



4/  
2 Ems

# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA OXIDACION DE PELETS  
PRODUCIDOS A PARTIR DE CONCENTRADOS DE  
MAGNETITA

T E S I S

FRANCISCO JAVIER BARRIOS RAMIREZ

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

México, D. F.

1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## SUMARIO

La presencia de una cierta cantidad de hierro ferroso en los pelets piroconsolidados, se considera desfavorable para su utilización en los altos hornos y reactores de reducción directa.

A su vez, cada tipo de concentrado presenta un comportamiento diferente durante su oxidación. Es por ésto que en los pelets producidos a partir de concentrados de magnetita es importante definir un ciclo térmico adecuado para lograr una máxima oxidación.

La presente tesis puede dividirse en tres partes; la primera, comprende una breve historia sobre el desarrollo del peletizado, así como una descripción del proceso y calidad del producto obtenido (pelets).

En la segunda parte se encuentra una explicación sobre los mecanismos de oxidación de pelets, los diversos factores que influyen en la misma y una proposición para calcular dicha oxidación a partir de datos experimentales.

En la última sección, se discuten los factores controlantes de la oxidación, así como las diferencias de comportamiento de los distintos pelets durante los ensayos realizados y se hacen recomendaciones para la definición de ciclos térmicos adecuados para favorecer la oxidación.

# INDICE GENERAL

## INTRODUCCION

	Pág.
I. ANTECEDENTES	4
I.1. HISTORIA DEL PELETIZADO	4
I.2. DESCRIPCION DEL PROCESO	7
I.2.1. BENEFICIO	7
I.2.2. FORMACION DEL PELET VERDE	9
I.2.3. ENDURECIMIENTO DEL PELET	11
I.3. CALIDAD DEL PELET COCIDO	14
I.3.1. CALIDAD FISICA	14
I.3.2. CALIDAD QUIMICA	16
I.3.3. CALIDAD METALURGICA	19
II. MECANISMO DE OXIDACION DE MAGNETITA A HEMATITA EN PELETS	21
II.1. RELACION ENTRE LA PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE LA OXIDACION Y EL PORCENTAJE DE OXIDACION	23
III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	26
IV. DISCUSION DE RESULTADOS	48
V. CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62

## INTRODUCCION

México es uno de los países en los que la capacidad de producción de pelets se ha incrementado en forma acelerada en los últimos años, de aquí, que las reservas de mineral de hierro exijan una explotación racional y que sea necesario desarrollar estudios tanto para el máximo aprovechamiento de nuestros recursos minerales, como para el mejoramiento de los procesos de peletización aplicados.

En México se cuenta actualmente con siete plantas peletizadoras en operación con una capacidad total de 11.5 millones de toneladas por año. El 81.7% de los pelets se producen por el sistema de parrilla recta, el 13.1% en parrilla horno rotatorio y el 5.2% en parrilla circular (2), como se muestra en el siguiente cuadro:

EMPRESA	UBICACION PELET	DISEÑO	TIPO DE PARRILLA	MINERAL TRATADO	CAP. INST (10 <sup>6</sup> T/A)	DESTINO PELET
HYLSA	Alzada, Col	Lurgi	Recta	Magnetita	1.60	R.D.
AHMSA	La Perla	McKee	Circular	Hematita	0.60	A.H.
FMSA	Monterrey	Allis	Horno Ro	Hematita	1.5	A.H.
SICARTSA	L. Cárdenas	Chalmers Lurgi	tatorio Recta	Magnetita	1.8	A.H.
P.C. I	Manzanillo	Lurgi	Recta	Magnetita	1.5	AH.y RD
P.C. II	Manzanillo	Lurgi	Recta	Magnetita	1.5	AH.y RD
AHMSA	Monclova	Lurgi	Recta	Hematita	3.0	A.H.

El empleo de pelets en los procesos primarios de elaboración de acero, es decir alto horno y reducción directa, ha sido un factor determinante en la productividad y consumo de energéticos. Las propiedades de los pelets que han favorecido la operación y economía de dichos hornos son aquellas que promueven:

- a) Una degradación baja durante el transporte.
- b) Tener una mayor carga por unidad de volumen en el horno.
- c) Mayor permeabilidad en los hornos. Al permitirse incrementar el volumen de soplo, se evitan canalizaciones que originan zonas calientes y frías y se logra una reducción de consumo de agente reductor ya que mejora la efectividad del contacto gas-sólido de las reacciones reductoras.
- d) Análisis químico más apropiado para la productividad del horno y los requerimientos de escorificación del mismo.
- e) Mayor resistencia física durante la reducción (3).

Casi el 60% de los pelets producidos en México provienen de concentrados de magnetita. La magnetita debe oxidarse al máximo durante el cocimiento, ya que pequeñas cantidades de magnetita en el pelet tratan de evitarse debido a que tienen un efecto negativo en las propiedades físicas y metalúrgicas del mismo, como pueden ser: resistencia a la compresión y degradación, resistencia al hinchamiento y reducibilidad. Es por esto que diversos autores se han preocupado por determinar los diferentes mecanismos de oxidación de pelets.

Por otro lado, se ha observado que la respuesta a la oxidación de diferentes minerales magnéticos es distinta. En trabajos recientes en Pot-Grate se ha encontrado mayor dificultad

tad para lograr la oxidación de minerales magnéticos procedentes de una determinada mina, con respecto a minerales de otras minas, aún cuando se empleen ciclos térmicos similares. Se estima que los siguientes factores influyen marcadamente en la respuesta a la oxidación.

- a) El contenido total de óxidos no ferrosos en el mineral así como su carácter ácido o básico.
- b) La superficie específica del mineral magnético concentrado.
- c) El tipo y cantidad de aditivo utilizado para aglomerar y ajustar la basicidad del pelet.

Para el presente trabajo se utilizaron muestras de 3 - plantas peletizadoras que aglomeran minerales magnéticos -- por el proceso de parrilla recta en México. Las muestras obtenidas se estudiaron:

- a) Sin aditivos.
- b) Con los aditivos que normalmente se utilizan para su - procesamiento.

En el presente estudio se pretende determinar los factores que influyen sobre la oxidación del pelet, dividiendo dicho estudio en las 3 fases siguientes:

- I. Oxidación de pelets de cada uno de los concentrados sin aditivo.
- II. Oxidación de pelets de cada uno de los concentrados con el aditivo en la proporción normalmente usada para su - procesamiento.
- III. Oxidación de pelets de un mismo concentrado con diferentes proporciones del aditivo que normalmente se usa en la planta.

## ANTECEDENTES

### I.1. HISTORIA DEL PELETIZADO

Existen 3 procesos diferentes para la aglomeración de minerales de hierro concentrados que son: Briquetización, Sinterización y Peletización.

En el final del siglo pasado, el Dr. Gustaf Gröndal, inventa el método de briquetización. El primer horno túnel fue incorporado en Finlandia en 1900 y en Suecia en 1902; el método fué rápidamente explotado y en 1915, alrededor de 350,000 toneladas de concentrado por año eran briquetizados en Suecia (4).

En este proceso minerales finos de hierro eran mezclados con agua que actuaba como aglomerante y la mezcla era presionada formando briquets.

Estos briquets verdes, eran cargados en carros y pasados a través de un túnel de flama de gas que tenía una zona de combustión a 1370°C donde era endurecido. El briquet poroso obtenido fue excelente alimentación para el alto horno. En la actualidad es inoperante debido a los altos costos del proceso y baja capacidad de producción (5).

La sinterización es un proceso de aglomeración por calentamiento de una mezcla de materiales finos de hierro; como mineral de hierro, cascarilla de laminación, polvo de hornos Siderúrgicos (Alto Horno, BOF, Horno de Sinterizado); homogenizados con finos de coke que desempeñan el papel de combustible y caliza o dolomita como fundente.



La mezcla es alimentada a una parrilla donde posteriormente es quemada por aplicación directa de una llama, la ignición continúa a través de la cama por succión de aire generada por ventiladores. La combustión del coke, genera una semifusión de las partículas de mineral, obteniendo masas de material poroso con una regular resistencia física y análisis químico controlado. Dichas masas son el sinter, el cual es triturado al tamaño deseado (1).

Conforme se fue aumentando la explotación de los yacimientos de hierro, la ley de éstos fue disminuyendo, por otra parte, los procesos para la producción de acero, exigían una materia prima de caractererísticas cada vez más uniformes y de mejor calidad. Por lo que a los minerales de hierro se refiere, estos requerían una concentración previa, que implicaba una molienda muy fina, de manera que se liberara al máximo el material beneficiable. Es aquí, donde surgen los problemas, ya que la sinterización de minerales de hierro sólo se aplica a partículas mayores a 0.147 Mm. de díametro promedio y una ley relativamente alta, obteniéndose además cierta heterogeneidad en el producto terminado (6).

El proceso de peletización, surge a principios de este siglo como resultado de la necesidad de mejorar la eficiencia de los procesos de elaboración de arrabio.

En 1912, A.G. Andersen, patenta un proceso de tolva giratoria que elaboraba bolas que se endurecían con un recocido posterior, C.A. Brackelsberg en 1913, patenta un proceso en el cual, minerales de hierro finamente granulados, eran mezclados con agua y un agente aglomerante, formando bolas dentro de un tambor para después ser calentadas a altas temperaturas. En 1916, Brackelsberg, publica un reporte sobre la producción de bolas aglomeradas, sus propiedades y sus usos en las industrias químicas y metalúrgicas.

En 1926, una planta piloto fue levantada en Rheinhausen, - para la producción de 120 toneladas por día por el proceso Brackelsberg (7).

Pero a mediados de 1940, es cuando se alcanza un mayor auge en la peletización, cuando la Estación Experimental de Minas de la Universidad de Minnesota desarrolla trabajos de - investigación y monta una pequeña planta piloto con éxito, con aportaciones del Instituto Real de Tecnología de Suecia.

En 1951, ideas innovadoras fueron aprobadas en relación a la utilización del horno de parrilla continua usado en la sinterización aplicado para la peletización.

Plantas piloto en E.U.A. (Mckee Company y Allis-Chalmers) y Alemania (Lurgi), son creadas con la adopción de esta idea.

La primera planta comercial peletizadora del mundo en gran escala es construída bajo este concepto en Silver Bay, - - Minnesota por la Reserve Mining Company, con capacidad de - 3.75 millones de toneladas por año.

Pero pese a todos los avances, ninguna de las nuevas plantas comerciales podían producir pelets adecuados de propiedades físicas altas para poder satisfacer los requerimientos de - la producción de hierro primario.

Allis-Chalmers, tomó una planta consistente en una parrilla horno y enfriador, pensando para la producción de cemento y la usó para la peletización de menas de hierro de baja ley. Los resultados fueron un éxito y el proceso "Grate-Kiln" - (Parrilla-Horno), empezó.

En 1964, la División de Combustión Superficial de la Corporación Midland-Ross, desarrolló otro sistema peletizador -- llamado "Proceso de Rápido Calentamiento", consistente de -- un secador y una parrilla de tipo circular integrada con un enfriador alimentado por arriba; este sistema fue desarrollado para peletización de óxidos de hierro.

En 1970, Mckee and Company, desarrolló la máquina de peletización de parrilla circular y construyó una pequeña en México en 1974. Este es el último de los sistemas desarrollados para peletización (6).

## **I.2. DESCRIPCION DEL PROCESO**

Debido a que los concentrados estudiados se les somete a un proceso similar en las diferentes plantas para la formación de pelets, solo se describirá el proceso seguido en el Con--sorcio Minero Benito Juárez "Peña Colorada", S.A., en Manzanillo, Colima.

### **I.2.1. BENEFICIO**

La extracción de mineral se realiza a cielo abierto utili--zando explosivos que son colocados después de haberse barrenado o perforado los bancos de explotación.

El mineral tratado es magnetita, la cual tiene una fórmula química  $Fe_3O_4$  ( $FeO-Fe_2O_3$ ). El mineral es transportado a -- una quebradora giratoria con una capacidad de 900 Tons/Hr.

El tamaño de alimentación es de trozos de hasta 80 Cms., y se reduce a un tamaño menor de 25 Cms., que se alimentan a un molino autógeno en el cual el medio de molienda es el

propio mineral. Ahí mismo se le adiciona agua para tener un contenido de sólidos de 70% aproximadamente, en esta etapa, el mineral es reducido a 93% a -16 mallas. La pulpa obtenida de la molienda se diluye con agua a 40% de sólidos para ser sometida a una separación magnética primaria, alcanzando un contenido de hierro de 60%.

El concentrado primario es llevado a la descarga del molino de bolas, donde se mezcla con el material molido, ahí mismo se le adiciona agua para bajar la densidad de la pulpa y ser alimentada a los hidrociclones donde se obtiene una descarga superior de 80 a 90% a -250 mallas y la descarga inferior es alimentada al molino de bolas.

La pulpa a -250 Mallas se somete a una segunda concentración magnética donde se obtiene un concentrado de 67% de hierro total y 90% a -325 Mallas, el cual es alimentado a un espesador de concentrado con el objeto de regular la densidad; una vez logrado esto, pasa al tanque agitador con una previa desmagnetización.

La pulpa obtenida es transportada a la planta peletizadora por medio de dos ferrosuctos a una velocidad de 1.63 m/s., con una densidad de 1.79 Kg/l., y un tamaño de partícula del 90% a -325 mallas.

Los dos ferrosuctos tienen una longitud de 44.5 Km. y un diámetro interno de 8 y 11 pulgadas respectivamente. Entre la planta de concentración y la de peletizado existe una diferencia de alturas de alrededor de 900 M., por lo que la pulpa se transporta por gravedad (°).

## I.2.2. FORMACION DEL PELET VERDE

El concentrado de magnetita pasa a un tanque espesador, el cual tiene la finalidad de homogenizar la pulpa hasta un 64% de sólidos, luego pasa a un tanque agitador que mantiene los sólidos en suspensión y homogeniza bien la pulpa para pasar a una de las etapas más importantes que es filtrado. La pulpa llega a los filtros de disco que cuentan con diez discos de 2.7 M. de diámetro por filtro y diez sectores, los parámetros a controlar son: Nivel de Pulpa, Velocidad del Disco (de 0.7 a 1.1 r.p.m.), presión de vacío (58 Cm. de Hg.) y presión y duración del soplo de aire (de 2.5 a 3.5 Kg/Cm. y 2 S.). Los filtros funcionan por medio de vacío, a base de un sistema de tubería común, succionan el aire de filtración desde los filtros hasta una trampa de vacío donde es separada el agua de filtración del aire, después el agua es enviada al espesador de concentrado. Cada disco del filtro, tiene cuatro zonas que son: Zona de Levante, la cual se encuentra sumergida en la pulpa; Zona de Secado, que se encuentra fuera de la pulpa; Zona de Soplo, donde ocurre el desprendimiento de la torta y una Zona Muerta entre las Zonas de Succión y de Soplo.

La torta con una humedad de 9 a 10%, es recibida en una banda donde se le adiciona calhídra para pasar a un mezclador de tambor. Esta mezcla es transportada a unas tolvas de almacenamiento, las cuales alimentan al disco peletizador.

La descarga de concentrado de cada tolva, se realiza a través de una boquilla vibratoria, la cual tiene dos funciones: Desintegrar los pedazos de concentrado y distribuirlo sobre el área del disco peletizador.

