

# Estudio de las cualidades de pellets preparados de concentrados de magnetita de Marcona

CLAUDIO ALVAREZ SAENZ \*

## INTRODUCCION

El presente trabajo tiene por objeto exponer como se realiza el control de las cualidades físicas y químicas de los pellets preparados de concentrados de magnetita de Marcona, basado en el estudio de la microestructura de los pellets producidos en la Planta de Peletización de San Nicolás, de la Compañía Marcona Mining Co., y de los resultados obtenidos en la pruebas de peletización, que se llevaron a cabo durante los primeros meses de 1964, en el Laboratorio metalúrgico de San Nicolás.

Con la finalidad de aumentar las reservas de mineral de hierro económicamente comerciables, e incrementar en forma creciente la explotación de las reservas básicas de Marcona constituidas por minerales primarios, es decir magnetitas criptocristalinas de relativa baja ley y alto contenido de azufre, la Compañía Marcona Mining Co. llevó a cabo la construcción de una planta de peletización, capaz de producir 1,000,000 de toneladas largas de pellets al año, que empezó a operar en julio de 1963 como etapa ulterior del programa de expansión y modernización iniciado en 1960 en la bahía de San Nicolás, cuya primera etapa fué la erección de las plantas de beneficio y la instalación del puerto.

Actualmente ha quedado demostrado por la experiencia, que los pellets de menas de hierro, constituyen la materia prima más satisfactoria para la alimentación en los altos hornos, cuyas características funda-

mentales comparadas con las menas de hierro, sintetizadas son:

El contenido de Fe es mayor de 62%  
Tamaño y composición química uniforme  
Mayor grado de reducibilidad.

El mejoramiento de las cualidades de los pellets de mena de hierro, ha sido en esta última década, uno de los aspectos más importantes en la producción de pellets en gran escala, y se está logrando a través de trabajos de investigación, con la finalidad de obtener un producto de gran calidad en condiciones óptimas de operación y con rendimiento económico.

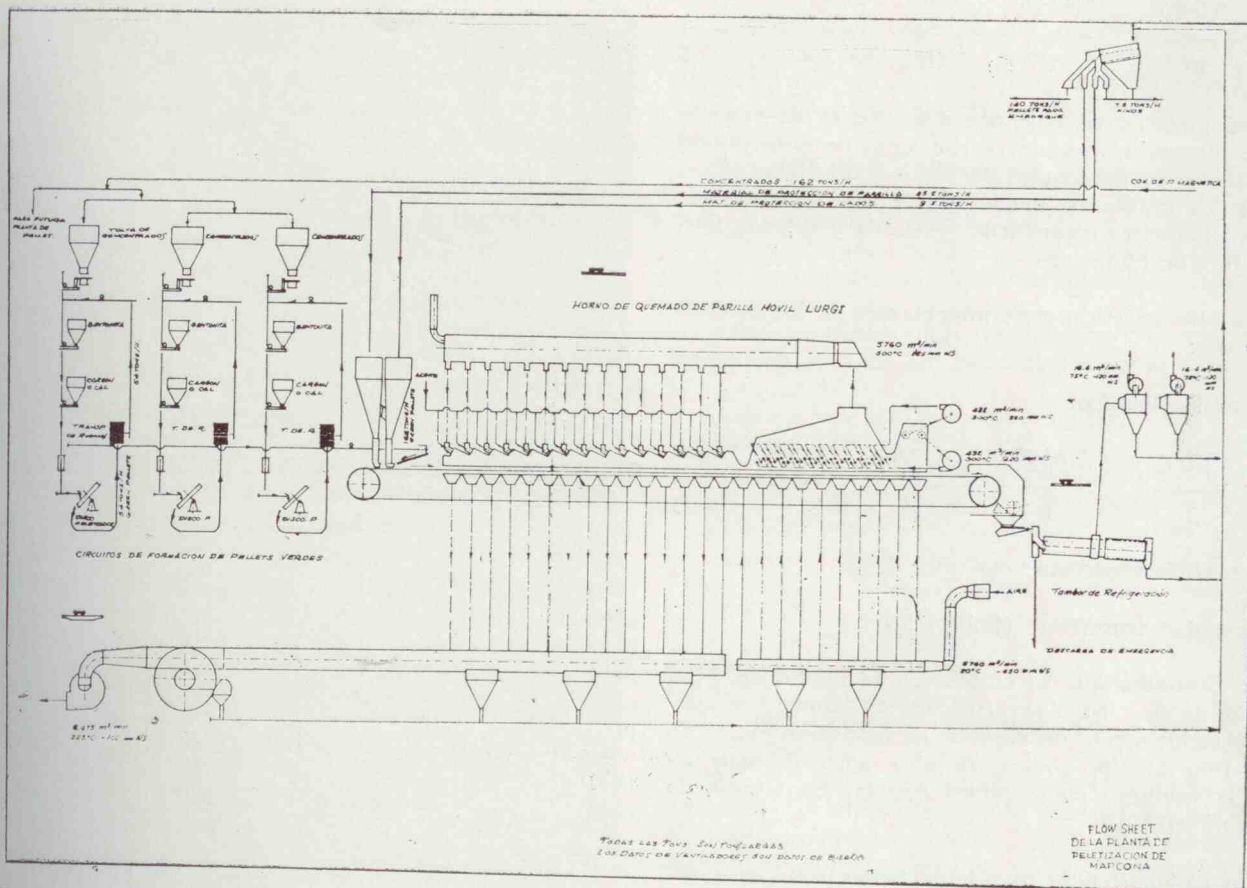
Estas razones decidieron al autor efectuar el presente estudio preliminar, con miras a llevar a cabo un estudio más amplio en el futuro.

## SINTESIS

En la primera parte del presente estudio se considera una exposición general de los materiales empleados en la producción de pellets, las operaciones y procesos que se llevan a cabo en la Planta de Paletización de San Nicolás para el tratamiento de los concentrados de magnetita, y las pruebas de control de calidad para la determinación y evaluación del producto.

En la segunda parte se ha discutido desde un punto de vista general, el estudio de los factores que afec-

\* La mejor tesis de Bachiller del Dpto. de Metalurgia del año 1965.



tan la calidad de los pellets quemados, tales como: formación y manipulación de pellets verdes, secado de los pellets, precalentamiento de los pellets y quemado. Además se incluye en esta parte aspectos sobre la teoría de las transformaciones que ocurren durante el quemado de los pellets.

En la tercera parte se presentan las pruebas experimentales comparativas de peletización, así como el estudio bajo el microscopio, de las microestructuras de secciones pulidas de pellets quemados. Este último constituyó una valiosa ayuda en la interpretación de los fenómenos que imparten resistencia a los pellets y en la evaluación de la calidad del producto.

## PRIMERA PARTE

### PALETIZACION DE MENAS DE FIERRO

La paletización es un método de aglomeración por el cual los materiales de gran finura se someten a rotamiento en un tambor rotatorio o en un disco rotatorio inclinado, donde las partículas del material se adhieren entre sí, formando pequeños pellets esféricos que posteriormente son tratados térmicamente.

Para la paletización de menas de hierro, generalmente se emplea concentrados finos de 70% — 325 mallas, humedecidos con agua para formar los pellets "verdes" o "green balls" que son secados y finalmente endurecidos por calentamiento a temperaturas superiores a 1100°C. en un horno de cuba o un horno de pa-

rilla móvil. En algunos casos la resistencia de los pellets es incrementada por la adición de un aglutinante, tal como la bentonita; además se emplean otros aditivos tales como: cal dolomita o carbón que dan lugar a los pellets autofundentes y pellets semireducidos respectivamente.

En esta parte nos ocuparemos específicamente de la peletización de concentrados de magnetita en la planta de San Nicolás, estudiando los materiales empleados, la tecnología y el control de calidad del producto.

### MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales usados en la producción de pellets están constituidos por:

Las magnetitas de las minas de Marcona, que constituye el mineral primario de relativa baja ley y  
Las bentonitas provenientes de Tumbes.

Las menas de hierro magnéticas están formadas por magnetitas criptocristalinas, poco compacta asociada con ganga de cuarzo, cristales de actinolita vercosa, pequeñas cantidades de otros óxidos de hierro, así como sulfuros de cobre tales como chalcopirita y bornita asociados a pirita y pirrotita.

El material proveniente de la mina donde es sometido a chancado primario y secundario, es reducido a  $-3/4"$ , que tiene el siguiente análisis químico en promedio:

%Fe	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%FeO	%S	%Cu
55.	10	1.2	18.	2.	0.1

Este material se alimenta a la planta de concentración magnética, que opera con agua de mar, donde es molido a un porcentaje de 70% — 325 Malla. Para separar los granos de magnetita, la mena es concentrada en tambores magnéticos, espesada y filtrada hasta un 10% de humedad.

Las características más importantes de los concentrados son:

#### Análisis Químico:

%Fe	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%FeO	%S	%Cu.
68.	2	0.4	22.	0.2	0.03

Superficie específica: cm<sup>2</sup> gm: 1200.

Gravedad específica: (Solid.) 5.0

La bentonita que se emplea en la Planta de Peletización de San Nicolás proviene de Tumbes y consiste principalmente de arcillas, de montmorillonita de grano fino del tipo sódicas de alto índice de esponjamiento (swelling) comparables con las bentonitas de Wyoming (U.S.A.).

Las características más importantes son:

#### Análisis Químico

%Na <sub>2</sub> O	: 2.4
%CaO	: 0.4
%SiO <sub>2</sub>	: 70.
%Ins.	: 27.2

Superficie específica : cm<sup>2</sup>/gm; 4500

Viscosidad : seg. 22

% de Coloides : 65

Para el control de calidad de las bentonitas, se llevan a cabo una serie de pruebas físicas en el laboratorio metalúrgico; con el objeto de determinar las cualidades indispensables que deben reunir las bentonitas, tales como alto porcentaje de coloides, buena viscosidad y propiedades de esponjamiento.

1. **Prueba de viscosidad.**— Se toma 33.5 gr. de muestra y 565 c.c. de agua destilada. La mezcla es agitada durante 5 minutos y pasada por embudo "Marsh", el tiempo de flujo en segundos se reporta como el índice de viscosidad de la bentonita, un tiempo de 22 segundos es satisfactorio.
2. **Prueba de Coloides.**— Se toma 10 gr. de muestra y 500 ml. de agua, se agita la mezcla durante 5 minutos, la pulpa se lleva a una probeta de 500 cc. y se deja durante 16 horas. al final de ese tiempo

se decanta con un sifón hasta dejar una pulgada de solución en la probeta. La pulpa restante se pasa a un vaso para ser secada y pesada, este peso se deduce del peso original y la diferencia se toma como índice de coloides, un índice de 70% de coloides es bueno.

3. **"Swelling Test".**— Se toma 5 gr. de muestra se humedece con agua de mar para formar los pellets, se mide el diámetro del pellet húmedo y luego del pellet secado por aire, el decrecimiento en diámetro se relaciona porcentualmente con el contenido de arcilla.
4. **"Grit Test".**— O prueba de granulometría es la fracción que pasa por + 325 Mallas.

#### OPERACIONES Y PROCESOS PARA LA PELETIZACION DE CONCENTRADOS DE MAGNETITA EN MARCONA.

La planta de peletización de San Nicolás, consiste esencialmente de una máquina de cocción de parrilla móvil según el sistema Dwight-Lloyd, con una superficie de reacción máxima de 125 m<sup>2</sup>; que es alimentada por tres discos granuladores de 6 metros de diámetro.

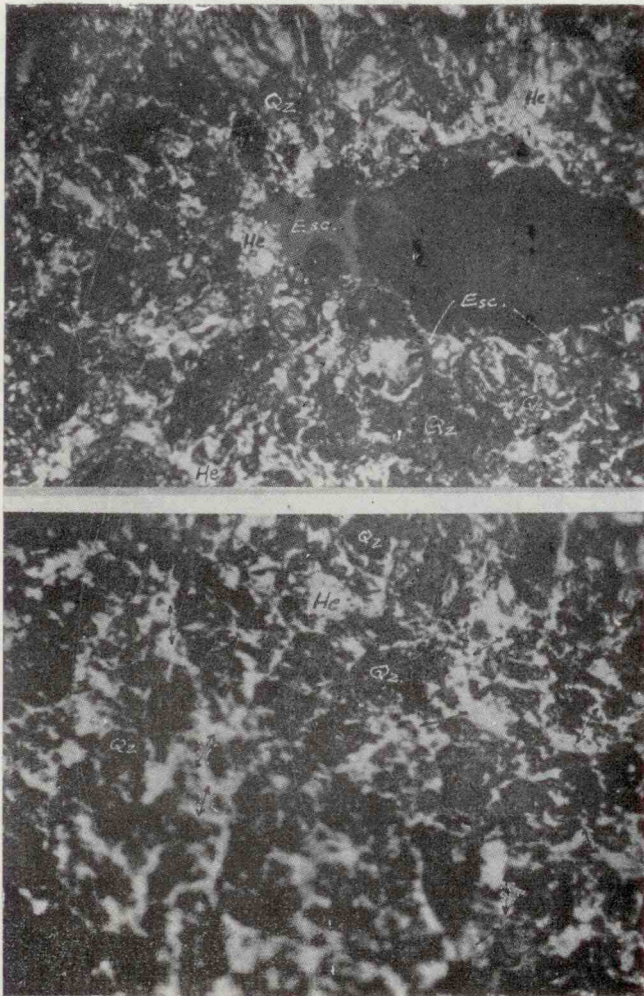
La capacidad nominal de esta planta es de 2940 ton./diarios de pellets de 10 a 15 mm. de diámetro; con una producción anual de 1'000,000 de ton. largas.

Los concentrados finos de magnetita (70% — 325 Mallas) producidos en la planta de concentración magnética son transferidos por fajas de la planta de peletización, que dispone de tres tolvas cónicas de 500 ton. para el almacenamiento de los concentrados que son descargados por alimentadores de mesa y automáticamente pesados por balanza de faja, montadas sobre las fajas transportadoras. Existe además todas las instalaciones necesarias para añadir en caso dado dos diferentes tipos de aditivos: **bentonita, cal o carbón.**

Después que ha sido completamente mezclado los concentrados con el aglomerante de bentonita (16 Lbs/Ton.), el material es alimentado a tres circuitos de producción de pellets "verdes", donde se encuentran instalados los discos granuladores de 6 m. de diámetro, con una inclinación de 45 grados con respecto a la vertical, los discos giran a razón de 8 RPM aproximadamente. Además poseen chisguetes de agua para suplir la humedad necesaria para la aglomeración. Se emplea para este efecto agua de mar.

Los pellets verdes son descargados de los discos granuladores, a los transportadores de rodillos motrices, habiendo un espaciamiento entre ellos de 3/8", para permitir la clasificación del material menor de 3/8"; que retorna a los discos granuladores.

Los pellets de + 3/8" de diámetro se alimenta a la máquina de cocción de parrilla móvil de 50 m. de largo y 2.5 m. de ancho; con una velocidad de avance de 1.8 m/min. A lo largo de la parrilla están instaladas 25 cajas de viento; 15 de las cuales son de succión, y se encuentran en la zona de reacción, donde se efectúa el secado, oxidado y cocido de los pellets; y 10 cajas de presión en la zona de enfriamiento.



Arriba Foto 1: Sección de Pellet conteniendo 20 lbs. de bentonita Ton. larga de Conc. quemado a 1350° c. Areas blancas: Hematita (He). Areas gris claro: escoria (Esc). Area gris oscura: cristales de Si O<sub>2</sub> inalterados (Q<sub>2</sub>).

