ensayos metalúrgicos para el estudio del proceso de metalización con carbón antracita de los pellets piroconsolidados, obtenidos por el procedimiento anterior. El procedimiento para realizar los ensayos fue el siguiente: en un horno mufla de laboratorio, se introdujo una mezcla homogénea de 100 g de pellets piroconsolidados, más el carbón antracita estequiométricamente calculado, con granulometría desde 2 mm hasta 4 mm y un 10 % de exceso. La carga se calienta a 1100°C durante 1h, 2h, 3h, y 4h, respectivamente, en atmósfera de nitrógeno. Los resultados mostraron que, para todas las muestras seleccionadas con un tiempo de retención de una hora, el

grado de metalización varió desde 89,5 hasta 95,4 %, el hierro metal desde 80,4 hasta 82,56 %, y resistencia a la compresión de 30 kg/pellets. En base a estos resultados, los pellets se consideraron aptos para su procesamiento siderúrgico (Figueredo, García, Cubillo, 1987).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Astuti, W., Andika, R., Nurjaman, F. (2018). Effect of basicity and reductant amount in the nickel pig iron (NPI) production from Indonesian limonite ore in submerged electric arc furnace (SAF). Mineral Processing and Technology International Conference 2017. IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering, 285, 012023.
2. Awad O. "Informaciones sobre características y aplicaciones del acero Mayarí". Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro.p.1-5, 1966.
3. Bethlehem archive. "Features and applications Mayari steel. 1966.
4. Bethlehem Steel Company. "Bethlehem Mayari pig iron: a natural nickel-chromium alloy iron for making high-grade castings ". Bethlehem Steel Co., 1923. 103 p
5. Bethlehem Steel Export Corporation Catalog 180.New York.16 - 20.1946.
6. Carthy G, Díaz A, Lamarque M. "Tecnología para el aprovechamiento integral de las colas de Nicaro.". Informe técnico. Centro de Investigaciones Siderúrgicas. Nicaro. Enero 1993.
7. Carthy G, Figueredo O, Leyva E, Diaz A, Ortiz J. "Procedimiento para La obtención de concentrado de cromita a partir de las colas de la tecnología carbonato amoniacal". Oficina para Patentes e Innovaciones.OCPI. 23316. Cuba. 2008.
8. CIS. 1970. "Informe sobre las investigaciones de obtención de semiacero a partir de las colas de Nicaro. Centro de Investigaciones Siderúrgicas. ". Informe Técnico. Archivo CIS.
- 9.
- 10.CIS. 1972. "Investigaciones complementarias sobre preparación de las colas de la fábrica de Nicaro y minerales magnetíticos de la República de Cuba para su fusión". Informe Técnico. Archivo CIS.
- 11.CIS. 1983. "Informe sobre las corridas industriales de concentrado de hierro cubano en alto horno y obtención de acero en oxiconvertidores. Biblioteca Virtual, CIS. file://///Servidor/dsit.cu/biblioteca_virtual/ict/Comp.%20Colas%20de%20Nicaro/Informe%20sobre%20las%20corridas%20industriales.pdf
- 12.CIS. 1988. "Informe sobre resumen de investigaciones con colas de las plantas de níquel". Biblioteca Virtual. Centro de Investigaciones Siderúrgicas.
- 13.CIS. 2005. "Informe sobre la síntesis de las Investigaciones con las colas de Nicaro". Biblioteca Virtual, Centro de Investigaciones Siderúrgicas. file://///

Servidor/dsit.cu/biblioteca_virtual/ict/Comp.%20Colas%20de%20Nicaro/S%C3%ADntesis%20de%20las%20investigaciones%20con%20las%20Colas%20de%20Nicaro.pdf

