

# INFLUENCIA DE LA GÉNESIS DE LOS MINERALES DE FIERRO EN EL DESARROLLO DE PROCESOS METALÚRGICOS

## THE INFLUENCE OF IRON MINERAL GENESIS IN THE DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PROCESSES

Jorge González\*, Janet Quiñones\*

### RESUMEN

En el presente trabajo se da a conocer la importancia de la caracterización previa de los diversos tipos de minerales de Fe; la importancia de las propiedades metalúrgicas y los resultados de estas caracterizaciones son significativas para el desarrollo de respectivos procesos metalúrgicos adecuados. En este artículo se da a conocer caracterizaciones mineralógicas de diversos minerales de Fe. Estos resultados pueden ser útiles, por ejemplo, en el desarrollo de procesos de reducción directa con gas.

**Palabras clave:** Procesos de sinterización de los minerales de hierro, mineralogía de los silicatos, sintetización en fase líquida, cambio morfológico de las fases durante los procesos de sintetización a altas temperaturas.

### ABSTRACT

Presently work is given to know the importance of the previous characterization of the diverse types of minerals of Fe. The importance of the metallurgical properties and its respective mineralogy characterization are important for the development of respective metallurgical processes appropriate. In this work, it is given to know mineralogy characterizations of diverse Minerals of Fe. These results can be useful, for example in the development of processes of direct reduction with Gas.

**Keywords:** Sintering process of the Fe o Be, mineralogy of the silicates, sintering in liquid phase morfological change of the phases during the high temperature sintering process.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de procesos metalúrgicos de producción de acero siempre está ligado a la calidad del mineral de Fe. Tal es así que, en la actualidad, se han desarrollado criterios por los cuales se pueden clasificar los minerales de Fe y, de esta manera, determinar si pueden ser utilizados o no en procesos siderúrgicos [1,2].

Entre estos criterios tenemos: Ley del mineral contenido de azufre, fósforo, porcentaje de ganga. Estos parámetros determinan si el mineral puede ser utilizado directamente o necesita una

etapa de beneficio. Por ejemplo, los minerales de Fe de yacimientos del tipo sedimentación, en donde la Ley de hierro es alta: 68-67%, los contenidos de azufre y fósforo son pequeños, determinan que este mineral sea utilizado directamente en módulos de reducción directa y en porcentajes moderados en la carga metálica de altos hornos.

Los yacimientos del tipo *skarn* (yacimientos de Fe de interés industrial en Perú) presentan etapas de explotación totalmente complejas. Al inicio se presentan capas superficiales de minerales de Fe, las cuales pueden ser explotadas fácilmente; poseen elevada Ley de hierro (Fe), pero en estos

---

\* Docente de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.  
E-mail: jogonzal\_63@yahoo.es

minerales es muy común encontrar zonas en donde el proceso de martitización está muy desarrollado [3], originando estos problemas al utilizar este mineral en procesos de reducción directa, que éstos forman finos en presencia de fase gaseosa reductora. A medida que esta capa superficial se explota, la Ley de Fe disminuye, el porcentaje de impurezas se incrementa, siendo necesario desarrollar un proceso de beneficio y posterior sinterización. En esta etapa, papel dominante al desarrollo del proceso de sinterización, es el comportamiento de los diferentes tipos de silicatos, los cuales aportan propiedades de resistencia en frío y a altas temperaturas en presencia de fase gaseosa reductora [4,5]. En esta clasificación de minerales de Fe también se encuentran los llamados complejos minerales; de cuyas composiciones químicas se encuentra Ti, Cr, Mn, Co. Es indudable que la presencia de estos elementos influyen en las propiedades de los pelets y/o *sinter* obtenidos de concentrados de este tipo de mineral y, por consiguiente, posean un comportamiento distinto a los concentrados clásicos de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [6,7].

La finalidad del presente trabajo es dar a conocer la correlación que existe entre la composición mineralógica de fases portadoras de Fe y el desarrollo de procesos siderúrgicos en función a este criterio; para lo cual se han tomado como base los siguientes tipos de minerales de Fe: Minerales de Fe, complejos procedentes de yacimientos del tipo *Skarn* (Tipo I), concentrados magnéticos de minerales de Fe de yacimientos del tipo de cuarcitas ferruginosas (Tipo II), minerales de Fe del sur del Perú (Tipo III).

