

1. V.A. GLASKOSKY.: Principios geológico-mineralógico y su valoración tecnológica en los yacimientos de hierro, 1954.
2. Yu.I. AZBEL y Otros.: Manual de beneficio de minerales, Moscú, "Niedra", 1982 Pag. 11-12, ruso.
3. V.I. KARMAZIN: Beneficio de minerales ferrosos. Moscú, "Niedra", 1983, Pag. 141 ruso.
4. TAGGART, A.F. Handbook of mineral dressing. E.K., 1964, Cap. 2, Pag. 134.
5. SUWARDJO W, GANDARILLA E.: Beneficio de minerales ferrosos cubanos, Boletín CIME, 1983.
6. T. RODRIGUEZ, L. GARCIA y Otros: Investigación sobre la tecnología de beneficio de la mena magnetítica del sector Concordia. Informe Técnico N.º.6, CIPIM febrero 1985.
7. O.S. BOGDANOV y Otros: Manual de beneficio de minerales. Plantas de beneficio. Moscú, "Niedra", 1984, Pag. 147-151 ruso.
8. Fundamentación técnico-económica de la construcción de la planta Siderúrgica Integrada. Lengiprometz, Leningrado, 1976.
9. E.F. VEGMAN: Breve manual del fundidor de alto horno. Moscú, "Metalurgia", 1981, Pag. 81-89. ruso.
10. KLAUS HERBERT: Direct reduction by comparison with the classical method of steel production. MPT Metallurgical Plant and Technology, 1979, 1, vol. 2, Pag. 34-42.
11. Rev. Perfiles Tecnológicos de la industria siderúrgica. Serie "Desarrollo y transferencia de tecnología", ONUDI, N.º. 11.
12. J. ASTIER: Perspectivas ofrecidas por la energía nuclear en siderurgia. Rev. Latinoamericana de Siderurgia, N.º. 184 agosto, 1985.
13. ROBERT S. BARNES: Energía nuclear y la industria siderúrgica. Siderúrgica Latinoamericana, N.º. 203, marzo 1977.

CDU: 669.243:622.788

ELABORACION DE LOS MINERALES OXIDADOS DE NIQUEL POR EL ESQUEMA CARBONATO-AMONIACAL

Ing. José Castellanos Suárez. Ing. Casto R. Castillo. Ing. Idalberto García. Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.

RESUMEN

ABSTRACT

Se ofrece un estudio científico-técnico sobre la reducción de los minerales oxidados de níquel, que permite establecer la factibilidad del procesamiento del mismo, mediante una tecnología más perfeccionada que la Caron. Se contempla el fundamento teórico de la reducción concluyéndose que el mineral aglomerado no afecta la extracción de los metales, pero permite alcanzar una reducción más uniforme de la masa mineral evitando la sobrerreducción. La posibilidad de procesar el mineral aglomerado posibilita el empleo de equipos de alta productividad y eficiencia, por lo que se logran índices técnico-económicos más altos.

A technical-scientific study on nickel oxidized ores reduction is described which has enabled the feasibility of its processing to be established using a technology more improved than Caron's. The theoretical principle of reduction is also examined, concluding that agglomerated ore does not affect metal extraction it raising, but enables a more homogeneous reduction of ore mass avoiding overreduction. The possibility of processing agglomerated ore provides the use of equipment with high productivity and efficiency thus obtaining higher economic and-technical indexes.

INTRODUCCION

En los últimos años se ha estudiado intensamente la preparación de los minerales oxidados de níquel, antes de ser sometidos al proceso de reducción o fusión, con el objetivo de aumentar la rentabilidad de las plantas.

Los resultados alcanzados en la preparación del mineral y en el estudio de la reducción selectiva, han introducido cambios significativos en las plantas instaladas recientemente. Ejemplo del desarrollo de tecnología más perfeccionada, lo constituye la planta de Greenvale.

Uno de los aspectos más importantes sobre el que incide el uso de minerales aglomerados es la disminución del arrastre de polvos, el que a su vez, influye grandemente en algunos índices económicos del proceso, como son:

- Se disminuye parcialmente el arrastre de polvos en comparación con el proceso convencional.
- Se requiere un sistema de recuperación de polvo de menor capacidad que el de plantas que procesan finos.
- Se disminuyen prácticamente a cero las pérdidas de calor sensibles con el mineral.
- Se reducen las pérdidas de níquel por arrastre.
- Se disminuye el cortocircuito dentro del horno, logrando una

reducción más uniforme del mineral.

Todos estos factores inciden sobre el consumo de combustible, siendo este índice un aspecto fundamental en la economía de cualquier proceso.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, y partiendo de los resultados obtenidos en los trabajos realizados para la aglomeración de los minerales oxidados de níquel cubano, en los cuales se ha demostrado que es posible obtener briquetas y pellets con características físico-mecánicas adecuadas, se han realizado una serie de investigaciones con finalidad de estudiar el proceso de reducción, utilizando los minerales cubanos aglomerados para obtener el correcto desarrollo de esta tecnología, o perfeccionar el proceso carbonato amoniacal existente, de forma tal que permita mejorar sus índices técnico-económicos.

