

Estudio de la granulación de la mezcla de minerales de hierro en el proceso de sinterización. I parte. Granulación^(*)

Antonio Formoso*, Alfredo Moro**, Gerardo Fernández-Pello***, Moisés Muñiz***, Juan Jiménez*, Aníbal Moro* y Alejandro Cores*

Resumen Se describe el proceso de granulación de la mezcla de mineral y se estudia la aptitud a la granulación de una serie de minerales de hierro que forman parte de la mezcla. Con una buena granulación y control de la temperatura máxima de sinterización, se puede conseguir la estructura óptima del sinterizado, formada por un núcleo de hematita rodeado por una red de ferritos aciculares. Se expone la práctica industrial de distintas formas de realizar la granulación.

Palabras clave Granulación. Sinterización. Horno alto. Minerales de hierro.

Study of the iron ores mixture granulation in the sintering process. Part 1. Granulation

Abstract The granulation process of the ore mixture is described and the fitness for granulation of several iron ores form part of the mixture is studied. With a good granulation and sintering maximum temperature control is possible to achieve the best sintered structure, forming by a hematite nucleous bonded by acicular ferrites. The industrial experience of several types of granulation is described.

Keywords Granulation. Sintering. Blast furnace. Iron ores.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de sinterización se utiliza para aglomerar una mezcla de minerales de hierro, fundentes y coque, de tamaño de partícula inferior a 8 mm, de tal forma que el sinterizado producido, con tamaño tamizado entre 12 y 35 mm, una vez cargado en el horno alto pueda soportar las presiones y temperaturas del horno.

En el proceso de sinterización, la mezcla de mineral se somete previamente a una granulación que consiste en homogeneizar la mezcla en un tambor giratorio, con la adición de un 7-8 % de agua, durante unos minutos.

Los gránulos formados se cargan sobre la parrilla de la banda de sinterización, en donde la temperatura de los gránulos se eleva entre 1.250 y 1.300 °C para conseguir la fusión parcial y producir material semifundido el cual, durante el enfria-

miento posterior, cristaliza en varias fases minerales de distinta composición química y morfológica, principalmente hematita, magnetita, silicoferritos de calcio y aluminio (SFCA), o ferritos, y silicatos cálcicos^[1]. La energía del proceso la suministra la combustión del coque.

Los factores que afectan a la sinterización y a la calidad del sinterizado producido son, entre otros: a) el tamaño y composición de los gránulos; b) el tamaño, composición y propiedades relativas de los componentes de la mezcla mineral (minerales de hierro, fundentes y coque); c) la composición mineralógica de los minerales y d) el perfil térmico del proceso.

La etapa de la granulación es muy importante en el proceso de la sinterización, debido a que:

- la distribución del tamaño del gránulo está relacionada directamente con la permeabilidad del lecho y la productividad.

(*) Trabajo recibido el día 27 de marzo de 2000 y aceptado en su forma final el 19 de julio de 2000.

(*) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM (CSIC). Avda. de Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid (España).

(**) Escuela de Ingeniería Técnica de Minas. Mieres. Universidad de Oviedo (España).

(***) ACERALIA Corporación Siderúrgica. Gijón, Asturias (España).

- es posible diseñar el tipo de gránulo deseado, para una mezcla mineral dada, con el fin de producir una microestructura sinterizada determinada.

La eficiencia de la granulación tendrá una influencia sobre la permeabilidad y velocidad del flujo de aire a través del lecho, la velocidad del descenso del frente de llama y el perfil de temperaturas del lecho en función del tiempo^[2].

El comportamiento a la granulación de una mezcla mineral particular determinará la estructura y composición de los gránulos formados y estos influyen luego en las reacciones locales de sinterización que se produzcan. Las propiedades del lecho durante la sinterización también son muy importantes.

En cada etapa de la sinterización, el comportamiento de los gránulos es importante. Por ejemplo, si los gránulos pierden consistencia durante la calcinación, se producirán partículas finas que pueden disminuir el flujo de aire o incluso obstruir huecos localizados del lecho, lo que ocasionaría una alteración en la marcha normal de esta etapa.

En el presente trabajo se estudia la aptitud a la granulación de minerales de hierro y la de una mezcla mineral. Con la mezcla se fabrica, en la planta piloto del CENIM, una serie de sinterizados a los que se determinan la composición química, índices de calidad y análisis estructural. Se define el índice de granulación de una mezcla mineral (índice G) y se dan los datos de cómo evoluciona con los años el

índice G de las mezclas utilizadas en ACERALIA, y cómo mejora la calidad del sinterizado con la mejora de este índice.

2. MINERALES UTILIZADOS

Se ha utilizado una serie de minerales de hierro, fundentes y coque que son de consumo habitual en las plantas de sinterización de ACERALIA. Estos minerales se han caracterizado como se indica en los apartados siguientes.

2.1. Análisis químico

En la tabla I se ofrece el análisis químico de los minerales de hierro. Todos presentan una buena ley en hierro, desde los concentrados Mount Wright y MBR, con 66-67 % de hierro, hasta el mineral español Andaluza, con un 53,7 %, siendo éste el que tiene un mayor contenido en álcalis, llegando al 0,3 % K₂O, con el consiguiente efecto perjudicial para la buena marcha del horno alto. No obstante, su presencia en la mezcla mineral es importante por ser el único mineral de procedencia española.

En la tabla II se ofrece el análisis químico de los fundentes.

El análisis del coque realizado en el Instituto Nacional del Carbón (INCAR) es el siguiente: 83,50 % C; 12,00 % cenizas; 2,20 % materias volátiles; 0,95 % humedad; 0,25 % H; 0,96 % N; 0,10 % S y 60,46 de reactividad CRI.