## 2. CARACTERIZACIÓN MINERAGRÁFICA DE MINERALES DE Fe Y COMPORTAMIENTO DE ÉSTOS A DIVERSOS PROCESOS METALÚRGICOS

A fin de poder abarcar la mayor diversidad de minerales de Fe se han escogido tres tipos característicos, estos han sido detalladamente estudiados en diferentes trabajos [8,9]. La composición química se muestra en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Composición química de diferentes minerales de Fe.

Tipo de mineral	Fe Total	SiO <sub>2</sub>	CaO	S	P	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
I	51.0	8.68	4.56	0.02	0.01	2.11	
II	63.7	10.09	0.24	0.02	0.01		0.01
III	55-60	6 - 7		0.05	0.02		

Al primer tipo corresponden los minerales complejos; en este tipo de minerales el Mn forma soluciones sólidas en la estructura cristalina de la magnetita formando espínelas, la cuales se caracterizan por la siguiente fórmula MeO. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Donde el Me puede ser el Cr, Ti, Mn.

En esta clasificación un mineral característico es la Ilminita: (Ti,Cr)O. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, el cual, además, presenta en su composición química Vanadio. Para este tipo de mineral, desarrollar un esquema metalúrgico de beneficio para recuperar el Cr, Ti o V, resulta, en muchos casos, antieconómico; por lo que se trata, en lo posible, de utilizar al máximo el Fe, para luego, en etapas posteriores de refinación de escorias, recuperar al Ti, Cr, V [10]

Para el caso específico de un mineral del Tipo I, que contiene Mn en su composición química, se determinó la existencia de fases muy complejas portadoras de Fe y Mn. La ganga está representada por: SiO<sub>2</sub> – sílice; [(Ca,Mn)Fe].SiO<sub>2</sub> . metasilicatos de manganeso y carbonatos dolomíticos: (Ca, Mg). CO<sub>3</sub>. En la Tabla N° 2 se muestra la distribución tipo de fases portadoras de Fe y Mn.

Tabla N° 2. Composición de fases en mineral complejo de Fe (Tipo I).

Tipos de fases	% en masa
Solución sólida de Mn en α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : α - (Fe, Mn) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	68,2
Solución sólida de Mn en γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : γ - (Fe, Mn) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,6
Hidróxidos de Fe: (Fe, Mn) O.OH.nH <sub>2</sub> O	23,2

Como se aprecia, los resultados muestran una interacción muy estrecha entre el Mn y el Fe. El grado de interacción del Mn en el mineral es muy elevado, ya que éste, inclusive, se puede encontrar en los minerales de ganga formando soluciones sólidas. A fin de enriquecer este mineral para posteriormente utilizarlo en la industria siderúrgica, se realizaron pruebas de separación magnética sin éxito. Todo el material pasó a los relaves, debido a que las características magnéticas de éste son bajas, consecuencia de que en la composición de fases no existe una fase magnética pura bien determinada, por lo que se optó por realizar un tostado magnetizante; éste elevó las características magnéticas del mineral estudiado en 320 veces. Con estas características fue posible realizar una separación magnética. Pese a estas mejoras, el contenido de Fe y Mn en los relaves fue igual al del concentrado. Sin embargo, la Ley de Fe se

elevó a 60-62%, Tabla N° 3. El análisis mineralográfico realizado al material tostado y a los relaves de separación magnética, muestran lo siguiente:

- La tostación magnetizante no ha logrado romper el enlace químico que existe entre la ganga y los minerales de Fe y Mn.
- El incremento de la Ley de Fe en el concentrado no es un efecto de enriquecimiento, éste está relacionado con la eliminación de materias volátiles, según el esquema:



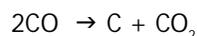
- Según estos resultados, un mismo efecto daría un tostado oxidante, debido a que los fines perseguidos, el lograr mayor cantidad de magnetita, no se han obtenido. Este proceso se realizaría en una etapa previa de acondicionamiento del material para su posterior tratamiento metalúrgico.

