

Universidad Nacional de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA GEOLOGICA,

MÍNERA Y METALURGICA



PELETIZACION

T E S I S

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO METALURGISTA

JORGE SEGUNDO CONDEMARIN RODRIGUEZ

PROMOCION 1975 - 2

LIMA · ★ PERU · ★ 1977

DEDICATORIA

*A mis padres y a
mi querido hermano
por su ayuda invaluable
en el logro de mi más
preciada aspiración.*

*Para llevar a cabo
grandes Empresas hay
que vivir como si nun
ca se fuera a morir.*

H. KAISER

I N D I C E

	PAGINA
PROLOGO	
INTRODUCCION	1

C A P I T U L O I

ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE PELETIZACION

1. ANTECEDENTES DE LA PELETIZACION	3
2. VALOR METALURGICO DE LA PELETIZACION	6
3. ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL PARA PELETIZAR	10
4. GAMA DE PRODUCTOS PELETIZADOS	12
5. DECISION DE INVERTIR EN PLANTAS DE PELETIZACION	13

C A P I T U L O II

FUNDAMENTOS Y TECNICAS DE LA PELETIZACION

1. RAZONES DE ACEPTACION DEL PROCESO	17
2. MECANISMOS DE LIGAZON	19

C A P I T U L O I I I

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR
LAS CARACTERISTICAS DE LA PELETIZACION
DE LOS CONCENTRADOS DE MINERAL DE
HIERRO

1. . PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA EL QUEMADO DE LOS PELETS	65
2. DETERMINACIONES DE LA CALIDAD DE LOS PELETS	69
3. SIGNIFICADO DE LAS PRUEBAS REALIZADAS	72
4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	78

C A P I T U L O I V

APLICACIONES FERROSAS Y NO FERROSAS DE LA
CARBONATACION EN LOS PROCESOS DE PE-
LETIZACION

1. DESCRIPCION DEL PROCESO	94
2. APLICACIONES FERROSAS. INVESTIGACIONES DE LABORATORIO	95
A. INFLUENCIA DEL SECADO PARCIAL	95
B. INFLUENCIA DE LA GRADACION DEL TAMAÑO DEL MATE- RIAL FERROSO Y DE LA CANTIDAD DE HIDRATO LIGAN- TE	97
C. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE CARBONATACION	102

	PAGINA
3. CAPACIDAD DE RETENCION DE LIQUIDOS DE LOS AGLOMERADOS HUMEDOS. FACTORES	21
4. ETAPAS DE LA PELETIZACION	24
A. FORMACION DE PELETS VERDES	24
B. TRATAMIENTO TERMICO DE ENDURECIMIENTO	28
5. PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD	34
A. PRUEBAS FISICAS PARA LOS PELETS VERDES	34
B. PRUEBAS FISICAS PARA LOS PELETS QUEMADOS	36
6. AGLOMERANTES. CARACTERISTICAS: BENTONITA	38
7. TIPOS DE EQUIPO EMPLEADO	39
FORMACION DE PELETS VERDES	40
A. FORMACION DE PELETS VERDES EN DISCO	40
B. FORMACION DE PELETS VERDES EN TAMBOR	44
TRATAMIENTO TERMICO DE ENDURECIMIENTO	48
A. HORNO DE CUBA (Horno Vertical)	48
B. PARRILLA MOVIL:	52
MODELO MACDOWELL	52
MODELO MCKEE	53
MODELO LURGI-DRAVO	54
C. PARRILLA MOVIL - HORNO ROTATORIO	57

PAGINA

D.	INFLUENCIA DEL TIPO DE ADITIVO BASICO	102
E.	EFFECTO DE LA CONCENTRACION DEL DIOXIDO DE CARBONO Y LA ADICION DE MELAZA	107
F.	EVALUACION METALURGICA DE LOS PELETS	109
3.	APLICACIONES NO FERROSAS	115
A.	ANTECEDENTES	115
B.	TRABAJO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO	115
4.	PELETIZACION CONTINUA A GRAN ESCALA POR CARBONATACION	118
A.	PREPARACION DEL MATERIAL A ALIMENTAR Y FORMACION DE BOLAS	118
B.	ENDURECIMIENTO A BAJA TEMPERATURA	120
C.	MANIPULEO DEL PRODUCTO Y ALMACENAMIENTO	121
D.	ALTO HORNO EXPERIMENTAL	123

C A P I T U L O V

PRODUCCION DE PELETS DE MINERAL DE CROMO

1.	DESCRIPCION DEL PROCESO	127
2.	PELETIZACION DE DIVERSAS CLASES DE MINERAL	130
3.	DESGASTE Y ROTURA	133
4.	DATOS DE OPERACION	134
5.	USO DE PELETS DE MINERAL DE Cr PARA LA FABRICACION DE FeSiCr	135

	PAGINA
CONCLUSIONES	137
BIBLIOGRAFIA	143
APENDICES	145
1. AVANCES EN EL DESARROLLO TECNICO DE PLANTAS DE PELETIZACION DE CAPACIDADES EXTREMADAMENTE GRANDES, PROBLEMAS RELACIONADOS Y PERSPECTIVA FUTURA	1
CAPACIDAD DE UNIDADES DE ENDURECIMIENTO DE PELETS DE DIFERENTE TIPO DE CONSTRUCCION	145
CONSIDERACIONES ECONOMICAS ACERCA DE LA CONSTRUCCION DE UNIDADES DE GRAN CAPACIDAD	149
CONCEPTO TECNICO DE PARRILLAS MOVILES LURGI/DRAVO PARA CAPACIDADES EXTREMADAMENTE GRANDES	153
2. AMERICA LATINA CUADRUPPLICARA PRODUCCION DE PELETS HACIA 1980	158
3. NUEVO PUERTO Y COMPLEJO DE PELETIZACION DE HIERRO EN EL BRASIL	161
4. LA EXPROPIACION DE MARCONA	163

P R O L O G O

El motivo que me llevo a escoger el proceso de peletización, como tema de esta tesis, tuvo lugar durante mi práctica vacacional realizada en SIDERPERU, donde conjuntamente con otro compañero de mi especialidad, realicé pruebas experimentales sobre peletización de mineral de manganeso. Las vivencias recogidas durante esta práctica, me hicieron ver la importancia de este proceso de aglomeración, importancia ésta que fue tomando cuerpo conforme iba avanzando en la elaboración de este trabajo.

Esta tesis realizada para optar el Título Profesional - de Ingeniero Metalurgista, tiene como objeto dar al estudiante, al profesional, como a toda aquella persona vinculada o interesada en este importante proceso metalúrgico, los conocimientos que ayuden a comprender no sólo los fundamentos y técnicas de este proceso, sino también la importancia del mismo.

Durante la realización de este trabajo, he tropezado con algunas dificultades, entre ellas la recopilación de información y el idioma, sito éstas dos por ser las que más problemas me ocasionaron, sobre todo al desarrollar los capítulos tercero y cuarto donde toda la información pertinente se hallaba en inglés. Pero todos estos impases fueron solucionados, con la ayuda de algunos profesionales

muchos de ellos profesores míos, y también gracias a las facilidades que me brindó el INCITEMI (Instituto Científico Tecnológico Minero), al permitirme el uso de su biblioteca.

Pongo ahora a consideración de ustedes el contenido de esta tesis.

I N T R O D U C C I O N

El proceso de peletización se ha tornado hoy en día, en el proceso más importante de aglomeración. Aunque últimamente su aplicabilidad en la industria no ferrosa, está adquiriendo cada vez más adeptos, es su aplicación en la industria ferrosa la razón fundamental de su importancia, esto tiene su explicación en la gran demanda existente actualmente en el campo siderúrgico, lo cual hace recurrir a grandes yacimientos de baja ley, los cuales necesitan de una concentración, dando lugar con ello a que debido a la gran superficie específica generada en el mineral con este tratamiento, se requiera de un proceso de aglomeración, para hacer utilizable este mineral como material de carga en el horno siderúrgico (Alto Horno).

Este trabajo muestra en su primer capítulo, el aspecto histórico de la peletización, con el fin de dar al lector una idea del avance cada vez mayor de este proceso en la industria ferrosa. Su valor metalúrgico, sus limitaciones y la influencia de su participación en la industria siderúrgica, son también expuestos en este primer capítulo. En el segundo capítulo, se habla sobre los fenómenos inherentes a este proceso, así como sobre las diversas técnicas desarrolladas para la aplicación de este proceso.

Una información detallada sobre una serie de pruebas experimentales de peletización realizadas a nivel de laboratorio con di

ferentes concentrados de mineral de hierro es mostrada en el tercer capítulo.

El cuarto capítulo al igual que el tercero también trata sobre pruebas experimentales de peletización a nivel de laboratorio, - con la diferencia, que éstas se realizan no sólo con mineral de hierro, sino también con mineral de cobre; además de que aquí la peletización se lleva a cabo aplicando un proceso de carbonatación que es una técnica diferente de la ya tradicional peletización con proceso de quemado. En este capítulo se muestran pruebas comparativas realizadas con pélets quemados y carbonatados.

El quinto y último capítulo, trata sobre la peletización de mineral de cromo realizada en la planta peletizadora instalada en la usina Weisweiler de Gesellschaft für Elektrometallurgie. Condiciones de operación y problemas relacionados con este proceso son tratados aquí.

Para complementar este trabajo se ha incluido un apéndice, en el cual se han tocado aspectos importantes relacionados con el aumento en la producción de pélets actual y futura. Con la lectura de los puntos tratados, en este apéndice, podrá apreciarse no sólo el avance que hoy en día ha alcanzado la peletización en cuanto a producción, sino también las ideas de mejorar las técnicas actuales que tienden a introducir unidades de producción de mayor tamaño con la consiguiente reducción de los costos de producción.

C A P I T U L O I

ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE PELETIZACION

La peletización es un método de aglomeración de partículas de los materiales de gran finura; lo cual se consigue sometiendo estos materiales a una operación de rodamiento en un tambor rotatorio o en un disco rotatorio inclinado, obteniéndose un producto en forma de bolas pequeñas llamadas pélets que posteriormente son tratadas térmicamente.

1. ANTECEDENTES DE LA PELETIZACION.-

La peletización tiene sus antecedentes en el inicio de este siglo, pues, en 1911, ya Anderson, en Suecia, obtiene aglomerados de minerales de fierro de forma específica, usando equipos bastante semejantes a los que son usados en las modernas usinas de peletización.

Otras tentativas fueron hechas en Alemania (1913 y 1923), Austria (1929) y Estados Unidos (1934-1936), pero ninguna de ellas tiene interés industrial; solamente con la Segunda Guerra Mundial por la anunciada escasez de mineral de fierro y como consecuencia

de ello los altos precios por éstos alcanzados, es que se investigó más intensamente el aprovechamiento de ciertas reservas de mineral de hierro de baja ley, reservas éstas antes no consideradas. Las reservas más grandes de mineral de fierro de América del Norte eran de baja ley y no servían para alimentar los altos hornos sin una adecuada concentración. El empleo de este mineral exigía un método de aglomeración para convertir los finos concentrados en un material apto para cargar los altos hornos.

Así fue que, en 1943, la Mines Experiment Station de la Universidad de Minnesota realizó investigaciones de peletización de concentrados de taconitas magnetíticas, siendo publicado en 1944, el primer trabajo sobre peletización de minerales de fierro. Tal fue el interés despertado que en 1946, en Suecia, fue creado un Comité de alto nivel para realizar investigaciones sobre peletización, asumiendo la presidencia el Dr. Magnus Tigerchiold.

De estas investigaciones resultó la instalación, en 1951, de las primeras usinas industriales de peletización en los Estados Unidos y en Suecia. Así la peletización se desarrolló como una manera de tratar el material ultrafino, como los concentrados, que son mucho más finos que el material de tamaño óptimo para sintetizar. Pronto demostró ser un producto superior para controlar el rendimiento del alto horno y durable para el transporte a gran distancia

Las primeras máquinas de peletización eran hornos de cuba adaptados de la tecnología sueca. Más tarde se desarrollaron

máquinas de parrillas basadas en las máquinas de sinterización - como prototipos. En 1959 se introdujo en la industria un tercer sistema de peletización, el de parrilla y horno rotatorio, que se basaba en la tecnología europea del cemento.

La mayor parte de la producción comercial con el método de horno de cuba se ha limitado a tratar concentrados de magnetita. Las instalaciones de hornos de cuba son por lo general plantas de unidades múltiples con rendimientos individuales que van a 700 á 1,700 ton/d.

Las primeras máquinas de peletización comerciales de parrilla tenían seis pies de ancho, con 1,008 pies² de superficie útil para una producción de 2,500 ton/d de pélets. Las unidades modernas tienen 11 á 13 pies de ancho, con más de 5,000 pies² de superficie útil de tratamiento y capacidad nominal de más de 9,000 ton/d. Se ha propuesto una máquina de parrilla circular enfriada por agua que incorpora más de 10,000 pies² de superficie útil. En México se ha construído un prototipo más pequeño de esta unidad.

La primera instalación comercial de parrilla y horno rotatorio tenía una parrilla de 9 pies de ancho con 520 pies² de superficie útil, un horno rotatorio de 10 pies de diámetro, con 1,200 ton/d de capacidad. Una unidad moderna, actualmente en construcción, tiene una parrilla de 18 pies de ancho con 3,600 pies² de superficie útil y un horno rotatorio de 25 pies de diámetro, capaz de producir 12,000 ton/d de pélets.

Las tendencias actuales en peletización son de construir grandes unidades simples para obtener mayores beneficios con menores costos de operación. Las instalaciones modernas de peletización están proyectadas para funcionar 24 horas al día con un mínimo de personal de mantención y operación. Se insiste más en la automatización de la planta con instrumentos complejos y controles de realimentación.

2. VALOR METALURGICO DE LA PELETIZACION.-

El valor metalúrgico de la peletización del mineral de hierro depende del costo de convertir el pélet en arrabio, comparado con el de los productos de alternativa, como el mineral en trozos. Este costo de conversión debe incluir no sólo los costos directos de la unidad de fierro aglomerado sino también los cargos adicionales, entre ellos: a) movimiento y descarga; b) transporte desde el puerto al consumidor; c) almacenamiento en patio de minerales; y, d) fabricación de arrabio en el alto horno.

Los factores mencionados varían de una siderúrgica a otra y según el tipo de material ferrífero de carga. Las diferencias de costo valen especialmente para la fabricación de arrabio, la cual depende de las características químicas y físicas del material ferrífero de carga.

Cuando los pélets forman una gran proporción del contenido de fierro y fundente de la carga del alto horno, los costos de la planta siderúrgica se ven afectados considerablemente por las características de dichos materiales. Las características del

pélet pueden regir la reducibilidad, el volumen de escoria, las características de fusión de la escoria y las impurezas perjudiciales presentes. Estos factores controlan a su vez el volumen efectivo del alto horno, el consumo de coque, el tratamiento para eliminar impurezas del arrabio y el uso final del arrabio producido.

La reducibilidad de un pélet es función del tamaño, uniformidad, porosidad y superficie de las partículas expuestas a los gases de reducción. La resistencia física en las sucesivas etapas de la reducción son un factor importante en la reducción de los pélets. Los pélets por su elevada porosidad son fácilmente reducibles. El tamaño y la uniformidad del pélet se controlan mediante un minucioso cribado en alguna etapa de la producción o de la preparación. Pélets de tamaño absolutamente uniforme proporcionan la permeabilidad máxima del lecho a los gases de reducción y mantiene un alto grado de contacto entre gases y sólidos. La resistencia física durante la reducción es función del contenido de hierro y de los constituyentes formadores de escoria que están presentes. La experiencia ha demostrado que las resistencias a la reducción de los pélets se puede controlar mediante adiciones adecuadas de fundente ácido o básico.

Las necesidades de escoria para el alto horno dependen del nivel de ganga en la carga total del horno y de la composición química deseada del arrabio. Las necesidades de escoria, en el caso de usar pélets ácidos, deben cumplirse con la adición de fundente básico. Normalmente, las necesidades de fun -

dentos de los pélets son relativamente pequeñas debido al alto grado de finos y concentrados de mineral que se tratan. Por tanto, el volumen de escoria que se necesita con pélets es relativamente menor que cuando la carga contiene mineral en trozos.

Los factores indicados señalan que el alto nivel de hierro tiene importancia al asignar un mayor valor metalúrgico al pélet. Un elevado contenido de hierro tiende a disminuir el volumen necesario de escoria y a reducir el consumo de coque en términos de libras por tonelada de arrabio fundido. A su vez, el menor consumo de coque tiende a reducir el volumen necesario de escoria.

Los pélets que tienen un contenido de hierro alto, acompañado de niveles bajos de ganga ácida, exigen menos ajuste del fundente en el alto horno que un mineral de hierro de baja ley que tenga un elevado contenido de sílice y alúmina.

Las materias primas para la peletización tienden a tener niveles bajos de impureza, en virtud de los métodos de clasificación por tamaño y los procedimientos de concentración que se emplean. (Algunas de las impurezas perjudiciales en siderurgia son el fósforo, azufre, titanio, arsénico, cobre, zinc y los alcalis). En la clasificación por tamaños de los finos de mineral para peletizar, el mineral de ley más alta se encuentra con frecuencia en las fracciones finas. En consecuencia, hay una tendencia natural hacia el uso de un contenido más elevado de hierro en el material de peletización. El objeto de la concentración es liberar el hierro y eliminar los elementos de ganga de

los minerales ferríferos presentes. Como resultado de la clasificación por tamaño y la concentración, las impurezas perjudiciales que se encuentran en el material de peletización disminuyen. Además los pélets producidos por endurecimiento en caliente se calcinan para disociar la combinación de humedad y carbonatos y eliminar contaminantes oxidables tales como el azufre.

Como la mayoría de los altos hornos reciben diversos materiales ferríferos en la carga, cabe considerar la compatibilidad de los pélets con otros materiales disponibles. Ciertas impurezas menores afectan la cantidad de escoria que se necesita, y las impurezas mayores, tales como la sílice y la alúmina controlan las adiciones de fundente para obtener las características adecuadas de la escoria.

Es preciso entonces evaluar cada tipo de material peletizado a la luz de su influencia sobre la composición química total de la carga. Dichos factores, junto con otros rubros como son las reservas disponibles, la ubicación, transporte y accesibilidad, ejercen una fuerte influencia sobre la economía que contribuye al costo entregado del material de carga peletizado. La comparación de estos factores con los de otros materiales competidores determina el valor del mercado del material peletizado para una posterior fabricación de hierro y acero.

Los costos directos de producción en la peletización incluyen los de combustible, energía, materiales, abastecimientos, mano de obra de operación y mantención, supervisión e imprevistos. Los costos se dan normalmente como costo adicional de las materias

primas. Los costos de peletización varían según el tipo de materias primas, las condiciones locales y la contabilidad de costos de la empresa dueña, por ejemplo en los cargos internos de combustible y mantención central. Los costos de la peletización su fren la influencia considerable del tipo de materias primas mine rales, tales como la hematita contra la magnetita. El costo de la peletización aumenta si hay que triturar los finos o concentrados de mineral antes de peletizar.

3. - ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL PARA PELETIZAR.-

La mayor parte de los finos de malla 200 forman bolitas con facilidad y son material adecuado para la peletización. En términos generales, un buen material de peletización tendrá 65 á 90% menos de malla 325 (44 micrones) con una superficie específica de 1,400 á 2,000 cm²/gramo. Algunos finos y concentrados de mineral son naturalmente más finos que malla 200 de tamaño, pero exigen trituración para obtener la superficie específica nece saria. Los materiales para peletizar que no cumplen las normas de tamaño tienden a entregar un producto peletizado de baja calidad física.

Un exceso de ultrafinos también puede ser perjudicial en el material de peletización. Esta condición se encuentra con frecuencia en los materiales de hematitas terrosas, que contienen una elevada proporción de fango. Los materiales de menos de malla 325 de tamaño y cuya superficie específica es más de 2,000

cm^2/gramo tienden a ser difíciles o imposibles de filtrar y con frecuencia necesitan una etapa de secado antes de peletizar.

Debido a la elevada superficie específica de los ultrafinos, la humedad de la peletización tiende a aumentar, lo que coloca una mayor carga térmica sobre la etapa de endurecimiento. Las hematitas terrosas tienden a necesitar temperaturas más bajas de secado para impedir la desintegración durante el secado. El secado se realiza por lo general en dos etapas, la primera para eliminar la humedad superficial y la segunda para eliminar el agua de hidratación. Debido a las pérdidas durante la calcinación hay una mayor contracción de los pélets de hematita terrosa, lo que conduce a una menor recuperación de peso o rendimiento específico de la peletización.

Los materiales ferríferos terrosos se pueden comparar con la magnetita que gana en peso como consecuencia de la oxidación, y con la hematita pura que no sufre cambio en el peso durante el quemado ni la peletización. Luego, los minerales de hierro o concentrados se pueden clasificar como sigue, de acuerdo con su aptitud para la peletización:

- a. Magnetita.
- b. Hematita.
- c. Hematita terrosa.

La última categoría se puede subdividir en minerales con baja pérdida en el quemado, y minerales con alta pérdida en el quemado, en que la dificultad para peletizar aumenta en relación con el grado de pérdida en el quemado.

4. GAMA DE PRODUCTOS PELETIZADOS.-

Si bien el contenido básico de fierro y las caracterís ticas químicas y físicas dependen en cierta medida del origen del mineral de fierro, los procedimientos de peletización ofrecen una extensa variedad de productos.

Los aglomerados peletizados son por lo general ácidos de naturaleza, como consecuencia de los componentes de ganga áci da del mineral. Dada la ubicación remota de la mayoría de las plantas de peletización y los elevados costos consiguientes de los fletes, no se agrega normalmente fundente a los finos o concentrados de mineral de hierro. Con todo, el contenido de fierro habitualmente alto, el tamaño uniforme y la resistencia física de los pélets ácidos dan buenos resultados en el alto horno. En ciertos casos, donde la ganga es fundente por naturaleza, o donde se agrega fundente por razones de estabilidad física, los pélets fundentes han dado un rendimiento excelente.

Los resultados de la operación del alto horno, con pélets fundentes son buenos. Algunas plantas de peletización situadas dentro de las plantas siderúrgicas han producido pélets autofundentes y superfundentes que han tenido buen comportamien to en el alto horno. Se pueden producir pélets altamente fundentes, con ferritas similares a las del sinter fundente. Estos pélets son inestables y se deterioran durante un período prolongado de almacenamiento.

Una cantidad considerable de debates se han centrado

últimamente en el uso de pélets metalizados pre-reducidos para alimentar el alto horno. Los resultados experimentales en alto horno han indicado grandes beneficios derivados de la carga pre-reducida. Al parecer la capacidad del alto horno aumentaría marcadamente y los consumos de coque disminuirían. Estas mejoras se anticiparían a medida que el alto horno se convierte esencialmente en una operación de fusión y afino más que un dispositivo de fusión para reducción.

La tecnología actual señala que la aplicación principal de los pélets pre-reducidos será para las acerías eléctricas donde el producto metalizado se puede emplear como competidor de la chatarra.

Con fines determinados se fabrican diversos productos - peletizados especializados, destinados a tratar los desechos de las siderúrgicas y de la industria de no ferrosos.

5. DECISION DE INVERTIR EN PLANTAS DE PELETIZACION.-

Por naturaleza las plantas de peletización exigen una gran inversión de capital, y sus costos son del orden del 5 á 10% de los de una siderúrgica completa. En ellos no se incluyen los de las instalaciones conexas de concentración que pueden elevar el costo aún más entre 10 y 20% de los de una siderúrgica completa.

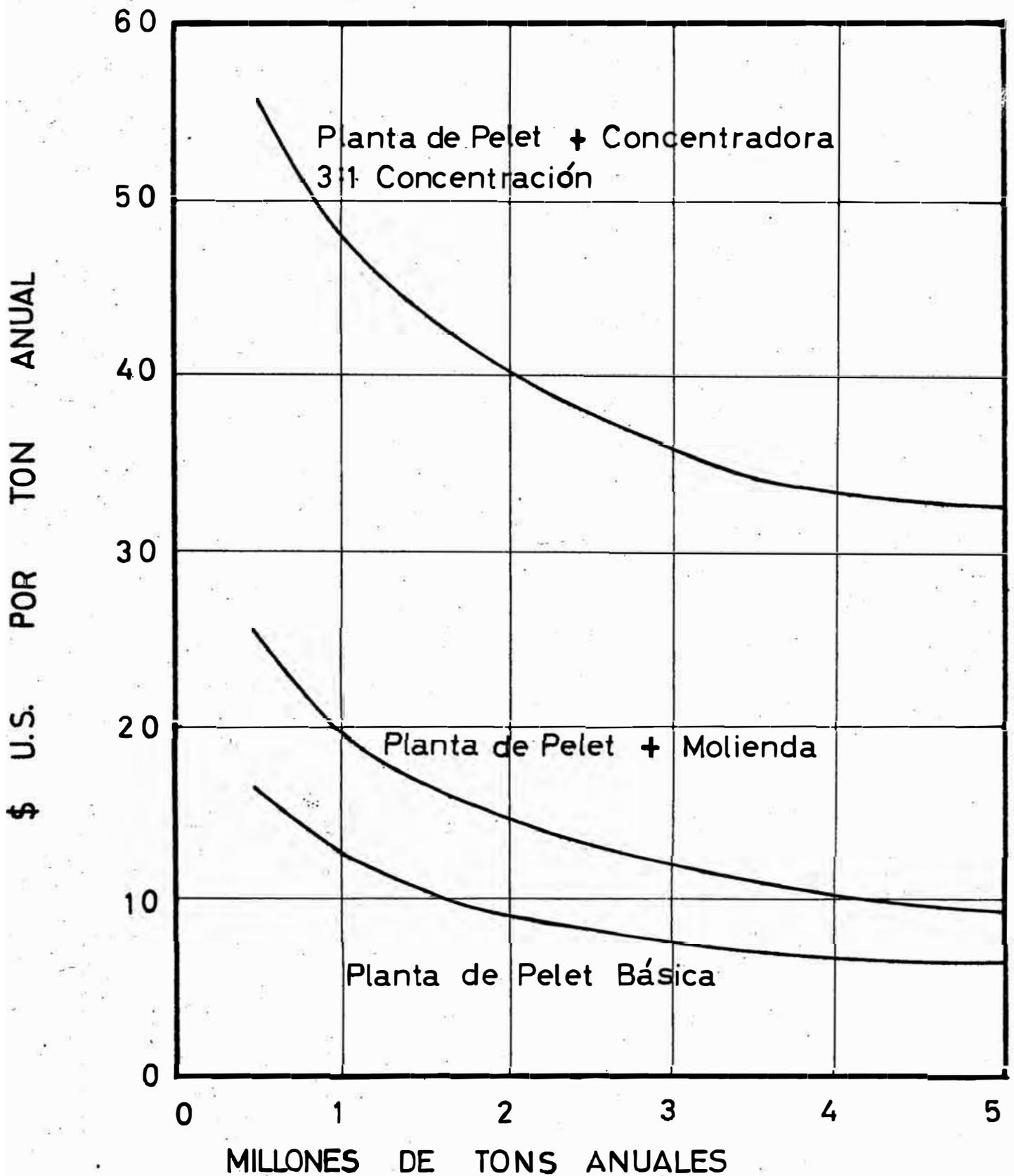


FIG. 1

Estimación de los costos de inversión de las instalaciones de peletización

Alimentación Hematita

Cabe señalar que la industria siderúrgica norteamericana ha participado directamente en las ampliaciones de la peletización. Que la explotación de los yacimientos norteamericanos de baja ley sea competitiva con las fuentes internacionales de mineral de alta ley en asunto debatible, cuya respuesta se encuentra en el grado de desarrollo que alcance esta tendencia en todo el mundo.

El actual mercado de finos de mineral es muy competitivo, debido al gran número de fuentes internacionales. Esta situación competitiva ha eliminado prácticamente la producción de mineral de hierro por métodos subterráneos. Hoy, con excepción de algunas fuentes europeas, casi toda la producción mundial de mineral de hierro proviene de métodos de extracción de tajo abierto de bajo costo. Con el fin de minimizar los costos de la minería de tajo abierto, ha habido una tendencia a explotar yacimientos de mineral cuyas reservas suban de los 100 millones de toneladas, de tal manera que se puedan emplear las maquinarias de tamaño máximo en la extracción de mineral. Las elevadas tasas de producción anual tienden a distribuir el costo de la mano de obra y de la maquinaria en un divisor más grande que reduce los costos unitarios.

Algunas minas de hierro tienen un exceso de fino de mineral para sinterizar o necesitan concentración en tamaño fino para obtener un producto comercializable. Los finos y concentrados de estos productos se tratan frecuentemente por peletización en la mina o en el puerto que sirve a la mina. Los costos de la instalación de peletización son de gran intensidad de capital, con condición que aumenta cuando se trata también de instalaciones de

trituración y/o de concentración. En consecuencia, el financiamiento de los grandes complejos de extracción, concentración y peletización es con frecuencia fruto de esfuerzos conjuntos entre empresas mineras, empresas siderúrgicas y gobiernos locales.

Las instalaciones necesarias de preparación afectan en gran medida los costos de inversión de las instalaciones de peletización. La figura 1 presenta tres curvas. La inferior indica el costo en dólares de los Estados Unidos por tonelada anual de producto, de la planta de peletización básica de una unidad. Si hace falta triturar para preparar los finos de mineral o concentrados, se trata de una inversión típica de la curva del medio. La curva superior indica la magnitud aumentada de la inversión que se necesita para las instalaciones de concentración y peletización cuando se trabaja con mineral de baja ley.

C A P I T U L O I I

FUNDAMENTOS Y TECNICAS DE LA PELETIZACION

Aglomerado es el término generalmente empleado para la formación de un cuerpo físicamente mayor a partir de cuerpos menores. Los aglomerados pueden ser obtenidos por procesos intencionales y no intencionales. La peletización pertenece al grupo de los intencionales.

1. RAZONES DE ACEPTACION DEL PROCESO.-

La fabricación de pélets es una técnica relativamente nueva en la preparación del mineral de fierro para obtener mejores resultados en el alto horno.

Las razones porqué el proceso de peletización ha tenido tan buena aceptación son:

- a. La posibilidad de poner en el mercado reservas de mineral - (magnetita, hematita, limonita) que, por su baja ley e impu rezas, necesita ser molido muy fino para liberarlo y luego concentrarlo.

- b. El contenido de fierro en los pélets es de 62 á 69% de Fe, que es mayor que el promedio de minerales en trozos y sinter que actualmente se usa.
- c. Los pélets tienen tamaño y composición química uniforme, lo que aumenta la permeabilidad en el alto horno, consiguiéndose una mejor distribución de los gases en la columna del horno.
- d. Los pélets tienen una micro-porosidad, aumentando el área de contacto entre ellos y los gases en el alto horno en un 20 á 30%. Consecuencia de todo esto es el aumento de la capacidad por metro cúbico de horno, y una disminución en el consumo de coke.
- e. La resistencia de los pélets al manipuleo disminuye la formación de polvo y de finos, reduciendo de esta manera las pérdidas del material.
- f. Los pélets ha eliminado los problemas de pagar falso flete por humedad y congelamiento en la época de invierno en los lugares fríos.

Hay trabajos técnicos, debidamente documentados, en operaciones de alto horno, que han probado la bondad y ventajas de sustituir los minerales y sinter por los pélets.

2. MECANISMOS DE LIGAZÓN.-

Se pueden dividir en cinco grupos los principales mecanismos de ligazón de las partículas en la aglomeración:

- a. Ligaciones sólidas que se forman entre las partículas, actuando como puentes ligantes entre ellas.
- b. Fuerzas interfaciales (presión capilar) en sistema sólido-líquido.
- c. Fuerzas de adhesión y cohesión que ocurren en presencia de ligantes viscosos y capas de absorción.
- d. Atracción entre partículas sólidas (Van der Waals, electrostática y magnética).
- e. Entrelazamiento de partículas de formas especiales (fibrosas, chatas, dendrítica, etc.).

En el proceso de peletización, los dos primeros mecanismos desempeñan un papel fundamental.

Las ligaciones sólidas pueden ser formadas por los siguientes fenómenos:

- Intercrecimiento de granos cristalinos.
- Por reacciones químicas.
- Por fusión. En los puntos de contacto de las partículas se forman ligaciones de materiales fundidos.
- Por endurecimiento del ligante inorgánico, por ejemplo, el cemento Portland.
- Por cristalización de materiales disueltos, pudiendo ser iguales o diferentes de las partículas.

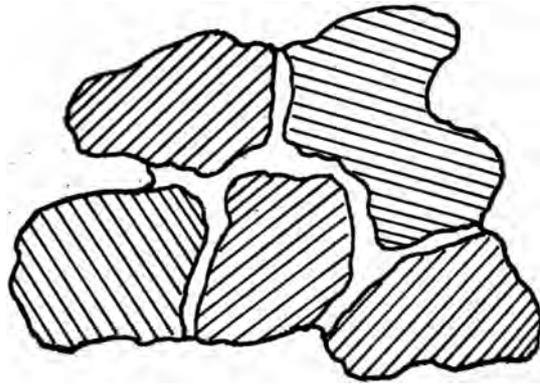


FIG. 2a

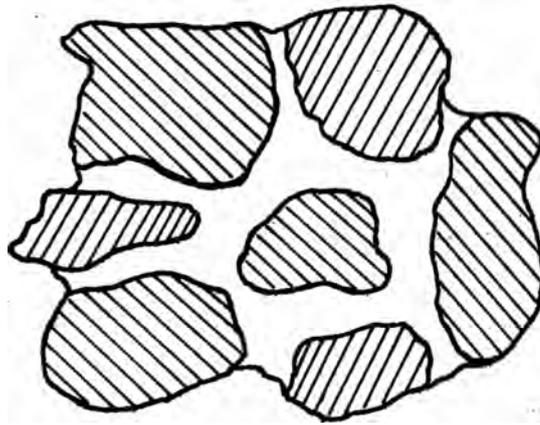


FIG. 2b

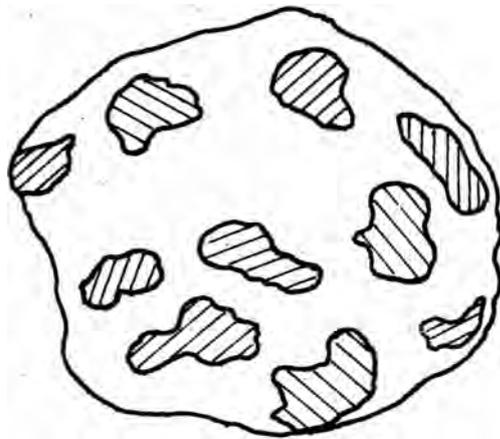


FIG. 2c

La acción de líquidos de baja viscosidad sobre la superficie de partículas mojándolas causa la ligación por efecto de las fuerzas interfaciales y capilares.

De acuerdo con la relación sólido-líquido, tres casos pueden ocurrir:

El espacio entre las partículas es llenado parcialmente con el líquido, que forma puentes entre las mismas (fig. 2a).

- El espacio vacío entre las partículas es totalmente llenado con el líquido, que no llega a envolver el aglomerado. El líquido en los bordes de los poros que dan para la parte externa del aglomerado forma superficies concavas (fig. 2b),

El líquido llena todos los vacíos y envuelve completamente el aglomerado, transformando las superficies líquidas concavas en convexas sustituyendo las fuerzas de cohesión superficial a las capilares (fig. 2c).

3. CAPACIDAD DE RETENCION DE LIQUIDOS DE LOS AGLOMERADOS HUMEDOS. FACTORES.-

Como ha podido verse por lo anteriormente expuesto, es de suma importancia la capacidad de retención de líquidos en el caso de los aglomerados húmedos. Para el caso de sólidos no porosos finamente divididos, la capacidad de retención está influenciada por los siguientes factores:

a. Número de contactos entre partículas. Este está determinado por su distribución granulométrica y modo de empaquetamiento.

b. Superficie específica de las partículas.

c. Mojabilidad de las partículas.

La influencia de los factores b y c puede ser físicamente demostrada.

Vamos a suponer que dos partículas vecinas de un determinado sistema forman un tubo capilar lleno de agua (fig. 3a), cuya base se comunica con otros tubos capilares del sistema (fig. 3b), también saturados con agua.

La fórmula del tubo capilar es:

$$h = \frac{2 \gamma \cos \theta}{r \rho g} \quad \{ 2 \pi r \gamma \cos \theta = \pi r^2 \rho g h \quad (1)$$

donde: h = altura alcanzada por el líquido dentro del tubo en cm H_2O .

γ = coeficiente de tensión superficial del líquido en dina/cm.

θ = ángulo de contacto en grados.

g = aceleración de la gravedad en cm/seg^2 .

ρ = densidad del líquido.

r = radio del tubo en cm (tómese aquí como radio medio de los poros).

Para el caso del agua:

γ = 72.7 dina/cm (20°C).