Tabla I. Análisis químico de minerales de hierro, % en masa

Table I. Chemical analysis of iron ores, % mass

	Andaluza	CVRD-Carajas	CVRD-Tubarao	San Isidro	Mount Wright	SNIM-T azadit	SNIM-Normal	Goa Silicioso	Nimco	Hamersley	MBR Brasil
Fe total	53,71	65,54	61,21	65,50	66,25	62,98	61,24	56,32	62,57	62,17	67,33
Fe ⁺⁺	0,0	0,27	0,55	0,61	1,61	0,40	0,86	4,83	3,04	0,27	0,69
CaO	4,12	0,10	0,04	0,04	0,13	0,11	0,12	0,07	0,03	0,10	0,07
MgO	0,64	0,03	0,02	0,03	0,08	0,02	0,08	0,09	0,02	0,06	0,04
Al ₂ O ₃	0,90	0,90	0,89	1,03	0,41	1,13	1,34	2,37	0,81	2,73	0,72
SiO ₂	4,64	0,50	10,01	1,35	1,44	8,55	8,82	13,43	6,30	4,20	0,79
MnO	2,11	0,52	0,10	0,05	0,04	0,02	0,02	1,06	0,12	0,07	0,28
Na ₂ O	0,013	0,011	0,006	0,005	0,011	0,017	0,024	0,026	0,013	0,034	0,007
K ₂ O	0,300	0,007	0,012	0,011	0,015	0,023	0,032	0,027	0,010	0,016	0,010
Pb	0,006	0,014	0,015	0,006	0,005	0,007	0,008	0,055	0,012	0,013	0,016
Zn	0,005	0,007	0,011	0,004	0,003	0,004	0,009	0,010	0,004	0,005	0,011
S	0,012	0,011	0,005	0,025	0,005	0,004	0,004	0,007	0,006	0,016	0,005
P ₂ O ₅	0,057	0,160	0,087	0,069	0,057	0,057	0,057	0,064	0,149	0,137	0,085
P.C.	10,16	6,18	2,40	4,75	1,54	1,02	1,42	3,60	4,18	4,10	2,18

P.C. = Pérdidas por calcinación.

Tabla II. Análisis químico de fundentes, % en masa

Table II. Chemical analysis of fluxes, % mass

	Caliza	Olivino	Dunita
Fe total	0,13	5,23	5,83
Fe ⁺⁺	0,04	4,85	2,70
CaO	54,44	0,07	2,32
MgO	0,51	49,80	35,51
Al ₂ O ₃	0,19	0,35	2,82
SiO ₂	0,42	39,34	39,92
MnO	0,02	0,09	0,12
Na ₂ O	0,018	0,040	0,174
K ₂ O	0,025	0,012	0,046
Pb	0,006	0,010	0,003
Zn	0,004	0,006	0,005
S	0,010	0,020	0,030
P ₂ O ₅	0,057	0,046	0,057
P.C.	44,97	2,40	8,27

P.C. = Pérdidas por calcinación.

El coque es el mejor combustible usado en el proceso de sinterización. La clasificación de tamaño físico es una característica muy importante y en el trabajo realizado en el IRSID^[3] y en otros centros^[4] se ha establecido que el coque deberá tener un tamaño inferior a 3 mm para un máximo de economía y eficiencia de utilización. Esta fracción inferior a 3 mm se denomina finos de coque. En Japón se han realizado estudios que indican que la fracción entre

3 mm y 0,25 mm se considera como óptima para la productividad^[5] y reductibilidad^[6] del sinter. En otro estudio^[7] se ha establecido que la fracción de coque inferior a 0,25 mm tiene una influencia perjudicial sobre la productividad pero no afecta a la eficiencia del proceso de combustión del coque.

2.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se ha realizado en un equipo ROT-TAP que combina el tamizado por desplazamiento de rotación excéntrica de vaivén con un sistema de percusión sobre la columna de tamices. Los resultados se recogen en la tabla III.

Algunos minerales tienen un tamaño medio superior a 2 mm, lo cual es beneficioso para una buena permeabilidad de la mezcla del mineral resultante.

En la figura 1 se representa la curva granulométrica del mineral San Isidro, elegido al azar como referencia y será el más citado a lo largo del trabajo.

2.3. Humedad, densidad y porosidad

En la tabla IV se ofrecen los valores de la humedad, densidad y porosidad. En los minerales de hierro se puede observar que existen variaciones importantes en la humedad (2,55-14,28), porosidad (2,3-22,3) y densidad (4,0-5,1). El mineral Andaluza es

Tabla III. Análisis granulométrico de minerales de hierro, fundentes y coque, % en masa

Table III. Granulometric analysis of iron ores, fluxes and coke, % mass

	Fracción , mm										Tamaño medio
	> 10	10,0 – 5,61	5,61 – 3,33	3,33 – 2,00	2,00 – 1,00	1,00 – 0,50	0,50 – 0,21	0,21 – 0,10	0,10 – 0,07	< 0,07	
Andaluza	0,54	9,56	12,14	10,44	12,55	18,54	18,56	7,21	4,17	6,29	2,04
CVRD-Carajas	1,64	11,14	17,79	12,28	12,98	9,95	13,79	8,48	3,08	8,87	2,53
CVRD-Tubarao	-	2,56	10,81	10,37	13,88	10,96	14,01	11,60	2,44	23,37	1,33
San Isidro	5,69	8,75	6,81	5,92	11,69	10,35	19,39	11,85	4,44	15,11	2,20
Mount Wright	-	-	-	0,06	3,21	18,46	43,21	24,69	5,32	5,05	0,39
SNIM-Tazadit	4,02	11,82	9,53	8,53	13,99	7,52	14,82	10,52	3,88	15,37	2,42
SNIM-Normal	8,17	8,50	7,78	6,93	10,70	11,91	21,31	14,19	3,11	7,40	2,47
Goa Silicioso	-	5,08	4,51	4,53	6,29	9,07	20,13	23,96	2,85	23,58	1,00
Nimco	6,85	9,76	8,36	7,06	9,78	9,99	20,08	17,21	3,15	7,76	2,50
Hamersley	0,34	6,58	18,91	14,80	17,09	14,48	12,28	4,83	1,25	9,44	2,22
MBR Brasil	-	6,03	17,01	15,22	15,88	9,48	8,99	5,97	1,66	19,76	1,96
Caliza	-	0,99	7,51	17,48	24,73	16,48	13,40	6,13	2,26	11,02	1,44
Dunita	-	-	9,20	28,52	23,11	11,69	9,87	5,91	2,24	9,44	1,66
Olivino	-	-	0,10	0,07	6,00	8,99	37,42	29,73	1,21	16,48	0,35
Coque	1,88	4,97	16,26	15,95	15,66	11,51	14,62	9,07	0,04	10,04	2,17