**Tabla N° 3.** Resultados de separación magnética previa tostación magnetizante.

Temperatura de tostación	% Fe en concentrado	% Mn en concentrado	% Fe relave	% Mn relave
700	5,63	2,21	55,80	2,01
800	62,63	219	58,80	2,17
900	61,66	234	60,2	2,22

Una posterior evaluación de utilizar este material en módulos de reducción directa llevó a realizar análisis de reducibilidad de este mineral, para lo cual se estudió la cinética de reducción en atmósferas de hidrógeno y monóxido de carbono. Cuando se utilizó H<sub>2</sub> como agente reductor, se obtuvieron resultados mayores del 100% de reducibilidad; esto se debe a que los óxidos de Mn también se reducen, por lo que para posteriores trabajos se considera el oxígeno enlazado con el Fe y Mn. Caso contrario sucede cuando se utiliza el CO como agente reductor. Estas diferencias fundamentalmente son consecuencias de diferentes tipos de mecanismos de reducción a las temperaturas estudiadas (800-1000 °C).

A estas temperaturas el Mn se disuelve en el Fe metálico, este cambio genera a su vez la solubilidad del carbón en el Fe metálico. A estas condiciones está favorecida la reacción:



El carbono producto de esta reacción se difunde en los óxidos reducidos, formando carburos del tipo (Fe, Mn) C<sub>13</sub>, en otras palabras, el efecto reductor del CO disminuye. Ésta sería la explicación por la cual el efecto de la temperatura es positivo

para el caso del hidrógeno y negativo para el CO. Estos resultados se comprueban por los análisis realizados por rayos X y por el efecto Mosbauer a los productos obtenidos por reducción con hidrógeno y CO (Tabla N° 4).

**Tabla N° 4.** Determinación de fases de minerales complejos reducidos con H<sub>2</sub> y CO.

Temp. °C	α - Fe	Mn en αFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Fe,Mn) <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	(Fe,Mn)	(Fe,Mn)C <sub>13</sub>
900°C, H <sub>2</sub>	37,1	36,2	14,2	12,5	
1000°C, CO	29,0	37,0	27,7		6,3

De los resultados obtenidos del comportamiento de este mineral, podemos realizar las siguientes conclusiones:

1. Previa etapa de benéfico, este tipo de mineral deberá pasar por una etapa de tostación oxidante, a fin de favorecer la eliminación del agua.
2. Los pelets obtenidos de este concentrado son de fácil reducibilidad en hidrógeno. La formación de carburos en presencia de CO limitaría la utilización de este tipo de material en hornos rotativos, ya que su grado de metalización sería bajo.
3. Lo más importante de este tipo de material es que posee Mn, elemento muy considerado en la industria metalúrgica, sobre todo en la fabricación de piezas que trabajan por desgaste; por lo que sería razonable su utilización en pequeñas cantidades para hornos de reducción directa, y gran eficacia en altos hornos, como carga metálica o como elemento corrector de Mn en el arrabio.

Los concentrados magnéticos obtenidos de cuarcitas ferruginosas (Tipo II), son de especial interés, ya que estos tienen una particularidad: la ganga en este tipo de concentrados está representada por SiO<sub>2</sub> y el porcentaje de estos varía entre 7,5% hasta 12% [10]. La presencia de otros óxidos es muy poca, el análisis mineralográfico de este tipo de concentrado se muestra en la Tabla N° 5.

**Tabla N° 5.** Análisis mineralográfico de diversos concentrados obtenidos de cuarcitas ferruginosas [10].

Concentrado	Minerales de ganga			Tipos de silicatos	Tipos de carbonatos
	SiO <sub>2</sub>	Silicatos	carbonatos		
N1	8,81	17	9	Cumr, Biot, Erg.	Dolomita
N2	2,0 1,73	50 25	5	Rod, Cumr, Hid, Mic	Unkmita
N3	10,1	33	5	Mir, Cumr, Rod, Biot	Dolomita Calcita

Cumr: Cummingtonita    Biot: Biotita  
Erg: Egurin              Rod: Rodocita    Mic: micas.

Como se aprecia en esta tabla, en todos los concentrados el cuarzo prevalece en mayor porcentaje. Como se conoce, el desarrollo del proceso de piro-sinterización para la obtención de pelets, está ligado y depende mucho del desarrollo de fase líquida, la cual cementa las partículas muy pequeñas de concentrado, asimilándolas y aportando de esta manera propiedades específicas a los pelets, como son: resistencia a la compresión, índice de tambor y reducibilidad [12].

Por esto, en este tipo de concentrados es muy valiosa la información referente al comportamiento de estos silicatos durante el proceso de piro-sinterización. Con este fin se determinó la composición química y la estabilidad térmica de estos. Tabla N° 6 y 7.