θ = 0' (casi nulo)

ρ = 1 g/cm³

g = 981 cm/seg²

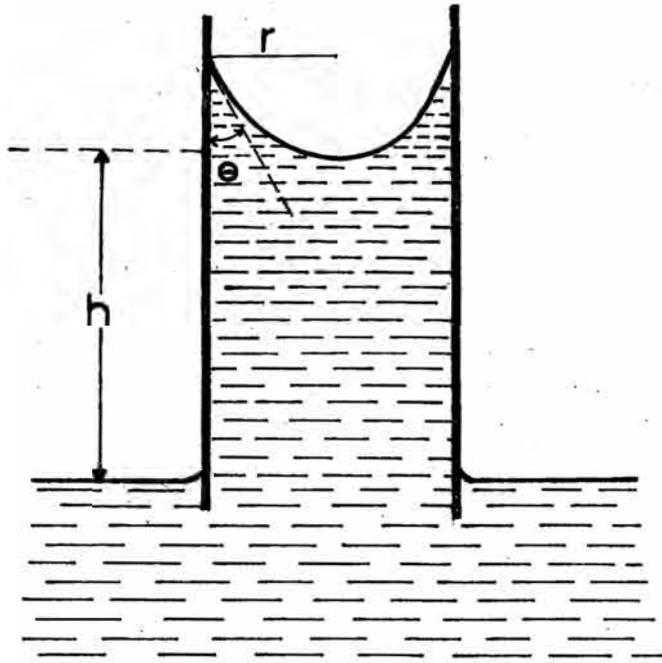


FIG. 3a

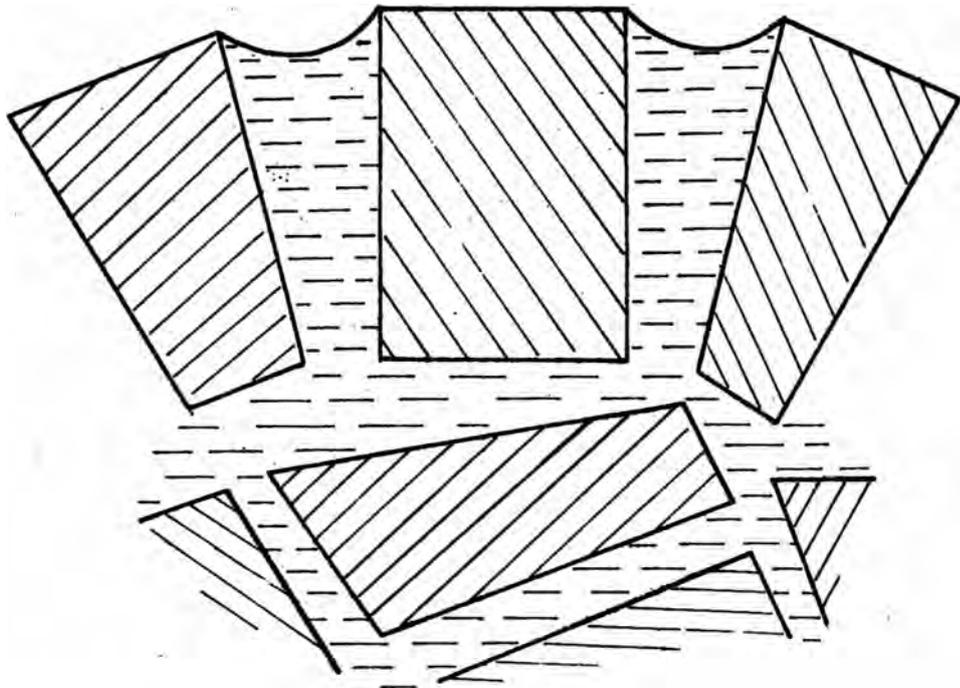


FIG. 3b

Considerándose que el radio medio de los poros se obtiene por la relación:

$$r = \frac{2 \Sigma}{S \rho_s (1 - \Sigma)} \quad (2)$$

Donde:

Σ = porosidad total del sistema.

s = superficie específica de las partículas sólidas en cm^2/g .

ρ_s = gravedad específica del sólido en g/cm^3 (Llámesese también masa específica real del concentrado).

Confrontándose las relaciones (1) y (2) puede verse que h y S son directamente proporcionales, luego cuanto mayor es la superficie específica mayor será la estabilidad del sistema.

4. ETAPAS DE LA PELETIZACION.-

El proceso de peletización tiene dos fases o etapas bien definidas: la formación de los pélets verdes (balling) y el tratamiento térmico de endurecimiento (heat hardening).

A. FORMACION DE PELETS VERDES.-

Los pélets verdes son aglomerados esferoidales de partículas finas no sometidos a tratamientos térmicos.

El proceso de formación de pélets verdes es idéntico al de formación de bolas de nieve, o sea, partículas humedecidas

forman núcleos que, al coligarse con otros núcleos o partículas secas, crecen formando cuerpos esféricos.

Esta fase es muy importante, ya que de la resistencia y uniformidad de tamaño de los pélets verdes, depende la alta calidad de los pélets quemados producidos en la etapa de endurecimiento por tratamiento térmico. La resistencia y la uniformidad de los pélets verdes dependen en gran parte de la superficie específica de la mena o concentrado y de su contenido de humedad.

Para explicar la formación de los pélets verdes y como influyen los factores mencionados (superficie específica y contenido de humedad) en la calidad del pélet, se hará referencia a 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 "pélet 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 pélets 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 la presión capilar, de otra parte un defecto de agua daría lugar a una mayor inclusión de aire dentro del pélet ver

de, 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 pélets verdes.

La importancia de los pélets verdes en los procesos de peletización es tan grande que se torna necesario someterlos a un riguroso control de calidad, comprendiendo dimensión, deformación plástica, resistencia a la compresión, a la caída y al choque térmico.

Como no hay variación sensible en la dimensión de un pélet verde, cuando es sometido al tratamiento térmico de endurecimiento, el control es hecho en los aparatos peletizadores. La dimensión óptima está siendo establecida por los consumidores. El diámetro de 1/2" es el preferido, habiendo un porcentaje límite de tolerancia para diámetros superiores a 5/8" o inferiores a 3/8".

En cuanto a las otras propiedades, los siguientes índices son considerados satisfactorios:

- Resistencia a la compresión: 1 Kg/pélet.

Deformación media: 10%.

Resistencia a las caídas repetidas: 6.

Resistencia al choque térmico: Superior a 300°C.

El contenido de humedad ejerce gran influencia en las propiedades citadas; la práctica ha demostrado que un error superior a $\pm 0.25\%$ en el contenido óptimo de humedad inhibe la acción de las fuerzas capilares.

La resistencia a la compresión y la deformación de los

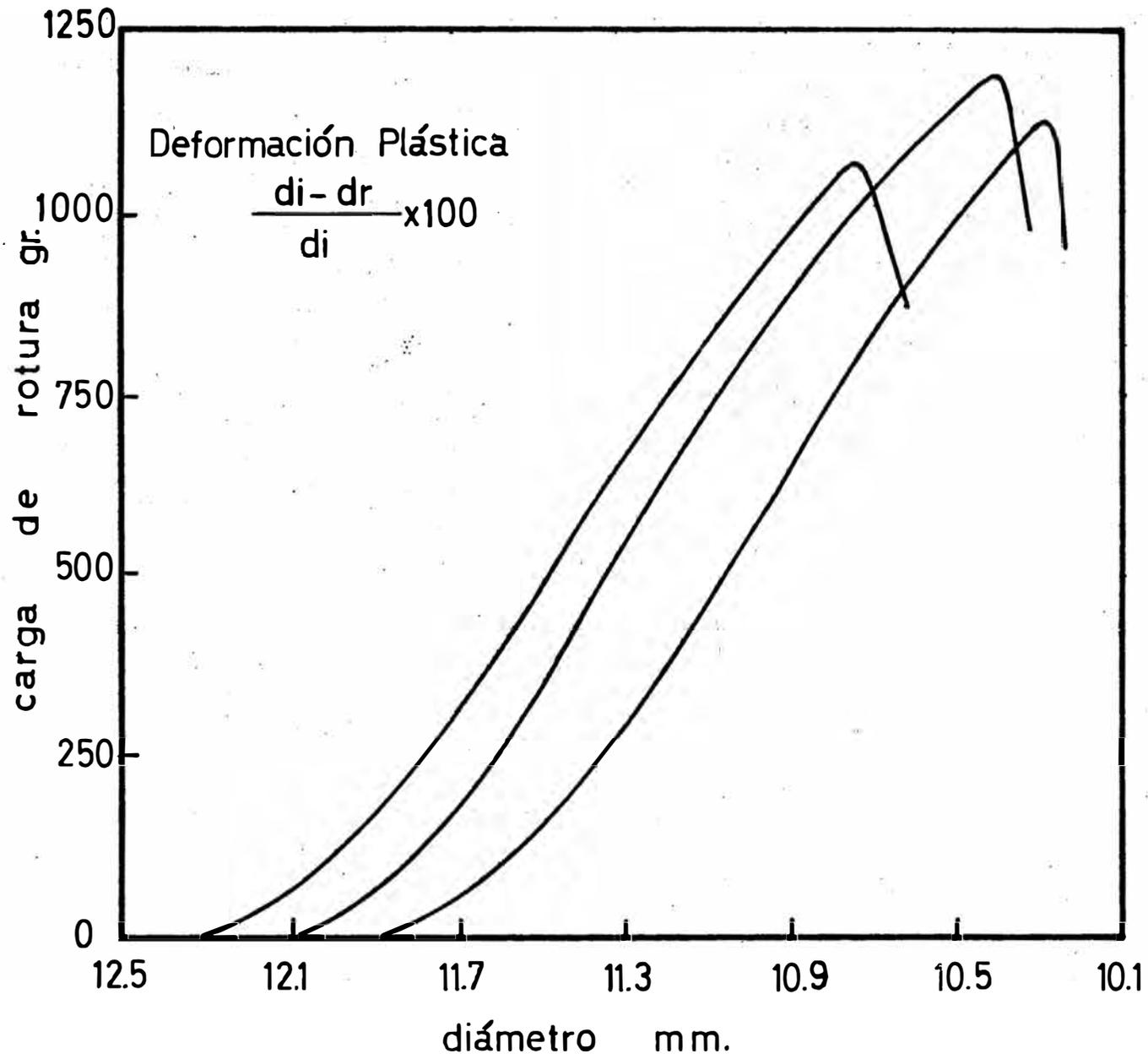


FIG. 4

pélets pueden ser determinadas por un aparato que registra y representa gráficamente (fig. 4) el diámetro inicial del pélet, el diámetro en la ruptura y la carga de ruptura.

La relación: $\frac{d_i - d_r}{d_i} \times 100$ nos da el porcentaje de de

formación, siendo:

d_i = diámetro inicial y

d_r = diámetro en la ruptura.

Una de las propiedades de los pélets que debe ser tomada en cuenta, es la resistencia al choque térmico, ya que, durante el tratamiento térmico de endurecimiento en todos los procesos usados industrialmente, los pélets verdes son sometidos a una corriente de gas caliente.

B. TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO.-

Por medio de este tratamiento, se trata de dar a los pélets la resistencia suficiente al manipuleo y asegurar las propiedades exigidas en los aparatos siderúrgicos a que se destinan.

Los mecanismos de ligación que hacen aumentar la resistencia de los pélets, con el tratamiento térmico son:

- Recristalización e intercrecimiento de cristales.

Reacciones químicas envolviendo los óxidos metálicos.

- Formación de la fase escoria.

Estos mecanismos pueden actuar simultáneamente o no, siendo el primero considerado como el más importante, ya que, originando un producto de resistencia superior, no perjudica la reductibilidad de los pélets.

Los pélets durante el tratamiento térmico de endurecimiento, pasan por una serie de etapas, las cuales en orden de aplicación son: secado, precalentamiento, quemado y enfriamiento.

En la etapa de secado, el objetivo que se persigue es la evaporación de la humedad de los pélets. Para un secado apropiado es importante tener en cuenta:

- El tiempo y la temperatura de secado.
- La velocidad y dirección del flujo de aire de secado.

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

Es de suma importancia en esta etapa, el control de la velocidad de flujo de secado, ya que cuando se emplea una alta velocidad, el vapor de agua removido se condensa en la superficie de los pélets fríos en forma de gotitas de agua, que por efecto del tiro de aire tendrá una acción erosiva sobre los pélets, produciéndose una especie de barro o "slurry" que se depositará en la superficie de los pélets y

en los vacíos entre éstos, afectando los procesos subsiguientes de peletización.

El tipo de secado a emplearse en esta etapa, es otro de los factores que juegan un papel decisivo en la calidad de los pélets, ya que cada tipo presenta sus propias características. Así tenemos que cuando se efectúa el secado de los pélets con tiro de aire descendente generalmente se emplean altas temperaturas y bajas velocidades de flujo de aire. Resulta importante anotar que el sistema de secado con tiro ascendente sea más recomendable que el que se efectúa con tiro descendente cuando el contenido de humedad de los pélets es mayor de 9%. Esto es debido a que en el tipo de secado con tiro descendente el vapor de agua que se desprende de los pélets verdes se va enfriando a medida que fluye a través de la cama de pélets, 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 pélets 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 pélets 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.

La asociación de la temperatura y velocidad del gas puede provocar la vaporización de la humedad de los pélets con rapidez mayor que la del escapamiento del vapor, provocando una sobrepresión interna y la consiguiente decrepitación del

pélet. Otros mecanismos que también provocan la decrepita -
ción por el choque térmico son las expansiones térmicas dife -
renciales, la recristalización de minerales y la contracción
de las partículas.

Los gráficos de la fig. 5 muestran los resultados obte -
nidos con pélets hechos con concentrados de taconita. Nóte -
se que para diferentes velocidades de gas, la temperatura en
que todas las pelotas permanecerán enteras es 75°C, inferior
a aquella en que el 50% de las pelotas decrepitarán, y ésta
a su vez es 75°C inferior a la temperatura que provoca el
100% de decrepitación.

El precalentamiento de los pélets es una etapa previa al
quemado, con la cual se persigue una apropiada oxidación y
un aumento gradual de la temperatura, de tal manera de some -
ter a los pélets a la temperatura de quemado sin desarrollar
esfuerzos indebidos, pero que permita el enlace y crecimien -
to de los granos de las partículas.

En esta etapa debe tenerse muy en cuenta, la velocidad
de incremento de la temperatura, ya que, el examen de micro -
fotografías ha demostrado que la cantidad de enlaces y cre -
cimiento de grano presente en un pélet quemado varía amplia -
mente, si se varía la velocidad de incremento de la tempera -
tura debido probablemente a los esfuerzos térmicos origina -
dos en el pélet durante el calentamiento.

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

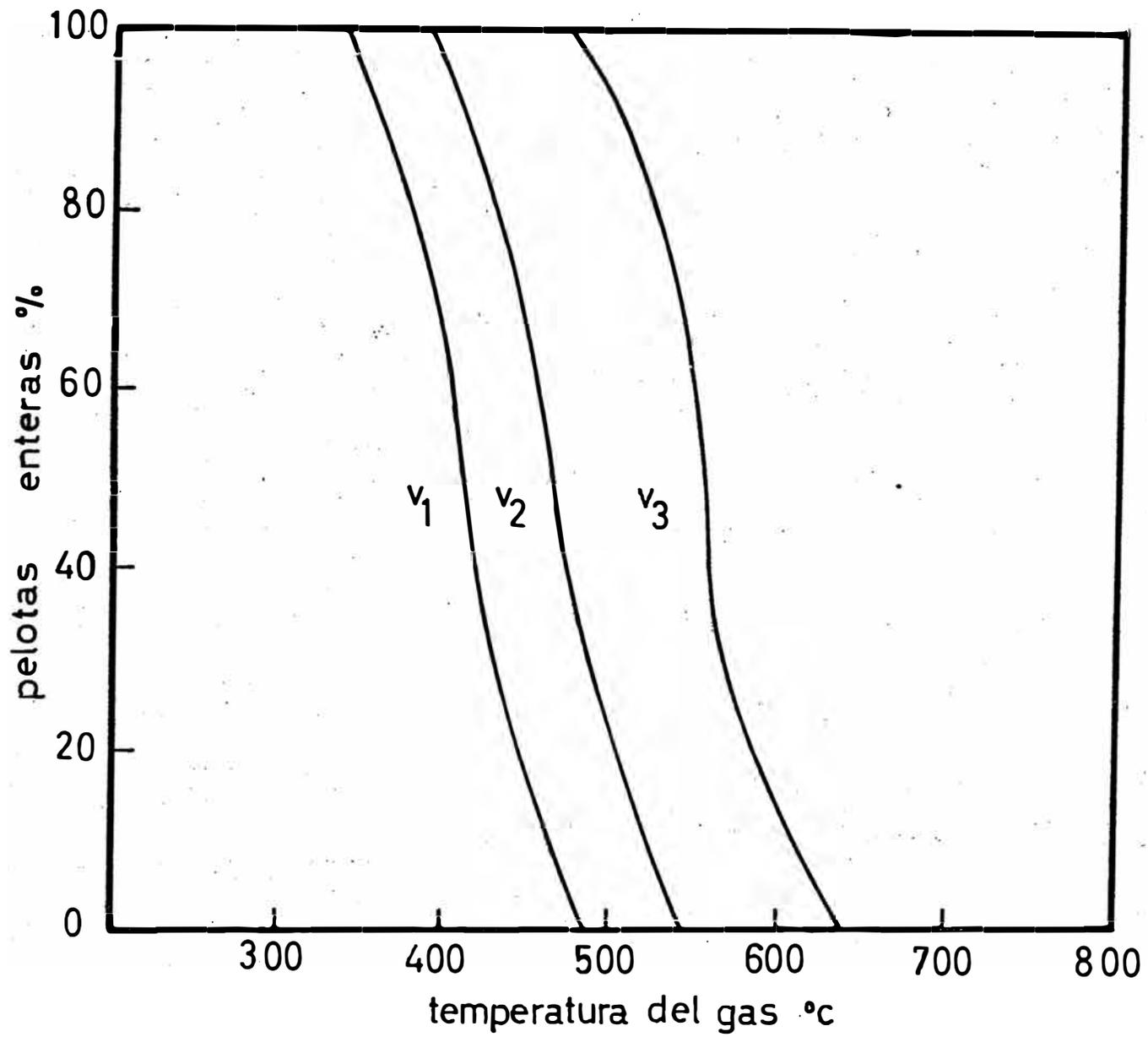


FIG. 5

que con material muy fino ocurren severas contracciones, que originan esfuerzos en el pélet, provocando en éste, pequeñas rajaduras y brechas que son muy difíciles de subsanar.

La etapa de quemado, tiene por objeto, desarrollar alta resistencia a los esfuerzos y a la abrasión en los pélets. En esta etapa del tratamiento térmico se producen las temperaturas más altas del proceso, las cuales están comprendidas entre 1,250 á 1,370°C, aunque cabe mencionar que éstas varían con el tipo de mineral a peletizar.

En esta etapa de quemado se efectúa la oxidación que no se ha llevado a cabo en la anterior etapa de precalentamiento. Es en esta parte del tratamiento térmico que se produce la formación de escoria.

Finalmente viene la etapa de enfriamiento, la cual tiene por objeto evitar un descenso violento de la temperatura del pélet. Esto debe evitarse ya que un brusco enfriamiento causaría esfuerzos internos en la red de los cristales y los enlaces de las partículas del mineral, debido a la contracción rápida del pélet.

Los pélets, al pasar de la zona de quemado a la de enfriamiento, son enfriados por una corriente de aire. Este enfriamiento permite:

- Manipular los pélets a una baja temperatura.
- Recuperar energía térmica, la que pasa de los pélets quemados al aire, el cual puede servir de esta manera como aire secundario de combustión y en la zona de secado.

5. PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD.-

Para la evaluación de las cualidades de los pélets verdes o "green balls" y de los pélets quemados, se han establecido pruebas físicas típicas o "standars" 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.

A. PRUEBAS FISICAS PARA LOS PELETS VERDES.-

Generalmente los pélets verdes tienen que soportar una rigurosa manipulación mecánica y choque térmico en el momento de introducirse en la máquina donde se efectúa el tratamiento térmico de endurecimiento; debido a esto deben reunir ciertos requerimientos mínimos de resistencia.

Las pruebas que se han establecido para la evaluación comparativa de esas propiedades son:

a. Prueba de Caída (Drop test).- Consiste en dejar caer individualmente diez pélets verdes recientemente preparados, sobre una plancha de acero, desde una altura de 45 cm (aprox. 18"). La media aritmética del número de caídas que los pélets verdes soportan sin romperse constituye el número de caída a drop number.

b. Resistencia a la compresión de pélets verdes húmedos.-

Llamada también resistencia a la compresión en húmedo, consiste en someter a los pélets verdes húmedos a com-

presión gradual mediante un probador tipo balanza. Este probador es una balanza de brazos largos; en el extremo de uno de los brazos descansa un recipiente, y el otro brazo equilibra el recipiente. Debajo del brazo que lleva el recipiente, se dispone una superficie metálica lisa, sobre la que se coloca el pélet.

Se carga luego el recipiente en forma gradual con perdigones, hasta causar la fractura del pélet, se pesa luego el recipiente con los perdigones en una balanza de laboratorio, y este peso se registra como la medida de la resistencia a la compresión del pélet probado. Debe tenerse cuidado para evitar cualquier esfuerzo diferente que el de pura compresión. El índice de resistencia a la compresión es generalmente la media de las cargas de ruptura de diez pélets.

Es dable anotar, que existen aparatos en los cuales la carga de ruptura del pélet es aplicada eléctricamente, con lo cual se evitan resultados ficticios.

c. Resistencia a la compresión de pélets verdes secos.-

Llamada también resistencia a la compresión en seco, se efectúa tomando diez pélets húmedos que son secados durante 24 horas en una estufa, luego sometidos a compresión en el probador tipo balanza anteriormente mencionado.

Se toma como índice de resistencia a la compresión, la media de las cargas de ruptura de los diez pélets secos.

B. PRUEBAS FÍSICAS PARA LOS PELETS QUEMADOS.-

La calidad de los pélets quemados puede ser determinada por diferentes pruebas de materiales que nos den a conocer su tenacidad, dureza y resistencia a la compresión. Cada una de estas propiedades están referidas al grado de coherencia de las partículas en el pélet.

Ban y Erck han descrito tres métodos, que han sido establecidos como standars para evaluar a los pélets quemados, - éstos son:

- a. Prueba de Compresión (Comprension test).- Esta prueba determina la resistencia que tienen los pélets para soportar esfuerzos de compresión.

La prueba consiste en someter al pélet a un estado de compresión colocándolo entre el pistón de una prensa y una placa fija de acero. La presión requerida para provocar la trituración se convierte en kilogramos o libras de carga, tomándose ésta como la medida de la resistencia a la compresión del pélet.

El índice de resistencia a la compresión está dado generalmente por el promedio de las medidas de resistencia de diez pélets.

- b. Prueba de Abrasión (Tumble test).- Esta basada en la prueba standard para coke, según el ASTM, con modificaciones específicas para la evaluación de pélets quemados. La muestra para esta prueba consiste de material de pélets 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. El tambor se rota a razón de 24 r.p.m. hasta completar 200 revoluciones.
 - 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.
- c. Prueba de Impacto (Impact test).- Esta prueba se realiza para determinar la tenacidad de los pélets o la resistencia relativa a la subdivisión debido a fuerzas de impacto. Estas fuerzas son impartidas dejando caer los pélets desde una altura predeterminada (33 1/3 pies) sobre una plancha de acero. La cantidad de muestra que se toma para cada prueba es de 1,000 gramos de pélets.
- Un índice de resistencia que evalúe esta prueba es de terminado mediante el método de Coghil. Este punto,

es visto con detenimiento en el capítulo tres.

6. AGLOMERANTES. CARACTERISTICAS. BENTONITA.-

La obtención de resultados satisfactorios para todas las propiedades de los pélets, no es una tarea fácil, debido a que las mejoras en una de ellas puede traer consigo la disminución en otras afectando la calidad del pélet.

A fin de conciliar estas características son utilizados los aglomerantes.

Toda buena sustancia aglomerante debe reunir las siguientes características:

- 1°- La granulometría del aglomerante debe ser tal que le permita ocupar los volúmenes intersticiales del mineral.
- 2°- No debe contaminar al mineral (uso en pequeñas cantidades).
- 3°- Cuando el pélet está crudo y seco debe favorecer las fuerzas de cohesión.
- 4°- En el tratamiento térmico de endurecimiento debe favorecer la resistencia de los pélets al choque térmico.
- 5°- Debe servir como agente de adherencia entre las partículas del mineral.

De entre varios aglomerantes usados, van siendo mundialmente preferidas las bentonitas que son arcillas de fórmula $Al_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$ conteniendo cierta cantidad de (HO) substituída por álcalis o tierras alcalinas.

La bentonita se emplea debido a que encierra en su estructura partículas coloidales que son rápidamente dispersables

y al contacto con el agua produce un gel, haciendo que los pélets tengan más cohesión; dándole a los pélets verdes mayor resistencia y tamaño uniforme.

La bentonita desempeña una función importante ya que uniformiza el contenido de agua en todo el pélet, en base a su gran capacidad de absorción de agua (hasta 16 veces su volumen), de esta manera se evita que el agua fluya hacia la periferia, con lo cual los pélets verdes se deformarían, perdiendo así su forma esferoidal.

Las bentonitas sódicas son las más usadas en la peletización por su propiedad de dispersión espontánea, causada por la separación de las láminas constituyentes.

7. TIPOS DE EQUIPO EMPLEADO.-

El mineral en bruto rico o el concentrado pasa primeramente por molinos de bolas, que forman un circuito cerrado con los hidrociclones; en los molinos de bolas el mineral o concentrado es molido hasta alcanzar la fineza apropiada para la peletización. Después de ser espesado y almacenado en tanques provistos de agitadores, el mineral fino pasa por filtros de dis-cos para que se reduzca el contenido de humedad a un 9% aproximadamente. Como aditivos para la peletización se usan bentonita o cal apagada.

La bentonita o la cal apagada se añaden al mineral fino en un mezclador de acción intensiva. La mezcla pasa luego

al equipo boleador o peletizador, donde se forman los llamados pélets verdes.

FORMACION DE PELETS VERDES.-

Los pélets verdes cuyo tamaño es de 10 á 16 milímetros, se forman en un equipo boleador o peletizador. Este equipo generalmente está constituido por discos o por tambores rotatorios.

A. FORMACION DE PELETS VERDES EN DISCO.-

El aparato es esencialmente un disco rotatorio, con pared periférica y que trabaja inclinado respecto a la horizontal. El agua se agrega con rociadores. Se dispone además de raspadores para impedir el amontonamiento de material y además para dirigir el flujo de éste en el disco. Cuando las pelotas alcanzan el tamaño deseado son descargadas del disco que actúa como clasificador, aunque para cumplir con la limitación estricta de tamaño de la práctica moderna (10-16 mm) para los pélets verdes, se harnea el producto separando el bajo tamaño y el sobretamaño. Este último es desmenuzado y agregado al material alimentado. El bajo tamaño es devuelto al disco.

El material así reciclado puede alcanzar al 25%, aunque la tendencia actual es a mantener un nivel menor de retorno.

El disco también actúa como mezclador. Los principales parámetros que controlan la producción y el movimiento del material del disco son:

- el diámetro del disco,

- el ángulo de inclinación,
- la velocidad de rotación, y
- la altura del borde periférico.

La velocidad de rotación debe ser optimizada para cada material, lo que se logra aumentando la velocidad y el ángulo del disco hasta que se obtiene la mejor utilización. Una velocidad excesiva reduce la eficiencia del pelotamiento y puede provocar fracturación de las pelotas por impactos entre ellas y contras el borde periférico.

La resistencia de las pelotas es aumentada por compactación a medida que ellas bajan rodando, por lo que reduciendo el ángulo del disco la componente normal de la gravedad aumenta, incrementando la resistencia de las pelotas. Cuando el diámetro aumenta, la velocidad a la que descienden las pelotas crece, de modo que es preciso reducir el ángulo para evitar velocidad excesiva de descenso, que puede ocasionar degradación. Así habría una combinación óptima de ángulo de inclinación y velocidad de rotación para un material dado.

El pelotamiento en el disco tendría lugar en dos etapas:

- a. Formación de núcleos, y
- b. Crecimiento de las pelotas hasta el tamaño deseado.

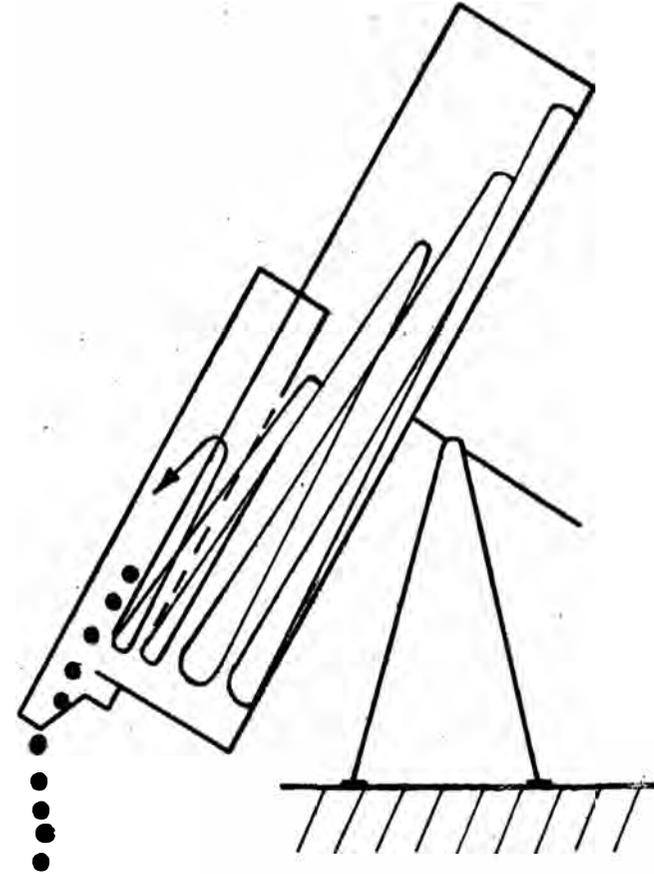
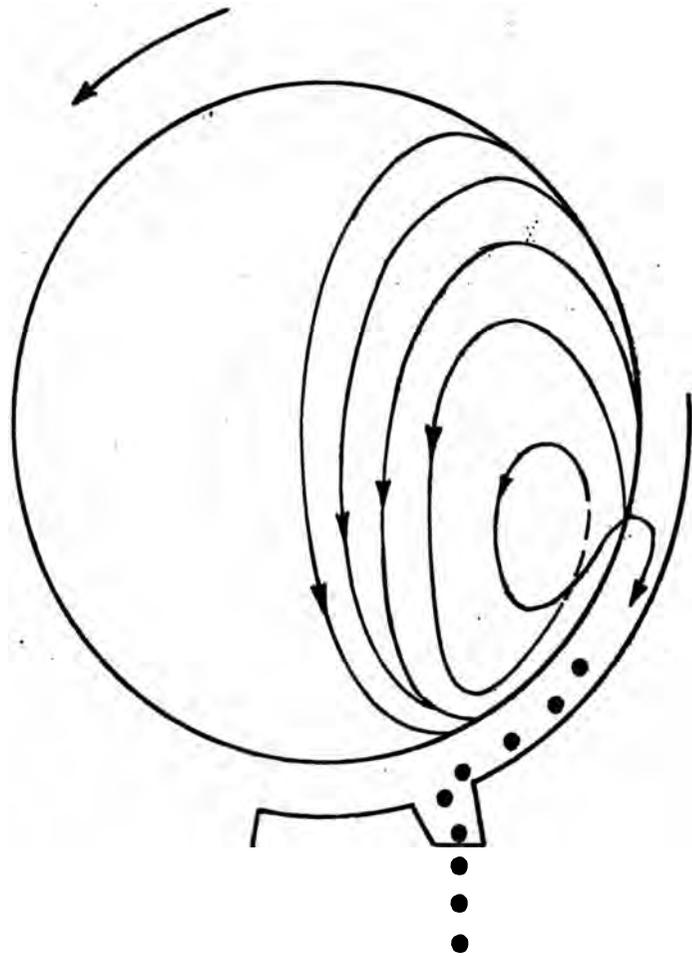
La formación de núcleos tiene más posibilidades de verificarse en la zona de los rociadores, donde es más probable que las partículas se saturen de agua.

El disco tiene una cierta flexibilidad para variar el punto de alimentación y los rociadores de agua. De este mo

do, la alimentación seca que pueda requerir apreciable tiempo para saturarse, se puede cargar directamente bajo los rociadores de agua para promover la formación de núcleos. Las pelotas de tamaño requerido son continuamente removidas del disco, lo que debe ser balanceado por la producción de un número igual de nuevos núcleos. El agua total agregada debe ser estrechamente regulada para producir un flujo continuo de pélets verdes de buena calidad.

Hay un tiempo específico de residencia en el disco para cada material de modo que resulten pelotas del tamaño requerido. La cantidad de material en el disco es una variable importante, ya que el tiempo de residencia debe ser igual al tiempo de pelotamiento si se quiere optimizar la utilización del disco. Así, para una velocidad de alimentación e inclinación dadas, el tiempo de residencia puede ser ajustado variando el alto del borde periférico. Según Bazilevich, la carga óptima sería de 0.20 ton/m^2 de área de disco, y sobrecargando más que tal cantidad perjudicaría el pelotamiento y reduciría la producción.

Se ha demostrado que el disco produce una distribución de tamaño autoprotectora, cuyo rango es función del material y del tiempo de residencia en la zona de crecimiento de las pelotas. El rango de tamaño disminuye a medida que el crecimiento avanza al estado estabilizado.



Carácter de movimiento del material en el disco peletizador

FIG. 6

B. FORMACION DE PELETS VERDES EN TAMBOR.-

El aparato consiste en un tambor rotatorio, inclinado, con una razón de largo a diámetro igual: 2.5 á 3.5. La carga se agrega en el extremo más alto, donde también están situados los rociadores. A diferencia del disco, en el tambor no hay clasificación del producto, lo que se hace por harnero, reciclándose el bajo tamaño y el sobretamaño (previamente desmenuzados). Se tiene un mecanismo raspador para impedir acumulación en las paredes. El ángulo de inclinación es de unos 6°; es usual tener un anillo retenedor en el extremo de descarga. El tiempo de residencia en el tambor será:

$$T = \frac{0.037 (\alpha + 24) L}{n D S}$$

en que:

T = tiempo residencia en minutos.

L = largo tambor en pies.

D = diámetro en pies

n = RPM

S = inclinación (in/pie de largo).

α = ángulo de reposo del material alimentado.

Idealmente podría operarse el tambor tal como el disco, donde el tiempo para el crecimiento de la pelota es igual al tiempo de residencia, pero en la práctica no es posible ya que el tambor no actúa como clasificador, y además para pro

ducir pelotas de buena calidad hay una velocidad y espesor del material óptimos en el tambor. Esta velocidad es usualmente 25 á 35% de la velocidad crítica a la cual el material se centrifugaría. Un aumento de la velocidad óptima es perjudicial por producir movimiento violento a la carga, "cataratas", que causan degradación de las pelotas. Cuando el tambor opera a la velocidad óptima, el material primero cargado se desliza hasta que al agregar más material empieza a rodar, promoviéndose una acción conocida como "cascada", con toda la carga activa en una doble acción rodante. Si se agrega aún más carga esto atora el material y la acción de rotación del tambor sólo provoca que la capa de material rote sobre sí misma.

La carga correcta para dar la adecuada acción rodante en "cascada" es muy pequeña, equivalente al 5% del volumen del tambor.

La carga del tambor es expresada a veces como:

- a. Razón de la sección transversal de material a la del tambor;
- b. Angulo subtendido al centro del tambor por la cuerda correspondiente a la superficie del material con el tambor detenido (varía de 90 a 110°);
- c. Espesor de la capa con tambor detenido.