La formación de bolas (pelet verde), se basa en el fenómeno

de la bola de nieve. Existen dos fases que intervienen en la formación de la bola que son:

- 1) Formación del núcleo que se lleva a cabo cuando la fuerza de atracción entre partículas cubiertas por una película de agua es suficiente para unir unas con otras; las partículas mojadas se juntan y sus películas de agua se reúnen debido a la tensión superficial. En esta primera fase, es de importante influencia la plasticidad de las partículas, su cohesividad y la influencia de las colisiones. Si la partícula no tiene buena plasticidad, no tendrá los suficientes puntos de unión para la formación de un buen núcleo, debe también ser cohesiva ya que, de nada valdría tener bastantes puntos de contacto si no hay una unión entre ellos, se debe tener una buena colisión para fomentar los choques entre partículas.
  
- 2) Crecimiento del núcleo hasta el tamaño deseado. El núcleo, al rodar en una pendiente se le van uniendo partículas a su paso haciéndolo cada vez más grande. Al mismo tiempo el peso de la bola descansa en pocas partículas en un cierto tiempo, lo que permite el reacomodo de las mismas para dar una buena compactación. En general, los factores que influyen (con respecto al mineral), en la formación del pelet son: tamaño de partícula, contenido de humedad y efecto del aglomerante añadido.

Los discos peletizadores en Peña Colorada, tienen un diámetro de 7.5 M. con una capacidad máxima de 140 Tons/Hr. de concentrado. Los parámetros a controlar son: velocidad de giro del disco (5 a 6 r.p.m.), inclinación del disco (45° a 48°), altura del bordo (a mayor altura, mayor tiempo de permanencia del pelet verde), y

velocidad de alimentación del concentrado (a mayor tonelaje alimentado, menor tiempo de permanencia en el disco del mismo).

Ya obtenido el pelet verde, éste pasa a una banda basculante, la cual registra la producción obtenida.

El pelet verde debe tener las siguientes propiedades:

- \_\_\_\_\_ Uniformidad de Tamaño
- \_\_\_\_\_ Resistencia Física.
- \_\_\_\_\_ Resistencia al Choque Térmico.
- \_\_\_\_\_ Buena Porosidad.
- \_\_\_\_\_ Tamaño Apropriado

### **1.2.3. ENDURECIMIENTO DEL PELET**

El pelet verde es alimentado por medio de una banda oscilante a una criba de rodillos, la cual separa los tamaños menores a 9 Mm.; los mayores a 9 Mm., son alimentados al horno de parrilla recta Lurgi Dravo. Antes de alimentar el pelet verde al horno, se alimenta una cama protectora en la parrilla del mismo de aproximadamente 8 Cm., esta cama es formada por pelets cocidos, también se protegen las paredes de la parrilla con pelets cocidos.

La parrilla es una serie de carros los cuales son recirculados continuamente. La finalidad de la cama protectora es evitar un ataque térmico en los carros y contribuye a mejorar la calidad del pelet tratado.

Los tres componentes mencionados se alimentan en el siguiente orden: Cama protectora, capa lateral y pelets -

verdes.

El pelet verde, es sometido a los siguientes pasos para su endurecimiento:

- 1) Secado ascendente y descendente, un flujo de gases - a una temperatura no mayor a 350°C, pasan de abajo a arriba en un espacio de 9 M., dentro del horno y viceversa en un espacio de 4.5 M. para eliminar la humedad del pelet verde.

Esta etapa debe ser bien definida en términos de duración, temperatura y cantidad de calor disponible; durante el secado la resistencia física del pelet es baja y si la velocidad de secado se realiza por arriba de un cierto límite, se provoca un choque térmico; en otras palabras, en el interior del pelet, las fuerzas desarrolladas por la presión de vapor son tan grandes que se supera el efecto de las fuerzas de cohesión, explotando o agrietándose interiormente.

- 2) Precalentamiento. Se realiza a una temperatura de 500°C a 800°C. En esta etapa se realiza la oxidación parcial de la magnetita y si el mineral contiene algún porcentaje de azufre, la desulfuración, reacción que es importante, ya que, tiene marcadas influencias en el proceso (afecta la resistencia del pelet y el % de FeO), también comienza el crecimiento de grano.
- 3) Cocimiento. Se lleva a cabo desde una temperatura de 1000°C a 1300°C máximo, a estas temperaturas se logra el endurecimiento del pelet por recristalización, crecimiento de grano y formación de escorias. La presencia de una fase líquida (escoria) facilita el rea



comodo de la estructura (recristalización) y el crecimiento de las estructuras más estables (crecimiento de grano). También ocurren reacciones químicas entre los constituyentes de la ganga del pelet, ya sea como constituyente natural o como aditivo.

- 4) Post-Cocimiento. En esta etapa ocurre un incremento en la temperatura, pero ya no por un medio externo, sino por el producto de realización de reacciones exotérmicas como son la oxidación de la magnetita y la fusión de escorias.
- 5) Enfriamiento Primario. Se realiza por una inyección de gases ascendentes a 25°C (aire), los cuales salen a una temperatura de 800°C a 900°C (por intercambio de calor), dichos gases se utilizan para la etapa de precalentamiento y cocimiento del pelet en esas zonas los gases son calentados a una temperatura mayor con combustóleo y por el producto de las reacciones existentes.
- 6) Enfriamiento Secundario. Se sigue alimentando aire a 25°C, sólo que en esta etapa salen los gases a menos de 400°C y son utilizados para el secado, en caso de salir a una temperatura mayor, se le inyecta aire fresco (25°C).

Los pelets ya endurecidos son sometidos a un cribado. Los finos (-1/4"), son convertidos nuevamente en pulpa y los que tienen un tamaño mayor que el deseado, son ocupados para la cama y pared protectora; - estos pelets al paso de las vueltas por el horno se van degradando por lo que tendrán un tamaño menor y podrán pasar a producción.

Los pelets que cumplen con el tamaño deseado son llevados a un almacén de 150,000 toneladas de capacidad para su posterior embarque.

El pelet debe tener ciertas propiedades tanto físicas -- como químicas y metalúrgicas para poder resistir su -- transporte a su conversión a arrabio o hierro esponja.

Es por eso, que es sometido a un Control de Calidad en el cual se valían sus propiedades de acuerdo a las siguientes pruebas:

### **1.3. CALIDAD DEL PELET COCIDO**

#### **1.3.1. CALIDAD FISICA**

##### **a) GRANULOMETRIA**

El pelet debe tener una distribución uniforme de tamaño, actualmente, la mayoría de las plantas piden el máximo de la producción en la -- fracción de  $-5/8"$  a  $+3/8"$ , de diámetro, ya -- que es el tamaño en el cual se presenta una me-- jor permeabilidad al paso de los gases reducto-- res y además sus propiedades físicas son las -- más adecuadas comparadas con las reportadas pa-- ra otros tamaños producidos.

Esta evaluación es importante en la calidad -- del pelet ya que una cantidad excesiva de fi-- nés obstruye la permeabilidad en los hornos y forma canalizaciones. Por otro lado en un tama-- ño mayor de  $5/8"$  es difícil lograr una penetra-- ción hasta el centro del pelet del gas reduc-- tor y por consiguiente una buena reducción.

Generalmente las especificaciones que se le piden a una planta peletizadora de minerales de hierro son las siguientes:

	+ 3/4"	1 % máximo
- 5/8"	+ 3/8"	80 % a 90% mínimo
- 1/4"		2 % máximo

**b) RESISTENCIA A LA COMPRESION**

Es la fuerza medida en kilogramos que soporta un pelet hasta su ruptura. El pelet debe tener una resistencia a la compresión mayor de 250 Kg. por pelet, puesto que tiene que resistir una carga sobre él, durante su transporte a los hornos.

Un pelet con menor resistencia a la compresión que la especificada, provoca una formación de finos debido a la desintegración del mismo (9).

**c) RESISTENCIA A LA DEGRADACION**

Se realiza este ensayo para darse una idea de la resistencia del pelet a la degradación por abrasión durante su paso por los diferentes equipos de manejo y transporte (9).

El pelet debe tener una degradación no mayor al 5%, esta degradación es determinada mediante un tambor cilíndrico giratorio, el cual es alimentado con pelets mayores a 1/4" y puesto a funcionar a una velocidad de 25 r.p.m., durante -

ocho minutos, cribando el producto final y el menor de 30 mallas es tomado como el porcentaje de material degradado.

#### d) POROSIDAD

La porosidad es el volumen de huecos en el pelet con relación a su volumen total. El pelet debe tener una cierta porosidad ya que, de esto depende su buena reducibilidad en los hornos primarios de aceración y no debe ser excesiva porque provoca una disminución en la resistencia física del pelet. La porosidad más adecuada, está entre un 25% a un 30%.

### 1.3.2. CALIDAD QUIMICA

#### a) HIERRO TOTAL

El hierro que compone al mineral se presenta en diferentes composiciones, como puede ser hematita, ferritos de calcio, Etc., por lo que cuando se habla de hierro total se refiere al contenido de hierro que pudiera existir en el mineral -- en cualquiera de sus composiciones. Este dato -- proporciona un criterio con respecto a la productividad y consumo de coke en el horno, a mayores contenidos de hierro total, menor consumo de -- coke por tonelada de arrabio producido y más alta productividad.

#### b) HIERRO FERROSO

El dato obtenido de esta prueba da información -- referente al grado de oxidación llevado a cabo --

durante la elaboración del pelet.

La presencia de una cierta cantidad de hierro --ferroso en los pelets cocidos, se considera desfavorable en su utilización siderúrgica. Estudios comparativos de pelets producidos a partir de un mismo concentrado de magnetita y que han sufrido tratamientos térmicos distintos, ponen de manifiesto que a una mayor cantidad de hierro se tiene una menor resistencia del pelet y un mayor hinchamiento; parece ser que la coexistencia en un mismo pelet de hematita y magnetita --provoca durante la reducción, tensiones internas que originan la destrucción de las unidades cristalinas y por consiguiente, una importante degradación y un hinchamiento anormal, por lo que es importante conseguir una oxidación lo más completa posible durante el cocimiento de pelets. El contenido de hierro ferroso en el pelet, debe ser menor a 0.85% (10).

**c) AZUFRE**

Es un elemento indeseable en la fabricación del acero ya que se escorifica en el alto horno ocasionando transtornos en el mismo, teniendo como consecuencia una repercusión en el consumo de coke y productividad del horno e implica producción de arrabio con alto contenido de azufre. El contenido de azufre máximo permitido es de 0.02% (3).

**d) FOSFORO**

Es también un elemento indeseable en el pelet -

ya que pasa íntegramente al arrabio y posteriormente se oxida durante los procesos de aceración, el contenido de éste en el pelet, debe ser menor del 0.065% (3).

**e) BASICIDAD**

Es una relación de los porcentajes de los óxidos básicos y los óxidos ácidos de acuerdo a la siguiente relación.

$$\text{Basicidad} = \frac{\% \text{ CaO} + \% \text{ MgO}}{\% \text{ SiO}_2 + \% \text{ Al}_2\text{O}_3} \quad \begin{array}{l} \text{Oxidos básicos.} \\ \text{Oxidos ácidos.} \end{array}$$

Algunas ocasiones se reporta como basicidad binaria.

$$\text{Basicidad} = \frac{\% \text{ CaO}}{\% \text{ SiO}_2}$$

Si esta relación es menor a uno el pelet es ácido y si es mayor a uno es básico. El valor de esta relación está en función del destino del pelet (reducción directa o alto horno).

**f) ÓXIDO DE POTASIO Y ÓXIDO DE SODIO**

Estos compuestos alcalinos aportados por los componentes de la carga atacan al refractario del horno produciendo incrustaciones que afectan la operación del mismo (3). La cantidad de estos alcalis en el pelet debe ser menor a 0.15%.

### 1.3.3. CALIDAD METALURGICA

#### a) HINCHAMIENTO

Este fenómeno de aumento en el volumen del pelet, se presenta durante la reducción, en donde dos cambios de volumen son observados, uno en la transformación de hematita a magnetita y el otro durante la reducción de wustita a hierro metálico. Esta expansión de volumen es debida a la baja resistencia de la escoria para retener el crecimiento de la estructura (11).

El hinchamiento no ocurre, u ocurre muy poco cuando la reducción es realizada en una atmósfera de hidrógeno, se piensa que es debido a que el poder de reducción del hidrógeno es alto por lo que la reducción del óxido de hierro a hierro metálico se lleva a cabo muy rápidamente, el resultado de esto, es una unión del metal resistente al hinchamiento (12).

#### b) REDUCIBILIDAD

Se puede definir como la pérdida de oxígeno del pelet al ser sometido al paso de gases reductores durante un cierto tiempo a una temperatura determinada. Esta prueba indica en qué tiempo el pelet alcanza cierto grado de reducción. Comúnmente se realiza con una mezcla de CO y N<sub>2</sub>, durante tres horas. Se acepta aquel pelet que presente una reducibilidad mayor al 55% (6).

**c) DEGRADACION A BAJAS TEMPERATURAS (DBT)**

La finalidad de esta prueba es simular las condiciones que existen en la parte alta de la cuba del alto horno, básicamente en la zona donde ocurre la transformación de hematita a magnetita. El ensayo se realiza a una temperatura de  $-500^{\circ}\text{C}$  a  $600^{\circ}\text{C}$  y bajo un atmósfera de  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$  semejante en composición a la del alto horno.

El objetivo es saber si existe un disgregamiento del pelet a la temperatura y mezcla de gases mencionados, se reporta el porcentaje mayor de  $1/4''$  y lo que pase por la malla 30 después del ensayo (13).

**d) REDUCCION BAJO CARGA (RBC)**

En este ensayo se trata de simular la estancia de los pelets en el alto horno soportando una carga bajo condiciones de reducción a altas temperaturas.

Esta prueba de reducción (Burghardt), se realiza usando una muestra de 500g., a una temperatura de reducción de  $1050^{\circ}\text{C}$ , aplicando una carga de  $0.8\text{Kg}/\text{Cm}^2$  y una mezcla gaseosa de 40%  $\text{CO}$  y 60%  $\text{N}_2$ . La finalidad es determinar las pérdidas de permeabilidad de la cama de pelets bajo estas condiciones.

Se reporta contracción de la cama en por ciento, AP en términos de  $\text{mm H}_2\text{O}$  y  $(\text{DR}/\text{DT})_{t_0}$  que refleja el grado de reducción a un cierto tiempo (14).



## II. MECANISMO DE OXIDACION DE MAGNETITA A HEMATITA EN PELETS

Para llevarse a cabo la oxidación de la magnetita, es necesario que las moléculas de oxígeno estén en contacto con los -- cristales de la misma. Para realizarse este proceso de oxidación se necesita que ocurran las siguientes etapas:

- a) Difusión del oxígeno a través del lecho de pelets.
- b) Difusión del oxígeno a través de la capa laminar que rodea el pelet.
- c) Difusión del oxígeno a través del pelet.
- d) Reacción entre el oxígeno y el óxido ferroso férrico.

Durante el cocimiento de pelets, las dos primeras etapas pueden despreciarse. Por una parte, la porosidad del lecho de -- pelets es alta, por lo que la difusión a través de él se realiza rápida y satisfactoriamente. De igual modo, la capa laminar de gases que rodea a los pelets, no opone ninguna dificultad apreciable para que el oxígeno alcance las primeras capas del mismo, por lo que también se desprecia la influencia que pudiera tener, quedando por lo tanto, las últimas dos etapas como controlantes del proceso.