**Tabla N° 6.** Composición química de silicatos en concentrados obtenidos de cuarcitas ferruginosas.

Tipo de silicatos	Fe Total	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	H <sub>2</sub> O
Egurin	24,04		34,42			52,27			
Rodocita	17,70	5,91	18,78		11,74	56,00			1,05
Micas	19,14	4,90	21,90		5,25	52,60	0,7		4,30
Biotita	15,30	18,05	1,75		9,35	36,10	18,8	0,18	4,03
Cumming	30,19	38,80		0,25	6,87	51,56		0,07	2,45
Chloritoid	22,51	24,44	5,00		5,35	43,77	12,5		8,94

**Tabla N° 7.** Temperatura de transformación de red cristalina de silicatos en concentrados de cuarcitas ferruginosas, a condiciones de calentamiento.

Tipo de silicato	Temperatura de Transformación de red cristalina, °C	Temperatura de Fusión, °C
Equirín	980	980
Rodocita	985	1000
Mica	930	1050
Biotita	1100 - 1180	1250
Cumming	900 - 1000	1350
Chloritoid	750 - 850	1350
Cuarzo		1728

Según estos resultados, los silicatos de mayor punto de fusión serían los que limitarían al proceso de sinterización. La presencia de fase líquida durante el proceso depende de la relación: silicatos de bajo punto de fusión / silicatos de alto punto de fusión. Lo característico en el proceso de obtención de concentrados de Fe es que mientras se quiera lograr leyes más altas esta relación proporcionalmente decrece. Esto disminuye las reservas internas del concentrado; es decir, la capacidad de interacción de fases está limitada, llevando al proceso a un mecanismo de sinterización en «seco» en donde prevalecen las reacciones del tipo sólido-sólido. Precisamente los pelets obtenidos en estas condiciones presentan elevadas características mecánicas en frío: mayor resistencia a la compresión, índice de tambor elevado. Sin embargo,

bajo condiciones de atmósferas reductoras, éstos decrepitan formando finos [3].

Para determinar la influencia de cada tipo de silicato, la interacción entre componentes y la influencia de estos dos parámetros a las propiedades metalúrgicas de los pelets se modeló un sistema para este tipo de minerales. A un súper concentrado %Fe = 71,0%, en el cual la sílice se encuentra en forma de cuarzo; se añadió diversos silicatos con la condición de que el máximo porcentaje de SiO<sub>2</sub> total sea 5,0%. Las particularidades de estos silicatos son más notorias en los pelets ácidos, debido a que el mecanismo de interacción de fases y asimilación de éstas por la fase líquida formada depende únicamente del grado de disociación y formación de fase líquida de determinado silicato. Los pelets obtenidos con silicatos de bajo punto de fusión, poseen mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia a condiciones reductoras. Considerablemente propiedades más bajas se han obtenido en los pelets con silicatos de elevado punto de fusión; sin embargo, éstos poseen mayor grado de reducibilidad que aquellos pelets con silicatos de bajo punto de fusión. Tabla N° 8.

**Tabla N° 8.** Propiedades metalúrgicas de pelets ácidos a partir de súper concentrado de Fe con diferentes tipos de silicatos (mineral tipo II).

Silicatos añadidos a concentrados	Propiedades metalúrgicas antes de reducción		Propiedades metalúrgicas Postreducción	
	Resistencia compresión	Índice tambor	Finos > 5 mm	Índice tambor
Cuarzo	4,01	5,20	22,50	8,30
Chloritoid	2,19	8,50	38,00	26,70
Biotita	4,41	3,40	34,10	5,70
Cumming	6,32	7,00	37,60	6,30
Rodocita	5,10	2,20	89,00	1,60
Egurin	4,80	1,50	92,00	0,20
Mica	5,76	2,40	91,20	0,80

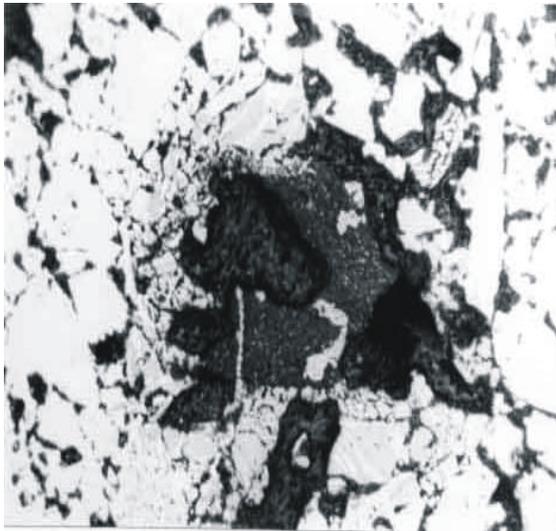
Resistencia a la compresión KN/ pelets.

