



T
553.46:
A284

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

" Separación Hidrometalúrgica del Oxido de Titanio Asociado con Magnetita en las Arenas Negras "

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del título de:

INGENIERO DE MINAS

presentada por:

LEONARDO AGUIRRE M.

GUAYAQUIL-ECUADOR

1996

AGRADECIMIENTO

A Dios, nuestro creador.

Al Ing. Hugo Eguez, Director de Tesis, por su dirección.

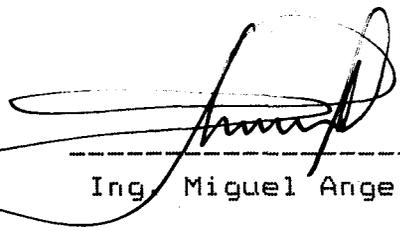
Al Dr. Chóez, jefe del laboratorio del Instituto de Química, por su atenta colaboración.

A mi familia, por todo el apoyo que me han brindado.

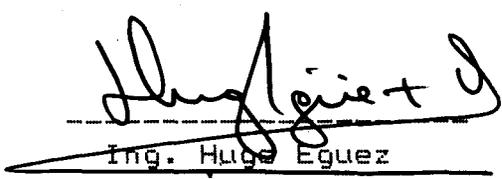
DEDICATORIA

A mi tío Alejandro Maldonado
Rivera, por su invaluable apoyo
a lo largo de toda mi vida.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL



Ing. Miguel Angel Chávez
DECANO



Ing. Hugo Eguez
DIRECTOR DE TESIS



Ing. W.F. Camacho Navarro



Ing. Coralía de la Cadena

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Ebuez', written over a horizontal dashed line.

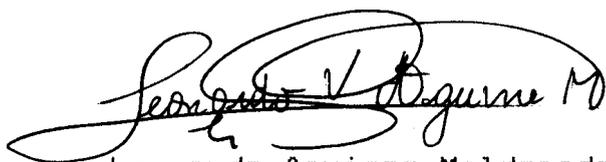
ING. HUGO EBUEZ

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

La responsabilidad par los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Leonardo V. Aguirre M.', with a large, stylized flourish at the end.

Leonardo Aguirre Maldonado

RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad la obtención del dióxido de titanio asociado en solución sólida con la magnetita existente en las arenas negras de la península. Para lograr este objetivo se trabajó con las arenas negras de Chanduy y se realizó el estudio en el laboratorio de mineralurgia de la F.I.C.T. de la E.S.P.Ó.L.

En el capítulo 1 se realiza una breve explicación sobre la formación de las arenas negras y se recopila cierta información sobre los estudios realizados para determinar zonas de un posible valor económico en el país así como sus posibles usos industriales.

En el capítulo 11 se realizaron los análisis y pruebas que determinaron un promedio de 24.5% de contenido de TiO_2 en la magnetita y los parámetros de concentración y molienda que permitieron obtener un concentrado casi puro de magnetita finamente molida. Se obtuvo un índice de trabajo de 13.51 kw-hr/ST para la magnetita. Se recomienda una molienda en húmedo y el uso de la mesa concentradora.

En el capítulo 111 se procedió a obtener el dióxido de titanio del concentrado de magnetita por métodos hidrometalúrgicos y a conocer las particularidades que presenta éste proceso. Se determinó un porcentaje de disolución del 80% para el TiO_2 . Se obtuvo un precipitado de dióxido de titanio con hierro a un PH entre 5 y 6. Se

presentan las condiciones de disolución y de precipitación del TiO_2 , así como el consumo de materia prima necesaria para el proceso.

En el capítulo IV se realiza un estudio estimativa de costos para procesar una tonelada de dióxido de titanio en base al consumo de materia prima y al consumo energético del diseño de la planta de procesamiento del capítulo III. Se obtuvo un costo de 12.257.506,00 sucres por tonelada de pigmento procesado en una planta de capacidad de 2 toneladas por día.

En el capítulo V se exponen las conclusiones de la investigación y se presentan recomendaciones para mejorar el proceso para obtener un pigmento de titanio de alta calidad.

INDICE GENERAL

	página
RESUMEN	5
INDICE GENERAL	7
INDICE DE FIGURAS	10
INDICE DE TABLAS	11
INDICE DE FOTOGRAFIAS	12
ABREVIATURAS	13
INTRODUCCION	15
CAPITULO I	
ARENAS TITANIFERAS	17
1.1 Generalidades	17
1.2 Geología	19
1.3 Ocurrencia en el país	23
1.4 Utilización en la industria	30
CAPITULO II	
SEPARACION DE LA MAGNETITA	31
2.1 Recolección de la muestra	31
2.2 Preparación de la muestra	32
2.3 Análisis Mineralógico Semicuantitativo	33
2.4 Composición Química de las Magnetitas	35
2.5 Distribución Granulométrica de las Arenas y las Magnetitas	35
2.6 Separación Gravimétrica por Vía Húmeda	38
2.6.1 Pruebas de Laboratorio	44
2.6.2 Resultados	46

2.7	Molienda.....	50
2.7.1	Principio del Molino de Bolas	51
2.7.2	Prueba de Laboratorio..	54
2.7.3	Obtención de Magnetita Finamente Molida.....	61

CAPITULO 111

OBTENCION DEL DIOXIDO DE TITANIO

3.1	PROCESO DEL SULFRTO.....	62
3.1.1	Teoria.....	62
3.1.2	Procedimiento.....	67
3.1.3	Equipos y Materiales..	67
3.1.4	Prueba de Disolución del Titanio... ..	68
3.1.5	Prueba del Contenido de TiO ₂ en el Concentrado.....	72
3.1.6	Prueba de Precipitación del Titanio.	74
3.2	Obtención del Pigmento.....	78
3.2.1	Características del Pigmento Obtenido	78
3.3	Procesamiento Mineral para la Obtención del Pigmento.(Diseña tentativo).....	81
3.4	Descripción de otras procesos para obtener el Dióxido de Titanio.....	84
3.4.1	Proceso del. Clorhidrato..	84
3.4.2	Proceso del. Flurotitanato.....	85

CAPITULO IV

ESTUDIO DE COSTOS PARA EL PROCESO DE OBTENCION Y PRODUCCION DEL PIGMENTU.....	86
--	----

4.1	Consumo de Materiales	86
4.2	Costos para 1 Tonelada del Pigmento.....	88
4.2.1	Costa de trasportación.....	89
4.2.2	Casta de Concentración.....	89
4.2.3	Costo de Molienda.....	Y0
4.2.4	Costo del Tratamiento Acido.....	91
4.2.5	Costo de Calcinación del pigmento...	91
4.2.6	Costo por Consumo de Materiales.....	92
4.2.7	Costo Total.....	92
4.3	Producción Mundial y Precios.....	93

CAPITULO V

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	Y7
5.1	Conclusiones	97
5.2	Recomendaciones.....	99

INDICE DE FIGURAS

No		Página
1	PRODUCCION MUNDIAL DE ILMENITA Y RUTILO.....	21
2	MAPA DE MUESTREO DE ARENAS DE EMERALDAS.....	26
3	MAPA DE MUESTREO DE ARENAS DE MANABI.....	27
4	MAPA DE MUESTREO DE ARENAS DE GUAYAS Y EL ORO.....	28
5	ACCION DE UNA PELICULA QUE FLUYE	45
6	MESA CONCENTRADORA.....	45
7	DISTRIBUCION DE PRODUCTOS DE LA MESA CONCENTRADORA.	45
8	ESTRATIFICACION VERTICAL ENTRE RIFLES.....	45
9	DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL TITANIO.....	80
10	DIAGRAMA DE TRATAMIENTO PARA LA PRODUCCION DE TiO_2 .	83
11	DIAGRAMA DE TRATAMIENTO DE LA QUEBEC IRON AND TITANIUM CORPORATION.....	101

INDICE DE TABLAS

No		p gina
I	ANALISIS MINERALOGICO DE LA ARENA NEGRA	. . .34
II	COMPOSICION QUIMICA DE LA MAGNETITA FERROMAGNETICA	36
III	COMPOSICION QUIMICA DE LA MAGNETITA PARAMAGNETICA	37
IV	GRANULOMETRIA DE LA ARENA Y DE LA MAGNETITA	39
V	PARAMETROS EXPERIMENTALES DE LA MESA VIBRATORIA	47
VI	BALANCE DE LA PRUEBA DE LA MESA CONCENTRADORA	48
VII	PRUEBA DE MOLIENTA DE LA MAGNETITA	
	MATERIAL CONOCIDO: CUARZO	57
VIII	PRUEBA DE MOLIENTA DE LA MAGNETITA	
	MATERIAL DESCONOCIDO: MAGNETITA	58
IX	PRUEBA DE DISOLUCION DEL TITANIO	70
X	PRUEBA DE PRECIPITACION DEL TITANIO	77
XI	CARACTERISTICAS DEL PIOMENTO PRECIPITADO	79
XII	CONSUMO DE MATERIALES PARA PRODUCIR UNA TONELADA DE PIOMENTO	87
XIII	RELACION TIEMPO-PRECIO PARA EL TITANIO	94
XIV	PRODUCCION MUNDIAL DE CONCENTRADO DE TITANIO	95
XV	CONSUMO DEL PIOMENTO EN U S A	96