FUNDAMENTO TEORICO DE LA REDUCCION

Es conocido que con la reducción con gas el proceso controlador es la difusión [9]. Las mejoras en el contacto sólido-gas, el aumento de la concentración de los agentes reductores gaseosos, temperatura, así como el tiempo de reducción, permiten contrarrestar el efecto

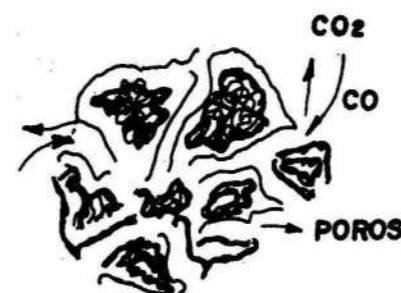
* Trabajo presentado en el II Seminario del Instituto de Química y Biología experimental. ACC, nov. 1980.

del proceso de difusión sobre el rendimiento de la reducción durante el tratamiento de los minerales oxidados de níquel.

El empleo de reductores más efectivos, como el petróleo, trae como consecuencia que prácticamente cese el proceso de difusión, comenzando a desempeñar un papel más importante los parámetros restantes [2]. Esto se explica debido a, que el em

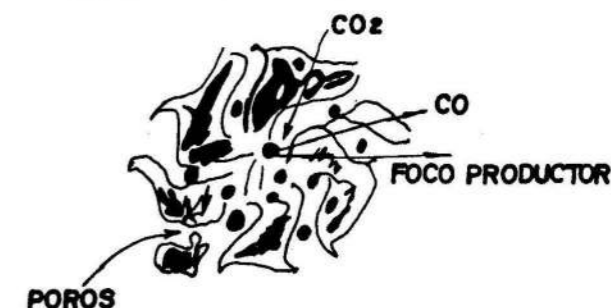
pleo de petróleo como agente reductor íntimamente mezclado con el mineral, produce un número considerable de focos *in situ* productores de monóxido de carbono, disminuyendo de esta forma a un mínimo la resistencia de transferencia de masa en los pozos del mineral. De esta manera, es posible obtener una reducción uniforme, con menor temperatura, tiempo de retención y concentración de gases reductores.

a) REDUCCION GASEOSA



ATMOSFERA 26 % CO
MINERAL LATERITICO
(-20,4/RT)
Kr = A exp

b) REDUCCION CON PETROLEO



ATMOSFERA 7,5 % CO
MINERAL LATERITICO + PETROLEO
(-4,1/RT)
Kr = A exp

MECANISMO DE LA REDUCCION CON PETROLEO

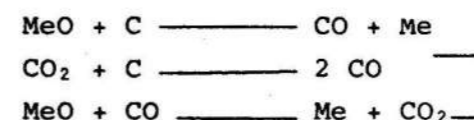
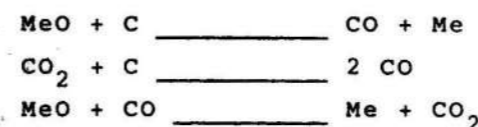


Fig. 1 Mecanismo de la reducción gaseosa y con petróleo.

Durante la reducción con petróleo, ocurren las siguientes reacciones:



Las cuales se regeneran en el transcurso de la reducción.

En la tabla No. 1 aparecen las energías de activación de las reacciones de reducción, empleando diferentes agentes reductores [3].

Si tenemos en cuenta que mientras menor es la magnitud de la ener -

gía de activación, más alta es la velocidad de reacción, podemos concluir que el reductor más efectivo lo es el petróleo y que la

actividad decrece en el orden:
Petróleo- gas pobre (17-18 % CO)
gas pobre (26 % CO).

TABLA No.1 REDUCCION DE LOS MINERALES OXIDADOS DE NIQUEL EFECTIVIDAD DE LOS AGENTES REDUCTORES

Reductor	Energía de activación Kcal/mol	Aumento de la velocidad de reducción Kri/Kr [26 % CO]	
		Ni	CO
Petróleo	4,1	1,53	1,30
Gas pobre (18 % CO)	16,8	1,15	1,03
Gas pobre (26 % CO)	20,4	1,00	1,00

Partiendo de la base de que el petróleo es un agente reductor más efectivo que el gas pobre, se propuso utilizarlo mezclado con minerales oxidados aglomerados. Esta propuesta se fundamenta en el hecho de que el comportamiento del petróleo mezclado con el mineral y aglomerado, debe mantenerse en lo que concierne a la formación de focos *in situ* productores de monóxido de carbono. Esto facilitaría la creación de una atmósfera reductora en el seno del mineral, que permitiría realizar una reducción más uniforme, evitando de esta manera los fenómenos indeseados de sobre-reducción es decir, el incremento excesivo del grado de reducción del hierro en comparación con la reducción del mineral en forma de polvo.

Como se ha demostrado por Cuntz [6], la reducción del mineral fino en un horno industrial provoca, debido al cortocircuito, que una fracción del mineral pase rápidamente a través del horno (con una reducción baja de los óxidos), mientras que otra fracción está sometida mayor tiempo a condiciones más drásticas, por lo que se produce una reducción excesiva de los óxidos de hierro. Como consecuencia de ello aumenta el consumo de combustible.

Además de estos aspectos, como demostró Kasherininov [10], un incremento del grado de reducción del hierro provoca una pérdida significativa del níquel, y sobre todo del cobalto por sorción durante la oxidación-formación y precipitación

del $Fe(OH)_3$, en el transcurso de la lixiviación amoniacal posterior del mineral reducido.

De los resultados expuestos, se infiere que es factible realizar la reducción del mineral oxidado de níquel aglomerado con índices técnico-económicos más favorables, en comparación con la tecnología carbonato-amoniaca de Nicaro.

REDUCCION SELECTIVA DEL MINERAL OXIDADO DE NIQUEL AGLOMERADO

Materiales utilizados y metodología de la investigación

En el transcurso de la investigación se estudió la reducción de distintos minerales oxidados de níquel cubano. La composición química de los minerales aparece en la Tabla No. 2.

