

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA  
GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA**



**“Investigaciones sobre Producción de  
Hierro Esponja en Hornos Rotatorios  
Siderperú”**

**T E S I S**

**Para optar el Grado de  
INGENIERO METALURGISTA**

**HUGO ELIAS ESPINOZA PAREDES**

**Lima — Perú**

**1978**

Con todo cariño a mis hermanas y a mi querida madre, en contribución a su constante esfuerzo para la culminación de mi carrera.

A mi querida esposa por su constante apoyo.

A mis compañeros de trabajo y a todos mis amigos en general quienes en una u otra forma han contribuido en la culminación del presente trabajo.

## I N D I C E

	PAG
<b>CAPITULO I : <u>GENERALIDADES</u></b>	
1.1 Sumario.....	1
1.2 Introducción.....	4
1.3 - Breve reseña histórica de la Reducción Directa.....	5
1.4 Terminología empleada.....	6
1.5 - Situación actual de la Reducción Directa en América Latina.....	8
1.6 - Importancia del Hierro Esponja.....	10
1.7 - Ventajas del Hierro Esponja sobre la cha- tarra.....	11
<b>CAPITULO II : <u>ASPECTOS TECNICOS EN GENERAL</u></b>	
2.1 <u>Estudio de la Materia Prima</u> .....	14
2.1.1 - Mineral de hierro pelletizado.....	14
2.1.2 - Reductor sólido: Carbón o Coque.....	17
2.1.3 - Caliza.....	20
2.1.4 - Combustible y Energía Eléctrica.....	21
2.2 - <u>Procedimientos Industriales de Reducción Directa</u> .....	22
2.2.1 - Procesos a base de Reductor Sólido..	22
2.2.2 - Procesos a base de Reductor Gaseoso.	23
2.3 - <u>Proceso adoptado por SIDERPERU</u> .....	26
2.3.1 Elección del proceso.....	27
2.3.2 - Desarrollo del proceso SL-RN.....	28
2.3.3 - Descripción general del proces SL-RN	29
2.4 - <u>Aspectos teóricos del Proceso</u> .....	30
2.4.1 Principios de la reducción.....	30
2.4.2 Relaciones de equilibrio.....	34
2.4.3 - Cinética de la reducción.....	38
<b>CAPITULO III : <u>LA PLANTA PILOTO DE SIDERPERU</u></b>	
3.1 - Implementación de la Planta Piloto.....	42
3.2 - Descripción general de la planta.....	45
<b>CAPITULO IV : <u>EXPERIENCIA OPERACIONAL</u></b>	
<u>Pruebas Preliminares</u> .....	55

4.1.1	Pruebas en frio.....	55
4.1.2	- Pruebas en caliente.....	57
4.1.3	Ensayos de producción.....	58
4.2	- <u>Resultados Experimentales</u> .....	60
4.2.1	Usando coque como reductor.....	63
4.2.2	- Usando Antracita como reductor.....	64
4.2.3	Con pellets ácidos, pellets de baja sílice y pellets básicos.....	64
 <b>CAPITULO V : <u>CONTROLES DE OPERACION</u></b>		
5.1	- Balance de Materiales.....	66
5.2	- Balance de Energía.....	68
5.3	- <u>Control de las variables predominantes</u> ....	70
5.3.1	Perfil térmico.....	70
5.3.2	- Velocidad del horno.....	71
5.3.3	Tiempo de permanencia de la carga en el horno,.....	71
5.3.4	Dosificación de la alimentación.....	71
5.4	- Control de calidad del producto obtenido..	72
5.5	Características físicas y químicas del Hierro Esponja.....	75
 <b>CAPITULO VI : <u>ANALISIS, DISCUSION y CONCLUSIONES</u></b> <b>                  <u>PRELIMINARES</u></b>		
6.1	- <u>Estudio analítico por campañas</u> .....	77
6.1.1	- Metodología.....	77
6.1.2	Antecedentes generales de operación.	78
6.1.3	- Cálculos efectuados.....	78
6.1.4	- Tablas y gráficos confeccionados....	78
6.2	Análisis y discusión de los resultados....	83
6.3	Conclusiones preliminares.....	90
 <b>CAPITULO VII : <u>EVALUACION TECNICO ECONOMICA</u></b>		
7.1	Costos de producción.....	95
7.2	Ejecución presupuestal del proyecto Hierro Esponja a nivel de Planta Piloto.....	96
7.3	- Proyección Industrial.....	96

CAPITULO VIII : UTILIZACION DEL HIERRO ESPONJA

8.1 - En Alto Horno.....	97
8.2 - En Hornos Eléctricos.....	98
8.3 - En fundiciones.....	98
8.4 - Utilización actual del Hierro Esponja en América Latina.....	99

CAPITULO IX : CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

BIBLIOGRAFIA

## CAPITULO I : GENERALIDADES

### 1.1 - SUMARIO .-

Ha sido siempre inquietud de los siderurgistas, el de encontrar un procedimiento mas directo y económico, que el sistema tardicional Coquería-Alto Horno-Conver-tidores LD, para producir el hierro primario. En este sentido, en los últimos tiempos, son los procesos de Reducción Directa los que han tenido mas auge y acogida como alternativa eventualmente favorable.

- La Reducción Directa es un proceso que consiste en la eliminación del oxígeno de los óxidos de fierro, mediante la acción de un agente químico: el Reductor. Este puede ser sólido (carbón o coque) o gaseoso (gas natural, petróleo o carbón gasificado). El producto resultante es el Hierro Esponja, que representa un sustituto eficaz de la chatarra.

La escasez de la chatarra es crítica en la actualidad y será mas aún en el futuro. Las estadísticas predicen que la producción mundial de acero en 1985 será de 1,100 millones de toneladas, de las cuales 330 millones corresponderán a las acerías eléctricas; y si consideramos que actualmente se produce 130 millones de Ton/año, notaremos que el incremento esperado en un tiempo relativamente corto, ha de ser enorme y muy grande también su repercusión en el mercado de la chatarra.

→ Por lo anterior, es preocupación de los países productores de acero, el de adoptar el proceso que mas se

adecúe a sus propósitos para producir su propia chatarra sintética (hierro esponja) y satisfacer así sus demandas de chatarra.

En la actualidad se cuenta con procesos elegibles que han probado su viabilidad técnica y económica, y que ya se han consagrado como confiables.

Uno de los procesos es el SL-RN, que se desarrolla en un horno rotatorio, y que en el caso del Perú, es el que mas se amolda a nuestra realidad, porque:

Permite el uso de nuestros propios recursos: mineral, carbones nacionales, etc.

Es de tecnología simple y bastante versátil en cuanto al tipo de mineral a emplearse y la calidad del reductor sólido.

Representa menores inversiones de capital, e inferiores costos de operación.

- En 1973, SIDERPERU decidió empezar a realizar las pruebas de Reducción Directa a nivel de Planta Piloto, paralelamente se comenzaba el montaje de la planta industrial que consta de tres hornos rotatorios.

- En el presente trabajo se resume los antecedentes y consideraciones que aconsejaron la instalación de la planta experimental a nivel de planta piloto con horno rotatorio para elaborar el hierro esponja.

- A una breve descripción del proceso y las características fundamentales de los equipos utilizados, sigue la enumeración en detalle de los resultados experimentales que han de tomarse en cuenta en la puesta en marcha y operación de la instalación industrial.

- En la actualidad se ha concluido con las pruebas a nivel de planta piloto, habiéndose llegado a dominar los principales parámetros que gobiernan el proceso y habiéndose obtenido un hierro esponja de alta calidad con una metalización por encima del 90%.

Se ha probado la reducción de 3 tipos de pellets: normales del alto horno, básicos y de baja sílice. Los reductores probados son los finos de coque y las antracitas de Caraz, la Galgada y Ancos. Habiéndose obtenido en todos los casos resultados completamente satisfactorios.

- El costo de producción del hierro esponja a nivel de planta piloto, resulta: S/ 7,393.00/Ton. A nivel de planta industrial, el costo de producción bajará ostensiblemente.

- El proyecto en actual ejecución, está concebido para una producción de 120,000 Ton/año, el proceso a emplearse es el SL-RN y se está construyendo con la licencia y asesoramiento de LURGI (Alemania).

El material de carga será, los pellets producidos por HIERRO PERU que son utilizados por la firma TAMSA de México para su proceso HyL. El reductor e emplearse será, Los 100,000 toneladas de finos de coque acumulados por SIDERPERU y posteriormente se utilizarán carbones nacionales.

A partir de 1980 en que empieza a operar la planta industrial de Reducción Directa, SIDERPERU logrará bajar sus requerimientos de chatarra en un 40%, el cual será reemplazado por el hierro esponja producido.



## 1.2 - INTRODUCCION.-

SIDERPERU, empresa encargada por el estado, de la actividad siderúrgica, ha venido produciendo acero desde el año 1958.

En 1968 se instaló en la siderúrgica de Chimbo+te, el sistema Alto Horno-Convertidores LD y desde esa fecha se viene importando coque desde el Japón.

También desde 1958 se viene produciendo acero en dos hornos eléctricos de arco de 30 Ton/colada de capacidad c/u, abasteciéndose como materia prima con chatarra nacional e importada. Se estuvo importando chatarra de calidad desde EEUU hasta el año 1976 en que se suprimió por los altos costos de importación.

A partir de 1977 han entrado en operación 2 nuevos hornos eléctricos de arco de 20 Ton/colada de capacidad c/u. Esto ha incrementado los requerimientos de chatarra en SIDERPERU.

El éxito de la colada continua con un mayor rendimiento metálico que introduce, y la laminación con una mayor eficiencia; han dado lugar a una menor producción de chatarra de retorno; mas la proliferación de hornos para la fusión de chatarra, han hecho que la chatarra de calidad se torne escasa y muy cara, y que se haya sentido la necesidad de un producto sustitutorio como el hierro esponja.

La escasez de la chatarra nacional y los altos costos de importación de la chatarra de calidad, han hecho que SIDERPERU se preocupara por contar con una planta productora de hierro esponja que cubra por lo

memos gran parte de su déficit de chatarra.

Las investigaciones hechas en la Planta Piloto de Hierro Esponja de SIDERPERU, han dado resultados exitosos, habiéndose obtenido un producto de alta calidad. Todas las experiencias ganadas en ésta planta, serán volcadas en la nueva planta industrial que a fines de 1979 será puesta en marcha.

### 1.3 - BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA REDUCCION DIRECTA.-

Hasta el siglo XIV en que por primera vez se obtuvo arrabio en los primitivos altos hornos, fueron de reducción directa los procesos que durante varios siglos permitieron al hombre contar con objetos de hierro procedentes de minerales de este metal.

Luego de la aparición del alto horno, los metalurgistas continuaron buscando otros procedimientos que permitieran una obtención mas favorable del hierro metálico. En 1910 cuando Emil Sieurin desarrolló el proceso Höganäs, se habían registrado desde 1855 en Inglaterra 284 patentes sobre procedimientos de reducción directa, y en 1944 las patentes registradas en EEUU sobre lo mismo alcanzaban a 897.

Pese a los considerables esfuerzos realizados y las importantes sumas gastadas en investigaciones, la aplicación industrial fue muy reducida, y de los procesos que han alcanzado consagración en el presente siglo, destacamos;

Höganäs	HyL
Wiberg	- SL-RN
Krupp-Ren	- Midrex
Echeverría	

Posteriormente aparecieron otros procesos como los que a continuación se mencionan, algunos con mayor éxito que los otros:

- HIB

Armeo

Purofer

Krupp Hierro Esponja

Fior

Sin embargo, no todos los procesos mencionados han prosperado, en su lugar han surgido otros, de tal manera que los procesos de reducción directa elegibles actualmente son:

SL-RN

ACCAR

KINGLOR-METOR

HYL

- MIDREX

PUROFER

En el capítulo II de la presente tesis se hace una breve descripción de éstos procesos.

#### 1.4 - TERMINOLOGIA EMPLEADA

##### 1.4.1 - Reducción Directa

Se considera como reducción directa, aquella reducción (eliminación del oxígeno) de los óxidos de hierro que se efectúa sin alcanzarse la fusión (en esta

de sólido). Aunque es éste la acepción que mas se ha generalizado no deja de ser meramente convencional. Mas apropiado sería en este caso, llamar como lo hacen algunos autores, de " Preredución " al respectivo proceso, en visto de que sin alcanzarse la fusión, no se llega a remover en la práctica todo el oxígeno y por consiguiente, no se logra la reducción por completo.

#### 1.4.2 - Hierro Esponja

Cuando la eliminación del oxígeno de los óxidos de hierro se efectúa sin llegar a la fusión, el producto conserva la forma original del mineral pero con notable mayor porosidad. Por ésta última condición recibe el nombre de "Hierro Esponja" o esponja de hierro.

Pero no todos los productos sólidos obtenidos por reducción directa son hierro esponja. En algunos procesos se emplean minerales de hierro en pequeñas partículas, luego de reducidas son briqueteadas, con el cual el producto final resulta muy compacto y duro, en este caso se llaman briquetas metalizadas.

Al Hierro esponja que procede de mineral en trozos o en pellets, se aplica también las denominaciones de mineral o pellets " metalizados " y mineral o pellets " prerreducidos ".

#### 1.4.3 - Grado de Reducción

Es la relación entre oxígeno removido de los

Óxidos de hierro y el oxígeno total de éstos antes de la reducción, multiplicando esta relación por 100 se expresa el grado de reducción como un porcentaje. Así, si  $O_r$  es el oxígeno removido y  $O_t$  el oxígeno total original, el grado de reducción vendría a ser:

$$R = \frac{O_r}{O_t} \times 100$$

#### 1.4.4 - Grado de Metalización

Es la relación entre el hierro metálico ( $Fe_m$ ) del producto reducido y el hierro total ( $Fe_t$ ) del mineral empleado. Este grado de metalización expresado en porcentaje, sería:

$$M = \frac{Fe_m}{Fe_t} \times 100$$

En el contenido del hierro metálico se incluye el Fe de la cementita que se puede formar.

#### 1.5 - SITUACION ACTUAL DE LA REDUCCION DIRECTA EN AMERICA LATINA.

Desde que comenzó a operar la primera planta de reducción directa en Monterrey ( Méjico ) en 1954, América Latina ha encabezado el nuevo desarrollo de la reducción directa y la región es ahora la primera en el mundo en cuanto al número de plantas en operación, y de acuerdo a

las estadísticas continuará en el liderazgo durante la próxima década. Hasta principios de 1,977 las perspectivas de la reducción directa eran excelentes, había 39 plantas en operación en 12 países de todo el mundo con una capacidad combinada de cerca de 9 millones de toneladas de hierro esponja y otras 25 plantas de reducción directa en construcción, la mitad de éstas unidades han sido completadas a fines de 1,977, en que la capacidad total era de 15 millones de toneladas.

Un tercio de esta capacidad mundial corresponde a América Latina con sus 14 instalaciones de reducción directa.

En 1,985, la capacidad de las instalaciones de reducción directa en América Latina será de 15 millones de toneladas en 33 plantas, representando el 29% de la capacidad total de reducción directa y el 32% de un total de 101 instalaciones.

La producción de la reducción directa en América Latina se concentra actualmente en 4 países: Méjico, Venezuela, Brasil y Argentina. Las 14 plantas actualmente en operación son: 6 en Méjico, 4 en Venezuela, 3 en Brasil y uno en Argentina.

En 1,980 habrá 6 en Méjico, 6 en Venezuela, 3 en Brasil, 2 en Argentina, 1 en el Perú y otro en Trinidad Tobago en el Caribe, con mas de 5 millones de toneladas, Venezuela en 1,980, será el mayor productor y consumidor

de hierro esponja en el mundo. La capacidad anual de producción en Méjico será de 2 millones de toneladas, en Argentina será de 750 mil y en Brasil 660 mil toneladas.

#### 1.6 IMPORTANCIA DEL HIERRO ESPONJA

En los últimos años se observa con mayor incidencia que nuestra disponibilidad de moneda extranjera ( dólares ) es muy limitada, lo mismo que el comportamiento de nuestra balanza de pagos permanece crónicamente deficitaria, tornandose año a año mas difícil el empleo libre de moneda extranjera para las operaciones de importación, por lo que en estos años se viene imponiendo una política de cuotas fijas de moneda extranjera para la importación de productos e insumos de carencia total o de difícil producción.

El mercado nacional de chatarra es sumamente limitado y fundamentalmente sirve de suministro a las fundiciones de Lima, su costo en la actualidad se ha elevado tanto, pagandose en oportunidades sobre los 10 soles por kilo.

La disponibilidad de éste insumo es cada vez menor en relación al consumo creciente de la industria siderúrgica, SIDERPERU inició sus importaciones en 1973, habiendo importado hasta 1976 la cantidad de 106,507 toneladas. En el presente año y para los próximos años, de acuerdo con su programa de producción sus necesidades de chata

rra serán cada vez mas crecientes, en proporción directa al ritmo de desarrollo de la acería eléctrica fundamentalmente.

El costo de la chatarra importada en el comercio mundial es completamente inestable y para los próximos años se preveé una escasez crónica.

Ante el panorama anterior, SIDERPERU decidió producir su propio hierro esponja, con lo cual conseguirá autoabastecerse y permitirá al país el mejor empleo de las divisas que se hubieran empleado en las futuras importaciones de chatarra.

Una vez que se ponga en marcha la planta industrial de hierro esponja, que producirá 120 mil toneladas por año, SIDERPERU dejará de preocuparse de todos los problemas de adquisición de chatarra importada.

El hierro esponja es un sustituto de la chatarra que ofrece características y ventajas múltiples tanto por sus propiedades físicas y químicas, como en lo referente a control de calidad.

#### 1.7 - VENTAJAS DEL HIERRO ESPONJA SOBRE LA CHATARRA

Sen muchas las ventajas del hierro esponja sobre la chatarra en el, proceso de fabricación del acero en los hornos eléctricos: así mismo en la comparación del acero obtenido con cada uno de ellos. A continuación se enumera algunas:



Por su mayor peso volumétrico que va desde 10 a 100% mayor que los diversos tipos de chatarra, permite una carga mas densa del horno eléctrico, evitando la recarga y evitando por lo tanto pérdidas de calor por radiación y disminuyendo el tiempo de colada.

Ofrece un mayor rendimiento de carga metálica a acero líquido. El rendimiento de una colada con 100% de hierro esponja es hasta 96% en cambio con chatarra no llega ni a 90%.

- Por ser el hierro esponja un producto libre de elementos nocivos y con un alto rendimiento, puede mezclarse con chatarras de baja calidad y bajo costo, sin afectar el promedio de calidad y disminuyendo el costo de la carga metálica.

El hierro esponja es un producto completamente libre de elementos residuales ( Cu, Ni, Sn ), por lo que diluye elementos residuales contenidos en la chatarra y produce un acero de mejor calidad.

- También el hierro esponja contiene menores elementos perjudiciales como el azufre ( inferior a 0.05% ) y fósforo ( 0.03% ) esto permite tiempos menores de refinación que la chatarra.

El contenido de los diversos elementos del hierro esponja es sumamente constante ( análisis uniforme ), dando un acero cuya composición se puede definir con el primer análisis, evitando desviaciones de calidad.

Permite una alimentación continua al horno, disminuyendo aún más el tiempo de refinación y el tiempo total de colada.

La uniformidad granulométrica del hierro esponja, ocasiona una potencia calorífica más uniforme en el horno, evitando interrupciones y discontinuidades propias de la fusión de la chatarra.

El carbón contenido en el hierro esponja se combina con el FeO residual, produciendo el desprendimiento de CO en el baño, que al burbujear, produce una agitación muy efectiva, permitiendo mayor homogeneidad en la composición del acero y una mayor eficiencia térmica.

Al haber generación de CO, el burbujeo a través del baño produce una escoria espumosa que cubre el arco y protege la pared refractaria del horno de la radiación.

La agitación del baño provoca una mejor desgasificación, con una mayor eliminación del Hidrógeno y el Nitrógeno del acero, dando mejores características para el troquelado.

El acero final obtenido a partir del hierro esponja, presenta mejores características físicas: se obtiene con mayor y más uniforme estructura cristalina, mejor respuesta a los tratamientos térmicos, aumenta su ductilidad y disminuye los defectos superficiales.

## CAPITULO II : ASPECTOS TECNICOS EN GENERAL

### 2.1 ESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA

Se detallan á continuación los requisitos que deben de cumplir los materiales a emplearse en la reducción directa:

#### 2.1.1 El Mineral de Hierro

En cuanto a la granulometría, se puede usar el mineral en forma de finos, en trozos, pellets y briquetas, de acuerdo al proceso a aplicarse. Los hornos rotatorios son los mas flexibles en cuanto a la granulometría, permitiendo no solo el uso de pellets, briquetas y trozos, sino también en ciertas condiciones, finos de mineral. Sin embargo, el uso de partículas pequeñas debe restringirse porque a las temperaturas que conviene conducir los procesos de reducción directa, hay riesgo de sinterización ya que las pequeñas partículas contribuyen a acelerar el proceso.