Abajo Foto 2: Sección similar a la foto 1. Se observa el mecanismo de crecimiento de grano y el predominio de los enlaces de grano de hematita a hematita.

A medida que los pellets avanzan a la zona de reacción, el aire caliente (400° a 500°C) proveniente de la cubierta de refrigeración, es soplado de arriba hacia abajo (down draft) a través de la cama de pellets; este aire caliente es utilizado como aire primario para la combustión del petróleo en los quemadores instalados en la cubierta de combustión, y en forma de aire secundario, para proveer el oxígeno y calor necesario en la zona de reacción para la transformación de la magnetita a hematita. Se alcanza temperaturas entre los 450° y 1350°C.

En la zona de enfriamiento se sopla aire del medio ambiente, a través de la cama de pellets de abajo hacia arriba, (up draft) que recupera parte del calor sensible de los pellets cocidos, constituyendo el aire caliente que se destina a la zona de reacción.

Los gases de reacción son evacuados a través de las cajas de viento de la zona de reacción, mediante un ventilador de una capacidad de 6,900 m<sup>3</sup>/min; los gases salen a una temperatura de 220 grados C° en promedio.

Los pellets se descargan a un tambor de refrigeración de 17 m. de largo y 2.8 m. de diámetro; que pule la superficie de los pellets y refrigera hasta una temperatura media de 100 grados centígrados. Luego se transportan mediante fajas a la pila de almacenamiento para embarque.

Las cualidades más importantes de los pellets producidos pueden ser sumariados como sigue:

Resistencia a la Comprensión en Lbs. . . . .	543
"Tumble Text Index" + 1/4" . . . . .	92.1%
+ 28 — Mallas . . . . .	93.3%
— 28 + Mallas . . . . .	6.7%
Leyes en % de Fe. . . . .	66.7
S . . . . .	0.04
Cu. . . . .	0.02
FeO. . . . .	1.4
SiO <sub>2</sub> . . . . .	1.96
Estructura en tamaño de + 3/8" . . . . .	75.1% Acum.

#### PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD

Para la evaluación de las cualidades de los pellets verdes o "green balls" y de los pellets quemados, se han establecido pruebas físicas típicas o "standards" que dan una medida de la coherencia de las partículas resistencia al impacto y a la abrasión; propiedades físicas que controlan la calidad del producto y la eficiencia en el procedimiento de peletización.

#### Pruebas físicas para los pellets verdes.

Generalmente los pellets verdes o "green balls" tienen que soportar una rigurosa manipulación mecánica y choque térmico en el momento de introducirse en la máquina de cocción: es por esto que deben reunir ciertos requerimientos mínimos de resistencia. Se han establecido tres pruebas para la evaluación comparativa de esas propiedades; a saber:

**Prueba de Caída (Drop test).**— Consiste en dejar caer individualmente diez pellets verdes recientemente preparados, sobre una plancha de acero; desde una altura de 18 pulgadas. La media aritmética del número de caídas que los pellets verdes soportan sin romperse constituye el **número de caída o drop number**".

**Resistencia a la compresión de pellets verdes húmedos y pellets verdes secos.**— Consiste en someter los pellets verdes a compresión gradual mediante un probador tipo balanza, en uno de cuyos brazos lleva un recipiente para colocar perdigones. El fondo de dicho recipiente se apoya sobre el pellet que se coloca en una superficie metálica lisa. La carga de ruptura del pellet se expresa en lbs; pesando el recipiente de perdigones en una balanza de laboratorio. La prueba de resistencia para pellets verdes secos, se efectúa tomando 10 pellets húmedos que son secados durante 24 horas en una estufa ventilada y

luego sometidos a comprensión en el probador tipo balanza.

#### Pruebas físicas para los pellets quemados.

Estas pruebas se efectúan para medir la coherencia de las partículas en los pellets quemados, sometidos a las fuerzas de trituración impuestas por la carga en el alto horno y el apilamiento, así como las fuerzas abrasivas ocasionadas por los métodos convencionales de manipulación y embarques de menas de hierro. Se han establecido diferentes pruebas con la finalidad de evaluar la tenacidad, dureza y resistencia a la comprensión de los pellets quemados.

Ban y Erck han descrito tres métodos, que han sido establecidos como standars para evaluar pequeñas cantidades de pellets quemados, a saber:

Prueba de Comprensión	(Comprension test)
Prueba de Abrasión	(Tumble test)
Prueba de Caída	(Drop test)

**Prueba de Comprensión.**— Determina la resistencia de los pellets, que es una medida de la habilidad para soportar esfuerzos. En el caso de comprensión diametral lenta de materiales esféricos, el esfuerzo es una función del tamaño de la esfera y de la fuerza de comprensión. Cuando los pellets de tamaño semejante están sometidos a comprensión diametral lenta los esfuerzos y el máximo esfuerzo unitario son directamente proporcionales a la carga de ruptura. Consecuentemente la resistencia del pellet, es aproximadamente una medida de la máxima carga impuesta sobre un pellet individual.

La prueba consiste en someter diez pellets quemados a comprensión entre el pistón de una prensa hidráulica y una placa fija de acero. La presión requerida para provocar la trituración es convertida en libras de carga.

**Prueba de abrasión.**— Está basada, en la prueba "standard" para coke, según el ASTM, con modificaciones específicas para la evaluación de pellets quemados.

La muestra para esta prueba consiste de material de pellets que está sobre 3 Mallas S. T.

- 1.—Se toma una muestra seca de 25 libras de + 3 Mallas.
- 2.—Esta muestra es sometida a rodamiento en un tambor de dimensiones especificadas. La muestra da 200 revoluciones a razón de 24 r.p.m.
- 3.—El producto del tambor es tamizado a mano sobre un cedazo de 3 Mallas S. T.
- 4.—El material — 3 Mallas es tamizado en un Rotap durante tres minutos sobre un cedazo de 10 mallas S.T.
- 5.—El porcentaje + 10 Mallas es reportado como el "Tumble index". También se toma — 28 Mallas como el índice.

**Prueba de impacto.**— Determina la tenacidad de los pellets, o la relativa resistencia a la subdivisión por la fuerza de impacto. Estas fuerzas fueron impartidas dejando caer los pellets desde una altura de 33 1/3 de pie sobre una plancha de acero, la cantidad de muestra que se toma para la prueba es de **1,000 gramos** (aprox. 35 pellets de 3/8" de diámetro).

En todas las pruebas se toma la media aritmética como índice, para cada una de las pruebas físicas.

## SEGUNDA PARTE

### ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LOS PELLETS EN EL PROCESO DE PELETIZACION.

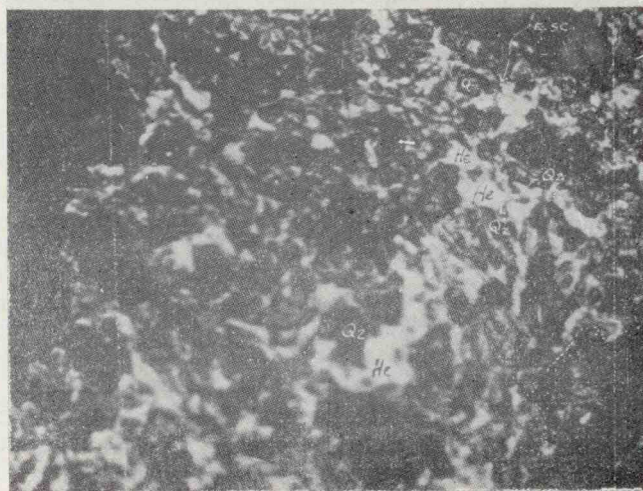
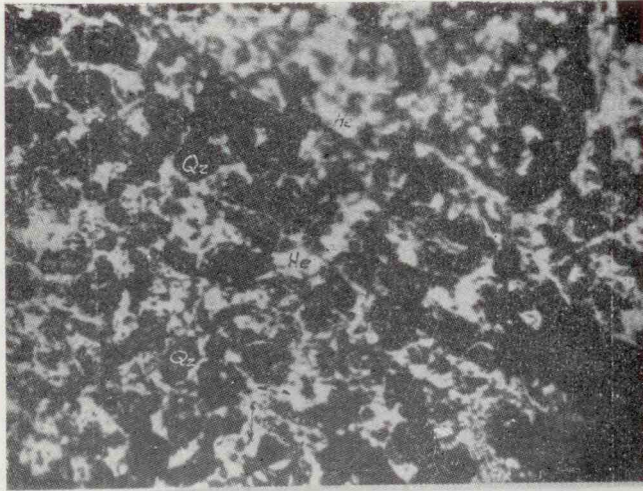
#### GENERALIDADES.—