La operación del tambor está restringida a la satisfacción de tres condiciones:

- Velocidad de rotación,

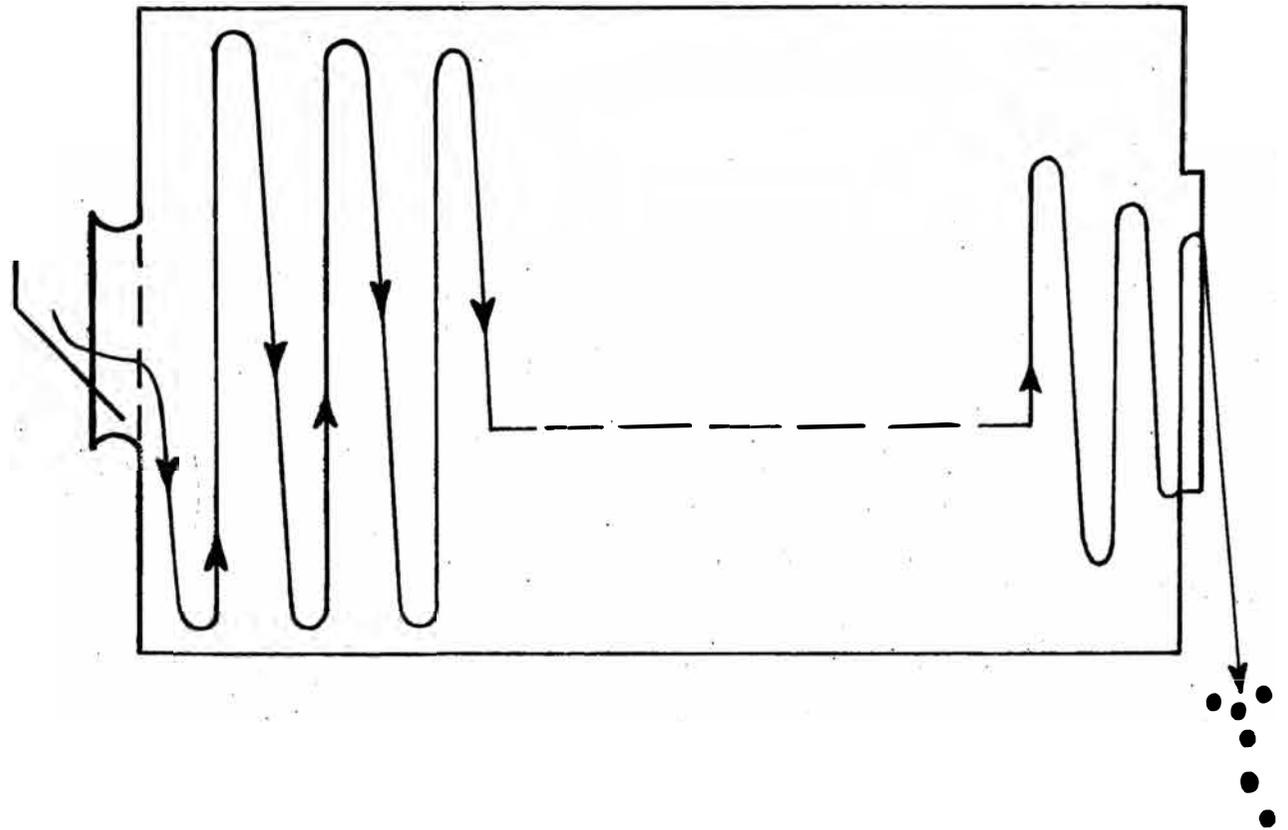
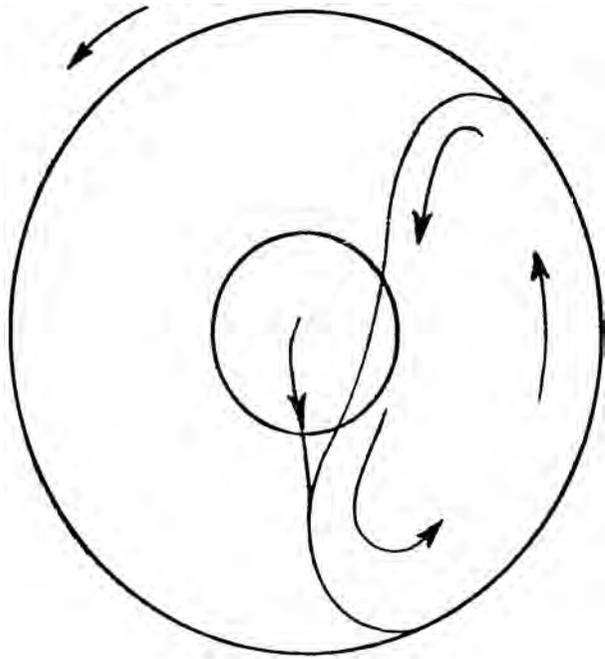
- Espesor del material, y
- Tiempo requerido para pelotamiento.

Luego de la formación inicial de núcleos, el crecimiento de las pelotas avanzará por asimilación a lo largo del tambor. Si se quisiera alcanzar el tamaño de bola requerido en una sola pasada, el tambor tendría que ser demasiado largo y aún así se obtendría una gran diversidad de tamaños con recirculación enorme. Por ello, los tambores se operan en circuito cerrado; efectuándose el crecimiento total en varias pasadas por el tambor. Suficientes núcleos deben formarse para reemplazar las pelotas que van produciéndose, la producción de éstas debe estabilizarse.

La producción puede ser aumentada incrementando las dimensiones del tambor, pero para determinado diámetro la velocidad y el espesor del material podrán variar sólo dentro de estrechos límites. En la práctica el tiempo de residencia se puede ajustar variando la cantidad alimentada y la velocidad de rotación.

Es importante la sensibilidad al porcentaje de agua, que al alterar la velocidad de crecimiento de las bolas y la formación de núcleos puede causar irregularidades en la producción.

La utilización del tambor, estimada en 40% de su área, es menor que la del disco; mientras un disco puede producir 20 toneladas de pélets por m^2 , los tambores producen 7 á 12 ton/m^2 . Se estima que para plantas grandes, los discos ocupan 30% menos espacio y también su costo de capital es menor



Carácter de movimiento del material en el tambor peletizador

FIG. 7

que para tambores. Además, por menores cargas circulantes los discos requieren menos energía y mantención. En cambio se considera que los discos requieren más mano de obra de supervisión.

TRATAMIENTO TERMICO DE ENDURECIMIENTO.-

Los principales tipos de equipo empleados industrialmente para el tratamiento térmico de endurecimiento de los pélets verdes son:

Horno de Cuba (Horno Vertical).

Parrilla Movil.

Parrilla Movil-Horno Rotatorio.

A. HORNO DE CUBA (Horno Vertical)

El horno de cuba fue el primero en ser usado industrialmente. Su atractivo es la simplicidad de diseño y la posibilidad de bajo consumo de combustible (el consumo medio de combustible por tonelada de pélets en estos hornos va siendo mejorado de año a año). Estos hornos en su mayoría, están siendo usados para producir pélets a partir de concentrados de magnetita.

En este horno el tratamiento térmico es hecho en tres etapas:

El secado en los primeros 1/20 del horno, a partir de la parte superior de éste.

El quemado en los 4/20 siguientes.

El enfriamiento en los 15/20 restantes.

Actualmente los hornos son de sección rectangular, las dimensiones corrientes son 18.3 metros de alto, de sección de 4.1 metros de largo por 2.1 metros de ancho, más recientemente serían de 6.4 x 2.1 metros, con una alimentación de 60 toneladas por hora con una producción aproximada de 1,000 toneladas por día de pélets. El tiempo de permanencia es de poco menos de 4 horas con una velocidad descendente de unos 43 mm/min.

El calor agregado al proceso proviene de la combustión de petróleo de dos cámaras cilíndricas, manteniéndose la temperatura de combustión cercana a los 1,290°C. El aire precalentado y los productos de combustión entran por una serie de aberturas en las cuatro paredes y a unos 2.6 metros bajo la parte superior del horno. Los ejes de los quebradores son enfriados interiormente por agua. Las entradas de aire de enfriamiento están inmediatamente bajo los quebradores. Este aire sube enfriando en contracorriente la columna descendente de pélets.

En la parte superior del horno los pélets alcanzan temperaturas sobre 1,320°C, debido a la oxidación de la magnetita. El gas de salida en la parte superior tiene unos 150°C. La gradiente calórica es brusca, alcanzando los pélets verdes una temperatura de 1,320°C a unos 2.5 metros de la parte superior. Los pélets permanecen a esta temperatura hasta pasar las entradas del aire de las cámaras de combustión, bajo las cuales se van enfriando progresivamente. La temperatura de

descarga depende del ritmo de producción y de la cantidad de aire enfriador introducido.

El control térmico es bastante difícil, pues los pélets colocados a la salida de las cámaras de combustión son sometidos a temperaturas bastante más elevadas que aquellas situadas en la parte central del horno. En vista de esto, hay frecuentemente el empaquetamiento de los pélets formando bloques que son deshechos por los quebradores o desagregadores - colocados en la parte inferior.

Estos hornos tienen poca flexibilidad y no es fácil equilibrar los requerimientos del horno, bajo las entradas de las cámaras de combustión, con las necesidades de aire para los quemadores y las necesidades de aire para secar, en la parte superior. Para una operación equilibrada se requeriría que: $\text{aire de enfriamiento} + \text{aire de combustión} = \text{aire para secar}$ en parte superior.

Pero usualmente la suma del primer término excede el aire necesario para secar. Una solución sería extraer el aire de enfriamiento y calentado, o sea bajo la zona de las entradas del aire de combustión, y usarlo como aire para los quemadores. Esto ha resultado en dificultades para los quemadores y cámaras de combustión por el polvo arrastrado por dicho aire. Como alternativa se han ensayado enfriadores separados e intercambiadores de calor y también enfriamiento parcial en el horno, complementado por enfriadores externos.

La operación en este horno es muy sensible a la calidad

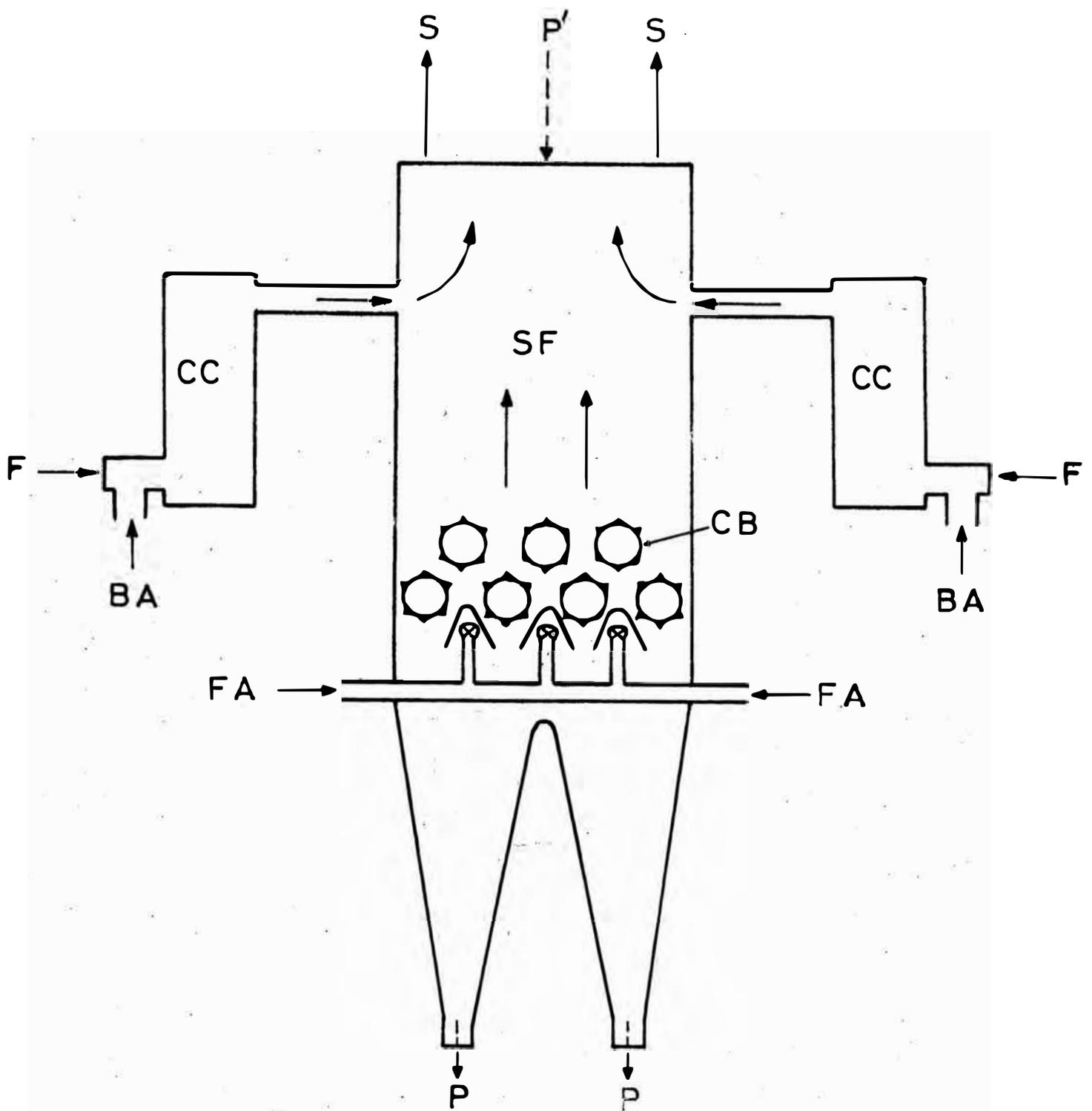


FIG. 8 Diagrama simplificado del horno vertical

- SF = Horno Vertical
- F = Combustible
- BA = Aire para quemadores
- CC = Cámara de combustión
- S = Escape a chimenea
- P' = Pélets verdes
- CB = Quebradores
- FA = Aire (enfriamiento)
- P = Pélets

de los pélets verdes y a una alimentación uniforme. Variaciones en la sensibilidad calórica de los pélets resultarían en decrepitación, canalización, formación de aglomeración. - Es necesario operar muy cerca del punto de fusión de los materiales, lo que también puede producir aglomeración. La corta zona de quemado implica que si el % de magnetita en los pélets verdes baja, se tendrá dificultades por disminución de calor exotérmico de oxidación.

B. PARRILLA MOVIL.-

Es el sistema más usado actualmente en el mundo, más del 40% de la producción mundial de pélets se realiza con este sistema.

Existen actualmente tres modelos de parrilla móvil en uso en la producción industrial de pélets.

MODELO MCDOWELL : el modelo idealizado por la McDowell inicio la producción mundial de pélets a partir de minerales hematíticos. Las pelotas crudas son envueltas en una camada de carbón, siendo aquí el procesamiento semejante al usado en la sintetización.

La máquina está dividida en tres zonas: ignición, quema y enfriamiento.

En la primera, la circulación de los gases es hecha con tiraje inferior. En la zona de enfriamiento, el aire frío es insuflado de abajo hacia arriba a través de los pélets resultando gases calientes que son recirculados por la zona de quema, también con tiraje superior.

El consumo de calorías por tonelada de pélets llega a ser superior a 350,000 Kcal.

MODELO MCKEE: Este modelo somete a los pélets a seis etapas distintas:

- a. Secado con tiraje superior;
- b. Secado con tiraje inferior;
- c. Precalentamiento con tiraje inferior;
- d. Quema con tiraje inferior;
- e. Primera etapa de enfriamiento con tiraje superior;
- f. Segunda etapa de enfriamiento con tiraje superior.

El sistema de parrilla móvil recta McKee usa espesor de capa de 330 mm a 425 mm. En la última sección del quemado las 3 á 4 pulgadas superiores a la capa de pélets alcanzan temperaturas de 1,290 á 1,300°C.

Una usina que produce 9'000,000 de toneladas al año, utilizando este tipo de parrilla para minerales magnetíticos, ocasiona un consumo de calorías del orden de 220,000 Kcal/Ton.

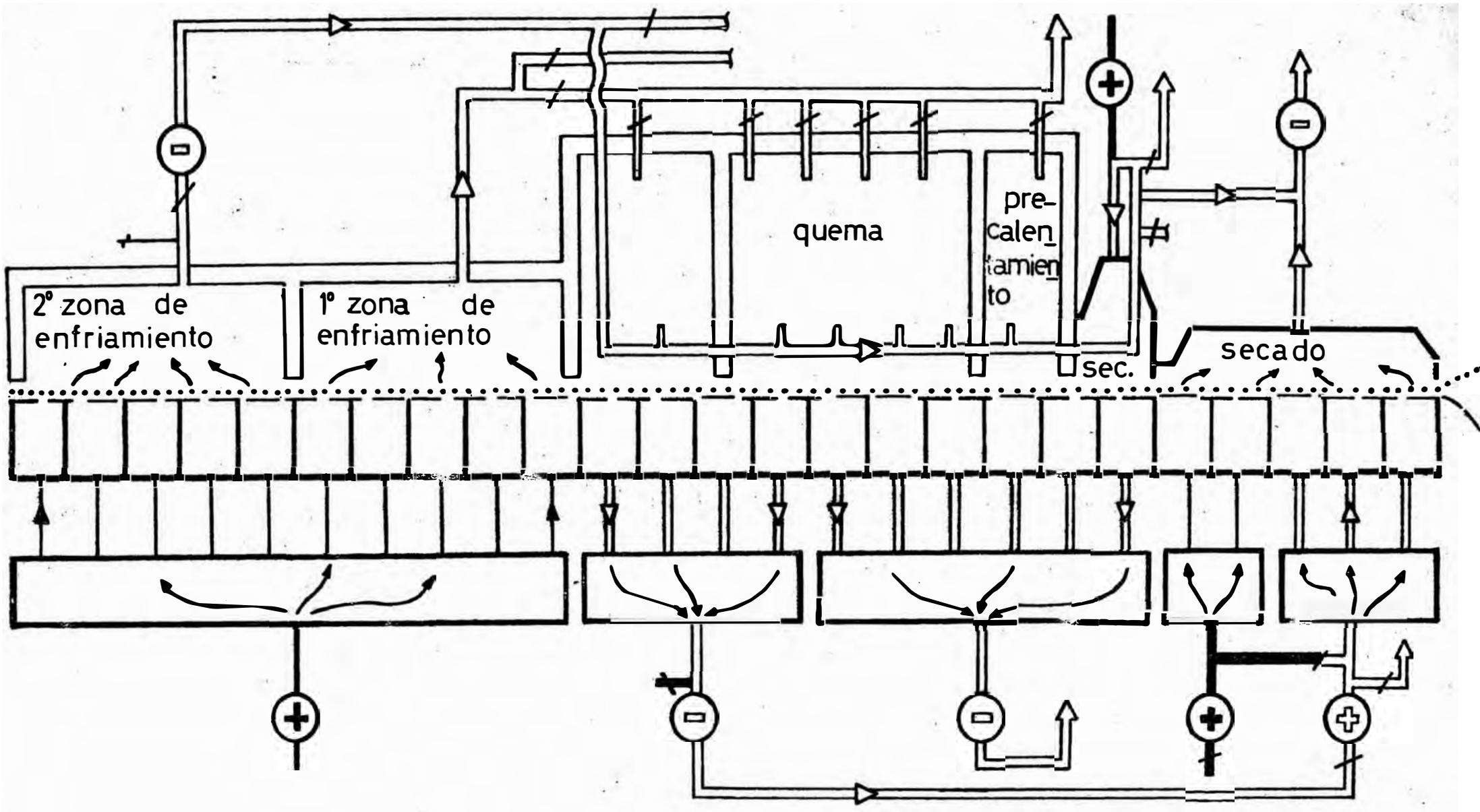
En una modificación posterior se usa sólo secado ascendente, resultando menor consumo de combustible y mejor protección térmica a las barras de la parrilla. No se usa capa protectora de pélets quemados y las barras son de Ni-Cr 12-15.

Una innovación de este sistema es la parrilla móvil circular, la primera de las cuales ha sido instalada por A.G. McKee en La Perla, Chihuahua, México, para la Planta Constitución, de Altos Hornos de México. Con ella se trata de supe-

rar la dificultad en las parrillas móviles rectas para una buena distribución del calor en los lados y eliminar las fugas de aire, lo que se evita con sellos de agua. Se prevé además costos de operación menores por menor consumo de energía y combustible.

MODELO LURGI-DRAVO: Finalmente tenemos el modelo Lurgi-Dravo (fig. 9), semejante al sistema de parrilla móvil recta McKee, la modificación más sensible es en el sistema de recuperación de los gases entre las diferentes zonas y en la recirculación de pélets quemados, formando camadas de retorno en las partes central y lateral de la parrilla.

En América Latina, de las 18 plantas en operación, construcción o proyecto, 14 ó sea el 78%, emplean el proceso de parrilla móvil recta tipo Lurgi-Dravo. En la figura 10, se muestra una típica planta de este proceso en el cual un transportador de rodillos sirve para la distribución uniforme de los pélets en la parrilla móvil. Durante el proceso de endurecimiento en la parrilla móvil tal como se observa en la figura 9, los pélets pasan también por seis etapas distintas en que el tiraje de los gases se hace de la misma forma mencionada para la parrilla móvil recta tipo McKee. En esta figura está señalado también el sentido de circulación de los gases. Para la circulación del aire y de los gases necesarios se han instalado varios soplantes. El gas es conducido de tal manera que el consumo de energía es reducido a un mínimo. En



Horno Parrilla Movil Modelo Lurgi-Dravo

FIG. 9

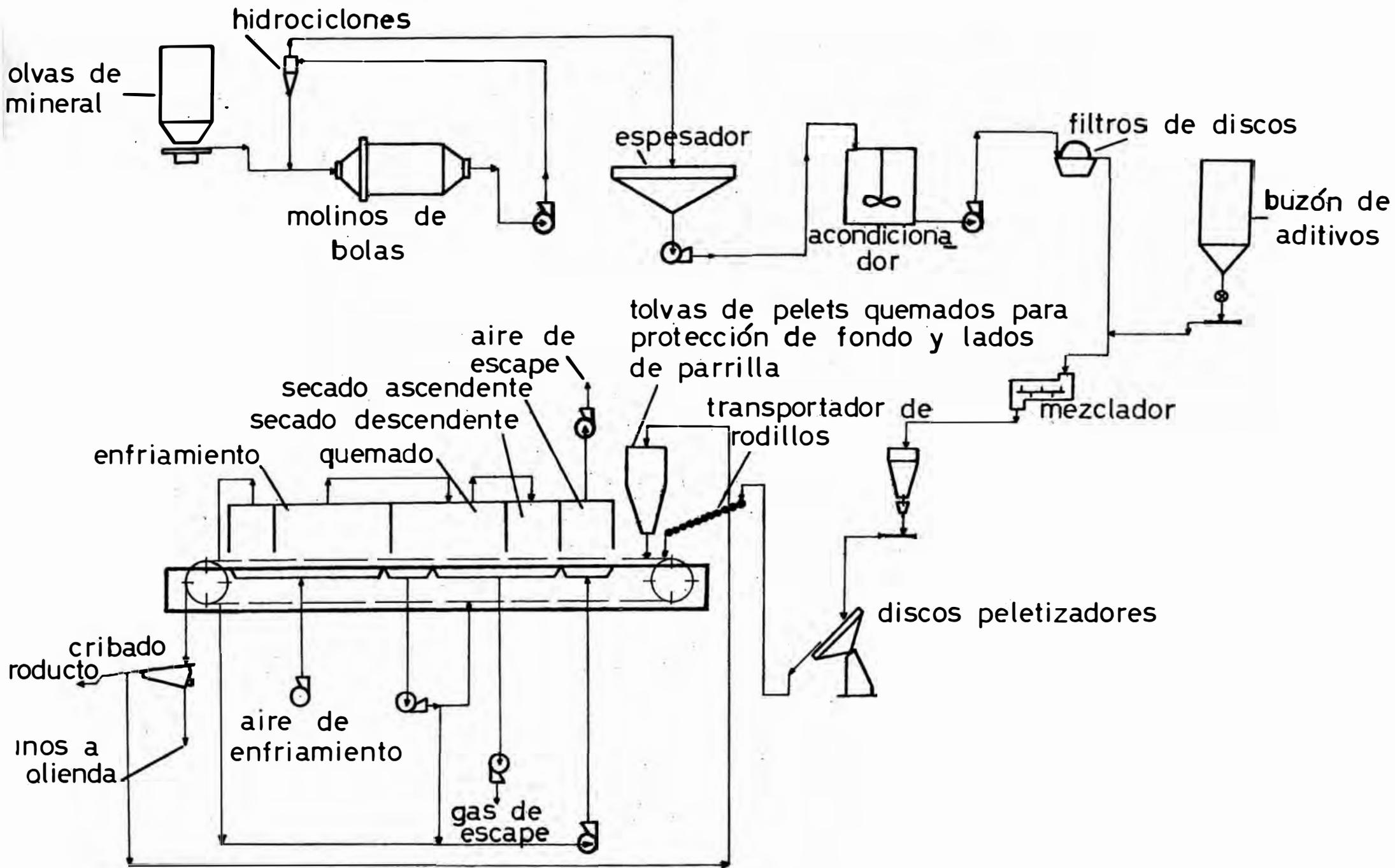


FIG. 10 Fluxograma de la Planta CVRDII en Brasil con molienda y peletización con el sistema de parrilla recta móvil tipo Lurgi-Dravo

la zona de quema se encuentran instalados los quemadores de gas o petróleo pesado, que producen el calor necesario para el endurecimiento de los pélets.

Los pélets endurecidos son cribados y los finos de abrasión son recirculados a los molinos para ser sometidos a otro proceso de molienda. De la producción de pélets se saca una parte que sirve como material de sobre parrilla y de protección lateral. De esta forma se garantiza la protección de la parrilla, así como un quemado uniforme de los pélets.

El consumo de calorías por tonelada de pélets producidos, hechos con mezclas de minerales hematíticos y magnetíticos es del orden de 230,000 Kcal.

C. PARRILLA MOVIL HORNO ROTATORIO.-

El tercero de los procesos usados industrialmente, es el "Grate-Kiln", de la Allis Chalmers, asociación de una parrilla a un horno rotativo (fig. 11).

La ventaja de dividir el endurecimiento en dos operaciones separadas, es que se pueden secar y precalentar los pélets verdes (siendo ambas fases con tiraje inferior) en una parrilla móvil corta y relativamente de bajo costo y luego lograr uniformidad de quemado en un horno rotatorio, semejante a los usados en la industria del cemento. Finalmente los pélets son transferidos a un enfriador anexo, donde las camadas de

pélets son atravesadas por una corriente de aire frío, con tiraje superior. La recuperación de calor es hecha por introducción del aire que fue calentado en la primera mitad del enfriador, en el horno rotativo. Los gases del horno rotativo van para la zona de precalentamiento de la parrilla y, de ahí para la zona de secado.

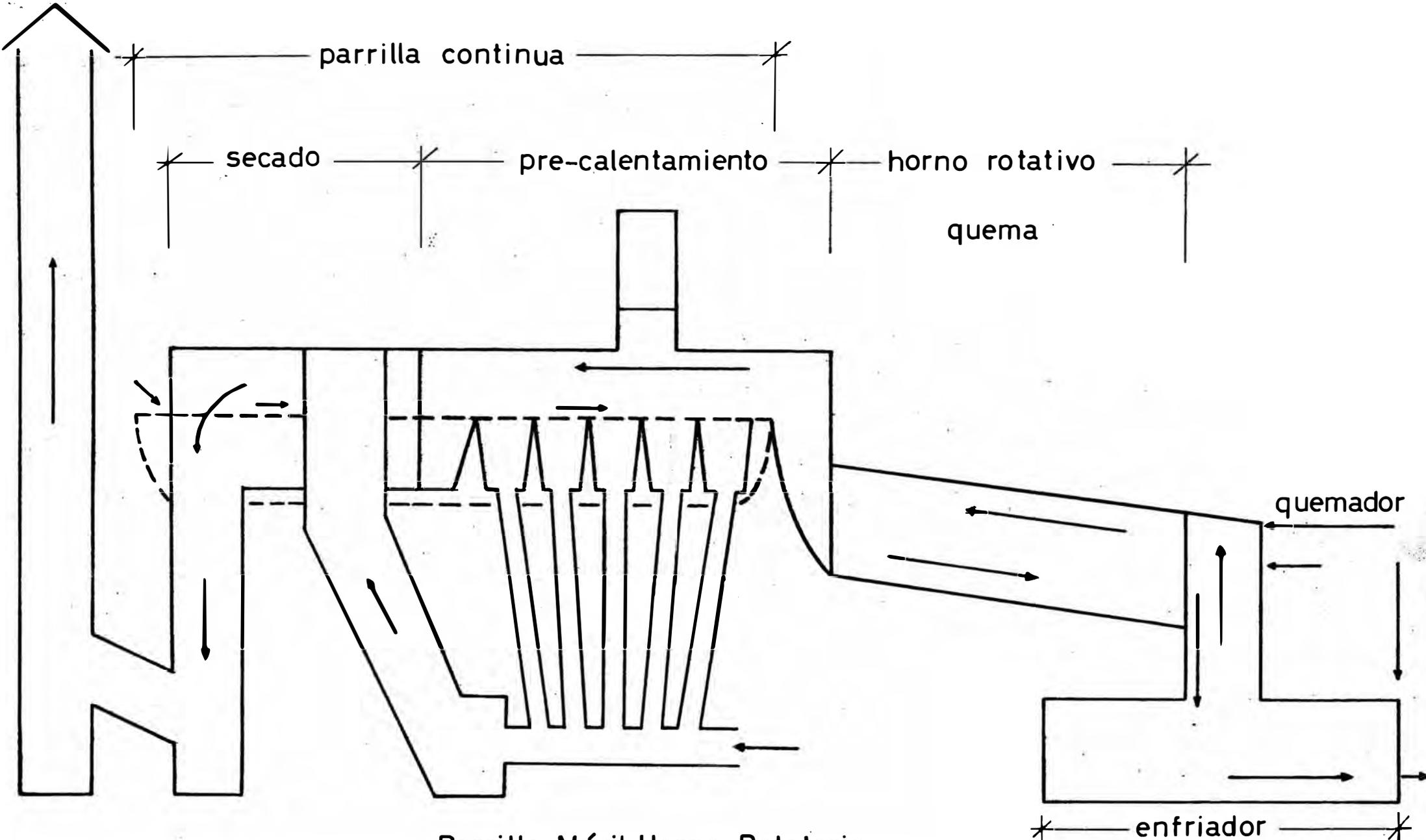
Una de las primeras dificultades en la operación de este sistema era lograr distribución uniforme de temperatura al final de la parrilla para tener pélets de suficiente resistencia para transferir al horno rotatorio.

La fracturación de los pélets en la transferencia producía polvo fino que se pegaba en el horno. Se ha superado esta dificultad con mejor diseño para los pélets ácidos, pero para los pélets autofundentes se deben usar quemadores auxiliares sobre la parrilla.

La ventaja de este proceso es que producen pélets de calidad más uniforme que por horno vertical o parrilla móvil. Además la rotación del horno muele los pélets quebrados para recircularlos. Habría también una posibilidad de que se sellaran las grietas de los pélets durante su paso por el horno. El tiempo de tratamiento también sería menor.

Una desventaja es que los pélets adquieren una superficie más compacta que daría menor reductibilidad.

El "Grate-Kiln", está siendo usado para minerales hematíticos, mezclas de minerales hematíticos y magnetíticos y para minerales magnetíticos. Con mine -



Parrilla Móvil-Horno Rotatorio

FIG. 11

rales hematíticos, el consumo de calorías es del orden de 250,000 Kcal/Ton.

Hecha la descripción de los diversos métodos utilizados en el tratamiento térmico de endurecimiento de los pélets verdes, la comparación de éstos da una idea más clara, sobre la elección conveniente del método a aplicar. Esta comparación se pone de manifiesto tanto en las figuras 12 y 13 como en la tabla número 1.

En la figura 12 se tienen las curvas para los procesos en horno vertical, parrilla móvil y parrilla-horno rotatorio. Mediante esta figura puede apreciarse que el tiempo de endurecimiento es muy largo para el horno vertical, intermedio para la parrilla-horno rotatorio y muy corto para la parrilla móvil.

Estas curvas se refieren al tratamiento óptimo que reciben los pélets, pero por flujo gaseoso irregularmente distribuido, parte de los pélets tienen tratamiento inferior, salvo en la parrilla-horno, en que por la rotación todos los pélets obtienen similar tratamiento. La tabla número 1 muestra datos de operación de los tres procesos para producción equivalente.

El horno vertical tiene menor consumo de petróleo por mayor eficiencia del intercambio de calor en contracorriente, pero tiene mayor consumo de energía porque los gases deben ser forzados a través de un espesor mayor de pélets, de unos 10 metros.

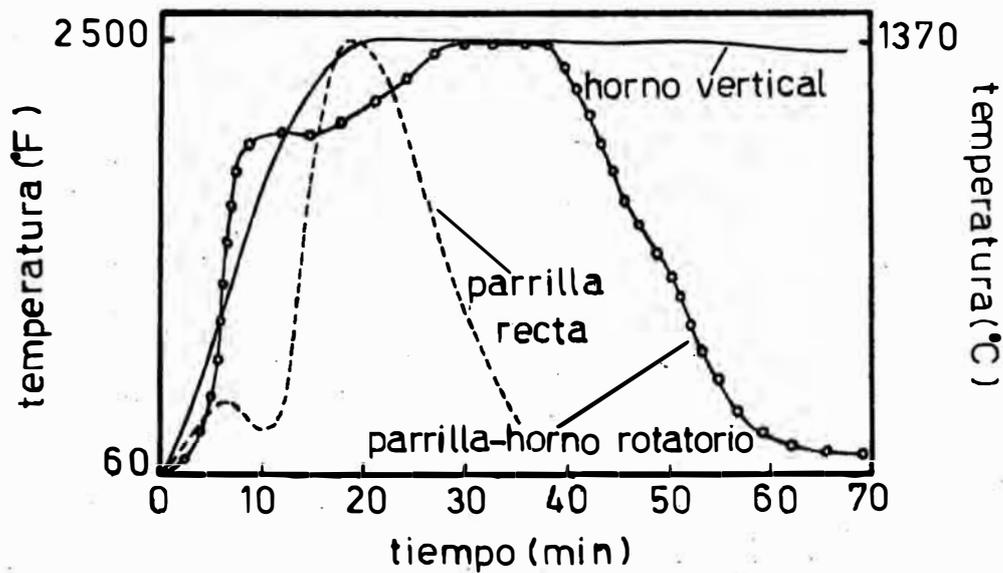


FIG. 12 Curvas temperatura-tiempo para los tres procesos de quemado

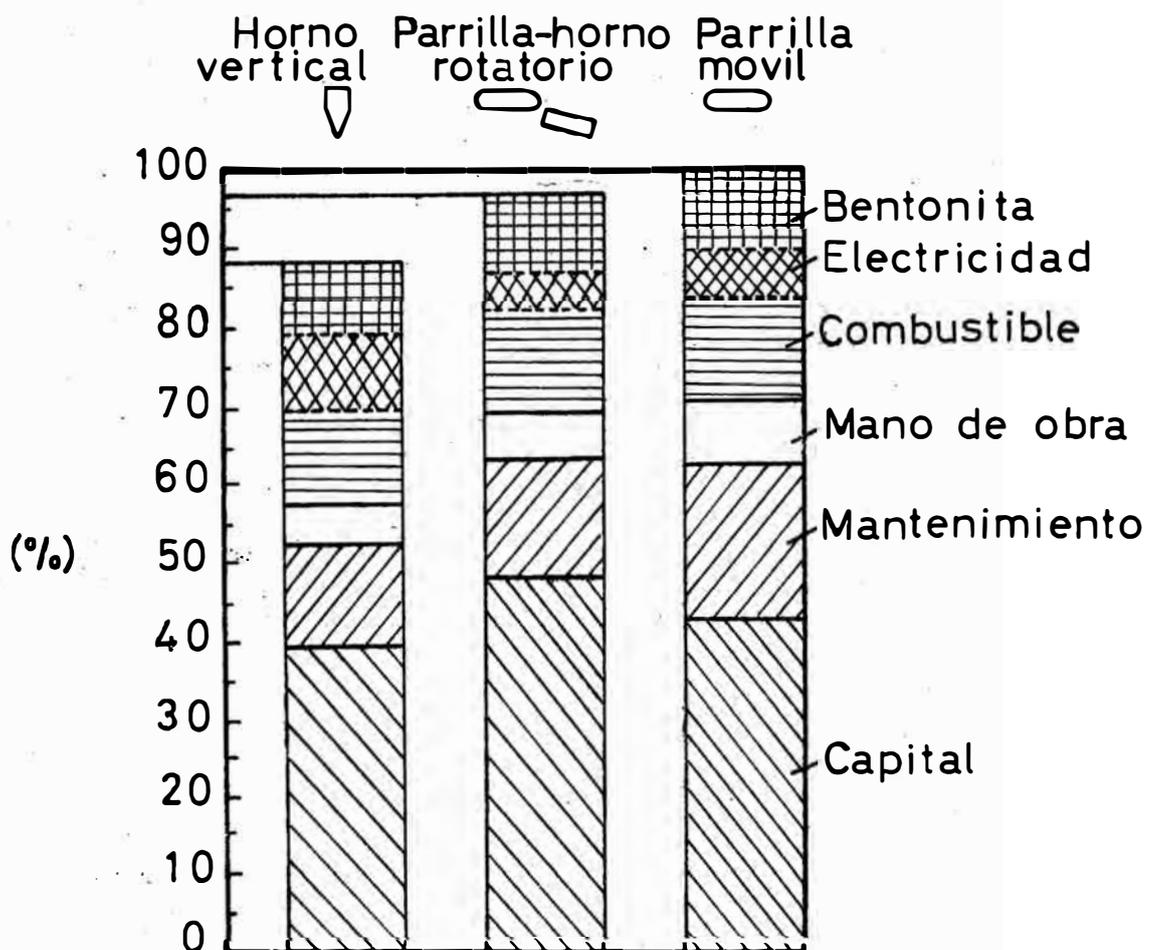


FIG. 13 Costos comparativos para los procesos de quemado

T A B L A I

	HORNO VERTICAL	PARRILLA MOVIL	PARRILLA-HORNO ROTATORIO
Producción (Mill.ton/año)	1.8 - 2	1.8 - 2	1.8 - 2
Disponibilidad horas/año	7,200	7,200	7,200
Horas-hombre/ton.	0.10	0.11	0.11
Fuel oil (litros/ton)	18	19	19
Energía (Kwh/ton)	40	25	20
Bentonita (Kg/ton)	7	7	7

La figura 13 muestra los costos comparativos para plantas de 2 millones de toneladas por año. Para plantas mayores la inversión de capital crecerá más en el caso del horno vertical, pues se necesitarían varias unidades, en tanto los otros métodos beneficiarían de la economía de escala. Los costos totales son menores para el horno vertical y mayores para la parrilla móvil, especialmente en la mantención, donde el ítem más costoso es el reemplazo de barras de parrilla. Sin embargo, las diferencias de costos totales entre los tres métodos son pequeñas, por lo que especialmente la posibilidad de alcanzar la calidad requerida del pélet con el tipo de mineral particular, influenciará la selección del proceso.