El mineral debe ser lo mas puro posible, es decir contener una reducida proporción de ganga, particularmente  $\text{SiO}_2$ , por la cantidad de escoria que forme en la aceración y el consecuente mayor consumo de energía eléctrica. También el  $\text{SiO}_2$  libre reacciona con los constituyentes básicas del mineral produciendo una sinterización (champones y encostramiento en las paredes del horno).

Una característica muy importante del mineral de hierro es su reducibilidad (facilidad de perder oxígeno). En pellets la reducibilidad suele ser buena y bastante pareja, aun en los de distinta procedencia.

Otro de los requisitos de apropiado mineral de hierro para su conversión a hierro esponja, es su bajo contenido de azufre, la cantidad de azufre en el prereducido depende de la proporción y el proceso en que se emplee.

Importa también que el mineral no decrepite ni sufra un gran hinchamiento durante el proceso de reducción porque los fines que se producirían, pueden reducir demasiado la permeabilidad de la carga y sobre todo favorecería la formación de encostramiento en las paredes del horno.

En la planta piloto de hierro esponja de SIDER PERU, se ha utilizado 3 tipos de pellets para las pruebas. A continuación se detalla sus principales caracte rísticas.

- Pellets Normales (ácidos) : los que se usan en el alto horno.

<u>Composición química</u>		<u>Granulometría</u>	
		<u>Malla</u>	<u>%</u>
Fe	: 65.40%		
SiO <sub>2</sub>	: 4.41	† 5/8	0.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: 0.96	1/2	45.0
CaO	: 0.63	3/8	44.9

MgO	:	0.83	1/4	4.0
Mn	:	0.020	- 1/4	5.4
Cu	:	0.008		
Zn	:	0.004	Humedad	: 0.70%
P	:	0.013		
S	:	0.034		

- Pellets Básica : Dolomíticos

<u>Composición química:</u>		<u>Granulometría:</u>	
		<u>Malla</u>	<u>%</u>
Fe	: 66.70%		
SiO <sub>2</sub>	: 2.35	‡ 5/8	2.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: 0.55	1/2	51.8
CaO	: 1.60	3/8	36.6
MgO	: 0.98	1/4	5.2
Mn	: 0.016	- 1/4	3.7
Cu	: 0.006		
S	: 0.030		

- Pellets de Baja Sílice : Son pellets especiales, apropiados para la reducción directa y son los que Minero Perú. ( Marcona ) exporta a los países productores de hierro esponja.

<u>Composición química:</u>		<u>Granulometría:</u>	
		<u>Malla</u>	<u>%</u>
Fe	: 67.5%		
SiO <sub>2</sub>	: 2.05	‡ 5/8	2.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: 0.55	1/2	70.0
CaO	: 0.35	3/8	20.0

MgO	:	0.77	1/4	1.2
Mn	:	0.020	- 1/4	4.9
Cu	:	0.009		
Zn	:	0.005		
P	:	0.010		
S	:	0.020		

Para los pellets, la granulometría mas recomendable en la reducción directa es de 6 a 16 mm.

#### 2.1.2 - El Reductor Sólido : Carbón o Coque

Los reductores sólidos que se emplean para la producción del hierro esponja son el carbón y el coque.

En toda la gama de carbones, desde los lignites hasta las antracitas y fines de coque, puede encontrarse reductores apropiados.

En cuanto a la granulometría, en los hornos rotatorios no es crítico el tamaño del carbón a emplearse y se admite hasta fines de 1 mm, lo cual favorece la cinética de las reacciones.

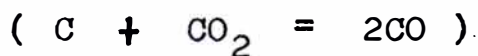
Las características mas importantes que determinan la aplicabilidad de un carbón a la reducción directa de los minerales de hierro, son:

- Contenido de cenizas
- Reactividad
- Materias volátiles
- Contenido de azufre.

- En cuanto a las cenizas, su fusibilidad limita la temperatura a alcanzarse en el proceso, pues debe mantenerse ésta a 100 °C por debajo del punto de fusión de las cenizas para evitar el encostramiento en el horno. Dada la influencia de la temperatura en la velocidad de reacción y su consecuencia en el tamaño del horno, la fusibilidad de las cenizas resulta de capital importancia. La excesiva cantidad de cenizas propicia la formación de encostramiento en forma de anillos en el interior del horno, aún cuando no sea demasiado bajo su punto de fusión. Es de desear que el contenido de cenizas en el carbón esté por debajo del 20%. No es utilizable el carbón con propiedades aglomerantes.

La granulometría mas recomendable para el coque es de 0 a 10 mm. y para las antracitas 1 a 10 mm. En el caso de SIDERPERU, se está usando los fines de coque de sechos del alto horno. También se está usando en las pruebas una antracita proveniente de Caraz ( Ancash ).

- El tamaño del horno y la economicidad de la planta dependen de la reactividad del carbón a emplearse , pues la concentración suficiente de CO que domina la reducción es función de la velocidad con que reaccionen el carbono y el CO<sub>2</sub> para regenerar el CO.



- La reactividad suele ser paralela al contenido de materiales volátiles, sin embargo un contenido muy

alto de materias volátiles, puede superar la cantidad utilizable dentro del horno y habría que contarse con alguna instalación de recuperación del excedente, a menos que sea muy bajo el costo del carbón. Otra solución al problema del carbón con demasiado contenido de materias volátiles sería reemplazarlo parcialmente por carbón de bajo contenido volátiles.

- El contenido de azufre es importante sobre todo si las cenizas del carbón son ácidas (como es lo común), es decir que no tienen capacidad para retenerlo como lo hacen las cenizas básicas. El azufre obliga el uso desulfurantes como la caliza i la dolomita para evitar su absorción por el hierro esponja. En condiciones ordinarias, resulta alto su contenido de azufre superior al 1.5%.

Las características principales de cada uno de los reductores utilizados, son las siguientes:

Polvo de Coque : Análisis inmediato

Materias volátiles	:	1.4%
Carbón fijo	:	82. %
Cenizas	:	16. %
Azufre	:	0.6%
Humedad	:	0.6%

Granulometría : De 0 a 10 mm

- 1 mm : 60%



+ 1 mm : 40%

Antracita de Caraz : Análisis inmediato

Materias volátiles	:	5. %
Carbón fijo	:	79. %
Cenizas	:	16. %
Azufre	:	0.5%
Humedad	:	3.5%

Granulometría : De 1 a 10 mm

2.1.3 - La Caliza

Su función en los procesos de reducción directa es la de desulfurante, actúa contrarrestando la acción del azufre del reductor, evitando su absorción por el hierro esponja.

Sin embargo, el efecto de la caliza es altamente negativo, pues el  $\text{CO}_2$  resultante de la calcinación, decrecerá el poder reductor del  $\text{CO}$ , consumirá carbón y absorberá calor del proceso. Debe notarse que la caliza adicionada será calcinada en un trecho dado del horno cuando llegue a  $900^\circ\text{C}$  aproximadamente, ocasionando un cambio en el perfil térmico por ser una reacción endotérmica.

En la planta piloto de SIDERPERU se usa los desechos de caliza ( finos ) de la planta de cal.

En su composición contiene 88% de  $\text{Ca CO}_3$  ( car

bonate de calcio ). La granulometría recomendable es de 0.2 a 3 mm.

#### 2.1.4 - Combustible y Energía Eléctrica

En el caso de los hornos rotatorios, el combustible principal usado es el petróleo Diesel # 2, lo cual se introduce al horno a través de quemadores. En el caso de nuestro horno piloto tenemos 2 quemadores ubicados en ambos cabezales.

La combustión del petróleo es la que proporciona parte de la energía calorífica al proceso.

Pero también la combustión del reductor sólido contribuye con su energía calorífica en la elevación de temperaturas en el interior del horno.

Las características principales del petróleo Diesel # 2 son:

##### Composición química:

C : 87. %

H : 12.6%

S : 0.4%

Densidad : 0.84 Kg/Lt

Poder Calorífico : 19690 BTU/Lb = 10928 Kcal/Kg

La Energía Eléctrica - Es aquella que contribuye, al movimiento de todo el sistema de la planta, accionando

motores y equipos eléctricos.

La que usa SIDERFERU es la proveniente de la Central Hidroeléctrica de Huallanca,

## 2.2 - PROCESOS INDUSTRIALES DE REDUCCION DIRECTA

A continuación se hace un resumen de los procesos elegibles actualmente.

### 2.2.1 - Procesos a base de Reductor Sólido

SL-RR - Este proceso que detalladamente se verá mas adelante, se conduce en horno rotatorio y emplea reductor sólido (carbón o coque). Actualmente existen 10 plantas en operación comprendiendo un total de 16 unidades y 2.5 millones de toneladas de capacidad anual. Una de las plantas es la de SIDERFERU (Chimbote) que actualmente se encuentra en construcción y cuenta con 3 hornos que totalizarán una producción de 120 mil toneladas por año.

Existen otros procesos similares al SL-RR, como el Krupp Hierro Esponja, el Kawasaki y el Nipon Steel, habiendo 4 unidades en operación, totalizando una capacidad nominal de 550 mil toneladas por año, o sea que en total, los procesos con hornos rotatorios suman una capacidad instalada de 3 millones de toneladas por año. Proyectos en estudio para nuevas aplicaciones, representan una capacidad total de casi 4 millones mas.

Las mayores unidades SL-RR ( 6 metros de diámetro

tro ) construidas hasta la fecha son de 350 a 400 mil toneladas por año, pero estando probada en la industria del cemento, la factibilidad de hornos bastante mayores (7.60 Mts. de diámetro) y habiéndose efectuado nuevos avances tecnológicos recientemente, podrá contarse con capacidades de 600/700 mil toneladas/año por unidad.

El consumo de electricidad reportado es del orden de 70 Kw/hr y el consumo energético en el reductor es de 4 Gcal, pero con las innovaciones previstas, mas la adaptación de recuperadores de calor, el consumo energético y de combustible bajará senciblemente.

ACCAR - En este proceso que también se desarrolla en horno rotativo, se pretende reforzar las condiciones reductoras en la sección ocupada por la carga, inyectando en éste un combustible líquido o gaseoso. Se puede suponer que la participación del reductor sólido cargado, será menor que en el proceso SL-RN y similares y que pudiera incluso suprimirse, convirtiendo el ACCAR en un proceso enteramente de reductor líquido o gaseoso, con la ventaja sobre todos los de ésta última clase en que no requiere reformador para obtener el gas reductor y se conduce a temperatura mas elevada con lo que se favorece la cinética de las reacciones y se obtiene un producto menos reoxidable que no requiere briqueteado ni pasivación alguna. Presenta también mas flexibilidad en cuanto al tamaño del mineral y no tiene el delicado manupuleo

del gas reductor.

El calor requerido es aportado por gases combustibles que emergen de la carga , con inyección de aire en la zona libre del horno. Las inyecciones de aire y combustible se aplican alternativamente en diversas secciones a lo largo del horno. Actualmente existen 2 instalaciones que operaron antes con procesos diferentes y que fueron convertidos al proceso ACCAR, totalizando una capacidad nominal de 265,000 toneladas/año. Hay planes para un horno de 6 m. de diámetro y una capacidad de producción de 400,000t/año.

Se ha reportado un consumo de 50 Kw-hr y el consumo energético es según el reductor empleado y en ningún caso mayor que 4 Gcal.

#### KINGLOR METOR

- Este proceso ha sido concebido para capacidades relativamente modestas, a base de nódulos de 20,000t/año que comprenden 6 reactores en un horno.

Los reactores son retortas de carburo de silicio calentados por fuera y la carga consiste del mineral en trozos o pellets, carbón y caliza o dolomita.

Existe una instalación experimental de 17 t/día a base de un horno con 2 reactores y se ha confirmado la construcción de una planta de 40,000 t/año.

El consumo energético reportado en la planta pilo

to es de 4.3 Gcal y 80 Kw-hr/t.

### 2.2.2 - Procesos a base de Reductor Gaseoso

HYL - Este proceso se efectúa a base de gas reductor proveniente del reformado catalítico del gas natural con vapor.

Es el mas antiguo de los procesos elegibles actualmente.

Existen 23 unidades operando y en construcción por un total de 10 millones de t/año de capacidad, y proyectos en estudio por un millon mas.

Las unidades mayores en actual construcción , son de 700,000 t/año de capacidad.

El consumo energético actual es de 4 Gcal y 10 Kw-hr por tonelada de hierro esponja.

MIDREX - Opera también con gas reductor proveniente del reformado catalítico del gas natural con gases ya usados en la reducción y conteniendo CO<sub>2</sub> como fuente de O<sub>2</sub> necesario. También es posible operar con gas de coquería.

Actualmente hay en operación y construcción 20 unidades Midrex, totalizando una capacidad de 9 millones de t/año, mientras que en consideración se encuentran proyectos por 7 millones de t/año mas. Al presente, la mayor de las unidades es de 600,000 t/año.

El consumo energético logrado es de 3.06 Gcal

y 139 Kw-hr por tonelada de hierro esponja, con metalización de 93% y 1.5%C.

FUROFER - Opera también a base de gas reductor proveniente del craqueo catalítico del gas natural con gas de tragante del alto horno o de la gasificación del petróleo residual por combustión parcial con oxígeno.

Existen 2 plantas en operación cada una con una capacidad de 330,000 t/año. Hay otra planta experimental de 500 t/día.

El consumo energético reportado es de 3.3 Gcal y 100 Kw-hr por tonelada de hierro esponja.

FIOR - Este proceso de lecho fluidizado, emplea también gas reductor proveniente del reformado catalítico del gas natural con vapor. Hay 2 plantas en operación la mayor con una capacidad de 400,000 t/año de briquetas metalizadas.

Existen diseños para unidades Fior de hasta 2 millones de toneladas.

El consumo energético previsto para la planta industrial es del orden de 4 Gcal y 45 Kw-hr/t de hierro esponja.

### 2.3 - PROCESO ADOPTADO EN SIDERFERU

Debido a los altos costos de fabricación del hierro en el alto horno, se pensó en un proceso más directo y económico. Como método alternativo se pensó en un pro

cedimiento que:

- a.- Significara menos inversiones de capital que la combinación coquería-alto horno.
- b.- Tuviera costos de operación inferiores.
- c.- Permitiera aumentar la capacidad de producción de acero.
- d.- Fuera capaz de emplear un amplio rango de carbones, en particular carbones no coquizables que es que mas abunda en el país. Pero mas aun, en el caso de SIDERPERU, se pensó en la posibilidad de emplear como reductor las inmensas cantidades de finos de coque no utilizables en el alto horno.

Se trazaron los planes para estudiar un procedimiento basado en el empleo de carbón en un horno rotatorio, pues la tecnología de estos es muy conocida y se sabía que son mecánicamente confiables y aptos para el trabajo continuo.

Al mismo tiempo se iba agravando la situación del abastecimiento de chatarra para la acería eléctrica, principalmente por los altos costos de importación y la escasez de chatarra nacional. Por lo tanto se trazaron los planes para construir un horno rotatorio piloto y paralelamente se iba montando 3 hornos industriales con una capacidad total de 120,000 t/año.

### 2.3.1 - Elección del Proceso



Para seleccionar la línea de proceso mas favorable para nuestro país, tuvimos en cuenta las características de nuestro mineral (pellets de Marcona) y la situación de los combustibles. El empleo de reductores sólidos y horno rotatorio, como equipo fundamental, ofrece un camino con un buen balance técnico que puede operar con calorías de bajo costo, con inversiones moderadas, tecnológicamente simple y de elevada flexibilidad, tanto en la operación como en el aumento de capacidad.

Descartamos aquellos procesos que emplean gas como agente reductor o electricidad como agente térmico y oxígeno como comburente.

De los procesos expuestos en 2.2.1, se eligió el SL-RM ya que el que mas se amolda a nuestros propósitos.

### 2.3.2 - Desarrollo del Proceso SL-RM

La reducción de mineral de hierro en el horno rotatorio fue abordada por J.T. Jones y estudiada mas tarde por el US Bureau of Mines. La aplicación de este principio del proceso en la industria, se inició recién en la década del 60 después de haberse completado amplias investigaciones. Hace 16 años mas o menos se inició el trabajo sobre el proceso SL-RM que fue desarrollado conjuntamente por Steel Company of Canada Limited, Turgi Chenie and Hüttentechnik (Alemania), Republic Steel Corp y National Lead Company (EEUU).

En lo que se refiere al proceso RM, el trabajo de investigación se concentró primero en la reducción de minerales de hierro de baja ley. El hierro esponja elaborado se preparaba después de enfriado mediante molienda y separación magnética y el concentrado obtenido se briqueteaba.

El proceso SL por el contrario se inició con la reducción de pellets de hierro de alta calidad endurecidos, usando antracita como reductor y calentamiento con gas natural. Por su bajo contenido de gangas, el hierro esponja producido así podía aplicarse directamente en acería como un sustituto de la chatarra. Con el transcurso del tiempo, el interés general se concentró más y más sobre esta posibilidad y finalmente esta 4 empresas se unieron y formaron el proceso SL-RM.

### 2.3.3 - Descripción General del Proceso SL-RM

La unidad principal del proceso es el horno rotatorio y es allí donde se efectúa el proceso.

Se alimenta en forma continua carbón, pellets de mineral y caliza a través del extremo de carga del horno, el cual presenta una pequeña inclinación. La inclinación y la rotación del horno, desplazan los materiales a lo largo de todo el horno. Esta carga se calienta con los gases de combustión que se escurren en sentido opuestos (flujo contra corriente).

En la primera parte del horno, los pellets, el

carbón y la caliza se calientan hasta la temperatura de reacción y la humedad del carbón y los materiales volátiles se eliminan a través de la fase gaseosa.

En la segunda parte (zona de reducción) del horno en que alcanza hasta una temperatura de  $1150^{\circ}\text{C}$ , se produce la reducción de los pellets de óxido a fierro.

El hierro esponja producido y el carbón en exceso salen del horno y se descargan en el enfriador, pequeño horno rotatorio inclinado y refrigerado exteriormente con chorros de agua, donde se enfría el hierro esponja antes de salir de la instalación al medio ambiente, evitándose así la reoxidación.

Luego pasa el sistema de clasificación por tamaño  $+3$  y  $-3$  mm. en una zaranda, posteriormente el producto  $+3$  mm. es separado magnéticamente del carbón recirculante y enviado a la tolva de almacenamiento.

## 2.4 - ASPECTOS TEÓRICOS DEL PROCESO

### 2.4.1 - Principios de la Reducción

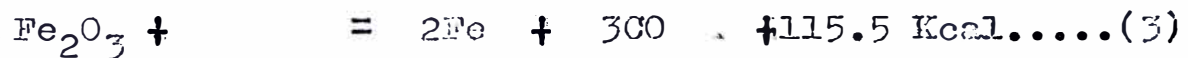
Los minerales de hierro o los pellets procedentes de ellos que se someten al proceso de reducción, están constituidos por el óxido férrico  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita) y el óxido ferroso férrico  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita), también suelen contener algo de óxido ferroso  $\text{FeO}$  (wustita). Se requiere por tanto elevar la temperatura en presencia de un agente químico: el reductor, para obtener la deseada metalización, es decir para liberar al hierro del oxígeno

con que se encuentra combinado en la naturaleza.

Los reductores usuales son el carbono, el hidrógeno, el monóxido de carbono o una mezcla de éstos 2 últimos.

Cuando se emplea carbono, este reacciona a temperatura adecuada con el mineral directamente al contacto superficial, el cual será tanto mayor cuanto menor sea el tamaño de las partículas en presencia.

Cuando se trabaja con reductores sólidos ricos en carbono pueden tener lugar las reacciones siguientes:



Como se puede ver, son fuertemente endotérmicas. Sin embargo tanto por esa vía como al reaccionar al oxígeno ocluido en una carga de carbón, se produce:



y el CO a su vez reacciona:



Mientras que en presencia de carbono en exceso:



en tanto que en presencia de aire:



Cuando tenemos una mezcla de óxido de hierro y carbón y elevamos su temperatura, tiene lugar la reacción ( 4 ) y en las superficies de contacto se produce (1) , (2) y (3) , aunque estas reacciones son lentas y algo limitadas probablemente por el hecho de ocurrir una prerreducción al estado magnético o a FeO. Sin embargo estas reacciones, especialmente la (3) juega un papel importante y probablemente capital por ser lo que inicia o provoca el " arranque " de todo el proceso : desempeña en cierta forma el rol de detonador. El CO producido por esta reacción ( 3 ), se utiliza en las reacciones de reducción por los gases, tales como (5) , (6) y (7) , produciéndose así el hierro metálico.