Para producir calidad óptima de pellets a mínimo costo no existe un modelo general de quemado, por el hecho de que cada mena de hierro, es un caso individual que requiere una atención específica y no se puede establecer generalizaciones definitivas considerando el comportamiento particular de una mena de hierro durante las etapas del proceso de peletización. Debido a la multitud de variables que intervienen en cada una de las etapas del proceso, se ha llevado a cabo una discusión general de los factores que afectan la calidad de producto en el proceso de peletización de concentrados de magnetita, con especial referencia del sistema de parrilla móvil.

Los sistemas más comunes de equipos comerciales usados actualmente para el quemado de pellets de menas de hierro son: El sistema de horno de cuba o "Shaft furnace", el de Parrilla móvil o "Traveling grate" y el sistema combinado Parrilla móvil y el kiln rotatorio o "Grate Kiln".

La mayor ventaja del sistema "Shaft Furnace" reside en la simplicidad de su diseño y su alto grado de recuperación de calor; la desventaja de este horno es la dificultad experimentada en mantener una zona de combustión uniforme. El sistema de Parrilla móvil posee la ventaja del control apropiado en cada etapa del proceso de endurecimiento de los pellets, así cualquier dificultad puede ser rápidamente remediada; la desventaja de este sistema es el alto costo de mantenimiento de los "pellets frame" del horno que están hechos de aleaciones costosas de alta resistencia al calor; esta dificultad ha sido reducida empleando el sistema de quemado con tiro hacia arriba o "Up draft firing" y el uso de material de protección.

El sistema "Grate Kiln" tiene las mismas ventajas del sistema de parrilla móvil, es decir control apropiado del proceso para el secado y precalentamiento de los pellets, y usa el diseño más simple de Kiln rotatorio para el quemado de los pellets a más alta temperatura. Estos dos últimos sistemas han demostrado ser por la experiencia los más adecuados para el endurecimiento de pellets de menas de fie-



Arriba Foto 3: En esta sección la silice, casi no se ha alterado. Existen los enlaces de escoria entre algunos granos de hematita.

Abajo Foto 4: Nótese en esta micrografía la movilidad efectuada por los granos de Hematita; algunos cristales de cuarzo, han quedado completamente rodeados por el crecimiento de grano de hematita. La formación de escoria es incipiente.

rro en la mayoría de las condiciones. De otra parte está demostrado que una gran mayoría de plantas de pellets actualmente en construcción están usando, el sistema de Parilla móvil o el sistema "Grate Kiln",

#### A.—FORMACION Y MANIPULACION DE PELLETS VERDES.

Un factor importante en la producción de alta calidad de pellets quemados de menas de hierro, es la resistencia, la uniformidad de tamaño y la colocación pausada de los pellets verdes en la parrilla de la máquina de cocción, de tal manera que evite el deterioro en el manipuleo mecánico. Estos factores son

esenciales si se desea obtener una cama altamente permeable, que permita una gran capacidad de producción.

La resistencia y la uniformidad de los pellets dependen en gran parte de la superficie específica de la mena o concentrado de hierro y el contenido de humedad.

Para explicar la formación de los pellets "verdes" y como influyen los factores anteriores en la calidad del Pellet, nos basaremos en la teoría Capilar (Capillary Theory) propuesta por Tigerschiol e Ilmoni. De acuerdo a esta teoría, la tensión superficial de una película delgada de agua que rodea las partículas de mineral tiende a tener un efecto comprensivo sobre la bola producida o "pellet verde"; esta fuerza comprensiva sobre la superficie de la bola es directamente proporcional a la firmeza del concentrado es decir su superficie específica, la distribución del tamaño de las partículas y la efectividad del método de formación de los pellets verdes, ya sea en un disco rotatorio inclinado o en un tambor rotatorio. El óptimo contenido de agua es extremadamente importante puesto que un exceso de agua neutralizaría el efecto de presión capilar, de otra parte un defecto de agua daría lugar a una mayor inclusión de aire dentro del pellet verde, reduciendo el efecto de presión capilar, y por consiguiente las fuerzas cohesivas y adhesivas entre las partículas del mineral responsables de la resistencia de los pellets verdes.

Para la manipulación mecánica de los pellets verdes, J. E. Meyer patentó un transportador de rodillos Dravo-Lurgi, que consiste en una serie de rodillos motrices que giran en un solo sentido permitiendo el rodamiento suave y una distribución transversal al ancho de la máquina de cocción; no se requiere de barra niveladora y la distancia del transportador a la cama de pellets puede ser mantenida debajo de 6 pulgadas para disminuir la altura de caída. Por un arreglo de un pequeño claro entre los rodillos individuales, el transportador puede ser usado para clasificar el material de menor tamaño.

En resumen el transportador de rodillos provee: Un medio de manipulación mecánica suave, asegura una profundidad uniforme de cama a través de su ancho, y permite un acabado de la superficie de los pellets verdes.

#### B.—SECADO DE LOS PELLETS VERDES.

Para un secado apropiado de los pellets es importante tener siempre en cuenta:

El tiempo y la temperatura de secado.

La velocidad y dirección del flujo de aire de secado.

1. **Tiempo y temperatura de secado** — Una apropiada temperatura y tiempo de secado es importante en la producción de pellets de alta calidad, estas variables se determinan de acuerdo al espesor de la cama, el tamaño de los pellets, el tipo de secado de tiro hacia arriba (Up draft) o de tiro hacia abajo (Down draft) y la naturaleza y humedad de los pellets.

La temperatura y tiempo de secado no sólo es importante en la producción de pellets de alta calidad, sino también en el costo de planta y mantenimiento de ventiladores.

Una excesiva temperatura y tiempo prolongado de secado afectaría la permeabilidad de la cama de pellets. Esto es: cuando se emplea una alta velocidad de flujo de secado, el vapor de agua removido se condensa en la superficie de los pellets fríos en forma de gotitas de agua, que por efecto del tiro de aire tendrán una acción erosiva sobre los pellets, produciéndose una especie de barro o "slurry" que se depositará en la superficie de los pellets y en los vacíos entre éstos, afectando los procesos subsiguientes de peletización. Además, este exceso de temperatura y tiempo, eleva el calor sensible de los pellets, calienta las barras de la parrilla, los pellets de protección de lados y base de la parrilla. Como este calor no es utilizado, meramente eleva la temperatura de los gases de salida, incrementando el volumen específico de los mismos, que resulta en un mayor consumo de energía para evacuar los gases.

**2. Velocidad y dirección de flujo de aire.**— La dirección del flujo de aire de secado, empleado en el sistema de Parrilla móvil puede ser de dos tipos:

Secado con tiro de aire ascendente ("Up draft") ó

Secado con tiro de aire descendente ("Down draft").