La oxidación de una partícula de magnetita situada en el interior del pelet, exige el paso del oxígeno a través de éste, -- ya que, dicha oxidación comienza en la superficie y penetra -- concéntricamente hacia el núcleo del pelet, los primeros cristales de hematita formados simultáneamente, se unen unos con otros. Con suficiente suministro de oxígeno y conforme se incrementa la temperatura, la oxidación penetra a través de la estructura del pelet, impartiendo así mayor resistencia a las uniones mediante la recristalización y crecimiento de los granos de hematita.

Sin embargo, en pelets producidos a partir de concentrados de magnetita, es común la tendencia a formarse una doble estructura esencialmente una capa periférica de hematita y un núcleo de magnetita sin oxidar. Por esta razón es importante -- que el oxígeno penetre la capa de hematita para oxidar el -- núcleo, por lo que, es necesario mantener una permeabilidad -- adecuada de esta capa mediante un control cuidadoso de la velocidad de calentamiento.

Una capa de hematita poco permeable, no sólo disminuye la velocidad de oxidación del núcleo, sino que a temperaturas de -- 900°C la magnetita puede sufrir una recristalización y crecimiento de grano capaz de interferir también en la oxidación -- del núcleo. (15)

Los minerales concentrados a peletizar contienen ciertos porcentajes de ganga y aditivos, que al alcanzar temperaturas superiores a los 1000°C, forman escorias.

Estas escorias, tienen composiciones muy variables, desde puramente ácidas del tipo de la fayalita ( $Fe_2SiO_4$ ), hasta del -- tipo básico de los ferritos de calcio ( $Fe_2O_3 \cdot 2CaO$ ;  $Fe_2O_3 \cdot CaO$  y  $2Fe_2O_3 \cdot CaO$ ). La influencia de un silicato fundido es importante pero afecta la oxidación debido a que no se permite un transporte de electrones, no obstante la unión de óxidos de -- hierro a través de una fase de silicato se considera la más -- importante contribución a la dureza del pelet (16).

Los ferritos de calcio favorecen el crecimiento de los granos del mineral, esto, se debe a que funden a bajas temperaturas y bajo estas condiciones el crecimiento es mucho más rápido -- que en el caso de no existir fases fundidas. Este tipo de escoria, favorece la oxidación, ya que permite un transporte de electrones, pero también favorecen la reversión de la reacción de oxidación a una menor temperatura (17).

Por lo que respecta a la reacción del oxígeno y el óxido - - ferroso férrico, ésta se realizará más rápidamente conforme - se aumenta la temperatura a un cierto tiempo (<sup>10</sup>), hasta llegar a un punto de máxima oxidación en el cual, aunque se -- aumente más la temperatura, no se tendrá una mayor oxidación - (máxima velocidad de oxidación), es aquí donde el factor tiem po de permanencia influye, para una cierta temperatura; mayor tiempo de permanencia, mejor oxidación.

La reacción de magnetita a hematita es reversible a altas tem peraturas (mayores a 1250°C) y conforme se tenga una mayor - cantidad de CaO, la temperatura de reversión será menor (17).

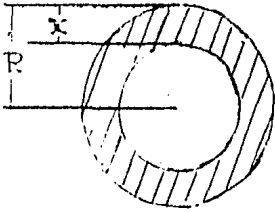
## II.1. RELACION ENTRE LA PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE LA OXI DACION Y EL PORCENTAJE DE OXIDACION.

Teniendo en cuenta que las densidades de la magnetita y la he matita son muy semejantes, puede considerarse despreciable el cambio de volúmen debido a la oxidación, el volúmen ( $V_R$ ) de - oxígeno necesario para oxidar un pelet de radio R, medido en condiciones normales, será proporcional al volúmen del pelet.

$$V_R = m \frac{4}{3} \pi R^3$$

Siendo m una constante que corresponde al volúmen de oxígeno necesario para oxidar la unidad de volúmen del material que - forma el pelet.

Admitiendo que al llegar las moléculas de oxígeno a una dis- tancia X del borde del pelet toda la capa externa correspon-- diente ya ha sido oxidada (Fig.)



Representación esquemática de un pelet semioxidado mostrando una corona (Parte oxidada) y un núcleo.

El volúmen oxidado del pelet es expresado por la diferencia - entre el volúmen total y el núcleo que aún no ha sido oxidado.

$$4/3\pi R^3 - 4/3 \pi (R-X)^3$$

y el volúmen de oxígeno empleado para oxidarlo será:

$$V_o = m \ 4/3 \ \pi (R^3 - (R-X)^3)$$

En estas condiciones, el porcentaje de oxígeno mencionado, referido al total necesario para oxidar todo el pelet dará el grado de oxidación (Ox).

$$Ox = 1 - \frac{(R - X)^3}{R^3}$$

De donde puede obtenerse el valor de la penetración X.

$$X = R (1 - (1 - Ox)^{1/3}) \dots (1)$$

Ecuación que relaciona, para un radio de pelet dado, la profundidad de penetración con el grado de oxidación.

Por otro lado, la profundidad a la que llega la oxidación en un cuerpo esférico poroso de radio R, suponiendo que esté controlada por la difusión del oxígeno a través de dicho cuerpo, está ligada al tiempo de exposición a las condiciones oxidantes (t), por la fórmula:

$$\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3R} = Kt \quad . . . . . (2)$$

Según la ley de Fick, en la que K es una constante de dimensiones (Longitud)<sup>2</sup> x (Tiempo)<sup>-1</sup>

Combinando las ecuaciones (1) y (2) y partiendo de los resultados obtenidos en los ensayos efectuados se llega a unos ciertos valores empíricos de K que son función del tiempo y temperatura del ensayo.

### III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se recibieron muestras representativas de concentrados producidos en plantas peletizadoras que tratan mineral magnético, las cuales fueron cuarteadas individualmente obteniendo las cantidades necesarias para las siguientes determinaciones:

a) **DENSIDAD**

La densidad de los concentrados, se midió en un picnómetro.

b) **SUPERFICIE ESPECIFICA**

Se utilizó un determinador de tamaño de partícula fisher.

c) **PORCENTAJE DE MAGNETITA**

Se determinó vía satmagan y del valor obtenido se calculó el hierro ferroso presente como magnetita.

Los análisis químicos se efectuaron por vía húmeda para hierro total (FeT) y por absorción atómica para: CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>.

Las características físicas y químicas mencionadas de los distintos concentrados se encuentran reportadas en la tabla I.

Los concentrados fueron homogenizados y preparados con aditivo los que así lo requerían en un mezclador Simpson para posteriormente ser boleados en un disco peletizador de un metro de diámetro, durante el boleado, el concentrado fue cargado en cantidades de 13 Kg. por ensayo teniendo un tiempo de permanencia en el disco de 10 Min.

Todas las pruebas realizadas tanto de caracterización como cocimiento, se efectuaron con pelets que se encontraban en un -

rango de tamaños de  $-5/8'' + 3/8''$ . El cocimiento de éstos, se realizó en una mufla de laboratorio previamente calentada a la temperatura del ensayo, en la cual, se metieron contenedores refractarios que aceptaban tres muestras de 16 pelets cada una por contenedor. Una vez cumplido su ciclo de calentamiento a una temperatura dada fueron sacados y enfriados al aire.

Posteriormente se determinaron sus contenidos de magnetita, se realizó un análisis microscópico y para los pelets correspondientes a la fase "C", se determinó su resistencia a la compresión.

Las temperaturas de calentamiento, los tiempos de permanencia a esas temperaturas y el porcentaje de aditivo utilizado en cada fase estudiada se mencionan a continuación:

**FASE I.-** En este ensayo los pelets producidos a partir de los concentrados A, B y C., se sometieron a temperaturas de 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C, por un lapso de 10, 20 y 40 minutos para cada temperatura.

**FASE II.-** Los pelets producidos a partir de los concentrados D, E y F, se llevaron a temperaturas de 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C, con un tiempo de permanencia a las distintas temperaturas de 10, 20 y 40 minutos.

**FASE III.-** Para evaluar el efecto del porcentaje de calhidra adicionada en la oxidación del pelet, se utilizó el concentrado G, sin ninguna adición y con adiciones de 1%, 2% y 3% de calhidra, las temperaturas, de cocimiento fueron 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C y 1300°C, con un tiempo de permanencia de 20 minutos para cada temperatura.

# T A B L A I

## CARACTERISTICAS DE LOS CONCENTRADOS UTILIZADOS

CONC.	FeT %	Fe <sup>++</sup> SAT. %	Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> %	CaO %	MgO %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	GANGA %	BASC	DENS G/CM <sup>3</sup>	SUP.ESP. CM <sup>2</sup> /G.
A	68	18.04	74.75	0.60	0.35	1.28	2.64	4.87	0.24	4.85	1818
B	67	19.39	82.37	1.20	0.40	0.72	3.84	6.16	0.35	4.82	1464
C	70.2	19.0	80.39	0.40	0.62	0.60	1.88	3.50	0.41	5.03	1412
D	66.2	18.10	75.01	2.00	0.52	1.32	2.92	6.76	0.59	4.70	1636
E	63.6	16.89	70.00	3.00	0.76	0.72	3.52	8.00	4.24	4.67	1690
F	67.3	14.41	59.72	1.90	0.96	0.80	2.08	5.74	0.99	4.77	1612
G	67.6	18.08	74.92	0.65	0.37	1.28	2.80	5.10	0.25	4.87	1760

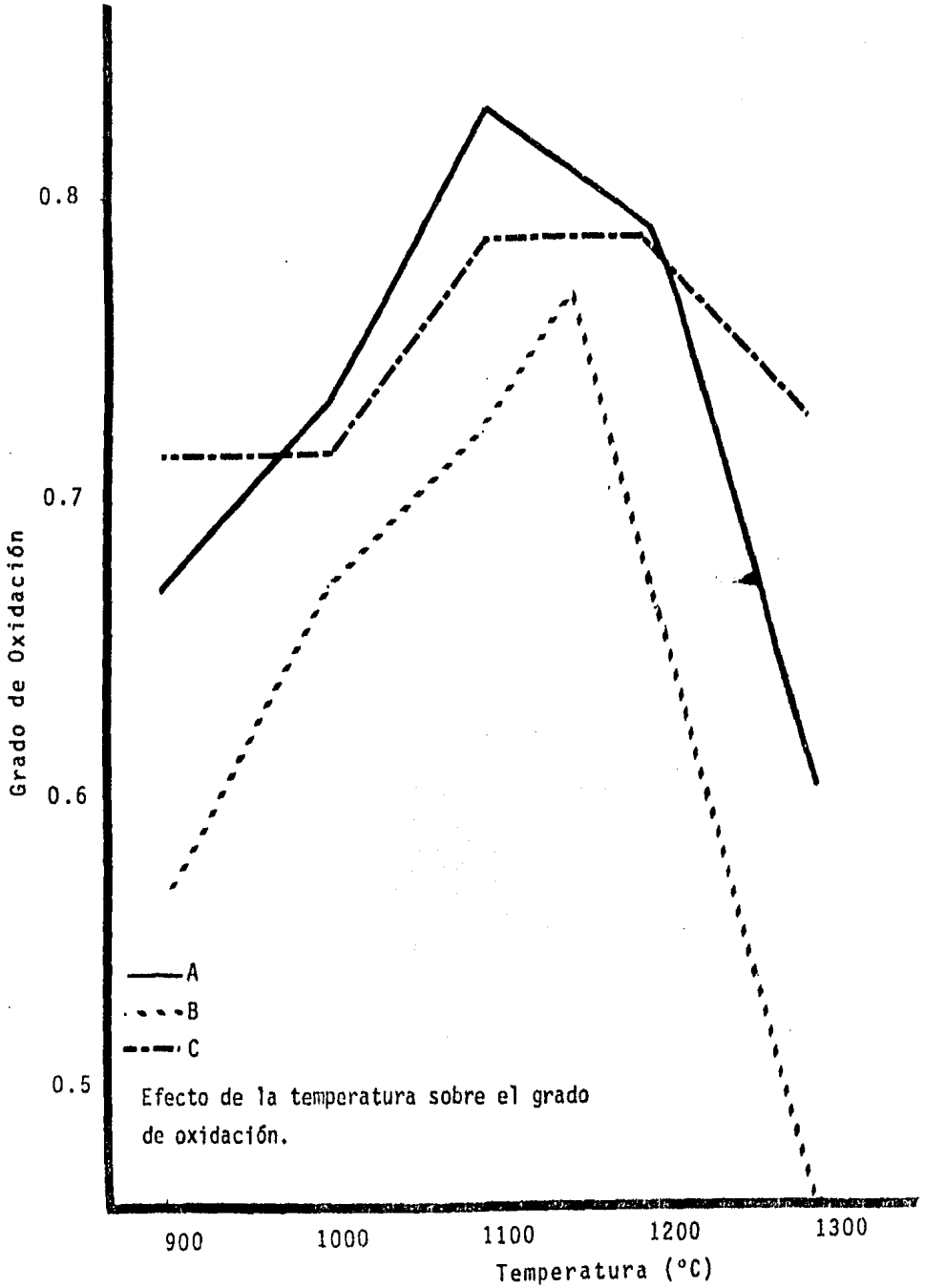


**R E S U L T A D O S :**

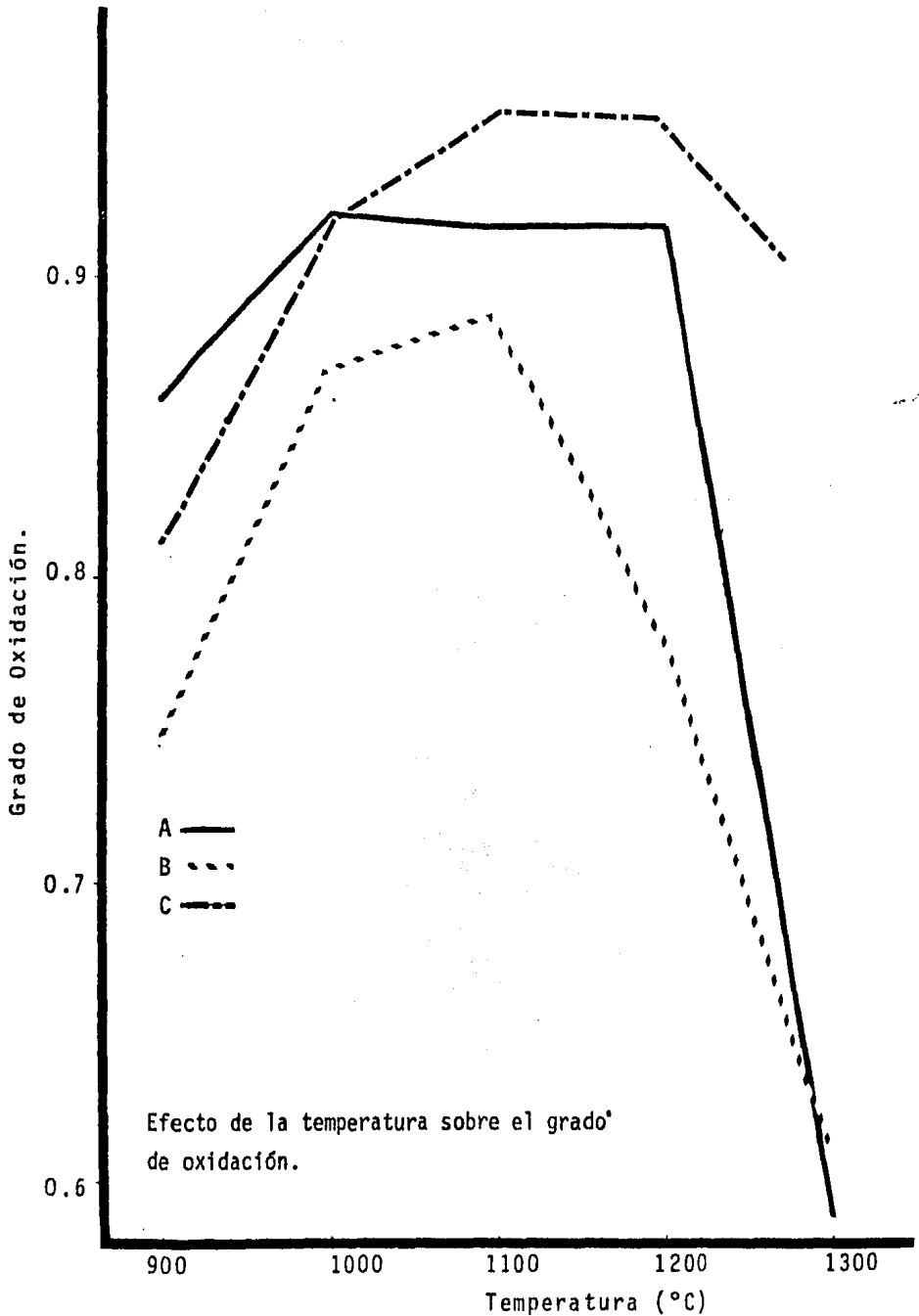
**LOS RESULTADOS OBTENIDOS SE PRESENTAN EN  
LAS SIGUIENTES TABLAS Y GRAFICAS**

TABLA III.- HIERRO FERROSO REMANENTE ( $Fe^{++}$ ), GRADO DE OXIDACION (Ox) Y  
 PENETRACION DE OXIDACION TEORICA (X), OBTENIDAS PARA LA --  
 F A S E "I"