C A P Í T U L O I I I

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LAS CARACTERISTICAS DE LA PELETIZACION DE LOS CONCENTRADOS DE MINERAL DE HIERRO

En este capítulo se presentan una serie de procedimientos de laboratorio empleados para determinar la calidad del pélet de mineral de hierro. Se presenta la descripción y operación de un aparato de laboratorio, el cual simulaba las condiciones de quemado del pélet en un horno de cuba. Relaciones de temperatura-resistencia en la peletización; efecto de los aditivos químicos en la aglomeración; y resistencia a la compresión, abrasión e impacto de los productos peletizados son discutidos con respecto a cinco concentrados diferentes de mineral de hierro.

En la mayoría de los trabajos experimentales rutinarios sobre procesos y productos, se establecen métodos de operación y evaluación de productos según un cuidadoso control de pruebas de laboratorio. Con particular énfasis en la peletización de concentrados finos de mineral de hierro, procedimientos estandarizados de producción en laboratorio y pruebas del producto, han sido establecidos en el Laboratorio de Investigación de la Cleveland-Cliffs Iron Co. en

Ishpeming, Mich. Un programa de esta naturaleza se usó para investigar las características de aglomeración de varios concentrados de mineral de hierro. Los factores que controlan el proceso se estudiaron y luego se controlaron para estas investigaciones.

El directorio del Laboratorio de Investigación de la Cleveland-Cliffs ha desarrollado un aparato para evaluar la respuesta relativa de varios concentrados finos de mineral de hierro hacia la peletización y para permitir un estudio de los varios aditivos o factores que ayudan al proceso. Este aparato fue diseñado y operado para simular las condiciones impuestas por el horno de cuba en el quemado de los pélets de mineral de hierro. Para este propósito algunas de las condiciones de operación del horno de cuba de una planta piloto se obtuvieron e incorporaron dentro del plan de quemado con el aparato de laboratorio diseñado para este fin.

1. PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA EL QUEMADO DE LOS PELETS.-

Los pélets del horno de cuba sufren un cambio de temperatura con el tiempo durante la transición del estado húmedo al estado quemado de acuerdo con las curvas de la figura 14, y cerca de 1.8 libras de gas conteniendo 15.3% de O_2 son admitidos por cada libra de carga de pélets. Este conocimiento se aplicó en la operación del aparato de laboratorio, ver figura 15, usado para simular las condiciones de quemado del horno de cuba.

El aparato consistía en un horno eléctrico de tubo cilíndrico de combustión, equipado con provisiones para pasar el gas a través del tubo controlando las velocidades del fluido. Botes de

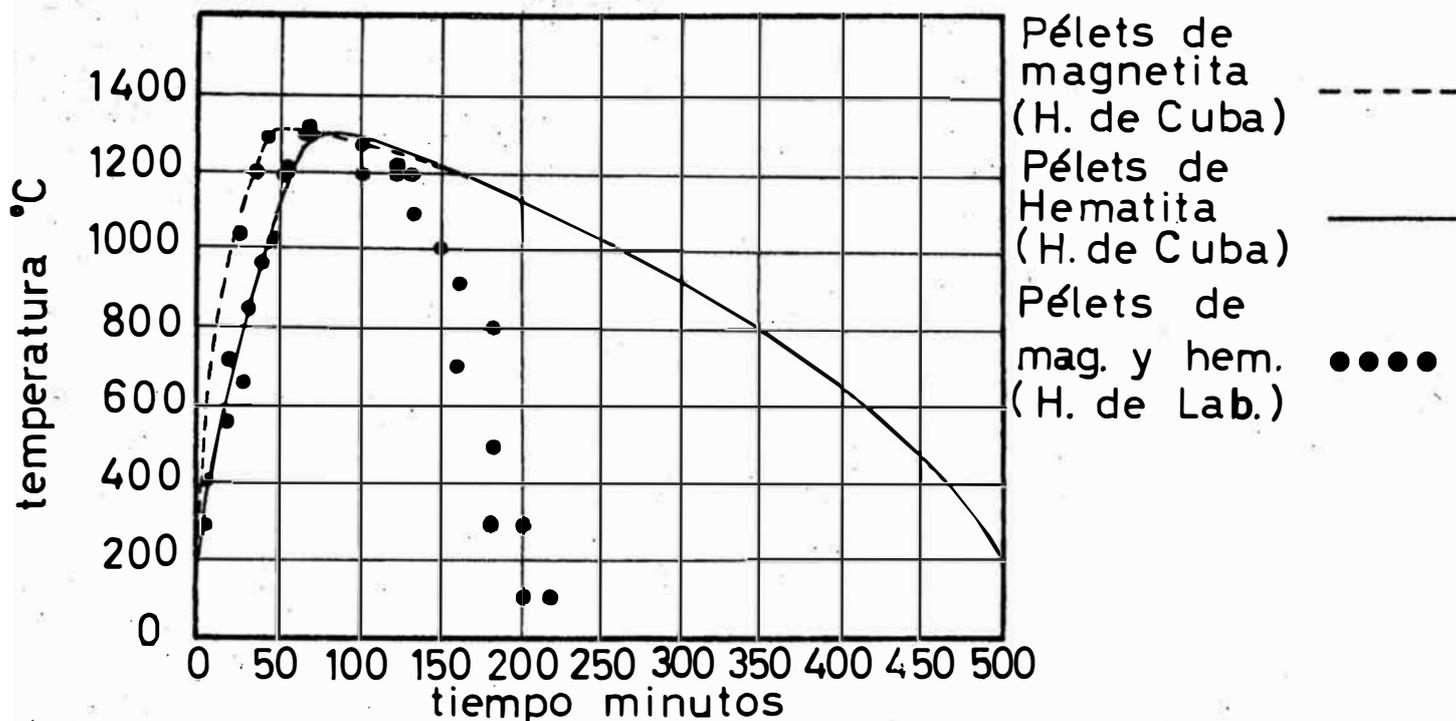


FIG.14 Relaciones tiempo-temperatura durante el quemado de los pélets en el laboratorio y en la planta piloto

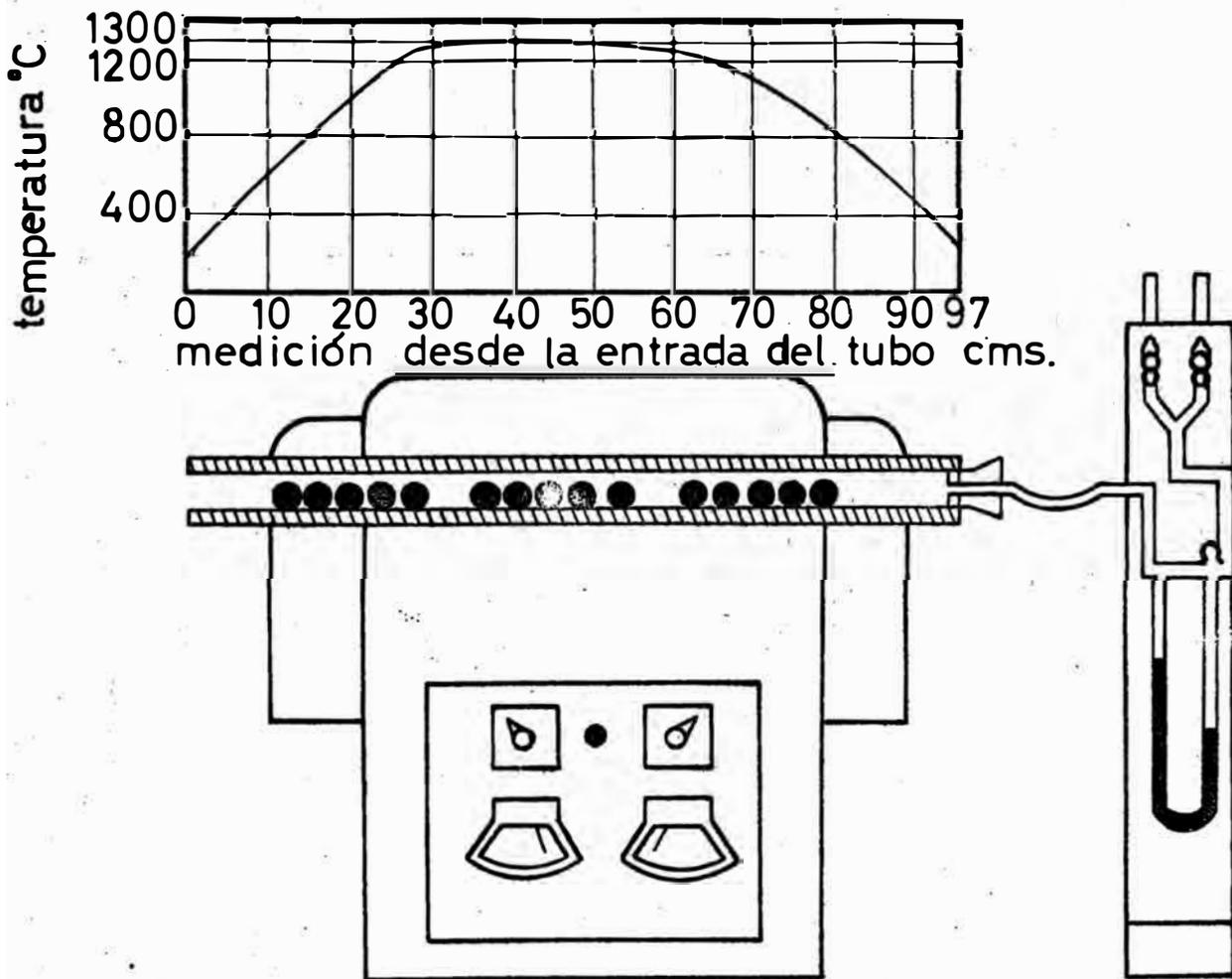


FIG.15 Aparato para el quemado de los pélets

nicromo que servían como dispositivos para la carga del pélet eran admitidos a través de la abertura extrema del tubo de combustión, pasaron en sentido opuesto a la corriente del gas y luego se les sacó por la parte final del tubo. La carga del bote consistió de cinco pélets húmedos cada uno de los cuales tenía alrededor de 35 gramos y 28 milímetros de diámetro. Estos se formaron en un tambor peletizador de laboratorio usando procedimientos descritos por Tigerschild e Ilmoni. Los productos del tambor se depositaron en envases sellados y se guardaban para las pruebas de quemado. Para minimizar los efectos de presecado, los pélets verdes representando un producto de un tambor peletizador específico se tomaron de los depósitos y se colocaron en el bote aproximadamente un minuto antes de la operación de quemado.

Durante la operación del aparato de laboratorio los botes cargados de pélets fueron admitidos uno por uno dentro del tubo de combustión y movidos periódicamente a través del tubo de tal manera que los pélets pudieran aproximarse a los cambios consecutivos de temperatura de los pélets en el horno de cuba. Para este propósito un programa de quemado estandarizado fue desarrollado con el conocimiento de la curva de la gradiente de temperatura del horno de la figura 15 y de las curvas de velocidad de calentamiento de la figura 14. En cuanto al quemado de acuerdo con este programa, los pélets individuales fueron periódicamente cambiados de temperatura de acuerdo con los puntos circulares de la figura 14, mientras una co-

riente de aire en sentido contrario a los pélets pasaba sobre ellos a razón de 3.50 litros por minuto. Este flujo de aire correspondía a 1.23 moles de O_2 por mol de Fe_2O_3 , el cual a su vez era aproximadamente el equivalente del suministro de oxígeno de los pélets de mineral de hierro durante la operación de quemado en el horno de cuba.

El gráfico de la figura 14 señalaba varios instantes donde el programa de quemado de laboratorio no era exactamente el mismo que el programa de quemado en el horno de cuba. La velocidad de enfriamiento en el laboratorio fue más rápida, - la velocidad de calentamiento fue una media de las velocidades de la planta piloto para la hematita y la magnetita, y la velocidad de calentamiento varió ligeramente de pélet a pélet.

Estas discrepancias eran tolerables. Hubiera sido no práctico permitir que los pélets del laboratorio se enfriaran por 10 horas, y las ligeras variaciones de las velocidades de calentamiento fueran de un pequeño orden contrastando con las variaciones normales de las velocidades de calentamiento dentro del horno de cuba. Los resultados de las pruebas de laboratorio fueron relativas antes que absolutas. Por esta razón el programa de quemado del horno de cuba se aproximó más no se alcanzó.

2. DETERMINACIONES DE LA CALIDAD DE LOS PELETS.-

Los pélets de mineral de hierro deberán ser capaces de resistir las fuerzas de compresión impuestas por el horno y el apilamiento de los depósitos de reserva, así como también deberán resistir fuerza's de impacto y abrasión impuestas por el convencional manipuleo y embarque del mineral de hierro.

Las propiedades físicas que hacen posible que los pélets resistan estas fuerzas están generalmente relacionadas aunque no definitivamente. Los pélets frágiles pueden resistir cargas de compresión grandes, sin embargo, se quebrarán por impactos. Pélets tenaces, asimismo, pueden estar compuesto de partículas gruesas, los cuales tienen una superficie que se desgasta fácilmente. Por estas razones cada propiedad específica de resistencia se probó individualmente empleando los procedimientos estandarizados de ensayos para materiales. Estos fueron pruebas de compresión, impacto y abrasión usados para determinar su resistencia, su tenacidad y su dureza respectivamente.

La resistencia es una medida de la habilidad para soportar esfuerzos. En el caso de compresión diametral lenta de materiales esféricos, el esfuerzo es una función del tamaño de la esfera y la fuerza de compresión. Cuando los pélets esféricos de tamaño semejante están sometidos a una fuerza diametral lenta, la resistencia y el máximo esfuerzo unitario son directamente proporcionales a la carga de compresión. Por consiguiente la resistencia del pélet designada aquí fue aproximada

damente una medida de la máxima carga impuesta sobre un pélet individual, o la prolongación de la carga compresora lo cual causaba la ruptura del pélet.

Las pruebas se realizaron comprimiendo un pélet entre un pistón hidráulico y una placa de acero fija. La presión hidráulica requerida para triturar las muestras se indicó por medio de un medidor Bourdon. La presión se convirtió a libras de carga, a su vez registrada como la resistencia a la compresión del pélet.

Los pélets representantes de una prueba específica invariable proporcionaron valores de resistencia que no fueron idénticos. Esto fue influenciado por:

- Diferencias en el tamaño del pélet;
- Diferencias en la forma del pélet; y,

Técnicas inadecuadas en la compresión donde la fuerza compresiva no se aplicó en un nivel constante.

Los procedimientos de laboratorio sólo redujeron el efecto de estos factores y las diferencias en las cargas de compresión para los pélets representando una medida específica fueron por lo tanto sólo reducidas. En consecuencia, el promedio de las cargas de compresión realizadas a 20 pélets individualmente probados, fue tomada para representar la resistencia a la compresión del pélet.

La prueba de abrasión se desarrolló para encontrar una medida que expresase la resistencia relativa a la acción abrasi

va ofrecida por la superficie de los pélets. Esta acción abrasiva fue causada por la fricción entre pélets provocada por medio del contacto y movimiento del pélet en un pequeño tambor rotatorio. El tambor consistió de un cilindro corto montado axialmente sobre un motor de velocidad variable. Las dimensiones fueron de 16 pulgadas de diámetro por seis pulgadas de longitud. Exactamente 1,000 gramos de pélets (cerca de 35 pélets) se colocaron dentro del tambor y el tambor fue rotado en 200 revoluciones a 24 revoluciones por minuto. Esta velocidad rotacional fue cerca del 50% de la velocidad crítica de tal manera que el movimiento del pélet fue mayormente una acción de cascada y rodamiento. Cuando las 200 revoluciones fueron completadas, los pélets y el polvo fino producido por la prueba fueron sacados y pesados separadamente. El peso del polvo raído, que fue de un material - 65 malla, se empleó para expresar los resultados de la prueba de abrasión.

Los pélets intactos desgastados y el polvo fino producido por la superficie fueron los únicos productos de la prueba.

La prueba de impacto se desarrolló para determinar la tenacidad de los pélets o la resistencia relativa a la subdivisión debido a fuerzas de impacto. Estas fuerzas se impartieron dejando caer los pélets sucesivamente desde una altura predeterminada sobre la superficie de una placa sólida de acero.

Exactamente 1,000 gramos de pélets del laboratorio (cerca de 35); de acuerdo a un tamaño medido, se colocaron dentro de

un recipiente montado a 33 1/3 pies sobre la superficie de una placa de acero de 1/2 pulgada de grosor. El depósito tenía fijado un escotillón el cual permitía la caída de los pélets a través de un tubo de cuatro pulgadas que los guiaba sobre la placa. Los pélets y los fragmentos se dejaron caer tres veces sucesivamente y luego con el producto final se procedió a un tamizado con un cedazo de malla 28.

Un índice de resistencia, o el porcentaje del tamaño original de la partícula, fue calculado a partir del análisis de malla de los pélets antes de caer y el análisis de malla de los pélets y fragmentos luego de tres caídas. La forma del método de Coghill en la determinación de malla, fue adaptado para este propósito. Esto proporcionó un medio de establecer el tamaño promedio de las partículas directamente del análisis de malla. Un ejemplo de esta determinación se muestra en la Tabla 2.

Este índice junto con el porcentaje de material fino (% - 10 malla) refirieron la tenacidad de los pélets, o la habilidad para soportar el golpe de las fuerzas de impacto. En realidad ésta fue proporcionada por la relación, del diámetro promedio de la partícula después de la prueba al diámetro promedio de la partícula antes de la prueba.

3. SIGNIFICADO DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.-

Las pruebas de caída se llevaron a cabo con muestras de 50 libras de pélets producidos por el horno de cuba de la planta piloto y con cargas de 1,000 gramos de pélets producidos en

TABLA N° 2 DETERMINACION DEL TAMAÑO PROMEDIO DE LA PARTICULA POR ANALISIS DE MALLA POR EL METODO DE COGHILL'S.

P R O D U C T O O R I G I N A L					P R O D U C T O D E C A I D A			
TAMAÑO DE MALLA	ANALISIS DE MALLA PESO	* N° ORDINAL (Arbitrario)	PESO	ANALISIS DE MALLA PESO	** N° ORDINAL (Arbitrario)	PESO		
Malla	Pulg.	%	%	%		%	%	
1 1/4	1.248	-	65.3	0.0	0	-		
1	1.050	65.3	69.4	8.0	1	8.0		
3/4	0.742	34.7	-	22.8	2	45.6		
1/2	0.525	-	-	27.7	3	83.1		
3/8	0.371	-	-	13.8	4	55.2		
3	0.263	-	-	10.6	5	53.0		
4	0.185	-	-	3.3	6	19.8		
6	0.131	-	-	3.3	7	23.1		
8	0.093	-	-	1.4	8	11.2		
10	0.065	-	-	1.4	9	12.6		
14	0.046	-	-	1.0	10	10.0		
20	0.033	-	-	0.7	11	7.7		
28	0.023	-	-	0.6	12	7.2		
-28	0.023	-	-	5.1	15	76.5		
<u>134.7</u>	1.347	100.0	134.7	$\frac{413.0}{100} = 4.130$		413.0		
100								

* Este número ordinal esta entre 1 y 3/4 pulg. del tamaño de malla. Por interpolación el tamaño promedio es igual:

$$1.050 - (0.347 (1.050 - 0.742)) = 0.943$$

** Este número ordinal esta entre 3/8 pulg. y malla 3 . Por interpolación el tamaño promedio es igual:

$$0.371 - (0.106 (0.371 - 0.263)) = 0.359$$

$$\text{INDICE DE RESISTENCIA - PORCENTAJE DEL TAMAÑO ORIGINAL} = \frac{\text{Tamaño promedio después del impacto}}{\text{Tamaño promedio antes del impacto}} = \frac{0.359}{0.943} = 37.9 \%$$

el horno del laboratorio. Con el porcentaje del tamaño original como un índice de resistencia, la severidad de la prueba pareció ser una función de la cantidad de pélets usados para una prueba específica. Cuando 50 libras de pélets se dejaron caer a la vez, un pequeño número de pélets estuvieron expuestos al impacto más grande; esto es, sólo unos cuantos pélets de cada 50 libras de carga recibieron el impacto primario debido al área proyectada relativamente pequeña situada directamente bajo la guía de prueba de caída. Los pélets situados exactamente en el fondo de la carga recibieron el impacto de la placa de acero, mientras los pélets situados en el centro o parte superior de la carga estuvieron sometidos a una caída obstaculizada y a una resultante amortiguación efectuada por la propia masa (efecto de masa). Esta condición de caída no existió para la prueba de caída de 1,000 gramos debido a que casi todos los pélets y fragmentos estaban sometidos a una fuerza de impacto que era una función solamente de la masa de la partícula. Varias pruebas se realizaron para determinar el efecto de la masa en la prueba de caída y determinar así con exactitud los resultados procurados por una muestra específica. Aproximadamente 700 libras de pélets de una calidad uniforme fueron detenidamente mezcladas para esas pruebas y cantidades variables fueron separadas de esta muestra. Estas cantidades consistían de dos porciones de 100 libras, dos de 50 libras, dos de 25 libras, dos de 12.5 libras, dos de 6.25 libras y ocho porciones de 1,000 gramos. Cada porción se dejó caer en masa con excepción de cuatro porciones de 1,000 gramos

que se dejaron caer de tal manera de dar lugar a un impacto singular de partícula. Esto se logró dejando caer individualmente cada pélet y fragmento de pélet sobre el área de la superficie plana limpiada. Este tipo de prueba de caída naturalmente permitió el impacto más drástico, o las condiciones más favorables para la subdivisión de la partícula por impacto. El gráfico en la Figura 16 muestra los resultados de la prueba de caída usando diferentes cantidades de pélets para cada carga de prueba específica. Se observó que el porcentaje de material \sim 10 malla producido por los impactos era independiente de la cantidad caída, y el porcentaje del tamaño original disminuía con la disminución de las cantidades de material caído. Esto era comprensible ya que las fuerzas de impacto mayores se impartían a un porcentaje mayor de las cargas de pélets. La producción de finos (% de material \sim 10 malla) fue causada por la abrasión y el impacto, siendo la abrasión más severa con las cantidades más grandes. Los finos producidos por el impacto al dejar caer pequeñas cantidades de pélets se compensaron con la normal abrasión de cantidades mayores al caer. El resultado neto de ambos efectos proporcionaron un valor independiente a la producción de finos con las cantidades de pélets caídos.

Se tomaron cuatro cargas de pélets de 1,000 gramos, estando éstos entre $- 1 \frac{1}{8}$ y $+ 1$ pulgadas. Estos pélets de calidad uniforme, fueron escogidos a mano, dándoseles luego una misma prueba de caída para determinar la confiabilidad o el grado de reproducibilidad de la prueba. Los resultados que indicaron

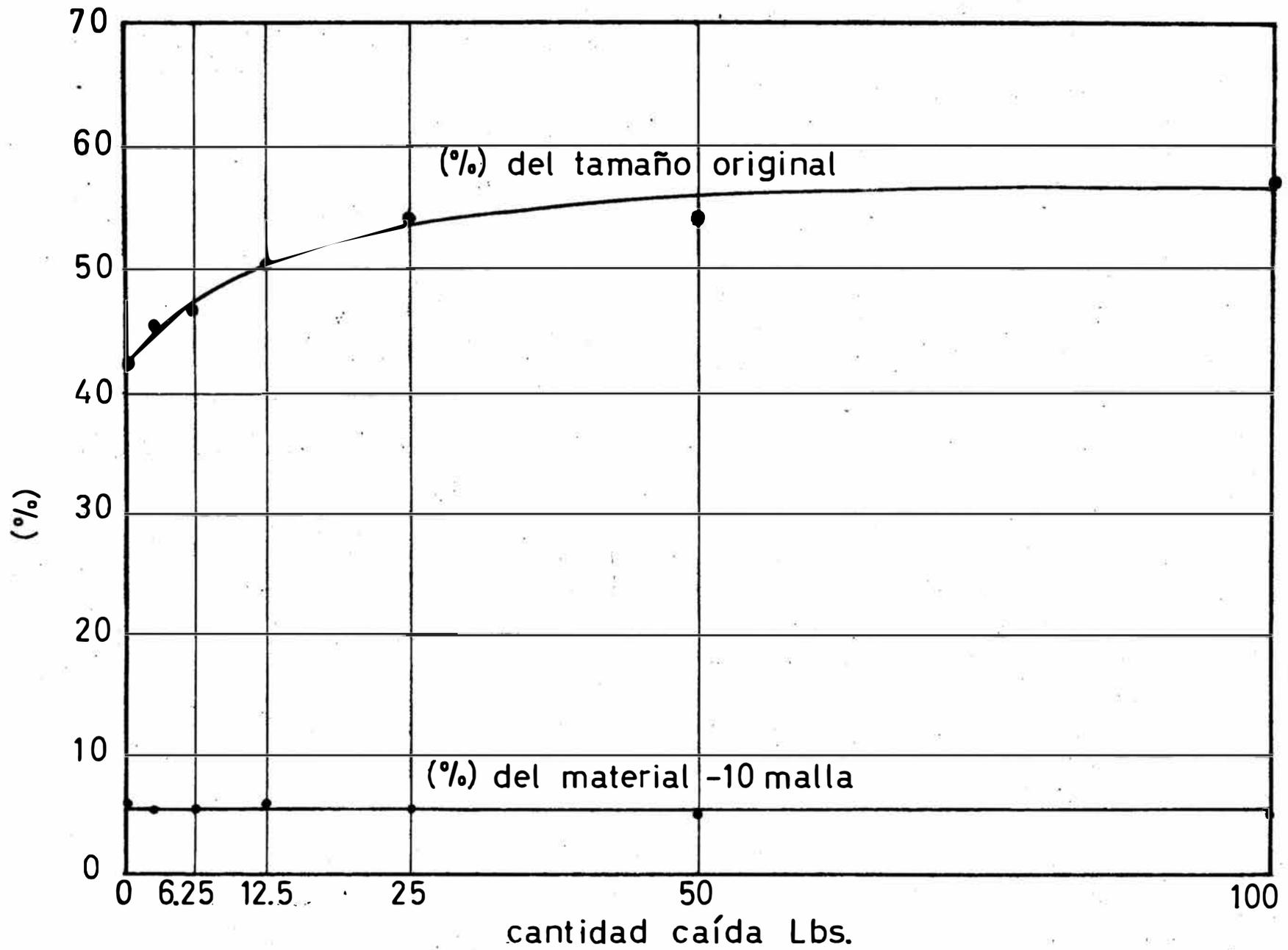


FIG. 16 Prueba de caída de los pélets quemados

la producción de finos y el porcentaje del tamaño original no variaron de un promedio de más de 30 ó 7%, respectivamente. Esta discrepancia era tolerable y de una magnitud lo suficientemente pequeña como para garantizar el procedimiento de la prueba de caída como una medida confiable de la tenacidad del pélet.

El método más apto para medir el grado de coherencia de las partículas dentro de un pélet de mineral de hierro es la prueba de compresión. Una prueba específica llevada a cabo como una medida de valor, tal como la resistencia a la compresión de los pélets quemados, es sólo tan buena como el grado de reproducibilidad de la prueba. Si los valores son asignados como una resistencia a la compresión de los pélets tratados conforme a una manera normalizada, los valores deberán alcanzarse con exactitud razonable por repetición de la prueba. Una indicación de esta medida de reproducibilidad, es debido a la desviación probable de una serie de medidas, y la magnitud de esta desviación indica la precisión de las medidas. Esta es matemáticamente determinada por el empleo de la ecuación:

$$Q = 0.674 \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum \gamma^2}$$

donde Q es igual a la desviación probable del valor medio, γ la residual del valor medido y el valor medio y N el número de mediciones. Esto significa que la probabilidad es uno a dos de que el valor medio tendrá una residual denotada por la desviación probable.

La Tabla 3 da los valores individuales de compresión de 15 clases de pélets de mineral de hierro quemados de acuerdo al programa de quemado de laboratorio a una temperatura máxima de 1,300°C. El significado aplicado al valor de compresión para una serie de pélets es indicado por la determinación de la desviación probable de la media de 20 pélets comprimidos individualmente. Las cifras indican los valores promedio de compresión, las desviaciones probables de los valores promedios, los valores óptimos, y las desviaciones probables de los valores óptimos expresados como porcentajes. Se observó que las desviaciones probables de los valores óptimos no eran mayores que 12% y no menores que 2.3% para las medidas de las 15 muestras. Estas pequeñas desviaciones indicaron que las pruebas de laboratorio de quemado y compresión eran razonablemente reproducibles.

La resistencia a la abrasión de los pélets depende tanto de la coherencia de la partícula como del factor de fricción de la superficie del pélet. Las partículas de mineral grueso tienden a aumentar el factor de fricción, y estas partículas gruesas se desgastan más rápidamente que partículas finas de igual ligazón. Se llegó a esta conclusión de la comparación de los resultados de la prueba de abrasión de los pélets hechos de los concentrados minerales originales y los pélets hechos de los concentrados minerales remolidos, ver la Tabla 4.

4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.-

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo con cinco diferentes concentrados de mineral de hierro, designados como

TABLA N° 3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE 20 PELETS EXPRESADA CON EL ERROR PROBABLE DEL VALOR PROMEDIO QUEMADOS A 1300°C. PELETS

ADITIVOS Lb./Ton.	H - 1				H - 2					M - 1			M - 2		M-3
	10b 50Pc	10b 50Pc	10b	10b	10b	10b	10b 10c	10b 10c	10b 30c	10b	10b	10b	10b 10bx	10b	10b
	CONDICION DEL CONC.		TM	CR	CR			super- ficial	CR		50%CR				
1	1180	1460	730	670	1250	900	900	900	690	1250	600	650	900	630	790
2	1200	1020	620	630	1550	720	620	1000	580	3000	400	540	500	430	610
3	2500	3000	720	570	1250	750	570	1000	410	1750	600	490	450	830	870
4	1000	870	460	640	1250	550	800	900	570	940	300	620	1000	740	2500
5	1500	840	500	540	1250	480	1030	860	570	1250	300	680	400	520	610
6	3250	860	570	440	900	3000	1050	730	380	1250	550	600	1500	820	460
7	3750	1100	840	500	1250	560	950	500	160	1250	530	900	800	540	700
8	2250	2250	990	520	2750	800	2400	1000	500	1160	620	650	500	1000	670
9	880	1100	520	600	1050	840	640	910	530	1500	1100	440	1000	740	1100
10	1000	2860	650	430	670	760	950	550	600	1090	300	350	900	730	840
11	2500	1100	1070	540	980	4250	1060	540	720	1250	600	650	700	550	910
12	2000	1500	770	720	1110	910	890	600	700	3000	1100	620	800	550	680
13	1200	2500	820	620	620	630	820	1100	540	1250	300	530	600	420	880
14	2500	2300	1000	520	1050	800	1900	700	400	1250	680	1900	1000	790	840
15	2000	3840	900	580	1250	940	2000	900	330	1110	520	600	2500	720	660
16	2000	1020	1200	460	1250	660	950	1000	500	1500	3100	790	800	240	1060
17	1250	2250	850	630	940	410	1030	640	590	1500	400	730	1100	540	850
18	800	1100	840	760	2000	700	550	720	900	950	500	530	1200	800	820
19	1200	930	680	530	870	830	910	780	360	1500	2400	780	1000	930	860
20	1500	1100	600	550	1250	700	900	640	550	1250	400	730	900	540	930
PROMEDIO - M	1773	1650	769	572	1224	1009	946	780	528	1450	765	689	927	653	882
DESVIACION - Q PROB.	±129	±138	±30	±13	±54	±99	±54	±30	±23	±68	±88	±32	±53	±29	±38
VALOR OPTIMO	1800	1700	770	570	1220	1000	950	780	530	1450	760	690	930	650	880
DESVIACION PROB. %	±7.2	±8.4	±3.9	±2.3	±4.4	±9.9	±5.7	±3.8	±4.3	±4.7	±11.6	±4.6	±5.7	±4.5	±4.3

NOTAS:

Los aditivos fueron añadidos en libras por tonelada de mineral.

b: Denota arcilla de bentonita

c: Denota carbón pulverizado de antracita

TM: Denota concentrado tostado magnéticamente

Pc: Denota piedra caliza pulverizada

bx: Denota borax

CR: Denota concentrado remolido

TABLA N° 4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON PELETS

	H - 1				H - 2					M - 1			M - 2		M - 3	
	10b 50Pc	10b 50Pc	10b C R	10b	10b	10b C R	10b 40c Super ficial	10b 10c	10b 30c	10b	10b C R	10b 50% C R	10b 10bx	10b	10b	10b
Aditivos, Lb/Ton.																
Condición del Conc.																
Diám.prom. del pélet, pulg.	1.132	1.050	1.165	1.180	0.998	1.015	1.015	1.035	1.020	1.125	1.052	1.042	0.975	0.975	1.042.	
	Análisis	de Malla	de	los	Pélets	después	de las	Pruebas	de	Caída	(3 veces	desde	33 1/2	pies)		
						(%	del	peso	retenido)							
M a l l a																
1	52.3	20.2	8.0	2.9	0.0	0.0	0.0	5.7	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3/4	20.6	34.6	22.8	22.2	33.6	20.3	37.7	46.3	29.4	35.9	0.0	5.7	20.8	33.1	9.7	
1/2	15.7	22.4	27.7	42.6	19.2	24.3	15.1	8.9	27.3	9.2	21.0	27.0	24.3	13.5	27.2	
3/8	3.4	12.8	13.8	10.6	22.8	25.0	19.7	11.2	14.3	14.3	41.5	33.9	21.0	17.6	33.3	
3	2.5	4.2	10.6	6.6	10.8	14.0	10.1	12.5	11.7	8.6	18.0	17.3	14.8	13.0	13.3	
4	0.9	1.6	3.6	2.8	4.8	7.1	6.0	3.7	4.1	4.1	8.8	6.6	4.6	7.3	5.5	
6	0.6	0.9	3.3	2.2	2.4	3.3	3.2	2.7	2.6	2.1	3.5	3.2	3.6	3.9	2.5	
8	0.3	0.4	1.4	0.9	0.9	1.8	1.8	1.5	1.6	1.1	2.0	1.5	2.3	2.0	1.6	
10	0.2	0.4	1.4	0.6	0.8	1.3	1.2	0.9	1.1	0.7	1.5	1.1	1.6	1.7	1.0	
14	0.2	0.3	1.0	0.7	0.6	0.9	1.0	0.6	0.8	0.7	1.0	0.8	1.1	1.3	0.8	
20	0.1	0.3	0.7	0.6	0.4	0.6	0.7	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	0.9	0.5	
28	0.1	0.2	0.6	0.5	0.2	0.4	0.6	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.7	0.4	
- 28	3.1	1.7	5.1	6.8	3.4	1.0	2.9	5.3	6.0	4.3	1.6	2.0	4.7	5.0	4.2	
Diám.prom.después de caída,pulg.	0.675	0.555	0.355	0.325	0.381	0.359	0.386	0.390	0.336	0.441	0.283	0.321	0.313	0.316	0.314	
% del tamaño original	59.4	52.8	30.5	27.5	38.2	35.3	36.2	34.8	33.0	39.2	27.4	30.7	32.1	32.4	30.1	
% - 10 malla por la caída	3.5	2.5	7.4	8.6	4.6	2.9	5.2	6.9	7.9	6.0	3.7	3.7	7.0	7.9	5.9	
Carga en prueba de compresión,Lb	1800	1600	750	550	1200	1000	780	950	550	1450	750	700	900	650	900	
Prueba de abrasión, % -65 malla	1.2	1.7	0.9	4.0	0.5	0.6	2.5	0.7	1.3	1.8	0.4	0.9	1.2	2.1	1.1	
Número de pélets por 1000 gr.	27	34	25	24	35	33	33	31	32	24	29	30	36	36	29	
Pélets, peso, gramos	37.0	29.4	40.0	41.6	28.5	30.3	30.3	32.3	31.3	41.7	34.5	33.3	27.8	27.8	34.5	
Pélets, volumen, cc.	12.5	9.9	13.5	14.1	8.4	8.9	8.9	9.5	9.2	12.2	10.1	9.7	8.1	8.1	9.8	
Densidad del pélet grm/cc.	2.97				3.36					3.42			3.44		3.52	
G.E. del mineral grm/cc.	4.23				4.86					4.44			4.40		4.43	
Porosidad del pélet. %	29.6				30.9					23.1			21.9		20.6	

M-1, M-2, M-3 y H-1, H-2. Los análisis químico y de malla de éstos son presentados en la Tabla 5. M-1 y M-3 representan dos diferentes concentrados de magnetita natural producidos de circuitos de concentración magnética. H-2 y M-2 representan concentrados de hematita artificial y magnetita artificial respectivamente, producidos por tostación de sulfuros de hierro bajo diferentes condiciones atmosféricas. H-1 representa un concentrado de flotación de hematita especular. Cada uno de estos minerales poseían propiedades peculiares, y como tales respondían diferentemente hacia la aglomeración por peletización.