INDICE DE FOTOGRAFIAS

No		Página
1.	MAGNETITA CONCENTRADA	49
2	FASES DE LA DISOLUCION	71
3	PRECIPITADO DE SULFATO FEROCO	71
4	SULUCICIN FILTRADA DE Ti y Fe	75
5	PRECIPITADO	75

ABREVIATURAS

B	Inducción Magnética
D	Diámetro interno del molino de bolas
d	Diámetro de una partícula.
E	Energía de entrada.
y	Aceleración
H	Campo magnético aplicado
J	Volumen de carga en un molino de bolas
L	Largo del molino
*N	Fracción de velocidad crítica
Pr	Tamaño en un para el 80% del producto pasante
P	Potencia del molino
Q	Tasa de producción
T	Temperatura
U	Intensidad de magnetización
V	Velocidad de rotación del molino de bolas
Vp	Velocidad terminal de la partícula
VC	Velocidad crítica
Vo	Volumen interno del molino
W	Trabajo de entrada
WB	Peso de la carga de bolas;
Wi	Índice de trabajo
Wir	Índice de trabajo del material de referencia
Wit	Índice de trabajo del material desconocido
Xp	80% del pasante de la carga del producto
Xf	80% del pasante de la carga de la alimentación

Xpt 80% del pasante del producto de material desconocido
Xpr 80% del pasante del producto el material conocido
Xft 80% del pasante de la carga de alimentación de
material desconocido.
Xfr 80% del pasante de la carga de alimentación de
material conocido.
O Densidad de bolas

UNIDADES

cc centimetro cúbico
cm centimetro
C grados Celcius
gr gramo
hr hora
Kw Kilowattia
m metro
mm milímetro
ml mililitro
min minuto
rpm Revolución por minuto
CT Tonelada corta
Ton Tonelada métrica
TPW Tonelada métrica por hora
um Micra

INTRODUCCION

EL presente trabajo consiste en investigar, estudiar, y analizar el comportamiento de la arena titanifera de nuestro pais utilizando el proceso del sulfato.

En el Ecuador existe una gran extensión de arenas negras distribuidas a lo largo de toda la costa. Se conoce que estas arenas tienen un alto contenido de Fe_2O_3 y TiO_2 . Se han establecido zonas de posible valor económico en base a reconocimiento aéreo de concentraciones de arena (1973. F. Mosquera y Gaston Ruales) y a un muestreo rápido realizado en 1975 por A.F. Wilkinson.

Actualmente los yacimientos ubicados en Manabí, cerca de Bahía de Caráquez y el de Guayas en Chanduy son explotados para la fabricación de Cemento por su alto contenido de hierro.

La posibilidad de obtener dióxido de titanio de las arenas negras representa un reto para la industria, pues en el país el TiO_2 es utilizado principalmente para pinturas, cerámicas, papel caucho, plásticos, etc.

En la presente investigación se trabajó con arenas originarias de Chanduy. La metodología comprende: primero, la obtención de un concentrado puro de magnetita finamente molido, segundo la separación del TiO_2 de la magnetita, para lo cual se utilizó el laboratorio de

mineralurgia de la E.S.P.O.L. y tercero un análisis de **costos** para producir el pigmento en base al consumo de la materia prima y **al** gasto energético **que** requiere.

CAPITULO 1

ARENAS TITANIFERAS

1.1 GENERALIDADES

EL Titanio es el noveno elemento en abundancia en la corteza terrestre, su clarke es 0.62%

La concentración mecánica *es* la separación natural por gravedad de minerales pesados de los ligeros por medio del agua u del aire en movimiento, en virtud de lo cual los minerales más pesados se concentran en depósitos denominados placeres.

Los dos minerales más importantes son la ilmenita de fórmula($FeTiO_3$) que contiene de 45% A 55% de TiO_2 y el rutilo (TiO_2) que contiene 95% o más. Otros minerales incluyen el leucóxeno y la anatasa. Tanto la ilmenita como el rutilo se encuentran repartidos en toda el mundo en rocas ígneas como metamórficas y sedimentarias, el primero en yacimientos primarios y secundarios en tanto que el segunda solo se encuentra en secundarios.

Los placeres de playa se forman a lo largo de las costa.; debido a los efectos concentradores de la acción de las alas. Las corrientes costeras acumulan materiales a lo largo de las costas y los mas ligeros son desplazados mas rápidamente y a mayor distancia que los pesados, con lo cual estos se concentran. Al mismo tiempo actúa la acción de las olas. El embate de estas arroja materiales a las playas; el salto del agua y la resaca arrastran las mas ligeros y finos, que a su vez se desplazan a lo largo de las costas; y los de mayor tamaño y pesa se concentran en las playas libres. Un ejemplo frecuente de este fenómeno son las playas de grava o cantos rodados de los cuales ha sido eliminado la arena. Si existen minerales pesados en la playa se concentrarán del misma modo.

La aportación de minerales de placer para su concentración en playas puede efectuarse por los dos siguientes agentes:

- 1) ríos que desembocan en la costa.
- 2) erosión de las olas sobre las terrazas o planicie de gravas.
- 3) cruce de corrientes sobre antiguas terrazas fluviales próximas a la costa.

La concentración de minerales de placer de playa. puede producirse tan solo si ellos poseen ciertas propiedades como: elevado peso específico, resistencia a la meteorización y durabilidad (maleabilidad, tenacidad o dureza). Los minerales de placer de playa son el oro, ilmenita, rutilo, diamantes, circonio, monacita. La ilmenita y el rutilo y la monacita han experimentado una extraordinaria concentración en las playas de Travancore y Quilon (India), cuyo resultado ha sido unas arenas comerciales que contienen de 50 a 70 por ciento de ilmenita.

1.2 GEOLOGIA

Los yacimientos secundarios de placeres se han formado por la acción de meteorización y erosión de los yacimientos primarios y debido a su gran resistencia tanto química como física y además a su elevado peso específico (4.55) para la ilmenita y (4.2) para el rutilo, sobreviven y se concentran a lo largo del cauce de los ríos y en las playas y terrazas marinas.

Según el estudio de Ana Saa (1988), realizado en General Villamil playas, los minerales magnéticos provienen de rocas ígneas máficas y por lo tanto de la erosión del basamento (Piñón), los cuales se han depositado también en rocas antiguas. No se

aprueba sin embargo si la erosión de las áreas en que Piñón aflora a lo largo del río Guayas, contribuye o no a aumentar la cantidad de sedimentos magnéticos encontrados. La explotación del material de manera continua es poco alentadora dada la variabilidad de las concentraciones en el transcurso del mes; sin embargo se podría programar para ser explotada en sisigia, época en que el enriquecimiento ocurre.

En otras regiones del planeta, los yacimientos primarios y secundarios totalizan 600 millones de toneladas de ilmenita, existiendo en Canadá y Noruega la mayor parte, aproximadamente 300 millones de toneladas de yacimientos primarios: que ensayan en un 40% de TiO_2 . En cambio los secundarios de Estados Unidos y Australia suman más de 100 millones de toneladas con un 20% de TiO_2 .

En cuanto al rutilo, limitado a yacimientos secundarios, las reservas totalizan 1.8 millones de toneladas de 90 a 96% de TiO_2 , de las cuales más de 7 millones se encuentran en Australia y más de 2 en Sierra Leona (11).

Yacimientos primarios de ilmenita son explotados actualmente en las siguientes países: Confederación de Países Unidos, Canadá, Finlandia y Noruega. Adicionalmente Brasil cuenta con depósitos

PRODUCCION MUNDIAL

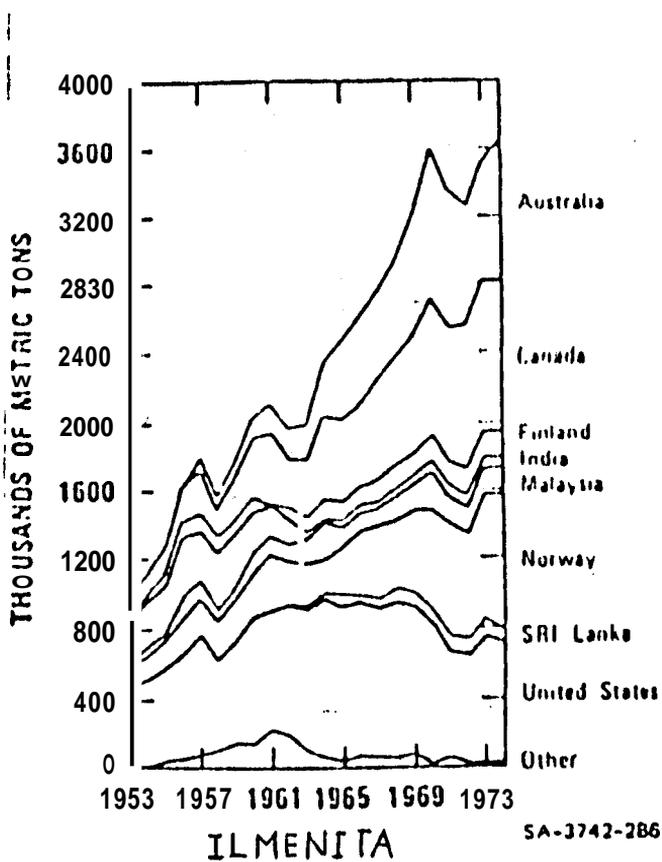


FIGURA 1

Ref. 11

potencialmente importantes del mineral anatasa TiO_2 , que es el polimorfo del rutilo de igual fórmula química.