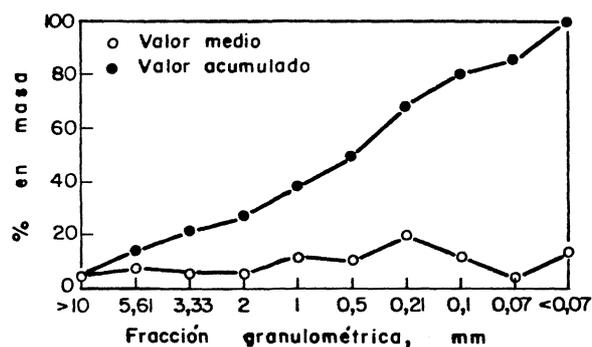


Figura 1. Curva granulométrica del mineral de San Isidro.

Figure 1. Granulometric curve of San Isidro ore.

el que presenta mayor humedad siendo también el más poroso.

2.4. Reducibilidad

El ensayo de reductibilidad se ha realizado siguiendo la Norma ISO para sinterizados^[8], adaptada para los minerales de hierro con muestras de la fracción 3,3-2,0 mm. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla V.

El comportamiento de los minerales es en general bueno, con velocidades altas de reducción, destacando el mineral Andaluza, que presenta los valores más altos, tanto en velocidad como en la reducción total al final del ensayo.

En la figura 2 se representa la curva de reductibilidad del mineral San Isidro.

2.5. Difracción de rayos X

Se han estudiado muestras de minerales de hierro y fundentes en un equipo de análisis por difracción de rayos X Philips modelo PW1010. Se han identificado las fases cristalinas que se indican en la tabla VI.

Tabla IV. Humedad, densidad y porosidad de minerales de hierro, fundentes y coque

Table IV. Moisture, density and porosity of iron ores, fluxes and coke

	Humedad, %	Densidad real, g/cc	Densidad aparente, g/cc	Porosidad %
Andaluza	14,28	4,0	2,8	29,7
CVRD-Carajas	5,59	4,8	4,0	16,2
CVRD-Tubarao	5,34	4,8	4,6	5,0
San Isidro	7,35	4,6	3,6	22,3
Mount Wright	2,55	5,0	4,5	10,9
SNIM-Tazadit	5,46	4,6	4,4	2,6
SNIM-Normal	5,38	4,7	3,8	19,6
Goa Silicioso	7,28	4,2	3,4	20,0
Nimco	5,61	4,7	3,8	19,1
Hamersley	6,89	4,5	4,1	8,9
MBR Brasil	6,61	5,1	4,8	5,9
Caliza	1,24	2,7	2,2	5,9
Dunita	1,10	2,9	2,7	4,2
Olivino	0,13	3,3	3,0	8,8
Coque	2,12	1,9	1,1	40,1

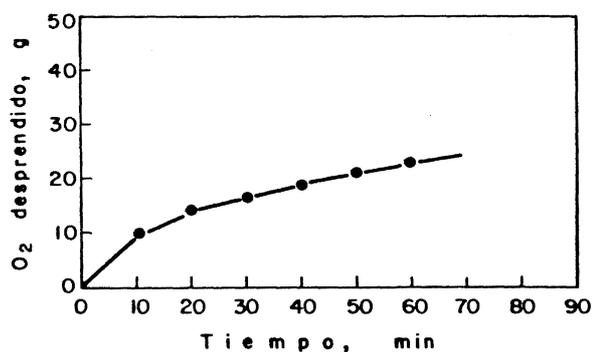


Figura 2. Curva de reductibilidad del mineral de San Isidro.

Figure 2. Reductibility curve of San Isidro ore.

Tabla V. Reducibilidad de minerales de hierro

Table V. Reductibility of iron ores

	Velocidad de reducción, (dR/dt) ₄₀	Reducción, R ₆₀ (%)	Reducción final. Ensayo (%)	Reducción final. Análisis (%)	Metalización (%)
Andaluza	1,50	76,97	78,45	88,46	82,91
CVRD-Carajas	0,58	51,55	59,20	70,05	58,12
CVRD-Tubarao	0,60	49,65	56,72	53,44	32,22
San Isidro	0,64	58,49	60,88	73,37	62,50
SNIM-Tazadit	0,96	65,77	67,86	73,25	62,49
Goa Silicioso	0,40	40,80	60,02	50,76	32,22
Nimco	0,58	51,25	60,58	67,04	54,22
Hamersley	0,77	59,38	66,10	76,22	65,71
MBR Brasil	0,43	42,60	48,00	52,73	34,47