El exceso de carbón presenta , regenera el CO necesario para mantener la reducción , según la reacción ( 8 ) , llamada reacción de Boudouard, la cual es endotérmica y enfría la masa a no ser que por adición de oxígeno, tenga lugar la reacción (9).

Manteniendo profunda la mezcla de carbón-óxidos de hierro , se asegura la metalización, en tanto que la capa de CO en la superficie, permite la marcha oxidante en la zona gaseosa del horno que garantiza el suministro de calor necesario.

La rotación del horno no solo asegura el des

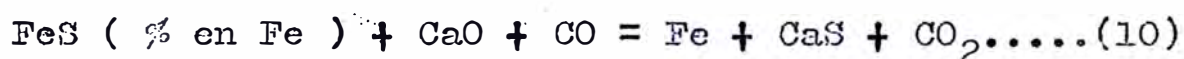
plazamiento mecánico de la mezcla, sino que establece una transmisión de calor homogénea a toda ella.

El éxito de la operación dependerá de la adecuada dosificación del aire para que el calor suministrado sea suficiente para una conveniente velocidad de reacción, evitando el sobrecalentamiento que acarrearía dificultades en la marcha.

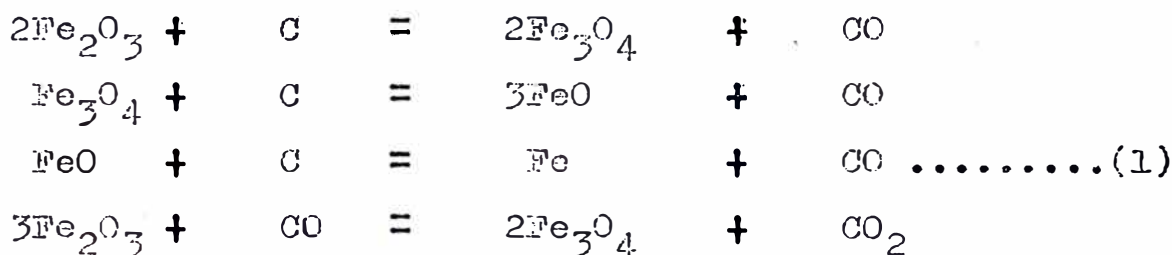
De acuerdo con los cálculos y datos de la reacción (7), resulta que bajo las condiciones de equilibrio, el azufre presente en el hierro esponja, debe estar en solución en el hierro, mas que existir como una fase separada alta en azufre.



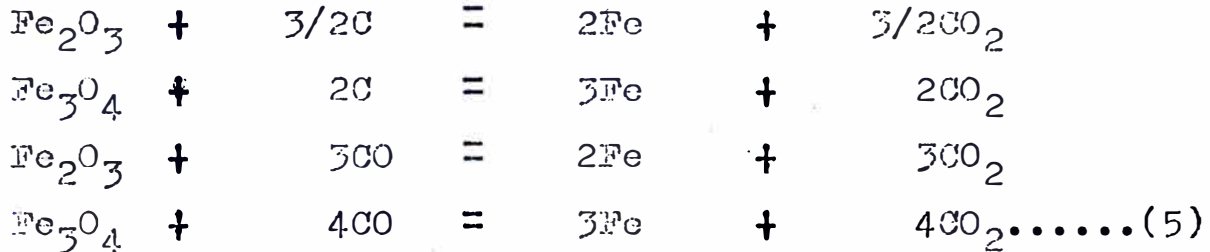
La ecuación que controla el contenido de azufre en el hierro esponja es:



Además de las reacciones estudiadas, se puede citar otras de importancia como las que originan las etapas intermedias de la reducción tanto por acción del C o por el CO producido y regenerado:



otras reacciones importantes:



2.4.2 - Relaciones de Equilibrio

De un análisis exhaustivo del diagrama de equilibrio Hierro-Carbono-Oxígeno que se muestra en la Fig # 1 ( Diagrama de Baur-Grassner ), en que aparece también la curva de Boudouard relativa al equilibrio Oxígeno-Carbono, se saca las siguientes conclusiones:

- 1.- En presencia de CO, el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es inestable. Dentro de las temperaturas consideradas , la menor proporción de CO lo reduce a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .
- 2.- En la curva de la reacción  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ , representada en la Fig. # 1 , sobre los  $1000^\circ\text{C}$  el  $\text{CO}_2$  es inestable por eso no existe. En caso de que se forme  $\text{CO}_2$  , es reducido de inmediato según la reacción de Boudouard.
- 3.- Solo concentraciones de gas  $\text{CO}/\text{CO}_2$  que están por encima de la curva (7)  $\text{Fe}/\text{FeO}$  pueden reducir el  $\text{FeO}$  a  $\text{Fe}$ .



- 4.- Solo concentraciones de gas reductor por encima de

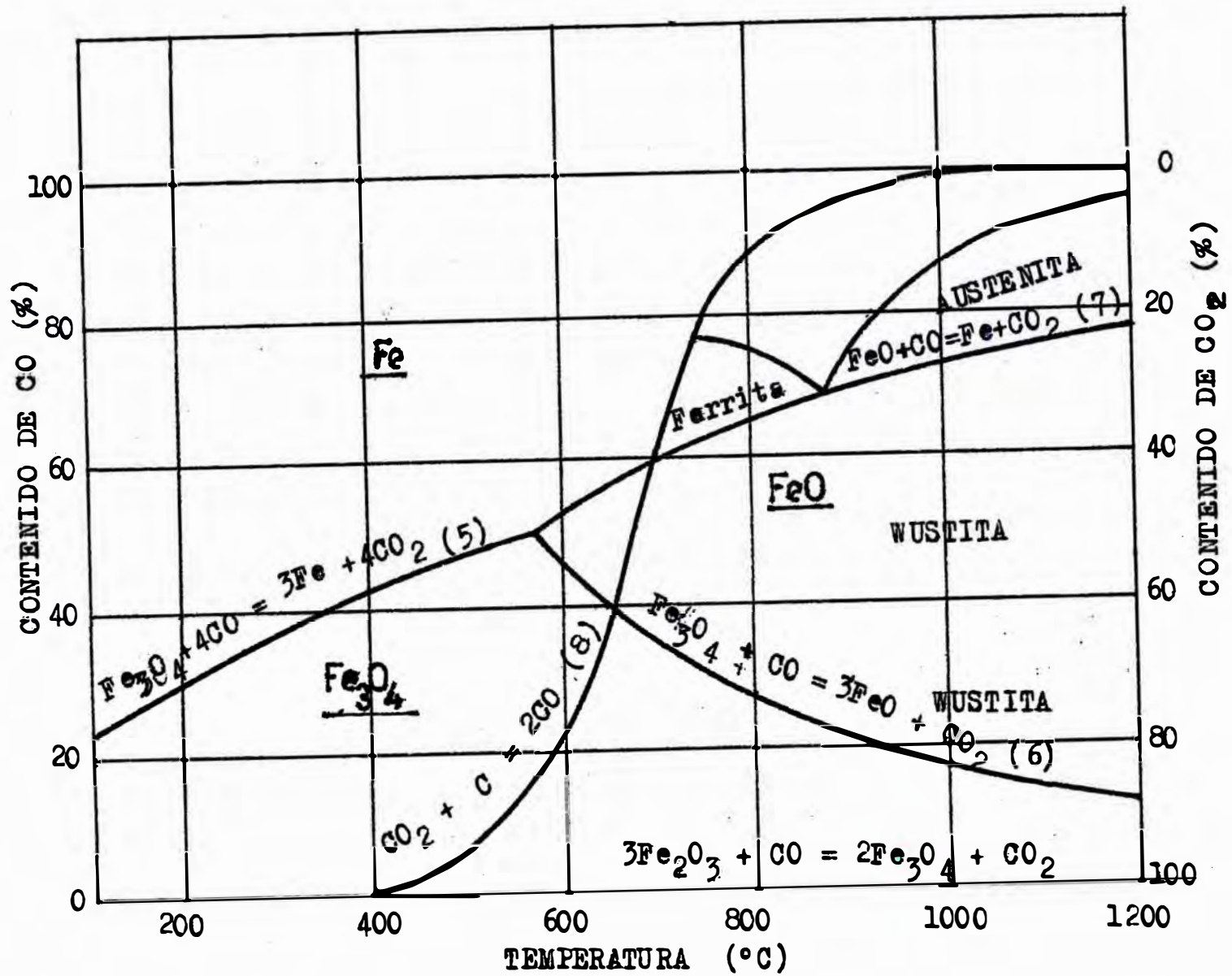
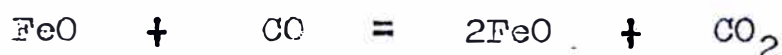


Fig # 1 : EQUILIBRIO DEL SISTEMA HIERRO-CARBONO-OXIGENO



la curva ( 6 ) FeO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> , pueden reducir Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a FeO.



- 5.- Por debajo de los 570°C, la reducción del Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> da lugar a hierro metálico sin pasar por el estado de wustita FeO.
- 6.- Se ha constatado además que a temperaturas inferiores a los 700°C la reducción del FeO por el CO, da lugar a Fe<sub>3</sub>C (carburo de hierro) y que el producto ya metalizado provoca por acción catalítica la disociación del CO a temperaturas bajas, siendo máxima la precipitación del carbono en el hierro , alrededor de los 550°C.



- 7.- Cuanto mas una composición de gas está situada por la parte superior del diagrama, es decir cuanto mas contiene CO tanto mas es su fuerza y capacidad de reducción. Pero es conveniente remarcar que la reducción de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y de FeO a Fe por el CO , no aumenta pasada la limitación de temperatura.
- 8.- Las reacciones de reducción por el CO son exotérmicas o débilmente endotérmicas.
- 9.- Las reacciones de reducción directa por el carbono son reacciones de temperatura elevada, siendo ellas

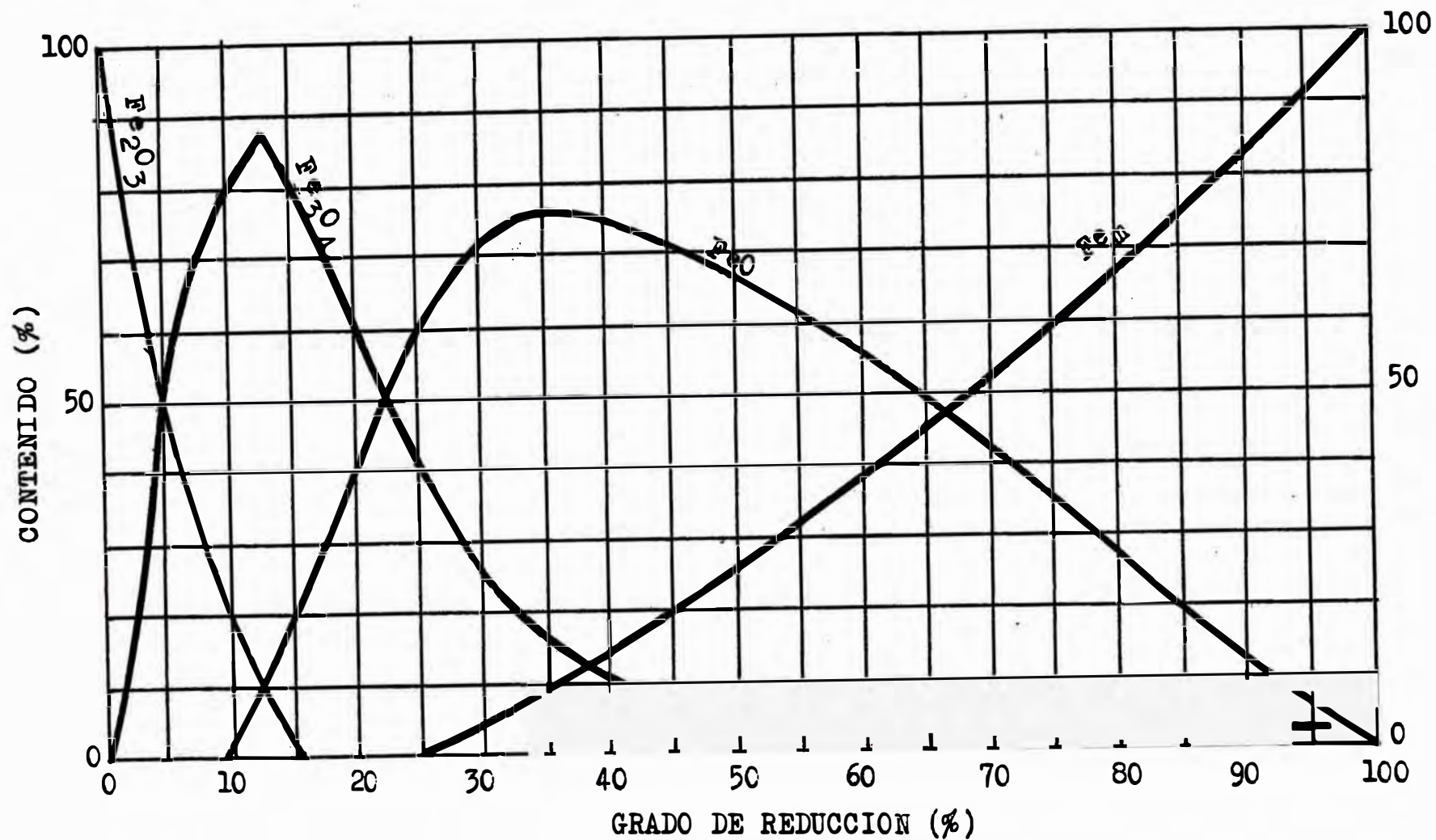


Fig # 2 : EVOLUCION DE LA REDUCCION DE PELLETS EN HORNO ROTATORIO CON CARBON SEGUN Q. DAHL

fuertemente endotérmicas.

La evolución de la reducción hasta su completa metalización , sigue el curso que se muestra en la Fig. # 2 ( gráfico de Q. Dahl ), siempre que se cuente con la suficiente temperatura y elementos reductores.

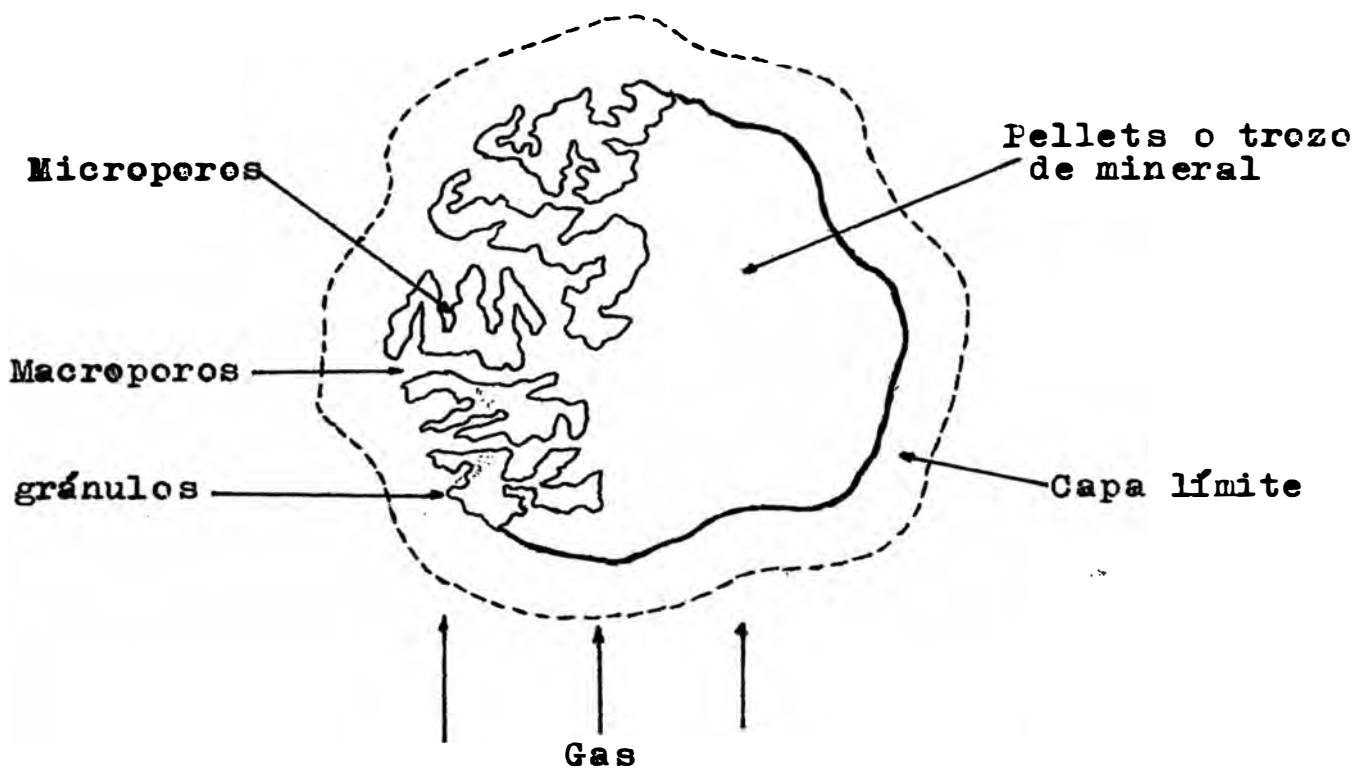
### 2.4.3 - Cinética de la Reducción

Existen muchos factores que influyen en la velocidad con que se desarrolla el proceso de reducción , entre ellas destacan:

#### .- Características del Mineral

a)- Porosidad: Constituidos por los espacios entre los gránulos que comprenden el mineral ( macroporos ) y dentro de los gránulos ( microporos ) , permiten la difusión de los gases reductores desde la capa límite que rodea a cada trozo de mineral hacia el interior , así como la salida de los productos gaseosos de la reducción efectuada. Esta tiene lugar en la fase gas-óxido , en que el gas absorbido por el óxido, descompone a éste, capturando el oxígeno y desprendimiento oxidado, dejando núcleos de  $Fe_3O_4$  ,  $FeO$  y  $Fe$  según el estado inicial del óxido ( ver Fig. # 3 ).

Puesto que en la fase límite gas-óxido subsisten el gas reductor entrante y el gas oxidado-saliente, la velocidad de reacción depende de las presiones parciales de ambos y será tanto mayor cuanto mas dis



**Fig # 3 : ESTRUCTURA DE LOS POROS DE UN TROZO DE MINERAL O PELLETS.**

tante del equilibrio se halle la mezcla.

Luego que una gruesa capa de productos sólidos de la reacción se ha formado, cobra importancia el fenómeno de difusión en estado sólido. En ésta, la metalización avanza de la superficie hacia el interior por difusión del hierro mediante los pasos de sucesivas reacciones en que va desoxidando las capas interiores. De este modo se repone  $FeO$  en la fase límite en que actúa el gas reductor capturando el oxígeno y dejando al hierro que irá engrosando la capa metalizada hasta el grado que otros factores como la temperatura y ciertas impurezas lo permitan. Pero para que continúe la metalización hasta el final, es necesario que la capa de hierro superficial sea porosa, de lo contrario la velocidad de reducción sería grandemente afectada.

b)- Tamaño de las Partículas: El tamaño de las partículas cumple un rol similar a la porosidad en cuanto a la superficie que se presenta en contacto con los gases. Es evidente que cuanto menor es el tamaño de las partículas, mayor será la superficie de reacción y por tanto mayor la velocidad de ésta última. Sin embargo en lechos estáticos, es la permeabilidad a los gases reductores lo que importa y para estos casos, conviene la uniformidad en tamaños y lo suficientemente grandes como para que se produzca fluidización.

La tendencia de las partículas pequeñas a sinterizarse y a formar cascotes y anillos en las

paredes de los hornos rotativos , impone límites menores a las temperaturas de operación lo cual conduce a regímenes de reducida velocidad de reducción.

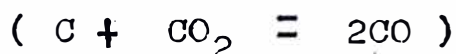
.- Temperatura de Reducción

Cuando el reductor es el CO, la velocidad de reacción es siempre mayor a temperatura mayor, pero conforme se observó en el diagrama de equilibrio de la Fig. # 1 , con el poder reductor ocurre lo contrario , es decir que se requiere mas concentración de CO a medida que sube la temperatura para reducir la wustita a fierro metálico. Dicho de otro modo, el rendimiento disminuye.

.- Concentración de Gases Reductores

Siendo de mayor importancia las reacciones en la fase límite gas-óxido , la presión parcial del gas reductor CO en las superficies de reacción debe mantenerse alta para sostener velocidades de reducción igualmente altas. En efecto , es evidente que el gas empleado debe ser lo mas rico posible en elementos reductores , o sea que la concentración del gas reductor CO desempeña un papel muy importante en la cinética de la reducción.