Desde aproximadamente un poco más de 50 años se inicio la recuperación de los minerales de titanio a partir de las arenas negras ubicadas en las playas y terrazas marinas, así como en las arenas y gravas de los ríos.

En cuanto a producción y explotaciones, los yacimientos más importantes que proporcionaron al año de 1977 el 85% de los 6 millones de toneladas de los minerales de titanio producidos por los países occidentales. La mayor cantidad proviene del Canadá, constituida por un mineral primario de ilmenita-magnetita de bajo grado de pureza, cuya producción fue mayor a los 2 millones de toneladas.

Le sigue en magnitud el yacimiento de arena de ilmenita, ubicado en la costa oeste de Australia con una producción superior a 1 millón de toneladas; En tercer lugar figura Noruega con casi 1 millón de toneladas que provienen de un yacimiento primaria. El cuarto y quinto lugar, lo ocupan dos yacimientos de los Estados Unidos con una producción cercana a medio millón de toneladas

de mineral primario, el uno y de arena de titanio el segundo (11).

Finalmente esta el yacimiento de la costa este de Australia que produjo cerca de 400 mil toneladas de rutilo.

La explotación minera se la realiza en algunos casos mediante dragas, y en otros se utiliza una combinación de tractores, bulldozers, scrapers a bombas de succión. En cambio el tratamiento se limita a la separación gravitacional, magnética ó eléctrica (11).

1.3 OCURRENCIA EN EL PAIS

En 1973 (F. Mosquera y Gaston Ruales) en un reconocimiento aéreo de concentraciones de arenas titaníferas a lo largo de zonas del litoral ecuatorial, establecieron zonas de un posible valor económico con miras a un estudio posterior.

Provincia del Guayas

1) Isla Puná: En el extremo SO, de la isla, al E de Punta Salinas. También en las costa casi frente a Posorja, cerca de la Punta Barranco Negro, que es la zona más importante.

2) En la playa de este pueblo.

3) Al norte de la población de Sta. Elena:
Cautivo, Ballenita y Punta Blanca.

Provincia de Manabí

4) Ensenada de Bálsamo: Playa situada entre
Puerto López y Machalilla.

5) Cojimies: Estuario del río.

Provincia de Esmeraldas

7) Playas del caserío de Bolívar: 10 Km. al N. de
Cojimies.

8) En la zona inmediata al Sur de Punta Galera.

9) Playa al S. de Esmeraldas: unos 5 Km. al N.
de Atacames.

Según la extensión e intensidad de las manchas de
arenas negras de las playas, las zonas tienen el
siguiente orden de prioridad decreciente:

- Isla Puná.
- Cojimies.
- N. de Sta. Elena.
- Bolívar.
- Ensenada de Surrónes.
- Ensenada de Bálsamo.
- Chanduy.

-Punta Galera.

-Atacames.

En 1975 (a.F. Wilkinson) al hacer un reconocimiento rápido de fosfato principalmente en las formaciones del Terciario y Cuaternario (con la formación Cayo del Cretáceo que aflora en la península de Sta. Elena entre Puerto Cayo y Puerto López y al Sur de Punta Brava) que aflora a lo largo de la Costa, consideró que el muestreo de arenas de playa proveería un método práctico y rápido de evolución de grandes áreas costaneras.

En la figura 2 (mapa 1 según Wilkinson) se indican los sitios de muestreo, donde era posible se tomaron muestras con intervalo de un Km. Cerca del 85% de la costa fue muestreada, excepto la Isla Puná y la carta al sur del río Guayas. En total 509 muestras fueron tomadas. En cada sitio de muestreo se excavó un pozo de 1m. de profundidad lo más cerca posible del arrecife posterior. Un muestreo continuo del canal fue cavado desde el suelo hacia la superficie de este pozo con una paleta pequeña. Varios pozos demostraron horizontes negros que alternaban con arena de playa normal. Se tomó 100 gr. de material.

En el laboratorio cada muestra fue secada y dividida, una parte para almacenarlo. La otra fue clasificada de acuerdo a la " negrura " de la arena de playa: intensamente negra, media negra, media jaspeado y normal.

Todas las muestras se han analizado para P2O5 y para Ti, Fe y Mn para aquellas muestras calificadas como muy negras, nueve muestras indicaron valores razonables de hierro variando desde 17.6% a 45,28%, pero representan una selección de arenas mineralizadas mas rica encontradas en localidades limitadas y dispersa que no pueden ser consideradas económicamente alentadoras.

Con los resultados disponibles se han logrado identificar cuatro áreas que indican arena negra anomálica:

- a) Al Este de Lagarto, 79 10 'W , 1 5'N, en la Provincia de Esmeraldas.
- b) Punta Ostiones, 79 15' W , 105' N , en la Provincia de Esmeraldas.
- c) Entre San Vicente y Canoa, 80 30 'W, 0 35'S, en 9ia provincia de Manabí.
- d) Punta Brava, 80 10 W, 0 5' S, Provincia de Manabí. .

Otras áreas en la provincia del Guayas pueden llegar a ser evidentes conforme se siga investigando.

1.4 UTILIZACION EN LA INDUSTRIA

Las yacimientos de placeres secundarios ubicados en Manabí, cerca de Bahía de Caraquez, y el de Guayas en Chanduy son esplatados para ser utilizados en la fabricación del cemento en Ibarra y Guayaquil, debido a su alto contenido de hierro.

Las arenas negras de la Península pueden ser utilizadas en la fabricación de pigmento negro obtenido a partir de la magnetita y en pigmento blanco, que resulta de la separación del dióxido de titanio asociado en solución sólida con la magnetita.

El dióxido de titanio se caracteriza por ser un pigmento de color blanco, insoluble en el agua, no tóxico, no combustible.

Su utilización en la industria es muy amplia, entre sus usos tenemos: pinturas, papel caucho, plásticos, cueros y acabadas para cueros, tintas, tejidos revestidos, cerámica, gránulos para tejados, revestimientos para barras de soldar y cubiertas para suelos (7).

CAPITULO 11

SEPARACION DE LA MAGNETITA

OBJETIVO

El propósito de este capítulo consiste en obtener un concentrado casi puro de magnetita para lo cual se realizó un estudio de las arenas en el laboratorio de mineralurgia de la F.I.C.T.

2.1 RECOLECCION DE LA MUESTRA

PROCEDIMIENTO

En el presente estudio se trabajo con el stock de arenas negras que tiene la Cemento Nacional en la vieja planta de San Eduardo. Estas arena son originarias de Chanduy. Se recogieron unos cinco sacos de diferentes partes del stock, con la intención de obtener diferentes muestras, **cuyas** características y condiciones sean similares e identifiquen el total relativo del material. Cabe señalar que de los estudios realizados sobre las arenas negras de playa en nuestro país se ha observado que existe una concentración muy variable según el espacio y el tiempo.

2.2 PREPARACION DE LA MUESTRA

Objetivo

Adecuar el material de trabajo para posteriores análisis granulométrico, mineralógico, pruebas de mesa concentradora.

Procedimiento

Las arenas fueron primero secadas. El secado se realizó colocando las arenas sobre un piso de plástico, ubicándolas directamente a los rayos del sol. Posteriormente se removi6 el material a intervalos de tiempo iguales en vistas de conseguir un secado uniforme.

El paso siguiente fue eliminar las particulas "grandes" (fragmentos de roca y restos de concha) para lo cual se hizo pasar la muestra por el tamiz numero 8 Tyler.

Finalmente se procedia a homogenizar mediante constante remoci6n de la muestra con una pala. El material es homog6neo cuando la textura del mismo no ofrece variaciones internas, externa en color y tama1o. La homogenizaci6n es dificil cuando existe altas diferencias de densidad en los granos. Una vez hornogenizado el material esta listo para cualquier prueba a realizarse , y es as6 como para cada ensayo se procede a cuartear hasta obtener el

peso de muestra necesaria.

2.3 ANALISIS MINERALOGICO SEMICUANTITATIVO

Objetivo

Conocer el porcentaje de magnetitas en las arenas negras e identificar minerales.

Equipos y materiales

- Microscopio
- Horno de baja temperatura.
- Batea, imán, punzón.

Procedimiento

1. Tomar 200 gr de muestra preparada.
2. Separar mediante batea inicialmente.
3. Separar mediante microbatea los minerales mas pesados.
4. Separar con ayuda del imán los minerales más pesados.
5. Identificar con ayuda del microscopio los minerales livianos y los pesados.

Resultados.

Los resultados del análisis se muestran en la tabla 1. Del análisis realizado se encuentra que las arenas utilizadas contienen 51% de minerales livianos como silice y granates, y un 49% de magnetitas. A su vez las magnetitas se divide en ferromagnéticas y

paramagnéticas, y además las magnetitas no son puras sino que se encuentran asociadas con minerales de titanio.

2.4 COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITIS

Se realizó un análisis químico completo de la magnetita, el mismo que se realizó en el laboratorio de Química de la Cemento Nacional en Cerro Blanco, usando un espectrómetro de rayos X. Se realizó un análisis químico de la magnetita paramagnética y de la ferromagnética.

Los resultados se presentan en la tabla II y III. Como se observa en esta tabla, la magnetita contiene oxido de titanio.

2.5 DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LAS ARENAS Y LAS MAGNETITAS

Objetivos.

Conocer la distribución granulométrica del material y de las magnetitas.