14. Cubillo, C.; Informe sobre la caracterización de los Escombros de Mina Martí. CENIM. Madrid. 6(3),1987.
15. Cruz-Crespo A.; Ortiz Bárcenas J.; Perdomo González L.; Quintana-Puchol R.; Pons-Herrera J.; Rosales-Martín G. Obtención de arrabio aleado con Ni y Cr por reducción carbotérmica en un horno de arco de corriente continua de colas de Nicaro de la producción de níquel. Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad de Zulia, Vol. 46, N.º. 1. 2023. pp. 1-13. <https://doi.org/10.22209/rt.v46a07>
16. Díaz, C, Mojena L., "Informe sobre el estudio mineralógico por microsondas de las fracciones granulométricas del escombros laterítico de Pinares de Mayarí". Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, 1-50, 1989.
17. Frades G. "Elaboración de la tecnología para la metalización del producto obtenido a partir de las colas de Moa para su utilización siderúrgica". Tesis doctoral, CIME,1988.
18. Figueredo O; García L; Cubillo C. "Perspectivas de utilización de los minerales magnetíticos del Yacimiento Hierro Santiago". Boletín Siderurgia. CIS Nicaro,1987
19. Ferreiro, Y., "Obtención de lupias de arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las Colas de Nicaro". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. ISMM, Moa, 2015.
20. Howard E. D "Tratado práctico de fundición". Aguilar, S.A de Ediciones, 482, España. 1962.
21. Informe geológico GEO-0-105., "Sobre las labores de exploración geológica del yacimiento de hierro y níquel de Nicaro efectuadas desde 1939 hasta 1961 con cálculos de reservas". Nicaro. 2-20, 1962
22. IIMA. International Iron Metallics Association. "Pig iron. A guide for transporting and handling at terminals". United Kingdom. 2013. <http://metallics.org.uk/wp-content/uploads/2013/09/Pig-Iron-Terminals-Guide.pdf>
23. Jiang Xinfang., Ferroníquel (NPI) Production from laterite Nickel ore China. Editorial Tsingshan. China, 2013.
24. García, L., Diaz C, Mojena, L., "Informe sobre la preparación pre metalúrgica de los escombros lateríticos de los yacimientos Pinares de Mayarí y Martí para su fusión. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid, 1-42, 1989.

25. Guerra A. "Preparación premetalúrgica de los residuos industriales, Colas de Moa (Colas), para su fusión. Boletín Siderurgia. CIS, Nicaro. 1987.
26. GEO-112,1966. Informe Geológico. Archivo CIS, Nicaro.
27. Guo, X., Chengyan, Xu C., Wang, Y., Li, X., Sun, T. (2021). Recovery of nickel and iron from low-grade laterite ore and red mud using co-reduction roasting: Industrial-scale test. *Physicochemical Problem of Mineral Processing*, 57(3), 61-72.
28. Kobe Steel LTD 2011. "World's first commercial ITMK3 plant successfully begins production". <http://www.kobelco.co.jp/english/releases/2010/01/118290712313.htm>
29. Kobe Steel Group news. (a). "Commercial operation of ITMK3 plant in USA" *New Steel Making Tecnology*. 2010.
30. Leyva E. "Informe sobre Monografía de colas de Nicaro". Informe Técnico. Centro de Investigaciones Siderúrgicas, 2007.
31. López, F., Nieto, J., Ortiz., "Determinación de los parámetros energéticos en un proceso de molienda de escombros lateríticos". *Revista Metalurgia*. Madrid, 24(4).255- 259, 1988.
32. López F. A; M. C. Ramírez; A. López - Delgado, F. J. Alguacil, M. Alonso y J. A. "Estudio cinético de la descomposición térmica de los escombros lateríticos". Congreso IBEROMET, 2006. Habana. Cuba.
33. Miranda, J, L., "Cronología de la explotación de los Yacimientos lateríticos". *Revista Cubana de Química*. XV (1) 3-19,2003.
34. Mojena, L., Widodo, S., García, L., "Proceso de obtención de Lupias Mejorado (PLM) a partir de los desechos sólidos de la producción de níquel (Colas de Nicaro)". XI Congreso Internacional de Reciclaje. Ministerio de la Industria Sideromecánica. Centro de Investigaciones Metalúrgicas. La Habana, 2011.
35. Mojena, L; Castillo, A; Fernando G, Preparación pirometalúrgica del mineral Pinares de Mayarí fracciones granulométricas +83 y -0,21 mm, Boletín 1, CIS, Nicaro 1989.
36. Nacer, O., "Informe Características y Aplicaciones del acero Mayarí, Centro Coordinador para el norte de Oriente y Nuevitas, Archivo Biblioteca., Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro. 1-5,1976.
37. Nacional Lead Company. Informe Técnico "Aprovechamiento de las Colas de Nicaro". 1-4,1952.
38. Ortiz J., Matos, J., "Investigaciones pre metalúrgicas de los escombros lateríticos de Pinares y Martí para su fusión". Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid, 1- 22, 1988.