En esto , juega un papel importante la reactividad del carbón , pues la concentración suficiente de CO que domina la reducción es función de la velocidad con que reaccionan el carbono y el CO<sub>2</sub> para regenerar el CO.



## CAPITULO III - LA PLANTA PILOTO DE SIDERPERU

### 3.1 - IMPLEMENTACION DE LA PLANTA PILOTO

Luego de que SIDERPERU decidió construir su planta piloto de hierro esponja, se hicieron las gestiones a ITINTEC ( Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas ) para que de acuerdo a un convenio firmado entre ambos, se realice las investigaciones sobre las " Posibilidades de Aplicación de la Reducción Directa a los Minerales de Hierro en el Perú ". El contrato se firmó y por intermedio de ella , ITINTEC se comprometía a financiar el montaje de la planta piloto y los gastos de operación , con el 2% de la Renta Neta de las Empresas Industriales a que se refiere la Ley General de Industrias.

Y en 1,973, se empezaron los trabajos de montaje. Se pensó aprovechar las antiguas instalaciones del Banco Minero en Chinbote ya abandonadas, especialmente la zona donde se elaboraba cal. En base a éstas instalaciones, se hicieron todas las modificaciones necesarias hasta adecuarlo para la producción de hierro esponja.

Cabe mencionar de que en el montaje se ha utilizado casi en un 100% materiales recuperados. En la dirección técnica y la mano de obra , ha intervenido netamente personal Peruano es decir Siderperuano , representando ésto un mayor mérito para nosotros.

Y a fines de 1,975 se concluyó el montaje y la plan

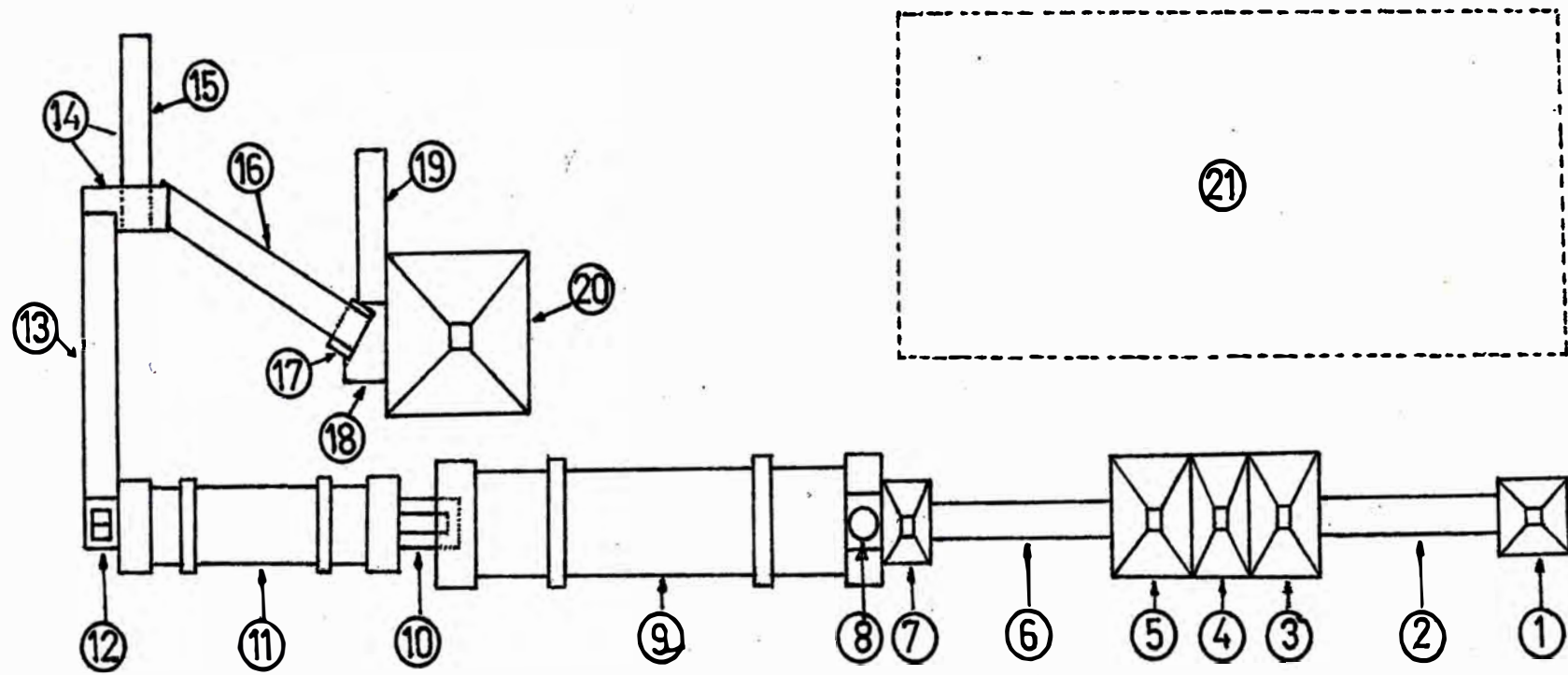


Fig # 4 : DIAGRAMA GENERAL DE LA PLANTA PILOTO DE HIERRO ESPONJA DE SIDERPERU.



ta estaba apta para la realización de los primeros ensayos.

En la Fig. # 4 se muestra el diagrama general de la Planta Piloto de Hierro Esponja SIDRIFLORU.

DESCRIPCION : Fig. # 4

- 1.- Silo de alimentación
- 2.- Faja transportadora # 1
- 3.- Tolva de carbón (coque)
- 4.- Tolva de caliza
- 5.- Tolva de pellets
- 6.- Faja transportadora # 2
- 7.- Cámara de carga
- 8.- Chimenea
- 9.- Horno rotatorio
- 10.- Shute de descarga del horno
- 11.- Enfriador
- 12.- Compuerta doble péndulo
- 13.- Faja transportadora # 3
- 14.- Zaranda vibratoria
- 15.- Evacuación de finos (-3 mm.)
- 16.- Faja transportadora # 4
- 17.- Polea magnética
- 18.- Elevador de cangilones
- 19.- Evacuación de carbón (coque) recirculante
- 20.- Tolva de almacenamiento del producto
- 21.- Canchas de almacenamiento de materias primas y carbón (coque) recuperado.

### 3.2 - DESCRIPCION GENERAL DE LA PLANTA

La planta se compone de los siguientes sistemas principales:

#### a).- Manejo de Materias Primas

El mineral de hierro en forma de pellets procedentes de Marcona ( HIERRO - PERU ) , llega por barco hasta los muelles de SIDERPERU , luego por medio de grandes fajas transportadoras es trasladado hasta las instalaciones de la Planta de Hierro (Alto Horno). Posteriormente, utilizando volquetes es trasladado a la Planta Piloto de Hierro Esponja , en donde es almacenado en amplias canchas que circundan la planta.

El coque fino que se encuentra acumulado en las canchas de materias primas del Alto Horno, previamente es cribado a mallas de 0 a 8 mm , para luego ser trasladado en volquetes a la planta piloto donde se almacena en las canchas de almacenamiento.

La caliza fina es traída de los descartes de finos de la planta de cal de SIDERPERU , ya en las canchas de la planta piloto es cribado al tamaño de 0.2 a 3 mm.

La antracita es traída directamente desde el lugar de procedencia ( Caraz ) ya seleccionada al tamaño de 0 a 1/4" y acumulada en las canchas de la planta piloto.

#### b).- Sistema de Alimentación al Horno

- 1 - Sile de alimentación
- 2 - Faja transportadora # 1
- 3 - Repartidor de materias primas
- 4 - Tolvas de alimentación (carbón, caliza, pellets)
- 5 - Tolvas dosificadoras
- 6 - Faja transportadora # 2
- 7 - Cámara de carga
- 8 - Horno rotatorio

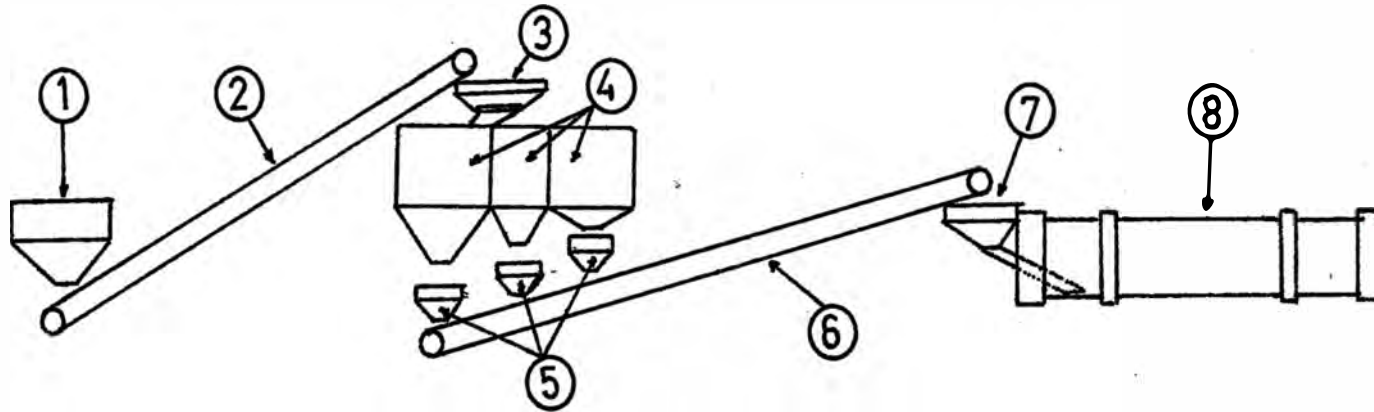


Fig. # 5 : SISTEMA DE ALIMENTACION AL HORNO.

El sistema de alimentación (ver Fig. # 5), consta de un pequeño silo de recepción de las diferentes materias primas, el cual descarga a la faja transportadora # 1 que transporta a cada uno de los materiales y los descarga en sus respectivas tolvas de alimentación. Estas tolvas son 3: de pellets, de coque y de caliza, sus capacidades son de 30, 15 y 10 toneladas respectivamente. Cada una de estas tolvas posee en la descarga, una tolvita pequeña mediante el cual se realiza la alimentación volumétrica (un volumen de material tiene su peso conocido) al horno. Las 3 pequeñas tolvitas descargan a la faja transportadora # 2 que lleva a los materiales a la cámara de carga donde se produce la mezcla. Esta mezcla (pellets + coque + caliza) es introducida dentro del horno por intermedio de un tubo de alimentación de 10" de diámetro.

c).- Horno y Enfriador

El horno como ya se dijo , constituye la unidad principal del proceso. El casco tiene 18.22 m. de longitud y 2 m. de diámetro , su inclinación es de 2% ( 1.88° ), rota sobre 2 llantas y es accionado por un motor de corriente continua de velocidad variable de 0.1 a 0.53 RPM , siendo la velocidad mas usual de 0.3 RPM. También posee otro motor de corriente alterna para casos de cese de energía eléctrica temporal. El casco del horno es ta revestido interiormente con refractario Sílice-Alumi

noso de 7" de espesor, dando un diámetro interior del horno de 1.65 m. aproximadamente.

El horno vacío pesa aproximadamente 80 toneladas , su máxima capacidad es de 15 toneladas. O sea que con carga soporta un peso de 95 toneladas.

Hay un quemador de petróleo en cada cabezal del horno , inicialmente solo había un quemador en el cabezal de descarga del horno , pero para mejorar la zona de reducción , se instaló otro quemador en el cabezal de alimentación del horno. Los 2 quemadores trabajan al mismo tiempo y consumen al rededor de 20 a 25 galones/hora de petróleo Diesel # 2.

A lo largo del horno hay 3 ventiladores axiales que introducen aire a través de tubos de acero inoxidable de 4" de  $\emptyset$  y 1" de espesor y protegidos por revestimiento refractario.

Para la buena operación del horno, es fundamental el control de las temperaturas de la carga sólida y de los gases. La distribución de temperaturas a lo largo del horno, se regula mediante el control de admisión de aire al horno por medio de ventiladores montados sobre la carcasa metálica del horno. Para un mejor control, cada uno está previsto de reguladores manuales.

También a lo largo del horno están distribuidos 6 termopares (4 de cromel-alumel y 2 de platino-rodio). Estos termopares atraviezan sucesivamente la carga y la na

sa de gases durante la rotación del horno y están protegidos por fundas de acero inoxidable de 12" de longitud, y 1/2" de  $\phi$ , 5 anillos deslizantes de 4 secciones c/u y un anillo común de conexión a tierra, transfieren los impulsos de fuerza electromotriz de la termocupla al tablero de control para la regulación. Contactos operados por carretes deslizantes con escobillas de grafito, permiten leer sucesivamente la temperatura de la carga y la de los gases durante la rotación del horno (ver detalles en la Fig. # 6).

En sus extremos de alimentación y descarga, el horno tiene un anillo (dique) de refractario de cierta altura para controlar la capa de materiales sólidos dentro del horno y aumentar el tiempo de retención, a medida que el producto rebosa por sobre el dique en el extremo de la descarga, cae al enfriador rotatorio a través de un shute revestido con refractario y refrigerado interiormente por chaquetas de agua.

El Enfriador es un pequeño horno rotatorio de 7.87 m. de longitud y la 1 m. de  $\phi$ , posee 2 llantas de soporte y es accionado por un motorreductor de 13.8 Kw. La velocidad nominal de rotación es de 0.7 RPM. El enfriador sobre su carcasa posee unas bandejas donde caen unos chorros de agua con un caudal aproximado de 4 m<sup>3</sup>/hr. que es la que justamente enfría la carga. En el interior posee una zona revestido por refractario (2 mts) que es la que recibe la carga caliente a 1,100°C, la otra zona

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 - Chimenea                  | 8 - Tobera de aire secundario |
| 2 - Tubo de alimentación      | 9 - Termopar                  |
| 3 - Dique de alimentación     | 10 - Llanta de soporte        |
| 4 - Dique de descarga         | 11 - Cremallera               |
| 5 - Cabezal de alimentación   | 12 - Quemador de petróleo # 1 |
| 6 - Cabezal de descarga       | 13 - Quemador de petróleo # 2 |
| 7 - Revestimiento refractario | 14 - Shute de descarga        |

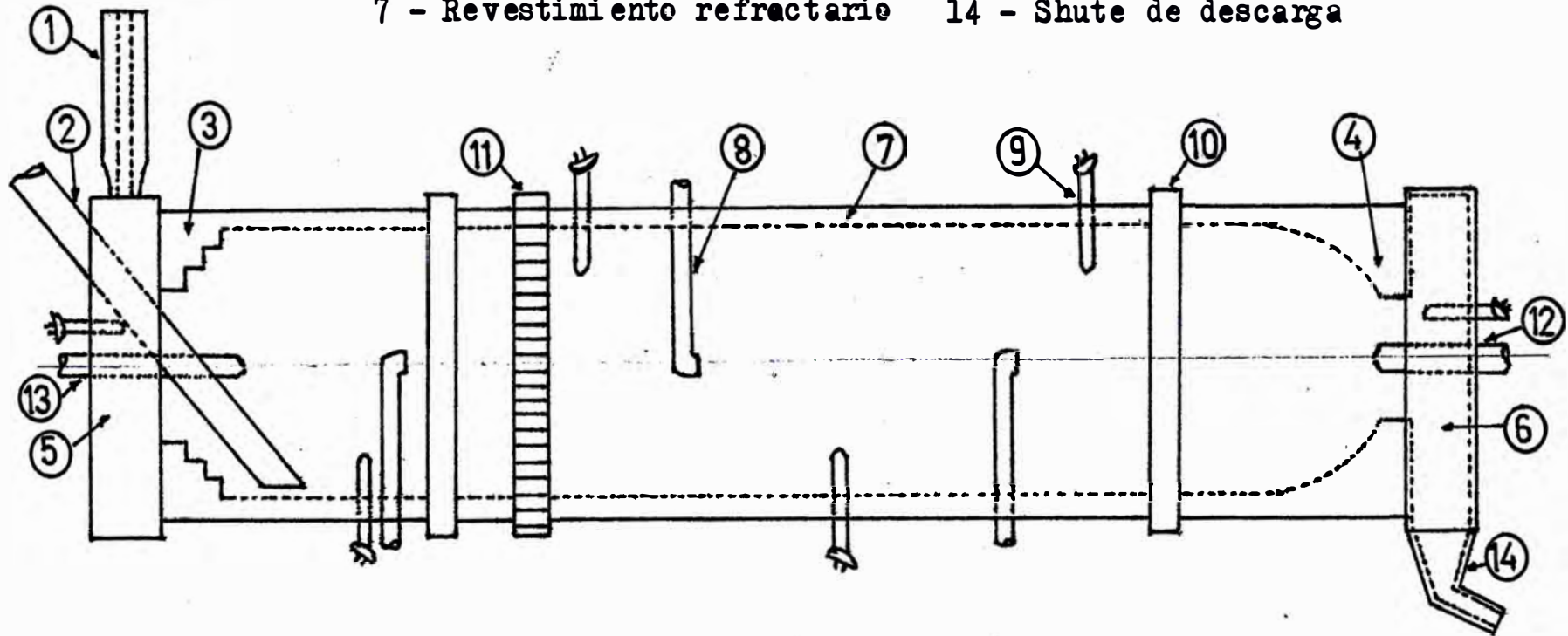


Fig # 6 : HORNO ROTATORIO DE REDUCCION DIRECTA DE SIDERPERU.





- .- Impulsión : motorreductor de 13.8 Kw
- .- Revoluciones : 0.7 RPM.
- .- Agua de refrigeración : 4.0 m<sup>3</sup>/hr.

d).- Clasificación del Producto

El producto sale del enfriador a una temperatura menor que 100<sup>o</sup>C y cae a través de la compuerta de doble péndulo a la faja transportadora # 3 que lo lleva hacia una zaranda vibratoria que lo separa +3 mm. y -3 mm. El producto de +3 mm, cae a otra faja transportadora #4 que lo lleva a una polea magnética que separa al hierro esponja del coque grueso recuperado. El hierro esponja es enviado a la tolva de almacenamiento a través de un elevador de cangilones. El coque recuperado es acumulado en las canchas de almacenamiento para su uso posterior.

El producto -3 mm, que contiene finos de hierro esponja , finos de coque , cenizas , cal , etc, es eliminado. (ver Fig. # 7).

- 1 - Enfriador rotatorio
- 2 - Compuerta doble péndulo
- 3 - Faja transportadora # 3
- 4 - Zaranda vibratoria
- 5 - Evacuación de fines (-3mm)
- 6 - Faja transportadora # 4
- 7 - Polea magnética
- 8 - Producto (Hierro Espenja)
- 9 - Carbón (coque) recuperado

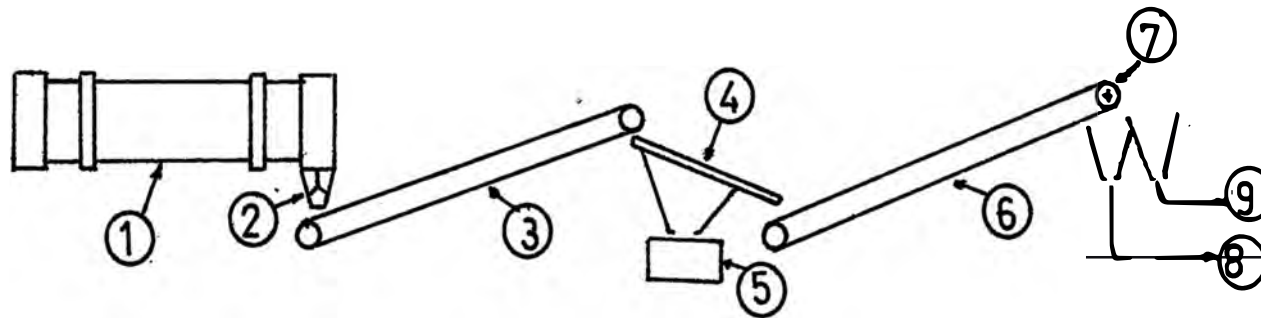


Fig # 7 : CLASIFICACION DEL PRODUCTO.

## CAPITULO IV - EXPERIENCIA OPERACIONAL

### 4.1 - PRUEBAS PRELIMINARES

#### 4.1.1 - Pruebas en Frio

Estas pruebas tuvieron por finalidad , determi  
nar:

##### a) Tiempo de llenado de la carga al horno

Se hicieron varias pruebas para determinar el tiempo que demora en llenarse de carga el horno a diferentes velocidades:

RPM HORNO	TIEMPO DE LLENADO
0.20	9.0 Hrs
0.25	8.5 Hrs
0.30	7.0 Hrs

Tiempos menores que los que corresponden a 0.20 RPM , no son recomendables , por la excesiva demora en el llenado del horno. Tampoco es recomendable , tiem  
pos de llenado mayores a los que corresponden a 0.30 RPM porque lo enfría al horno caliente. Es mas recomendable una velocidad de llenado de 0.25 RPM.