TABLA No.2 COMPOSICION QUIMICA DE LOS MINERALES OXIDADOS DE NIQUEL

Mineral No.	Tipo	Componentes %						
		Ni	CO	Fe	SiO ₂	Cr	Al ₂ O ₃	MgO
1	Laterita (Pta. Gorda)	1,27	0,10	39,2	11,34	1,4	7,44	6,76
2	Laterita (Pta. Gorda)	1,31	0,09	36,8	15,9	1,4	8,7	8,70
3	Serpentina (Nicaro)	1,23	0,017	12,7	34,2	0,05*	2,8	28,1

Los minerales se trituraron bajo 1 mm y se hicieron briquetas y pellets con ellos, utilizando las condiciones óptimas establecidas para la aglomeración de los mine-

rales oxidados de níquel [4,6]. El agente reductor utilizado fue el petróleo, cuya composición se reporta a continuación:

TABLA No.3 COMPOSICION DEL PETROLEO

Componente	CF	H ₂	N ₂	O ₂	Cenizas	S	kcal/kg
%	85	11	1,5	1,5	0,30	0,5	9 800

* En forma de Cr₂O₃

Métodica de la investigación

Los pelets y las briquetas se redujeron en un horno tipo botella (Fig. 2). Antes de introducir la carga en la botella (400 g base seca) el sistema se purgaba con gas reductor producido en un gasogenerador. La temperatura en la mufla se controlaba automáticamente, en una magnitud total, que garantizara la velocidad de calentamiento deseada.

Los pelets o briquetas reducidos se descargaban en un kitasato preparado para ese fin, en una atmósfera reductora o inerte. La trituración de los pelets o briquetas se realizó en una caja hermética de preparación de mineral reducido.

Para evaluar la reducción, al mineral reducido y preparado (menor 0,5 mm) se le hacía una lixiviación standard por duplicado. Se enviaba una muestra de mineral reducido (- 100 mesh) al laboratorio para su análisis químico.

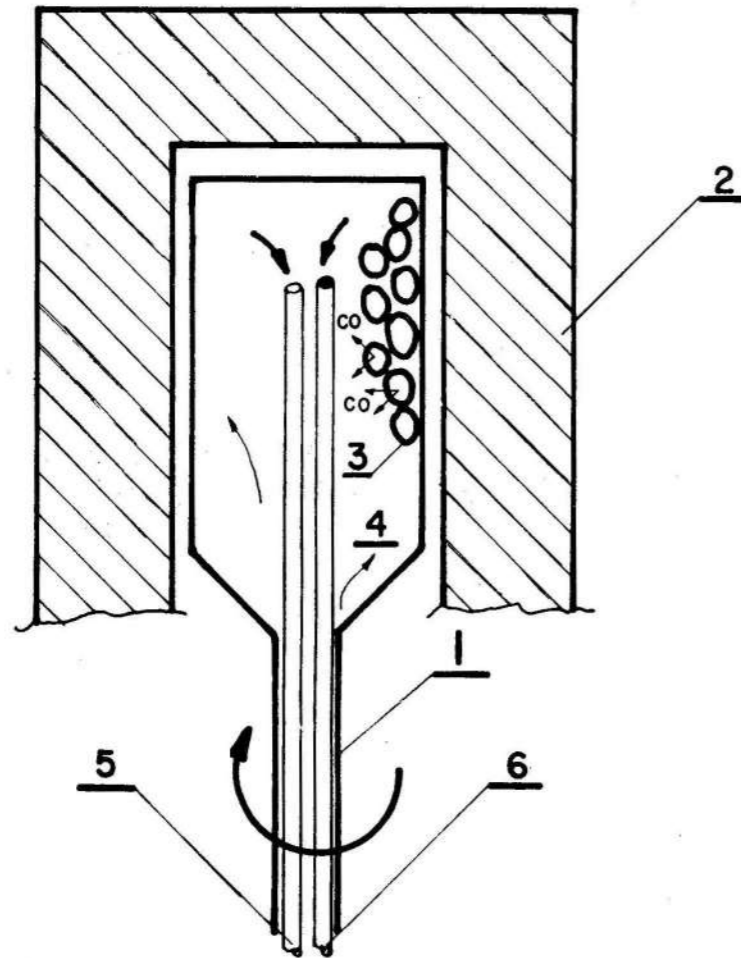


Fig. 2 Horno de botella

1 Botella; 2 mufla; 3 pelets; 4 gas reductor;
5 tubo de salida del gas residual; 6 Termopar.

Desarrollo de la investigación

Las pruebas para el estudio de la reducción fueron programadas empleando los métodos de diseño, de experimentos, y sus resultados fueron evaluados mediante el uso del análisis estadístico [4,6].

Los métodos de planificación de experimentos permiten estudiar un mayor número de variables o parámetros, y obtener una mayor cantidad de información con un número mínimo de experimentos. El efecto de cada parámetro se determina de forma independiente, evaluando su grado de significación.

Basándonos en la experiencia adquirida en Cuba en la planificación de experimentos, se seleccionaron los métodos que han dado mejores resultados en los estudios del esquema carbonato amoniacal.

Estudio de la reducción de los minerales ferroniquelíferos (lateritas)

Este estudio se realizó con las lateritas 1 y 2 (ver Tabla No.2), mezcladas con petróleo y peletizadas.