Equipo y materiales.

- Vibrador-agitador RQ-TAP.
- Sarta de tamices.

TABLA 11

COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETICAC	
FERROMAGNETICAC (PORCENTICIGE POR PESO)	
ELEMENTO	MAGNETITA
C1	0.01
TiO ₂	21.70
P ₂ O ₅	0.16
SiO ₂	0.94
Al ₂ O ₃	0.68
Fe ₂ O ₃	74.60
CaO	0.04
MgO	1.20
K ₂ O	0.05
Na ₂ O	0.37
TOTAL	99.70

TABLA 111

COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITAS	
PARAMAGNETICAS (PORCENTAGE POR PESO)	
ELEMENTO	MAGNETITA .
Cl	-
TiO ₂	26.00
P ₂ O ₅	0.20
SiO ₂	-
Al ₂ O ₃	0.10
Fe ₂ O ₃	72.00
CaO	-
MgO	1.60
K ₂ O	0.05
Na ₂ O	0.21
TOTAL	100.00

- Balanza.
- Horno de baja temperatura.
- Batea
- Microbatea
- Arena de playa.

Procedimiento.

1. Tomar 500 gr. de material.
2. Tamizar
3. Pesar cada fracción.
4. Determinar la cantidad de magnetita en cada fracción por separación gravimétrica con batea.

Resultados.

Los resultados del análisis se presentan en la tabla 5 y gráfico 5. Como se puede observar en el gráfico, entre las mallas 28 y 48 el contenido de magnetita es mínimo, mientras que entre las mallas 60 y 140 se halla la mayor parte. Es importante hacer notar que las proporciones de magnetita a ganga no se mantienen constantes. Los retenidos de las mallas 80 y 100 son casi en su totalidad de magnetita.

2.6 SEPARACION GRAVIMETRICA POR VIA HUMEDA

Los métodos gravimétricos de concentración son usados

TABLA IV

GRANULOMETRICI DE LA ARENA Y DE LA MRGNETITA			
Tyler Mesh	Peso Retenido (gr)	% Peso Retenido	%Contenido Magnetita
28	12.85	2.57	0.02
35	50.35	10.07	0.24
48	91.05	18.21	0.54
60	56.10	11.22	1.42
65	78.05	15.61	7.10
80	118.95	23.79	22.53
100	78.50	15.70	15.34
140	12.85	2.57	1.05
FONDO	1.30	0.26	0.09

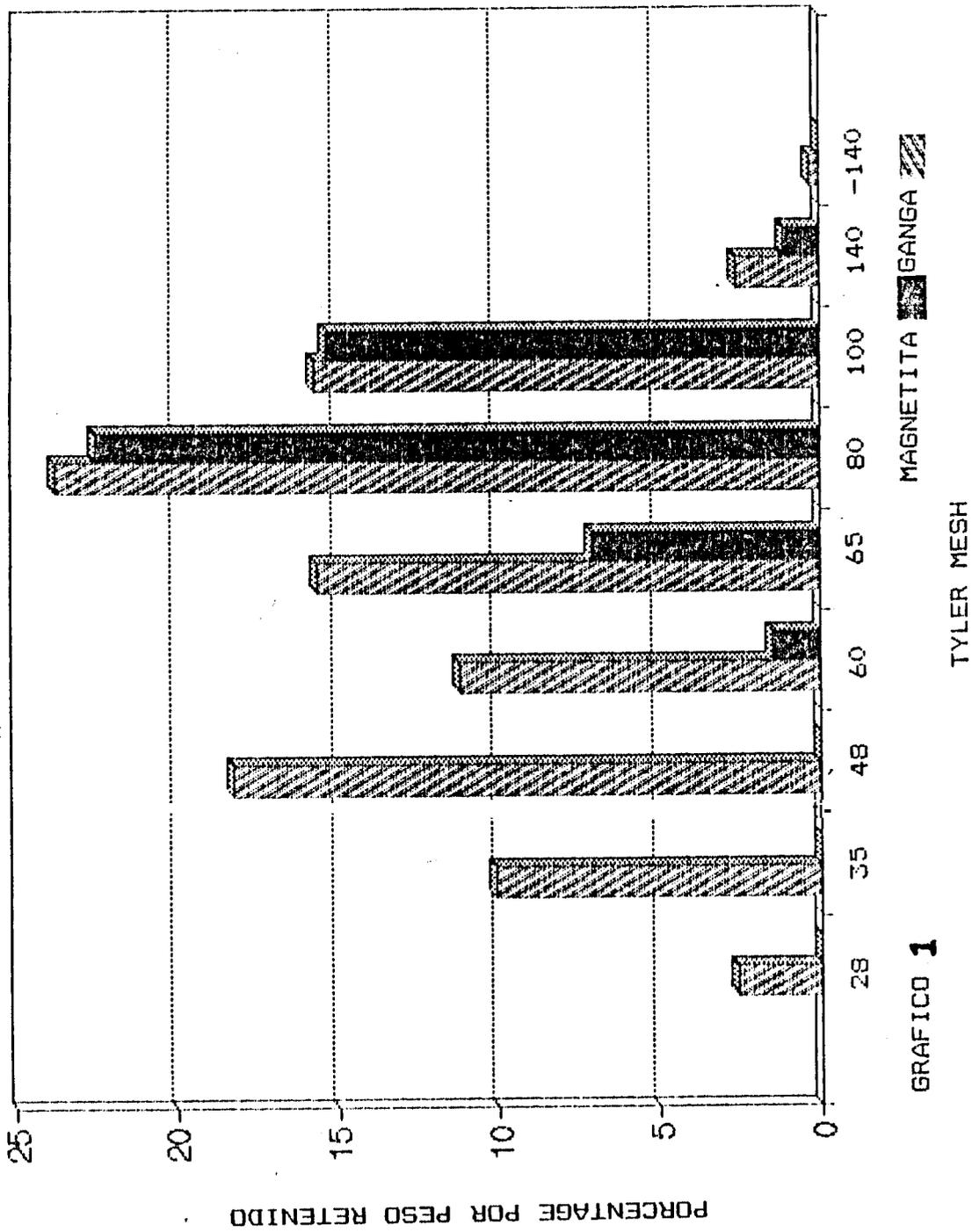


GRAFICO 1

TYLER MESH

MAGNETITA GANGA

para tratar una gran variedad de materiales, desde sulfuros de metales pesados tales como galena (gravedad especifica 7.5) hasta carbón (gravedad especifica 1.3), en tamaños de particulas en algunos casos por debajo de 50 micras.

PRINCIPIOS DE CONCENTRACION GRAVIMETRICA

Los métodos de concentración gravimétrica separan minerales de diferente gravedad especifica por su movimiento relativo en respuesta a la gravedad o a una o más fuerzas, siendo las últimas a menudo la resistencia al movimiento ofrecido por un fluido viscoso, tal como el agua o el aire.

Para una separación efectiva debe existir una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga. Alguna idea del tipo de separación posible puede ser dada del siguiente criterio:

$$\frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

donde D_h es la gravedad especifica del mineral pesada. D_l es la gravedad especifica del mineral liviano, y D_f es la gravedad especifica del medio fluido.

En términos muy generales, cuando el cociente es mayor que 2.5, positivo o negativo, entonces la

separación gravimétrica es relativamente fácil. Conforme el valor del cociente disminuye, así también disminuye la eficiencia de la separación, y por debajo de 1.25 la concentración gravimétrica generalmente no es posible comercialmente.

El movimiento de una partícula en un fluido no solamente depende de su gravedad específica, sino también de su tamaño: las partículas mas grandes serán afectadas en grado mayor que las mas pequeñas. La eficiencia de los procesos gravimétricos por lo tanto se incrementan con el tamaño de la partícula, y las partículas deberían ser lo suficientemente grandes para mover-se de acuerdo con la ley de Newton de resistencia turbulenta, según la cual cuando una partícula sólo cae libremente en un medio viscoso, tal como el agua, hay una resistencia a su movimiento y el valor de la misma se incrementa con la velocidad; cuando se alcanza el equilibrio entre las fuerzas gravitacional y de resistencia al fluido, el cuerpo desarrolla velocidad hasta alcanzar velocidad terminal y por lo tanto cae a una rapidez uniforme. A altas velocidades la resistencia es debida al desplazamiento del fluido por el cuerpo; esta resistencia se llama turbulenta. Según la ley de Newton para la resistencia turbulenta la velocidad terminal de una partícula cayendo en un medio fluido

es:

$$V_p = \sqrt{\frac{3 \cdot g \cdot d \cdot (D_s - D_f)}{D_s}}, \text{ donde}$$

V_p : Velocidad terminal de la partícula.

D_s : Densidad de la partícula.

g : Aceleración de la gravedad.

d : diámetro de la partícula.

Las partículas que son tan pequeñas que su movimiento es dominado principalmente por la fricción de su superficie responden pobremente a los procesos gravimétricos comerciales de alta capacidad. En la práctica se requiere de un riguroso control de la granulometría de la alimentación a los procesos gravimétricos con el fin de reducir el efecto del tamaño de las partículas y hacer el movimiento relativo de las partículas dependiente de la gravedad (3).