Cuando el secado y quemado de los pellets es efectiva con tiro de aire descendente (Down draft) generalmente se emplean altas temperaturas y bajas velocidades de flujo de aire, en este caso se debe asegurar que la intensidad del calor impuesto al pellet, sea suficientemente baja para prevenir el rápido desprendimiento de vapor de agua del centro del pellet que podría provocar su quebrantamiento o explosión. Este tipo de secado opera muy bien siempre que el contenido de humedad de los pellets verdes no sea mayor de 9%. Puesto que en el tipo de secado "Down draft", el vapor de agua desprendido de los pellets verdes se enfría a medida que fluye a través de la cama de pellets, y cuando la temperatura de este vapor de agua está por debajo de la del punto de rocío, se condensa sobre la superficie de los pellets verdes de las capas inferiores de la cama, que absorben en gran parte esta agua, aumentando su contenido de humedad original (9%), dando lugar a que los pellets de la base de la cama se tornen pastosos y poco resistentes para soportar el peso de las capas superiores y la presión del aire de secado; es por esto que un secado con tiro ascendente (Up draft) sea más recomendable cuanto el contenido de humedad de los pellets es mayor de 9%.

### C. PRECALENTAMIENTO DE LOS PELLETS.

El propósito de la zona de precalentamiento es asegurar una apropiada oxidación de la magnetita, y someter a los pellets a la temperatura de quemado sin desarrollar esfuerzos indebidos, pero que permita el enlace y crecimiento de los granos de las partículas.

La velocidad de oxidación de las magnetitas varían ampliamente, debido probablemente a factores tales como: Velocidad de incremento de temperatura, estructura de la magnetita y granulometría del concentrado.

La velocidad de oxidación decrece rápidamente a alta temperatura; de acuerdo a la ecuación energética, la energía libre se hace positiva en el rango de temperaturas mayor de 1500°C y la oxidación no procede.

De lo anterior se desprende, que si la mayor parte de la oxidación no es efectuada en la zona de precalentamiento, es probable que ésta no se lleve a cabo en la zona de quemado de alta temperatura (1300 a 135°C).

Se ha demostrado por pruebas físicas de calidad, que a mayor grado de conversión a hematita, mayor es la resistencia de los pellets, debido a los enlaces fuertes de los granos de hematita.

La velocidad de incremento de la temperatura afecta la resistencia de estos enlaces, y debe tenerse muy en cuenta. El examen de las microfotografías ha demostrado que la cantidad de enlaces y crecimiento de grano presente en un pellet quemado varía ampliamente, si se varía la velocidad de incremento de la temperatura debido probablemente a los esfuerzos térmicos originados en el pellet durante el calentamiento.

La granulometría del material debe tenerse en cuenta al adoptarse la velocidad de incremento de la temperatura.

Con material muy fino, ocurre una severa contracción a temperaturas de 1100°C. Esta contracción puede tener dos efectos perjudiciales marcados:

- 1.—Causar el sellado de los poros dificultando la difusión del oxígeno dentro de la masa del pellet, evitará la oxidación del núcleo del pellet y consecuentemente debilitamiento de los pellets quemados.
- 2.—Resultarán esfuerzos en el pellet, que provocarán pequeñas rajaduras y brechas en el pellet, que son casi imposible subsanarlas.

Puesto que los granos individuales deben estar en contacto para permitir el crecimiento granular, las dificultades anteriores pueden ser prevenidas por un muy cuidadoso control de la temperatura de precalentamiento.

Por estas razones los pellets deben ser oxidados a baja temperatura y la velocidad de elevación de la temperatura debe ser lenta hasta que el pellet se haya oxidado en gran parte.

### D.— QUEMADO DE LOS PELLETS.

Tienen por objeto, desarrollar alta resistencia a los esfuerzos y a la abrasión en los pellets, lo cual

se logra mediante un tratamiento térmico a temperaturas comprendidas entre 2300 a 2400°F. No es recomendable sobrepasar estos límites por que podría ocurrir escorificación en los pellets, a partir de los óxidos metálicos y no metálicos presentes. También puede ocurrir la descomposición térmica de la hematita, rompimiento de la red continua del óxido y aparición de huecos debido a la liberación del oxígeno.

## TEORIA DE LAS TRANSFORMACIONES QUE OCURREN DURANTE EL QUEMADO DE LOS PELLETS

Se ha demostrado por trabajos de investigación, que existen dos fenómenos básicos que imparten coherencia a las partículas dentro de los pellets quemados, establecidos ambos por la transferencia de energía térmica a las partículas de mineral. Estos fenómenos son:

- 1.—Oxidación de la magnetita a hematita y subsiguiente recristalización y crecimiento de grano.
- 2.—Formación de escoria (Ceramic bond formation)

1.—Este primer fenómeno ocurre normalmente en toda secuencia de peletización. La oxidación de la magnetita comienza debajo de los 600°C, formándose una costra tenaz de hematita en los pellets, que no se combina con la sílice o silicatos presentes. Esta oxidación cesa cerca de los 1400°C y se invierte la reacción a mayor temperatura. Por encima de 1300°C una cantidad significativa de hematita se transforma a magnetita que permite la formación de una escoria viscosa de fayalita o de un eutéctico entre la magnetita, la sílice y los silicatos. Probablemente la formación de pellets aglomerados en zonas de excesiva temperatura, es debida a esta descomposición térmica de la hematita, aunque mayormente se debe a la extrusión del líquido matriz de los pellets rotos.

La oxidación de los pellets de magnetita, puede explicarse por el fenómeno de "refinamiento de grano" (Grain refinement), que es un proceso por el cual, ciertas direcciones cristalográficas dentro de un cristal cualquiera de magnetita se oxidan preferencialmente. Así un simple cristal de magnetita se transforma eventualmente en un número de granos independientemente orientados de hematita. Esto ocurre a 500°C ó 600°C. A mayor temperatura, cerca de los 1300°C, los granos de hematita comienzan a crecer formándose cristales grandes de hematita; este proceso ocurre a través de toda la masa del pellet, es decir, el crecimiento de los granos que darán origen a cristales grandes de hematita, constituyendo una red de granos de hematita equiaxiada en todo el pellet. Con el engrosamiento del tamaño del grano hay un incremento concomitante en la resistencia. Debe observarse que el mecanismo del crecimiento de grano es principalmente un conjunto de reacciones físicas, en las cuales las partículas más pequeñas consolidan en unas más grandes con el resultante de crecimiento de la energía de superficie, de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica.

Como la escoria no se forma debajo de 1300°C, no puede haber transferencia de átomos de fierro a través de un segundo constituyente, luego el crecimiento de los granos de hematita debajo de esa temperatura depende solamente de la movilidad de los átomos de fierro en la hematita. Este fenómeno es sustentado por un experimento cuidadosamente controlado en el laboratorio.

Entre 1300° y 1400°C, la sílice y los granos de silicato que han permanecido inalterados, comienzan a formar escorias y al mismo tiempo la red continua de hematita se rompe apareciendo una gran cantidad de cristales idiomórficos de hematita y magnetita; este cambio está acompañado por un decrecimiento en la resistencia de los pellets.

Los pellets mas resistentes hechos de magnetita son aquellos, en los cuales hay una red continua de cristales de hematita, en una matriz de granos de cuarzo inalterado; con muy pequeña cantidad de escoria intersticial enclavada en la hematita.

Si los constituyentes de la ganga del mineral y los aditivos están presentes en cantidades anormales, ocurre una escorificación pronunciada dentro del pellet quemado y las partículas de mineral de Fe estarán débilmente enlazadas por esta escoria vitrosa, inhibiendo a las partículas de fierro a su interrelación por crecimiento de grano.

Una excesiva velocidad de incremento de la temperatura, provoca una disminución en la compactación de pellet verde debido a la rápida expulsión del aire y el agua de combinación. Esto causa que las partículas de mineral estén menos íntimamente asociadas para las reacciones de enlazamiento. Además dá lugar a la formación de una estructura doble en el pellet, es decir costra de hematita y núcleo de magnetita.