Antes del pelotamiento los concentrados de mineral se mezclaron en el estado seco con 1/2 % de bentonita por peso de concentrado y, en ciertos casos, con diversas cantidades de otros aditivos pulverizados. Luego estas mezclas fueron mezcladas con cerca de 10% de agua, hecho esto cada mezcla fue usada como alimento del tambor peletizador del laboratorio. Los pélets se formaron cuidadosamente por el método descrito por Tigerschiold e Ilmoni para producir compactos esféricos con un rango de tamaño de $- 1 \frac{1}{8}$ + 1 pulgada. Estos fueron tratados térmicamente desde el estado húmedo hasta el estado de quemado de la manera descrita en el procedimiento de quemado de los pélets en el laboratorio. Los pélets quemados fueron sometidos a pruebas según la manera descrita en los procedimientos de pruebas para pélets.

Una variedad dilatante (hinchamiento) de bentonita se añadió como una ayuda peletizadora, a todos los concentrados de mineral de hierro. En virtud del tamaño de partícula y la química del

TABLA N° 5: ANALISIS QUIMICO Y DE MALLA DE LOS CONCENTRADOS DE MINERAL DE HIERRO USADOS EN LAS PRUEBAS DE PELETIZACION

CONCENTRADO CONSTITUTIVO	H - 1 %	H - 2 %	M - 1 %	M - 2 %	M - 3 %
- Fe	61.90	66.45	60.35	67.20	67.70
- SiO ₂	7.32	0.82	8.98	3.54	4.57
- Al ₂ O ₃	1.93	0.29	4.42	1.13	0.23
- CaO	0.27	0.27	0.30	0.45	0.32
- MgO	0.51	0.10	0.29	0.50	0.41
- Mn	0.18	0.005	0.25	0.28	0.27
- P	0.074	0.209	0.033	0.016	0.010
- S	0.055	-	0.357	0.113	0.009
<u>MALLA</u>		<u>ANALISIS</u>	<u>DE</u>	<u>MALLA</u>	
65	0.7	0.5	4.1	0.2	1.1
100	3.4	0.7	6.7	0.3	0.3
150	8.9	1.3	12.0	0.6	1.3
200	14.3	5.2	11.5	1.8	3.4
325	15.2	12.8	10.2	10.1	8.8
400	21.0	18.6	12.8	16.8	23.5
800	21.1	37.8	18.5	38.2	26.9
1600	10.1	13.4	12.8	17.8	18.0
-1600	5.3	9.7	11.4	14.2	16.7
- 325	57.5	79.5	55.5	87.0	85.1
- 325 malla después - de remoler	87.4	92.0	78.0		

cristal, de las arcillas montmorillonitas, o bentonitas, ayudan al fenómeno del pelletamiento, la resistencia del pélet en húmedo, en seco, y algunas veces la resistencia del pélet quemado. La coherencia impartida a los pélets verdes por la bentonita esencialmente reduce el desgaste y el polvoreamiento de los pélets en las etapas de secado y quemado, y el alto contenido de alúmina de la bentonita ayuda a la formación de la fase escoria.

El conocimiento de estos beneficios, junto con el bajo costo del reactivo han hecho atractivo el uso de la bentonita para el proceso de peletización. Por estos motivos se añadió bentonita a todos los minerales usados para las pruebas estandarizadas. Diez libras de bentonita se añadieron por cada tonelada de concentrado de mineral. Para ayudar a la formación de la fase escoria dentro los pélets quemados, piedra caliza pulverizada y bórax fueron añadidos a los minerales difíciles de peletizar. La piedra caliza, después de la calcinación llevada a cabo durante el quemado, proporcionó un CaO activo el cual reaccionaba a altas temperaturas con el Fe_2O_3 y el SiO_2 para formar una ferri-ta de calcio fácilmente fusible y soluciones sólidas de CaO , SiO_2 y Fe_2O_3 .

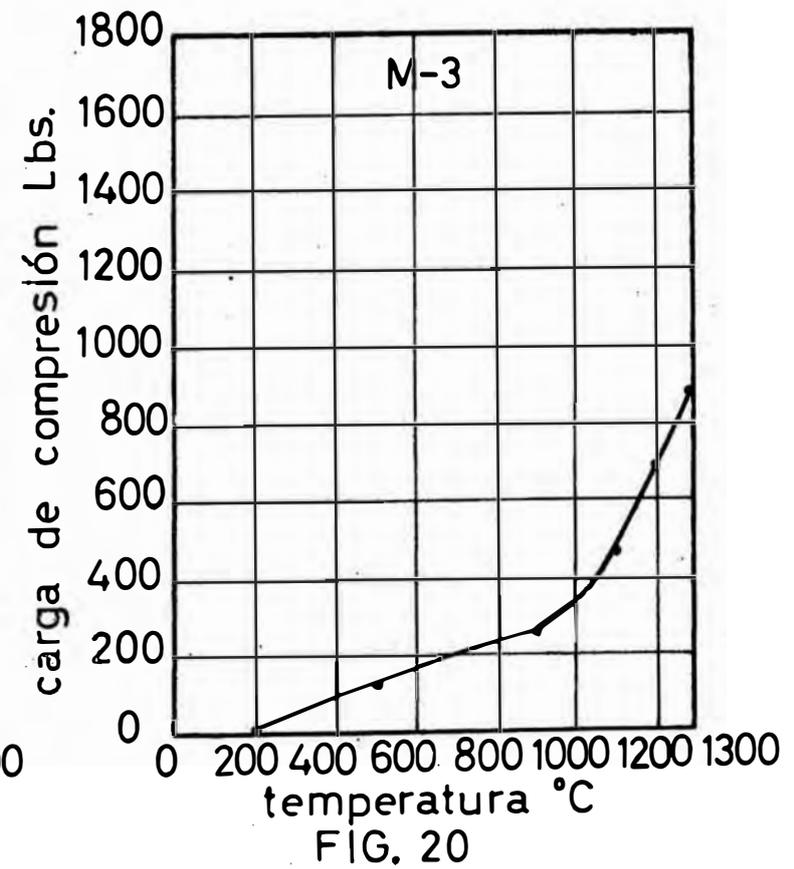
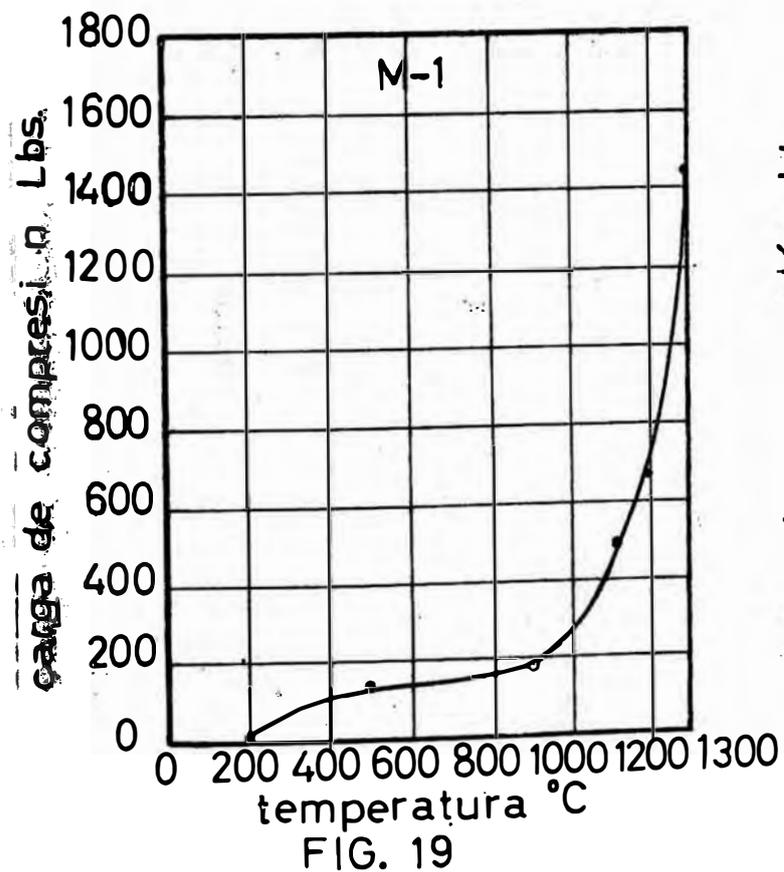
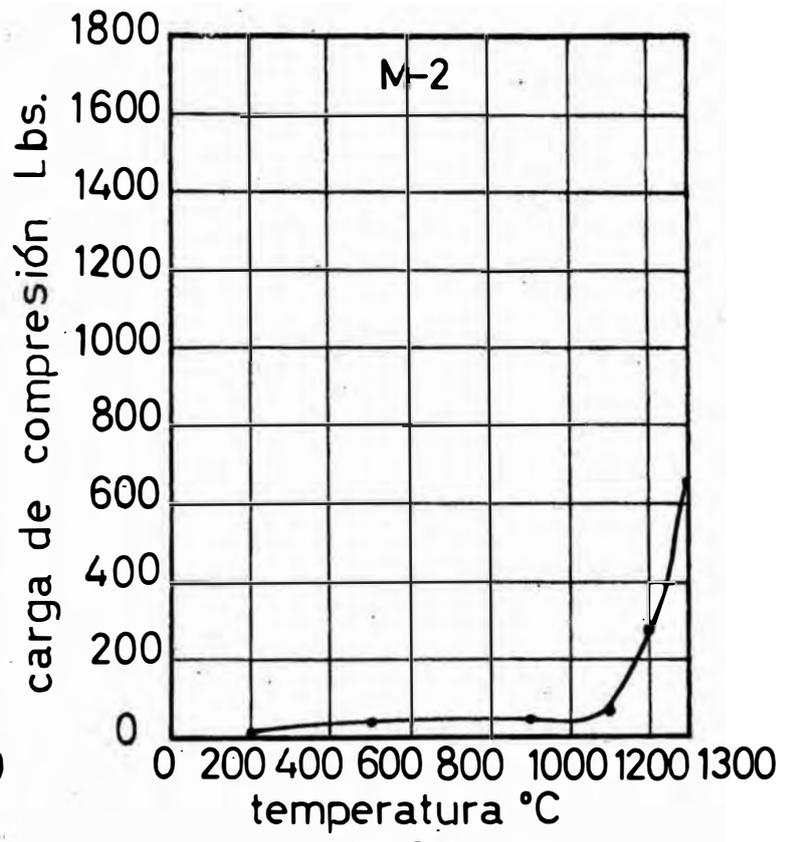
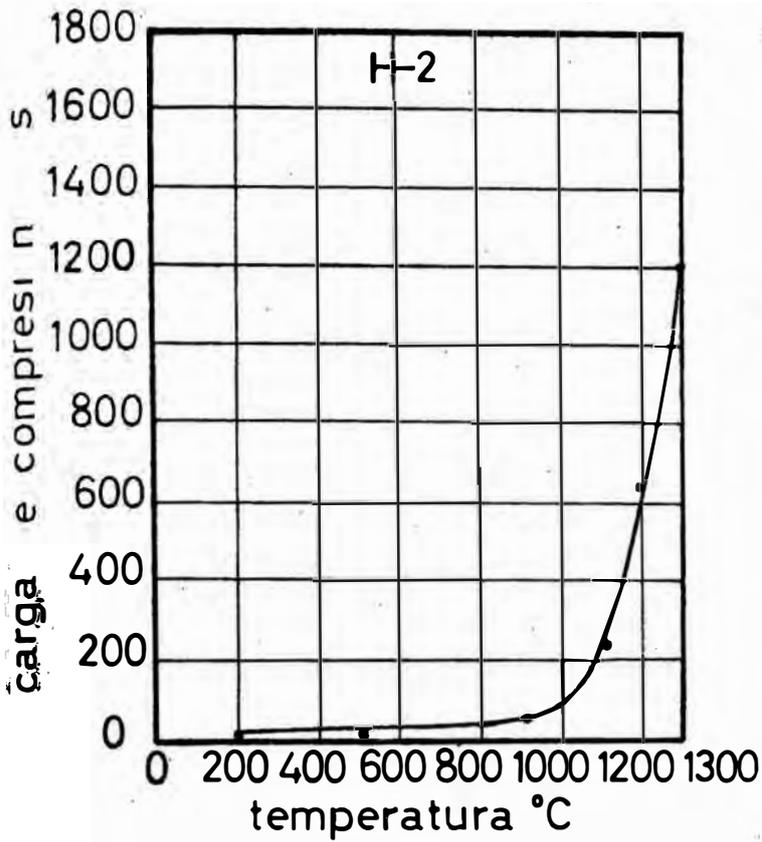
El bórax funcionaba como agente fundente a baja temperatura y probablemente ayudaba al mecanismo del crecimiento del grano por un fenómeno de solución-precipitación. El efecto beneficioso declarado de estos aditivos se muestran en la Tabla 4. Los pélets H-1 que contienen 2 1/2 % de piedra caliza y los pélets M-2 que contienen 1/2 % de bórax tenían propiedades de resis-

tencia notable en contraste con las propiedades de los pélets respectivos sin estos aditivos.

Los efectos de las temperaturas de quemado en la resistencia a la compresión de varios tipos de pélets se indican en la Tabla 6 y están representados gráficamente de la Figura 17 a la 24. Se observó que los pélets de magnetita natural tales como M-1 y M-3 de las Figuras 19 y 20 aumentaban en resistencia con el aumento de las temperaturas, y a 500°C los pélets tenían una resistencia a la compresión alrededor de 150 libras. Estos fenómenos no se observaron, con pélets de magnetita artificial, tales como M-2 y H-1 convertido, de las figuras 18 y 24, y tampoco se observaron con pélets de hematita de H-2 y H-1 de las figuras 17 y 21. La cementación a baja temperatura de las magnetitas naturales ha sido tratada por Cooke y Ban. No se supo porque este mismo fenómeno no ocurrió con los pélets de magnetita artificial. Zetterstrom ha demostrado que la magnetita artificial se oxida a temperaturas más bajas que la magnetita natural y tal vez ésta rápida oxidación natural de la magnetita artificial inhibe la cementación a estas temperaturas. Por cuanto la cementación a baja temperatura coincidía con el cambio de la fase exotérmica de la magnetita natural a la hematita, fue comprensible que los pélets de hematita no se cementarán a bajas temperaturas.

Las curvas de temperatura-resistencia de las figuras 17-24 dan una indicación de cómo los diferentes tipos de pélets de mineral de hierro pueden resistir gradientes de temperatura dentro de un horno de cuba. Si una resistencia a la compresión arbi

traría de 400 libras es establecida como la resistencia mínima de pélets aceptables, puede verse que los minerales respectivos so portarán los siguientes diferenciales de temperatura hasta 1,300°C: M-3, 250°C; M-1, 225°C; H-2, 150°C; H-1 y M-2, 50°C. Los aditivos de los pélets cambian estos diferenciales de temperatura tolerables. Por ejemplo, 2 1/2 % de piedra caliza en los pélets H-1 aumenta el diferencia de temperatura de 50 á 125°C, y 1/2 % - de bórax en los pélets M-2 aumenta el diferencial de temperatura de 50 á 100°C. Tres características fundamentales de las curvas de temperatura-resistencia señalan la respuesta relativa de los concentrados hacia la peletización. Estas son como siguen: La resistencia máxima que puede adquirirse, la transmisión del aumento de resistencia a baja temperatura, y la gradiente de temperatura tolerable. Estos tres factores están compuestos de una manera general en un sentido diagramático por el área bajo las curvas de temperatura-resistencia, limitada por la ordenada de resistencia 0-libras y la ordenada de temperatura de 1,300°C, ver Figuras 25 y 26. Con esta anotación parecía que podía hacerse una clasificación de los minerales en el orden de respuesta hacia la peletización. Esta podría ser como sigue para los cinco minerales estudiados: M-1, M-3, H-1 más 2 1/2 % de piedra caliza, H-2, M-2 más 1/2 % de bórax, H-1 y M-2. Esta clasificación no incluye los factores de resistencia a la abrasión y al impacto o las diferencias técnicas importantes de la peletización en el horno de cuba de la hematita y magnetita mencionadas anteriormente.



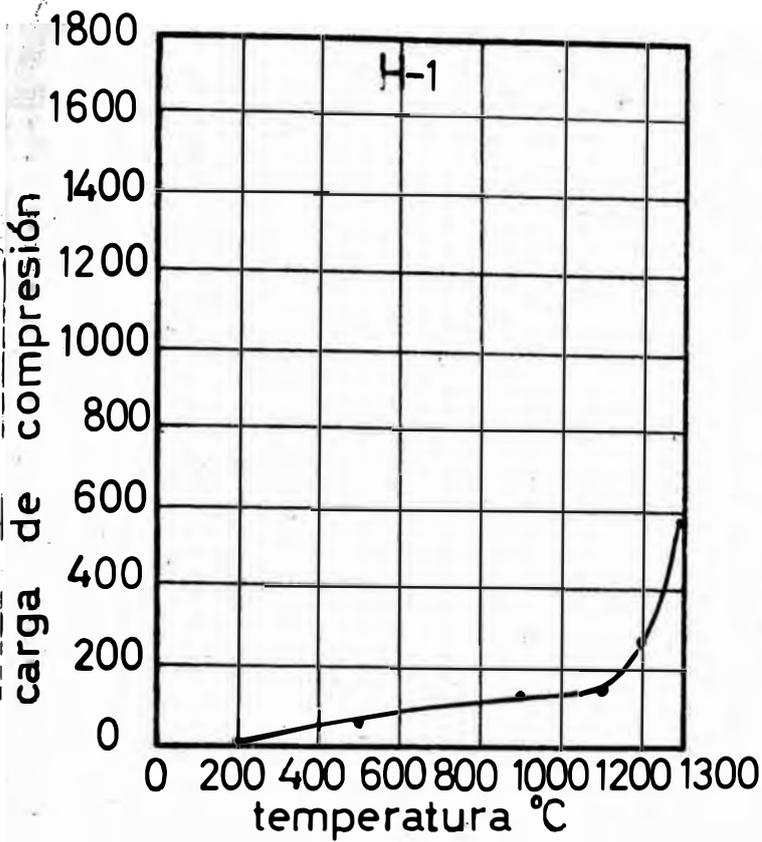


FIG. 21

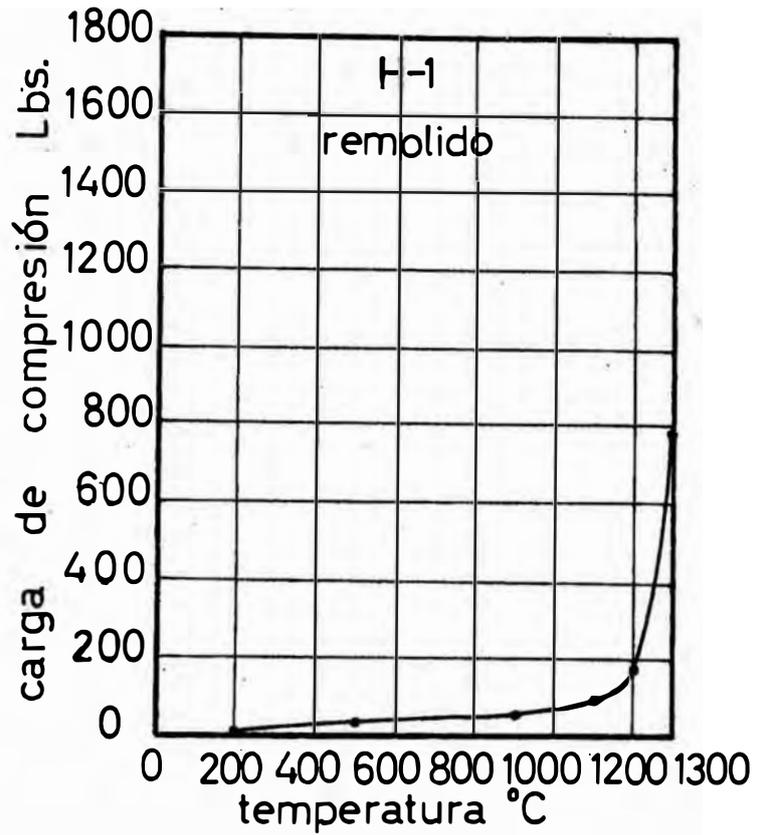


FIG. 22

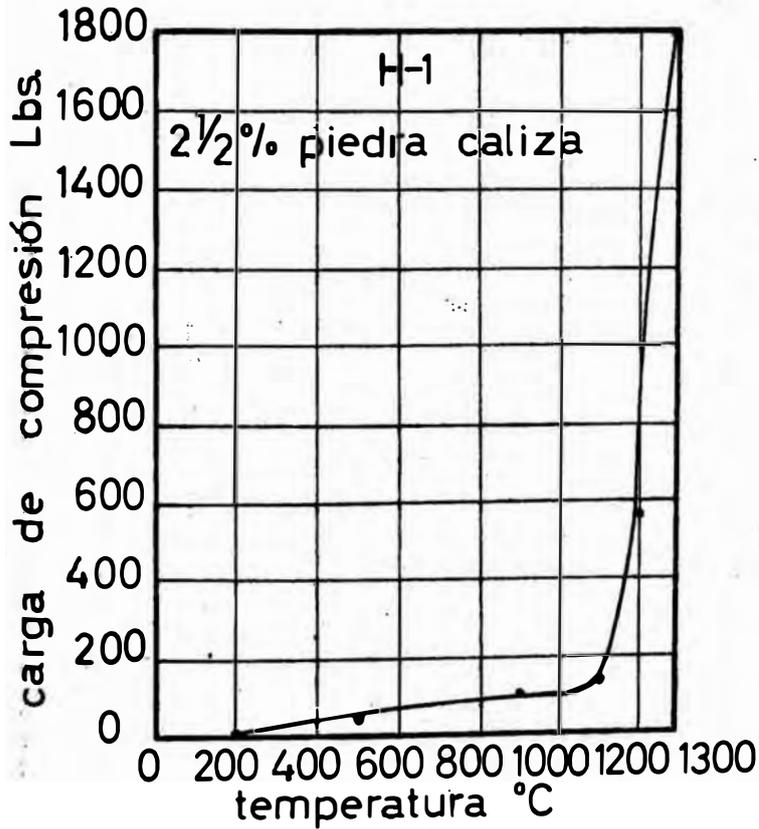


FIG. 23

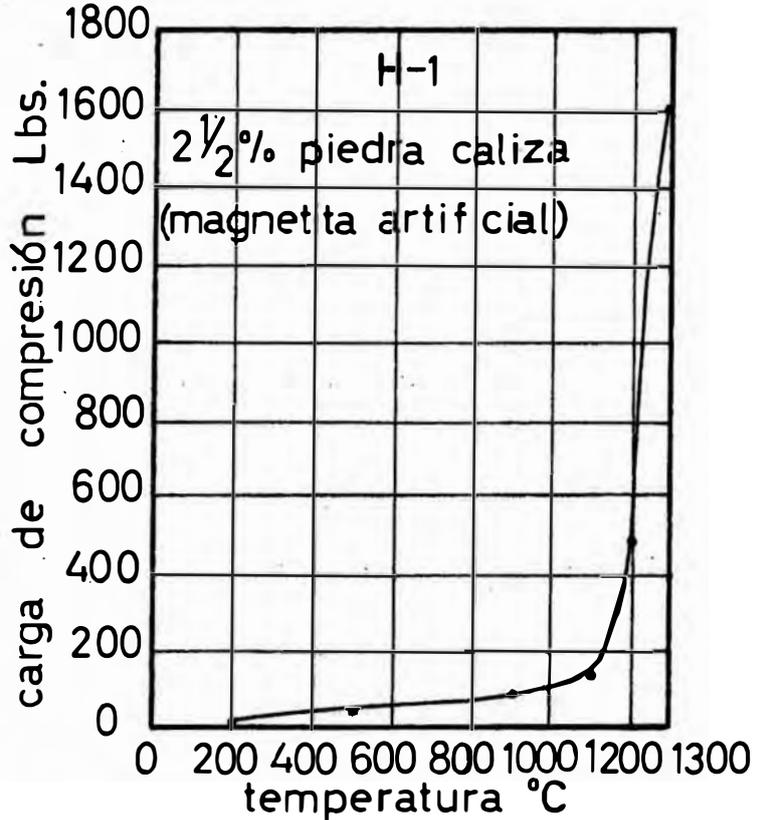


FIG. 24

TABLA N° 6: RELACIONES TEMPERATURA-RESISTENCIA DE LOS PELETS DE MINERAL DE HIERRO QUEMADOS EN EL LABORATORIO

ADITIVOS, Lb/Ton -	H - 1				H - 2		M - 1		M - 2		M - 3
	10 b 50 Pc	10 b 50 Pc	10 b	10 b	10 b	10 b	10 b	10 b	10 b 10 bx	10 b	10 b
CONDICION DEL CONC.	T M		C R		C R		C R				
TEMPERATURA DE QUEMADO.	RESISTENCIA				A	LA	COMPRESION,		Lb		
200°C	20	20	20	20	10	10	20	20	10	10	20
500	30	30	40	60	30	30	130	180	60	20	130
900	120	90	100	110	50	100	180	370	160	50	280
1100	130	140	110	140	240	230	460	640	200	70	470
1200	580	470	190	270	650	780	670	700	330	270	680
1300	1800	1620	770	570	1220	1000	1450	760	930	650	880

La Tabla 4 resume las propiedades físicas de los pélets quemados en el aparato de laboratorio hasta una temperatura última de 1,300°C. Esta Tabla muestra el efecto de los aditivos tales como piedra caliza y borax y el efecto de la condición de los concentrados, tales como los concentrados remolidos o los convertidos magnéticamente. Las propiedades físicas incluídas son como siguen: 1) Tamaños de los pélets, 2) Pesos de los pélets, 3) Análisis de malla de los pélets después de la prueba de caída, 4) Valores de las pruebas de compresión, de caída y de abrasión, y 5) La densidad aparente de los pélets. La determinación de las densidades aparentes fue hecha usando un boquiancho picnómetro improvisado.

El efecto de remoler los concentrados antes de la peletización parecía ser de pequeña consecuencia. Los minerales remolidos de H-1, H-2 y M-1 producían pélets con mayor resistencia a la abrasión, y en el caso de H-1 solamente un ligero aumento en la resistencia a la compresión y al impacto. Los minerales remolidos de M-1 y H-2 proporcionaban pélets con menor resistencia al impacto y a la compresión. Estos dos minerales remolidos, M-1 y H-2 mostraron una gran tendencia a descascararse mientras eran quemados, esto es, el mineral se compactaba demasiado en el estado húmedo, y la expulsión del agua agregada en el pelotamiento era inhibida durante el proceso de quemado. Aproximadamente el 21% de los pélets compuestos del mineral M-1 remolido, el 9% compuestos del H-2 remolido, y 5.2% de los pélets compuestos de 50% remolido y 50% sin remoler del M-1 se descascaraban durante la

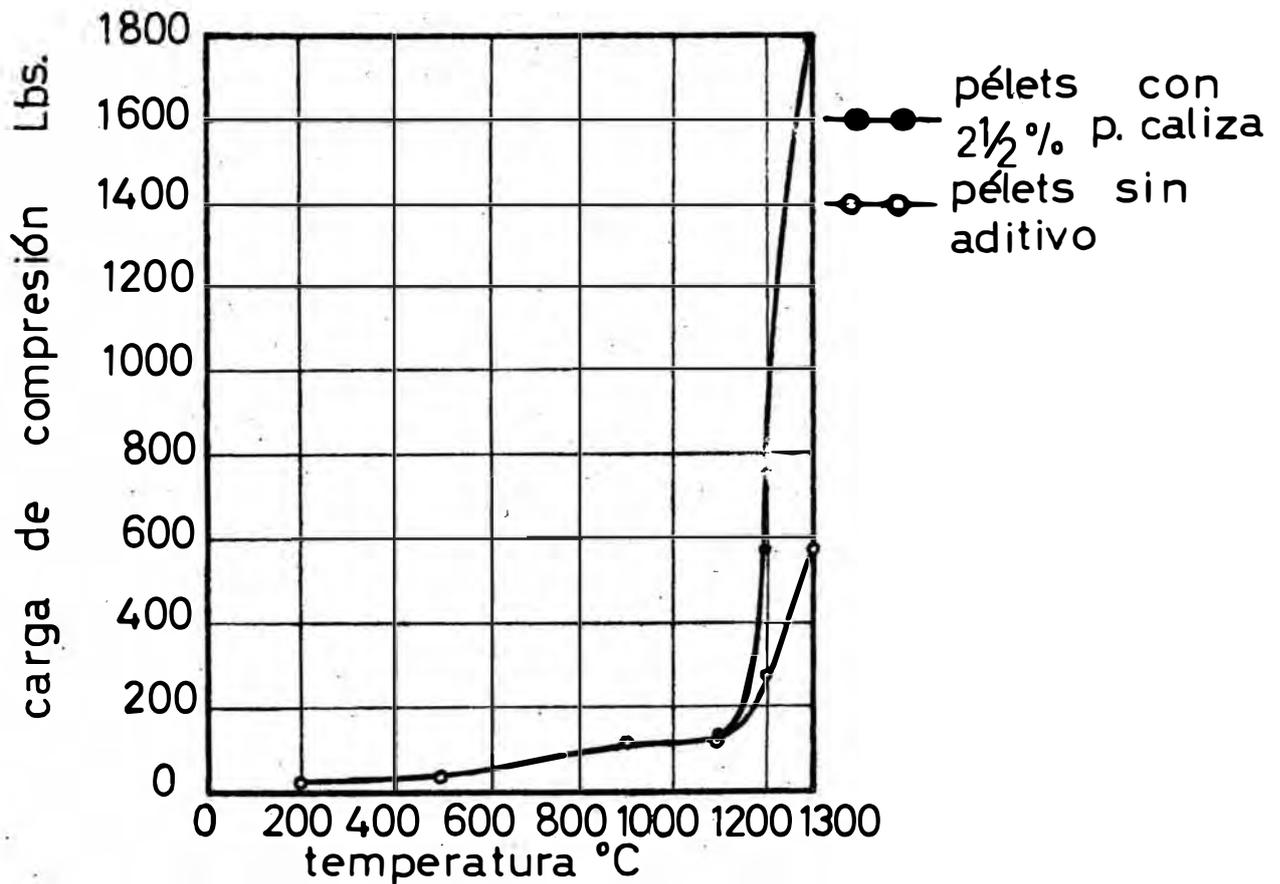


FIG. 25 Relaciones resistencia-temperatura de los peléts H-1 mostrando el efecto de piedra caliza pulverizada

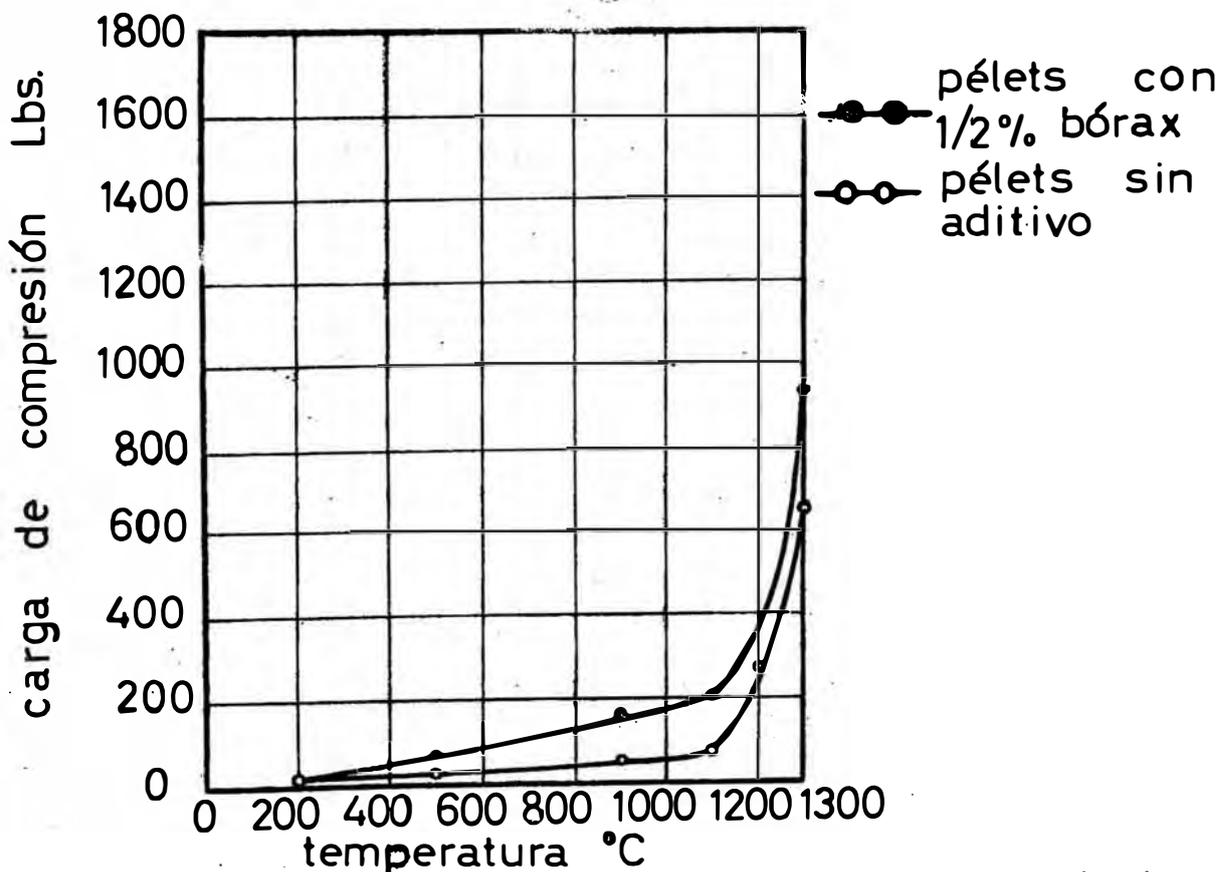


FIG. 26 Relaciones resistencia-temperatura de los pélets M-2 mostrando el efecto del bórax pulverizado

etapa de secado del proceso de quemado. No ocurrió descascaramiento alguno durante las pruebas de quemado de los demás pélets.

El efecto beneficioso de 2 1/2 % de piedra caliza en los pélets H-1 y el efecto beneficioso menos remarcable del bórax dentro de los pélets M-2 se demuestran por las propiedades de resistencia dadas en la Tabla cuatro. Un examen visual de los fragmentos cuarteados de estos pélets denotaban fracturas vítreas concoidales las cuales ejemplificaban la acción ligante de los aditivos, sobre todo si se tiene en cuenta el contraste con las fracturas cristalinas toscas de los mismos pélets no conteniendo ningún aditivo.

El aparente efecto perjudicial de la materia carbonosa interna en los pélets de mineral de hierro fue evidente por el crecimiento de las propiedades de resistencia de los pélets de H-2 conteniendo cantidades crecientes de carbón interno. Los pélets conteniendo 2% de carbón en el exterior, sin embargo parecían tener propiedades de resistencia mayores que la de los pélets que contenían cantidades menores de carbón internamente. Esta demostración indicaba que dentro de los pélets con carbón interno, la transferencia de calor por difusión gaseosa se retardaba, y que el carbono sustraía el oxígeno del mineral en vez de los gases calientes. Esta reacción causaba una reducción directa del mineral de hierro y por consiguiente defectos en la estructura del pélet, tales como núcleos vacíos o contraídos, volúmenes sinterizados a causa de los cambios de fase con la temperatura alta de la peletización. Los productos reducidos se reoxida

ron en algunos casos a estados de óxidos superiores de hierro, pero dejaron como testimonio de su historia pasada una estructura pobre de pélet con una resistencia de materiales baja.

Previsiones fueron hechas para mejorar las reacciones de gas-sólido durante los experimentos de peletización, mediante la aplicación de carbón al exterior del pélet. Esto naturalmente - previno una rotura en el interior del pélet y sirvió como un medio práctico para llevar combustible dentro de la zona peletizada en el aparato de laboratorio.

Los pélets comprendidos en H-1 convertidos a magnetita artificial y mezclados con 2 1/2 % de piedra caliza eran comparables en todas sus propiedades de resistencia a los pélets del mineral H-1 no convertido conteniendo la misma cantidad de piedra caliza. De esta conversión algunas de las ventajas químicas de la magnetita se obtuvieron sin detrimento del proceso de peletización.

C A P Í T U L O I V

APLICACIONES FERROSAS Y NO FERROSAS DE LA CARBONATACION EN LOS PROCESOS DE PELETIZACION

Durante las dos últimas décadas, la aglomeración de materiales finamente divididos se ha convertido cada vez más importante tanto para las industrias metalúrgicas ferrosas como para las no ferrosas. Varias técnicas se han desarrollado para convertir las materias finas en aglomerados de tamaño uniforme de suficiente fluidez, resistente a la abrasión y al impacto, adecuados para un siguiente manipuleo y procesamiento metalúrgico.