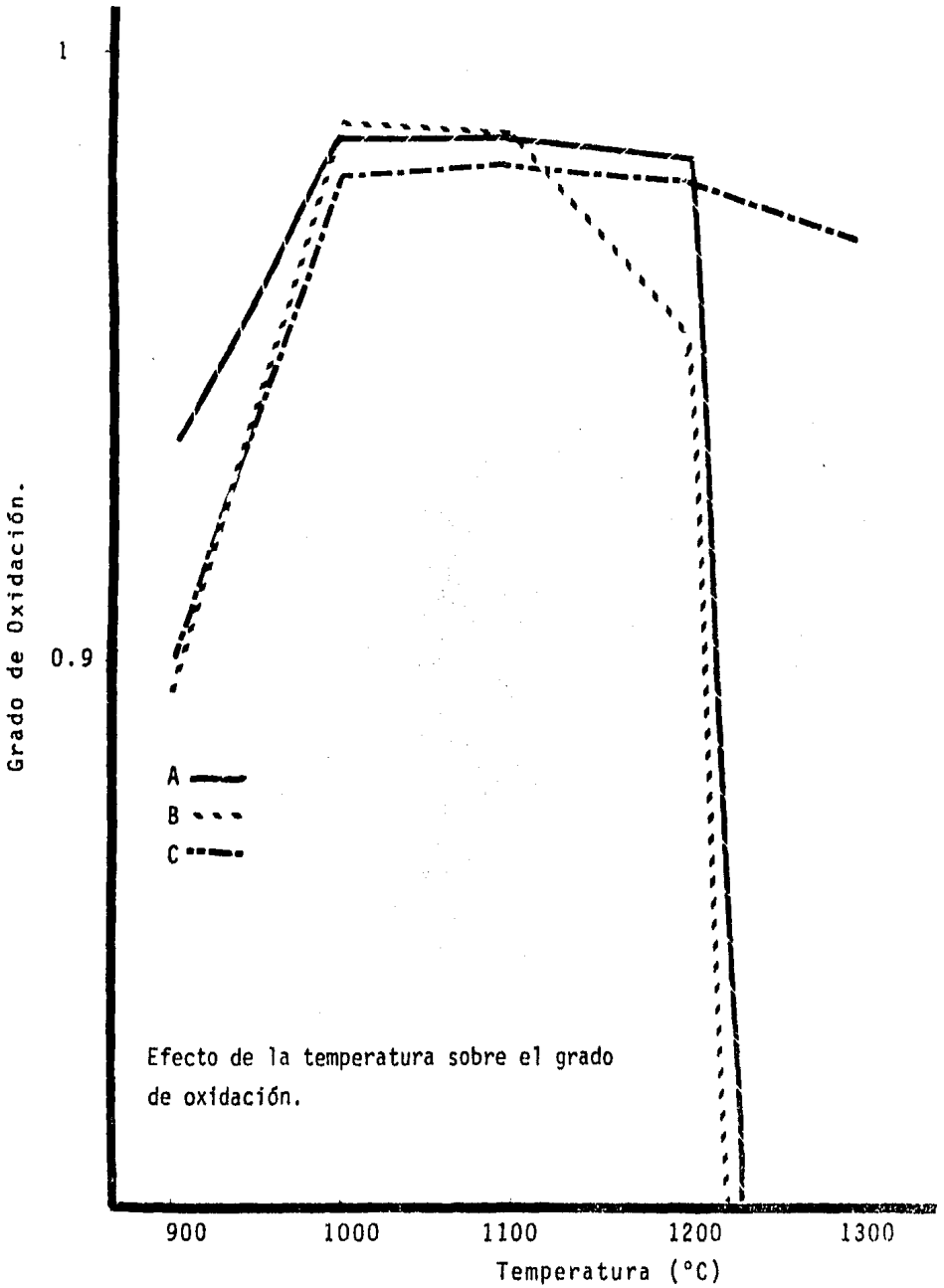
CONCEN- TRADO,	TEMP. °C.	TIEMPO DE OXIDACION								
		10 MINUTOS			20 MINUTOS			40 MINUTOS.		
		$Fe^{++}$ %	Ox	X mm	$Fe^{++}$ %	Ox	X mm	$Fe^{++}$ %	Ox	X mm
A	900	5.88	0.670	1.931	2.15	0.881	3.176	1.13	0.937	3.763
	1000	4.81	0.733	2.225	1.06	0.941	3.817	0.27	0.985	4.709
	1100	3.06	0.830	2.788	1.13	0.937	3.763	0.25	0.986	4.744
	1200	3.78	0.790	2.531	1.08	0.948	3.916	0.32	0.982	4.620
	1300	7.24	0.599	1.641	7.39	0.590	1.607	9.86	0.453	1.140
B	900	8.42	0.566	1.059	4.54	0.766	2.399	2.04	0.895	3.301
	1000	6.39	0.670	1.905	2.14	0.890	3.255	0.23	0.988	4.819
	1100	5.59	0.712	2.123	1.79	0.908	3.429	0.27	0.986	4.744
	1200	6.52	0.664	1.931	3.84	0.802	2.607	0.90	0.954	4.011
	1300	11.11	0.427	1.518	7.52	0.612	1.691	9.77	0.496	1.277
C	900	5.40	0.716	2.142	3.20	0.832	2.801	1.72	0.900	3.349
	1000	5.40	0.716	2.142	1.16	0.939	3.790	0.40	0.979	4.526
	1100	4.03	0.788	2.523	0.52	0.973	4.375	0.37	0.981	4.586
	1200	4.05	0.787	2.517	0.52	0.973	4.375	0.41	0.978	4.499
	1300	4.99	0.737	2.240	1.61	0.915	3.502	0.58	0.969	4.287



Fase I; Gráfica 1 Tiempo de cocimiento 10 minutos.

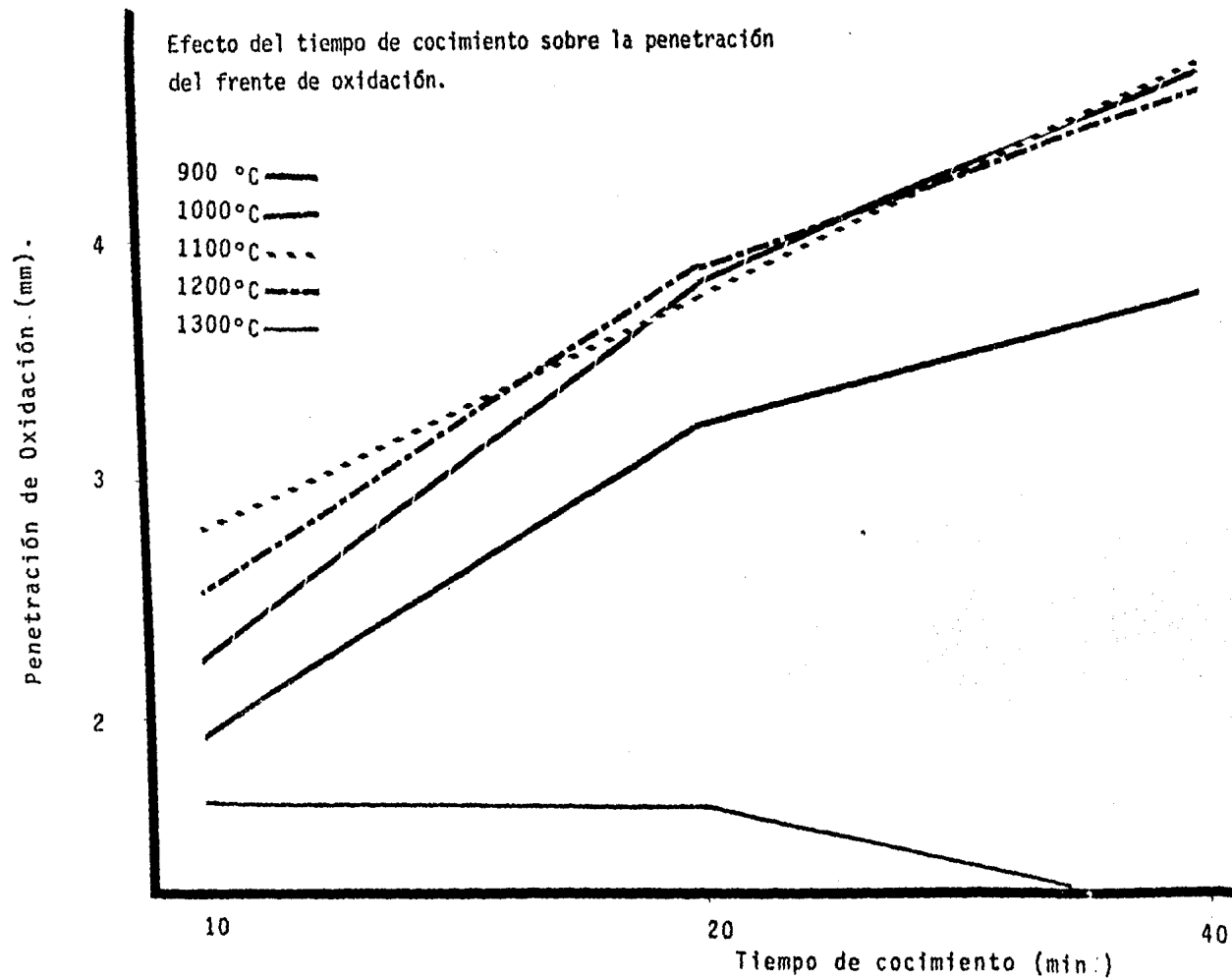


Fase I; Gráfica 2 Tiempo de cocimiento 20 minutos.

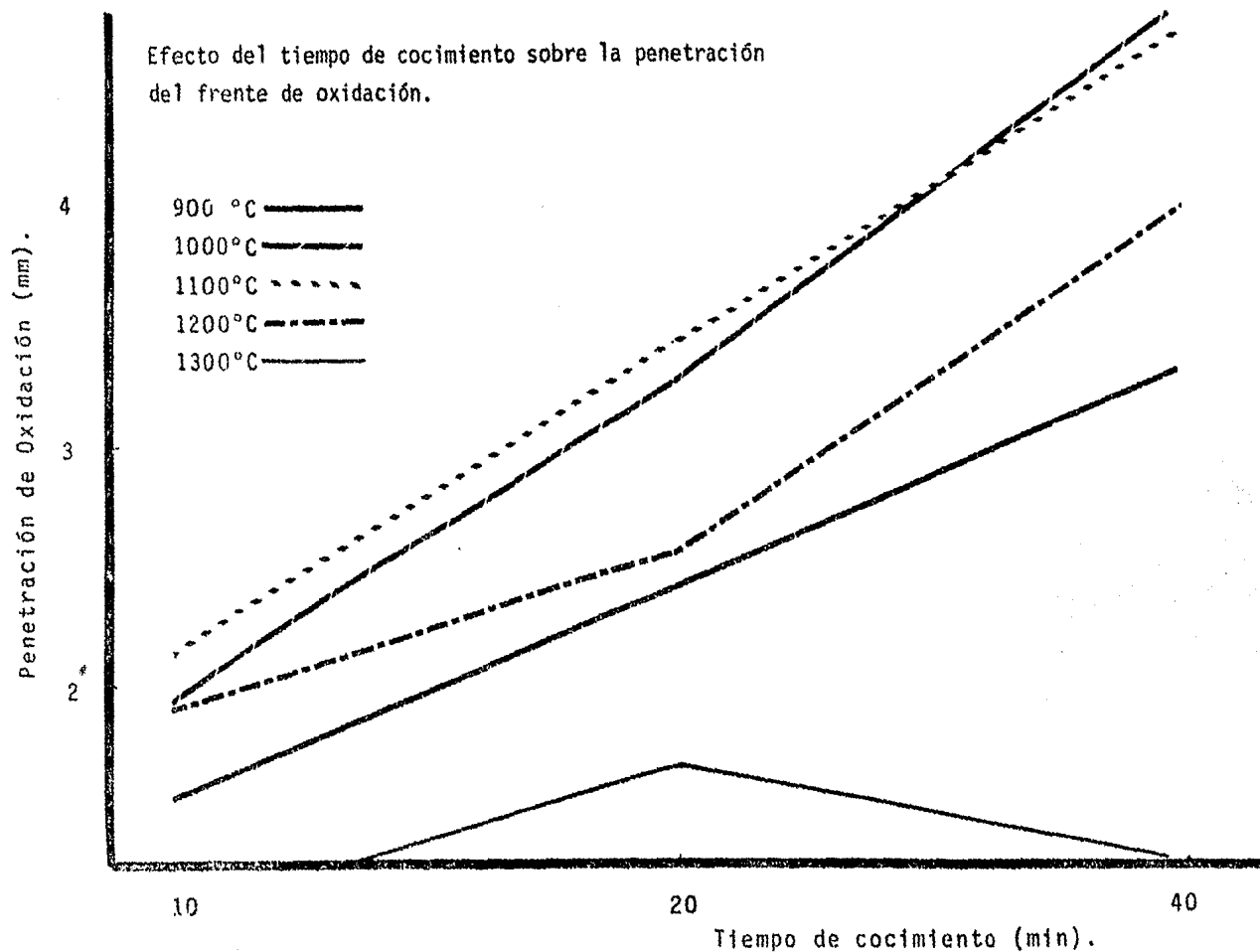


Fase I; Gráfica 3 Tiempo de cocimiento 40 minutos.