Estos resultados han sido obtenidos en pelets sinterizados a temperatura constante de 1300 °C. Si se compara esta temperatura con las temperaturas de cambio en estructura cristalina y de fusión de silicatos, se afirma que aquellos silicatos de bajo punto de fusión han formado masa líquida, la cual ha cementado todas las partículas de óxidos de Fe. Esta fase que cementa sirve de esqueleto, lo suficientemente resistente en frío, y a condiciones reductoras no sufre cambio alguno, por el contrario, ésta limita la formación de finos durante el proceso. La desventaja es que este tipo de silicatos se encuentra en baja proporción en el concentrado

por lo que se hace necesario desarrollar un proceso de obtención de pelets básicos. Cabe resaltar que este tipo de concentrados son utilizados para producir pelets básicos para uno de los más grandes complejos de reducción directa en Rusia: Complejo de OEMK.

Los yacimientos de minerales de Fe en el Perú son del tipo skarn. En el caso de Marcona los concentrados obtenidos son limpios de P y S; estos concentrados, a diferencia de los dos tipos anteriores, según el análisis realizado por efecto Mosbauer, no poseen elementos que formen con el Fe soluciones sólidas, es decir, se trata de un concentrado magnético típico [13].

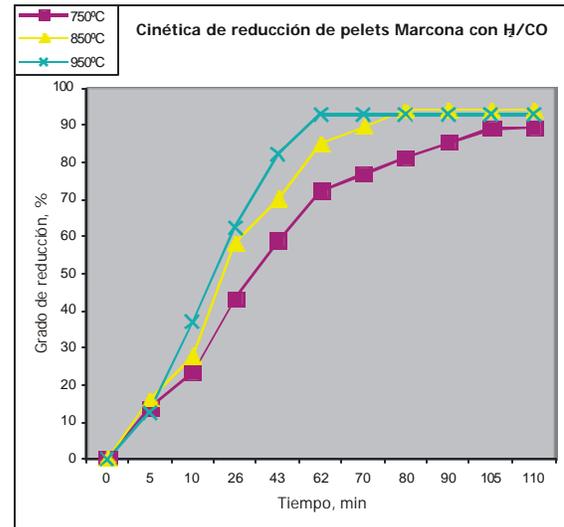
Sin embargo, estos pelets en presencia de una fase gaseosa reductora similar a las de los hornos MIDREX presentan el fenómeno de aglomeramiento (sticking). Para analizar este fenómeno se realizaron pruebas para determinar el análisis microestructural de los pelets sinterizados y reducidos. Este análisis muestra que la temperatura de sinterización no se encuentra en los rangos requeridos para favorecer la formación de fase líquida es característico encontrar zonas donde los silicatos se encuentran en pleno proceso de disociación (Foto N° 1).



**Foto N° 1.** Microestructura de pelets ácidos industriales de Marcona. Se muestra silicatos en fase inicial de disociación.

Por experiencia en análisis realizados en pelets similares de otros tipos, es de esperar que estos pelets, durante el proceso de reducción, posean elevada reductibilidad y formen muchos finos. En el Gráfico N° 1 se muestra la cinética de reducción de los pelets industriales de Marcona con una fase gaseosa compuesta de  $H_2/CO=50/50$ . Como se puede apreciar, la cinética se incrementa en función de la