MESAS CONCENTRADORAS

Cuando una película de agua fluye sobre una superficie plana e inclinada, el agua que está más cerca de la superficie es retardada por la fricción del agua absorbida en la superficie; la velocidad se incrementa hacia la superficie del agua. Si

partículas minerales son introducidas dentro de las películas, las partículas pequeñas no se moverán tan rápidamente como las grandes, puesto que ellas serán sumergidas en la porción de movimiento más lento de la película. Las partículas de alta gravedad específica se moverán más lentamente que las partículas más ligeras, produciendo así un desplazamiento lateral del material.

La película de agua que fluye separa partículas ligeras grandes de partículas pesadas pequeñas, y este mecanismo es utilizado en algún grado en la mesa concentradora, que es el concentrador más eficiente en la metalurgia (6).

2.6.1 PRUEBAS DE LABORATORIO

Objetivo

Determinar la recuperación de ferromagnetita que se consigue con la mesa concentradora.

Equipos y Materiales

- Mesa concentradora Deister 15-C.
- Tanque cilíndrico (reservorio de agua).
- Toma de agua.
- Una manguera.
- Balanza .
- Inclinómetro .

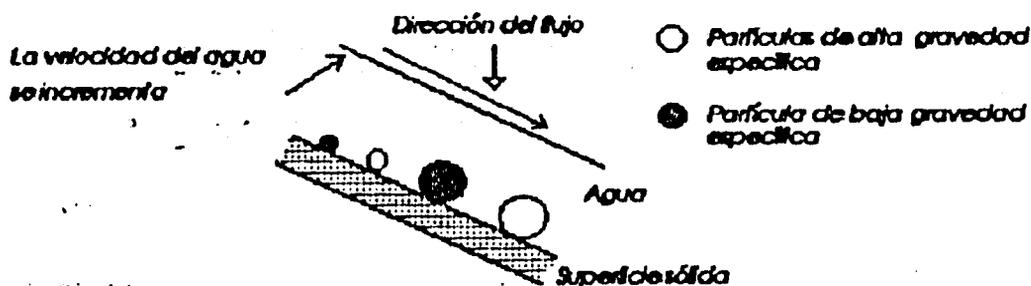


Fig No. 5 Acción en una película que fluye

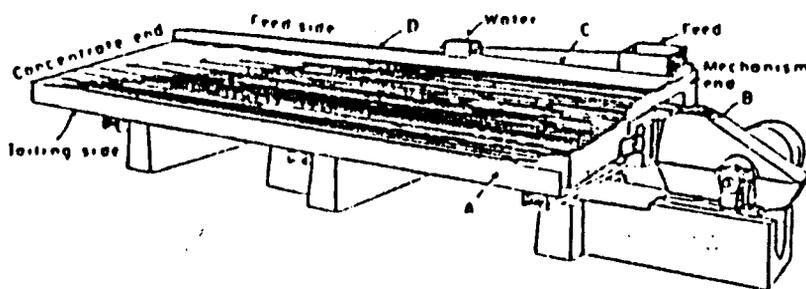


Fig No. 6 Mesa Concentradora

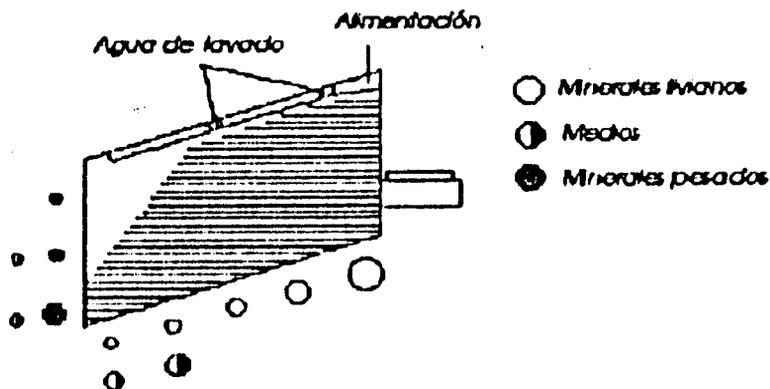


Fig No. 7 Distribución de productos de la mesa concentradora

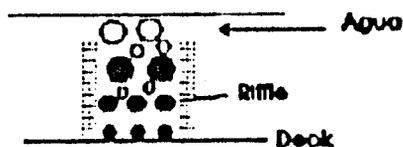


Fig No. 8 Estratificación vertical entre riffles

Ref. 3

Procedimiento

1. Adecuar la mesa.
2. Adecuar la pulpa. En **estas** pruebas **se** usará pulpa con un 25% de sólidos por peso.
3. Regular los parámetros de la mesa; inclinación lateral, amplitud velocidad de golpe, flujo de agua, hasta conseguir una línea de corte (Separación del material según su densidad). La línea de separación debe coincidir con la bisectriz del ángulo de la descarga de la mesa.
4. Una vez regulados los parámetros, se procede a realizar la prueba definitiva.
- 5 Acumular- en recipientes el material de descarga clasificado en concentrado, medio y ganga.
6. Secar el material acumulado en los tres recipientes y pesarlos individualmente.
7. Determinarla recuperación de ferromagnetita en las productos.

2.6.2 Resultados

En la tabla V se muestran los parámetros Óptimos con los que se realizó la prueba de concentración magnética.

En la tabla VI se muestra el balance de los productos con la mesa concentradora y se

TABLA V

PARAMETROS EXPERIMENTALES DE LA MESA VIBRCSTORIA		
PARAMETROS	UNIDADES	MAGNITUDES
Velocidad de golpe	310	(R.P.M.)
Amplitud del golpe	9	(mm)
Inclinación lateral	3.5	(mm/m)
Inclinación longitudinal	62	(mm/m)
Agua de lavado	22	(lt/min)
Tasa de Procesamiento	1.33	(Kg/min)

TABLA VI

BALANCE DE LA PRUEBA DE LA MESA CONCENTRADORA

GRUPO	PESO (gr)	% PESO	% CONTENIDO DE MAGNETITA	% DE MAGNETITA TOTAL
Cabeza	5000	100	70	100
Concentrado	3352	67	98	94
Medios	760	15	29	6
Colas	888	18	0	0

RECUPERACION DE MAGNETITA = 94%



MAGNETITA CONCENTRADA
FOTO 1

puede observar que se logra una recuperación de magnetitas del 94%, con una pureza del concentrado del 98%.

La recuperación con la mesa **es** excelente y su uso **es** altamente recomendado en la concentración de magnetita en las arenas negras de la playa.

2.7 MOLIENDA

Para lograr obtener un dato técnico real y de significado valorativo a la hora de los cálculos de consumo de energía, que nos permita cuantificar los costos de molienda es necesario obtener el índice de trabajo para la magnetita; como el índice de Bond requiere de una relación de reducción de 6 a 1 para obtener resultados confiables, el método tradicional **no es** aplicable y en su lugar **se** utiliza un método de comparación alternativo.

Los parámetros más importantes a tomar en consideración en la molienda son:

- Velocidad crítica del molino.
- Volumen de **carga** del molino.
- Fracción de velocidad crítica.
- Energía requerida para realizar la reducción.

PRINCIPIO DEL MOLINO DE BOLAS.

La velocidad de rotación de un molino *es* una importante variable de diseño, puesto *que* la misma gobierna la naturaleza del producto y la la tasa de desgaste de los blindajes internos del molino. *Es* común definir la velocidad crítica como aquella en la cual una bola aislada se mantiene contra el casco durante un ciclo completo, siendo su fórmula:

$$V_c = \frac{42.3}{(D-d)}$$

D: Diámetro interno del molino.

d: Diámetro de la bola mas grande.

Otro concepto importante *es* la fracción de velocidad crítica (N) a la que gira el molino. Normalmente los molinos operan a velocidades entre el 50 y el 90% de la velocidad crítica, dependiendo de la elección de consideraciones económicas. Si V *es* la velocidad del molino, entonces la fracción de velocidad crítica *N *esta* dada por la fórmula :

$$*N = \frac{V}{V_c}$$

El volumen de carga (J) de un molino de bolas **es** el porcentaje del volumen interior del molino que esta ocupado por los medios de molienda e incluye los espacios huecos que existen entre los medios . Sólo los molinos con rejilla de descarga pueden tomar la potencia máxima (trabajando con un 50% de carga), ya que la rejilla mantiene a las bolas en el interior. Los molinos de bolas del tipo de derrame estan restringidos a menos del 45% de carga para evitar que descarguen las bolas. El volumen de carga del molino es:

$$J = \frac{WB}{V_o \cdot O}, \text{ donde}$$

WB : Pesa de la carga de bolas

V_o : Volumen del molino.

O : Densidad de bulas contemplando la porosidad de empaque de la carga total..

La energía suministrada a un molino se consume esencialmente en el movimiento de los medios (y en menos grado del mineral, pero también se utiliza algo de energía en **hacer** girar el casco y en superar la fricción de la transmisión). Si un molino tiene una tasa de producción Q, la energía E requerida para realizar la reducción

sera igual a:

$$E = P / Q$$

donde P es la potencia del molino suministrada por el motor.

Cinco parámetros determinan la potencia tomada por el molino: el diámetro (D), la longitud (L), el volumen de la carga (J), la velocidad (*N) y el tipo del molino. La potencia P en base a relaciones empírica, se calcula mediante la fórmula

$$P = 7.04D^{3.4} (L/D)^0 (J-0.94J^2)^*N(1-0.1(2)^{10*N-9})$$

donde P esta dado en Kw.

$$Q = p.v$$

donde,

p = promedio del material. molido en un mismo intervalo de tiempo (gr./min.)

v = Velocidad crítica.