La Blocked Iron Corporation dedicó muchos años a perfec - cionar y utilizar las técnicas de aglomeración a baja temperatura. El desarrollo del método por carbonatación fue el resultado de su investi gación sobre un ligante superior a aquellos usados anteriormente. Al- gunos ligantes solubles en agua, perjudicaban la resistencia a las in- clemencias del tiempo del aglomerado; otros introducían constituyentes que contribuían a una dilución no deseable o contaminaban el producto.

El proceso de carbonatación así patentado por la Blocked Iron Corporation, ofrece una técnica económica de baja temperatura pa- ra convertir materiales finamente divididos en pélets de altas calida-

dades físicas y metalúrgicas sin las desventajas anteriormente mencionadas.

Recientemente la Koppers Company, Inc. en Pittsburgh, Pensilvania, se ha convertido en el concesionario de alcance mundial para diseñar y construir plantas de aglomeración usando el proceso de carbonatación. La investigación está siendo continuada coincidentemente en las instalaciones de la Koppers Company, Inc. en Monroeville y Verona, Pensilvania, y en la Blocked Iron Corporation, en Montrose, Nueva York. En este capítulo se presentan algunos de sus descubrimientos relacionados a la peletización por carbonatación.

1. DESCRIPCION DEL PROCESO.

El proceso de carbonatación tiene lugar a una temperatura cercana a la del ambiente sin calor de una fuente externa. Esencialmente el proceso consiste en mezclar pequeñas cantidades de hidróxidos básicos pulverizados con finos metálicos u otros sólidos finamente divididos. La mezcla prehumedecida es peloteada y las bolas humedecidas son secadas parcialmente. Seguidamente son tratadas (carbonatación) con gases elaborados conteniendo bióxido de carbono. Así los hidróxidos son convertidos químicamente en una red continua de carbonatos duros, produciendo un pélet fuerte, altamente resistente a la abrasión, endurecido uniformemente.

Las resistencias del pélet pueden aún mejorarse con la adición de pequeñas cantidades de melaza u otras sustancias que contienen azúcar.

2. APLICACIONES FERROSAS. INVESTIGACIONES DE LABORATORIO.-

Se realizaron una serie de pruebas con el fin de determinar la influencia de las variaciones del material y del procedimiento en la calidad del producto. Los resultados de las pruebas demostraron que los datos eran reproducibles y suficientemente concluyentes. Deberá señalarse que las condiciones óptimas del proceso son específicas a los materiales por aglomerarse y por lo tanto, deberá tenerse cuidado antes de trasladar estos resultados como conclusiones generales para cualquier material.

A. INFLUENCIA DEL SECADO PARCIAL.-

En este proceso es usual que las pelotas húmedas se sequen parcialmente antes de entrar en contacto con el bióxido de carbono. Con la mayoría de los materiales procesados hasta la fecha, el grado del secado parcial fue de una importancia única. Tentativas para producir pélets carbonatados con bolas no secadas, o bolas completamente secadas, resultaron en pélets con resistencia extremadamente débiles.

En los esfuerzos por llevar al máximo la calidad del producto se determinó que el grado deseable del secado parcial y la correspondiente resistencia máxima del pélet alcanzada, es específica al tipo de materiales y otras condiciones.

La Figura 27 muestra una relación típica del contenido de humedad de la bola parcialmente secada, con la resistencia a la compresión del pélet, la resistencia a la abrasión y el contenido de bióxido de carbono del pélet después de la

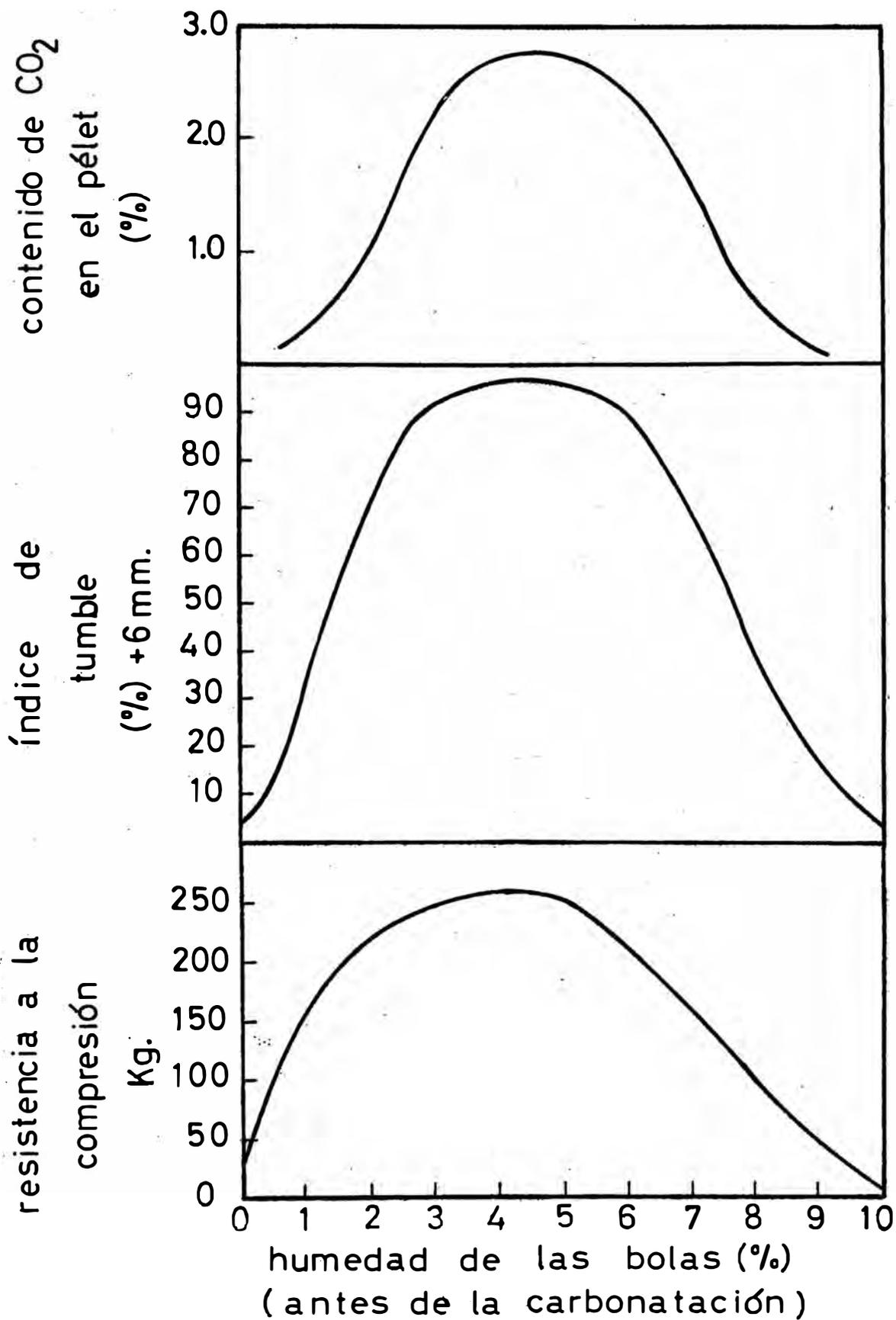


FIG. 27 Típica correlación entre el contenido de humedad después del secado parcial y la calidad del pélet carbonatado

carbonatación. Esta figura muestra que los puntos máximos de la resistencia a la compresión, la resistencia abrasiva y el contenido de bióxido de carbono de los pélets carbonatados - coinciden en un nivel de contenido de humedad específico, este nivel es considerado "El Contenido de Humedad Óptimo de Precarbonatación".

En las investigaciones descritas en este capítulo, pruebas preliminares determinaron generalmente el contenido de humedad óptima de precarbonatación y en general, solamente se consideraron datos obtenidos dentro del rango de humedad óptima.

B. INFLUENCIA DE LA GRADACION DE TAMAÑO DEL MATERIAL FERROSO Y DE LA CANTIDAD DE HIDRATO LIGANTE.-

La materia prima seleccionada para este estudio fue un concentrado espiral de hematita especular Canadiense.

Un análisis químico típico se muestra en la Tabla 7.

Para investigar el efecto de distribución de tamaño de la alimentación ferrosa en la calidad del producto, una porción del concentrado fue molida en un molino de bolas obteniendo se esencialmente, una fineza de menos 44 micrones y mezclado con el concentrado no molido en diferentes proporciones. La distribución de tamaño del concentrado molido y no molido también se muestran en la tabla 7.

El concentrado se preparó en cuatro grupos separados, en los cuales la proporción de concentrado no molido al molido se

TABLA N° 7: ANALISIS QUIMICO Y DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE LAS MATERIAS PRIMAS

ANALISIS QUIMICO (base seca)		CONCENTRADO DE MINERAL DE HIERRO		*MONOHIDRATO DOLOMITICO
- Fe	%	66.19		-
- SiO ₂	"	4.67		-
- Al ₂ O ₃	"	0.32		-
- CaO	"	0.02		46.87
- MgO	"	0.03		33.98
- Ca(OH) ₂	"	-		62.93
- Pérdida en la Ignición	"	-		16.80
DISTRIBUCION DE TAMAÑO % ACUMULATIVO RETENIDO		CONCENTRADO DE MINERAL DE HIERRO		MONOHIDRATO DOLOMITICO
Micrones	Malla Tyler	Sin Moler	Molido	
1,168	14	3.32	--	-
589	28	31.96	--	-
295	48	70.24	--	-
246	60	76.64	--	-
147	100	91.36	0.10	-
74	200	98.88	0.85	0.22
44	325	99.14	5.75	0.50
Menos 44 micrones (325 malla)		0.86	94.25	99.50

* Dolomita parcialmente hidratada calcinada a menudo referida como un hidrato de dolomita normal (Tipo N).

varió en incrementos de 25%, 0:100, 25:75, 50:50, 75:25.

Adicionalmente, cantidades constantes pequeñas de monohidratos dolomíticos y soluciones de melaza fueron también mezclados a los concentrados diferentemente proporcionados. Un análisis típico del monohidrato dolomítico usado se muestra en la Tabla 7. Para cada prueba la alimentación consistía de 95.10% de concentrado, 4.75% de monohidrato, y 0.15% de melaza sobre una base de peso seco. Durante la mezcla, el agua se introdujo a los finos tal como se requería para el pelotamiento siguiente. Las mezclas se pelotearon luego separadamente en un peletizador de cono tipo batch de 50 centímetros de diámetro.

Las características de las bolas húmedas se resumen en la Tabla 8.

Tal como se ve en la Tabla, el contenido de humedad requerido para el pelotamiento se reducía cuando la cantidad de concentrado sin moler aumentaba. Esta humedad reducida requerida para el pelotamiento de una alimentación relativamente gruesa se atribuyó a la reducida área de superficie específica de los finos. Debe notarse que la resistencia a la compresión de las bolas húmedas también disminuye con el aumento del tamaño promedio de la partícula. Con respecto a las bolas húmedas de esta naturaleza, la resistencia de la bola se considera ser principalmente una función de la atracción capilar y la tensión superficial.

TABLA N° 8: CARACTERISTICAS DE LAS BÓLAS HUMEDAS

MINERAL ALIMENTADO SIN MÓLER	0	25	50	75
Molido	100	75	50	25
Bolas Húmedas humedad, base húme- da, %, peso.	10.0	8.4	6.0	4.3
Fuerza de compre - sión, promedio , gramos.	972	876	863	545

Cada grupo de bolas húmedas se secaron parcialmente colocando 6 á 7 kilogramos de bolas dentro de una unidad rotante secadora carbonatadora. La humedad fue parcialmente quitada pasando 0.90 metros cúbicos/minuto de gases de combustión a 250°C a través de la unidad rotante de pélets. Como se anticipó las bolas preparadas para la alimentación relativamente más gruesa requirieron de una cantidad menor de agua para ser quitada.

Al completar el secado parcial se dejó de pasar el flujo caliente de gases de combustión y la carbonatación comenzó pasando 2 metros cúbicos/hora de gases de bióxido de carbono a 15°C, a través de los pélets. Después de una duración predeterminada (60 minutos) los pélets se quitaron de la unidad y se enfriaron antes de ser probadas sus propiedades físicas.

La resistencia del pélet se determinó promediando la fuerza requerida para romper individualmente 20 pélets de casi el mismo tamaño. La línea A de la figura 28 ilustra la resistencia comprensiva del pélet siendo inversamente proporcional a la fineza del concentrado alimentado.

Dos nuevas series de pruebas se realizaron con los cuatro grupos de concentrado. El contenido de monohidrato de las cuatro cargas se aumentó a 6% por peso de la primera serie y 7% por peso para la segunda. Las mismas técnicas prescritas para secado y carbonatación se siguieron y los pélets

endurecidos, se sometieron a fuerzas de compresión. Las líneas B y C de la Figura 28 ilustran el aumento de la resistencia del pélet al aumentar el contenido de hidrato.

C. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE CARBONATACION.-

Para estas pruebas cuatro grupos de bolas se prepararon con las cuatro mezclas de concentrados molido e iguales cantidades de monohidrato dolomítico. Cada grupo fue parcialmente secado y luego tratado con gas de bióxido de carbono. En intervalos de tiempo progresivamente aumentados, las muestras de pélets fueron quitadas de la cámara de carbonatación, enfriadas y probadas sus resistencias a la compresión para un contenido de bióxido de carbono dado.

La Figura 29 muestra la relación entre el tiempo de carbonatación y la cantidad de carbonato formado, expresado como ganancia en porcentaje de bióxido de carbono en los pélets. La Figura 30 muestra la relación entre el tiempo de carbonatación y la resistencia a la compresión. Hasta que se alcanzó un equilibrio, la cantidad del carbonato formado y la resistencia del pélet aumentaban con el tiempo de carbonatación. Los pélets preparados con los molidos más finos alcanzaron el equilibrio en un nivel más alto. También debe notarse que todos los grupos de pélets alcanzaron el equilibrio con casi el mismo contenido de carbonato, y que también existió una marcada diferencia en la resistencia del pélet para cada grupo.

D. INFLUENCIA DEL TIPO DE ADITIVO BASICO.-

El efecto de aditivos básicos en la calidad del pélet

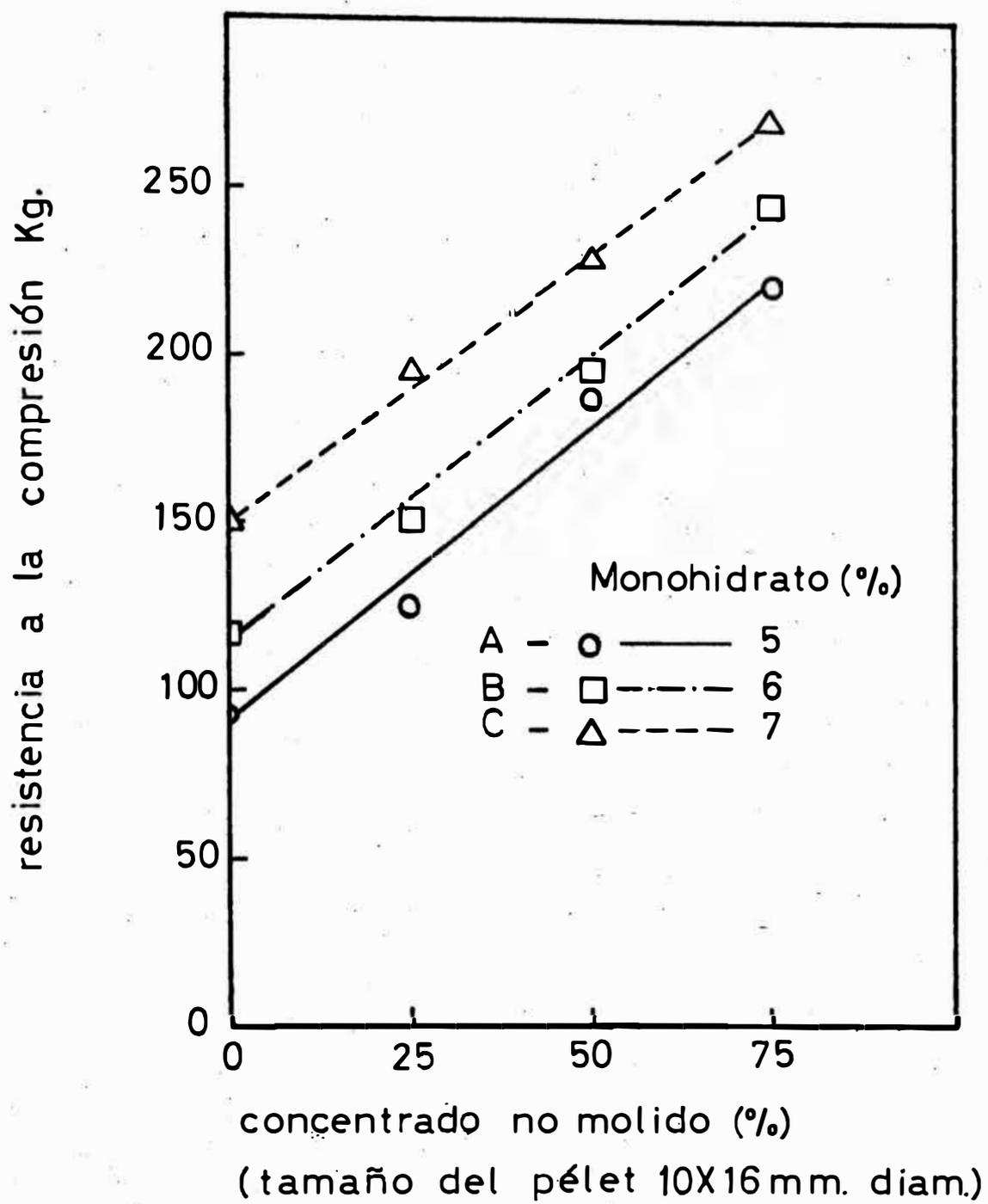


FIG. 28 Influencia del tamaño alimentado y de la cantidad de monohidrato en la resistencia del pélet carbonatado

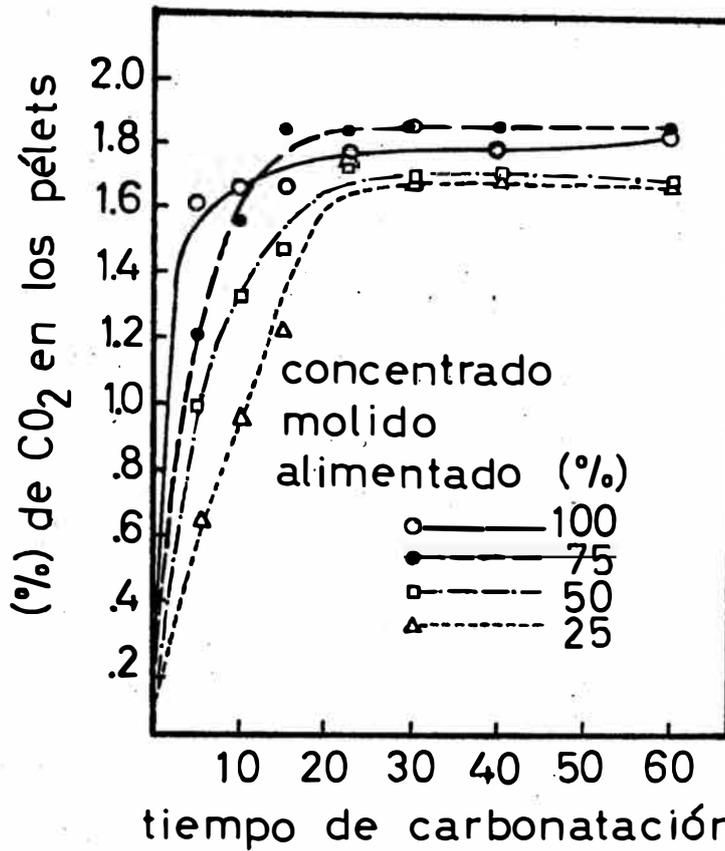


FIG. 29 Relación grado-tiempo de carbonatación

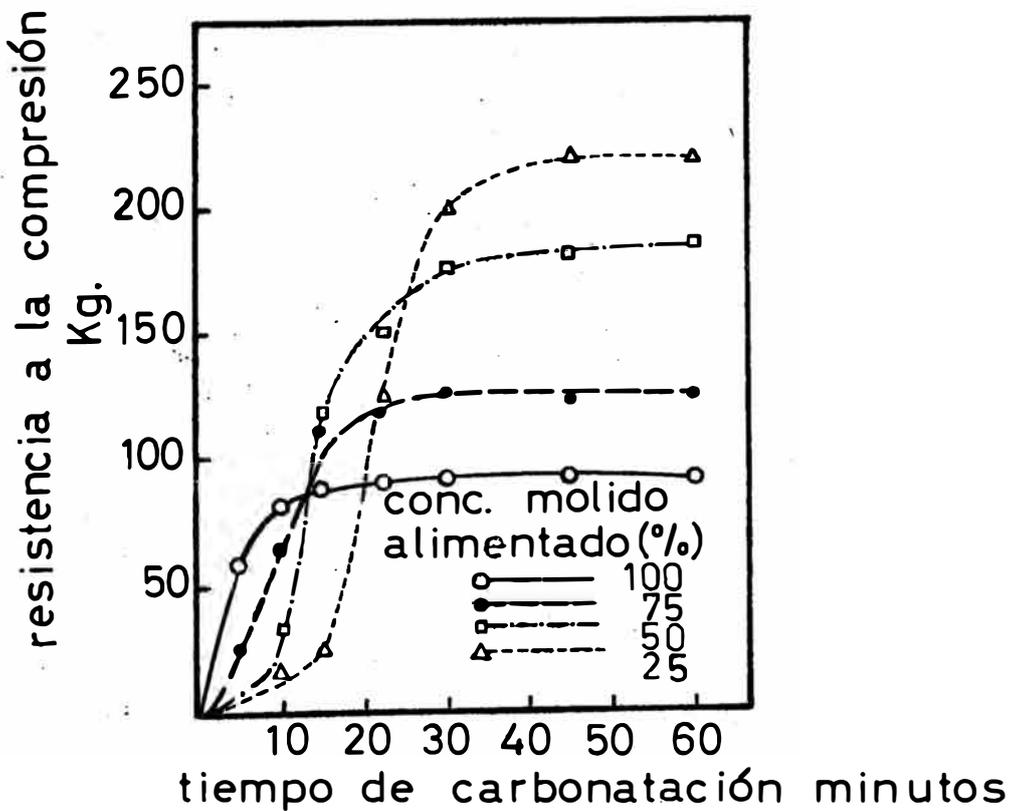


FIG. 30 Resistencia del pélet con el tiempo de carbonatación. Tamaño del pélet 10X16 mm. diámetro

producido por carbonatación fue investigado. La alimentación para la peletización consistió de hematita especular molida y diferentes óxidos metálicos terrosos alcalinos y/o hidróxidos. En todas las pruebas el total del aditivo alcalino fue 9% por peso seco.

Los métodos de preparación de muestra, pelletamiento, secado, carbonatación y pruebas del producto fueron casi idénticos, de tal manera que cambios aparentes en la calidad del producto podrían atribuirse al tipo de aditivo básico empleado.

Los datos más indicativos seleccionados de las tendencias generales de los pélets se resumen en la Tabla 9. Pélets de alta resistencia se produjeron con cuatro monohidratos dolomíticos de tipo comercial de diferentes orígenes geográficos. Las resistencias compresivas promedio variaban de 68 á 86 kilogramos y los índices correspondientes de tumble (resistencia a la abrasión y al impacto) estuvieron en un rango estrecho de 96.3 á 97.8% más 6 mm.

Cuando se sustituyó el óxido de magnesio por monohidrato dolomítico, la resistencia compresiva y los índices de tumble permanecieron sin cambio.

Los pélets hechos con hidróxido de calcio presentaron menos resistencia que aquellos hechos con monohidrato dolomítico u óxido de magnesio. La resistencia a la compresión fue de 44 kilogramos y el índice de tumble fue 71.8% más 6 mm.

TABLA N° 9: INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS BASICOS EN LA RESISTENCIA DEL PELET

TIPO DE ADITIVO BASICO (9% por peso)	RESISTENCIA A LA COMPRESION		INDICE DE TUMBLE % + 6 mm
	RANGO Kg.	PROMEDIO Kg.	
MONOHIDRATO DOLOMITICO			
Región de Ohio	53 - 85	69	97.4
Región de Wisconsin	68 - 87	78	97.4
Región 1 de Pensilvania	45 - 84	68	96.3
Región 2 de Pensilvania	70 - 106	86	97.8
Oxido de Magnesio	47 - 93	68	96.9
Hidróxido de Calcio	31 - 52	44	71.8
Hidróxido de Calcio con 0.075% de melasa	50 - 95	79	97.1
COMPUESTO de 5.85% Hidróxido de Calcio 3.15%			
Oxido de Magnesio	45 - 94	82	96.0

Introduciendo 0.075% de melaza por peso seco a la mezcla que contenían hidróxido de calcio aumentó la resistencia del pélet al nivel obtenido con monohidrato dolomítico.

Por último la proporción estequiométrica del hidróxido de calcio alto (5.8% por peso) y el óxido de magnesio (3% por peso) se usaron para preparar una mezcla química parecida al monohidrato dolomítico. Las resistencias del pélet obtenidas eran iguales a aquellas alcanzadas con monohidrato dolomítico natural.

E. EFECTO DE LA CONCENTRACION DEL DIOXIDO DE CARBONO Y LA ADICION DE MELAZA.-

En todas las pruebas se mezclaron 9% de monohidrato dolomítico a hematita especular fina y se peletizó. Después de un secado parcial, los porcentajes de dióxido de carbono mantenidos fueron 10, 30 y 100% por volumen; el volumen restante consistió de nitrógeno.

Durante la carbonatación la temperatura y la humedad relativa de los gases del proceso eran constantes a 50°C y 80%, respectivamente.

Los resultados mostrando la resistencia relativa del pélet como una función de la concentración del dióxido de carbono y el tiempo de carbonatación están indicados en la Figura 31. La comparación muestra que para alcanzar 50 Kilogramos de resistencia compresiva con 100% de dióxido de carbono requería siete minutos, mientras que para alcanzar esta resisten-

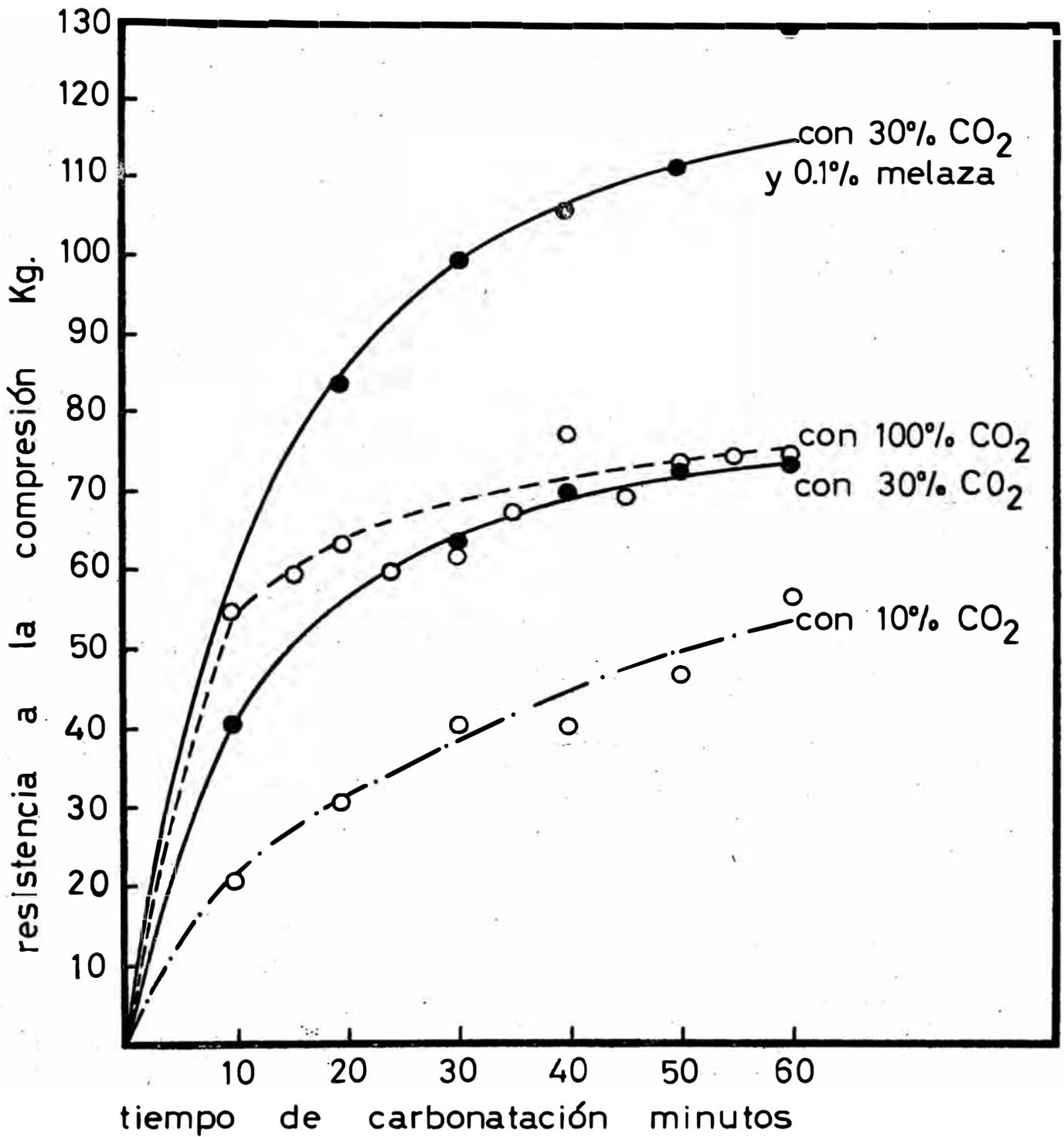


FIG. 31 Efecto de la concentración del dióxido de carbono y la adición de melaza

cia con 30% y 10% de concentraciones de dióxido de carbono, se requerían 15 y 52 minutos, respectivamente.

Un estudio similar se realizó para evaluar el efecto de una pequeña adición de solución de melaza de caña de azúcar. La figura 31, muestra el efecto encontrado cuando 0.1% de solución de melaza se añadió a una mezcla de 91% de hematita especular y 9% de monohidrato dolomítico. Las condiciones de carbonatación a 50°C y 80% de humedad relativa se mantuvieron y la concentración de dióxido de carbono fue nuevamente de 30% por volumen.

Se observó que la adición de melaza aumentaba el nivel de resistencia muy dramáticamente. El uso de melaza reducía el tiempo requerido para producir pélets de 70 kilogramos de resistencia compresiva de cerca de 45 minutos a cerca de 16 minutos y después de 60 minutos los pélets alcanzaban una resistencia sobre los 100 kilogramos en comparación con los 70 kilogramos antes alcanzados.

F. EVALUACION METALURGICA DE LOS PELETS.-

Los pélets típicos, obtenidos por carbonatación con o sin adiciones de carbono en la forma de carbón, y de melaza, fueron probados conforme a la prueba de reductibilidad propuesta por Rolf Linder.

La prueba Linder consiste de una reducción programada de un tamaño de muestra de mineral grueso o de un aglomerado en la presencia de coque grueso, el cual es rotado en un tu

bo de acero inoxidable a una velocidad constante. Durante el período de la prueba que es de 5 horas, la carga es calentada externamente hasta 1,000°C manteniendo velocidades de calentamiento y velocidades de flujo de gases reductores predeterminados a través del tubo rotatorio. Al completar el programa de reducción, la carga es enfriada en el tubo en una atmósfera neutral y seguidamente probada para ver su reducción química y sus cambios de consistencia de tamaño.

La reductibilidad relativa es medida por medio del porcentaje de oxígeno extraído de los óxidos de hierro, mientras la tendencia relativa de la degradación física, es decir la estabilidad estructural, es medida en términos de finos generados durante el programa de reducción.

La tabla 10 presenta los resultados de la prueba Linder obtenidos con los pélets carbonatados, pélets endurecidos por calor y sinter. La reductibilidad y los valores de estabilidad estructural para los pélets carbonatados fueron del mismo orden de magnitud que los mejores valores obtenidos con materiales de carga comerciales. Los pélets carbonatados conteniendo carbón exhibieron una reductibilidad más alta y algunas veces una estabilidad estructural ligeramente reducida. Por lo general, el incremento de adiciones de hidrato de cal y/o melaza mejoraron el comportamiento en la prueba Linder.

TABLA N° 10: COMPARACION DE LOS PELETS CARBONATADOS CON PELETS COMERCIALES ENDURECIDOS POR CALOR EN EL APARATO L I N D E R

	INDICE LINDER DEL GRADO DE OXIDACION DEL PRODUCTO	*PORCENTAJE GENERADO MENOS 1 mm	RESISTENCIA A LA COMPRESION DESPUES DE LA REDUCCION, Kg.
PELETS CARBONATADOS HEMATITA ESPECULAR			
+ 7% de hidrato	47.2	6.2	27
+ 9% de hidrato	48.5	4.9	44
+ 9% de hidrato	37.1	8.5	35
MAGNETITA-HEMATITA ESPECULAR			
+ 7% de hidrato	45.3	6.6	33
+ 7% de hidrato + 0.15% de melasa	51.8	1.8	35
+ 9% de hidrato	52.6	1.6	28
+ 9% de hidrato + 0.15% de melasa	53.5	1.5	54
+ 8% de hidrato + 2% de carbón	43.1	3.5	35
HEMATITA			
+ 9% hidrato + 0.15% de melasa	50.3	5.9	8
+ 9% de hidrato + 2% de carbón	39.2	4.2	13
+ 8% de hidrato + 2% de carbón	66.7	0.3	23
+ 8% de hidrato + 3% de carbón	40.3	1.5	13

* Corregido por pérdida de coque.

Cont...

Cont. Tabla N° 10...

	INDICE LINDER DEL GRADO DE OXIDACION DEL PRODUCTO	PORCENTAJE GENERADO MENOS 1 mm	RESISTENCIA A LA COMPRESION DESPUES DE LA REDUCION, Kg.
MAGNETITA			
+ 7.5% de hidrato	59.5	2.6	50
PIRITA CALCINADA			
+ 9% de hidrato + 0.15% de melasa	51.7	5.8	59
PELETS ENDURECIDOS POR CALOR			
Taconita 1	57.3	3.6	35
Taconita 2	55.1	6.2	42
Hematita Especular	71.4	4.3	55
Magnetita-Hematita Especular	49.8	3.7	61
Hematita-Magnetita Sinters	56.8	3.7	30
Promedio de 4 Dis- trito de Pittsburgh	61.3	3.0	-
Altamente Básico Dis- trito de Pittsburgh	57.3	22.9	-
América del Sur	56.4	21.3	-

Bouman y Aubrey de la Bethlehem Steel Corporation informaron que con ciertos aglomerados, se observó una decrepita - ción incrementada drásticamente durante las primeras etapas de temperatura más bajas del programa de reducción de Linder.

En sus pruebas, la cantidad de finos generados alcanzaron un máximo cerca de las tres horas, luego disminuía a medida que progresaba la prueba resultando en valores bajos favorables, después del tiempo total programado de 5 horas.

Ellos atribuyeron la disminución de los finos a la reaglo - meración en el tubo Linder durante las siguientes etapas de reducción.

En vista de este fenómeno, los pélets carbonatados esta - ban sujetos a similares modificaciones en las pruebas de Linder. En una de las series las pruebas se terminaron al alcanzar el período normal de 5 horas. En otra de las series, los pélets fueron probados por 8 horas. La temperatu - ra de 1,000°C alcanzada después de un período programado de 5 horas se mantuvo para 3 horas más. Los resultados de es - tas modificaciones en las pruebas de reducción de Linder tal como se muestra en la figura 32 indican que los pélets car - bonatados no mostraron ninguna disminución significativa de la estabilidad estructural durante toda la etapa de reduc - ción.