Tabla VI. Difracción de rayos X de minerales de hierro y fundentes

Table VI. X-ray diffraction of iron ores and fluxes

Mineral	Fase	Mineral	Fase
Andaluza	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Goa silicioso	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
	$\alpha\text{-FeO(OH)}$		$\alpha\text{-FeO(OH)}$
	$\alpha\text{-SiO}_2$		$\alpha\text{-SiO}_2$
	CaCO_3		Fe_3O_4 (trazas)
CVRD-Carajas	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Nimco	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
	$\alpha\text{-FeO(OH)}$		$\alpha\text{-FeO(OH)}$
			$\alpha\text{-SiO}_2$
			Fe_3O_4
CVRD-Tubarao	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hamersley	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
	$\alpha\text{-SiO}_2$		$\alpha\text{-FeO(OH)}$
San Isidro	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	MBR Brasil	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
	$\alpha\text{-FeO(OH)}$		
Mount Wright	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Dunita	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	$\alpha\text{-SiO}_2$		$(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$
			MgSiO_3
SNIM-Tazadit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Olivino	$(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$
	$\alpha\text{-SiO}_2$		MgSiO_3
SNIM-Normal	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$		
	$\alpha\text{-SiO}_2$		

La especie química que encabeza cada columna es la detectada en mayor cantidad, siguiendo las demás, en orden decreciente, según una estimación cuantitativa en función de la intensidad de cada pico en el difractograma. Se puede observar que todos los minerales de hierro son de naturaleza hematítica.

3. GRANULACIÓN

Los primeros trabajos sobre la estructura de las mezclas minerales granuladas se realizaron por investigadores de la Nippon Steel Corporation (NSC) y fue definido el término de cuasipartícula^[9-11].

La cuasipartícula está formada por un núcleo de hematita, que durante la sinterización permanece sin fundir, rodeado por granos más finos de mineral con ganga de sílice y en presencia de una basicidad (CaO/SiO_2) alta. Las partículas mayores de 0,7 mm actúan como núcleos y las partículas inferiores a 0,2 mm actúan como finos adherentes. Las partículas intermedias son difíciles de granular y no tienen un papel bien definido. Al aumentar el contenido de agua que se añade a la mezcla mineral durante la granulación, las partículas intermedias se adhieren a los núcleos más gruesos pero se sueltan en el secado^[12].

La capa adherente al núcleo, durante la sinterización, experimenta la formación de ferritos por reacción sólido-líquido entre la hematita y un fundido de $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$ que contiene pequeñas cantidades de SiO_2 y Al_2O_3 . Se considera como estructura óptima para la reductibilidad del sinterizado aquella formada por un núcleo de hematita rodeado de ferrito acicular. Esta estructura se puede conseguir con una granulación adecuada de la mezcla mineral y realizando la sinterización a temperatura inferior a 1.300 °C para que el núcleo de la cuasipartícula no experimente fusión. Esta reacción será explicada en el próximo apartado.

En unas investigaciones realizadas se observa que hay dependencia entre la humedad y un intervalo de tamaños de partículas intermedias, en el cual las partículas del mismo tamaño pueden actuar como finos adherentes o como núcleos^[13 y 14]. La cantidad de material en este intervalo, entre 0,2 y 0,7 mm, deberá ser mínima debido a que afecta a la permeabilidad de las mezclas de dos maneras: a) como núcleos, estas partículas disminuyen el tamaño de las cuasipartículas y por tanto disminuyen la permeabilidad del lecho, y b) como finos adherentes están poco enlazadas y se separan con facilidad de las partículas secas.

Los tres factores que controlan la extensión de la capa de finos adheridos sobre un núcleo son la estructura del núcleo (superficie, porosidad), el contenido de humedad y la cantidad de finos presentes^[12]. Las partículas de forma irregular tales como los finos de retorno, coque y mineral goethítico serán buenos núcleos, mientras que las superficies regulares y suaves de caliza y hematita densa, no lo son.

La adherencia está muy influida por la humedad disponible para la granulación^[13 y 14]. Otros factores, tales como la naturaleza del núcleo, forma de la partícula y las propiedades de superficie son de importancia secundaria.

3.1. Estructura óptima del sinterizado

Una disposición favorable de la mezcla mineral que se va a sinterizar, la cual se consigue con una granulación adecuada, es la formada por las cuasipartículas que consisten en un núcleo mineral, preferentemente de hematita, con temperatura de fusión elevada, rodeado de partículas minerales más finas, que conviene que tengan una temperatura de reblandecimiento baja^[9-11].

Cuando la sinterización se realiza a temperatura inferior a 1.300 °C, en el lecho de las cuasipartículas

se genera, a unos 1.200 °C, un fundido (que consiste principalmente en Fe_2O_3 y CaO), el óxido de hierro y las partículas minerales finas se asimilan en el fundido. Si el fundido penetra en los granos de hematita del núcleo, se produce una rotura interfacial quedando una hematita primaria (sin fundir) que se considera beneficiosa para el sinterizado porque mejora el índice de reductibilidad (*RI*). Cuando el CaO y el Al_2O_3 se asimilan en el fundido, éste reacciona con el óxido de hierro y genera ferrito cálcico acicular (de tamaño inferior a 10 μm) conteniendo Al_2O_3 y SiO_2 como disoluciones sólidas. Estos silicoferritos de calcio y aluminio (SFCA) se consideran componentes muy beneficiosos en la estructura del sinterizado puesto que poseen buena reductibilidad y aportan resistencia mecánica al sinterizado mejorando el índice *shatter* (*SI*). Al sinterizar a baja temperatura disminuye la formación de magnetita (menor FeO) y el sinterizado mejora el *RI* y el índice de la degradación con la reducción (*RDI*)^[15-17].