Se inició la investigación empleando un diseño Plackett Burman (factorial-fraccional) de 8 pruebas con cada una de las muestras, y partiendo de los modelos matemáticos obtenidos, se realizó una matriz de reducción conocida por "movimiento por el gradiente", con el objetivo de acercarnos a la zona óptima de reducción.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Modelos matemáticos calculados (laterita 2).

$$\text{Ext (Ni) } Y_1 = 64,79 - 13,04X_1 + 14,52X_2$$

$$\text{ES} = 2,78 \text{ signif. } > 90 \%$$

$$\text{Ext (Co) } Y_2 = 30,4 - 5,1X_1$$

$$\text{ES} = 4,11 \text{ signif. } \sim 80 \%$$

Modelos matemáticos calculados (laterita 1).

$$\text{Ext (Ni) } Y_4 = 69,35 + 0,34X_1 + 7,68X_2 +$$

$$+ 7,28X_3 + 3,55X_4 + 2,87X_5 \text{ ES} = 2,78$$

$$\text{Ext (Co) } Y_5 = 44,2 + 0,85X_1 + 5,6X_3$$

$$\text{ES} = 4,11$$

De las pruebas realizadas de manera similar con la serpentina, se obtuvieron los modelos siguientes:

$$\text{Ext (Ni) } Y_6 = 76,2 + 1,7X_4 \text{ signif. } 80 \%$$

$$\text{ES} = 1,7$$

$$\text{Ext (Co) } Y_7 = 27,7 + 4,8X_1 - 3,38X_3 +$$

$$4,2X_4 - 3,8X_6 - 5,5X_7 \text{ ES} = 2,28$$

Empleando los modelos matemáticos desarrollados para la reducción del mineral oxidado de níquel mezclado con petróleo y aglomerado, se procesaron los mismos y los resultados se presentan en las figuras 3, 4, 5, 6 y 7.

En las figuras 3 y 4, vemos la interrelación entre la temperatura y el consumo de petróleo (como agente reductor), sobre la reducción de las briquetas de serpentina y los pelets de lateritas.

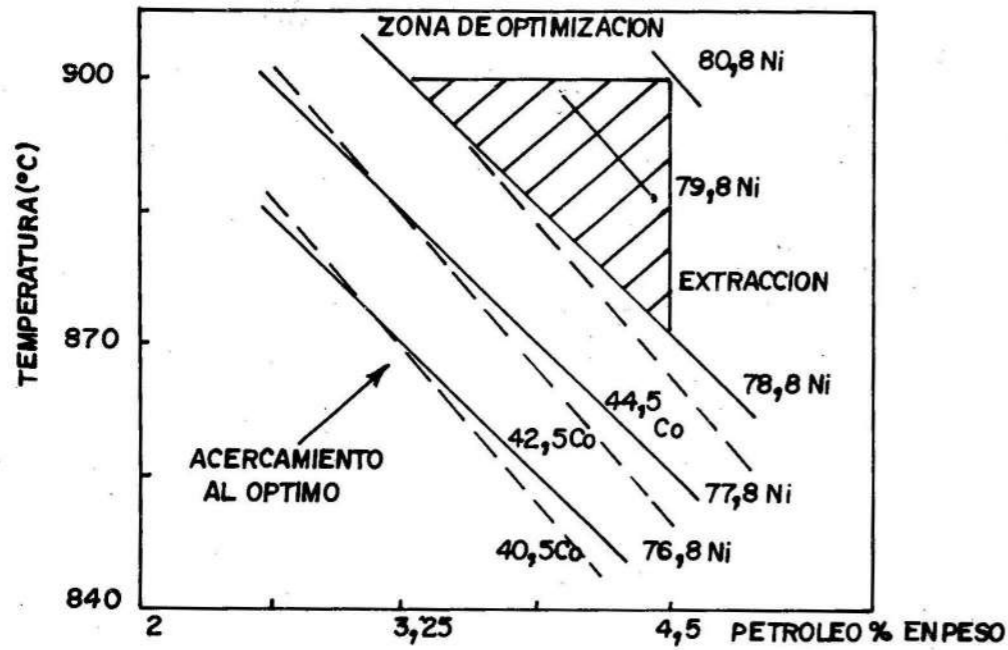


Fig. 3 Reducción de las briquetas de serpentina
 Briqueta 1,9x2,8 cm; presión de briquetado 600 Kg/cm²; tiempo de reducción 120 min; humedad 8 %; melaza 5 %; gas reductor (7 % Co) 39 m³ N/ton.