##### b) Tiempo de permanencia de la carga en el inte rior del horno.

Se hicieron varias determinaciones del tiempo de permanencia de la carga en el interior del horno, para distintas velocidades de rotación del horno.

<u>RPM HORNO</u>	<u>TIEMPO DE PERMANENCIA</u>
0.20	12 Hrs
0.25	11 Hrs
0.30	10 Hrs

El tiempo de permanencia mas recomendable es de 10 horas , que es el que corresponde a una velocidad de rotación de 0.3 RPM del horno.

c) Determinación del tonelaje de carga en el interior del horno.

Se hicieron pruebas para distintas relaciones de Coque/Pellet en la carga:

<u>COQUE/PELLETS</u>	<u>TON INT HORNO</u>
1.0/1.0	6.0 t
1.5/1.0	9.0 t
2.0/1.0	12.0 t
2.5/1.0	15.0 t

d) Segregación de la carga en el interior del horno.

Observaciones hechas en el interior del horno para distintas velocidades de rotación del horno y distintas relaciones de Coque/Pellets , determinaron de que en ningún caso se producía separación de la mezcla Coque-Pellets-Caliza. Es decir que la mezcla es homogénea en todas las secciones de la longitud del horno.

#### 4.1.2 Pruebas en Caliente

En caliente se hicieron las siguientes pruebas:

##### a) Determinación del periodo de Calentamiento del horno.

Se determinó el tiempo total de calentamiento necesario hasta obtener un óptimo perfil térmico para empezar a cargar el horno. Es muy importante este, detalle ya que si no se contara con un adecuado perfil térmico , la carga fría que entra al horno descendería las temperaturas del perfil térmico, enfriando al horno y con pocas posibilidades de recuperación.

Es recomendable un tiempo de calentamiento mínimo de 24 horas para obtener un perfil óptimo de carga.

##### b) Determinación del consumo de petróleo

En la práctica se ha determinado que en el periodo de calentamiento , el consumo de petróleo es de 25 a 30 Gal/hr. Luego cuando el horno está en producción normal el consumo es de 20 a 25 Gal/hr.

##### c) Determinación del perfil térmico de producción

Se determinó un perfil óptimo de producción de hierro esponja , obteniendose rangos de temperaturas adecuadas para cada termopar que se encuentra a lo largo del horno (ver Fig. # 6).

Dichos rangos son:

<u>TERMOPAR</u>	<u>RANGO T°C</u>
1	700 - 800
2	700 - 750
3	800 - 900
4	950 -1000
5	1050 -1100
6	900 -1000

En la Fig. # 8 se presenta el perfil térmico del horno.

Considerando que a los 800°C empieza la reacción de los materiales en el interior del horno , se delimita las 2 zonas principales del proceso: zona de calentamiento y zona de reducción.

d) Velocidad de rotación del horno mas recomendable.

Las velocidades de rotación del horno mas recomendable son las comprendidas entre 0.2 a 0.3 RPM.

#### 4.1.3- Ensayos de Producción

Con la ayuda de los ensayos antes referidos, se empezó a efectuar los ensayos de producción de hierro esponja , usando distintas relaciones de carga ( Coque/Pellets ).

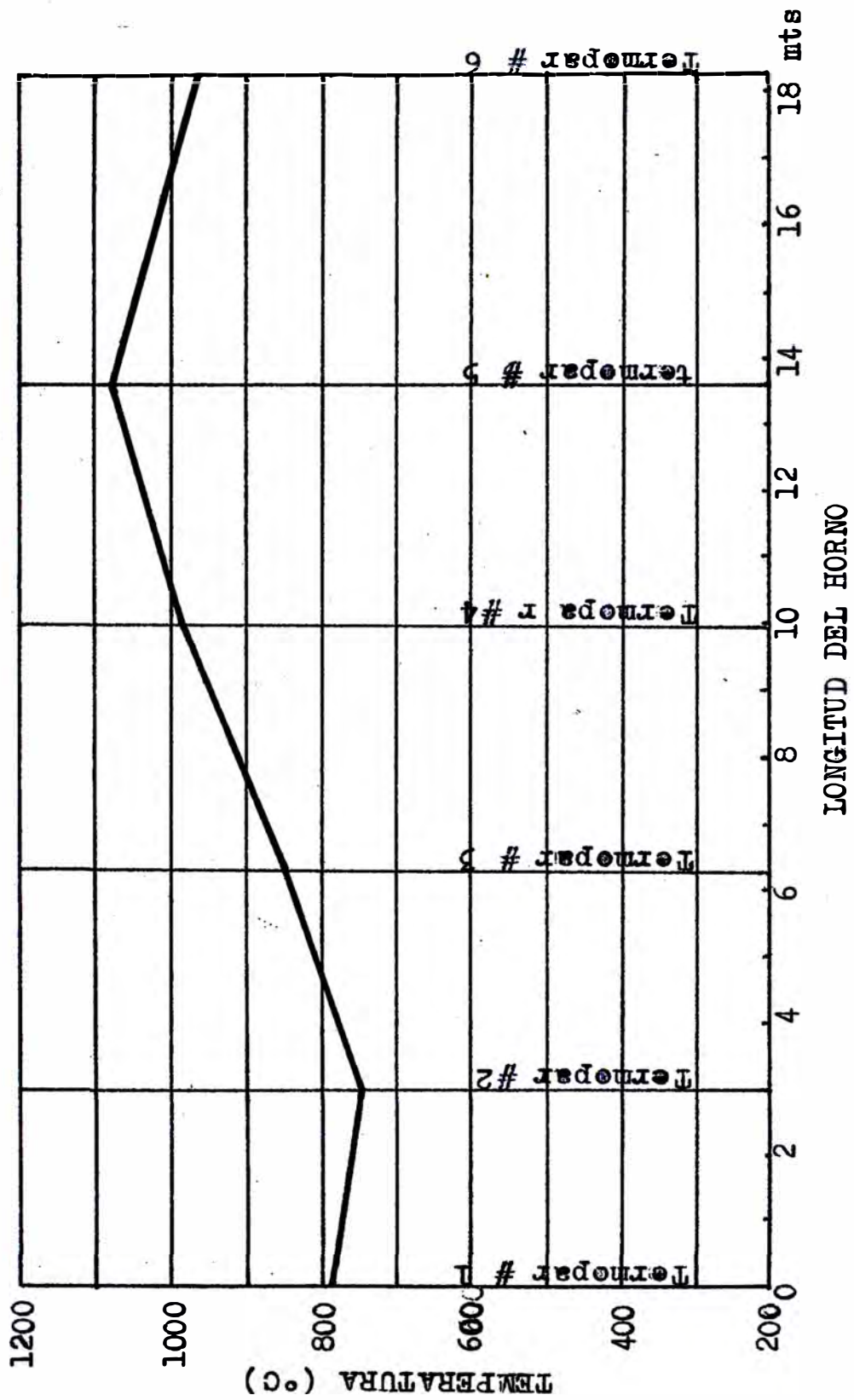
Coque/Pellets Velc. horno Metz. prom. Producción (ton/D)

1.0/1

0.3

96%

9.0



**Fig # 8 : PERFIL TERMICO DEL HORNO .**

1.5/1	0.3	93%	10.5
2.0/1	"	90%	12.0
2.5/1	"	84%	13.0

Llegandose a determinar que la relación Coque/Pe\_ llets = 2.0/1 es la mas recomendable ya que da una produccion mas homogénea y con una buena metalización del producto.

#### 4.2 - RESULTADOS EXPERIMENTALES

Desde Mayo de 1,976 hasta la fecha, se han realizado 18 campañas experimentales, cuyas duraciones han variado desde 2 a 42 dias. De las 4 primeras campañas prácticamente no se sacó ninguna conclusión porque fueron demasiado cortas. La quinta campaña de 8 dias de duración, se dedicó fundamentalmente a comprobar la linea de flujo en operación continua, produciendose frecuentes interrupciones y lograndose estabilizar en los 4 últimos dias. El temor a la formación de anillos y encostramientos nos aconsejó un incremento prudente del perfil térmico. Durante las 10 primeras campañas, el horno rotaba a 0.2 RPM. y un diámetro de descarga de 0.90 mts: en las siguientes campañas, se redujo el diámetro de descarga a 0.80 mts. y la velocidad del horno se incrementó a 0.3 RPM, lograndose una mayor producción.

Al principio tuvimos continuas formaciones de anillo e incrustaciones en las paredes del horno, especialmente en la zona de reducción y muy cerca de la descarga



ésto se debía principalmente a que estabamos alimentando el coque con excesiva cantidad de finos ( polvo ), lo mismo que la caliza. Esto se corrigió mediante el zarandeo para eliminar gran parte del polvo de coque y de la caliza antes de alimentar al horno.

El hecho de atomizar el petróleo sobre la masa incandescente a poca distancia de la boca de descarga , presenta el inconveniente de que parte del azufre que entra por esa via , se fije en el producto si el exceso de caliza no es suficiente para evitarlo. Sin embargo este hecho tiene la ventaja porque aumenta ligeramente el carbono en el hierro esponja.

Las temperaturas máximas de operación son generalmente de 1050 a 1100<sup>o</sup>C, pero cuando suben hasta 1150, los granos de hierro esponjoso aumentan su densidad perdiendo el aspecto poroso y creando una coraza externa mas compacta , de espesor variable que dificulta su degradación y su reoxidación. Este es un producto ideal, para la exportación. Sin embargo producir ésto es arriesgado porque la elevada temperatura hace pastoso el producto y esto puede ocasionar encostramiento en las paredes del horno y boca de descarga.

El diseño adecuado de toberas para la inyección de aire secundario es muy importante para la marcha normal del proceso. La dosificación adecuada del aire secundario determina el régimen térmico y por ende el grado y velocidad de reducción. Un diseño inadecuado que ,

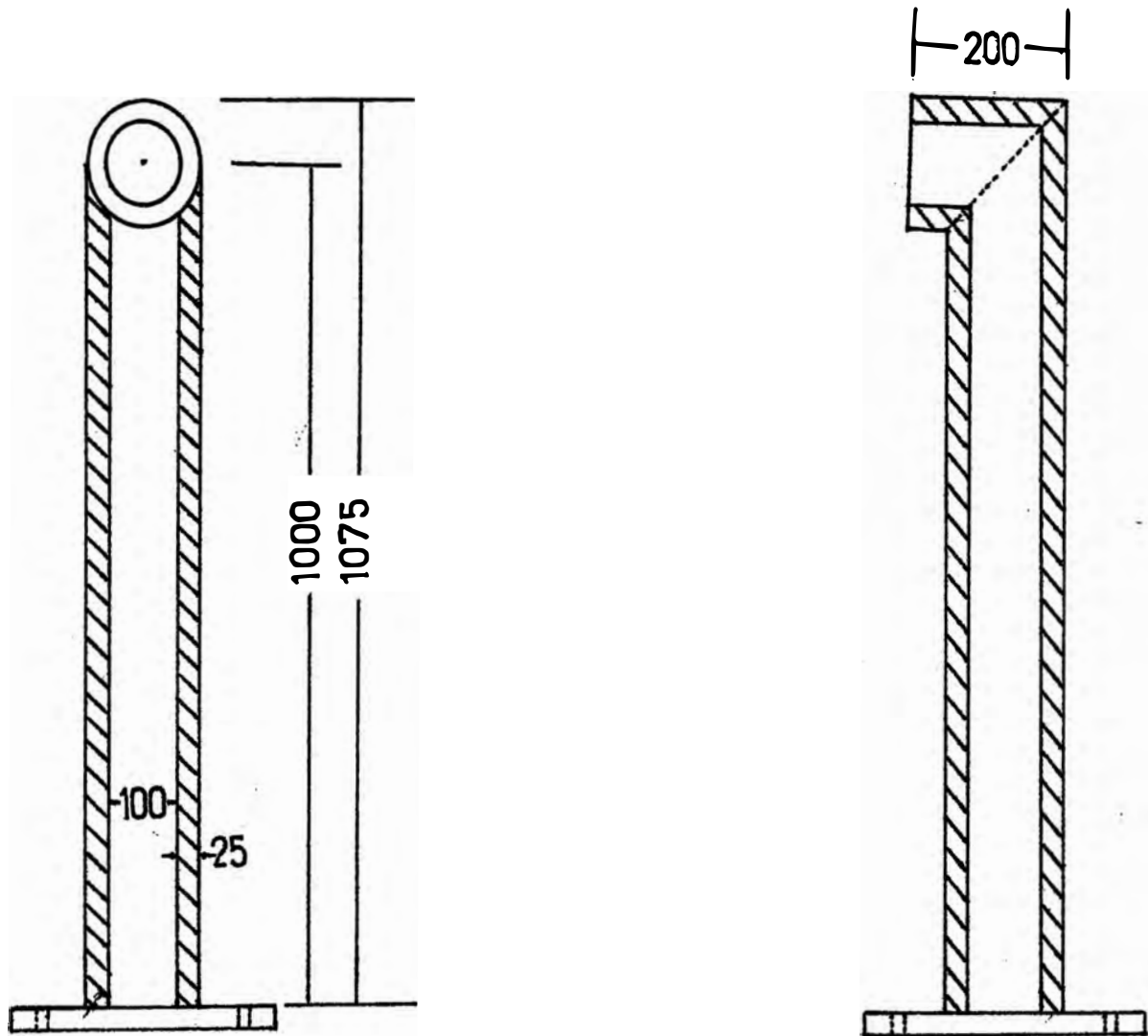


Fig # 9 TOBERA DE AIRE SECUNDARIO.

dirija el aire contra la pared del horno dará lugar a un sobrecalentamiento en la zona y la consecuente formación de costra. Una buena operación se logra usando toberas , del tipo que se muestran en el diseño de la Fig. # 9 y que trabaja en contracorriente con el flujo de la carga.

Nuestro principal problema constituía la descarga del producto del horno hacia el enfriador , a través de un shute el cual constantemente se encostraba con el material incandescente que fluye por ella , provocando atoros continuos que en la mayoría de las veces ocasionaba la parada de la planta. Este inconveniente se solucionó diseñado un nuevo shute en forma de chaqueta refrigerada por agua , a través del cual la descarga del horno fluye por gravedad cayendo sin problema hacia el enfriador.

#### 4.2.1 Usando Coque como Reductor

La mayoría de las pruebas de reducción en la planta piloto , se han hecho con polvo de Coque. Este reductor por su homogeneidad en su composición y granulometría y sobre todo por su abundancia en SIDERPERU como desechos del alto horno, representa un agente reductor mas ideal para la Reducción Directa , a pesar de que su reactividad es inferior al de las antracitas.

La experiencia demuestra de que usando coque como reductor , el proceso es mas versátil, las operaciones se simplifican, las variables son mas fáciles de con

trolar y el producto obtenido tiene una metalización mas homogénea. De tal manera , que para empezar cualquier prueba con antracitas , hay que adecuar el proceso iniciando con coque.

#### 4.2.2 - Usando Antracita como Reductor

A partir de la campaña # 12 se empezaron las pruebas con antracitas de Caraz (Ancash). Las primeras pruebas dieron resultados desalentadores, pero con un adecuado control de las variables , velocidad lenta del horno, perfil térmico con temperaturas altas, relación C/Fe cerca a uno: dieron resultados satisfactorios y una vez normalizado todo , se podía operar en forma similar que con los finos de coque. Los pellets metalizados así obtenidos resultaron con metalización similar , algo mas carburos y mas resaltante de estas pruebas consiste en que el consumo de petróleo bajó considerablemente como consecuencia del mayor contenido de materias volátiles y la mayor reactividad de la antracita.

#### 4.2.3 - Con Pellets ácidos, pellets de baja sílice y pellets básicos.

Durante las campañas # 14,15 y 16, se hicieron pruebas de reducción de pellets básicos ( ver características en 2.1.1 ) con polvo de coque y antracita , los resultados fueron muy satisfactorio en ambos casos, la única diferencia estriba en que con el coque los pellets

metalizados salían con mayor hinchamiento y por lo tanto con mayor agrietamientos en su superficie. En cambio con la antracita salían de tamaño algo reducido , mucho mas compactos y de superficie lisa.

A partir de la campaña # 16, se están utilizando los pellets de baja sílice, que son los mas adecuados para la Reducción Directa por su bajo contenido de ganga y su mayor contenido de fierro (67.5%). Se han hecho pruebas tanto con coque como con antracita , los resultados que se están obteniendo son mucho mejores porque se obtiene un buen producto cuya metalización no disminuye del 90% y sobre todo se puede operar la planta durante periodos mas prolongados (campañas de larga duración). A continuación se resume el periodo de duración de las 18 campañas realizadas hasta la fecha (Agosto 1, 1978):

<u>CAMPAÑA #</u>	<u>DURACION</u>	<u>CAMPAÑA #</u>	<u>DURACION</u>
1	5 dias	11	12 dias
2	4 "	12	26 "
3	4 "	13	13 "
4	2 "	14	24 "
5	8 "	15	13 "
6	4 "	16	14 "
7	23 "	17	42 "
8	18 "	18	19 "
9	20 "		
10	31 "		

## CAPITULO V - CONTROLES DE OPERACION

### 5.1 - BALANCE DE MATERIALES

La ecuación general del balance de materiales es:

$$(Pellets + Coque + Caliza) + (Petróleo + Aire) = (Hierro Esponja + Finos Reducidos) + (Coque Recuperado + Finos No Magnético) + (Gases + Polvos).$$

Durante la campaña # 12, se hizo seguimiento durante 4 días consecutivos, reuniendo los datos necesarios para realizar los balances.

La Tabla # 1, muestra las condiciones de la descarga durante esta campaña. Con los datos de la Tabla del 2 al 6 y los ya dado en el estudio de la materia prima (2.1), se completan todos los datos.

En la Tabla # 7 se muestra los elementos del balance de materiales, tomados para 4 días y promediados para 24 horas.

No se ha hecho los balances para el caso de las antracita por continuar las pruebas en la actualidad.

TABLA # 1

#### DESCARGA DEL ENFRIADOR : CAMPAÑA 12

<u>Materiales</u>	<u>Tamaño</u>	<u>% Total</u>	<u>Ton/D</u>	<u>%Fe mag</u>	<u>% Mtz</u>
Pellets Red.(H.E)	+3 mm	69.90	12.00	80.0	90.0
Finos Red. (Mag)	-3 mm	5.66	1.08	39.2	49.0
Coque Recuperado	+3 mm	18.86	3.60	----	----
Finos no mag(cnz. cal,coque,etc).	-3 mm	12.58	2.40	----	----

TABLA # 2

Pellets Reducidos

(Hierro Esponja)

Análisis Químico

Fe<sub>m</sub> : 80.00 %

Fe<sub>t</sub> : 88.00 %

C : 0.08 %

S : 0.05 %

Mtz : 90.00 %

Ganga : 11.87 %

Granulom: +3 mm(100%)

TABLA # 3

Finos Reducidos

(Magnético)

Análisis Químico

Fe<sub>m</sub> : 39.80 %

Fe<sub>t</sub> : 79.75 %

C : 0.34 %

S : 0.50 %

Mtz : 49.80 %

Ganga : 19.31 %

Granulom: -3 mm(100%)

TABLA # 4

Coque Recuperado

Análisis inmediato

CF : 66.0 %

IV : 0.05 %

CHZ : 33.0 %

S : 1.0 %

Granulom: +3 mm(100%)

TABLA # 5

Gases

Análisis Orsat

CO<sub>2</sub> : 20.0 %

CO : 0.5 %

O<sub>2</sub> : 8.0 %

H<sub>2</sub>O : 2.0 %

TABLA # 6

Petróleo Diesel # 2

C : 87.0 %

H : 12.6 %

S : 0.4 %

P.C.: 10928 Kcal/Kg.

TABLA # 7

BALANCE DE MATERIALES : Kgs/24 Hrs.

<u>M. ENTRANTES :</u>	<u>Kgs/24 Hrs</u>	<u>%</u>
Pellets	17,280	14.75
Carbón (Coque)	8,640	7.38
Caliza	940	0.82
Petróleo Diesel # 2	1,440(453 Gal)	1.23
Aire	<u>88,800(68,590m<sup>3</sup>)</u>	<u>75.82</u>
Total	117,120	100.00
 <u>M. SALIENTES</u>		
Hierro Esponja	12,000	10.25
Finos Magnéticos	1,080	0.92
Coque Recuperado	3,600	3.07
Finos no Magnet	2,400	2.05
Gases	95,496(70,608m <sup>3</sup> )	81.54
Folvos (dif)	<u>2,544</u>	<u>2.17</u>
Total	117,120	100.00

5.2 - BALANCE DE ENERGIA

Un análisis de los datos de operación nos muestra el consumo de  $5.5 \times 10^6$  Kcal por tonelada de Hierro Esponja, lo que equivale al consumo de 660 Kg de carbón(Co que) mas 110 Kg (34.6 Gal) de petróleo Diesel # 2. Este valor es alto, pues hay que añadirle la pérdida de carbón no recuperable en la parte no magnética de la descarga (finos). Sin embargo nos sirve de índice de compara



ción para el empleo de carbones de bajo poder calorífico y marcha del horno a baja productividad.