Si se transfiere demasiado calor al centro del pellet antes de la difusión del oxígeno o la oxidación de la magnetita, el núcleo del pellet se consolidará en granos gruesos de magnetita, mientras que la costra se oxida a hematita, los granos gruesos de  $Fe_3O_4$  del núcleo se tornan poco susceptibles a una subsiguiente oxidación, por virtud de la estructura gruesa y la presencia de la escoria causada por la reacción del  $FeO$  con el  $SiO_2$ .

Estos pellets de doble estructura tienen más bajo índice de resistencia que aquellos que tienen una red homogénea de óxido de Fe. Por otra parte un brusco enfriamiento causa esfuerzos internos en la red de los cristales y los enlaces de las partículas del mineral, debido a la contracción rápida del pellet.

Si la atmósfera que rodea a las partículas de los pellets no tiene composición homogénea, puede ocurrir una aglomeración diferenciada en el pellet, por la diferente reactividad química de las partículas en un ambiente no homogéneo.



Los minerales de hematita, magnetita y los óxidos mas bajos de Fe poseen diferentes propiedades de aglomeración. Así, cuando alguno de los minerales de Fe están en presencia de sustancias reductoras durante el quemado, las características de aglomeración diferirán de las partículas quemadas por un ambiente atmosférico que es oxidante por naturaleza.

2.—La formación de escoria (ceramic bond Formation) es el resultado de las reacciones químicas, que ocurren generalmente entre óxidos ácidos y básicos de la ganga y los aditivos con el mineral de fierro.

El  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$  reaccionan en proporciones variables con  $\text{SiO}_2$  ó  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para formar una serie de compuestos o soluciones sólidas amorfas.

Estos productos enlazan las partículas de mineral de fierro juntándolas: por lo que se ha llamado "bridging action" o por reacción directa con la superficie de las partículas.

Sumarizando estos resultados podemos establecer que la resistencia de los pellets es una consecuencia de los dos fenómenos básicos explicados, que está gobernado por la propiedades de los pellets no quemados y las condiciones de quemado:

1. Composición mineralógica del concentrado y tamaño de las partículas del mineral.
2. Compactación de las partículas dentro del Pellet.
3. El uso de una óptima Temperatura de Quemado y velocidad lenta de incremento de Temperatura durante el quemado.
4. Un prolongado tiempo de retención a la Temperatura óptima de Quemado.
5. Un recrecimiento lento de la Temperatura de enfriado después del quemado.
6. Una atmósfera oxidante homogénea.

### TERCERA PARTE

#### PRUEBAS COMPARATIVAS DE PELETIZACION

Con el objeto de estudiar el efecto de la bentonita y el uso del agua de mar en la peletización de los concentrados de magnetita, se llevó a cabo una serie de pruebas de peletización en el Laboratorio metalúrgico de San Nicolás, con los concentrados finos procedentes de los filtros de secado (Filter cake) y con el rebose de los hidrociclones de la Planta de concentración magnética. Las muestras tenían las siguientes características:

Descripción	Sup. Esp. cm <sup>2</sup> /gr — 325 Mallas	An. Químico			
		%Fe	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Conc. de Filtro	1258	78.1	70.1	0.4	0.2
Rebose de HidroC	1430	80.1	68.2	0.2	0.3

Las pruebas de laboratorio se condujeron variando

los componentes de los pellets, de acuerdo al siguiente plan:

#### A. Pruebas con muestras lavadas

1. Con bentonita
2. Sin bentonita

#### B. Pruebas con muestras no lavadas

3. Con bentonita
4. Sin bentonita

Este plan de pruebas se realizó en forma independiente tanto para los concentrados de filtros, como para el rebose de los hidrociclones. La prueba con muestras lavadas se efectuó con agua destilada para disolver las sales presentes y deslamar las muestras originales, procedentes de la planta de concentración magnética que opera con agua de mar.

Las muestras para las pruebas utilizando bentonita se prepararon, mezclando los concentrados finos de magnetita con la bentonita en la proporción de 20 Lbs. de bentonita por tonelada larga de concentrado.

En cada una de las pruebas se tomó 200 gramos de concentrados finos secos, se humedeció con 20 a 22 ml. de agua de mar para las muestras no lavadas y agua destilada para las muestras lavadas; luego se procedió a formarlos a mano los pellets verdes, con un diámetro aproximado de  $1/2'' + 3/8''$ ; a estos pellets se les sometió a rodamiento suave durante cuatro minutos en un recipiente esférico a fin de darles uniformidad. A continuación se procedió a la evaluación de las cualidades de los pellets producidos de acuerdo a las siguientes pruebas:

**Resistencia a la caída (Drop Test).—** Fue obtenido del promedio del número de caídas requeridas para romper 10 pellets verdes en un probador de caída vertical desde una altura de 18 pulgadas.

**Resistencia a la comprensión de pellets verdes (Green Balls Str.).—** Se obtuvo mediante un probador tipo balanza. Este probador es una balanza de brazos largos; en el extremo de uno de los brazos descansa un recipiente donde se añade perdigones, y el otro brazo equilibra el recipiente vacío. Debajo del brazo que lleva el recipiente, se dispone una superficie plana sobre la que se coloca el pellet verde.

Se carga luego el recipiente en forma gradual con perdigones, hasta acusar la fractura del pellet, se pesa el recipiente con los perdigones en una balanza ordinaria de laboratorio, y este peso se registra como la medida de la resistencia a la comprensión del pellet probado. Se tomó cuidado para evitar cualquier esfuerzo diferente que el de pura comprensión.

Sumarizando las pruebas comparativas, se obtienen los siguientes resultados promedios:

**MUESTRAS LAVADAS**

Bentonita Lb./Ton.	Green		Dry	Fired	SUP.	
	Drop Test	Ball Str.	Pellet Str.	Pellet Str.	Esp.	
		Lbs.	Lbs.	Lbs.	cm <sup>2</sup> /gr.	
Filter Cake	20	3.1	0.91	4.2	354	1258
Filter Cake	—	2.3	0.79	0.7	186	1258
Rebose						
Hidro—C	20	2.4	0.70	3.9	559	1430
Rebose						
Hidro—C	—	1.0	0.59	0.9	289	1430

**MUESTRAS NO LAVADAS**

Bentonita Lb./Ton.	Green		Dry	Fired	SUP.	
	Drop Test	Ball Str.	Pellet Str.	Pellet Str.	Esp.	
		Lbs.	Lbs.	Lbs.	cm <sup>2</sup> /gr.	
Filter Cake	20	3.5	0.81	4.56	519	1258
Filter Cake	—	3.1	0.78	4.37	399	1258
Rebose						
Hidro—C	20	3.0	0.93	5.0	456	1430
Rebose						
Hidro—C	—	3.4	0.78	4.8	212	1430

La resistencia de los pellets fué el promedio de 10 pellets rotos. También se determinó el contenido de humedad de los pellets verdes que se sometieron a la prueba.

**Resistencia de pellets verdes secos (Dry Pellets Str.)**

— Fue obtenida de la resistencia promedio de 10 pellets verdes después de haber sido sometidos a un secado de dos horas en una estufa eléctrica; a una temperatura de 230°F. La resistencia de los pellets secos se determinó en el probador tipo balanza mencionado anteriormente.

**Resistencia a la comprensión de pellets quemados (Fired Pellets Str.)**— Se tomó el promedio de 10 pellets quemados, producidos en un horno eléctrico de mufla marca "Leco", a una temperatura de quemado de 2360°F. El tiempo de quemado fue de 30' minutos, al término de este período se desconectó el horno y se mantuvieron los pellets en él hasta que la temperatura hubo descendido a 1000°F, entonces son retirados del horno los crisoles con pellets, y se les permite enfriar al aire. Finalmente se sometieron a prueba de comprensión en una prensa hidráulica marca "Carver", que determina la resistencia en libras de carga.