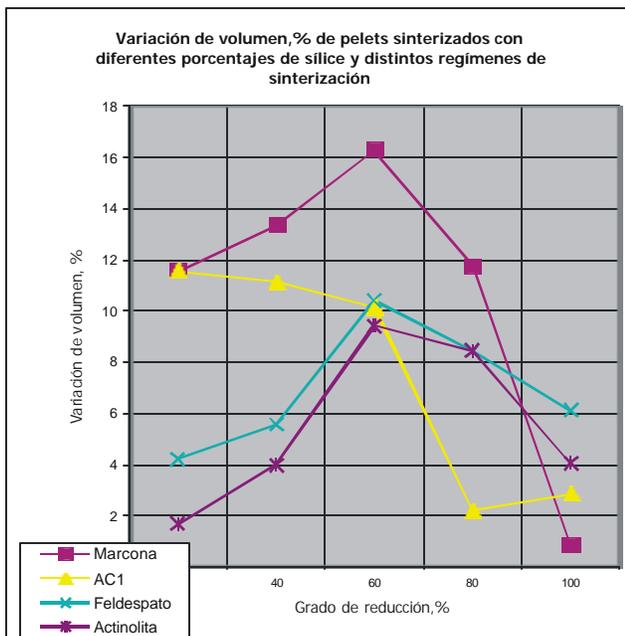
temperatura. Grados de metalización del orden de 90-95% se obtienen a relativos tiempos cortos; por ejemplo, a 950 °C, 95% de metalización se obtienen a aproximadamente 70-75 min. Sin embargo, éstos, a medida que se incrementa el grado de metalización, pierden integridad física; éstos reportan un incremento de volumen sustantivo en función del grado de reductibilidad [14].



**Gráfico N° 1.** Cinética de reducción de pelets de Marcona.

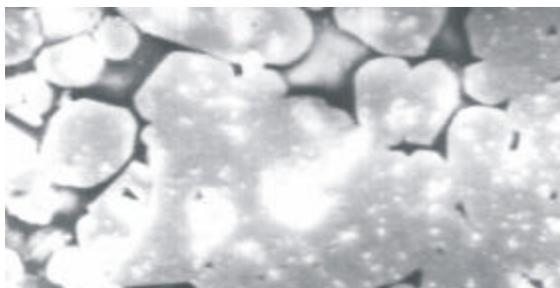
Este incremento de volumen durante el proceso de reducción es un indicador directo de que el «esqueleto» que cementa las partículas de Fe sinterizadas en los pelets no es estable a las condiciones reductoras. La principal causa es que el régimen de sinterización de pelets no es el adecuado y los silicatos principales portadores de fase líquida, presentes en el concentrado son de elevado punto de fusión. Con esta finalidad se añadieron tres tipos de silicatos característicos en estos tipos de concentrados. El nuevo régimen de sinterización se denominó AC1, luego se realizaron las respectivas pruebas de reducción y variación de volumen. Como se muestra en el Gráfico N° 2, los modelos: concentrado + actinolita (conc.+act.), concentrado + feldespato (conc.+feld.) reportan menor incremento de volumen durante el proceso de reducción. El máximo incremento de volumen para estos dos modelos, comparado con los pelets industriales, es aproximadamente 50%. La variación de volumen de los pelets sinterizados por el régimen AC1 presenta una tendencia distinta, esto es debido a que este régimen se ha desarrollado en función a condiciones de equilibrio de transformaciones de fases. El régimen de sinterización de los otros dos modelos es similar al utilizado en la producción de pelets industriales. Según el análisis de fases durante la

reducción para todos los casos es similar y típicamente conocido, para los cuatro casos estudiados el Fe metálico a partir del 40% de reducción presenta un proceso creciente. A 60% de reducción la magnetita, prácticamente se ha transformado totalmente en Wustita y Fe metálico. Justamente a estos valores de reducción es donde se encuentra en mayor incremento de volumen en todos los sistemas estudiados.



**Gráfico N° 2.** Variación de volumen de pelets en función del grado de sinterización.

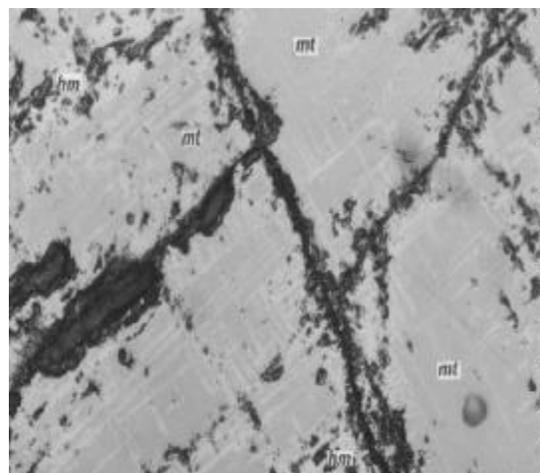
El análisis realizado por MEB., a fin de determinar el mecanismo de sinterización de este concentrado con diversos tipos de silicatos muestra que a temperaturas de 1240-1250 °C aparecen indicios de fase líquida, ésta, como se muestra en la Foto N° 2, asimila pequeñas partículas de óxidos de Fe, es característico que a medida que se incrementa la temperatura esta fase líquida ocupe porosidades y disgregue bloques de óxidos de Fe.