En la Tabla # 8 se muestra un balance de energía correspondiente al balance materiales de la Tabla # 7. El renglón "e", poder calorífico del coque recuperado dependerá en cada caso de las características específicas de las materias primas. De acuerdo con experiencias, la recuperación del orden de 40 a 50% es viable con esquemas de flujo sencillo.

El renglón "f" (pérdidas) obtenido por diferencia es casi 3 veces superior al valor calculado para pérdidas por radiación y convección. Suponemos que una gran parte de la diferencia corresponde al carbón perdido en forma de polvo y gases, que no se han contabilizado, y el resto de desajuste que introducen los métodos de medidas.

El renglón "d" (calor sensible del material no magnético) depende de 2 componentes fundamentales: el exceso de carbón que se utilice y la cantidad de cenizas de carbón. En las condiciones consideradas se empleó una carga de carbón con 10% de exceso sobre la necesaria desde el punto de vista termoquímico.

El renglón "b" (calor sensible de los gases) es alto debido a que al operar el horno con el perfil técnico mostrado en la Fig. # 8, los gases tienen alta temperatura de salida (500 - 600 °C).

**TABLA N° 8**  
**BALANCE DE ENERGIA : GCAL / 24 Hrs.**

	<b>Total 24 Hrs</b>	<b>Por TM Esp.</b>	<b>Por TM Fe</b>	<b>Por TM Pellets</b>	<b>%</b>
<b><u>ENTRADAS :</u></b>					
Coque	57.888	4.426	5.154	3.350	79.29
Petróleo	15.120	1.156	1.346	0.875	20.71
<b>TOTAL</b>	<b>73.008</b>	<b>5.582</b>	<b>6.500</b>	<b>4.225</b>	<b>100.00</b>
<b><u>SALIDAS :</u></b>					
(a) Red. Oxidos	19.750	1.510	1.758	1.143	27.05
(b) C.S. Gases	18.300	1.400	1.630	1.059	25.06
(c) C.S.H. Esp.	2.750	0.210	0.245	0.160	3.77
(d) C.S. No Mag.	2.022	0.154	0.180	0.117	2.77
(e) P.C. Coq. Rec.	25.300	1.934	2.252	1.464	34.65
(f) Pérdidas (Dif)	4.886	0.374	0.435	0.282	6.70
<b>TOTAL</b>	<b>73.008</b>	<b>5.582</b>	<b>6.500</b>	<b>4.225</b>	<b>100.00</b>

De los balances mostrados en las Tablas # 7 y # 8, se deduce que para obtener una tonelada de Hierro Esponja, se requiere:

<u>Materiales</u>	<u>Kg/t H. ESP.</u>
Pellets	1,323
Carbón (coque)	660
Caliza	73
Petróleo Diesel # 2	110 (34.6 Gal)
Aire	6,790 (5,245m <sup>3</sup> )
Energía	5.585 Gcal.

---

### 5.3 - CONTROL DE LAS VARIABLES PREDOMINANTES

Las principales variables que hay que controlar durante la marcha del proceso, para obtener exitosamente el Hierro Esponja, son:

#### 5.3.1 - Perfil técnico

Para asegurar la metalización del producto, debe mantenerse el siguiente rango de temperaturas en los 6 termopares instalados a lo largo del horno rotatorio:

<u>TERMOPAR</u>	<u>RANGO T°C</u>
1	700 - 800
2	700 - 750
3	800 - 850
4	950 -1000
5	1000 -1100
6	950 -1000

---

La adecuación del perfil térmico óptimo se realiza mediante la regulación de los 2 quemadores de petróleo situados en los 2 cabezales del horno y la adecuada dosificación del aire primario y secundario.

### 5.3.2 - Velocidad de rotación del horno

Luego de alcanzar un buen perfil térmico, la velocidad de rotación del horno garantiza su estabilidad. Un incremento exagerado en las RPM. del horno, disminuye notablemente las temperaturas del perfil y por consiguiente disminuye la metalización del producto: y una excesiva disminución de las RPM. , determina la rápida elevación de las temperaturas con el peligro de producirse la fusión del producto en el interior con que normalmente opera el horno piloto de SIDERPERU es de 0.20 a 0.35 RPM siendo 0.30 RPM. la velocidad mas usual.

### 5.3.3 - Tiempo de permanencia de la carga en el interior del horno.

El tiempo de permanencia está dado por la velocidad de rotación del horno. Normalmente a 0.30 RPM, el tiempo de permanencia de carga en el interior del horno es de 10 horas, de las 5 horas corresponden a la permanencia en la zona de reducción.

### 5.3.4 - Dosificación de la alimentación

La alimentación al horno se realiza mediante

pesadas volumétricas. Las tolvas dosificadoras tienen señaladas unas marcas que corresponden a un determinado peso de cada material.

En primer lugar se determina la relación C/Fe con que se va a trabajar y de acuerdo a esto se determina que peso de cada material (carbón/coque y pellets) se va a alimentar:

$$\frac{C}{Fe} = \frac{\% C \times \text{Peso Coque}}{\% Fe \times \text{Peso Pellets}}$$

Se trabaja generalmente con relaciones de:

$$\frac{\text{Pellets}}{\text{Coque}} = \frac{1.5}{1} \text{ y } \frac{2}{1}, \text{ o sea:}$$

$$\frac{\text{Pellets}}{\text{Coque}} = \frac{90}{60} \text{ y } \frac{120 \text{ Kg}}{60 \text{ Kg}}, \text{ C/Fe} = 0.84 \text{ y } 0.63$$

$$\frac{\text{Pellets}}{\text{Caliza}} = \frac{20}{1}, \text{ o sea: } \frac{120 \text{ Kg}}{6 \text{ Kg}}$$

#### 5.4 - CONTROL DE CALIDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO

Al producto obtenido se somete a las siguientes pruebas de control de calidad:

a) Inspección ocular: La experiencia nos ha enseñado a distinguir un producto bien metalizado de otro de baja metalización, para lo cual se considera:

- Aspecto exterior : generalmente agrietada, otras veces bastante compactada y rugosa.

- . Plasticidad : al golpe del martillo debe ser plástico, es decir no debe de ser frágil ni quebradizo.

- . Color interno : al ser partido , las tonalidades que toma un buen producto, va del azul prusia, al dorado y gris. Un producto de baja metalización tiene un aspecto terroso o carbonoso.

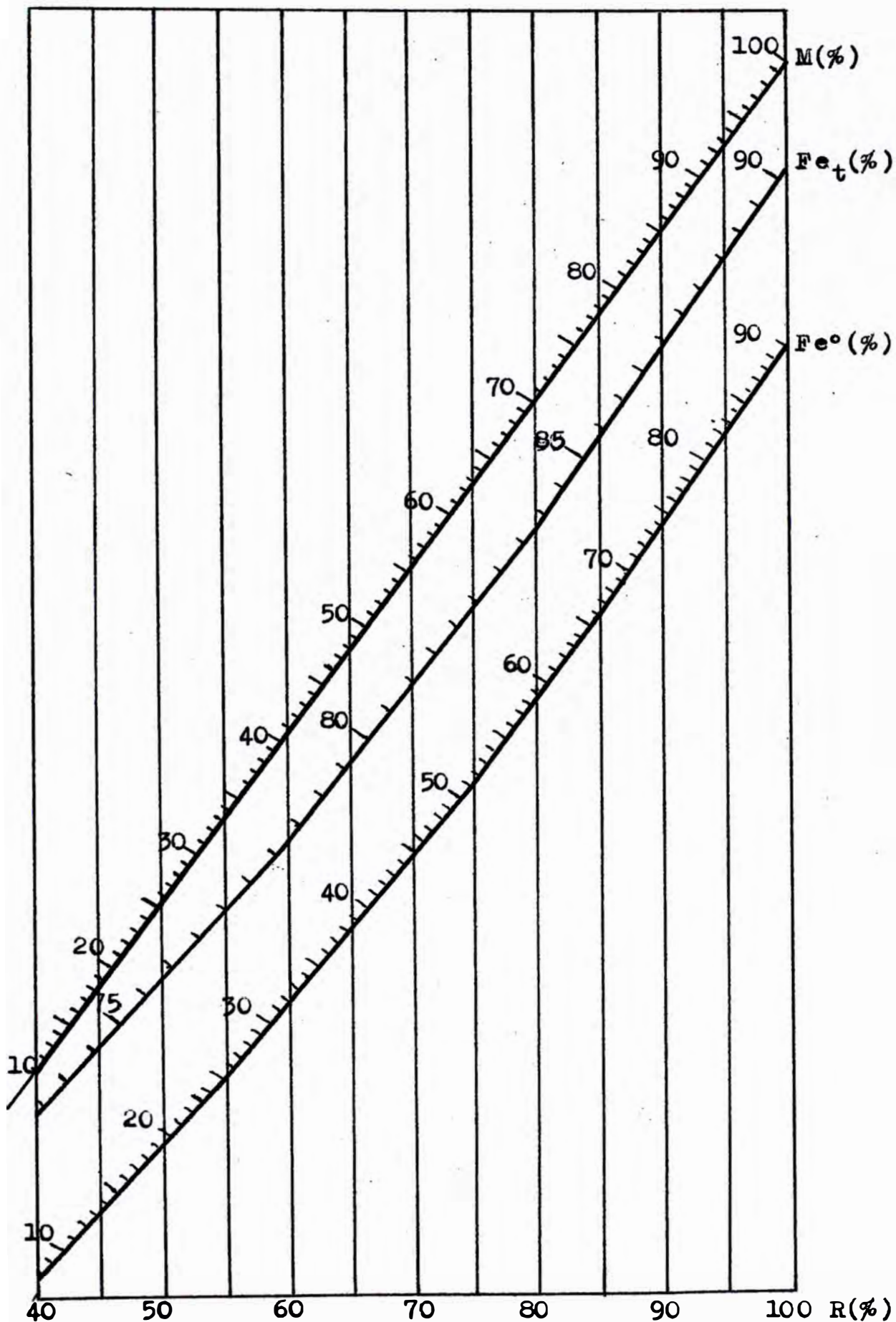
- . Brillo metálico : al esmerilar entero o partido , el producto debe presentar un brillo metálico total.

b) Análisis químico: En el laboratorio se analiza a los compósitos de muestras de cada turno de 8 horas. En ella se determina: el fierro metálico, el fierro total, el % de carbono, de azufre y esporádicamente se analiza por FeO.

En base al % de fierro metálico obtenido, se determina el % de Metalización ploteando unos gráficos ya confeccionados para cada tipo de pellets. (ver Fig. # 10).

c) Pruebas físicas: Esporádicamente se realizan algunas pruebas físicas como: resistencia a la comprensión, volumen aparente, volumen porosidad, volumen real, densidad aparente y densidad real. A continuación se da los - valores promedios:

- Resist compresión : 200 Kg/cm<sup>2</sup>
- Volumen aparente : 7.0 cm<sup>3</sup>
- Volumen porosidad : 3.9 cm<sup>3</sup> (55.7%)
- Volumen real : 3.1 gr/cm<sup>3</sup>
- Densidad aparente : 2.76 gr/cm<sup>3</sup>



**Fig # 10 : RELACIONES EN EL HIERRO ESPONJA  
(BASE : PELLETS DE 65 % Fe)**

- Densidad : 6.15 gr/cm<sup>3</sup>

### 5.5 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL HIERRO ESPONJA.

El hierro esponja producido a partir de los minerales de hierro en trozos o pellets por medio de la reducción en la fase sólida es principalmente el hierro metálico.

Durante la reducción la forma externa de los pellets no cambia, pero la porosidad aumenta considerablemente como consecuencia de la remoción de oxígeno. Por este motivo, los productos de hierro esponja tienen una superficie interna de gran tamaño, lo cual bajo condiciones químicas favorables (oxígeno atmosférico, humedad y aumento de temperatura), puede contribuir a una reoxidación acelerada. Además la estructura porosa tipo esponja, hace que la conductividad térmica sea baja en comparación con otros sólidos.

Las características básicas del hierro esponja, pueden definirse por su grado de metalización, su % de carbono, el tipo y la cantidad de aglutinante, además de la ganga del mineral empleado.

Se puede operar a cualquier metalización. La variación de los distintos niveles de metalización se refleja en la productividad de la planta, la cual aumenta aproximadamente 1.0% por cada punto en la baja de la metalización.

El tipo de aglutinante empleado en los pellets, no



afecta la productividad durante la reducción, sin embargo es preferible el empleo de pellets aglutinados con cal (aglutinante no ácido), pues durante el proceso se disminuirá el consumo de cal y será menor el consumo de energía eléctrica por no tener que fundir el aglutinante además de la cal necesaria para fluidizar la escoria.

Las características básicas que debe reunir el hierro esponja para ser procesado satisfactoriamente en los hornos eléctricos de aceración son:

.- En cuanto a las características físicas, debe tenerse en cuenta los valores dados en el párrafo anterior.

.- En cuanto a las características química, se debe cumplir principalmente lo siguiente:

a) El % de Hierro Metálico no debe ser inferior a 70% para que la metalización no sea menor que 80%.

b) El contenido de carbono debe estar entre 0.5 y 1.0% para que reaccione con el FeO residual produciendo el CO que al burbujear produzca una agitación efectiva del baño, la cual dará una composición homogénea al acero.

c) El contenido de Azufre debe ser inferior a 0.05%, por ser perjudicial en el acero.

CAPITULO VI - ANALISIS, DISCUSION Y CONCLUSIONES PRELIMINARES.

6.1 - ESTUDIO ANALITICO POR CAMPAÑAS

Para el estudio se han considerado las campañas 11 y 12 en las que se operó con pellets normales , polvo de coque y antracita.

6.1.1 - Metodología : Se procedió a la recopilación de datos de las 2 campañas turno por turno, hallandose primero los promedios por cada turno y luego los de cada día. Los datos tomados han sido:

- Alimentación:

- .- Peso de pellets
- .- Peso de coque y/o antracita
- .- Peso de caliza.

- Producto:

- .- Análisis químico de hierro esponja
- .- % de Fe metálico : % Fe<sup>0</sup>
- .- % de Fe total : % Fe<sub>t</sub>
- .- % de carbono : % C
- .- % de azufre : % S
- .- Metalización : M

- Marcha diaria:

- .- Temperatura en termopares:  
T<sub>1</sub> , T<sub>2</sub> , T<sub>3</sub> , T<sub>4</sub> , T<sub>5</sub> , T<sub>6</sub>.

6.1.2 - Antecedentes generales de operación

. - Campaña # 11

a).- Se empleó coque fresco en los 10 primeros días, luego una mezcla de coque fresco con coque recuperado.

b).- Se usó pellets normales (65% Fe)

c).- La duración de la campaña fue de 12 días.

. - Campaña # 12

a).- Se empleó coque fresco durante los 12 primeros días y los 4 últimos días. Durante 10 días consecutivos se empleó antracita de Caraz.

6.1.3 - Cálculos efectuados : Para las 2 campañas:

a).- Determinación de la relación promedio diaria C/Fe.

b).- Determinación de las temperaturas promedio diaria:  $T_1$  ,  $T_2$  ,  $T_3$  ,  $T_4$  ,  $T_5$  y  $T_6$ .

c).- Determinación de la frecuencia y el porcentaje de los cambios de metalización (campaña # 12).

6.1.4 - Tablas y gráficos confeccionados

Las tablas confeccionados son:

a.- Promedios diarios de operación para las 2 campañas : Tabla # 9A y 9B.

b.- Promedios diarios de control de temperaturas para las 2 campañas : Tabla 10A y 10B.

c.- Frecuencia de cambios de metalización: Tabla # 11.

Los gráficos confeccionados son:

.- Para la campaña # 11:

Fig. # 11:

- a) Perfil térmico Vs Metalización
- b) Perfil térmico Vs % C en el hierro esponja
- c) Perfil térmico Vs % S en el hierro esponja
- d) RMI Vs Metalización
- e) Metalización Vs % C en el hierro esponja
- f) Metalización Vs % S en el hierro esponja
- g) C/Fe Vs Metalización.

Fig. # 12:

- a) C/Fe Vs Metalización
- b) C/Fe Vs Perfil térmico
- c) Perfil térmico Vs Metalización
- d) C/Fe Vs % C en el hierro esponja
- e) Ca/Fe Vs % S en el hierro esponja
- f) Metalización Vs % C en el hierro esponja
- g) Metalización Vs % S en el hierro esponja.

Fig. # 13:

- a) Frecuencia Vs Metalización
- b) % Vs Metalización.

TABLA # 9A : PROMEDIOS DIARIOS DE OPERACION

CAMPANA # 11 : (25.05.77 al 05.06.77)

<u>DIA</u>	<u>RPM</u>	<u>%Fe<sup>o</sup></u>	<u>%Fe<sub>t</sub></u>	<u>%C</u>	<u>%S</u>	<u>%M</u>	<u>C/Fe</u>	
25/05	0.20	C A L D E N T A M I E N T O						
26	0.20	Producto de baja calidad						0.84
27	0.20	Producto de baja calidad						0.84
28	0.30	75.80	87.25	0.061	0.045	86.50	0.84	
29	0.30	74.90	87.00	0.068	0.050	86.00	0.76	
30	0.25	76.40	87.35	0.071	0.052	87.14	0.76	
31	0.25	77.08	87.40	0.068	0.050	87.81	0.84	
01/06	0.25	77.20	87.60	0.065	0.048	88.00	0.84	
02	0.30	74.90	87.05	0.073	0.060	86.00	0.76	
03	0.30	70.52	86.20	0.070	0.068	82.10	0.76	
04	0.25	Producto de baja calidad						0.76
05	0.25	E N F R I A M I E N T O						

TABLA # 9B : PROMEDIOS DIARIOS DE CONTROL DE TEMPERATURAS

CAMPAÑA # 11

<u>DIA</u>	<u>T<sub>1</sub></u>	<u>T<sub>2</sub></u>	<u>T<sub>3</sub></u>	<u>T<sub>4</sub></u>	<u>T<sub>5</sub></u>	<u>T<sub>6</sub>(°C)</u>
25	C A L D E N T A M I E N T O					
26	730	700	820	950	1060	970
27	710	700	830	970	1070	980
28	745	715	850	970	1100	990
29	730	730	840	980	1110	990
30	750	720	850	975	1100	990
31	735	730	860	985	1120	1000
01	755	720	855	990	1130	1020
02	740	735	860	985	1110	1010

03	755	745	870	970	1100	1000
04	740	730	850	975	1090	1000
05	720	710	850	970	1080	995
06	E X P E R I M E N T O					

TABLA # 10A : PROMEDIOS DIARIOS DE OPERACION

CAMPANA # 12 : (17.06.77 al 13.07.77)

<u>DIA</u>	<u>RPI</u>	<u>%Fe<sup>o</sup></u>	<u>%Fe<sub>t</sub></u>	<u>%C</u>	<u>%S</u>	<u>%M</u>	<u>C/Fe</u>	<u>Ca/Fe</u>
17		C A L D E M E T A L I Z A C I O N						
18	0.20	Producto de baja metalización						
19	0.25	75.14	87.10	0.052	0.040	85.60	0.99	0.049
20	0.25	76.76	87.45	0.061	0.040	87.56	0.99	0.049
21	0.25	80.88	88.30	0.070	0.031	91.25	0.84	0.041
22	0.25	81.13	88.35	0.062	0.032	91.40	0.84	0.041
23	0.30	80.12	88.00	0.051	0.028	90.50	0.84	0.041
24	0.30	80.40	88.20	0.045	0.024	91.00	0.84	0.041
25	0.30	83.06	88.70	0.060	0.027	93.21	0.76	0.037
26	0.30	82.86	88.60	0.066	0.036	93.00	0.76	0.037
27	0.30	81.20	88.40	0.052	0.029	91.45	0.76	0.037
28	0.25	82.46	88.50	0.060	0.035	92.75	0.76	0.037
29	0.25	81.82	88.47	0.056	0.036	92.12	0.63	0.030
30	0.25	67.06	85.51	0.066	0.076	78.83	0.63	0.030
01	0.25	64.86	85.00	0.063	0.067	76.60	0.63	0.030
02	0.25	65.13	85.17	0.070	0.054	77.00	0.63	0.030
03	0.25	68.31	85.65	0.074	0.059	80.00	0.63	0.030

04	0.25	66.42	85.38	0.069	0.080	78.00	0.63	0.030
05	0.25	67.41	85.62	0.062	0.087	79.10	0.63	0.030
06	0.25	64.58	85.00	0.067	0.071	76.10	0.63	0.030
07	0.25	65.93	85.32	0.060	0.083	77.75	0.63	0.030
08	0.25	67.90	85.74	0.058	0.083	79.25	0.63	0.030
09	0.20	65.63	85.30	0.075	0.084	77.23	0.84	0.041
10	0.20	73.07	86.54	0.036	0.039	84.30	0.84	0.041
11	0.25	80.02	88.18	0.046	0.037	90.06	0.84	0.041
12	0.25	77.84	87.22	0.055	0.044	88.46	0.84	0.041

TABLA # 10B : PROMEDIOS DIARIOS DE CONTROL DE TEMPERATURAS

RAS CAMPAÑA # 12:

<u>DIA</u>	<u>T<sub>1</sub></u>	<u>T<sub>2</sub></u>	<u>T<sub>3</sub></u>	<u>T<sub>4</sub></u>	<u>T<sub>5</sub></u>	<u>T<sub>6</sub> (°C)</u>
18	720	700	810	960	1050	980
19	710	700	820	965	1070	1000
20	730	710	840	970	1080	1020
21	725	715	850	980	1100	1020
22	730	720	860	990	1110	1020
23	720	710	840	980	1090	1000
24	720	715	840	980	1095	1010
25	730	720	860	980	1095	1010
26	720	710	845	990	1090	1000
27	720	710	850	980	1095	1000
28	725	710	850	980	1095	1000
29	710	700	840	980	1090	1010

30	695	650	800	950	1060	1025
01	680	660	780	920	1035	1050
02	660	650	780	900	1020	1050
03	670	660	780	910	1000	1060
04	680	660	790	900	990	1060
05	660	650	780	890	980	1070
06	680	660	770	880	970	1060
07	690	650	780	880	980	1060
08	680	660	780	880	980	1060
09	680	660	785	880	980	1060
10	710	690	800	910	1000	1035
11	720	710	820	935	1030	1010
12	730	720	830	950	1060	1010

TABLA # 11 : FRECUENCIA DE CAMBIOS DE METALIZACION

METALIZACION	Frecuencia			%		
	Coque	Antrac	Total	Coque	Antrac	Total
Hasta - 80	2	14	16	2.86	20.00	22.86
80 - 85	4	5	9	5.71	7.14	12.85
85 - 90	7	7	14	10.00	10.00	20.00
90 - 95	27	3	30	38.57	4.29	42.86
95 -100	1	0	1	1.43	0.00	1.43
	41	29	70	58.57	41.43	100.00

## 6.2 - ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

### 6.2.1 - CAMPAÑA # 11 : Fig. # 11

#### a) Perfil térmico Vs Metalización



En relación a las temperaturas  $T_4$ ,  $T_5$  y  $T_6$ , se aprecia que trabajando a temperaturas aproximadas a 980, 1120 y 1010 °C respectivamente, se obtiene una metalización sobre 86% (Días : 30, 31, 01 y 02).