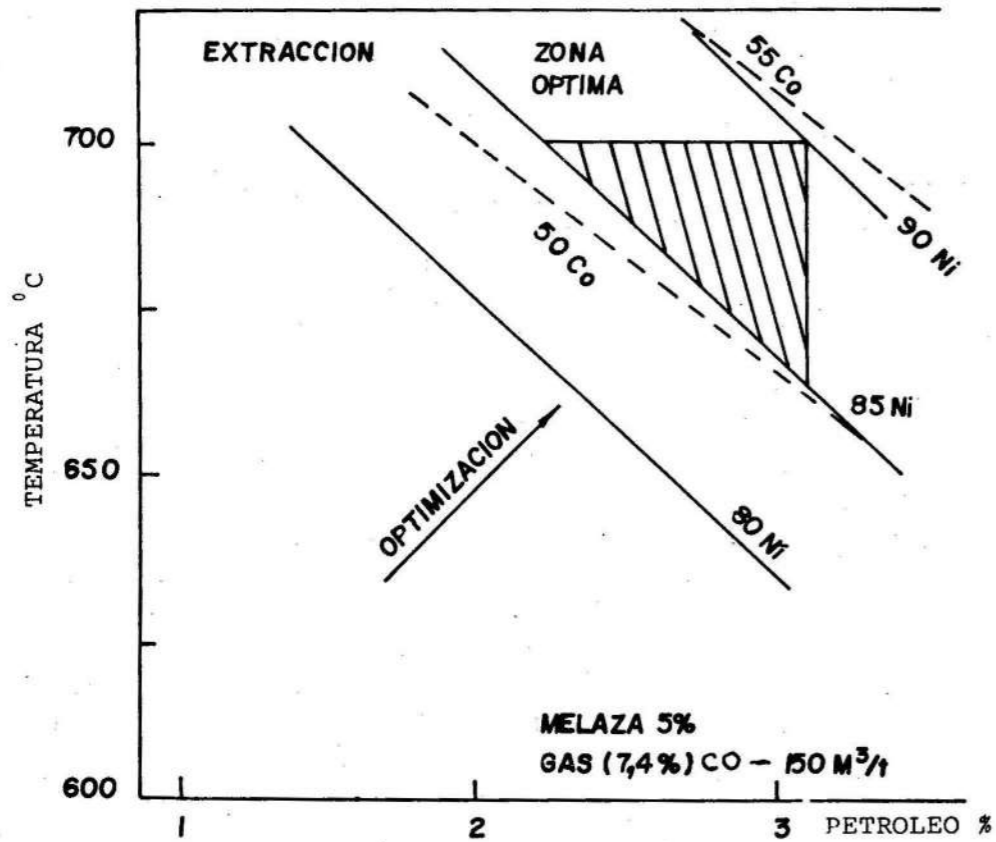


Fig. 4 Reducción de los pelets de laterita.

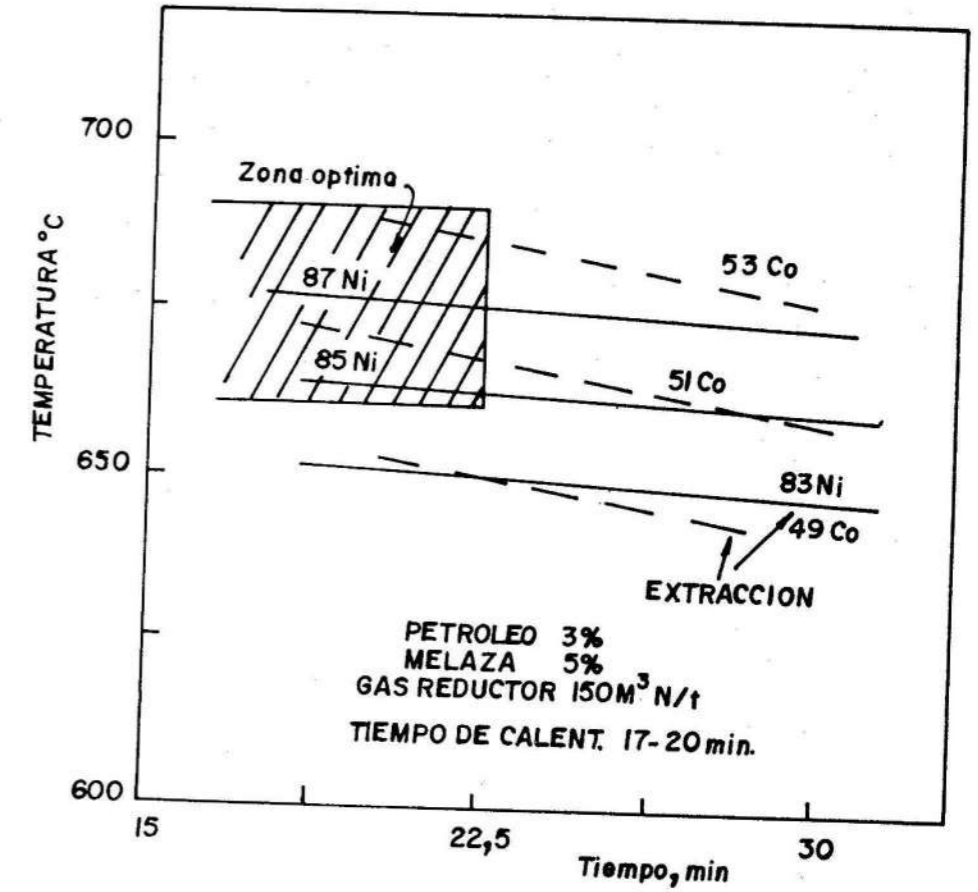


Fig. 5 Influencia del tiempo y la temperatura de reducción de los pelets de laterita No. 1 sobre la extracción de los metales (Ni, Co) en la solución amoniacal.