Los datos obtenidos de las pruebas descritas se muestran a continuación:

"MINERIA"

**RESULTADOS DE LAS PRUEBAS COMPARATIVAS PARA LOS CONCENTRADOS DE FILTRO**

A.- MUESTRAS LAVADAS									
Descripción de MUESTRA.	1.- CON BENTONITA				2.- SIN BENTONITA				
	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	
Filter Cake	1.	3	437	2040	400	3	400	326	100
	2.	3	437	1569	500	3	376	312	200
	3.	2	414	2519	350	2	399	300	100
	4.	3	408	2366	340	2	331	273	140
	5.	3	431	1921	200	3	331	408	200
	6.	3	400	2424	600	2	359	321	300
	7.	4	375	1477	150	2	336	343	200
	8.	3	437	1972	400	2	375	346	180
	9.	3	437	1407	400	2	354	320	320
	10.	5	423	1787	200	2	382	331	120
PROMEDIO	3.1	420	1948	354	2.3	364	330	186	

B.- MUESTRAS NO LAVADAS									
Descripción de MUESTRA.	3.- CON BENTONITA				4.- SIN BENTONITA				
	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	
Filter Cake	1	3	365	2476	740	3	363	2908	400
	2	3	368	2046	600	4	317	2297	400
	3	4	397	2229	840	2	406	2712	300
	4	3	396	2223	500	2	277	1883	200
	5	4	380	1924	500	3	328	1737	330
	6	3	344	2456	400	3	413	1637	400
	7	3	312	1517	600	4	313	1810	760
	8	4	365	2020	300	4	345	1639	400
	9	4	379	1452	250	3	413	1866	400
	10	4	396	1525	460	3	369	2078	400
PROMEDIO	3.5	373	2100	519	3.1	358	2017	399	

**RESULTADOS DE LAS PRUEBAS COMPARATIVAS PARA EL REBOSE DE LOS**

**HIDROCLONES**

A.- MUESTRAS LAVADAS									
Descripción de MUESTRA.	1.- CON BENTONITA				2.- SIN BENTONITA				
	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	
Rebose de Hidro-C	1	3	316	2130	340	2	258	465	440
	2	2	300	2070	600	1	254	348	300
	3	2	364	2076	460	1	300	404	260
	4	3	203	1570	700	1	274	348	250
	5	2	416	1677	720	1	247	425	200
	6	3	370	1570	660	1	239	555	200
	7	3	192	2002	800	1	253	327	400
	8	2	353	1645	500	1	261	394	140
	9	2	385	1443	360	1	275	391	300
	10	2	-	1544	460	1	316	586	400
PROMEDIO	2.4	318	1773	559	1	268	411	289	

B.- MUESTRAS NO LAVADAS									
Descripción de MUESTRA.	3.- CON BENTONITA				4.- SIN BENTONITA				
	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	Drop Test	Green Ball Str. Grs.	Dry Pellet Str. Grs.	Fired Pellet Str. Lbs.	
Rebose de Hidro-C	1	3	391	3403	440	3	347	2303	150
	2	3	402	2272	360	3	331	2788	260
	3	3	380	1871	400	4	329	1904	260
	4	3	394	2215	400	3	398	2300	190
	5	3	474	2330	100	4	395	1895	200
	6	3	510	2285	500	-	-	-	-
	7	4	428	2035	500	-	-	-	-
	8	3	475	1894	840	-	-	-	-
	9	3	460	2364	220	-	-	-	-
	10	3	426	1830	740	-	-	-	-
PROMEDIO	3	421	2249	456	3.4	360	2238	212	

**Interpretación de los resultados:**

De los resultados de las pruebas podemos inferir que:

**A. MUESTRAS LAVADAS.**

1. La resistencia de los pellets verdes y de los pellets secos ha sido mejorada por la bentonita debido

- probablemente a las cualidades de esponjamiento de este aditivo.
- La resistencia de los pellets quemados preparados con bentonita incrementó notablemente en un cincuenta por ciento más que aquellos sin bentonita.
  - En cuanto a la granulometría del material, se observa un incremento en la resistencia de los pellets quemados en la muestra con una superficie específica de 1430 cm<sup>2</sup>/gr.

#### B MUESTRAS NO LAVADAS.

- Prácticamente no se observa un efecto favorable del aditivo bentonita, en la resistencia de los pellets verdes y de los pellets secos preparados de las muestras con una superficie específica de 1258 y 1430 cm<sup>2</sup>/gr.
- En cuanto a la resistencia de los pellets quemados, es notable el incremento de la resistencia, en las muestras preparadas con bentonita. Esto demuestra el rol que desempeña en el incremento de la resistencia, la formación de enlaces de escoria y hematita (ceramic Bond Formation).
- El efecto de las lamas parece tener una acción favorable en la resistencia de los pellets verdes y de los pellets secos preparados sin bentonita, así como en la resistencia de los pellets quemados.

#### ESTRUCTURA DE LOS PELLETS QUEMADOS

El estudio preliminar de las microestructuras de los pellets de concentrado de magnetita, ha sido restringido enteramente a los pellets producidos con aditivo de bentonita en la planta de paletización de San Nicolás.

Para este objeto se prepararon diez secciones pulidas de pellets, siguiendo el procedimiento descrito por R. B. Cooke y E. Ban; excepto en el uso del plastificante para rellenar los vacíos de las secciones pulidas. Los pellets para este estudio procedieron de las muestras que se envían al laboratorio Metalúrgico para las pruebas de calidad, y es un compuesto de una semana (febrero 1 al 7 de 1964).

A continuación se presenta un resumen de las características de los materiales usados, la calidad de los pellets verdes, tanto húmedos como secos, que sirvieron para obtener los pellets quemados y analizar su estructura.

#### Concentrados finos (Filter cake)

% Fe	68
% SiO <sub>2</sub>	2.
% FeO	22.
%—325M	73.
Sup. esp.	
cm <sup>2</sup> /gr.	1200
% Humedad	9.

**Bentonita.**— Se empleó alrededor de 20 lbs. por tonelada larga de concentrados finos.

% Na <sub>2</sub> O	2.4
% CaO	0.4

% SiO <sub>2</sub>	70.0
% Ins.	27.2
Sup. Esp.	
cm <sup>2</sup> /gr.	4100
Viscosidad	
Funnel flow time sg .	22.
% De colides	65.

#### CALIDAD DE LOS PELLETS VERDES SECOS Y HUMEDOS.

##### Pellets verdes húmedos

Resistencia a la compresión. Lbs.	0.9
Porcentaje de humedad	8.8

##### Pellets verdes secos

Resistencia a la compresión Lbs.	8.7
----------------------------------	-----

Estos pellets verdes fueron sometidos a quemado en el horno de la planta a una temperatura de quemado de 1350°C, en promedio.

Las características de los pellets quemados fueron:

% Fe	67.
% SiO <sub>2</sub>	2.
% FeO	1.4
Resist.	
comp. Lbs.	540
% Tumble	
index (—28M)	8.

#### ESTUDIO MACROSCOPICO.

En general las secciones pulidas presentan un color que va del gris rojizo al gris de acero. A simple vista no se hace evidente el aditivo o la escoria, el aspecto más importante que se ha observado es la presencia de una doble estructura en alguno de los pellets, que consiste en un núcleo gris oscuro de magnetita, y una costra de mayor superficie de gris de acero de hematita. En su mayoría se ha probado que los pellets rojizos son débiles y friables, estos pueden o no tener un núcleo; en cambio los pellets gris acerados frecuentemente son fuertes y poco friables, que también poseen un núcleo generalmente de magnetita recristalizada.

Existe pues una correlación remarcable entre la resistencia y la estructura del pellet, que se observa a simple vista.