**Foto N° 2.** MEB. Muestra formación de fase líquida formándose en límites de granos y asimilación de pequeñas partículas de Fe. T=1240 °C. X 5000.

Otros tipos de minerales de Fe de interés tecnológico se encuentran en el sur del país; éstos, por su génesis, son del tipo Skarn; pero por su composición mineralógica, son totalmente diferentes a los de Marcona. Esto se debe a que los análisis se han realizado a muestras que han sido tomadas de zonas cercanas a la superficie. Debido a que en el análisis minerográfico se observa una activa oxidación de la magnetita la cual tiene lugar por acción del aire en el agua. La magnetita pura contiene 31% de FeO la fórmula de  $Fe_3O_4$  puede ser representada por  $FeO \cdot Fe_2O_3$ . En la zona de oxidación la magnetita del cuerpo mineral pasa a ser hematita es decir la cantidad de FeO como producto de oxidación paulatinamente disminuye.

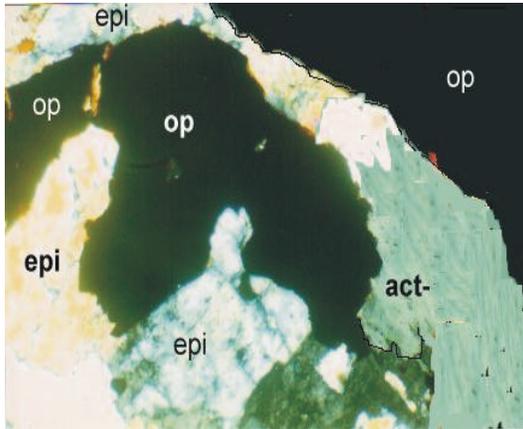
Si la relación  $Fe_{total} / FeO < 3.5$  se tiene un mineral oxidado parcialmente y se llama magnetita. Si esta relación se encuentra entre los valores de 3.5 - 7.0 el producto de oxidación se llamará semi-martita. Si  $Fe_{total} / FeO > 7$  tendremos un mineral de Fe llamado martita. De esta manera la martita es producto de la oxidación de la magnetita a condiciones ambientales y esta microestructura se caracteriza por tener una mezcla de dos minerales: hematita y magnetita (ver Foto N° 3).



**Foto N° 3.** Magnetita (mt) en la cual se puede observar que está alterada a hematita (hm) a lo largo de sus clivajes, hacia la izquierda fragmentos oscuros de gangas (GGs). Esta foto representa a un proceso de martitización inicial. Aumento: 250X en Nícoles Paralelos (sin analizador). Sección pulida.

La ganga presente en estos minerales es típica a los yacimientos del tipo Skarn y son del tipo actinolita, epidotas y tremolitas (ver Foto N° 4). Según este análisis realizado se puede afirmar que estos minerales poseen elevada reducibilidad y presentan problemas de formación de finos. Por lo que es recomendable que se desarrolle un proceso de aglomeramiento para su posterior utilización en

módulos de reducción directa. Esto es factible debido a que este tipo de mineral –como se dijo anteriormente– posee una reserva interna y ésta es favorable térmicamente, ya que los silicatos presentes son de bajos puntos de fusión; esto hace posible que se pueda producir material aglomerado con una basicidad determinada en función a las necesidades del complejo. Por otro lado, es muy factible la utilización de carbones bituminosos para la obtención de materiales aglomerados prerreducidos.



**Foto N° 4.** Actinolita-tremolita (gris verdosas) parcialmente reemplazada por minerales opacos (op) de color oscuro, bordeando a epidotas (epi) amarillas y rosáceas. Aumento : 200X en Nícoles Cruzados (con analizado insertador) en sección delgada.