Al sinterizar a baja temperatura se consigue una estructura óptima para la reductibilidad del sinterizado en el horno alto, que es la formada por un núcleo de hematita (sin fundir) rodeado de ferrito acicular. Sin embargo, esta estructura presenta la desventaja de una menor resistencia, por lo cual es aconsejable añadir a la mezcla mineral materiales que aporten SiO_2 para aumentar la resistencia^[15-16 y 18-19].

Cuando se sinteriza a temperatura superior a 1.300 °C, parte del ferrito se disuelve y funde para convertirse en hematita o magnetita y en componentes de ganga^[20-22]. Al enfriarse el fundido se forman, como fases nuevas, grandes cristales de ferrito, que se reducen peor que el ferrito acicular, y hematita romboédrica o hematita secundaria que es perjudicial para el *RDI*^[15].

En la figura 3 se ofrece un esquema del desarrollo de las diferentes estructuras en función de la temperatura máxima alcanzada en el lecho. El perfil de temperatura en una zona del lecho refleja una serie de cambios químicos y físicos que tienen lugar, tales como la evaporación, calcinación y fusión parcial. El calor total disponible en una zona depende de la transferencia de calor de los gases, consumo de coque y de las reacciones exotérmicas/endotérmicas. La temperatura máxima alcanzada depende principalmente de la cantidad, localización y combustibilidad del combustible.

En la tabla VII, establecida a partir de los datos obtenidos de la bibliografía, se puede apreciar cómo varía la composición de las fases y los índices de calidad del sinterizado en función de la temperatu-

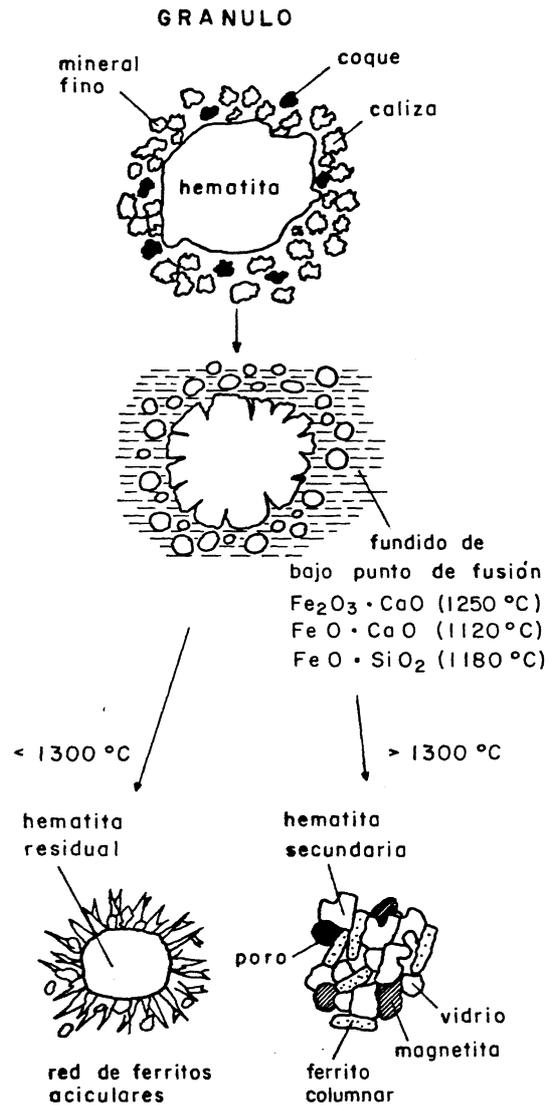


Figura 3. Desarrollo de la estructura del sinterizado.

Figure 3. Development of sintering texture.

ra máxima alcanzada en el lecho. Se observa que los mejores resultados se obtienen en el intervalo de 1.225-1.275 °C, con un porcentaje máximo de ferritos, alto de hematita primaria, bajo de hematita secundaria, buena porosidad y buenos índices de calidad (FeO , *RDI*, *RI* y *SI*).

3.2. Ensayo de aptitud a la granulación SAFE

El ensayo de aptitud a la granulación de un mineral y de una mezcla de minerales se ha realizado en el CENIM siguiendo la Norma establecida por el Centro Sviluppo Materiali (CSM) italiano, denominada SAFE (Size Analysis on Frozen Elements)^[25].

La mezcla mineral se somete a una granulación previa a la sinterización para incrementar el tamaño medio de los minerales con granulometría muy fina, tratando de mejorar el comportamiento

Tabla VII. Valores aproximados de la composición de las fases y calidad de los sinterizados en función de la temperatura máxima del lecho, %

Table VII. Approximate values of phases composition and sinterings quality versus maximum temperature in the bed, %

	T _{máx.} , °C			Referencias
	1.175-1.225	1.225-1.275	1.275-1.350	
Hematita primaria	50	42	22	16, 17, 24
Hematita secundaria	5	5	20	16, 17, 24
Magnetita	10	15	20	16
SFCA	35	38	30	15, 16, 17, 24
Vidrio+2CaO·SiO ₂	7	10	12	16, 17, 24
Porosidad	35	30	15	17, 24
FeO	3	4	5,5	15, 16, 18, 23
RDI	30	32	36	15, 16
RI	72	70	64	15, 16, 17, 19, 24
SI	93	94	95	16

Datos de planta de sinterización: 15, 16, 18, 19, 23.

Datos de laboratorio: 15, 17, 18, 24.

Datos de un modelo de simulación: 19.

dinámico durante la sinterización. Se trata de conseguir que las partículas finas se adhieran unas a otras y formen partículas más gruesas. De este modo, el mineral granulado contiene un rango reducido en la distribución del tamaño de partículas, y como resultado ofrecerá una resistencia menor al paso de los gases, es decir, mejora la permeabilidad y con ello la productividad de la planta.