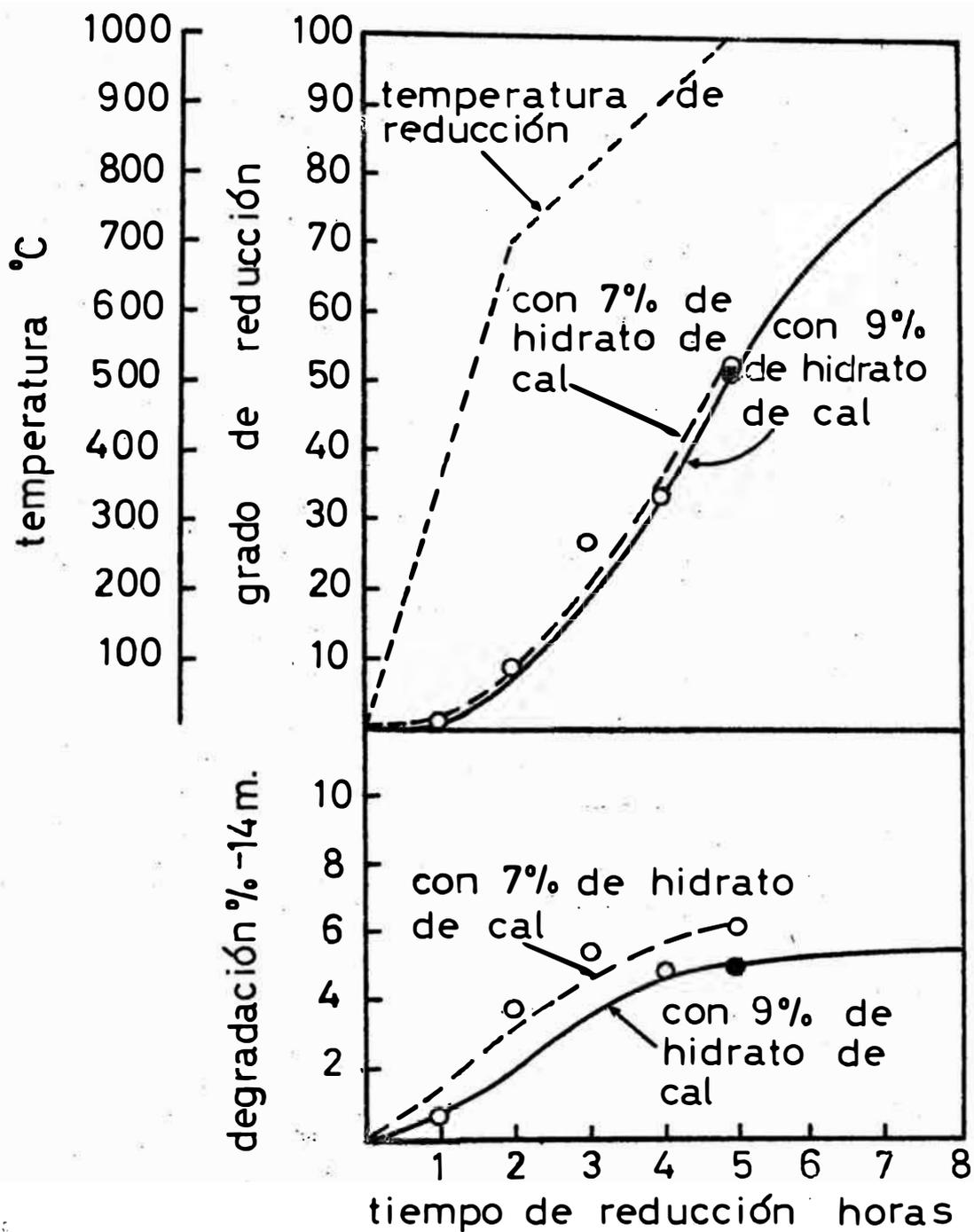


FIG. 32 Pruebas de reducibilidad de Linder modificadas con pélets de hematita especular carbonatados

3. APLICACIONES NO FERROSAS.-

A. ANTECEDENTES.-

La aglomeración, más específicamente la peletización de minerales ferrosos finamente divididos, logró ganancias económicas sustanciales para la industria ferrosa. Evidencias indican que la peletización podría ser beneficiosa para las industrias no ferrosas.

Los riesgos físicos y económicos, en el manipuleo y transporte de concentrados de cobre peletizados no ferrosos de grano fino húmedo se han discutido y la peletización ha sido ofrecida como un concepto de mejoramiento.

La fusión en laboratorio y a escala industrial de los concentrados de cobre peletizados con fundente y sin fundente indicaron ventajas y alentaron una investigación más amplia.

Conclusiones favorables se sacaron de una evaluación económica teórica para peletizar concentrados de cobre.

B. TRABAJO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO.-

Para determinar la aplicabilidad de los pélets carbonatados, tres ejemplos de aplicación industrial posibles, se investigaron y seleccionaron como sigue:

- (a) Una instalación de peletización en la concentradora de cobre, la cual está situada a una considerable distancia de la fundición y requiere una transportación oceánica o férrea del concentrado.

- (b) Una instalación de peletización donde la concentradora de cobre y la fundición sean contiguas, o casi así.
- (c) Proporcionar una alimentación peletizada para un alto horno de cobre (llamado también horno de cuba u horno de manga)

CASO (a).- El objetivo del primer ejemplo fue reducir el contenido de humedad del concentrado y mejorar el transporte proporcionando un pélet, fuerte, seco y autofundente.

Las pruebas se realizaron con concentrados de sulfuro de cobre usando las técnicas de peletización por carbonatación. Con un 7% por peso, de adición del ligante hidrato de cal, la calidad del pélet carbonatado se caracterizó por una resistencia compresiva de 70 kilogramos y quedando aproximadamente 99% sobre un cernidor de 6 mm después de someter a una prueba de abrasión a una muestra de 5 libras durante 200 revoluciones en un tambor de pruebas de abrasión para coke según el ASTM.

Si estos pélets demuestran ser más fuertes de lo necesario, el hidrato de cal puede reducirse dando una correspondiente reducción de resistencia.

CASO (b).- El segundo ejemplo supone una concentradora y una fundición colindantes.

Los objetivos eran eliminar el contenido de humedad de la carga, minimizar las pérdidas de polvo en la fundición y proporcionar

nar un pélet fuerte, único, compuesto, conteniendo todas las materias primas generalmente alimentadas separadamente al horno de reverbero.

Los pélets carbonatados se hicieron de una mezcla de 81% de concentrado de óxido de cobre, 5% concentrado de chalcopirita, 4% concentrado de pirita, y 10% de hidrato de cal, por peso. Estas proporciones se aproximan a una carga de un horno reverbero actual.

El pélet carbonatado terminado tenía un contenido de humedad menor al 0.5%, una resistencia a la compresión de 45-65 Kilogramos y un 95% remanente, se obtuvo sobre 6 mm después de la prueba de abrasión.

Si se deseaba una porción del hidrato de cal podría reemplazarse con piedra fundente, de tal modo de mantener el total del fundente básico requerido.

CASO (c).- Para el último ejemplo se produjeron pélets autofundentes y semireducidos (pélets autoreductores) de concentrados de cobre. Esto se logró mezclando 2 - 4% por peso de finos de carbón, con adición de 5% de hidrato de cal, al concentrado de sulfuro, efectuando el pelletamiento y luego la carbonatación. La resistencia compresiva del pélet era aproximadamente de 45 kilogramos y 76% remanente de más 6 mm quedó después de la prueba la abrasión. Se supuso que los pélets carbonatados con estas propiedades físicas y químicas podrían proporcionar una alimentación favorable para una proo

ducción económica de cobre en un alto horno u horno de cuba.

El proceso de peletización por carbonatación se presta a los finos ferrosos así como a los no ferrosos. En el presente están en camino investigaciones de laboratorio peletizando cobre contenido en polvos y precipitados.

Aunque la atención ha sido enfocada ahora a los minerales de cobre, otros materiales no ferrosos han sido exitosamente procesados en pélets por el método de carbonatación.

4. PELETIZACION CONTINUA A GRAN ESCALA POR CARBONATACION.-

Varios minerales ferrosos diferentes fueron procesados en una operación continua a gran escala. El propósito era verificar los datos obtenidos a escala de laboratorio, establecer la correlación entre la escala de bancada tipo-batch y la operación a escala industrial, y producir un gran tonelaje de pélets para un proceso metalúrgico siguiente.

En una campaña se produjeron 1,400 toneladas métricas de pélets por carbonatación para una productora de acero norteamericana. La distribución del tamaño típico y la composición química del concentrado de hematita especular usado se muestra en la Tabla 11.

A. PREPARACION DEL MATERIAL A ALIMENTAR Y FORMACION DE BOLLAS.-

La alimentación consistió de 80% de concentrado, 8% de mo

TABLA N° 11: DISTRIBUCION DEL TAMAÑO Y ANALISIS QUIMICO

ANALISIS QUIMICO		
Fe		66.0 %
$\Sigma \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$		5.6 %
DISTRIBUCION DEL TAMAÑO		
% ACUMULATIVO		RETENIDO
<u>MICRONES</u>	<u>MALLA</u>	
246	60	29 %
147	100	34 %
74	200	39 %
44	325	47 %
-44	-325	53 %

nohidrato 4% carbón bituminoso y 8% humedad superficial o humedad agregada por peso. No se emplearon melaza ni otros aditivos. La alimentación fue completamente mezclada y alimentada continuamente a un tambor peletizador de 1.8 metros de diámetro por 8.5 metros de largo.

El pelletamiento se controló para producir bolas húmedas de 10 a 16 mm de diámetro. Las bolas húmedas se descargaron sobre un cernidor vibrante la parte de menor tamaño fue reciclada a la alimentación y la parte de tamaño mayor se alimentó al secador. El análisis de tamaño realizado en muestras representativas mostraron que el 75 al 95% de bolas húmedas tenían el rango de tamaño deseado de 10 a 16 mm.

B. ENDURECIMIENTO A BAJA TEMPERATURA.-

El endurecimiento a baja temperatura consistió de un secado parcial y carbonatación en dos unidades rotativas (1.5 metros de diámetro por 6 metros de largo) colocadas en serie.

En la primera unidad, las bolas húmedas se secaron parcialmente a un contenido de humedad residual de aproximadamente 2%. Después que se estableció el equilibrio, la temperatura del aire caliente de ingreso estaba en el rango de 125 a 150°C mientras la temperatura del aire de salida variaba entre 26 a 38°C. La temperatura de las bolas alimentadas era aproximadamente 15°C, las cuales aumentaron a 35°C durante el secado.

Las bolas secadas parcialmente se alimentaron a la segunda unidad rotatoria donde las bolas entraron en contacto con

gas de bióxido de carbono teniendo una temperatura de ingreso de 15°C y una temperatura de salida en el rango de 55 á 70°C. Durante la reacción exotérmica de carbonatación, la temperatura del pélet aumentó en un rango de 55 á 70°C.

El tiempo total del proceso incluyendo pelotamiento, secado y carbonatación fue de 60 á 70 minutos.

C. MANIPULEO DEL PRODUCTO Y ALMACENAMIENTO.-

El pélet producido se cargó en carros de ferrocarriles y fue transportado 850 Kilómetros, donde se le descargó y apiló en canchas de almacenamiento.

Los pélets carbonatados fueron almacenados al aire libre por aproximadamente 6 meses, donde estuvieron expuestos a lluvias, nieve y a repetidos congelamientos y deshielamientos. Luego de estar expuestos a este clima bastante fuerte, los pélets se trasladaron a las canchas de almacenamiento del alto horno.

Los pélets fueron muestreados y probados en el mismo lugar donde se encontraba ubicado el alto horno, los resultados típicos se resumen en la Tabla 12.

Debe notarse que después del transporte por vía férrea y camiones, el almacenamiento severo de invierno, y el manipuleo incluyendo un número alto de caídas en los puntos de traslado, aproximadamente 98% de los pélets carbonatados fueron retenidos en un cernidor de 6 mm.

TABLA N° 12: CARACTERISTICAS TIPICAS FISICAS Y QUIMICAS DE PELETS CARBONATADOS DE HEMATITA

ANALISIS QUIMICO	
Fe	55.16 %
Σ CaO + MgO	7.53 %
Σ SiO ₂ + Al ₂ O ₃	4.73 %
C	4.35 %
S	0.06 %
DISTRIBUCION DEL TAMAÑO	
% ACUMULATIVO RETENIDO	
13 mm	3 %
10 mm	88 %
6 mm	98 %
2 mm	99 %
*Prueba de Tumble sobre + 6 mm	95 - 99 % + 6 mm
Humedad de los pélets, base húmeda	< 1 % por peso
Densidad de la masa	1.9 tons. métricas/metro cúbico

* Para la prueba de Tumble (Prueba de abrasión) 34 Kg. de pélets fueron sometidos a un rodamiento en un tambor a 25 RPM durante 200 revoluciones, según las especificaciones del ASTM en las pruebas de abrasión para coke.

Las pruebas de tumble realizadas con estos pélets expuestos a la interperie dieron como resultados valores de 95 - 99% para + 6 mm, lo que indica una excelente resistencia al impacto y a la abrasión.

D. ALTO HORNO EXPERIMENTAL.-

Las 1,400 toneladas métricas de pélets carbonatados se evaluaron en un pequeño alto horno. El alto horno tiene un crisol amovible de 1.22 metros de diámetro y una altura de trabajo de aproximadamente 6.1 metros y 3 toberas colocadas con una separación de 120°. Las estufas o recuperadores de calor de piedrecillas de alúmina calentados por gas natural se usaron para precalentar el aire soplado al horno.

Los objetivos del programa eran determinar la proporción mínima de coque con respecto a una carga de pélets carbonatados, una temperatura de soplado y proporciones de aire predefinidas, lográndose mantener el metal caliente con un contenido de 1% de sílice; y también observar el comportamiento de los pélets carbonatados en el horno comparando con el de los pélets endurecidos por calor.

Durante el transcurso del experimento con este alto horno, la operación con pélets carbonatados se comparó con los pélets endurecidos por calor preparados comercialmente. La composición de los pélets quemados era tal que un volumen de escoria marcadamente bajo resultaba en sus pruebas de fundición.

Durante los 16 días de operación normal con una carga de 100% de pélets carbonatados, se demostró que los pélets carbonatados permitían la utilización de una proporción de coque menor que la de aquellos pélets endurecidos por calor en todas las proporciones probadas con la consiguiente corrección dirigida hacia una misma proporción de viento y un mismo porcentaje de silicio en el metal caliente, sin embargo, no se pudo ajustar la diferencia de volumen de escoria de los pélets carbonatados.

Estos datos son mostrados en las Tablas 13 y 14.

TABLA N° 13: PRODUCTIVIDAD Y REQUERIMIENTOS DE COQUE CON VARIAS CARGAS EN EL ALTO HORNO EXPERIMENTAL, CON UNA TEMPERATURA DE AIRE SOPLADO DE 2,100°F

	PELETS CARBONATADOS	PELETS QUEMADOS
Proporción del viento, Nm ³ /m ²	35	35
Humedad insuflada, grms/Nm ³	46	46
Proporción de coque, Kg/ton de metal caliente al 1% de silicio	525	542
Nivel de producción, Kg/hr.	1580	1600
Tons. de metal caliente/m ² , de área de crisol/día	32	33
Volumen de escoria, Kg/ton de metal caliente	332	212
Proporción de polvo, Kg/ton de metal caliente	13	14

TABLA N° 14: PRODUCTIVIDAD Y REQUERIMIENTOS DE COQUE CON
 VARIAS CARGAS EN EL ALTO HORNO EXPERIMENTAL,
 CON UNA TEMPERATURA DE AIRE SOPLADO DE
 2,100°F

	PELETS CARBONATADOS	PELETS QUEMADOS
Proporción del viento, Nm ³ /m ²	45	45
Humedad insuflada, grms/Nm ³	58	46
Proporción de coke, Kg/ton de metal caliente al 1% de si- licio	550	562
Nivel de producción, Kg/hr.	1905	1980
Tons. de metal caliente/m ² , de área de crisol/día	39	40
Volumen de escoria, Kg/ton de metal caliente	332	212
Proporción de polvo, Kg/ton de metal caliente	15	22

C A P I T U L O V

PRODUCCION DE PELETS DE MINERAL DE CROMO

Este capítulo trata acerca de la experiencia de casi tres años en la producción de pélets de finos y concentrados de mineral de cromo. Describe el diferente comportamiento en la peletización de diversas clases de mineral de cromo. Se discuten problemas de abrasión en varias partes del equipo y se comparan los resultados de operación al producir FeSiCr utilizando ya sea mineral grueso o pélets.

El proceso de peletización, que se va a describir aquí, - fue llevado a cabo en la planta peletizadora de mineral de cromo, levantada en la usina Weisweiler de Gesellschaft für Elektrometallurgie (G f E), que entró en operación en agosto de 1972.

1. DESCRIPCION DEL PROCESO.-

El mineral crudo se transporta mediante un skip y una cinta transportadora a los tres depósitos para mineral crudo. El cuarto está destinado a material de regreso desde la planta. Desde los depósitos es llevado al molino a través de la cámara de secado calentada con gas natural. En dicha cámara se seca el mineral a una humedad de alrededor de 0.2%. El mineral molido, que ha

sado por la mitad izquierda del molino, sale por el centro y es llevado mediante una cinta transportadora y un elevador de cubos o cangilones (bucket conveyor) a un clasificador de aire. La parte gruesa del mineral regresa al molino, en su mayor parte a la mitad derecha. En la práctica, cada partícula del mineral pasa dos veces por el molino, cuya capacidad fluctúa entre 20 a 25 Ton/hora de mineral molido a 90% bajo 90 micrones.

La parte del mineral ya molido al tamaño definitivo es transportado a un silo de 700 metros cúbicos. El aire proveniente del clasificador de aire pasa a través de un filtro de saco y el polvo del filtro se une al flujo del mineral fino hacia el silo.

El mineral es transportado desde el silo en un elevador de cubos, hasta un depósito regulador contiguo a otro depósito lleno de bentonita. Debajo de estos depósitos están instaladas las máquinas dosificadoras para lograr la proporción deseada de ambos materiales, los que son posteriormente izados hasta el mezclador donde se le agrega algo de agua durante la mezcla. La alimentación de mineral así preparada se dirige enseguida al peletizador de discos, donde se le rocía el resto del agua necesaria a la mezcla que rota. Después se criban los pélets verdes (con abertura de 8 mm), el bajo tamaño fluye de vuelta al depósito mencionado al comienzo para material de retorno.

Desde la criba (peneira), los pélets caen sobre la parrilla de cadena sin fin de la parrilla Lepold, la que tiene dos cámaras, en la primera de las cuales se secan los pélets a una tempe-

ratura de 150° a 200°C. Entran a la segunda cámara, donde se calientan hasta una temperatura de 800° á 900°C, logrando la resistencia necesaria para el proceso siguiente de sinterizado en el horno giratorio. Aquí los pélets alcanzan su resistencia final a una temperatura de quemado de 1,250° á 1,350°C. Las dimensiones del horno son de 3 metros de diámetro y 18 metros de largo. El horno se calienta con gas natural de un quemador situado al extremo del horno. A la salida del horno giratorio, los pélets caen al enfriador, el que también consiste en una parrilla de cadena que gira en una caja. El aire refrigerante es comprimido por ventiladores desde abajo a través del tren de parrilla superior de la cadena, enfriando en esta forma los pélets hasta 100°C. El aire calentado se utiliza como aire secundario en el horno giratorio y, a su vez, los gases calientes del horno giratorio calientan la parrilla Lepold. Son succionados primero desde abajo a través de la cadena en la cámara caliente, donde se enfrían desde 1,050° - 1,100°C a alrededor de 400°C. Subsiguientemente, son comprimidos desde arriba a través de la cadena de la cámara secadora, enfriándose adicionalmente a 90° - 120°C. El gas de escape se limpia en un filtro electrostático. El polvo recolectado del filtro se alimenta de vuelta al silo de almacenamiento para alimentación mineral.

El tiempo de retención de los pélets alcanza alrededor de 30 minutos en el Lepold, más o menos 20 minutos en el horno giratorio, y, aproximadamente, otros 20 en el enfriador, en total, 70 minutos.

Los pélets enfriados son llevados a la planta clasificadora en un elevador de cangilones. La primera criba tiene aberturas de 50 mm. Los trozos que sobrepasan este tamaño son triturados y caen después, junto con el material que ha pasado por la primera criba, a una segunda con aberturas de 6 mm. Los pélets así clasificados, constituyen el producto final y son transportados para el macenamiento intermedio a los tres depósitos para pélets, desde donde son llevados al taller de hornos en carros alimentadores ("lorries").

El material de granulometría inferior a 6 mm. es devuelto al depósito para material de retorno. Este material alcanza en total un 6% a 8% y proviene del cribado después del peletizado y del que ha caído a través de las parrillas en el Lepold y en el enfriador.

2. PELETIZACION DE DIVERSAS CLASES DE MINERAL.-

Entretanto, la planta ha producido alrededor de 200,000 toneladas de pélets con finos de mineral de cromo rusos y albaneses, como asimismo con finos y concentrados provenientes de Turquía y Sudafrica. Se observó que las condiciones óptimas para peletización varían de un mineral a otro y deben ser, por lo tanto, determinadas en forma individual para cada uno.

La resistencia de los pélets verdes, que no debería ser inferior a 1.5 Kg/pélet, depende (entre otros factores) del tamaño de las partículas del mineral molido y del porcentaje de bentonita que se le agregue. Puede disminuirse la cantidad necesaria

de bentonita mediante una molienda más fina y viceversa. El nivel económico óptimo, resulta de la suma de los costos de molienda y el precio de la bentonita. Normalmente, se muele el mineral a 90% bajo 90 micrones. La adición de bentonita varía de 0.8% á 2.5%.

Otro factor importante para la resistencia y tamaño de los pélets lo constituye un contenido definido de humedad de la mezcla para peletización. Por consiguiente, se prefiere secar el mineral crudo a fin de eliminar diferencias de humedad y evitar un consumo excesivo de bolas en el molino. Alrededor de 25% del agua necesaria se agrega durante el mezclado, en tanto que el resto se rocía en el disco. Si se agregara la cantidad total de agua al disco, existiría el riesgo que se formara una película superficial; es decir, insuficiente humedad en el centro del pélet y demasiada en la película externa, que después estallarà durante su cocción en el horno. El disco peletizador gira a una velocidad de alrededor de 12 r.p.m. y, según la clase de mineral, el ángulo varía entre 25° á 30°. El tamaño de los pélets fluctúa entre 15 á 25 mm, ya que los de granulometría inferior a 6 mm son cribados y se parados antes de entrar al horno Lepold. La temperatura de 800° á 900°C, a que se calientan los pélets en la cámara caliente del Lepold, es apenas suficiente para dar a los pélets hechos, por ejemplo, con finos rusos, la resistencia mínima requerida de 30 Kg/pélet. Con otros minerales, se han obtenido cifras de hasta 50 Kg/pélet con la misma temperatura.

En la zona de sinterizado del horno, los pélets alcanzan una temperatura final de 1,250° á 1,350°C. En el caso de los con

centrados de mineral de Transvaal, por ejemplo, una temperatura de 1,250°C es suficiente para una resistencia de 180 - 210 Kg/pélet y en el de finos de mineral ruso, se necesitan 1,350°C para obtener 130 - 150 Kg/pélet. La formación de anillos ocurre principalmente en la parte más caliente del horno y su tamaño depende de la temperatura. Si se opera a una temperatura elevada, es preciso remover la costra con disparos por cañón especial ("shooting"). En el rango de temperaturas más bajas, se forma una costra de sólo 5 á 10 cm de espesor, la que se descama sola de tiempo en tiempo. Una costra de este tamaño es deseable para proteger el revestimiento del horno. Aún se desconoce, en gran parte, la razón por qué las diversas clases de mineral se comportan en forma diferente. Se sospechaba que existía una diferencia entre los concentrados y los finos de un mismo mineral, puesto que las partículas muy finas son retiradas del concentrado por flotación. Se ha probado que esta suposición era incorrecta y que el problema requiere mayor trabajo de investigación, que ya se está llevando a cabo.

Se ha comprobado la ventaja de controlar la producción continuamente, por lo que se realizan en forma regular los siguientes análisis:

- (a) Contenido de humedad del mineral crudo, sin secar (una vez al día);
- (b) Contenido de humedad de los pélets verdes (4 - 5 veces/carga de mineral);
- (c) Análisis granulométrico del mineral molido (una vez por hora);
- (d) Resistencia de los pélets; es decir, pélets verdes, pélets al

término del horno Lepold y producto final (5 veces/carga de mineral).

3. DESGASTE Y ROTURA.-

El problema más importante en la peletización del mineral de cromo es la abrasión. Debe señalarse que la experiencia ganada a través del mundo con la peletización de mineral de fierro es de valor muy limitado, en cuanto se refiere a los problemas de abrasión al peletizar mineral de cromo, ya que ésta ocurre en todas las piezas del equipo que entran en contacto ya sea con el mineral, los pélets verdes o sintetizados, o con gases que contengan polvo de mineral de cromo. Por consiguiente, es preciso prestar la mayor atención a la selección de materiales en lo que se refiere a:

- (a) Todas las partes que contienen gas, especialmente el clasificador de aire, filtro, ventiladores y todas las tuberías. En este caso, además de la clase de mineral usado, la abrasión es una función de la velocidad del gas;
- (b) El molino. Aquí se tuvo éxito, por ejemplo, en disminuir el consumo de bolas de molino de 1,500 gr/ton. de pélets a 500 - 700 gr/ton. de pélets utilizando bolas con un mayor contenido de cromo; y,
- (c) Todas las partes del equipo que transportan el mineral, ya sea en forma de mineral de cromo o de pélets verdes o sintetizados.

En la mayoría de los casos fue posible disminuir el desgaste por abrasión, eligiendo un tipo de material de construcción

distinto al instalado primitivamente.

4. DATOS DE OPERACION.-

La planta peletizadora fue planeada para una capacidad de 250 toneladas por día, en tanto que se ha alcanzado una cifra de 300 toneladas por día. Debe reservarse un mes por año para una reparación general, y durante los once meses restantes la planta - está en operación aproximadamente un 80% del tiempo, cifra que se espera elevar en un futuro próximo a alrededor de 90%.

La planta funciona día y noche, sin interrupción. La cuadrilla está compuesta por dos personas en el turno diurno (un capacitaz y un hombre para el control analítico), además de cinco hombres por turno:

1 en el puesto central de control

1 en el molino.

1 en el disco.

1 en el Lepold, horno giratorio y enfriador.

1 de reserva para reemplazar, en caso de necesidad a cualquiera de los ya citados.

Cifras de consumo por tonelada de pélets:

Combustible (gas natural, 8,300 Kcal/Nm ³)	75 - 90 Nm ³
Energía eléctrica	50 - 60 Kw h
Mano de obra	0.54 horas

5. USO DE PELETS DE MINERAL DE Cr PARA LA FABRICACION DE FeSiCr.-

Durante muchos años, la G f E produce FeSiCr según el proceso de una etapa, entre otros, en un horno 25 MW. Desde fines de 1972, se ha alimentado este horno con alrededor de 70,000 toneladas de pélets de mineral de cromo, por lo que la mayor parte de este tiempo la parte de mineral de la mezcla ha consistido en un 100% de pélets.

Debe señalarse que, antes de usar pélets, se extraían todas las partículas de menos de 20 mm después del cribado del mineral grueso. En aquella época, la única utilización que tenían esos finos era para la producción de ferrocromo de bajo carbono. Por lo tanto, podemos comparar la operación con trozos cribados y la con pélets de 6 - 50 mm, de éstos últimos alrededor de 90% son de entre 15 y 25 mm.

Durante los últimos tres años, las clases de mineral y de coque empleados en Weisweiler han tenido que cambiarse con mayor frecuencia que antes. De este modo, la influencia de los pélets coincidió parcialmente con otros factores influyentes de los componentes de la mezcla. De todos modos, se observó que los resultados obtenidos al operar con pélets no eran de manera alguna peores, aún levemente mejores que los logrados con trozos, en cuanto respecta al consumo de energía, recuperación del cromo y del silicio y contenido de polvo del gas de escape.

La diferencia más importante entre los trozos y los pélets

se encuentra en la más baja conductividad eléctrica de éstos últimos, lo que hace mucho más fácil mantener los electrodos abajo en el horno. Este puede operar con un voltaje más elevado, siempre que el hogar sea suficientemente ancho, lo que resulta en un mejor factor de potencia. Debe controlarse con sumo cuidado la penetración de los electrodos, la que puede corregirse variando ya sea el voltaje o el tamaño del coque. No es posible dar un rango definido de su tamaño, el que debe determinarse por experiencia para cada horno, conforme a los datos individuales de cada horno, tales como el diámetro del hogar, etc. En otros aspectos, los pélets ofrecen ventajas adicionales:

- a. No ocurre la formación de puentes y los sopladados subsiguientes.
- b. El cambio de un mineral a otro es mucho más sencillo, ya que la diferencia en comportamiento entre dos clases de pélets fabricados con minerales diferentes es menor que la de los trozos correspondientes.
- c. Al operar con pélets, se facilita mucho el control de la penetración de los electrodos, levantándolos. Prácticamente, no existe riesgo de romper los electrodos al presionarlos nuevamente dentro de la mezcla, puesto que los pélets ceden lugar más fácilmente que los trozos.

C O N C L U S I O N E S

1. Como entrega un producto durable, la peletización se ha convertido en el método más importante de aglomeración de mineral de hierro principalmente.

A medida que aumenten los métodos de concentración y se generen minerales más finos durante la extracción, el método de sintetización ya no será aplicable para la producción de aglomerados, en consecuencia el tratamiento de los ultrafinos de mineral o concentrados se realizará por el método de peletización.

2. El sistema de aglomeración por peletización demanda una gran inversión de capital particularmente si se necesita concentrar antes de peletizar.
3. Existen muchos factores que influyen en la calidad de los pélets verdes, siendo los más importantes la superficie específica del material a peletizar y el contenido de humedad de éste.

Estos factores son sumamente importantes ya que la resistencia y uniformidad de los pélets son función de estos factores, lo cual será indudablemente de vital importancia no sólo para la etapa de

formación de los pélets verdes, sino también para la etapa de quemado.

4. El contenido de humedad y la superficie específica del material a peletizar, están en íntima relación, debido a que el contenido de humedad requerido para el pelletamiento aumenta cuando la superficie específica del material aumenta. Esto se atribuye a la mayor área de superficie específica presentada por la mena o concentrado, luego la superficie específica del material peletizante debe ser bien controlada para dar un balance satisfactorio entre estos dos factores.
5. Cuanto mayor sea la humedad, mayor será la plasticidad de la pelota y al mismo tiempo la deformación y el número de caídas repetidas, por otro lado, cualquier exceso de humedad superior a 0.25% del contenido óptimo perjudica la resistencia a la compresión y al choque térmico.
6. En el tratamiento térmico de los pélets juegan un papel importante en la resistencia de los pélets, el uso de una temperatura óptima de quemado, el tiempo de retención a esta temperatura, y las velocidades de incremento y decremento de temperatura. Otro factor importante en esta etapa es la homogeneidad que debe existir en la composición de la atmósfera que rodea a los pélets.
7. Generalmente no hay problema con el grado químico de los pélets, las demandas que hay en el mercado hoy en día giran en primer lu -

gar alrededor de las características físicas. Por eso el control de las cualidades físicas de los pélets es quizás una de las características por la que se ha hecho y se sigue haciendo grandes esfuerzos por mejorarla.

8. De los diferentes tipos de equipo de quemado empleados, cada cual tiene sus ventajas y desventajas; y aunque actualmente en el mundo, el sistema más usado es el de parrilla móvil, sin embargo, es especialmente la posibilidad de alcanzar la calidad requerida del pélet con el tipo de mineral particular, lo que finalmente influenciará en la selección del sistema.
9. Los aditivos como la piedra caliza y el bórax empleados en la pelletización experimental de los diferentes concentrados de mineral de hierro, produjeron efectos beneficiosos en las propiedades de resistencia de los pélets.

Del remolido de los concentrados, pudo advertirse, que éste fue beneficioso en algunos casos y en otros perjudicial.

La adición del carbón en los concentrados, produjo un decrecimiento en las propiedades de resistencia de los pélets, decrecimiento éste, que fue más acentuado, en los pélets que contenían carbón interno.

Otro aspecto importante en este experimento fue, el llegar a la conclusión de que la resistencia a la compresión de los pélets au

mentaba al aumentar la temperatura de quemado.

10. Las condiciones exigidas para la obtención de los mecanismos de li gación, son mucho menos rigurosos en los minerales magnetíticos, que en los hematíticos.

El aumento de resistencia de los pélets de magnetita durante el tratamiento térmico aplicado, es la oxidación de la magnetita a hematita, debido a los enlaces fuertes de los granos de hematita.

11. Los costos de la producción comercial de la peletización de la hematita son incuestionablemente mayores que los de la peletización de la magnetita debido a la fuente intrínseca de energía térmica de la magnetita, si esta diferencia de costo es apreciable, podría darse la necesidad de beneficiar algunos minerales de hematita de grano fino mediante el proceso de tostado magnético.

12. En general el pélet carbonatado se caracteriza por su dureza uniforme, excelente resistencia al impacto y a la abrasión, y propiedades superiores de fusión.

13. En la preparación de pélets carbonatados, las variaciones en las materias primas, tales como la distribución del tamaño del mineral alimentado, la cantidad y tipo de aditivos, y las variaciones en las condiciones del procesamiento, tales como el contenido de humedad del pélet en el tiempo de carbonatación, la concentración

del dióxido de carbono, y el tiempo de carbonatación, tienen influencia en las características físicas del producto.

14. Los pélets carbonatados durante la reducción a baja y alta temperatura exhibieron una buena reductibilidad sin ninguna pérdida significativa de la estabilidad estructural.
15. Los experimentos realizados, demostraron la aplicabilidad del proceso de peletización por carbonatación a finos no ferroso, tales como mineral de cobre.
16. Las pruebas realizadas a gran escala, confirmaron las buenas propiedades físicas de los pélets carbonatados inclusive después de una exposición a fuertes cambios de clima, asimismo demostró su buen grado de fusión en el alto horno, concluyéndose por lo tanto, que los pélets carbonatados, son favorablemente comparables con los pélets endurecidos por calor.
17. Economías favorables son inherentes, al carácter del proceso de peletización por carbonatación, como son: la posibilidad de usar alimentación más gruesa, operar a baja temperatura, y la flexibilidad para producir una alimentación parcial o totalmente autofundente y/o autoreductora al horno, así como también un menor consumo de coque.
18. El problema más importante que presenta la peletización del mine-

ral de cromo, es la abrasión de todas las piezas del equipo que entran en contacto con este mineral.

19. Puede concluirse con respecto a la peletización del mineral de cromo, que estos pélets son más que un mero sustituto del mineral grueso. En los casos en que los finos, que todos los así llamados minerales gruesos contienen, no pueden utilizarse para otros propósitos como, por ejemplo, para la producción de FeCr bajo carbono, la peletización o algún otro tipo de aglomeración se torna en una necesidad casi imperiosa. Si se compara la operación con pélets, con la de operar con mineral sin cribar, se observará que se economizará mucho más que tan sólo los costos de peletización.

20. Es indudable que los experimentos realizados, nos demuestran que cada tipo de mineral, debido a sus propiedades peculiares, responden de una manera muy particular, frente a los cambios realizados en un proceso peletizante. Este hecho nos trae a conclusión de que sólo se logrará una mejora efectiva de las propiedades de los pélets, con un estudio detenido del comportamiento que una mena particular, tiene hacia el proceso de peletización en ella efectuado.

B I B L I O G R A F I A

1. COOKE STRATHMORE, R.B. AND BAN T.E. 1952. Microstructures in Iron Ore Pellets. Trans. AIME, Noviembre, Vol. 193, págs. 1053-1058.
2. MORAN, LUIS F. 1965. Marcona Mining Company Proyecto de San Nicolás. Minería, N° 66, págs. 13 - 20.
3. SARCINELLI GARCIA, LUIS FERNANDO. 1965. Pelotizacao: Nova Perspectiva para Minérios de Ferro. Engenheiro Moderno, Setiembre, págs. 9 - 14.
4. TIGERSCHIOLD M. AND ILMONI P.A. 1950. Fundamental Factors Influencing the Strength of Green and Burned Pellets Made from Fine Magnetite Ore Concentrates. AIME Blast Furnace and Raw Materials Proceedings, Vol. 9, págs. 18 - 45.
5. FIRTH, C.V. 1944. Agglomeration of Fine Iron Ore. AIME Blast Furnace and Raw Materials Proceedings, Vol. 4, págs. 46 - 65.
6. COOKE STRATHMORE R.B. AND STOWASSER W.F. 1952. The Effect of Heat Treatment and Certain Additives on the Strength of Fired Magnetite Pellets. Trans. AIME, Diciembre, Vol. 193, págs. 1223 - 1230.

7. BOHOMOLETZ, PAULO MIGUEL. 1964. Pelotizacao de Minérios de Ferro. Engenharia, Mineracao e Metalurgia, Agosto.
8. RYLE Y, D.B., VERNEY, L.R., HANSEN, P.J. ELLIOT, B.G. 1967. Research and Pilot Investigations into the Preparation and Smelting of Prefluxed Copper Concentrate Charges. Institution of Mining and Metallurgy, London, England, Abril.
9. LAPPING, R.L. PSENER, I., WRIGHT, Y.F. 1969. The Aplication of Pelletizing Techniques in the Nonferrous Industry. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Junio.
10. WALLACH A. ALBERT y GREENWALT RICHARD B. 1972. Perspectivas Presentes y Futuras de la Aglomeración de Mineral de Fierro en América Latina. XII Congreso Latinoamericano de Siderurgia, ILAFA, Octubre.
11. SECRETARIA GENERAL DE ILAFA. 1975. América Latina Cuadruplicará Producción de Pélets Racia 1980. Revista Latinoamericana de Siderurgia, N° 188, Diciembre, págs. 50 - 57.
12. LANKES, E., Y BOEHM, W. 1974. Experience made and Operational results obtained with a Chrome Ore Pelletising Plant Working on the Lepold Process, INFACON 74, Abril.

A P E N D I C E S

1. AVANCES EN EL DESARROLLO TECNICO DE PLANTAS DE PELETIZACION DE CAPACIDADES EXTREMADAMENTE GRANDES, PROBLEMAS RELACIONADOS Y PERSPECTIVA FUTURA.