Este último aspecto es importante, porque con el inicio de la explotación del gas de Camisea la utilización de éste en el desarrollo de procesos siderúrgicos, como es la reducción directa, es de vital importancia. Es necesario considerar que los mecanismos de reducción con carbón y con gases son totalmente diferentes; el primero depende de la reactividad del carbón, el segundo depende netamente de las propiedades del mineral, en especial la tendencia a la formación de finos durante la reducción, ya que éstos poseen mayor superficie específica y al contacto con partículas mayores, favorecen la formación de conglomerados, originando una distorsión de la gasodinámica del proceso, lo que origina una disminución del coeficiente de utilización de gases.

### 3. CONCLUSIONES

1. Se ha dado a conocer un análisis del comportamiento de diferentes tipos de minerales de Fe y sus respectivos concentrados en procesos de reducción directa.

2. Los yacimientos del tipo skarm poseen diversos tipos de silicatos, éstos tienen diversas temperaturas de disociación y formación de fase líquida. El desarrollo adecuado del contenido de esta fase en sus respectivos concentrados asegura un comportamiento óptimo del material sinterizado en atmósferas reductoras.
3. Los minerales de Fe de la zona sur del Perú son del tipo martíticos, éstos poseen un comportamiento diferente al proceso de reducción con carbón y a la reducción con gas. Cuando se utilice gas natural convertido en una mezcla de CO/H<sub>2</sub>, la cinética de reducción de estos minerales será elevada, esto originaría finos metálicos.
4. Todas estas consideraciones deben tomarse en cuenta para la explotación de los respectivos yacimientos y sus posteriores aplicaciones en procesos siderúrgicos.
5. Sería recomendable realizar pruebas de sinterización de finos de minerales a condiciones de fase gaseosa reductora y óxido-reductora, para analizar el comportamiento metalúrgico, y poder definir propiedades tan importantes como la recarburación y la cinética de reducción, así como también el analizar la composición de la ganga y su influencia a procesos posteriores en la obtención de aceros en hornos eléctricos.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

1. Iron (1985). Bearing raw materials for direct reduction. *Handbook ASME R.D Technology and Process*.
2. Bushy, N.J. Fundamental research into optimization of iron ore sinter properties by consideration of mineralogy and structure. British Steel Corporation. Teesside Laboratories. Meddlesbrough, England.
3. Gonzales, J.; Malicheva, T. Y. (2001). «Importancia de formación de fase líquida durante el proceso de sinterización de minerales de Fe y el comportamiento de éstos en atmósferas reductoras». I Congreso Internacional de metalurgia de transformación. Lima-Perú.
4. Dolitskaya, O. A. (1995). Influencia de la génesis del mineral de Fe al régimen de sinterización en pelets básicos. *Izv. Akad. Nauk. Metalli* N° 5.
5. Malicheva, T. Y. (1972). Composición de fases y resistencia a la compresión en pelets

- de KSGOK durante procesos de sinterización y reducción. *Izv. Akad. Nauk Metalli*, pp. 5-20.
6. Hass, Larry A. (1985). Influence of reducing conditions on the softening-melting characteristics of taconite pelets. Publication of Research Center US Bureau of Mines.
  7. Tasaku Fuwa (1969). Swelling of iron ore pelets during reduction. *Transactions ISIJ*. Vol. 9, pp. 2-15.
  8. Malicheva, T. Y. (1985). Piroconsolidación de minerales de Fe. Moscú, Nauka.
  9. Begman, E. F. (1990). Tratamiento metalúrgico de minerales de Fe con alta alumina en ganga. Moscú, Metalurgia.
  10. Shuravleb, F. M. (1991). Pelets de concentrados de cuarcitas ferruginosas. Moscú. Metalurgia.
  11. Bratchikov, C. G. (1988). Minerales de Ti-Magnetita-Tratamiento sin coque. Moscú. Metalurgia, 1988.
  12. Laidova, B.Y. (1992). Formación de fase líquida a bajas temperaturas en las fronteras de granos de sílice en minerales de Fe básicos. *Izv. Akad. Nauk. Metalli* N°6.
  13. Gonzales, Jorge (1992). Estudio de la cinética de reducción de los pelets para RD de Marcona. Estudio de Investigación. MISIS Moscú.
  14. Gonzáles, Jorge (1995). Informe Técnico presentado a gerencia técnica SHOUGANG HIERRO Perú. Lima, octubre.