Un descenso en dichas temperaturas origina un descenso en la metalización del producto. (Días : 02, 03 y 04).

b) Perfil térmico Vs % C en el hierro esponja

Un descenso en las temperaturas  $T_4$ ,  $T_5$  y  $T_6$ , origina un incremento del % C en el hierro esponja. (Días : 30, 02 y 03). Un incremento en dichas temperaturas, origina un descenso del % C. (Días : 28, 01 y 02).

c) Perfil térmico Vs % S en el hierro esponja

El comportamiento del % S con respecto al perfil térmico es similar al del % C.

d) RPM horno Vs Metalización

El incremento de las RPM del horno, origina un descenso en la metalización del producto ya que origina también un descenso en las temperaturas del perfil térmico. (Días : 28, 29, 02, 03 y 04).

e) Metalización Vs % C en el hierro esponja

En la figura se observa de que hay una tendencia a incrementarse el % C en el hierro esponja, al disminuir la metalización. (Días : 29, 02 y 03).

Al aumentar la metalización, disminuye el % C en el hierro esponja. (Días : 30, 31 y 01).

f) Metalización Vs % S en el hierro esponja

Mientras aumenta la metalización , disminuye el % S en el hierro esponja.(Dias : 30,31,01) y viceversa (Dias : 02 y 03).

g) C/Fe Vs Metalización

Un descenso de la relación C/Fe origina un descenso la metalización (Dias : 29,30,02 y 03).

Un incremento de la relación, origina un incremento de la metalización (Dias : 30 y 31).

6.2.2 - Campaña # 12 : Fig. # 12

a) C/Fe Vs Metalización

Una disminución de la relación C/Fe, ocasiona un descenso en la metalización, ocurriendo éste tanto con el coque como con la antracita usados como reductor (Dias : del 29 al 08,11 y 12).

El incremento de la relación C/Fe, aumenta la metalización (Dias : del 25 al 28,09 y 10).

b) C/Fe Vs Perfil térmico

Un descenso de la relación C/Fe, origina un descenso de las temperaturas  $T_4$  y  $T_5$  del perfil térmico, siendo el comportamiento mas uniforme al usar el coque como reductor.

c) Perfil térmico Vs Metalización

Al incrementar las temperaturas del perfil térmico se incrementa la metalización y viceversa ( con ambos reductores ).

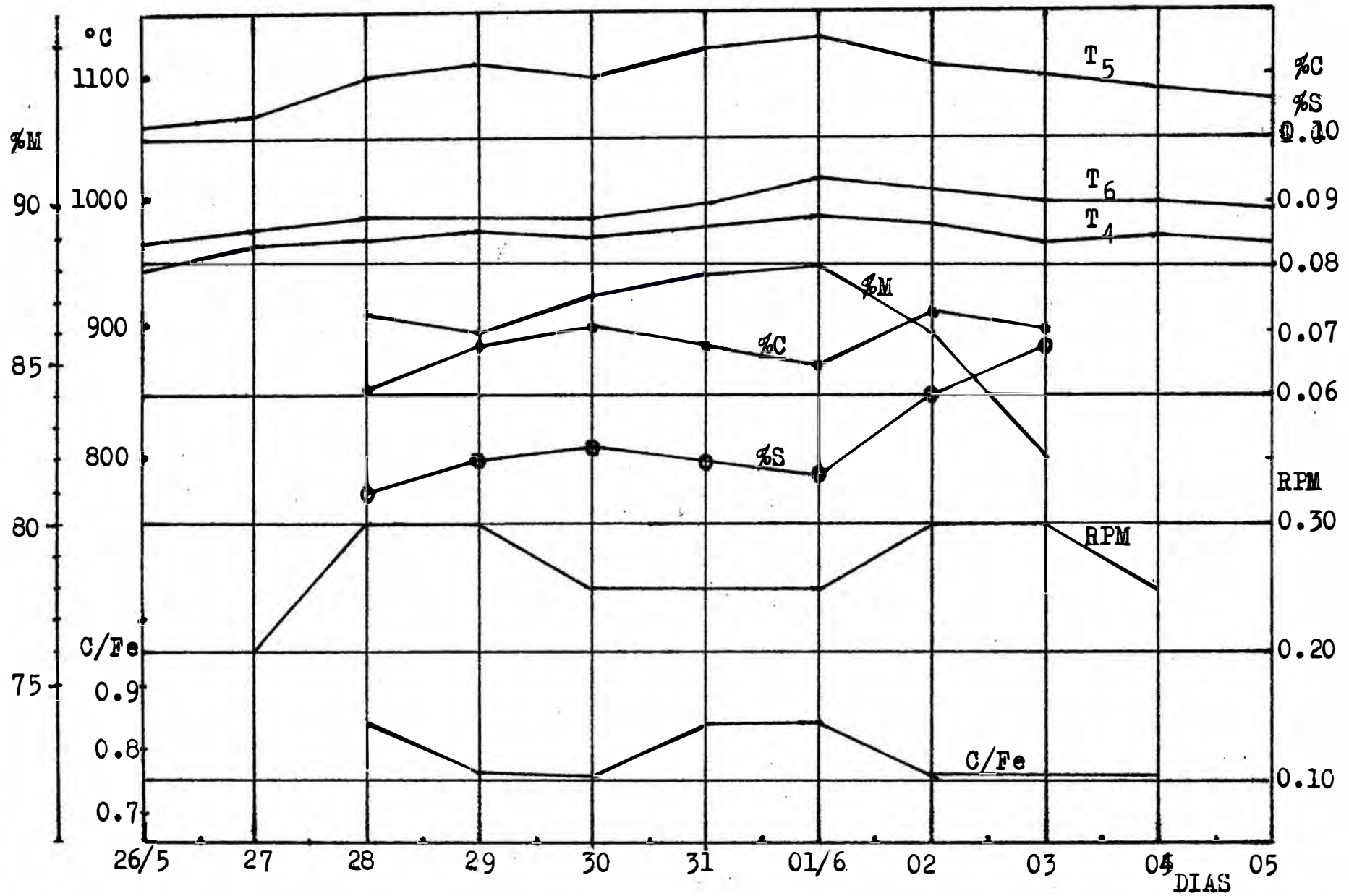


Fig # 11 : GRAFICOS CAMPAÑA # 11

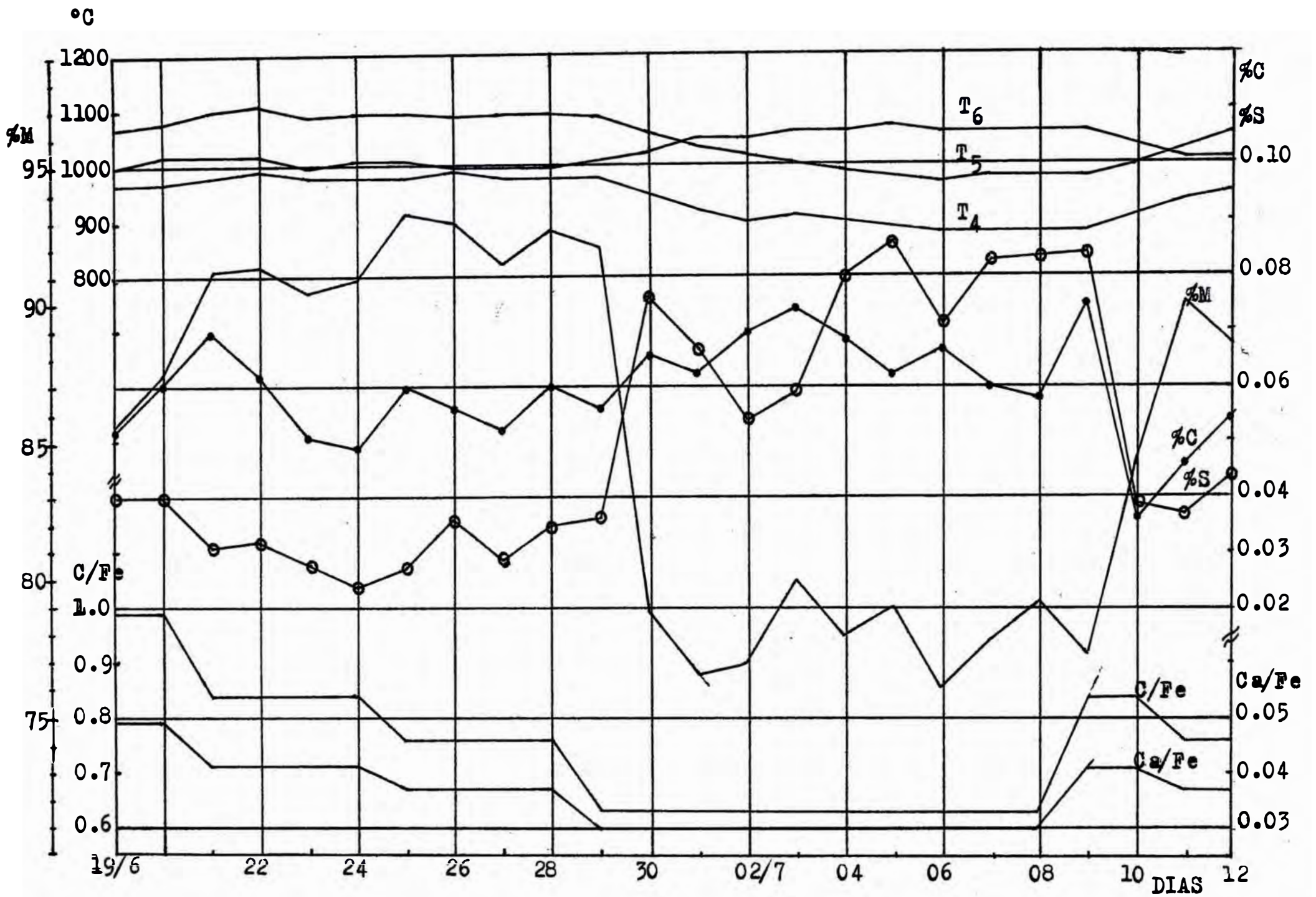
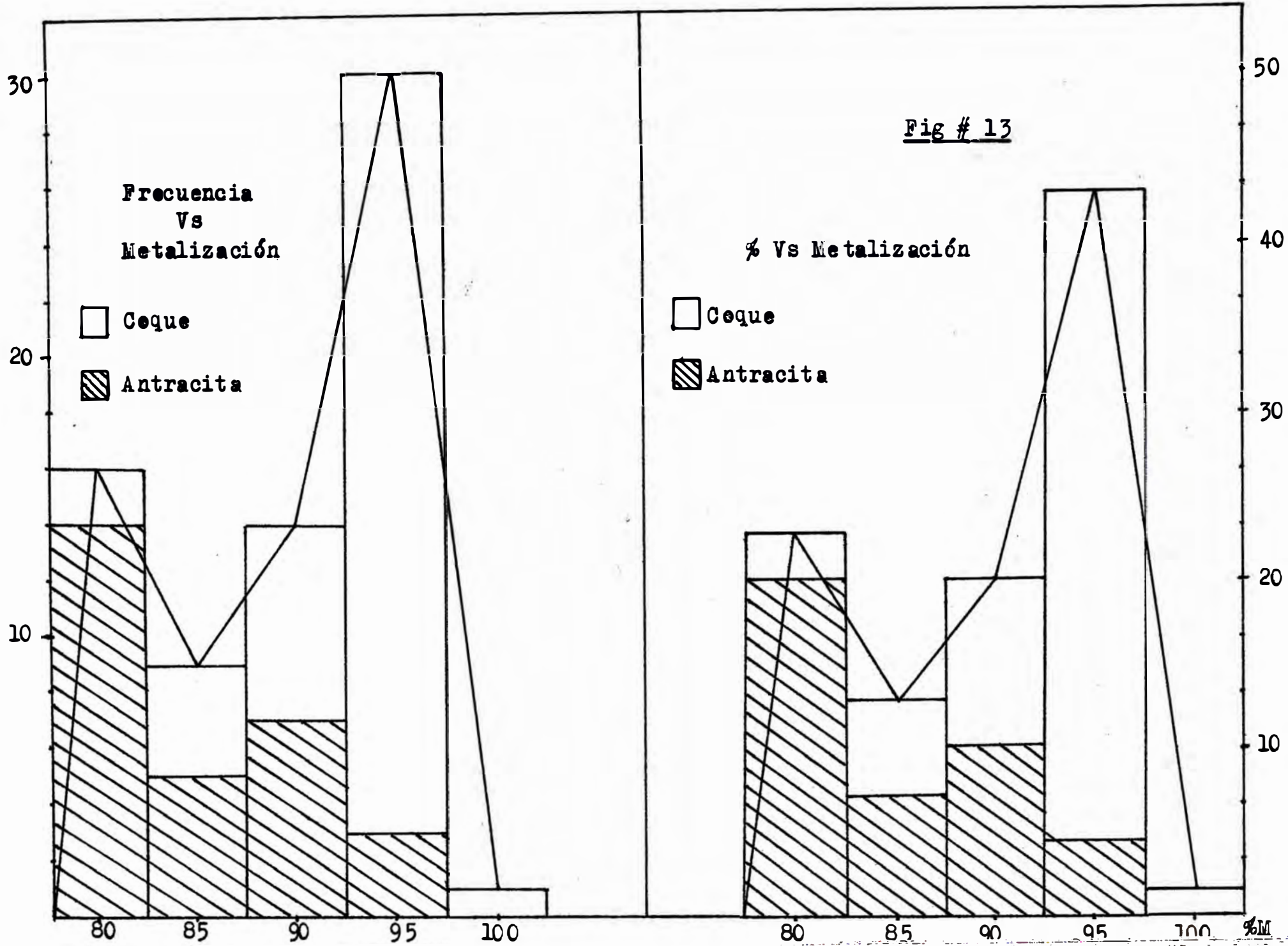


Fig # 12 : GRAFICOS CAMPAÑA # 12



d) C/Fe Vs % C en el hierro esponja

No hay una relación lógica entre estas 2 variables como aparentemente se puede pensar.

e) C/Fe Vs % S en el hierro esponja

Una disminución en la relación Ca/Fe, origina un aumento en % S en el hierro esponja (Dias : 30,31, del 01 al 08) y un aumento en la relación , disminuye el % S en el hierro esponja (Dias : 10,11 y 12).

f) Metalización Vs % C en el hierro esponja

Cuando la metalización disminuye , el % C en el hierro esponja tiende a aumentar (Dias : 30,02,03,04,06, y 09) y viceversa (Dias : 25,26,28,11 y 12).

g) Metalización Vs % S en el hierro esponja

Al disminuir la metalización , aumenta el % S en el hierro esponja (Dias : 30,01,04,05,07 y 08) y viceversa (Dias : del 21 al 29 y 10,11 y 12). Este ocurre con ambos reductores.

Fig. # 13

a) Frecuencia de cambios de metalización

De las condiciones de operación citadas, se aprecia que de 70 muestras estudiadas, 30 ( 43% ) han tenido una metalización superior al 90%, siendo 27 correspondientes a coque y 3 a la antracita; 14 ( 20% ) han tenido una metalización entre 85 y 90% , correspondiendo 7 a cada uno de los reductores. Se han presentado 16 ( 23% ) muestras

con metalización inferior al 80%, correspondiendo 14 a la antracita.

### 6.3 - CONCLUSIONES PRELIMINARES

Luego de analizar las diferentes variables es de las 2 campañas estudiadas, se ha llegado a las siguientes conclusiones preliminares:

1) Las temperaturas  $T_4$ ,  $T_5$  y  $T_6$  del perfil térmico, son los que dominan el proceso por estar ubicados en la zona de reducción del horno. Los demás puntos del perfil térmico desempeñan un papel complementario.

2) Hay una tendencia de mayor metalización a mayor temperatura de los  $T_4$ ,  $T_5$  y  $T_6$  del perfil térmico.

3) A bajas temperaturas del perfil térmico, hay mayor captación de carbono y azufre del hierro esponja.

4) La velocidad de rotación del horno se comporta en forma inversamente proporcional con la metalización y el perfil térmico.

5) La menor velocidad de rotación del horno, incrementa la permanencia de la carga en su interior y por lo tanto aumenta su metalización; pero esto repercute en la productividad de la planta, la cual disminuye.

6) La metalización tiene una relación inversamente proporcional con el % C y el % S en el hierro esponja.

7) El carbono y el azufre en el hierro esponja tienen un comportamiento casi paralelo.

8) La relación C/Fe de la alimentación, influye en fer

ma directamente proporcional al perfil térmico y a la metalización del producto.

9) La relación  $Ca/Fe$  de la alimentación, influye en forma inversamente proporcional al % S en el hierro esponja.

10) El hierro metálico ( $Fe^{\ominus}$ ) y el hierro total ( $Fe_t$ ) se comportan en forma directamente proporcional a la metalización del producto. Tienen un comportamiento paralelo.

11) Con respecto a la antracita, por ser la primera vez que se usa como reductor, los resultados no han sido tan alagadores, principalmente por haber trabajado a baja relación C/Fe (0.63).



## CAPITULO VII - EVALUACION TECNICO ECONOMICA

El mineral de hierro pelletizado procedente de Marcona (Ica) con un análisis de 67.5% Fe, es transportado por via marítima hasta el puerto de Chimbote y su costo asciende a 1,724 soles la TM puesta en planta. Su consumo está en el orden de 1,300 a 1,400 Kg por TM de hierro esponja.

Los fines de coque ( polvo ) que son los descartes del coque que se usa en el alto horno y que es de procedencia europea, se ha considerado a 600 soles la TM ( costo simbólico ). Su consumo está entre 500 a 600 Kg por TM del hierro esponja.

La antracita procedente de Caraz tiene un costo de 2,914 soles la TM puesta en planta y su consumo es similar al del polvo de coque.