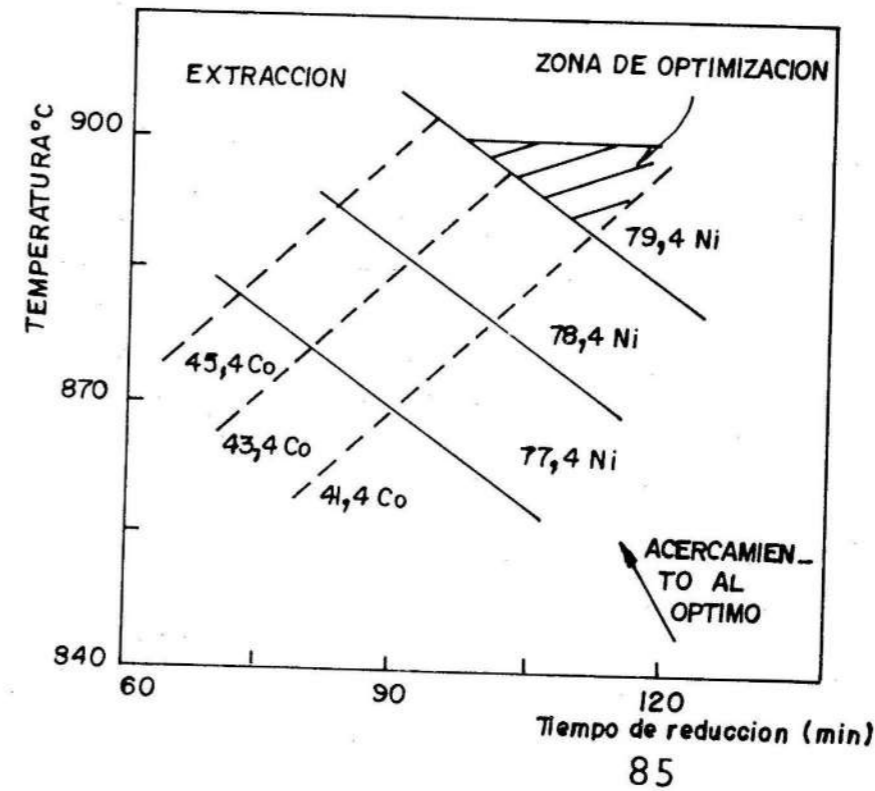


Fig. 6 Influencia del tiempo de reducción de las briquetas y la temperatura sobre la extracción de los metales

Tiempo de calentamiento 75 min; presión de briquetado 600 kg/cm²; gas reductor 20 m³ N/ton Co; petróleo 4,5 % en peso; humedad 9 %; melaza 5 %; briquetas 1,9x2,8 cm.

Los resultados indican que con un aumento de la temperatura y el consumo de petróleo, se aumenta la extracción de los metales. Como indican las figuras antes mencionadas, vemos que es factible disminuir la magnitud de un parámetro, cuando se aumenta el otro.

Las condiciones óptimas para la reducción son:

Para las briquetas:

Temperatura 870-900 °C
Consumo de petróleo 3 - 4,5 % .

Para los pelets:

Temperatura 660-700 °C
Consumo de petróleo 2,5 - 3 % .

Bajo estas condiciones la extracción que se alcanza es Ni 79-81 %, Co 44,5-46,5 % y Co 50-55 % (para la láterita).

En las figuras 5 y 6, se representa la interrelación entre la temperatura y el tiempo de reducción. En la primera se observa además, que el tiempo no influye sobre la extracción de níquel y cobalto, así como que su disminución no afecta notablemente la misma. Como explicamos anteriormente un incremento excesivo del tiempo, aumenta el grado de reducción del hierro y como consecuencia de ello, las pérdidas de níquel y sobre todo de cobalto, por el fenómeno de sorción durante la oxidación-formación y precipitación del $Fe(OH)_3$.

Este fenómeno es más significativo en la reducción de la serpentina, debido al bajo contenido de hierro total de este mineral y a la forma en que este se encuentra. Debido a esto, se recomienda disminuir el tiempo de retención hasta límites aceptables, con la finalidad de alcanzar altos índices tecnológicos.

Las condiciones óptimas establecidas (ver figuras) son:

Para briquetas de serpentina:

Temperatura, 880-900 °C
Tiempo, 95-120 min

Para pelets de laterita:

Temperatura, 660-690 °C
Tiempo, 15-22 min

De las figuras se deduce, que las condiciones óptimas de reducción del óxido de cobalto difieren de las del níquel. De acuerdo con ello, las condiciones óptimas deben establecerse con un criterio de compromiso, fundamentado en la rentabilidad de la planta [5] .

Un parámetro de interés lo constituye la presión de briqueteo. Del estudio teórico se concluyó, que una distribución más perfecta del agente reductor líquido en la masa de mineral y su adsorción por el mismo garantizaría las condiciones ideales para realizar una selección más uniforme, con una mayor efectividad del reductor.

Del estudio de la preparación de briquetas, se sugiere que un aumento de presión debe favorecer la mezcla íntima del agente reductor y el mineral.

Los resultados de la Figura 7 confirman estas conclusiones: un aumento de la presión de briqueteo de

350 hasta 800 kg/cm^2 , produce un aumento en la extracción de níquel de 82 hasta 92 %, aproximadamente.

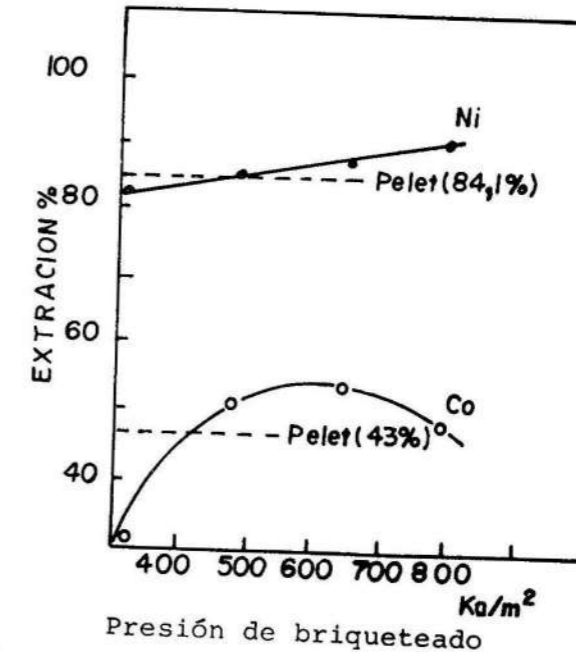


Fig. 7 Influencia de la presión de briqueteo sobre la extracción de los metales.