Una vez determinada la energía requerida para realizar la reducción entonces:

$$W_i = E / 10 (1 / X_p - 1 / X_f)$$

donde,

X_p=tamaño en micras del 80% del producto.

X_f=tamaño en micras del 80% de la alimentación.

Barry y Bruce desarrollaron un método comparativo de determinar el índice de trabaja de una merla. El método requiere el uso de una mena de referencia de índice conocido. La mena de referencia es molida por un cierto tiempo y se determina el consumo de energía. Un peso idéntico de la mena a ensayar es entonces molido por un periodo de tiempo tal que el poder consumido es idéntico con aquel de la mena de referencia. Luego si r es la mena de referencia y t es la mena baja ensayo, de la ecuación de Bond,

$$E_r = E_t = W_i r (10 \sqrt{P_r} - 10 \sqrt{F_r}) = W_i t (10 \sqrt{P_t} - 10 \sqrt{F_t})$$

Por lo tanto,

$$W_i t = W_i r (10 \sqrt{P_r} - 10 \sqrt{F_r}) / (10 \sqrt{P_t} - 10 \sqrt{F_t})$$

Valores razonables para índices de trabaja se obtienen por este método; tanto las menas de como las de referencia son molidas a casi la misma distribución de tamaño (3 1).

2.7.2 PRUEBA DE LABORATORIO

Objetivo.

Determinar el índice de trabajo (W_i) de la magnetita para la molienda.

Equipo

- Molino cilíndrico de bolas 0.9582 pies de diámetro y 0.6457 pies de longitud
- Carga de bolas que ocupa un 30 por ciento del volumen del molino.
- Cronómetro.
- Sarta de tamices.

Procedimiento

1. Preparar 200 gr. de material patrón (arena de cuarzo) de índice de trabajo conocido.
2. Preparar una sarta de tamices con la finalidad de realizar un diagrama log-log de fracción por peso acumulado ($F(d)$) versus diámetro de partículas (d) en micras.
3. Determinar el tamaño del 80 por ciento de la alimentación del material patrón.
4. Preparar 200 gramos de arena negra.
5. Tamizar y establecer el tamaño del 80 por ciento de la alimentación de la arena negra.
6. Moler en el molino de bolas durante 5 minutos en etapas separadas, las muestras de los materiales bajo los mismos parámetros de molienda.
7. Obtener el tamaño del 80 por ciento pasante de los productos tamizados.
8. Calcular el índice de trabajo (W_i) del

material. desconocido aplicando la fórmula:

$$E = W_i / (10((1/ X_p) - (1/ X_f)))$$

si recordamos que la energía consumida es la misma para ambos materiales, entonces:

$$W_{it} = W_{ir} \cdot ((1/ X_{pt}) - (1/ X_{ft})) / ((1/ X_{pr}) - (1/ X_{fr}))$$

donde,

W_{it} : Índice de trabajo del material desconocido.

W_{ir} : Índice de trabajo del material conocido.

X_{pt} y X_{pr} : Tamaños en micras del 80 por ciento del producto del material desconocido y conocido.

X_{ft} y X_{fr} : Tamaños en micras del 80 por ciento de la alimentación de los materiales desconocido y conocido respectivamente.

Resultados

De las tablas VII y VIII y de los gráficos 1 y 3 se obtienen los siguientes datos:

$$X_{pt} = 131.4 \text{ um.} \quad X_{ft} = 199.5 \text{ um.}$$

$$X_{pr} = 129.6 \text{ um.} \quad X_{fr} = 199.5 \text{ um.}$$

Conociendo que el material de referencia es cuarzo y que su índice de trabajo es 14, entonces:

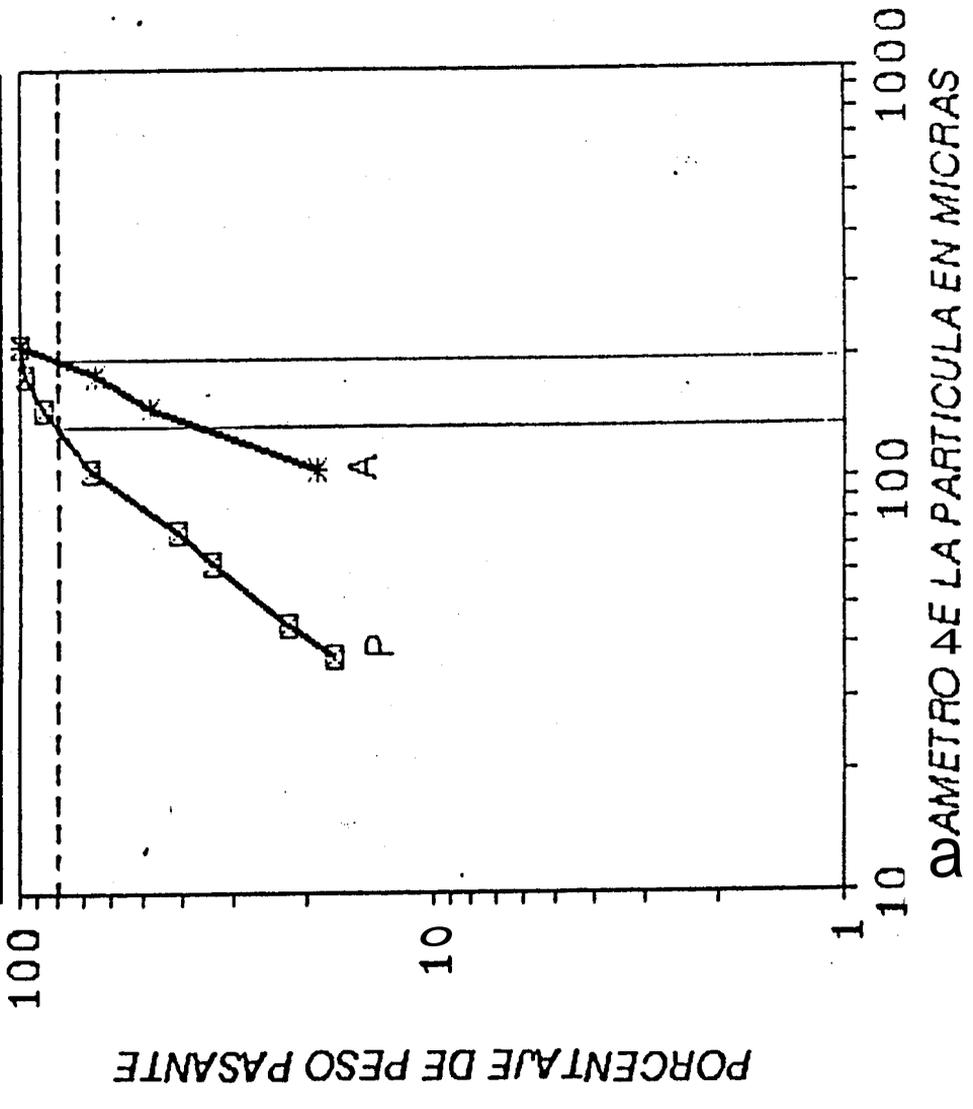
$$W_{it} = (14 \text{ Kw-hr/ST}) \cdot ((1/ 131.4 \text{ um.} - 1/ 199.5 \text{ um.})) / ((1/ 129.6 \text{ um.} - 1/ 199.5 \text{ um.}))$$

TABLA VII

PRUEBA DE MOLIENDA DE LA MAGNETITA			
MATERIAL CONOCIDO: CUARZO			
TYLER Mesh	DIAMETRO (um)	PORCENTAGE DE PESO PASANTE	
		ALIMENTACION	PRODUCTO
65	212	100.0	100.0
80	180	65.0	96.6
100	150	47.5	87.2
150	106	19.0	66.8
200	75		41.2
250	63		34.0
325	45		22.3
400	38		17.3
FONDO			0