La formación de núcleos, en la estructura de los pellets es probablemente debida al hecho de que la baja permeabilidad del pellet no permite la difusión del oxígeno del aire, dando lugar a la formación de escoria y recristalización de la magnetita a temperaturas comprendidas entre los 1100 y los 1200°C: una vez que la escoria se ha formado y el tamaño de los granos engrosado, la oxidación de la magnetita disminuye en forma notable.

También se ha observado en las secciones, la presencia de grandes cavidades y grietas concéntricas. Estas últimas son debidas a la contracción del núcleo, a temperaturas por encima de 1100°C la es-

coria se ablanda, las cavidades o poros se alargan volviéndose menos numerosos, por que se unen por tensión superficial entre la costra rígida y el núcleo.

## ESTUDIO MICROSCOPICO

El estudio microscópico de las secciones pulidas comprendió las observaciones de las secciones bajo el microscopio y la interpretación de las fotomicrografías tomadas a estas secciones.

### Observaciones de las secciones bajo el microscopio.

Para el efecto del examen se utilizó un microscopio "standard" de polarización marca Zeiss Winkel, del Departamento Metalúrgico de la Facultad de Minería.

Todas las secciones se observaron, empleando luz reflejada monocromática, con una magnificación total de 100X y de 250X.

Del examen microscópico de las secciones pulidas podemos anotar que la textura en general de los pellets, está constituida por cavidades o vacíos, partículas de hematita cementadas entre ellas por escoria o enlaces entre los mismos granos de hematita (Bridging action) dando el aspecto de una textura de esponja. El agrupamiento de granos grandes de hematita a expensas de los más pequeños, se debe en gran parte a la libertad de movimiento de las partículas de hematita a través de la escoria formada, se nota claramente el predominio de los enlaces de hematita a hematita, que es responsable de la resistencia del pallet, en algunos pellets se ha observado la presencia de enlaces de granos de magnetita recristalizada, pero en menor cuantía.

Se ha demostrado experimentalmente que la resistencia parece ser debida a la cementación de las partículas de mineral en el instante de su oxidación, en ese tiempo los átomos de fierro tienen tan alta movilidad durante la transformación de la red que es posible el libre intercambio y el reordenamiento de la red, en forma continua y homogénea de cristales de hematita, que se constituyeron a expensas de la oxidación de la magnetita.

**Interpretación de las Fotomicrografías.**— Las fotomicrografías de las secciones pulidas de los pellets quemados tienen una magnificación de 350X, en ellas podemos observar que las áreas blancas corresponden a la hematita, las áreas de color gris claro a la escoria formada a partir del FeO y el SiO<sub>2</sub>. Los cristales de cuarzo inalterados presentan un color gris oscuro, las cavidades o poros pueden identificarse fácilmente por presentar un aspecto nebuloso y bordes bien remarcados.

En algunas fotomicrografías es notable la presencia de los enlaces de escoria (Slag bond) que se han formado entre los granos de hematita, así como también el predominio de los enlaces de hematita a hematita (Bridging action).

De las observaciones de las microestructuras de los pellets quemados bajo el microscopio y la inter-

pretación de las fotomicrografías, podemos inferir, que tanto los enlaces de escoria como los enlaces de hematita a hematita han contribuido a la resistencia de estos pellets, de otra parte la recristalización y crecimiento de granos de los oxidos de fierro también han influido favorablemente en esta resistencia, como ha quedado demostrado por las pruebas de resistencia a que fueron sometidos estos pellets.

## CONCLUSIONES

1. De los varios métodos de quemado de pellets, y después de considerar las ventajas de cada sistema se ha concluido que el de parrilla móvil es el más adecuado para el endurecimiento de pellets de menas de fierro, en la mayoría de las condiciones.
2. El transportador de rodillos para los pellets verdes provee el mecanismo más satisfactorio de alimentación a la máquina de parrilla móvil, asegurando el mantenimiento de la calidad de los pellets verdes hasta que son colocados en el horno.
3. Los factores más importantes que influyen en la calidad de los pellets verdes son:
  - a) La superficie específica de la mena o concentrado de fierro.
  - b) La humedad de la mena o concentrado, puesto que un exceso de humedad neutralizaría el efecto de presión capilar responsable de la compactación del pellet verde, y un defecto de humedad reduciría el efecto de presión capilar.
  - c) La velocidad y dirección de flujo de aire de secado (Down Draft o Up Draft).
4. La óptima oxidación de la magnetita, en la etapa de precalentamiento de los pellets, dependerá en gran parte de la velocidad de incremento de la temperatura.
5. El factor más importante para el desarrollo de las resistencias de los pellets quemados, preparados de concentrados de magnetita, es la oxidación de la magnetita a hematita y subsiguiente recristalización y crecimiento de grano del mismo.
6. La estructura doble del pellet, costra de hematita separada de un núcleo de magnetita recristalizada, generalmente tienen más bajo índice de resistencia que pellets que tienen una red homogénea de hematita.
7. El efecto favorable en la resistencia de los pellets por la presencia de lamas en los concentrados de magnetita permite disminuir la cantidad de bentonita usada en la peletización.
8. La cualidad de los pellets solamente pueden ser mejoradas en muchos casos por el estudio de un

sistema de quemado específicamente desarrollado para una mena particular.

#### AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer muy sinceramente a los Ingenieros, Manuel de Losada y Rubén Breña, quienes me brindaron la oportunidad de efectuar observaciones y prácticas sobre peletización y control de calidad en el Departamento Metalúrgico de San Nicolás; como también a la compañía minera Marcona Mining Co. por las facilidades brindadas para llevar a cabo el presente trabajo.

Asimismo agradezco muy especialmente al Ingeniero César Sotillo, quien me asesoró en el desarrollo de la tesis.

Hago extensiva mi gratitud a todas las personas que colaboraron en la realización de este trabajo.

#### BIBLIOGRAFIA

- T. E. BAN & L. J. ERCK.— 1953. Laboratory procedures for determining pelletizing characteristics of iron ore concentrates. AIME Trans. Vol. 196.
- LAWRENCE A. ROE.— 1957. Iran ore beneficiation. Mineral Publishing Co. USA.
- E. N. CAMERON.— 1961. Ore Microscopy. John Wiley & Sons.
- W. E. MARSHALL.— 1961. Taconite pellets in the blast furnace. Journal of metal-abril. USA.
- K. E. MERKLIN & F. D. DEVANEY.— 1959. Production of self-fluxing pellets in the laboratory and pilot plant Mining Engineering-marzo 1960. USA.
- D. PHELPS & J. A. ANTHES.— 1963 Improvements in the grate pelletizing process. USA.
- G. REGINALD BASHFORTH.— 1964 The manufacture of iron and steel Vol. I Iron production Chapman & Hall London.
- STRATHMORE R. B. COOKE & W. F. STOWASSER 1952 — The effect of heat treatment and certain additives on the strength of fired magnetite pellets. AIME Trans. Vol. 193. USA.
- M. TIGERSCHIOLD & P. A. ILMONI.— 1950. Fundamental factors influencing the strength of green and burned pellets made from fine magnetite ore concentrates. Blast Furnace, Coke oven and Raw materials Conference. AIME USA.

# BANCO MINERO DEL PERU

## OFICINA PRINCIPAL

Calle Carrera No. 450

Apartado 2565

HACE PRESTAMOS PARA LA EXPLOTACION DE MINAS

VENDE MATERIALES PARA LA INDUSTRIA MINERA

COMPRA MINERALES Y METALES Y OTORGA

CREDITOS CONTRA ENTREGAS FUTURAS

Ofrece a los mineros los servicios de sus Plantas Concentradoras de Minerales de Huachocolpa, Castrovirreyna, Sacracancha, Hualgayoc y Huarochirí y la Planta Lavadora de Carbón de Chimbote. Sus Laboratorios del Callao, y sus Oficinas y Depósitos en Arequipa, Pisco, Callao, Supe, Huaraz, Trujillo, Juliaca.