39. Ortiz, J (a)., "Proceso de reducción de un mineral laterítico hasta la obtención de arrabio ". Congreso Metalúrgico Cubano. CD Metánica, 2010.
40. Ortiz J., Llopiz J (a)., "Regularidades cinéticas de la reducción con carbón de la laterita ferruginosa. Revista Minería y Geología. 30 (2) 41-51, 2014.
41. Ortiz, J., "Obtención de un producto prereducido para la producción de arrabio con níquel a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí de Nicaro". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. ISMM, Moa, 2015.
42. Figueredo O; García L; Cubillo C; Castaño, O; "Perspectivas de Utilización de los minerales magnetíticos del Yacimiento Hierro Santiago". Boletín 1 Siderurgia, Nicaro 1989)
43. Pons, J., "Producción de Níquel Pig Iron (NPI) en China". Reporte Técnico. Moa, 1-14, 2013.
44. Rodríguez, A., et al., "Reevaluación de los recursos y reservas de Pinares Este y Nicaro". Informe Técnico. Ministerio de la Industria Básica. Empresa Geólogo Minera Oriente, 1987.
45. Suwardjo, W., "Beneficio y posibilidades de utilización siderúrgicas de escombros de minerales lateríticos cubanos". Boletín ICT, SIME La Habana. 1(1) 12-16, 1982.
46. Nacional Lead Company, Informe Técnico "Sobre las colas de Nicaro. Biblioteca Fabrica de Nicaro, 1952).
47. Norma EURONORM 1-81. Definición y clasificación de arrabios. <http://es.youscribe.com/catalogue/rapports-et-theses/euronorm-1162713>
48. Widodo S., "Análisis sobre el proceso de piroconsolidación de los pellets obtenidos a partir de las colas de Moa y elaboración una tecnología de su producción". CIME, 1985.
49. Warren, B., "Producción de lupias de ferromanganeso en horno rotatorio", Buró de Minas, Reporte de Investigación 5638.1.19, Washington. 1960
50. Yildirim, H., Morcali, H., Turan, A., Yucel, O. (2013). Nickel pig iron production from lateritic nickel ores. Proceedings of the Thirteenth International Ferroalloys Congress. Almaty: Ferronickel Production and Operation, 238-244.

SOBRE LOS AUTORES



Félix Antonio López es Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad de Valladolid (España). Fue profesor en el Departamento de Geoquímica de dicha Universidad. Se incorporó al CSIC en 1987. Es miembro del Observatorio de Prospectiva Tecnológica e Industrial (OPTI), forma parte de varios comités españoles y europeos relacionados con el reciclado de materiales. Ha ocupado diversos cargos de responsabilidad en el CSIC y ha sido Editor en jefe de Revista de Metalurgia.

Figura como inventor más de una treintena de patentes, una parte de las cuales están transferidas y/o con acuerdos de explotación a distintas empresas. Ha desarrollado más de 90 proyectos de investigación en el área de reciclado de materiales y aprovechamiento de residuos. Una parte de ellos en colaboración con distintas empresas. En 2016 fundó la compañía B-Circular, dedicada al aprovechamiento de fibras de vidrio y de carbono y en 2023, la compañía New Materials for Cleaning Biogás, dedicada a la fabricación de materiales para la limpieza de biogás. Ambas son empresas de base tecnológica del CSIC.

Ha recibido distintos premios y reconocimientos entre los que destacan el Premio R 2012 al mejor proyecto innovador en el área de reciclaje de materiales, finalista en la IV y V Convocatoria del Fondo de Emprendedores de la Fundación Repsol (2014 y 2015) y en 2020 recibió el Premio Enel Challenge Open Innovability.

En la actualidad, es director del Laboratorio de Reciclado de Materiales del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) del CSIC y es jefe del Grupo TecnoEco (Grupo ID 641334 del CSIC).

Jesús Ortiz Bárcenas es Doctor en Ciencia Técnicas por la Universidad de Moa, Cuba, se incorpora desde 1985 como Investigador en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas en Cuba provincia de Holguín, ocupó distintas responsabilidades hasta llegar a ser en el año 2000, director general de este centro que por objeto social básicamente se dedicaba a la metalurgia extractiva de minerales ferrosos. A partir del año 2005 pasa a ser director general del Centro de Investigaciones Metalúrgicas ubicado en La Habana Cuba cuya actividad fundamental está relacionada con la metalurgia física. (Caracterización de metales y aleaciones, e inspección de construcciones soldadas). Desde el año 2014 ha laborado como especialista principal de la industria metal mecánica e investigador del Centro de Investigaciones Siderúrgica. Ha publicado en revistas científicas reconocidas como autor principal 9 artículos y como coautor 6. Posee innovaciones probadas en el proceso de preparación mecánica del carbón y la intensificación de la producción de acero en hornos de arcos eléctricos mediante el insuflado de estos. Ha participado en 35 proyectos de investigación relacionados con la metalurgia extractiva, el reciclaje y la caracterización de metales y construcciones soldadas asociados a proyectos en España, Canadá, China, La India y Portugal. En la vida académica es Miembro del Tribunal Nacional en la defensa del proyecto denominado Plan de estudio de la carrera de metalurgia y materiales en Cuba.