Con el ensayo SAFE se determina el poder aglomerante de un mineral, que es distinto de un mineral a otro, y depende de la composición química, granulometría y contenido de humedad. En el proceso de aglomeración al que se someten los minerales y/o sus mezclas antes de sinterizar es muy difícil de comprobar el estado de granulometría alcanzado.

Generalmente, los gránulos se forman por adhesión de las partículas finas entre sí o con granos gruesos, pero la solidez de esta unión es muy poco consistente, ya que sólo alcanza para asegurar que la mezcla granulada pueda ser transportada y colocada en la parrilla de la máquina de sinterización sin romperse. Por tanto, resulta muy difícil medir directamente el estado de granulación alcanzado, sobre todo al considerar que el sistema de cribado utilizado habitualmente conduce siempre a una rotura de los gránulos.

3.2.1. Descripción del ensayo SAFE

El ensayo SAFE permite conocer el estado granulométrico y el fin de la granulación de un mineral o

mezcla de minerales, al efectuarse sobre gránulos consolidados mediante congelación, determinando la distribución del tamaño por medio de un procedimiento de cribado normal de laboratorio.

Para realizar el ensayo se coloca 1 kg de mezcla mineral en una bandeja metálica, en el interior de un congelador a una temperatura inferior a -20 °C, durante 90 min.

El agua de humidificación de los gránulos se solidifica, dotándolos de la solidez necesaria para poder ser cribados en un equipo de tamizado a 3.000 vibraciones/min durante 10 min, manteniendo la torre de tamices a baja temperatura por medio de hielo empaquetado entre la doble pared de un contenedor metálico, lo que permite determinar la distribución del tamaño de los gránulos, pasando por separado las fracciones retenidas en los tamices.

Al final del ensayo es posible evaluar:

- La relación entre la granulometría del granulado y la permeabilidad frente a los gases.
- La transformación de la fracción granulométrica simple, como resultado de los cambios en la granulación o en las especificaciones de la mezcla inicial.
- La distribución de los componentes de una mezcla.

Esta información se utiliza para conocer cómo varían la permeabilidad y productividad de la mezcla y, por tanto, poder modificarse de acuerdo con la composición de la mezcla. También es posible

conocer la distribución de los finos de coque en las distintas fracciones granulométricas.

3.2.2. Aplicación del ensayo SAFE a los minerales unitarios

En el CENIM se ha realizado el ensayo SAFE a una serie de minerales utilizados en un amplio trabajo sobre la "Racionalización de mezclas de minerales de hierro para la obtención de sinterizados de óptima calidad"^[26]. En la tabla VIII se comparan las granulometrías inicial y SAFE de cada uno de los minerales, y en la figura 4 se representa la aptitud a la granulación del mineral San Isidro.

Los minerales presentan una buena aptitud a la granulación excepto el mineral Nimco que sólo aumenta su tamaño medio de 2,50 a 2,77 mm. El mineral Goa silicioso tiene una gran aptitud aumentando su tamaño medio de 1,00 a 3,44, mientras que el mineral Andaluza lo hace de 2,04 mm a 3,87 mm. Esto hace que los minerales Goa silicioso y Andaluza sean componentes importantes de la mezcla mineral, ya que su aportación contribuye a una mejor permeabilidad de la misma en

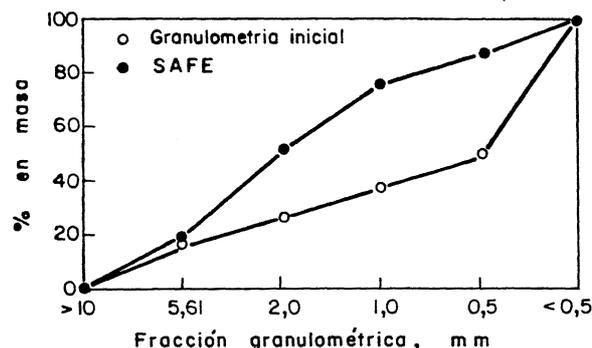


Figura 4. Aptitud a la granulación del mineral San Isidro.

Figure 4. Granulation fitness of San Isidro ore.

el lecho de sinterización, y como consecuencia a una mayor productividad.

La elección adecuada de los minerales tendrá una influencia directa sobre la calidad del sinterizado fabricado y, posteriormente, sobre la buena marcha del horno alto y la producción de arrabio^[27-30].

3.3. Granulación selectiva

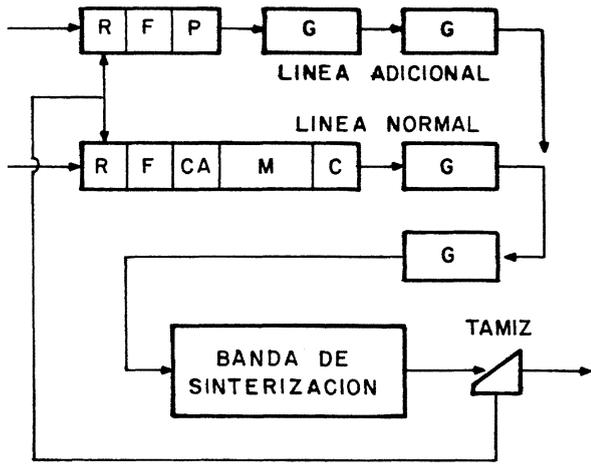
Para mejorar la permeabilidad de las mezclas minerales a sinterizar con contenidos elevados de finos,