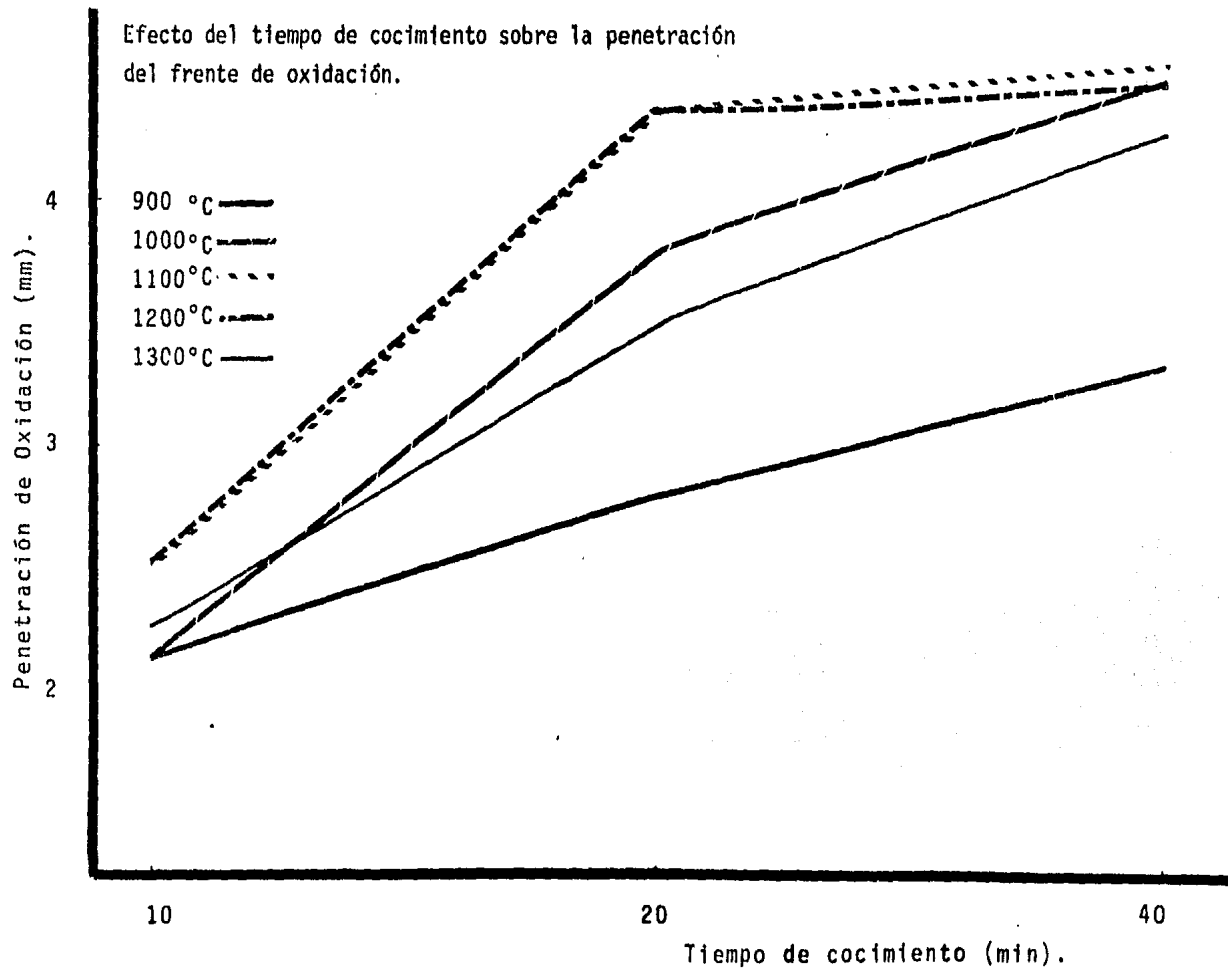
Efecto del tiempo de cocimiento sobre la penetración del frente de oxidación.



Fase I; Gráfica 4 Pelets "A"



Fase I; Gráfica 6 Pelets "B"

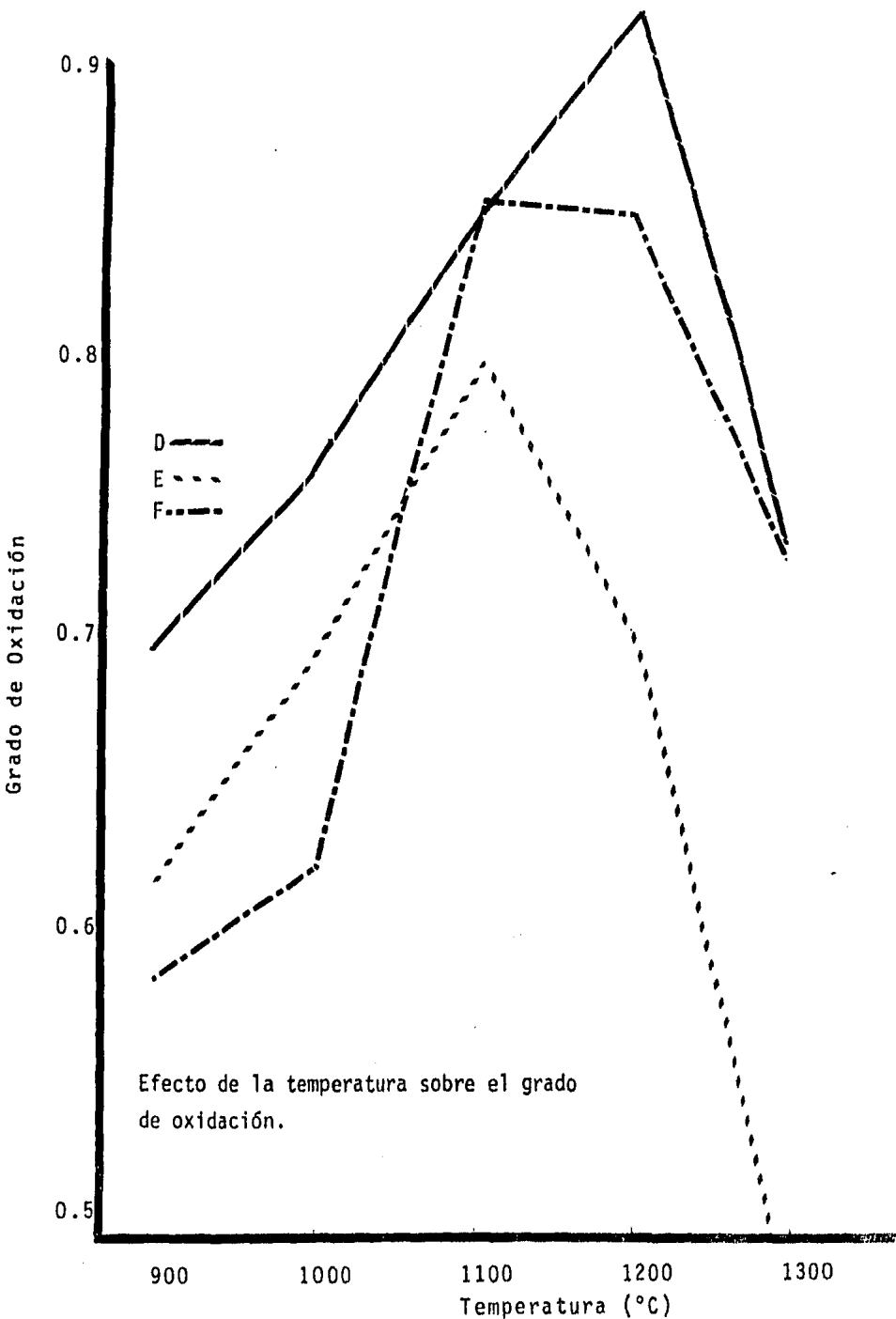


Fase I; Gráfica 6 Pelets "C"

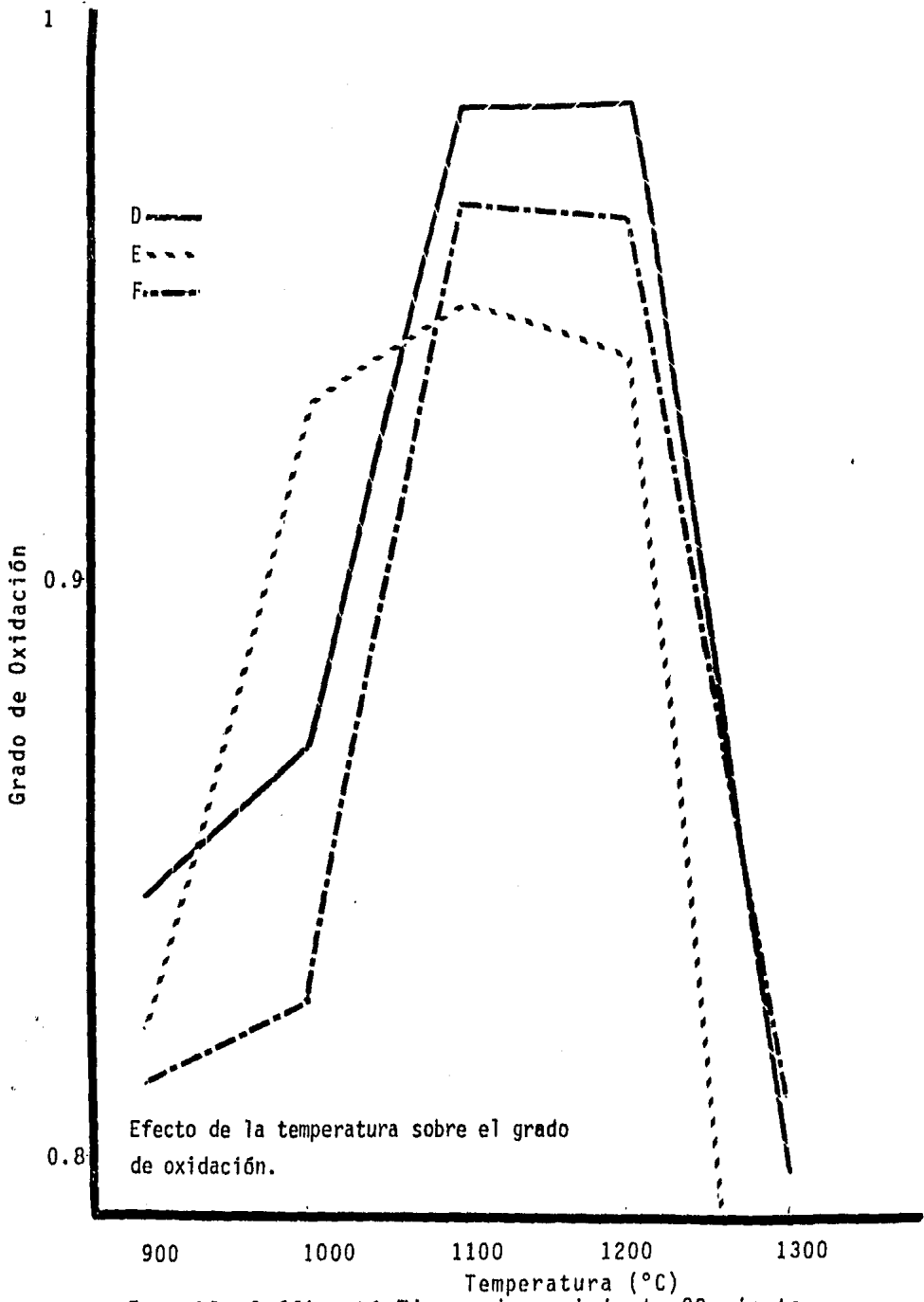


TABLA IV.- HIERRO FERROSO REMANENTE ( $Fe^{++}$ ), GRADO DE OXIDACION (OX) Y  
 PENETRACIONES DE OXIDACION TEORICAS (X), OBTENIDAS PARA LA  
 FASE "II"

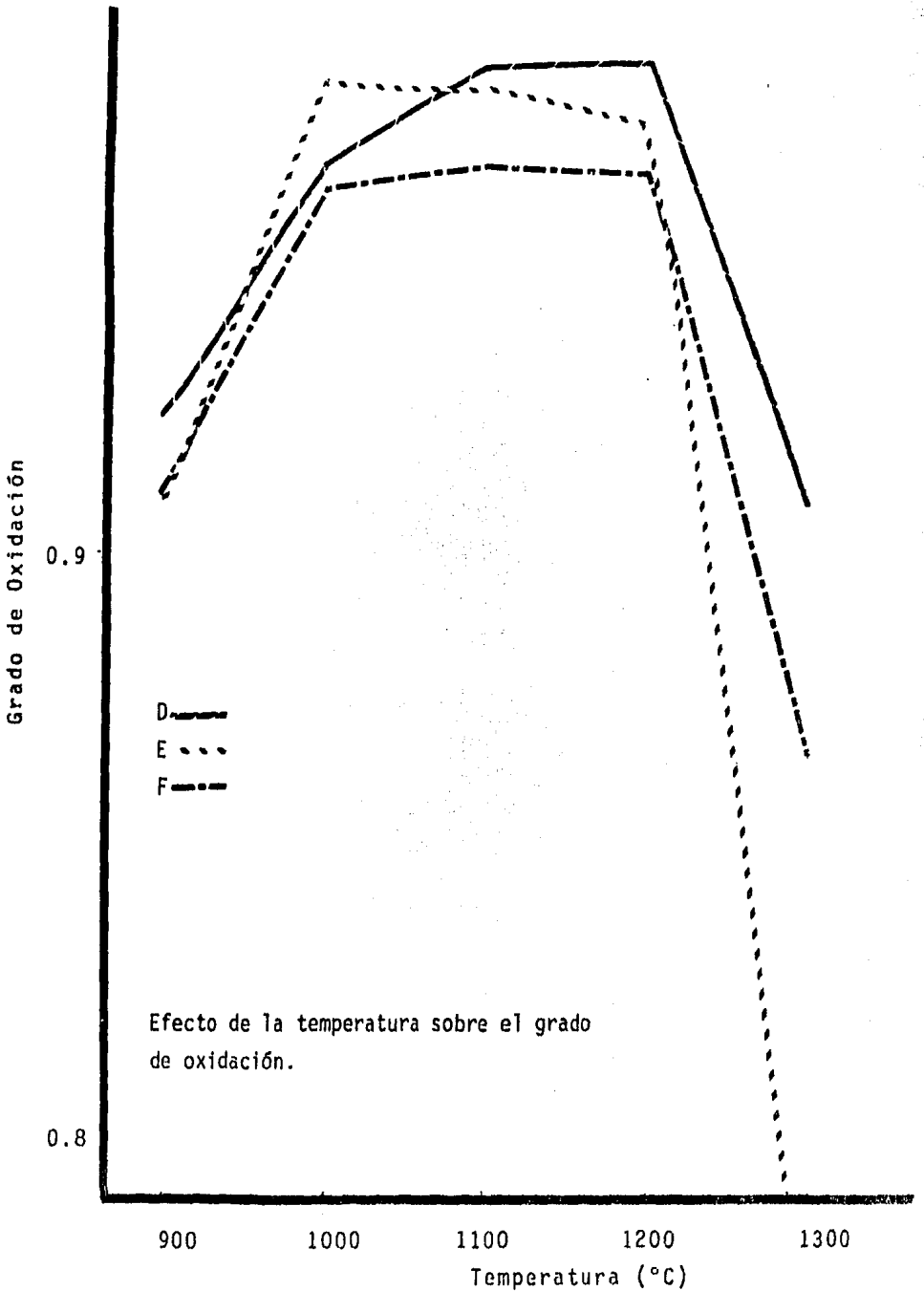
CONCENTRADO	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE OXIDACION								
		10 MINUTOS			20 MINUTOS			40 MINUTOS		
		Fe <sup>++</sup> %	OX	X mm	Fe <sup>++</sup> %	OX	X mm	Fe <sup>++</sup> %	OX	X mm
D	900	5.50	0.696	2.048	2.80	0.845	2.893	1.37	0.924	3.606
	1000	4.39	0.757	2.350	2.34	0.875	3.092	0.59	0.967	4.253
	1100	2.78	0.846	2.900	0.32	0.932	4.612	0.31	0.983	4.643
	1200	1.66	0.908	3.429	0.30	0.983	4.643	0.29	0.984	4.674
	1300	4.84	0.733	2.225	3.65	0.798	2.585	1.64	0.909	3.443
E	900	6.54	0.613	1.695	3.01	0.822	2.734	1.55	0.908	3.429
	1000	5.20	0.692	2.029	1.17	0.931	3.687	0.32	0.981	4.582
	1100	3.48	0.794	2.559	0.91	0.946	3.838	0.36	0.979	4.526
	1200	5.03	0.702	2.975	1.03	0.939	3.790	0.44	0.974	4.398
	1300	8.88	0.474	1.205	7.27	0.570	1.533	6.76	0.600	1.645
F	900	6.33	0.561	1.500	2.69	0.813	2.676	1.29	0.910	3.449
	1000	5.50	0.618	1.715	2.50	0.827	2.767	0.55	0.962	4.149
	1100	2.17	0.849	2.922	0.50	0.915	4.206	0.49	0.966	4.225
	1200	2.22	0.846	2.900	0.55	0.912	4.149	0.50	0.965	4.206
	1300	3.93	0.727	2.196	2.71	0.812	2.670	1.94	0.865	3.044



Fase II; Gráfica 7 Tiempo de cocimiento 10 minutos.