Con ocasión del 26° aniversario de la Asociación Brasileira de Metales (Associação Brasileira de Metais), en Río de Janeiro, se leyó un trabajo de la Dravo Corporation acerca de "La economía del equipo de peletización en gran escala"; el cual contenía algunos aspectos muy interesantes que señalaban el camino que está tomando la peletización del mineral de fierro.

La exposición siguiente es una continuación de la discusión acerca de las tendencias del desarrollo en la construcción de plantas modernas de peletización.

CAPACIDAD DE UNIDADES DE ENDURECIMIENTO DE PELETS DE DIFERENTE TIPO DE CONSTRUCCION.-

Entre las unidades de endurecimiento de pélets, hoy día utilizadas en plantas de peletización, predominan la parrilla móvil y la combinación horno - parrilla (grate-kiln). Lo expuesto a continuación trata de cifras de producción que se pueden lograr mediante cada una de estas unidades.

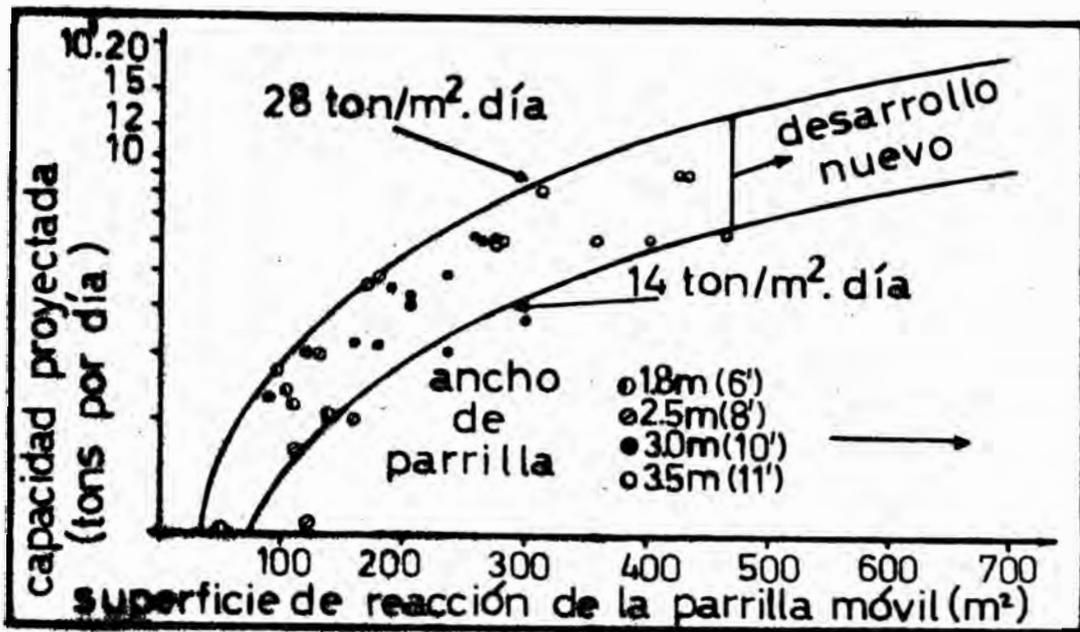


FIG. 33 Capacidad proyectada de parrillas móviles para producción de pélets

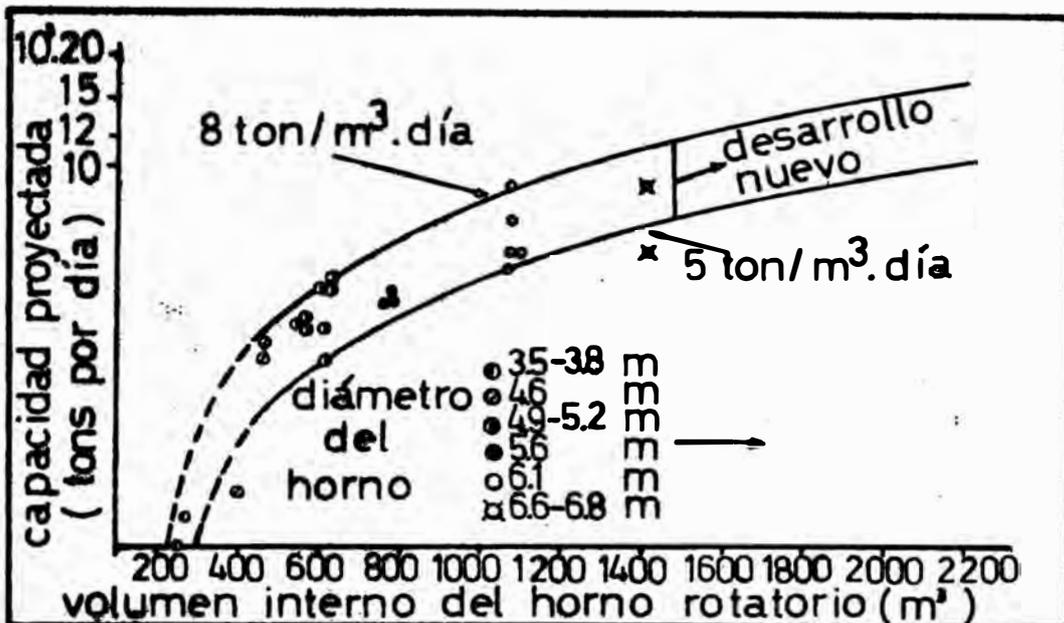


FIG. 34 Capacidad proyectada de hornos rotativos para producción de pélets

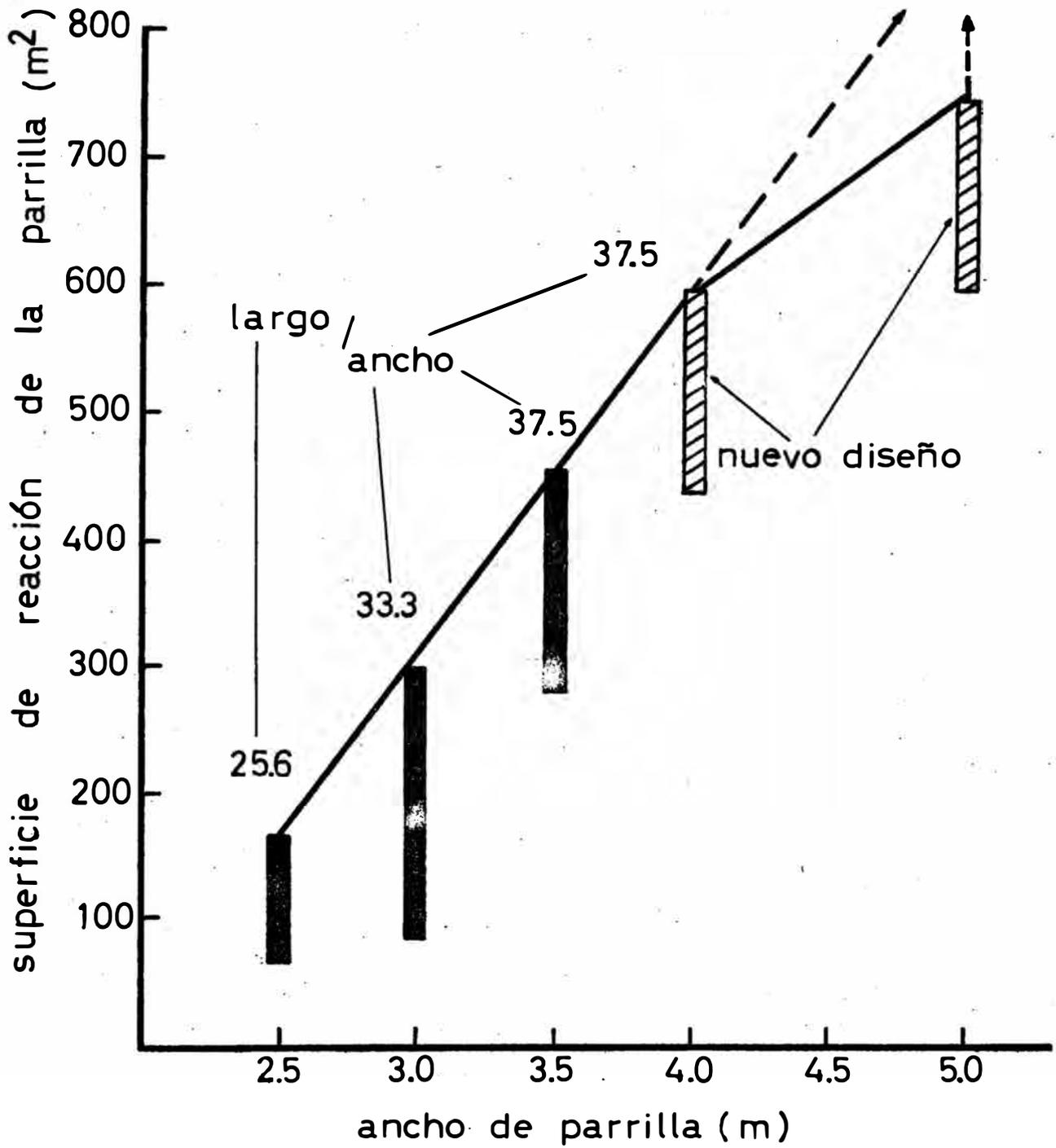


FIG. 35 Gama de aplicación de diferentes anchos de parrilla para plantas de peletización

Las Figuras 33 y 34 contienen una representación gráfica de todos los tamaños de parrillas móviles y hornos rotatorios, en funcionamiento o en construcción, como una función de su capacidad prevista por día. Los respectivos criterios que determinan la capacidad de la parrilla móvil y del horno rotatorio son la superficie de reacción y la capacidad neta, respectivamente.

Es necesario indicar que aquí se toman a unidades que tengan capacidades previstas de más de 3 millones de toneladas anuales como unidades de capacidad extremadamente grandes. El hecho de que en ciertas plantas de peletización, se haya sobrepasado considerablemente esta cifra de producción, indica claramente que en el futuro será aumentado el valor límite para "capacidad extremadamente grande".

La Figura 35 muestra que el desarrollo en el caso de las parrillas móviles comenzó con una superficie de reacción de aproximadamente 100 m^2 y con un ancho de ya sea 1.8 ó 2.5 metros, para alcanzar después superficies de 460 m^2 y un ancho de 3.5 m. Para producciones de 4.5 ó incluso 6 millones de toneladas de pellets por año habrá que aumentar aún más en varios centenares de metros cuadrados, las superficies de reacción de las parrillas móviles. De acuerdo con la tendencia predominante del desarrollo las parrillas móviles se tornarán más anchas y también más largas.

A diferencia de las parrillas móviles, el aumento de la capacidad del horno rotatorio ha sido posible aumentando solamente una dimensión, a saber el diámetro, tal como puede verse en la Figura 34. Mientras que el diámetro de la camisa ha aumenta -

do su tamaño de 3.5 á 6.8 m, el largo del tubo del horno ha sido aumentado solamente en poco más de un 30%, es decir de 35 m a unos 46 m. Si se construyesen hornos rotatorios de 7 metros de diámetro y más, los problemas que surgen en conexión con el diseño, la fabricación, la instalación y el transporte, el cual no es menos importante, resultan mucho más difíciles de resolver que los problemas que surgen en conexión con la ampliación de las parrillas móviles. Probablemente el proceso de endurecimiento será transferido en medida creciente, como ya se ha evidenciado en varios casos, del horno rotatorio a la parrilla de precalentamiento que precede al horno rotatorio.

Las Figuras 33 y 34 muestran que las parrilla móviles, y también los hornos rotatorios de igual tamaño, son utilizados para producciones que varían en gran medida. Esto se debe al comportamiento bastante diferente de los minerales tratados en el proceso de endurecimiento. Mientras que la capacidad prevista para hornos rotatorios fluctúa entre 5 y 8 ton/m³ al día, los valores específicos típicos para parrilla móviles son de 14 á 28 ton/m² al día. Los valores más altos se refieren casi sin excepción a magnetitas naturales, mientras que los más bajos se refieren a minerales de hematita con contenidos mayores de limonita.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS ACERCA DE LA CONSTRUCCION DE UNIDADES DE GRAN CAPACIDAD.-

En este punto se trata la cuestión de si existen las condiciones económicas que justificarían el desarrollo de plantas -

de peletización de capacidades extremadamente grandes. Si se miran los valores que se especifican en la Tabla 15, como las capacidades nominales de las mayores plantas de peletización existentes en el mundo (estando todas ellas formadas por varias unidades) y si se considera que están siendo discutidos proyectos para plantas que tienen capacidades anuales de muchos millones de toneladas de pélets en los países con grandes yacimientos de mineral, tales como la URSS, Australia, en Africa Occidental y en América del Sur, no existe duda alguna de que hay una demanda genuina por unidades con capacidades extremadamente grandes.

En la Figura 36 se ha graficado la capacidad de la unidad encargada frente al año en que el pedido ha sido concertado, para todas las plantas de peletización existentes. Solamente se consideraron aquellas plantas con unidades de diferente tamaño o plantas que han sido construídas en diferentes épocas por el mismo propietario en la zona del mismo yacimiento mineral, por ejemplo, las plantas de LKAB en la región de Kiruna-MalMBERGET. Los pocos ejemplos indicados ya muestran una clara tendencia hacia plantas cada vez mayores. La razón para ello es que los productores están obligados por una competencia siempre creciente a reducir los costos de producción.

A causa de la gran intensidad de capital del proceso de peletización, se puede lograr esta reducción de costos de producción introduciendo unidades de producción de mayor tamaño, tal como se muestra en la Figura 37. El cálculo de los costos estuvo basado en los precios vigentes en Europa Occidental. Ya que es

TABLA N° 15: LAS MAYORES PLANTAS DE PELETIZACION DEL
 MUNDO

N O M B R E	CAPACIDAD PREVISTA AL SER ENCARGADAS EN MILLONES DE TONS/AÑO	NUMERO DE UNIDADES
- Minntac, EE.UU	10.5	5 c.h.p.
- Carol Lake, Canadá	9.5	6 p.m.
- Erie, EE.UU.	9.3	27 h.c.
- Reserve, EE.UU.	8.5	8 p.m.
- Krivoj Rog, URSS	7.0	8 p.m.
- Knob Lake, Canadá	6.0	2 c.h.p.
- Tubarao, Brasil	5.0	2 p.m.
- Watush, Canadá	4.9	3 p.m.

c.h.p. = combinación horno-parrilla (grate-kiln)

p.m. = parrilla móvil

h.c. = horno de cuba

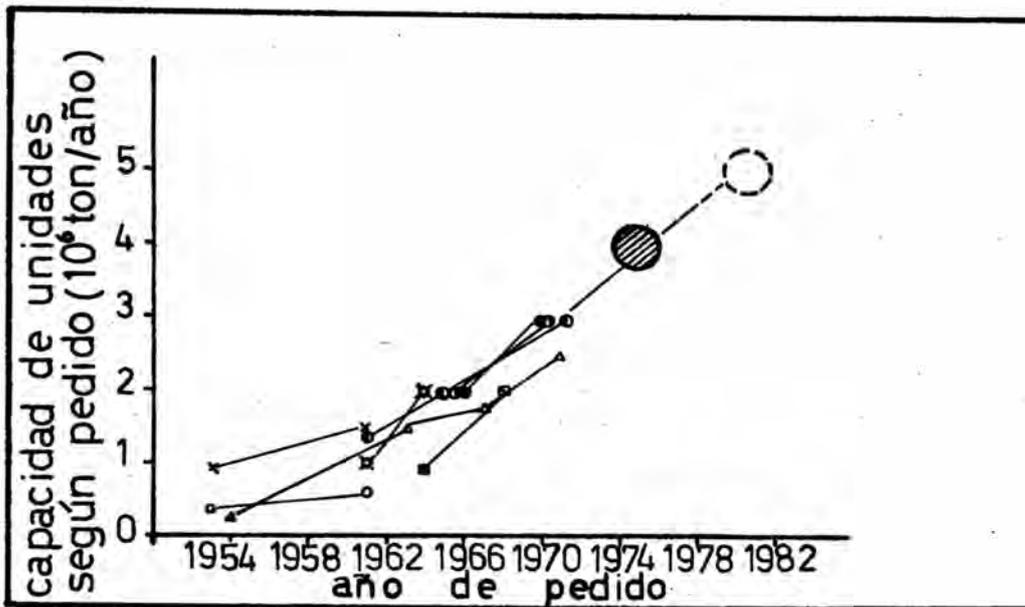


FIG. 36 Desarrollo de la capacidad de unidades de endurecimiento de pélets

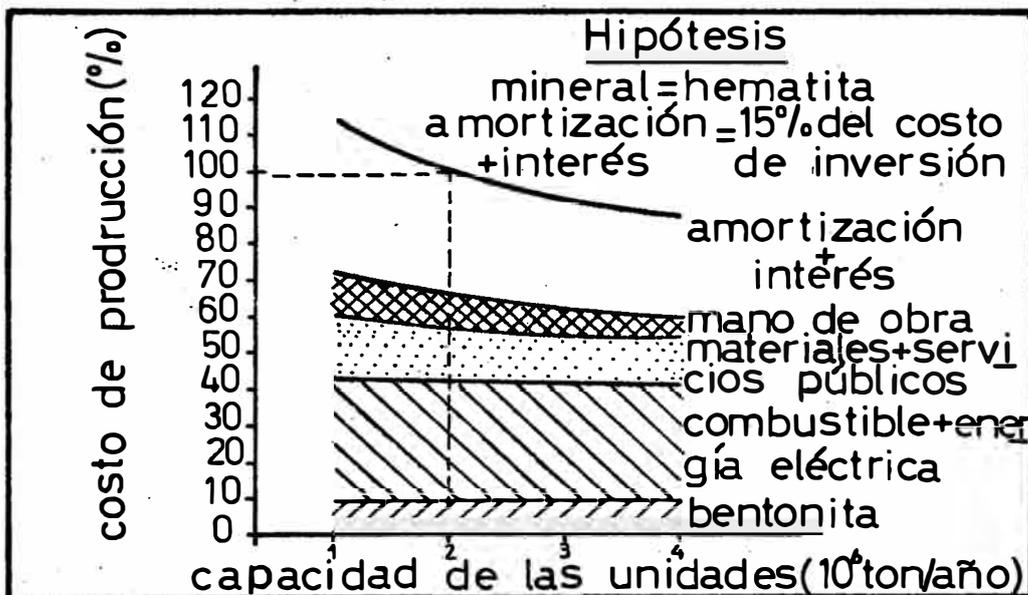


FIG. 37 Influencia de la capacidad de la planta de peletización en el costo de producción

la reducción de costos lo que se desea señalar en particular, se ha indicado los cambios en los costos únicamente en porcentajes, adoptando un 100% para los costos de una planta de dos millones de toneladas por año.

Se puede ver claramente que la reducción de los costos se logra, en primer lugar, debido a que las plantas se abaratan decididamente a medida que aumenta su tamaño y porque sus gastos de personal son bajos.

Ya que las condiciones económicas son convenientes, es muy posible que se sigan encargando plantas de peletización y unidades para capacidades anuales cada vez mayores. Los proyectos de plantas de peletización tendrán que tomar en cuenta este desarrollo.

CONCEPTO TECNICO DE PARRILLAS MOVILES LURGI/DRAVO PARA CAPACIDADES EXTREMADAMENTE GRANDES.-

La figura 35 señala la gama de la aplicación de parrillas móviles de 2.5 á 3.5 metros de ancho, tal como se emplean en la actualidad. Las parrillas indicadas en el sistema de medidas británicas están integradas en los tipos correspondientes del sistema métrico. La relación entre largo máximo y ancho ha sido aumentada a medida que aumentaba el ancho, a fin de ampliar la gama de aplicación del nuevo tipo de acuerdo con el desarrollo predominante. Debido a la experiencia alcanzada con parrillas en la operación práctica, se fijó una relación largo-ancho de 37.5:1 como límite superior, por razones concernientes a la fabricación y cos

tos. Así resulta una superficie máxima de reacción de 600 m^2 para una parrilla móvil de 4 metros de ancho. Cálculos y ensayos en modelos demostraron que las ruedas elevadoras y de descenso, de los tamaños estandar empleados en parrillas de 3.5 metros de ancho, aún siguen siendo adecuadas para parrillas de 4 metros de ancho si se usan paletas de 1.5 metros de largo. Un mayor aumento del ancho de parrilla requirió, sin embargo, el diseño de nuevas ruedas elevadoras y de descenso de mayor tamaño, lo cual involucró en consecuencia la necesidad de diseñar nuevas cajas de viento y un armazón más fuerte para la máquina. De este modo resultó ser natural que se dejase a un lado el ancho de 4.5 metros y que se haya recurrido a parrilla de 5 metros de ancho, las cuales permitirían superficies de reacción de hasta $1,000 \text{ m}^2$ y producciones de 8 millones de toneladas de pélets por año.

Las partes más caras y, desde el punto de vista técnico, las más importantes de la parrilla móvil son las paletas con las barras de la parrilla. Por eso se le ha prestado máxima atención a su diseño, una vez que se hubo fijado el ancho de la parrilla. Por medio de cálculos realizados sobre la base de resultados de ensayos y por numerosas mediciones efectuadas en plantas industriales, se está ahora en una posición que permite predeterminar las temperaturas a las cuales es sometido el cuerpo de la paleta al ser procesados diferentes tipos de minerales. El cuerpo sustentador de la paleta tiene que ser diseñado de la manera tal que asegure que la tensión de flexión resultante de las cargas estáticas y dinámicas no exceda un cierto valor que está dado por la tensión térmica prevista. Esto se logra por una corres -

pondiente construcción sólida y una forma adecuada del cuerpo sustentante, lo que evita el desarrollo de grandes diferencias de temperaturas entre sus bridas superior e inferior. Los cálculos demostraron que el cuerpo soportante de paletas de 5 metros de ancho y 1.5 metros de largo tiene que ser unas dos y media veces más pesado que el de paletas de 3 metros de ancho y 1.5 metros de largo. No obstante, los costos de paletas se reducen con cada metro cuadrado de superficie de reacción, debido al hecho de que el aumento en cuanto a los costos de manejo es mucho menor que el aumento en peso.

Una cuestión muy importante es si las parrillas móviles de más de 3.5 metros de ancho aún permiten que los gases del proceso sean succionados o admitidos unilateralmente a través de las cajas de viento. Una doble admisión o evacuación de los gases requeriría que se duplique el número de ventiladores del proceso, conectados con las cajas de viento, así como también que se duplique el número de tubos de conexión y de sistemas de extracción de polvo junto a las cajas de viento. Esto no solamente complicaría la operación de la planta de peletización y exigiría un mayor espacio, sino que también conduciría a considerables gastos adicionales. Por lo tanto fue necesario investigar si existían ventiladores en el mercado o si podían ser construídos para los grandes volúmenes de gases implicados por admisión o evacuación unilaterales de los gases. Además fue necesario investigar si una distribución uniforme de los gases, a través de la carga de pélets, aún podía asegurarse con admisión y evacuación de los gases en el caso de máquinas de endurecimiento de 5 metros de -

ancho, lo cual es esencial para poder lograr una perfecta calidad del pélet.

Aunque los ventiladores de plantas para una producción extremadamente grande de pélets asumen dimensiones enormes (ventiladores de flujo radial tienen un diámetro de caja de hasta 16 metros) se encuentran dentro del alcance de las posibilidades de la fabricación moderna y satisfacen todas las exigencias corrientes en cuanto a seguridad operacional, eficiencia y duración de vida útil.

Se han realizado ensayos con aire en modelos, con la finalidad de estudiar las condiciones de penetración del gas a través de la sección transversal de la parrilla con cajas de viento que tengan admisión y evacuación unilateral del gas. Se ha logrado efectuar una evaluación de las condiciones de penetración del gas, midiendo el perfil de velocidad por medio de un anemómetro de rueda de ventilador por encima y por debajo del modelo de parrilla, dependiendo de la dirección del flujo. Durante los ensayos realizados se modificaron la velocidad del flujo y también el diseño de las cajas de viento, sin cambiar la semejanza geométrica entre el modelo y la planta industrial.

Los resultados que se han obtenido de los ensayos, han sido muy satisfactorios, de manera que ya no hay objeciones a las cajas de viento con evacuación unilateral del gas admitido para parrillas de 5 metros de ancho. Los ensayos demostraron además de que, en lo concerniente a la configuración del flujo, las cajas de viento de 6 metros de largo no traen consigo condiciones que sean diferentes a las con cajas de viento de 3 m -

de largo. Esto, naturalmente, constituye una gran ventaja con respecto a los costos involucrados.

En cuanto a la producción de gas caliente en la zona de quemado se puede decir lo siguiente: si se emplean los llamados quemadores de aspiración, que se utilizan en todas las plantas modernas de Lurgi/Dravo, se disponen las cámaras de quemadores a 2 m de distancia a ambos lados de la campana de quemadores. El largo de la cámara del quemador es fijado empíricamente según el volumen de gas, la cantidad y el tipo de combustible y la relación aire de combustión/combustible, y considerando el hecho de que la llama debe estar casi consumida al final de la cámara del quemador, de modo que se evite que la radiación de la llama afecte la calidad del pélet.

Con miras a reducir el número de quemadores y de cámaras de quemadores para parrillas móviles largas, se ha previsto un paso de 3 m para la disposición de los quemadores en parrillas móviles de 4 y 5 m de ancho, como ya ha sido realizado en la primera planta de peletización de Tubarao, si bien el principio de combustión allí aplicado es algo más antiguo y desfavorable en lo que se refiere a la economía térmica. Quemadores grandes actualmente instalados junto a un paso de 2 m, tienen una capacidad térmica de aproximadamente 4 millones Kcal/hora. Las cámaras de quemadores asociadas tienen un largo de hasta 2.4 m. Con un paso de 3 m y parrillas móviles de 5 m de ancho, habría que emplear quemadores de una capacidad térmica de aproximadamente 8 millones Kcal/hora. Se ha ensayado con tipos de quemadores de semejantes capacidades con gas natural y también con fueloil, en condiciones muy

variables, y de los resultados obtenidos se desprende la posibilidad de limitar a 3.7 - 3.8 m el largo de la cámara del quemador, incluso en el caso de los quemadores más grandes en cuestión, lo cual puede lograrse aún con medios simples de construcción.

Permitiendo condiciones de espacio, los discos de aglomeración o los tambores de aglomeración de plantas de tamaño muy generalizados se encuentran instalados en el eje longitudinal de las parrillas móviles, y la distribución de los pélets crudos a través del ancho de la parrilla es efectuada por medio de una correa oscilante. En el caso de unidades de 4 millones de toneladas anuales de pélets, y más aún, resulta más ventajosa la distribución por medio de una correa móvil dispuesta en ángulos rectos con respecto a la parrilla móvil. También para anchos mayores de parrilla, se mantiene el transportador de rodillos Lurgi como equipo de carga y de tamizado para pélets crudos. Recientemente se le instaló también en varias plantas de horno-parrilla.

2. AMERICA LATINA CUADRUPLICARA PRODUCCION DE PELETS HACIA 1980.-

Al considerar las plantas en construcción o en avanzado estado de estudio, tenemos que hacia 1978 la región contaría con 18 plantas en operación y una capacidad total anual de 50 millones de toneladas de pélets, o sea cuadruplicando prácticamente la producción de pélets, con respecto a lo producido hasta el año 1975. Estas 18 plantas se muestran en la Tabla 16 con sus principales características.

PROPIETARIO Y UBICACIÓN	PRODUCCIÓN ANUAL (t p a)	DE DISEÑO	EN CONSTRUCCIÓN	EN AMERICA LATINA, PROYECTADAS	PLANTAS EN OPERACION	
					(Puesta en marcha) aglomerante; mineral tratado; observac.	
FERROPERU (ex Marcona) San Nicolás	1'200,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	5 discos; 6m diám.	1; 135 ; 2.5	(1963) bentonita ; magnetita el quemado volatiliza
Planta II	2'800,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	6 discos; 6m diám.	1; 268 ; 3.0	(1966) álcalis y Cl del agua de mar.
CVRD-Tubarão Brasil-Planta I	2'000,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	6 discos; 6m diám.	1; 278.25; 3.5	(1969) cal hidratada ;
Planta II	3'000,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	5 discos; 7.5m diám.	1; 430.5 ; 3.5	(1973) hematita
JALATA Y LAMINA Ico Colima (La Alzada)	1'500,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	4 discos; 6m diám.	1; 180 ; 3.0	(1970) bentonita; magnetita y mezcla de magn. y hematita.
CHMSA-MEXICO Chihuahua-Planta Constitución	600,000	McKee	parrilla circular	2 discos; 5.5m diám.	1; 103; 2.7	(1974) bentonita (posteriormente se usará cal hidratada); mezcla de hematita y magnetita. En 1978 se ampliará a 900,000 t p a.
CONSORCIO MINERO BENITO JUAREZ - PERA COLORADA S.A. MEXICO-Manzanillo-Colima Planta I	1'500,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	3 discos; 7.5m diám.	1; 189 ; 3.0	(1974) bentonita , magnetita
FUNDIDORA MONTERREY MEXICO Monterrey	1'500,000	Allis-Chalmers	parrilla-horno rotatorio	3tambores; 36' largo x 12' diámetro	1 parrilla; 134'6" x 12'2" ; 142 m ² 1 horno rotatorio 115' x 17' diám.	(1976) cal y menos de 1% de bentonita ; magnetita y hematita. Pélets autotundentes.
SICARTSA-MEXICO Las Truchas	1'800,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	3 discos; 7.5m diám.	1; 278.25; 3.5	(1976) cal hidratada, magnetita
PERTECO-BRASIL Fábrica-M.G.	2'500,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	5tambores; 12' diám. 32' largo.	1; 388.5 ; 3.5	(1976) , hematita
HIPASAM-ARGENTINA Sierra Grande,Punta Colorada	2'000,000	Midland Ross	horno vertical	4 tambores; 3.65m. diámetro, 9.75 m. largo	4 hornos verticales 2.5 x 6.3 m	(1976) bentonita , magnetita
ITABRASCO (CVRD+FIN SIDER) Tubarão, BRASIL	3'000,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	5 discos; 7.5m diám.	1; 451.5; 3.5	(1977) cal hidratada. hematita
HIPOBRAS (CVRD+Cías.Japón) Tubarão, BRASIL	6'000,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	10 discos; 7.5m diám.	2; 528 ; 4.0	(1977) cal hidratada, hematita
HIPANOBRAS (CVRD+INI) Tubarão, BRASIL	3'000,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	5 discos; 7.5m diám.	1; 451.5 ; 3.5	(1978) cal hidratada, hematita
SAMARCO. BRASIL Punta Ubu, E.S.	5'000,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	8 discos; 7.5m diám.	1; 704 ; 4.0	(1977) cal hidratada, hematita
SIDOR-VENEZUELA Matanzas	6'600,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta	12 discos; 7.5m diám.	2; 552 ; 4.0	(1977) , ilmonita y hematita.
MAP - CHILE Huasco	3'500,000	Allis-Chalmers (KOBÉ)	parrilla-horno rotatorio	6 discos; 7.5m diám.	Parrilla móvil: 182' x 15.6" Horno rotatorio: 164' largo 22'8" diám.int.	(1977) cal hidratada, magnetita
BENITO JUAREZ-PERA COLORADA, MEXICO Manzanillo, Colima, Planta II	2'500,000	Lurgi-Dravo	parrilla recta			(1978) bentonita , magnetita

Es posible que pronto se incorporen otros proyectos, especialmente por parte de la Companhia Vale do Rio Doce - CVRD, de Brasil, la que impulsaría una nueva planta de peletización, en Minas Gerais, con participación de las grandes empresas siderúrgicas brasileñas y cuya producción sería consumida por esas empresas. Otra posibilidad, aún no precisada, es la construir una nueva planta de peletización en San Nicolás, Perú. Con ello la producción latinoamericana de pélets alcanzaría aproximadamente 57 millones de toneladas hacia 1980. El consumo interno sería del orden de 25 millones de toneladas, quedando para exportar fuera de la región unos 32 millones de toneladas de pélets por año. Se estima que el comercio mundial de pélets en 1980 será del orden de los 90 - 95 millones de toneladas, por lo cual América Latina estaría participando con un 34 - 35% de tal comercio.

La mayoría de las plantas de peletización tienen también una instalación de molienda y beneficiación preconectada. Merece ser mencionado que el primer molino autógeno para mineral de hierro instalado en la América Latina se encuentra en servicio en la Planta Peña Colorada, en México, desde fines de 1974.

El desarrollo técnico del proceso de peletización, en general, se desprende claramente del tamaño de las parrillas móviles construidas en América Latina. La primera planta puesta en servicio en 1963 para Marcona Mining Co., en Perú, tiene una capacidad de 1.2 millón de toneladas por año, siendo el

área de reacción de la parrilla móvil de 135 m² y la anchura de 2.5 m.

En 1978 se pondrá en marcha la planta de HISPANOBRAS (CVRD + INI de España), en Tubarao/Brasil, completando así el mayor conjunto de peletización del mundo, que comprenderá 6 plantas de una capacidad de 17 millones de toneladas por año.

3. NUEVO PUERTO Y COMPLEJO DE PELETIZACION DE HIERRO EN EL BRASIL.-

Fué la Marcona Corporation, la que consiguió asegurar préstamos bancarios por 194 millones de dólares para ayudar a financiar los trabajos de desarrollo de un nuevo yacimiento de mineral de hierro a trabajarse a cielo abierto en el Brasil. El complejo estaría formado por una planta de beneficio, una línea de tuberías de 385 Km de longitud para el transporte de lodos, y una planta de peletización de mineral de hierro e instalaciones portuarias en Punta Ubú, en la Costa.

Los servicios de ingeniería, suministros, y administración de la construcción los proveerán conjuntamente la International Engineering Co. Inc. y la Dravo Corp. La Samarco Mineracao S.A., empresa que patrocina el proyecto, es una compañía brasileña perteneciente en un 49% a la Marcona International S.A. (una subsidiaria de la Marcona Corp.) y 51% a la empresa brasileña productora de mineral de hierro S.A. Mineracao de Trindade (Samitri).

El complejo comprenderá una nueva mina de mineral de hierro y concentradora ubicados a 80 Km al sureste de Belo Horizonte, en el estado de Minas Gerais, para desarrollar los depósitos de 280'000,000 de toneladas; una tubería de 20 pulgadas de diámetro y de 385 kilómetros, para la conducción de lodos minerales, y, el complejo de peletización e instalaciones portuarias en Punta Ubú, al sur de Vitoria y al norte de Río de Janeiro. En Punta Ubú se recibirán los lodos concentrados con un contenido del 66% de hierro a razón de 10 millones de toneladas métricas por año. De esta cantidad, 5 millones de toneladas serán peletizadas, y el resto será embarcado en forma de concentrados a los clientes de ultramar. Se han tomado las medidas para aumentar la capacidad de peletización a 10 millones de toneladas.

El complejo incluirá instalaciones para el espesamiento y filtrado del lodo, mezclándolo con cal como agente aglomerante, formándose el concentrado en bolas, que se someten a endurecimiento por calor sobre una línea de peletización de parrilla móvil. Normalmente, los pélets se apilarán y luego se recuperarán mediante un recuperador/apilador, para luego ser trasladados al muelle de embarque para cargarlos a bordo a razón de 8,000 toneladas por hora.

Las instalaciones portuarias que se construirán en Punta Ubú incluirán una calzada y espigón que se extenderá 2.5 Km frente a la playa, para acomodar barcos de hasta 250,000 D W T. Los servicios de ingeniería para las instalaciones marítimas los proporcionará la firma URS/John A. Blume & Associates bajo subcontrato de Consorcio Punta Ubú.

La capacidad inicial será de 7'000,000 de toneladas anuales de concentrado y 5'000,000 de toneladas de pélets.

Se han firmado ya contratos para la venta de pélets a plantas siderúrgicas europeas. Rohstoffhandel GmbH ha firmado contrato por 1'200,000 toneladas anuales de pélets; Erzkonter, 500,000 toneladas; y la British Steel Corporation, por 500,000 toneladas.

4. LA EXPROPIACION DE MARCONA.-

Marcona, uno de los más grandes complejos mineros en el país, es ahora totalmente peruano. Hierro - Perú la nueva compañía estatal, que está a cargo del complejo, tiene que enfrentar dos difíciles problemas: Las ventas futuras y la ampliación de la planta de peletización.

La expropiación de las operaciones mineras de la Marcona, fue casi enteramente esperada. El Gobierno había expresado ya que Marcona sería peruana antes de finalizar el año 1975.

El Decreto Ley que autoriza la expropiación de Marcona (D.L. 21228) cancela el contrato bajo el cual la Marcona operó en el país y crea una nueva compañía estatal Hierro - Perú, que se haría cargo de las minas y las plantas de procesamiento.

La Compañía Marcona, inició en 1953 la explotación de minerales oxidados de hierro con leyes económicamente aceptables para exportación directa sin mayor proceso de concentración.

En 1962, pasa a la etapa de beneficio para explotar las reservas de bajo contenido de hierro y poner al mercado como pro

ductos de calidad superior en forma de concentrados tipo sinter y alto horno.

En 1963 pasa a la peletización.

Todo esto y los planes de ampliación, hacen de la ahora Hierro - Perú, cuyas plantas de beneficio e instalaciones de embarque situadas en la bahía de San Nicolás, a unos 500 kilómetros al sur de Lima, uno de los complejos industriales más importantes en el país.