PRUEBA DE INDICE DE TRABAJO DE LA MAGNETITA

CURVAS GRANULOMETRICAS DEL CUARZO

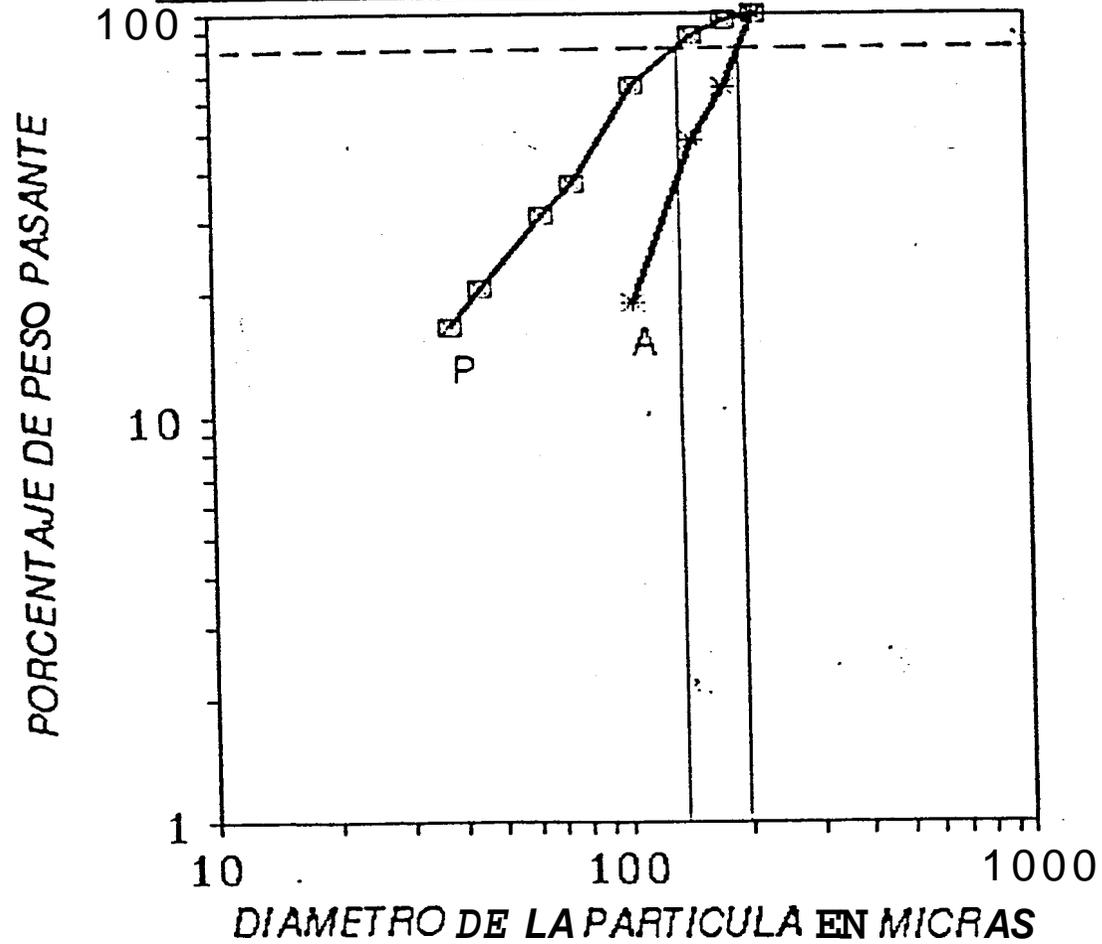


Ref.3

GRAFICO 1

PRUEBA DE INDICE DE TRABAJO DE LA MAGNETITA

CURVAS GRANULOMETRICAS DE LA MAGNETITA



Ref. 3

GRAFICO 2

Wit = 13.51 Kw.-hr/ST.

2.7.3 OBTENCION DE MAGNETITA FINAMENTE MOLIDA

Objetivo

Obtener magnetita molida con un tamaño pasante malla 200 Tyler.

Procedimiento

La prueba se realizó siguiendo el procedimiento y parámetros de la prueba anterior:

- V = 66,66 R.P.M.
- Vc = 77,77 R.P.M.
- *N = 0,8571
- J = 0,3
- Peso de carga de bola5 = 2 kilos
- peso del material = 200 gr.
- volumen de H2O = 1000 cm 3
- tiempo de molienda = 1 hora 15 minutos

Resultados

El 82% del tamaño del producto del material pasante corresponde a malla 200 Tyler.

CAPITULO 111

OBTENCION DEL OXIDO DE TITANIO

3.1 PROCESO DEL SULFATO

OBJETIVO

Separar el dióxido de titanio (TiO_2) existente en el concentrado de magnetita obtenido utilizando ácido sulfúrico.

3.1.1 TEORIA

Las arenas negras utilizadas para el presente estudio hidrometalúrgico son originarias de Chanduy. El óxido de titanio *se* encuentra asociado con la magnetita formando una solución sólida. El objetivo de esta investigación *es* disolver la asociación magnetita-titanio utilizando ácido sulfúrico. Se ha realizado un estudio particular del comportamiento de esta asociación con el fin de obtener resultados prácticos.

No existen especificaciones rígidas y concretas para el material de alimentación ha ser

utilizado en el proceso del sulfato, pero **es** conocido que ciertas impurezas como el cromo, vanadio, magnesio, fósforo, afectan seriamente a las propiedades del pigmento, de tal forma que el contenido de estos elementos **es** un factor importante en la selección de los concentrados para este proceso. El contenido de dióxido de titanio debe ser lo suficientemente alto para que pueda **ser** recuperado económicamente, y **capaz** de disolverse en ácido sulfúrico a temperaturas prácticas.

En el proceso del sulfato los granos magnetita finamente molidos son digeridos por ácido sulfúrico concentrado formando un cake poroso que **se** disuelve en ácido diluido y en agua para alcanzar una solución de sulfato de Titanio ($TiOSO_4$) y sulfato de hierro ($FeSO_4$). La presencia del hierro férrico es reducida al estado ferroso agregando viruta de hierro. Esto se realiza **para** evitar que el hierro férrico precipite posteriormente en el proceso y se produzca contaminación al **separar** precipitado de titanio. **Esta** reducción produce la cristalización de algo del hierro como sulfato ferraso heptahidratado. Finalmente el dióxido de titanio se precipita por hidrólisis.

SOLUCIONES SOLIDAS

Una fase tiene las siguientes características:

- a) La misma estructura y ordenamiento atómico en todo el material.
- b) Una fase tiene la misma composición y propiedades.
- c) Hay una interficie definida entre la fase y cualesquiera otras fases circundantes.

Por ejemplo, se puede encerrar un bloque de hielo en una cámara con cierto vacío. El hielo empezaría a fundirse y adicionalmente, puede evaporarse agua. Bajo estas condiciones tendríamos tres fases coexistiendo—H₂O sólida, líquida y gaseosa; en este caso las fases tienen una composición idéntica.

Por otra parte, se podría combinar agua (una fase) y alcohol. (segunda fase). Como forman una fase. El vaso contiene una solución de agua y alcohol que tiene una estructura, propiedades y composición únicas. El agua y el alcohol desarrollan una solubilidad ilimitada sin importar la proporción de agua y alcohol, solo se produce una fase al mezclarlos.

De manera similar, una mezcla de cobre líquido y de níquel líquido produce un solo líquido con la misma composición, propiedades y estructura en todo lugar. El cobre y el níquel líquidos tienen solubilidad ilimitada. Después de la solidificación los átomos de **cobre** y níquel se ubican aleatoriamente en una red cúbica centrada en las caras. Dentro de la fase sólida la estructura, las propiedades y la composición son uniformes y no existe ninguna interficie entre los átomos de cobre y níquel. Por esto el cobre y el níquel tienen solubilidad sólida ilimitada. La fase sólida puede ser llamada solución sólida.

Cuando se añade una pequeña cantidad de sal (una fase) al agua (una segunda fase) y agitamos, la sal se **disuelve** completamente en el agua. Se presenta una sola fase: agua salada o salina. Sin embargo si se añade demasiada **sal** al agua, la **sal** excedente se precipita en el fondo del vaso. Ahora tenemos dos fases: **agua** saturada de sal. y **sal** sólida excedente. La **sal**. tiene una solubilidad limitada en el agua.

En el caso extremo puede no haber solubilidad de un material en otro. Este **es** el caso del aceite y el **agua** o las aleaciones sólidas de cobre y plomo .

Para **que** un sistema de aleación, como el de cobre-níquel, tenga solubilidad sólida ilimitada deben satisfacerse ciertas condiciones. Estas son conocidas como reglas de Hume-Rothery y son las siguientes:

- 1) Los átomos de los metales deben ser de tamaño similar, con no más de un 15% de diferencia en el radio atómico, para minimizar la deformación de la red.
- 2) **Los** metales deben tener la misma estructura cristalina .
- 3) Los átomos de los metales deben tener la valencia y electronegatividad similares, de manera **se** fomenta la formación de compuestos.

Las condiciones de Hume-Rothery deben cumplirse ,pero no son necesariamente suficientes para que dos metales tengan una solubilidad sólida ilimitada.

3.1.2 PROCEDIMIENTO

El propósito de este capítulo consiste en investigar, estudiar y experimentar la reacción que se produce al someter un concentrado puro de magnetita a la acción del ácido sulfúrico; observar el comportamiento de la disolución y de las diferentes especies químicas existentes en la solución. Separar solamente aquellas que pertenezcan al grupo del Titanio. Analizar los resultados.

En el laboratorio de la F.I.C.T. debieron realizarse varias pruebas de disolución y de precipitación para determinar los parámetros óptimos para la obtención del TiO_2 .

En cada prueba se varió un parámetro en busca de obtener mayor efectividad en los resultados, a la vez que se obtenía un mejor conocimiento del comportamiento hidrometalúrgico de las arenas negras de Chanduy.

3.1.3 EQUIPOS Y MATERIALES

- Concentrado de magnetita (200 Tyler).
- Acido Sulfúrico 98% concentrado (Industrial).
- Hidróxido de Sodio.
- Viruta de hierro.

- Matraz Erlenmeyer.
- Pipeta volumétrica de 5, 10, 15 cc.
- Vasos de precipitación.
- Horno o mufla
- Espectrofotómetro de rayos x

3.1.4 ENSAYOS QUIMICOS

PRUEBA DE DISOLUCION DEL TITANIO

OBJETIVO

- 1- Conocer la proporción de ácido necesaria para la **disolucion** del titanio
- 2- Conocer el porcentaje de dióxido de titanio en la solución.

PROCEDIMIENTO

- Se toma 10 gr arena concentrada y molida a malla 200 (Tyler) en un matraz de agitación.
- Se coloca una cantidad de ácido sulfúrico al 98%.
- Se observa si hay o no reacción.
- Se agrega H₂O destilada hasta **observar** reacción.
- Se somete a temperatura.
- Se agrega viruta de **Hierro**.
- Se anotan los resultados.