La caliza fina no tiene precio por ser el descarte de la planta de cal. Su costo simbólico está encuadrado dentro de los gastos de transporte dentro de la planta.

El petróleo Diesel # 2 que se usa , tiene un precio de 37 soles el galón y la cantidad empleada puede variar se entre el 15 a 20% de la energía térmica , sin alterar el balance.

Se considera que, como promedio, el refractario del horno operando normalmente debe ser renovado totalmente cada 2 años, para ello se asigna 300 soles per TM de producto.

La fuerza de trabajo requerida para la operación según se desglosa en la Tabla # 12, responde a la experiencia probada en la planta, para garantizar la operación continúe, en aquellos cargos que trabajan 3 turnos, se consideran 4 plazas.

El consumo de energía eléctrica es de 62 Kw-hr por TM de hierro esponja, cuyo costo promedio resulta 4.05 soles por Kw-hr; aunque en realidad el costo de la energía reactiva, su costo de la energía activa es de 2.275 soles el Kw-hr, al considerar el consumo total con la energía reactiva, su costo se incrementa.

El agua necesaria para el enfriador es de  $8m^3$  por TM de hierro esponja, el consumo por evaporación es aproximadamente el 5%, el cual no influye en el costo, por lo que no se ha considerado en los cálculos de costos.

En el renglón mantenimiento está incluido el mantenimiento mecánico, eléctrico, lubricación, talleres y repuestos. Gran parte de estos trabajos lo realiza el personal de la misma planta.

Lo concerniente a transporte, se refiere al traslado de las materias primas y producto dentro de la misma planta, la que se realiza en volquetes. También se incluye el uso de un cargador frontal con la que se realiza el carguío de las tolvas de alimentación.

En el renglón otros gastos se incluye gastos por utilidades de oficina, de limpieza, etc.

**TABLA N° 12**

**COSTOS DE OPERACION : MANO DE OBRA**

( En Soles )

<u>CARGO</u>	<u>TORNOS</u>	<u>HOMBRES</u>	<u>SUELDO BASICO</u>	<u>BONIFICA CIONES</u>	<u>RESERVAS Y LEYES SOC.</u>	<u>T O T A L</u>
Jefe de Turno	3	4	34,500	4,000	22,000	342,000
Ofici nista	1	1	14,000	4,000	10,000	28,000
Analista	3	4	12,500	2,600	7,700	91,200
Tablerista	3	4	11,910	2,600	7,200	86,840
Hornero	3	4	11,310	2,600	6,950	83,440
Alimentador	3	10	11,310	2,600	6,950	208,600
Descargador	3	6	10,710	2,600	6,700	120,060
<b>TOTAL</b>						<b>860,140</b>

Total Mano de Obra : S/. 860,140.00 / mes

Por TM de Hierro Espona : S/. 860,140 / 360 = 2,390.00

## 7.1 - COSTOS DE PRODUCCION

En la Tabla # 13 se resume los costos de producción.

Los cálculos se han hecho para la producción de una TM de hierro esponja. En la evaluación técnico económica se ha hecho una explicación detallada de cada uno de los renglones de la referida tabla.

Cabe aclarar de que los cálculos de costos se han efectuado en el mes de Agosto de 1,978 y que la inestabilidad económica del país hace variar constantemente los costos.

El costo resultante para la producción de una TM de hierro esponja es 7,393 soles. Este valor es sumamente bajo en comparación con el costo de la chatarra importada inclusive es menor que el costo de una tonelada de chatarra nacional.

TABLA # 13

### COSTOS DE PRODUCCION

(soles/TM de hierro esponja)

<u>DESCRIPCION</u>	<u>UNID.</u>	<u>COSTO U.</u>	<u>UNID/TM</u>	<u>COST/TM.H.E.</u>	<u>%</u>
<u>MAT.D.CARGA</u>					
Pellets	TM	1,724.	1.32	2,276.	30.78
Polvo Coque	TM	600.	0.66	396.	5.36
Caliza	TM	000.	0.07	000.	0.00
<u>COST.D.OPER.</u>					

Petróleo	Gal	37.	34.60	1,280.	17.31
Refractarios				300.	4.06
Mano de obra	Hr/h			2,390.	32.33
Energ. Elect.	Kw-hr	4.05	62.00	251.	3.40
Mantenimiento				200.	2.70
Transportes				270.	3.65
Otros gastos				<u>30.</u>	<u>0.41</u>
<b>TOTAL</b>				<b>7,393.</b>	<b>100.00</b>

## 7.2 - EJECUCION PRESUPUESTAL DEL PROYECTO HIERRO ESPON- JA A NIVEL DE PLANTA PILOTO

La ejecución del proyecto sobre "Investigaciones de las posibilidades de aplicación de la Reducción Directa a los minerales de hierro en el país", llevado a cabo mediante el convenio firmado el 15/01/75, entre ITINTEC y SIDERPERU, tuvo una duración de 2 años: del 01/05/76 al 01/05/78.

El proyecto se finalizó con la ejecución presupuestal que se muestra en la Tabla # 14, por un monto total de S/ 24'568,639.00 aplicado a gastos solamente; es decir, sin incluir las inversiones hechas por SIDERPERU (aprox. 15 millones de soles en el montaje de la planta piloto).

La financiación se basó en el 2% de la renta neta de SIDERPERU en los ejercicios económicos de 1973 y 1974, y en la venta del producto. La primera por un monto de S/ 18'199,512.00 correspondientes según ley al ITINTEC, constituyó el aporte de este instituto.

TABLA # 14

EJECUCION PRESUPUESTAL PROYECTO PLANTA PILOTO

<u>CODIGO</u>	<u>PARTIDAS</u>	<u>IMPORTES</u>
1.00	REMUNERACIONES	
1.01	Sueldos.....	3'786,566.00
1.02	Salarios.....	1'369,487.00
1.03	Remuner Servicios Contrat.....	5'396,523.00
1.04	Leyes Sociales.....	2'497,797.00
2.00	MATERIALES	
2.01	Materias Primas.....	3'899,471.00
2.02	Materiales de Laboratorio.....	27,760.00
2.03	Materiales Auxiliares.....	1'637,655.00
3.00	SERVICIOS CONTRATADOS	
3.01	Servicios Publicos (energía, agua y comunicaciones).....	889,743.00
3.02	Laboratorio y Talleres.....	76,118.00
3.03	Transportes.....	2'203,386.00
3.00A	SERVICIOS SIDERPERU	
3.02A	Laboratorio y Talleres.....	1'290,512.00
3.03A	Transportes.....	16,628.00
4.00	GASTOS INDIRECTOS	
4.01	Viáticos y Gastos de Viaje.....	3,000.00
4.02	Combust, Lubric y Similares....	1'412,756.00
5.00	GASTOS DE ADMINISTRACION	
5.01	Impresos y Publicaciones.....	21,534.00
5.02	Utiles de Escritorio.....	39,703.00
	TOTAL : .....	<u>S/ 24'568,639.00</u>

FINANCIACION DE LOS GASTOS REALIZADOS

CONCEPTO

- 2% de la renta neta de SIDERPERU: Saldo del Ejercicio Económico de 1973.....	2'638,828.00
- Idem del Ejercicio Económico 1974.....	15'560,684.00
- Abono de SIDERPERU por uso del Hierro Esponja producido.....	6'369,127.00
TOTAL ; .....	<u>S/ 24'568,639.00</u>

### 7.3 - PROYECCION INDUSTRIAL

La construcción y puesta en marcha de la Planta Industrial de Hierro Esponja de SIDERPERU(Proyecto 61), representa una inversión de S/ 526'786,266.00, distribuido de la siguiente manera:

- Presupuesto Obras Civiles.....	97'642,043.00
- Presupuesto Obras Electro- mecánicas: .....	428'044,223.00
- Presupuesto Suministro de personal p'puesta en marcha.....	1'100,000.00
TOTAL : .....	S/ 526'786,266.00

La financiación de la obra está hecha de la siguiente manera:

- Préstamo de COFIDE: .....	200'000,000.00
- Recursos propios SIDERPERU: .....	326'786,266.00
TOTAL : .....	S/ 526'786,266.00

En la Tabla # 15 se resume la distribución general del presupuesto.

El costo de producción del Hierro Esponja en la planta industrial será menor que en la planta piloto ya que hay que considerar la alta capacidad de producción en comparación con esta plantita.

Se producirá 120,000 Ton/año, siendo el tiempo efectivo de operación de 10 meses. Los otros 2 meses están destinados a las paradas por mantenimiento.

Hasta mediados de 1978, se daba un valor nominal de 10 mil soles al precio de venta de la tonelada de Hierro Esponja. Por esta misma fecha, los cálculos esti

mados de los costos de producción en la planta industrial, arrojaban el valor de 7 mil soles por tonelada..

Considerando estos datos, se podía obtener una utilidad neta de 360 millones de soles.por año.

TABLA # 15

PRESUPUESTO CONSTRUCCION PLANTA INDUSTRIAL

1 - OBRA CIVIL

<u>DESCRIPCION</u>	<u>IMPORTE</u>
A - Obras Preliminares, Movimiento de Tierras y Solados.....	10'039,295.00
B - Planta Industrial.....	49'111,222.00
C - Oficina de Administración y Servicios Higiénicos y Vestuarios.....	4'810,032.00
D - Sub-estación eléctrica.....	3'663,907.00
E - Calzadura de Zapatas de Pilares.....	2'219,777.00
F - Canaletas de concreto para cables Man-holes.....	16'000,982.00
G - Varios: Pozos p' hornos, anclajes, muros de concreto.....	11'796,828.00
TOTAL OBRA CIVIL : .....	S/ 97'642,043.00

2 - PARTE ELECTROMECHANICA

<u>DESCRIPCION</u>	<u>IMPORTE</u>
A - <u>Presupuesto Mecánico</u>	
- Suministro de Materiales y Equipos..	192'507,023.00
- Fabricación.....	73'497,651.00
- Instalación y Montaje.....	79'650,464.00
TOTAL PARTE MECANICA : .....	S/ 345'655,138.00
B - <u>Presupuesto Eléctrico</u>	
- Suministros.....	50'244,484.00
- Instalación y Montaje.....	21'972,601.00
- Ingeniería de detalle.....	672,000.00
TOTAL PARTE ELECTRICA : .....	S/ 72'889,085.00
C - Pintura (Arenado y Pintado).....	9'500,000.00
TOTAL PARTE ELECTROMECHANICA : ...	S/ 429'144,223.00



## CAPITULO VIII - UTILIZACION DEL HIERRO ESPONJA

El producto de la Reducción Directa de minerales de hierro constituye una materia prima técnicamente apta para la producción de arrabio de acería, arrabio de fundición y acero. La preferencia por su empleo frente a las alternativas clásicas, dependerá de la economía que con él se pueda lograr.

### 8.1 - EN ALTO HORNO

El empleo del hierro esponja en alto horno produce 2 efectos beneficiosos: incremento de la productividad y disminución del consumo específico de coque. Los resultados de numerosas experiencias se alinean en promedios de aproximadamente 0.7% de mayor productividad y 0.5% de menor consumo de coque por cada porcentaje de aumento en el grado de metalización de la carga. En el caso de ser éste muy alto, la operación del alto horno se asemeja a la de un cubilote básico con viento caliente.

El hierro esponja al emplearse en altos hornos, no necesita satisfacer exigencias tan grandes como las que deben cumplir los destinados a los hornos de aceración. Basta con presentar en contenido de ganga y de azufre, antes de procesar, cifras del orden de las permitidas para el mineral que se reemplaza, y aun más altas si se considera que el consecuente ahorro de coque disminuye las cantidades de sílice y de azufre en la carga.

## 8.2 - EN HORNIOS ELECTRICOS DE ACERACION

Para el empleo del hierro esponja en hornos eléctricos de aceración , es deseable un contenido de hierro lo mas alto posible, en vista de su influencia en el consumo de energía eléctrica ( mayor contenido de ganga, mayor consumo de energía eléctrica ).

El hierro esponja reemplaza con ventaja a la chatarra por su pureza, particularmente para la fabricación de aceros finos y especiales.

Una característica muy importante del hierro esponja la constituye su adaptabilidad al sistema de carga continua del horno, lo cual permite una mayor utilización relativa del arco dentro del periodo de colada a colada con respecto al sistema de cargas masivas.

La uniformidad del análisis químico del hierro esponja es otra ventaja de éste sobre la chatarra porque permite simplificar el aforo al ser previsible con bastante certeza la composición del baño.

Con un hierro esponja rico ( Mas de 90% de Fe ), es posible incrementar grandemente la productividad de las instalaciones de acería eléctrica y lograr suficiente economía como para reemplazar en proporción importante a la chatarra.

## 8.3 - EN FUNDICIONES

El hierro esponja aplicado en cubilotes, sobre todo aquellos con contenido de carbono mayor que 1%, constitu

yen por su pureza un conveniente sustituto parcial de la chatarra, siempre que resulten competitivos con el arrabio para fundición y siempre que pueda controlarse la segregación el cargo del cubilete.

En cuanto a los hornos de reducción, por ser estos de cuba baja, no tiene lugar prácticamente la prerreducción que se efectúa en la cuba del alto horno, el efecto del empleo del hierro esponja es mas notable aun. Puede llegarse a 0.5% de reducción del consumo de energía eléctrica y entre 0.8 a 1.0% en la reducción del consumo de coque por cada por ciento de aumento en el grado de metalización en la carga. Esto significa que con hierro esponja de 70% de metalización por ejemplo, se podría incrementar en 30% la productividad de los hornos de reducción.

#### 8.4 UTILIZACION ACTUAL DEL HIERRO ESPONJA EN AMERICA LATINA.

Prácticamente la totalidad de los 5 millones de toneladas de hierro esponja producidos en América Latina desde Mayo de 1,975 hasta fines de 1,977, se usaron como material de carga para los hornos eléctricos de arco, como sustituto de la chatarra.

Dada la escasez de la chatarra en América Latina, no cabe duda de que para la explotación de los hornos de arco, tan apropiado para mercados relativamente pequeños constituye el hierro esponja de mineral de hierro, una materia prima de mayor interés en la región.

En el caso de SIDERPERU, actualmente lo poco que se produce en la planta piloto, es consumido en los hornos eléctricos de acería en proporciones de 15 a 20% mezclada con la chatarra. A pesar de la poca proporción de su uso, el hierro esponja hace notar sus grandes cualidades.

## CAPITULO IX - CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

1). Se ha determinado a nivel de planta piloto, la posibilidad de producir pellets reducidos ( Hierro Esponja con características superiores a la chatarra, empleando residuos de coque ( polvo ) y carbones nacionales (Antracita) , a partir de pellets oxidados procedentes de Marcona ( Ica ).

2). La dificultad tradicional del horno rotatorio: formación de bolas , incrustaciones y anillos que pueden perturbar , hasta detener la marcha normal del horno; se puede eliminar completamente con un diseño adecuado y una operación correcta , cuyas características han sido determinadas.

3). Se han comprobado los parámetros de diseño para instalaciones de mayor volumen de producción, así como las técnicas de operación, determinándose los consumos de materiales y energía, los requerimientos de mano de obra y las unidades de inversión.

4). La línea de flujo probada se caracteriza por bajos índices de inversión , mantenimiento limitado y modestos requerimientos en la calificación del personal. La suficiente disponibilidad de equipos de medida y control, elimina la necesidad de entrenamientos largos y costosos. La productividad es independiente de la habilidad y experiencia de los operarios.

5). En el Balance Técnico ( 5.5 Gcal/TM hierro es

ponja ), las cifras son mas altas que las reportadas por los procesos industriales ( 4.0 Gcal/TE ).

Sin embargo un consumo de 500 a 600 Kg de carbón , dependiendo esta cifra de la calidad del mismo , ofrece una ventajosa perspectiva económica, por la disponibilidad del producto y un mas bajo costo de la caloría.

6). Se ha comprobado la posibilidad de obtener un producto con bajo contenido de azufre ( inferior a 0.05% ), tal como exige las especificaciones de la carga para los hornos eléctricos de aceración.

7). El costo de producción estimado ( \$ 7,393./TE de hierro esponja ) compite ventajosamente con la chatarra de importación , dando un producto uniforme y libre de elementos indeseables.

8). Cuando un hierro esponja es obtenido a las mas altas temperaturas ( 1,100 °C ) , una adecuada permanencia en el interior del horno y una granulometría sobre +3 mm la resistencia a la reoxidación es mucho mayor que en los casos de hierro esponja obtenido a bajas temperaturas y/o en partículas pequeñas.

9). Se puede operar a cualquier metalización, la variación en los distintos niveles de metalización se refleja en la productividad de la planta, la cual aumenta aproximadamente por cada punto que baja la metalización.

10). Con los resultados obtenidos en la primera prueba realizada con antracita de Caraz, los cuales fueron algo desalentadores, no se podía vertir conclusiones definiti

vas. Pero las pruebas posteriores realizadas ajustando mejor los principales parámetros, han permitido demostrar ampliamente que la antracita es un buen agente reductor para este proceso.

11). Las campañas de producción analizadas, han permitido comprobar experimentalmente muchos de los aspectos fundamentales de la Reducción Directa en hornos rotatorios a base de reductores sólidos. Dichos aspectos están descritos en las conclusiones preliminares.

12). En los casos de transporte del hierro esponja a grandes distancias, o de almacenamiento por periodos prolongados, es decir en todas aquellas circunstancias de muy larga exposición al ambiente, particularmente si éste es muy húmedo y/o muy cálido, puede presentarse una reoxidación muy importante. En nuestro caso, pruebas hechas con el producto almacenado a la intemperie por 30, 60 y 90 días, han sufrido una reoxidación despreciable. Es recomendable evitar el contacto con el agua y materiales incandescentes que pueden dar origen a una reoxidación en cadena haciendo inútil el producto.

13). Es necesario un control térmico cuidadoso y evitar excesivos finos en la alimentación para evitar la formación de encostramientos y anillos en las paredes del horno. La temperatura máxima en la zona de reducción debe ser de  $1,150^{\circ}\text{C}$ , y debe hacerse un control granulométrico estricto a los materiales entrantes.

14). El coque o carbón recirculante posee adherido en

su superficie,abundante cantidad de polvos y cenizas que contribuyen al encostramiento.Por lo tanto debe ser sometido a un lavado previo antes de usar como carga al horno.

15). Hay una imperiosa necesidad de producir hierro esponja para cubrir el déficit de chatarra en el país,la viabilidad de dicha producción está demostrada por los logros obtenidos en la Planta Piloto de Hierro Esponja de SIDERPERU. Por lo tanto se debe dar un mayor impulso a la implementación de plantas de Reducción Directa y al estudio de nuestros carbones para conocer con mas exactitud las calidades y reservas nacionales.



## BIBLIOGRAFIA

- .- ASTIER, Jacques - Los aspectos Científicos de la Reducción Directa. ILAFA - Mexico 1,973.
- .- ROBLES GIL M., Sergio - Uso y Comercialización del Hierro Esponja. ILAFA - Mexico 73.
- .- HAKER Awad, W. Swrdjo y J. Gómez - La Reducción Directa sus bases y sus ventajas. CEMIN VOL 12 1,976.
- .- AGUIRRE, Fernando; BARBIS, René - La Reducción Directa de los Minerales de Hierro y su Aplicación en América Latina, Criterios de Selección de Procesos en América Latina. ILAFA XV Bogotá Octubre 74.
- .- REUTER, Gerhard - La Reducción de los minerales de Hierro y su Aplicación en América Latina. ILAFA - Seminario Latinoamericano de Reducción Directa - Mexico 1,973.
- .- COLAUTI, Franco; FERRERI, Rensio - Reducción Directa - según el Proceso Kinglor Metor con Reductor Sólido ILAFA 75 - Brasil.
- .- GUNTER, Meyer; BONGERS, Uwe - Reducción por Combustible sólidos con el Proceso Krupp de Hierro Esponja. ILAFA Brasil 75.
- .- SERBENT, Harry; REUTER, Gerhard - Estado actual de Proceso SL/RN. ILAFA - Brasil 75.
- .- D.A. Bold; N.T Evans - Selección y desarrollo de la Planta de Reducción Directa en New Zeland Steel Limited. ILAFA - Brasil 75.
- .- KAZUHARU, Yatsunami - Diseño de la Planta SL/RN para la Reducción de Pellets en Fukuyama japon. ILAFA - Brasil 75.

- .- G.H. Murdoch; R. Littlewood - La Planta SL-RN ubicada en La Mina Griffith. ILAFA - Brasil 1975.
- .- F.C. Prado - El Horno Rotatorio para la Producción de Hierro Esponja en Cuba.
- .- MANRIQUE, Marcial - Demanda y Oferta de la Chatarra en el Perú. Conversatorio: Perspectivas de la Reducción Directa en el Perú. Lima Mayo 1977.