Con la mejora en la mezcla del reductor y del mineral también se favorece la reducción de los óxidos de hierro hasta metal; lo cual puede producir un incremento en las pérdidas de los metales en el proceso posterior, lixiviación. Como se ha demostrado por Kasherninov, las pérdidas de cobalto son más significativas que las del níquel. Los resultados representados en esta figura, confirman las conclusiones anteriores.

También podemos observar, como era de esperar, que el procesamiento del mineral, en forma de briqueta ofrece mejores índices

tecnológicos que en forma de pelets.

En la figura 8 se representa la correlación entre la extracción de los metales y el contenido de Fe^{+2} . Estos resultados concuerdan con los expuestos por otros investigadores [1,12]. Como vemos, un incremento en el grado de reducción del hierro en el mineral reducido hasta una magnitud de 20-25 % Fe^{+2} produce una caída en la extracción de níquel y cobalto. A su vez, con un aumento del grado de reducción se incrementa el área unitaria de sedimentación de la pulpa (Figura 9).

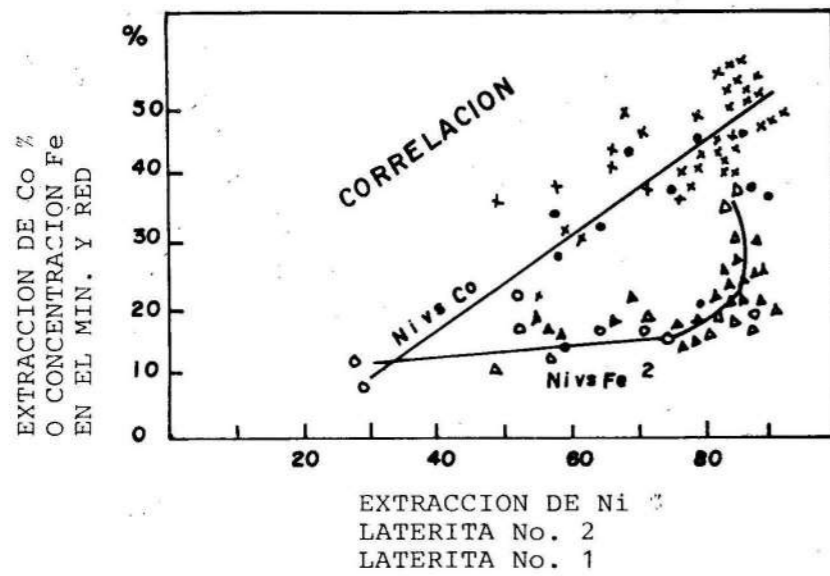


Fig. 8 Correlación entre la extracción de los metales y el contenido de Fe^{2+} .

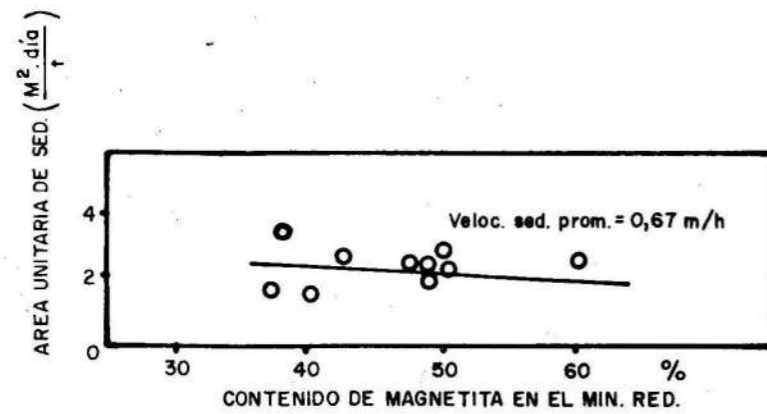


Fig. 9 Correlación entre el área de sedimentación y el contenido de magnetita.

Comparación de la reducción del mineral aglomerado con la tecnología Caron

En general, podemos concluir que es factible reducir el mineral aglomerado con el control necesario de los parámetros, con la finalidad de alcanzar altos índices tecnológicos del proceso.

En la Tabla No. 4 se reportan los resultados óptimos de la reducción de la laterita en forma de mineral fino en el horno industrial de planta piloto, y a escala de banco.

TABLA No. 4 RESULTADOS DE LA REDUCCION DE LATERITA EN CONDICIONES OPTIMAS

Escala	Mineral	Temperatura °C	Tiempo total (min)	Extracción	
				Ni	Co
Horno industrial o de planta piloto	fino	560-730	50-90	85,7-86,8	56,5-63,4
Horno de botella (escala de banco)	fino	680	75	87,2	64,2
Horno de botella (escala de banco)	Pelets	675-700	28	87,6	52,4
Horno de botella (escala de banco)	Briquetas	700	35	92,4	49,0

De los resultados de esta tabla, se deduce que los índices tecnológicos en la reducción del mineral, ya sea en forma de pelets o de briquetas, son más altos que la reducción de mineral fino.

La reducción del mineral aglomerado permite disminuir considerablemente el tiempo de reducción de 75-90 min hasta 28-35 min (lo que equivale a un aumento de la productividad del horno), y aumentar la extracción de níquel de 83,7 - 86,8 % hasta 92,4 %.

Con la finalidad de determinar el beneficio económico, se hizo un estudio comparativo con el proceso Caron de Nicaro para una planta con una capacidad de 30 000 t Ni contenido por año. Los resultados demuestran que la aplicación de esta tecnología permite incrementar la ganancia de 8,85 hasta 18,2 millones de dólares, según se reduzcan pelets o briquetas. A su vez se disminuye la inversión relativa a planta de hornos hasta 53,62 % de la planta, procesando mineral fino Tabla No. 5.