Tabla VIII. Ensayo SAFE de minerales, % en masa

Table VIII. SAFE test of ores, % mass

Mineral	Granulometría	Fracción, mm						TM, mm
		> 10,0	10,0-5,6	5,6-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	< 0,5	
Andaluza	Inicial	0	10,10	22,58	12,55	18,54	36,23	2,04
	SAFE	0	28,85	42,04	21,84	5,65	1,62	3,87
CVRD-Carajas	Inicial	0	12,78	30,07	12,98	9,95	34,22	2,53
	SAFE	0	13,00	54,77	18,20	12,91	1,12	3,25
CVRD-Tubarao	Inicial	0	2,56	21,18	13,88	10,96	51,42	1,36
	SAFE	0	8,17	35,98	22,31	15,99	17,55	2,37
San Isidro	Inicial	0	14,44	12,73	11,69	10,35	50,79	2,20
	SAFE	0	17,45	32,18	24,87	13,03	12,47	2,83
Mount Wright	Inicial	0	0	0,06	3,21	18,46	78,28	0,39
	SAFE	0	0	1,26	18,23	47,86	32,65	0,75
SNIM-Tazadit	Inicial	4,02	11,82	18,06	13,99	7,52	44,59	2,42
	SAFE	0	19,98	45,27	17,44	10,91	6,40	3,33
SNIM-Normal	Inicial	8,17	8,50	14,71	10,70	11,91	38,61	2,81
	SAFE	0	37,26	28,43	15,39	12,19	6,74	3,93
Goa Silicioso	Inicial	0	5,80	9,04	6,29	9,07	70,52	1,00
	SAFE	0	29,04	25,20	27,08	15,13	3,55	3,44
Nimco	Inicial	0	16,61	15,42	9,78	9,99	48,20	2,50
	SAFE	0	19,00	28,49	17,97	21,23	13,31	2,77
Hamersley	Inicial	0	6,92	33,71	17,09	14,48	27,80	2,22
	SAFE	0	15,63	50,75	20,72	9,62	3,28	3,33
MBR Brasil	Inicial	0	6,03	32,23	15,88	9,48	36,38	1,98
	SAFE	0	4,03	54,89	21,41	15,34	4,33	2,67

TM = Tamaño medio.



M = mezcla mineral. C = coque. CA = caliza.
 F = CaO. P = pellet. R = finos de retorno.
 G = granulador

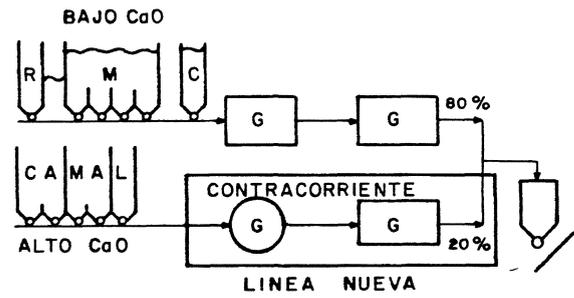
Figura 5. Diagrama de la planta de granulación selectiva de NKK.

Figure 5. Outline of NKK's selective granulation plant.

varias plantas japonesas han investigado el proceso de granulación selectiva o preaglomeración. En la mayoría de los casos el proceso ha implicado el tratar los finos minerales y concentrados, algunos finos de retorno y la cal separadamente usando una línea de proceso adicional. Estos materiales se mezclan con agua y se micropelletizan en un tambor o en un disco. El producto se introduce luego en el circuito de granulación principal, antes del tambor de granulación.

Este sistema ha sido instalado en la planta de sinterización núm. 4 de Nippon Kokan Keihin (NKK) en Fukuyama^[31]. En este proceso, que se muestra en la figura 5, los finos de retorno se usan como núcleo, y la cal actúa como agente aglomerante. Esta práctica permite el empleo de una mayor cantidad de finos sin pérdida de productividad.

Sumitomo en la planta de sinterización núm. 2 de Kashima, ha desarrollado la granulación selectiva como un medio de mejorar (disminuir) el índice RDI^[32]. Se ha establecido que el índice RDI alcanza su valor máximo para un contenido del 10 % de CaO en el sinterizado, y que este valor disminuye para contenidos de CaO mayores y menores del 10 %. En la granulación selectiva se procesan dos gruesos separados de minerales para producir gránulos con bajo y alto contenido de CaO, como se indica en la figura 6. Se utilizan minerales australianos para los gránulos con un contenido elevado de CaO. Los dos tipos de gránulos se combinan en una cinta transportadora antes de la tolva sobre el rodillo de dosificación.



M = mezcla mineral. C = coque. CA = caliza.
 R = finos de retorno. MA = mineral australiano.
 L = cascarilla de laminación. G = granulador.

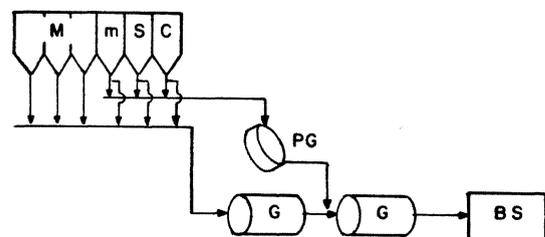
Figura 6. Diagrama de la planta de granulación selectiva de Sumitomo.

Figure 6. Outline of Sumitomo's selective granulation plant.

Nippon Steel Corporation (NSC), en la planta de sinterización de Oita, utiliza la granulación selectiva para aumentar el contenido de mineral goethítico en la mezcla mineral^[33]. El mineral se granula en un disco con la adición de serpentina y una pequeña cantidad de finos de coque, como se puede apreciar en la figura 7. El recubrimiento del mineral limonítico con los finos de serpentina protege al mineral y evita la reacción con el fundido que le rodea (asimilación), permitiendo un aumento de la densidad del gránulo a unos 1.300 °C.

4. CONCLUSIONES

La granulación de una mezcla mineral es una etapa muy importante en la sinterización de minerales de hierro para obtener una estructura óptima de sinterizado. El comportamiento de la aptitud a la granulación de una mezcla mineral se puede conocer mediante el ensayo SAFE. Estas conclusiones se dan más ampliadas en la II parte de este trabajo.