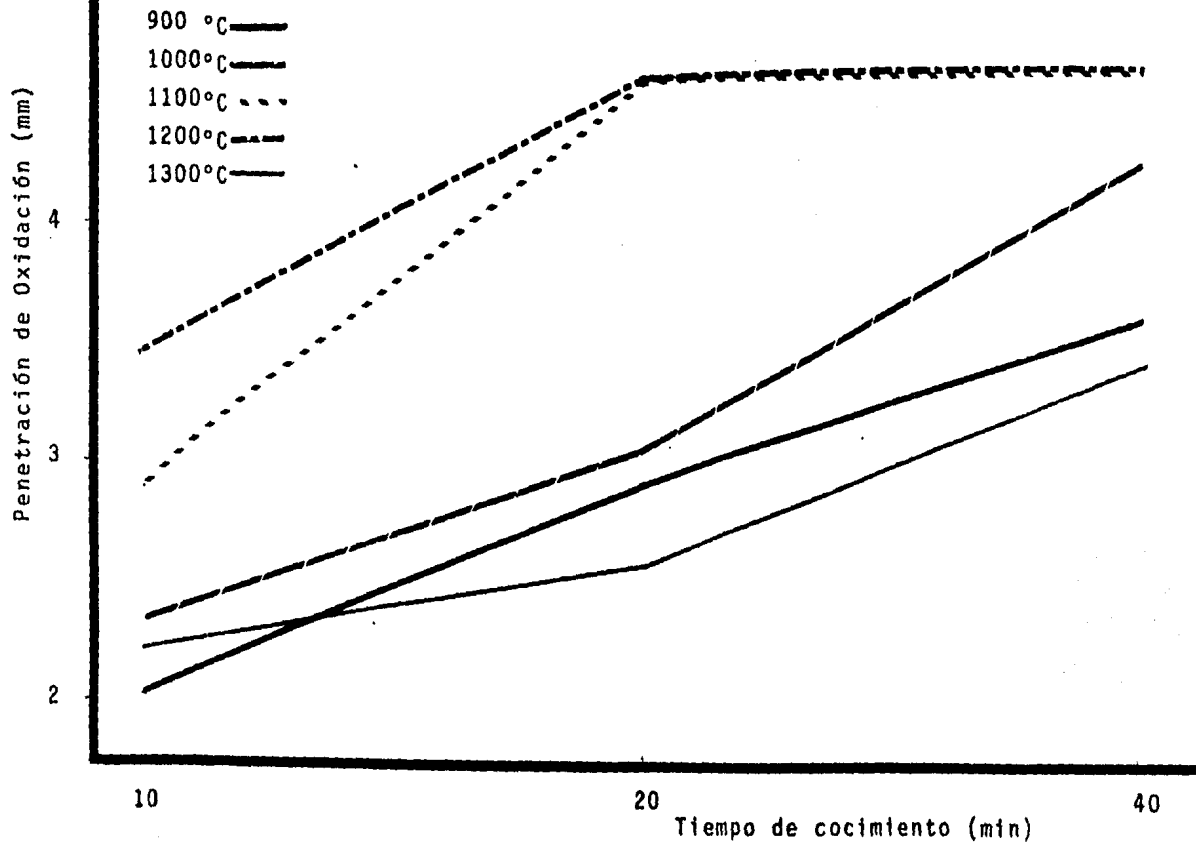


Fase II; Gráfica 18 Tiempo de cocimiento 20 minutos.

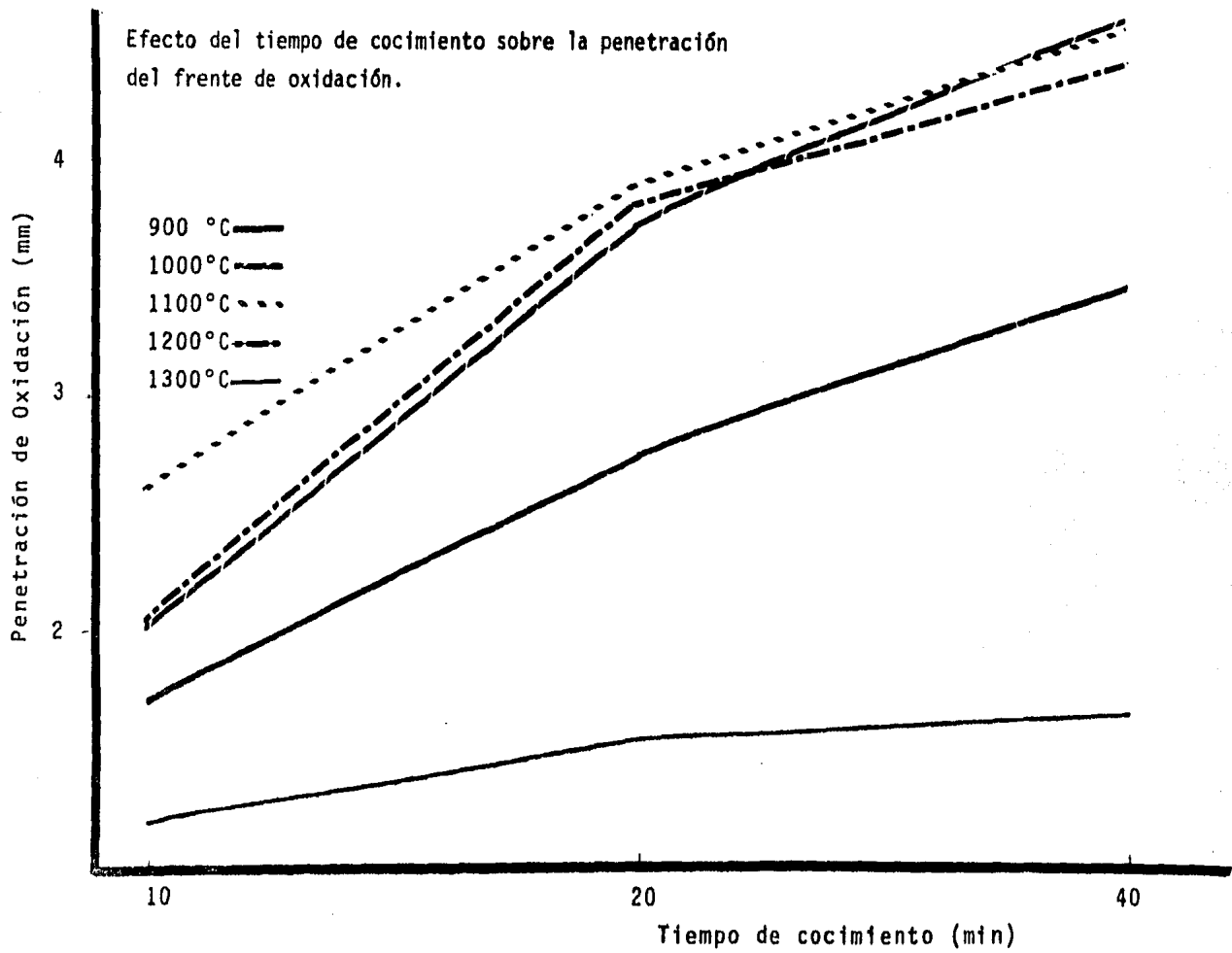


Fase II; Gráfica 9 Tiempo de cocimiento 40 minutos.

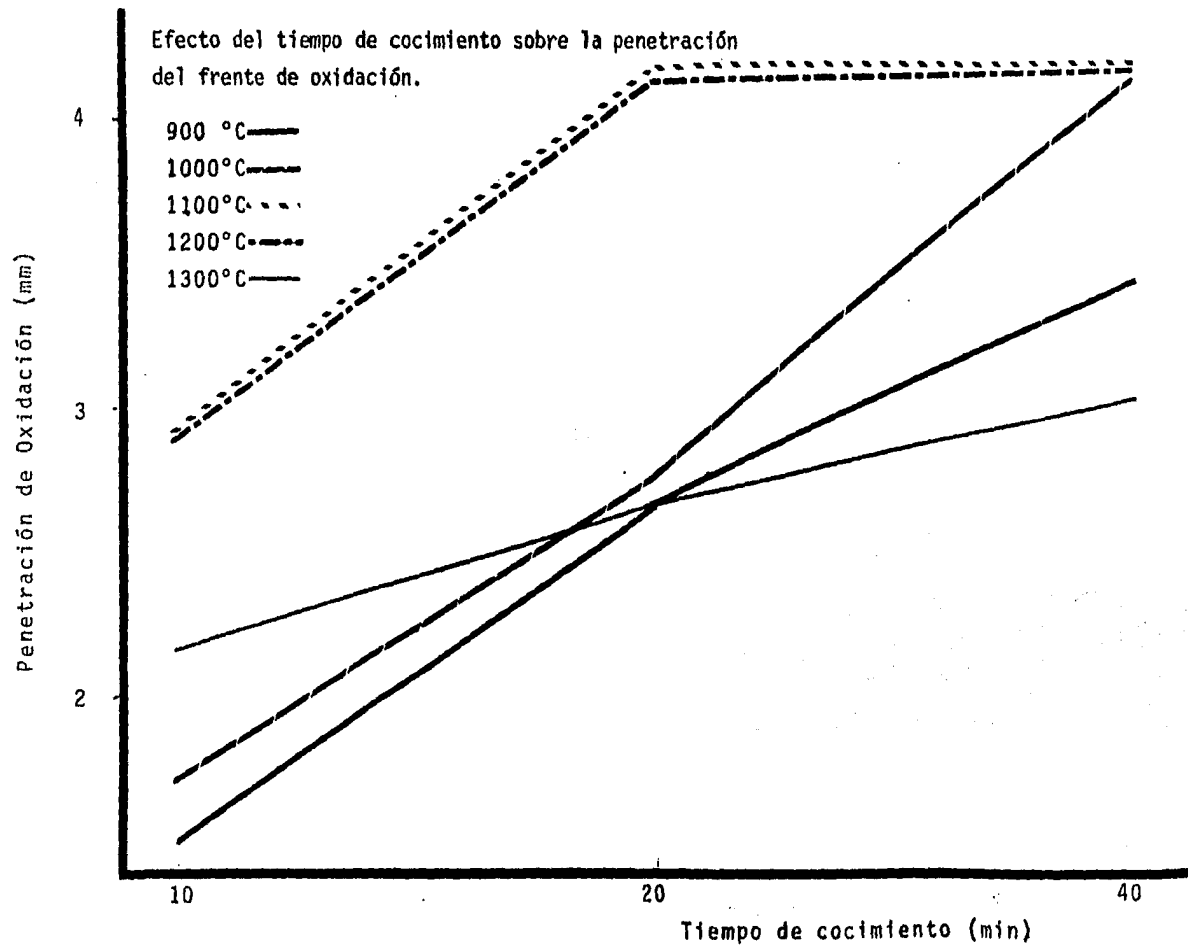
Efecto del tiempo de cocimiento sobre la penetración del frente de oxidación.



Fase II; Gráfica 10 Pelets "D"



Fase II; Gráfica 11 Pelets "E"



Fase II; Gráfica 12 Pelets "F"

TABLA V.- VALORES DE LA CONSTANTE DE DIFUSION EXPERIMENTAL  
 "K" (MM<sup>2</sup>/MIN.), OBTENIDOS PARA LAS  
 FASES "I" Y "II"