TABLA No. 5 BENEFICIO ECONOMICO (CAPACIDAD DE LA PLANTA 30 000 t Ni/Año,

Mineral	% de la inversión de una planta de horno procesando mineral fino	Incremento de la ganancia, M dólares/año
Fino	100	0
Pelets	53,4	8,85
Briquetas	61,8	18,2

La posibilidad de procesar el mineral aglomerado, permite ir al empleo de equipos de alta productividad y eficiencia, como el hor

no de Cuba. En la figura 10 aparece un esquema para la reducción selectiva del mineral aglomerado.

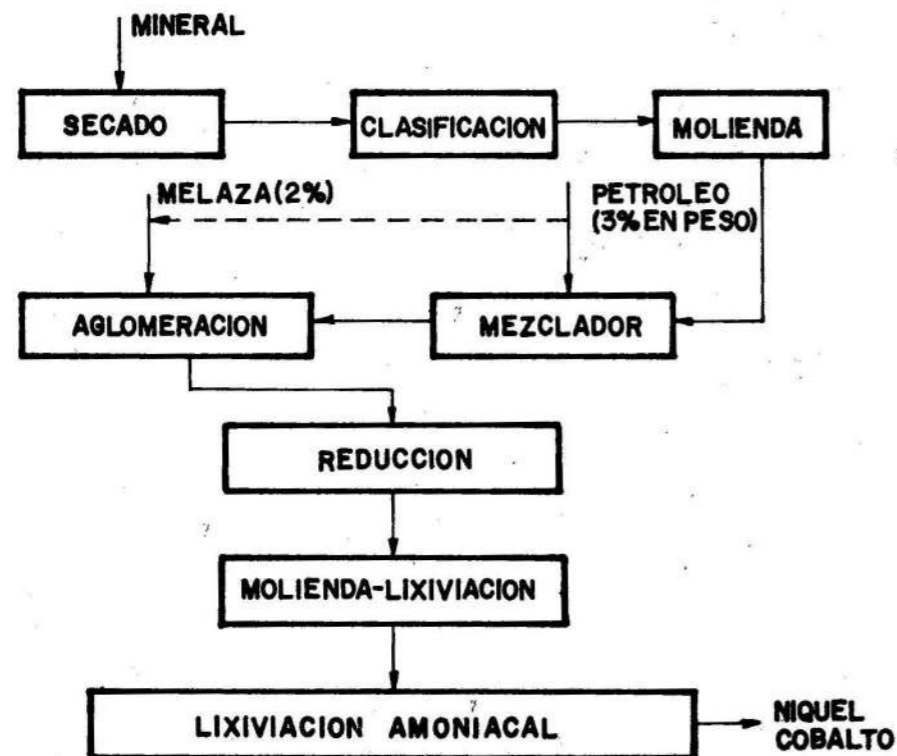


Fig. 10 Esquema de reducción selectiva del mineral aglomerado

CONCLUSIONES

1. El estudio científico-técnico de la reducción de los minerales oxidados de níquel permitió establecer la factibilidad del procesamiento del mismo, por una tecnología más perfeccionada que la de Caron.
2. En el trabajo se demuestra que el estudio científico-técnico de los procesos es necesario, y permite dilucidar los fenómenos que ocurren en los mismos.
3. La reducción del mineral aglomerado no afecta la extracción de los metales, pero permite alcanzar una reducción más uniforme en la masa de mineral, evitando la sobre-reducción del mismo.
4. La tecnología desarrollada ofrece índices técnico-económicos más altos que la tecnología carbonato-amoniaca convencional.

REFERENCIAS

1. CARON, M.A.: "Fundamental and practical-factor n in ammonia leaching of nickeliferous laterites", in *Journal of Metals*, 1950.
2. CASTELLANOS SUAREZ, J.: "Reducción de las lateritas. Mecanismos de reducción". *Encuentro de Post-Graduado Universidad de Oriente*, 1968.
3. _____: "Elaboración de los minerales oxidados de níquel por el esquema carbonato-amoniaca". *Tercer Forum de la ACC*, marzo, 1980.
4. _____: "Reducción del mineral oxidado de níquel mezclado con petróleo briqueteado y/o peletizado utilizando melaza con aglutinante", *RI-560*, 1976.
5. _____: "Cinética de la reducción de los minerales oxidados de níquel". *Cuipromiquel-Instituto de Minas de Leningrado*, 1979 (en imprenta).
6. CASTILLO, R. y J. CASTELLANOS SUAREZ: "Optimización de la reducción de la serpentina mezclada con petróleo y briqueteada para la lixiviación con resina de intercambio". *CIPIMM*, 1977.
7. CUNTZ, H. y O. ZVEGEL: "Reduction of iron-containing oxidic nickel and cobalt". *Get. patent 214 6357*, 1972.
8. GRAAF, J.E.: "Tratamiento de los minerales de níquel". *Hidrometallurgy*. Vol. 15, No. 1, 1979.
9. POWER, L.F. y G.A. GEIGER: "Aplicación de la calcinación reductora carbonato de amonio-amoniaca a las lateritas níquelíferas". *Minerals Science Engineering*, Vol. 9, No. 1, 1977.
10. STEVENS, L.G. y L.A. GOELLER: "El proceso U.O.P. de la extracción de níquel". *14 va Conferencia Anual de Metalurgia de Canadá. Institute of Mines and Metal, Canadá*, 1975.