M = mezcla mineral. C = coque. m = mineral goethítico.
 S = serpentina. PG = pregranulador. G = granulador.
 BS = banda de sinterización

Figura 7. Diagrama de la planta de granulación selectiva de NSC.

Figure 7. Outline of NSC's selective granulation plant.

REFERENCIAS

- [1] F. CAPPEL, Ironmaking Conf. ISS, 410 Commonwealth Dr., Warrendale, PA, 15086 (EE.UU.) 50, 1991, pp. 525-539.
- [2] C.E. LOO, 57th Ironmaking Conf. Proc. Toronto (Canadá), 1998, pp. 1.299-1.316.
- [3] M. BOUCRAUT y R. ROCHAS, *Rev. Metal. CIT*, 65 (1968) 835-844.
- [4] A. SHIGEMA, *Yawata Tech. Rep.* n° 264, Sep. 1968.
- [5] T. KODAMA, F. ARTANI y T. TANAKA, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 22 (1982) B-296.
- [6] H. TODA, S. SASAKI, N. NOSAKA, S. ISOZAKI y K. KATO, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 22 (1982) B-297.
- [7] C.E. LOO, *Ironmaking Steelmaking* 18 (1991) 33-40.
- [8] *A new method for measuring tie reductibility (isothermal reactivity) of natural and processed iron ores. Fifth Draft.* ISO, Proposal, ISO/TC 102/SC 3/284 E, 1974.
- [9] T. FUORI, K. SUGAWARA, M. KAGAWA, S. UNO, M. KAMAZU, T. FUJIWARA y A. SAWAMURA, *Nippon Steel Tech. Rep. Overseas* 10 (1997) 36-46.
- [10] Y. HIDA, M. SASAKI, K. SATO, M. KAGAWA, T. MIYAZAKI, H. SOMA, H. NAITO y M. TANIGUCHI, *Nippon Steel Tech. Rep. Overseas* 35 (1987) 59-67.
- [11] S. WU, E. KASAI e Y. OMORI, *Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong. Nagoya (Japón)*, Iron and Steel Inst. of Japan, 1990, pp. 15-22.
- [12] P.W. ROLLER y B.A. FIRTH, *BHP Tech. Bull.* 25 (1981) 79-84.
- [13] J.D. LITSTER y A.G. WATERS, *Powder Technol.* 55 (1988) 141-151.
- [14] J.D. LITSTER, A.G. WATERS y S.K. NICOL, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 26 (1986) 1.036-1.044.
- [15] Y. ISHIKAWA, Y. SHIMOMURA, M. SASAKI, Y. HIDA y H. TODA, Ironmaking Conf. ISS, 410 Commonwealth Dr., Warrendale, PA, 15086 (EE.UU.) 42, 1983, pp.17-29.
- [16] H. TODA, T. SENZAKI, S. ISOZAKI y K. KATO, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 24 (1984) 187-196.
- [17] P.R. DAWSON, *Proc 4th Int. Symp. on Agglomeration.* Ed. C.E. Capes. Iron and Steel Society of AIME. Warrendale, PA (EE.UU.), 1985, pp. 243-250.
- [18] Y. ISHIKAWA, M. KASE, M. SASAKI, K. SATOH y S. SASAKI, *Ironmaking Proc. AIME*, 41, 1982, pp. 80-89.
- [19] H. TODA y K. KATO, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 24 (1984) 178-186.
- [20] F. MATSUNO y T. HARADA, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 21 (1981) 318-325.
- [21] Li.-H. HSIEH y J.A. WHITEMAN, *ISIJ Int.* 29 (1989) 625-634.
- [22] Li.-H. HSIEH y J.A. WHITEMAN, *ISIJ Int.* 29 (1989) 24-32.
- [23] S. YASUMOTO y S. TANAKA, *Kawasaki Steel Tech. Rep.* 5 (1982) 1-8.
- [24] P.R. DAWSON, J. OSTWALD y K.M. HAYES, *Proc. Australasian Inst. Min. Metall.* 289 (1984) 163-169.
- [25] *A new method for evaluating the particle material granulation.* Rep. Centro Sviluppo Materiali, No. 652 V. 3th Int. Symp. on Agglomeration, Norimberga, 6-8 mayo 1991.
- [26] A. MORO, Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad de Oviedo. 1995.
- [27] A. BABICH, S. YAROSHEVSKII, L. GARCÍA, A. FORMOSO, A. CORES, A. ISIDRO y S. FERREIRA, *Rev. Metal. Madrid* 32 (1996) 103-116.
- [28] L. GARCÍA, A. CORES, A. FORMOSO y A. BABICH, *Rev. Metal. Madrid* 33 (1997) 403-415.
- [29] L. GARCÍA, A. CORES, A. FORMOSO, A. BABICH y S. YAROSHEVSKII, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 51-59.
- [30] A. FORMOSO, A. BABICH, H.W. GUDENAU, L. GARCÍA y A. CORES, *ISIJ Int.* 39 (1999) 1.134-1.139.
- [31] S. KUROSAWA, H. FUKUYO, O. KOMATSU, N. SAKAMOTO y J. YAMAOKA, Ironmaking Conf. ISS. 410 Commonwealth Dr., Warrendale, PA, 15086 (EE.UU.) 48, 1989, pp. 451-458.
- [32] T. KAWAGUCHI, K. KURIYAMA, T. SATO, K. TAKATA y T. MIYAKE, *Proc 6th Int. Iron and Steel Cong. Nagoya (Japón)*. Iron and Steel Inst. of Japan, 1990, pp. 40-47.
- [33] Y. HIDA, J. OKAZAKI y K. NAKAMURA, *Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong. Nagoya (Japón)*. Iron and Steel Inst. of Japan, 1990, pp. 48-55.