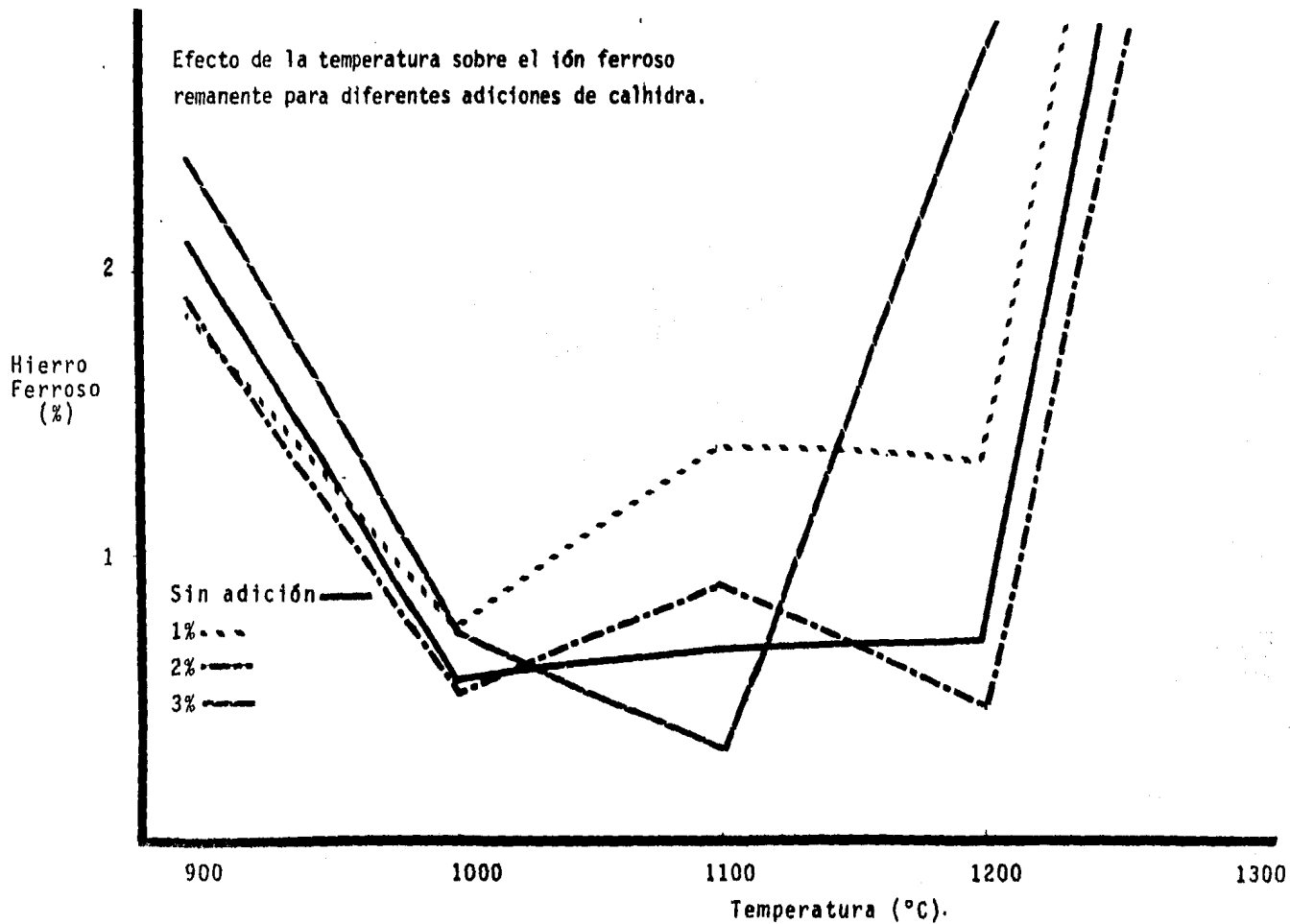
		TIEMPO DE COCIMIENTO (MIN)								
		10	20	40			10	20	40	
CONCEN- TRADO,	TEMP. (°C),	K	K	K	CONCEN- TRADO,	TEMP. (°C)	K	K	K	
A	900	0.148	0.167	0.106	D	900	0.164	0.145	0.100	
	1000	0.189	0.216	0.138		1000	0.207	0.160	0.124	
	1100	0.273	0.212	0.139		1100	0.290	0.270	0.136	
	1200	0.230	0.223	0.135		1200	0.373	0.272	0.137	
	1300	0.110	0.053	0.014		1300	0.189	0.121	0.094	
B	900	0.097	0.107	0.018	E	900	0.094	0.128	0.094	
	1000	0.148	0.173	0.115		1000	0.120	0.135	0.120	
	1100	0.174	0.186	0.139		1100	0.294	0.244	0.123	
	1200	0.145	0.123	0.141		1200	0.290	0.240	0.122	
	1300	0.050	0.059	0.088		1300	0.185	0.127	0.078	
C	900	0.177	0.138	0.090	F	900	0.118	0.132	0.093	
	1000	0.177	0.214	0.132		1000	0.161	0.206	0.134	
	1100	0.233	0.255	0.134		1100	0.238	0.221	0.132	
	1200	0.232	0.255	0.132		1200	0.168	0.214	0.128	
	1300	0.192	0.192	0.125		1300	0.063	0.049	0.028	



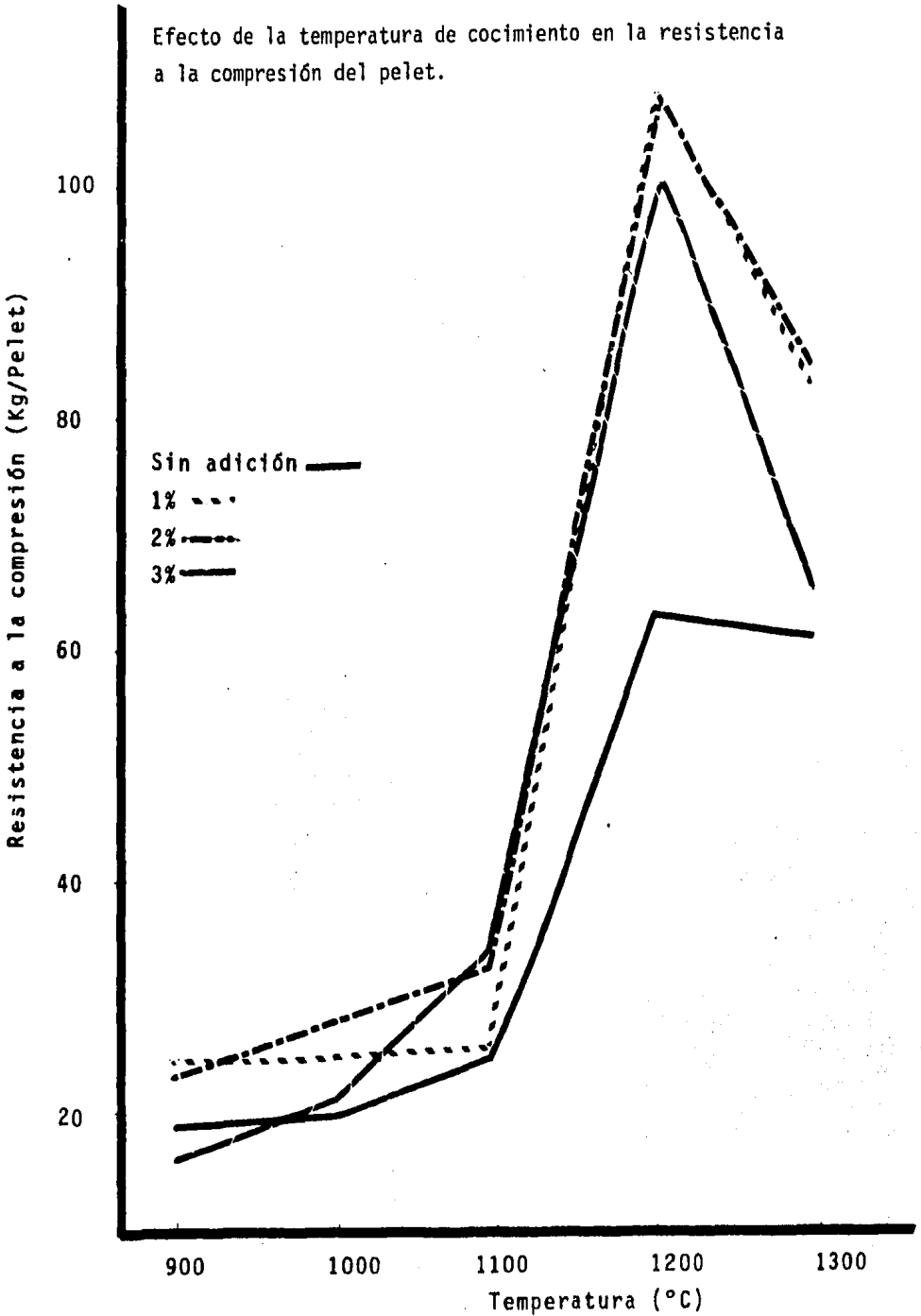
**TABLA VI.- HIERRO FERROSO REMANENTE ( $Fe^{++}$ ) Y RESISTENCIA  
A LA COMPRESION ( COMP) OBTENIDOS PARA LA ---  
F A S E "III"**

TEMP. °C.	ADICION DE CALHIDRA.							
	SIN ADICION		1%		2%		3%	
	COMP. KG/PELET	$Fe^{++}$ %	COMP. KG/PELET	$Fe^{++}$ %	COMP. KG/PELET	$Fe^{++}$ %	COMP. KG/PELET	$Fe^{++}$ %
900	19	2.10	25	1.85	23	4.42	16	2.40
1000	20	0.55	25	0.74	28	0.47	21	0.73
1100	25	0.67	27	1.37	35	0.89	34	0.31
1200	63	0.70	108	1.32	107	0.50	100	2.72
1300	61	5.61	83	6.97	85	1.90	65	4.72

\* Tiempo de cocimiento 20 Min.



Fase III; Gráfica 13 Tiempo de cocimiento 20 minutos.



Fase III; Gráfica 14 Tiempo de cocimiento 20 minutos.

#### IV. DISCUSION DE RESULTADOS

En las tablas III y IV, se reportan datos de hierro ferroso (Fe<sup>++</sup>), grado de oxidación (OX) y penetración de oxidación (X).

A partir de los porcentajes de hierro ferroso determinados vía Satmagan, se calculó el grado de oxidación por medio de la siguiente ecuación:

$$OX = \frac{Fe^{++} \text{ Inicial} - Fe^{++} \text{ Final}}{Fe^{++} \text{ Inicial}}$$

Una vez calculados los valores de OX para los diferentes -- concentrados se introdujeron en la ecuación (1), obteniendo se los valores de la penetración de oxidación y posteriormente con la ecuación (2), los valores de "K", correspondientes a cada temperatura y tiempo ensayados, los cuales se encuentran reportados en la tabla V. En la tabla VI, se reportan valores de resistencia a la compresión y hierro -- ferroso obtenidos en la fase III.

El análisis de los resultados se realizará individualmente para cada fase.

**FASE I.-** Para la explicación individual de cada tipo de -- pelet se utilizan las gráficas que relacionan el grado de oxidación con la temperatura y las observaciones microscópicas realizadas.

pelets "A", para este tipo de pelet, se observa que a temperaturas menores a 1000°C, la oxidación esta controlada por la reacción de magnetita a hematita, la cual es más rápida conforme se aumenta la temperatura (10). Esto para tiempos de 10, 20 y 40 minutos de cocimiento.

A 1000°C, se alcanza la máxima velocidad de oxidación y al incrementarse la temperatura ya no se logra una mayor oxidación debido a que la velocidad de la reacción es tal que consume todo el oxígeno disponible y aunque la temperatura incrementa la velocidad de reacción, el factor controlante es la difusión del oxígeno en la masa del pelet. En la gráfica 4, se observa que la penetración del frente de oxidación -- para este mineral, es similar entre 1000°C y 1200°C, y en las gráficas 2 y 3, se muestra un grado de oxidación semejante dentro de este rango de temperatura. En la gráfica correspondiente a 10 minutos lo anterior no se observa y se piensa que esto es debido a que en intervalos cortos de tiempo, no se distingue la difusión del oxígeno en la masa del pelet, -- como mecanismo controlante de la oxidación.

Arriba de 1200°C para tiempos de 20 y 40 minutos de cocimiento y arriba de 1100°C para tiempos de 10 minutos el oxígeno empieza a tener problemas en la difusión del pelet consecuencia de la formación de una fase líquida (escoria), que obstruye el paso del mismo y conforme se aumenta más la temperatura, se tiene una mayor cantidad de escoria fundida por lo cual la difusión del oxígeno es más lenta y en consecuencia la oxidación del pelet.

Pelets "B". Para tiempos de cocimiento de 10 y 20 minutos se observa que la reacción de oxidación es la controlante del proceso hasta una temperatura de 1100°C, temperatura a la -- cual la oxidación pasa a ser función de la difusión del oxígeno en la escoria fundida. La razón de que se lleve a cabo una fusión de escorias a una menor temperatura que para el pelet "A", es consecuencia de la gran cantidad de ganga que presenta el pelet B. Debido a la lenta velocidad de oxidación que posee, sólo en tiempos de 40 minutos se puede observar una oxidación controlada por una difusión del oxígeno en la masa del pelet, esto en un rango de 1000°C a 1100°C.

Pelets "C". Al igual que el tipo de pelet anterior, para tiempos de cocimiento de 10 y 20 minutos, la oxidación está controlada por la reacción de oxidación hasta 1100°C, una explicación a esto, es que tanto el pelet "B" como el "C", presentan una menor superficie específica que el pelet tipo "A" y por lo tanto menor área de reacción. Entre 1100°C y 1200°C la oxidación está controlada por la difusión del oxígeno en la masa del pelet, a partir de 1200°C se presenta una fusión de escoria que obstruye parcialmente el paso del oxígeno, para este caso es menor la interferencia de las escorias fundidas, con respecto a los casos anteriores, por la menor cantidad de ganga en el pelet.

En tiempos de 10 y 20 minutos se observan diferencias en los grados de oxidación de los tres minerales en el rango de 1000°C a 1200°C, lo que sugiere diferencias en la difusión del oxígeno en la masa del pelet, atribuibles a distintas superficies específicas. (Gráficas 1 y 2).

En 40 minutos se alcanzan los máximos grados de oxidación para los tres minerales y éstos son similares entre 1000°C y 1100°C al elevar la temperatura a 1200°C, el pelet tipo "B", empieza a sufrir interferencias por la escoria y arriba de esta temperatura tanto el pelet "A" como el "B", muestran una disminución muy drástica en sus grados de oxidación. (Gráfica 3).

Es de esperarse que al incrementarse el tiempo de exposición a una temperatura dada, se logre una mayor penetración del frente de oxidación, lo anterior se observa para casi todos los casos en las gráficas (4), (5) y (6). Sin embargo para los pelets "A" y "B" a una temperatura de exposición de 1300°C, se observa una disminución de la penetración del frente de oxidación al aumentar el tiempo. Esto sólo puede atribuirse a la reversión de la hematita a magnetita - - -

mencionada por Orvar Nyquist (17), R. Urbina (18) y R.B. -  
Cooke (19).

**FASE II.-** Para esta fase del estudio, se utilizaron concen-  
trados con aditivo en la proporción que se estaba empleando  
en la planta peletizadora en el momento en que fueron toma-  
das las muestras.

Los resultados obtenidos se analizan en comparación con los  
presentados en la Fase "I", la relación es de la siguiente  
manera: El concentrado "D" corresponde al "A" con aditivo,  
el concentrado "E" corresponde al "B" con aditivo y el con--  
centrado "F" corresponde al "C" con aditivo.

Comparando las gráficas 7,8 y 9 con las gráficas 1,2 y 3 --  
las cuales relacionan el grado de oxidación con la temperatu-  
ra, se aprecia que se logra una mayor oxidación para los con-  
centrados "D" y "E" para tiempos de 10 y 20 minutos que para  
los "A" y "B" (concentrados sin aditivo), no así para el "F"  
("C" con aditivo), que presenta un menor grado de oxidación  
que el "C" en las mismas condiciones.

Se detecta también que para los concentrados "D", "E" y "F"  
la reacción de oxidación es el proceso controlante hasta una  
temperatura de 1100°C. Para los concentrados "D" y "F", arri-  
ba de 1100°C y hasta 1200°C, el factor controlante de la oxi-  
dación es la difusión del oxígeno en la masa del pelet y pa-  
ra temperaturas mayores a 1200°C, la difusión del oxígeno en  
una fase líquida es la controlante del proceso de oxidación.  
Para el concentrado "E" la temperatura a la cual la difusión  
del oxígeno en la escoria es el factor controlante de la oxi-  
dación es de 1100°C.

En los pelets "D" y "E", en esta última etapa de la oxidación se tiene una mayor difusión del oxígeno debido al carácter básico de la escoria formada. Para el pelet "F", se observa un efecto contrario en la oxidación por la mayor cantidad de ganga en el mismo (que el "C"). Además algunas referencias ponen de manifiesto que pelets endurecidos -- (oxidados) con adiciones de MgO tienen un mayor contenido de hierro ferroso (<sup>20</sup>). Estos pelets presentan mayor contenido de MgO.

Al hacer una comparación de la penetración de la oxidación calculada, contra la penetración medida con ayuda del microscopio se encontraron algunas diferencias importantes.

Estas diferencias se deben a las siguientes causas, observadas en el microscopio.

a). Para pelets con muy alto grado de oxidación (con contenidos de hierro ferroso menores a 0.60%).

Se encontró que no existía un núcleo real de magnetita sino granos aislados de magnetita parcialmente oxidada, ubicados preferencialmente hacia el núcleo.

b). Para pelets con grado de oxidación muy pobre (alto hierro ferroso, mayor a 3%).

Se observa no solamente un núcleo de magnetita recristalizada, sino también grupos de partículas de magnetita en la periferia.

El cálculo teórico de la penetración de la oxidación considera que todo el ión ferroso, está formando magnetita en el núcleo del pelet, por lo que los dos casos anteriores difieren totalmente de lo esperado.



Los casos en que los valores teóricos de la penetración de oxidación se acercan a los obtenidos con la ayuda del microscopio, son aquellos en que los pelets presentan cuatro zonas características, dichas zonas son las siguientes:

**I. HEMATITA DISPERSA**

Las partículas de hematita son pequeñas e irregulares, la escoria no está bien distribuida y presenta pequeños poros de forma irregular.

**II. HEMATITA RECRISTALIZADA**

Se presentan partículas de hematita grandes y redondeadas, escoria bien distribuida y pocos poros con formas más redondas.

**III. MAGNETITA PARCIALMENTE OXIDADA**

Partículas de magnetita con manchas de hematita, una escoria bien distribuida y pocos poros pero grandes.

**IV. MAGNETITA RECRISTALIZADA**

Partículas de magnetita redondeadas con escoria bien -- distribuida y poros redondeados.

Estas cuatro zonas mencionadas, se presentan comúnmente en -- pelets producidos en plantas peletizadores que tratan mineral magnético.

En la tabla V, se encuentran reportados datos de la constante de difusión obtenidos experimentalmente para los diferentes concentrados estudiados.

Para el cálculo de estos datos, se supuso que la oxidación -- estaría controlada por la difusión del oxígeno en la masa -- del pelet. Es por ésto que los mayores valores obtenidos para

los diferentes tiempos de cocimiento, son aquellos en que normalmente se cumple con lo estipulado.

Los bajos valores de la constante de difusión obtenidos -- (para temperaturas de 1300°C y 900°C generalmente), se debe a que la oxidación estaba controlada por otros factores -- como fueron: Velocidad de reacción, difusión del oxígeno en una fase líquida y reversión de la reacción de oxidación.

**FASE III.-** La finalidad de esta parte del estudio es observar el efecto en la oxidación y en el endurecimiento del -- pelet, al variar la adición de calhídra a diferentes temperaturas de cocimiento para un sólo tipo de concentrado (G).

Se empezará por discutir la influencia que tiene la calhídra en la oxidación y posteriormente en el endurecimiento -- del pelet.

En la gráfica 13, se encuentra relacionado el hierro ferroso con la temperatura para diferentes adiciones de calhídra. En dicha gráfica se aprecia que la oxidación está controlada por la reacción de oxidación hasta temperaturas menores a 1000°C. Arriba de esta temperatura y hasta que no existe presente una fase líquida la oxidación depende de la difusión del oxígeno en la masa del pelet, esto para los diferentes pelets producidos en ésta fase.

Para pelets sin adición de calhídra, hasta 1200°C, la oxidación es función de la difusión del oxígeno en la masa del -- pelet, arriba de esta temperatura la difusión del oxígeno -- en la fase líquida determina la oxidación.

Al adicionar 1% de calhídra se presenta un aumento en el -- hierro ferroso con respecto al que no tiene adición y se --

piensa que es debido a que al tener una cierta cantidad de fundente éste promueve una recristalización y crecimiento de grano de la hematita, la cual debido a que disminuye su permeabilidad, retarda la velocidad de oxidación del pelet (15). Esto puede estar apoyado en que el pelet con 1% de calhidra presenta una mayor resistencia a la compresión que el que no tiene aditivo. A partir de 1200°C, la mayor cantidad de ganga fundida impide una buena oxidación del mismo.

Para adiciones de 2% de calhidra a 1100°C, existe un ligero aumento en el hierro ferroso. Se piensa que es debido a una recristalización y crecimiento de grano, pero a partir de 1100°C, la escoria formada, ahora de carácter más básico fomenta la oxidación hasta llegar a una temperatura de 1200°C, a la cual se obtiene una máxima oxidación y buena formación de escorias. Arriba de esta temperatura es mayor la influencia negativa que tiene la cantidad de escoria formada y la posible reversión de la hematita, por lo que, se logran oxidaciones muy pobres.

Para pelets producidos con 3% de calhidra adicionada, se observa una fusión de escorias de tipo básico a menor temperatura lo cual promoverá la oxidación hasta 1100°C; arriba de esta temperatura la gran cantidad de escoria impide la difusión del oxígeno en el pelet; además las observaciones microscópicas confirman lo expuesto por Orvar Nyquist (17), con respecto al efecto del CaO de disminuir la temperatura de reversión de la hematita. Para ese tipo de pelets, a una temperatura de 1200°C, se encontró la coexistencia de conglomerados de hematita y magnetita en la periferia del pelet.

Por lo que respecta a la resistencia a la compresión, en la gráfica (14), se observa que conforme aumenta la temperatura de cocimiento del pelet aumenta su resistencia a la compresión debido a la recristalización y crecimiento de grano, además de una formación de escorias a altas temperaturas.

A 1200°C, se observa una máxima resistencia a la compresión ya que es cuando se tiene la mayor oxidación y una buena -- formación de escorias. Para pelets sin adición de calhidra se tiene una menor resistencia física debido a que no con-- tiene la cantidad de calhidra necesaria para que promueva - una recristalización y crecimiento de grano adecuados.

Para una temperatura de 1300°C, se observó una mala oxida-- ción y ésto trae como consecuencia una disminución en la re-- sistencia a la compresión por la formación de grietas con-- céntricas entre el núcleo de magnetita y la periferia de he-- matita al llevarse a cabo el enfriamiento.

## VI.- CONCLUSIONES

De lo observado en los diferentes tipos de concentrados se puede definir que la cantidad de ión ferroso encontrada en los pelets al finalizar su cocimiento depende de los siguientes factores:

- a). **Velocidad de reacción.**- La cual se incrementa al incrementarse la temperatura.  
Para una misma temperatura, la superficie específica -- del concentrado (grado de finura de las partículas que lo componen), tiene una importancia fundamental ya que determina el área de reacción.
- b). **Difusión de oxígeno en la masa del pelet.**- El cual es el factor controlante cuando la velocidad de reacción es tal, que consume todo el oxígeno disponible, lo que en todos los casos empezó a ocurrir alrededor de los -- 1000°C. Este factor sigue controlando la oxidación hasta la temperatura en que aparece una fase líquida.
- c). **Difusión de oxígeno en la escoria fundida.**- La temperatura a la que aparece una escoria fundida en el pelet es variable y depende principalmente de la cantidad de ganga y fundentes presentes. En este estudio se observó desde 1100°C, hasta temperaturas superiores a 1200°C, - debe hacerse notar que la presencia de una fase líquida también favorece la recristalización y crecimiento de grano de los óxidos de hierro, produciendo un efecto negativo en la oxidación, pero incrementando la resistencia a la compresión del pelet frío.

Una adición adecuada de óxidos básicos (2% de  $\text{Ca(OH)}_2$  para el caso estudiado) promueve la formación de - - -

escorias básicas que facilitan la oxidación aún con la fase líquida presente.

Se espera que también la superficie específica del concentrado influya en la temperatura de formación de la fase líquida.

- d). **Reversión de la hematita a magnetita.**- Se observó que dicha reversión ocurre a temperaturas de 1300°C, a menos que se tenga un concentrado de muy alta ley.

La adición de CaO puede bajar la temperatura de esta reversión y de hecho se observó que adiciones de 3% de  $\text{Ca(OH)}_2$ , en el caso estudiado, la promueven aún a temperaturas de 1200°C.

De lo anterior se pueden resumir las siguientes características de las mezclas por peletizar, como principales influencias en la oxidación del pelet:

- Porcentaje de ganga.
- Porcentaje de fundentes adicionados.
- Superficie específica de los concentrados.

Dichas características deben considerarse seriamente al definir los ciclos de cocimiento de pelets de magnetita si se pretende obtener bajos porcentajes de ión ferroso residual en los pelets cocidos.

Con respecto a cada fase del estudio, en particular pueden plantearse las siguientes conclusiones:

**FASE I** (Concentrados sin aditivo).

- Para los diferentes tiempos de cocimiento, el concentrado "A" es el que presenta la mayor velocidad de reacción debido a su mayor superficie específica. Por otra parte, registra una marcada disminución en su grado de oxidación -- arriba de 1200°C, esto es atribuible a la presencia de -- una fase líquida (escoria) que interfiere en la oxidación y a una posible reversión de la hematita a magnetita.
- El pelet "B" es el que presenta el menor grado de oxidación y el que tiene una disminución en el mismo a mas baja temperatura, debido a una menor superficie específica (que el concentrado "A") y a un mayor contenido de ganga (que los otros concentrados), esto para tiempos de 10 y 20 minutos. Este tipo de pelet también presenta una posible reversión de la hematita a altas temperaturas.
- Para 10, 20 y 40 minutos de cocimiento, el pelet "C" presenta una velocidad de reacción menor que el "A" debido a su menor superficie específica, pero posee la menor disminución en el grado de oxidación a temperaturas mayores a 1200°C, consecuencia de la poca cantidad de ganga en el mineral lo que hace menos crítica la difusión del oxígeno en la escoria fundida que para los otros tipos de -- pelets estudiados.

**FASE II** (Concentrados con aditivo)

- Para el concentrado "D", se tiene un mayor grado de oxidación comparado con el "E" y "F", debido a que existe una mejor difusión del oxígeno en la masa del pelet. En comparación con el concentrado "A" (muestra sin aditivo), presenta una menor inhibición en la oxidación a altas temperaturas ya que el CaO adicionado forma una escoria lo --

suficientemente básica para fomentar la oxidación, lo anterior para los diferentes tiempos de cocimiento.

- Para tiempos de 10 y 20 minutos de cocimiento y en comparación con los concentrados "D" y "F", el concentrado "E" presenta el menor grado de oxidación y la más drástica -- disminución en el mismo a altas temperaturas, consecuencia de la mayor cantidad de ganga que contiene dicho mineral. En comparación con el concentrado "B" (concentrado sin aditivo), para tiempos de cocimiento de 10, 20 y 40 minutos, presenta una mejor oxidación cuando el proceso controlante de la misma es la difusión del oxígeno en -- una fase líquida, esto se debe al tipo de escoria formada (básica).
- Por otra parte, para el concentrado "F" se aprecia una mayor disminución en el grado de oxidación a 1300°C, con respecto al concentrado sin aditivo ("C"), esto para tiempos de 10, 20 y 40 minutos de cocimiento, lo anterior se debe a la presencia de una mayor cantidad de MgO en el pelet que tiene como consecuencia un mayor contenido de - hierro ferroso en el mismo.

### FASE III

- Conforme se aumenta la temperatura de cocimiento del pelet, se incrementa la velocidad de oxidación de éste, hasta una cierta temperatura la cual es función de la ganga del mineral y de su superficie específica.
- La presencia de una mayor cantidad de ganga promueve una recristalización y crecimiento de grano, que tiene como consecuencia una inhibición en la oxidación debido a la - menor permeabilidad de la hematita.



- Una vez lograda la fusión de la ganga, la cantidad y carácter de la misma determina el grado de oxidación que puede alcanzarse.
- La ganga fundida de carácter básico fomenta la oxidación hasta temperaturas de 1200°C para este tipo de concentrados, temperaturas mayores promueven la reversión de la hematita.
- La resistencia física del pelet depende de la recristalización y crecimiento de grano de la estructura del pelet, así como, de la formación de escorias que se lleve a cabo durante el cocimiento del mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ( 1 ) K. Meyer. "Pelletizing of iron ores"  
Verlag Stahleisenmbht Düsseldorf Germany (1980) p.p.  
(3-15).
- ( 2 ) H. Tamés. "Aglomeración de mineral de hierro"  
2do. Seminario de Beneficio de Minerales Gto. México,  
junio (1980) p.p. (116-131).
- ( 3 ) AHMSA "Propiedades tecnológicas de nueve tipos de pe-  
lets extranjeros"  
Dpto. de Investigación Siderúrgica Aplicada (1979 Re-  
porte Interno p.p. (2-6).
- ( 4 ) M. Tigerschiöld. "Aspects on pelletizing of iron ore  
concentrates"  
Journal of the Iron and Steel Institute may (1954) -  
p.p. (15-24).
- ( 5 ) G. Altamira. "The mineralogy of pelletized iron ore"  
Tesis de Maestría University of Sheffield (1980) p.p.  
(2-4).
- ( 6 ) D. Sosa. "Pruebas de control y caracterización de mi-  
nerales de hierro aglomerados (pelets)"  
Tesis de Licenciatura U.N.A.M. (1976) p.p. (43-85).
- ( 7 ) K. Meyer. "Development of iron ore pelletizing"  
Journal of the Iron and Steel Institute 179 (1955) -  
p.p. (1-7).

- ( 8 ) M. Soto "El proceso de peletizado del mineral de - -  
hierro Peña Colorada"  
Tesis de Licenciatura" U.A.S. L.P. (1984) p.p. (3-42).
- ( 9 ) C.M.B.J. Peña Colorada "Nomenclatura o terminología -  
utilizada en las características del pellet"  
Laboratorio y Control del Proceso México, diciembre -  
(1977) p.p. (1-7).
- (10 ) R. Moyano y F. García "Estudio de la oxidación de pe--  
lets de magnetita" Rev. Metal. CENIM vol. 7 (1971)Núm.  
3 p.p. (191-200).
- (11 ) B. Bjorkvall and G. Thaning "Test methods for pellets  
used in research and production, Sweden"  
Society of Mining Engineers" AIME vol. 254 jun (1973)  
p.p. (152-160).
- (12 ) A. Ishimitsu "On the swelling of pellets during reduc-  
tion"  
Tetsu-to-Hagané Overseas vol. 5 No.3 sept. (1965) p.p.  
(214-216).
- (13 ) HYLISA "Caracterización metalúrgica de pellet de Alzada  
elaborados con diversos aditivos"  
Gcia. Ingeniería de Proceso. Materias Primas, agosto -  
(1982).
- (14 ) A. Berzins and C.A. Czako. "Comparación entre pellets -  
ácidos y básicos y su efecto en las características de  
fusión en el Alto Horno"  
Siderúrgica Latinoamericana No. 235 noviembre 1979 p.p.  
(81-83).

- ( 15 ) G. Altamira "Introducción al estudio de microestructura de pelet de mineral de hierro" Curso Interno - C.M.B.J. Peña Colorada (1981).
- ( 16 ) J.T. Fitton and D. C. Goldring "Constitution of iron ore pellets in relation to time and temperature of firing"  
Journal of the Iron and Steel Institute May. (1966)  
p.p. (452-458).
- ( 17 ) O. Nyquist "Studies of the effect of gangue in the sintering of rich magnetite and hematite concentrates";  
Jernkont Ann 146 (1962) p.p. 82-87).
- ( 18 ) R. Urbina "Descripción de estructuras de sinterizados de minerales de hierro" Rev. Metal CENIM vol. 14 (1971) No. 2 p.p. (82-84).
- ( 19 ) R. B. Cooke and W. F. Stowasser "The effect of heat treatment and certain additives on the strength of fired magnetite pellets"  
Mining Engineering Transactions AIME december (1952).  
p.p. (1223-1230).
- ( 20 ) L. Bentell and G. Mathisson "Oxidation and slag-forming process in dolomite-fluxed pellets based on magnetite concentrates".  
Scandinavian Journal of Metallurgy 7 (1978) p.p. -- (230-236).