OBSERVACIONES Y RESULTADOS

En la tabla IX se muestran los resultados de la prueba. En esta *se* puede observar que la máxima disolución *se* produce cuando *se* diluye el ácido con H₂O destilada. Además al someter la solución al calor aparece una temperatura de reacción en la que el ácido digiere rápidamente la arena. Es precisamente inmediatamente después de esta reacción que *se* debe agregar viruta de Hierro para fomentar la producción de iones ferrosos que forman un precipitado blanco gelatinoso de Sulfato de Hierro .

Una vez disuelta la arena *se* deja decantar produciéndose una solución de dos fases: Una fase que consiste en una solución café clara de iones de Hierro ferroso y Titanio y otra que es un precipitada blanco de FeSO₄ claramente visible.

En las fotos 11 y 111 *se* puede apreciar la formación de dichas fases.

Se realizó una prueba en el fotómetro de rayos X del Instituto de Química de la E.S.P.O.L. para obtener el porcentaje de Titanio presente



FOTO 2 FASE DE DISOLUCION Y PRECIPITADO DE
SULFATO FERROSO

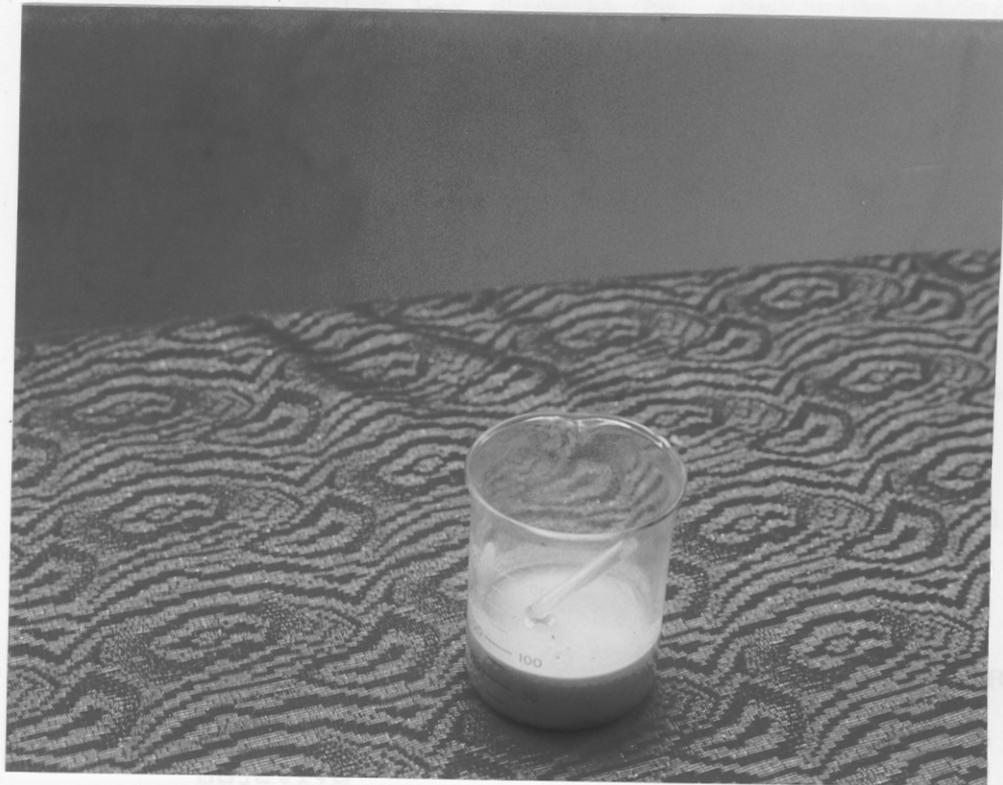


FOTO 3 PRECIPITADO DE SULFATO FERROSO

en la solución y se registró el resultado para cálculos posteriores.

Es necesario anotar que en la disolución de la arena a temperatura se debe mantener una constante agitación para evitar la formación de costras en la base que interfieren en la completa disolución del material.

De igual forma se realizó una prueba de absorción atómica para verificar el contenido de Hierro aún presente en la solución.

Realizadas las pruebas de absorción atómica se obtuvieron los siguientes resultados.

- El porcentaje de disolución de dióxido de Titanio en la prueba 15 fue del 80% de reacción.
- El titanio permanece en la solución ácida como Ti^{++} , TiO^{++} , Ti^{+++} .
- El 44% del Hierro disuelto precipita como sulfato ferroso heptahidratado.
- El 31% del Hierro permanece en la solución como Hierro iónico Fe^{++} , Fe^{+++} .

3.1.5 PRUEBA DE CONTENIDO DE TiO_2 EN EL CONCENTRADO

Objetivo

Conocer la cantidad real de titanio disuelto en la solución y comparar con los resultados

del concentrado de arena obtenido en el laboratorio de la Cemento Nacional.

PROCEDIMIENTO

- Se coloca 1 gr de la arena a malla 200 Tyler en un matraz volúmetrico.
- Se agrega una pequeña cantidad de H₂O destilada.
- Se agita el tubo de ensayo.
- Se agregan 7.5 ml. de H₂SO₄ concentrado.
- Se agita y se somete a calor unos 2 o 3 minutos.
- Se espera que desaparezca la reacción exotérmica producida.
- Se agrega agua destilada poco a poca agitando constantemente hasta completar los 6 ml.
- Si la disolución no es completa se somete a calor hasta alcanzar la temperatura de reacción.
- Se deja enfriar.
- Se agrega agua destilada hasta completar 120 ml.
- Se filtra la solución y se realiza el análisis de absorción atómica.

RESULTADOS

Se obtiene que existe en disolución un 24.5% de dióxido de titanio (TiO₂), lo cual concuerda con los resultados mostrados en la tabla 11 del

capitulo II realizados en el laboratorio de la
Cemento Nacional.

3.1.6 PRUEBA DE PRECIPITACION DEL TITANIO

Objetiva

- Conocer el PH practico de precipitación del Titanio disponible en la solución.
- Evitar la precipitación del Hierro con el Titanio.

Procedimiento

- Se toma 100 ml. de la solución que contiene el titanio disuelto.
- Se agrega hidróxido lentamente en caliente.
- Se agita fa solución.
- Se observa la formación de un precipitado.
- Se filtra el precipitado.
- Se anotan las observaciones.
- Se realiza una prueba de absorción para verificar que haya precipitado todo el titanio disponible dé la solución y que no exista contaminación de hierro.

Resultados

Inicialmente el PH es 1; conforme se agrega hidróxido de sodio se puede observar la formación de un precipitado color café marrón

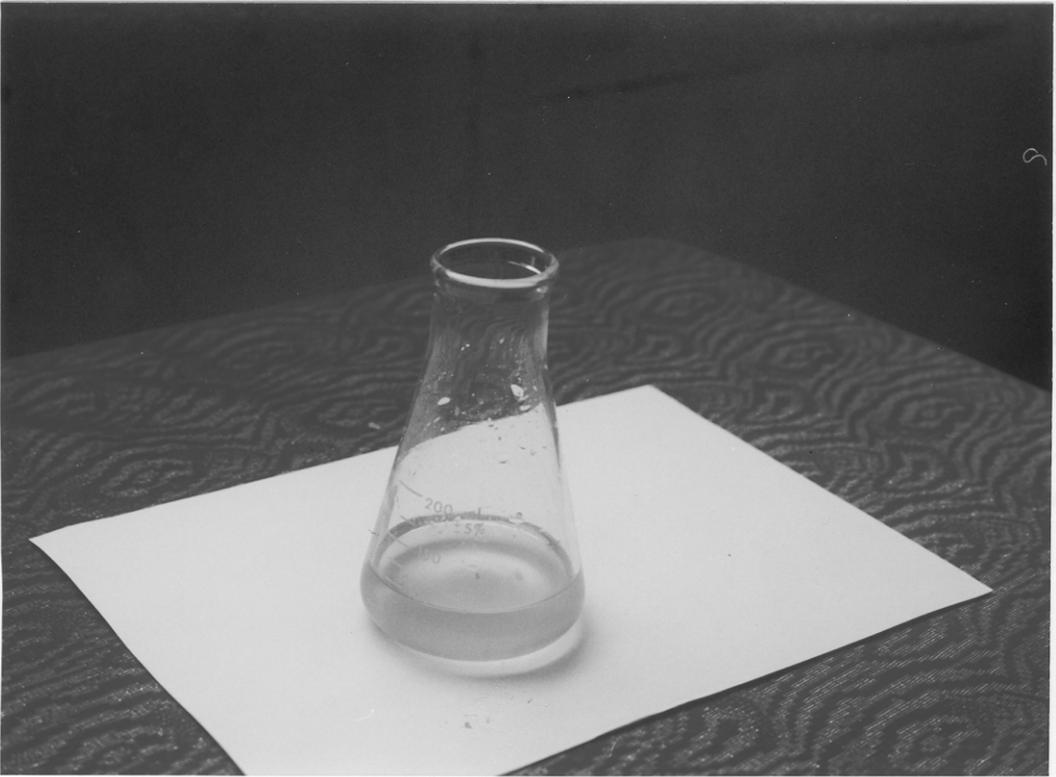


FOTO 4 SOLUCION FILTRADA DE Ti y Fe

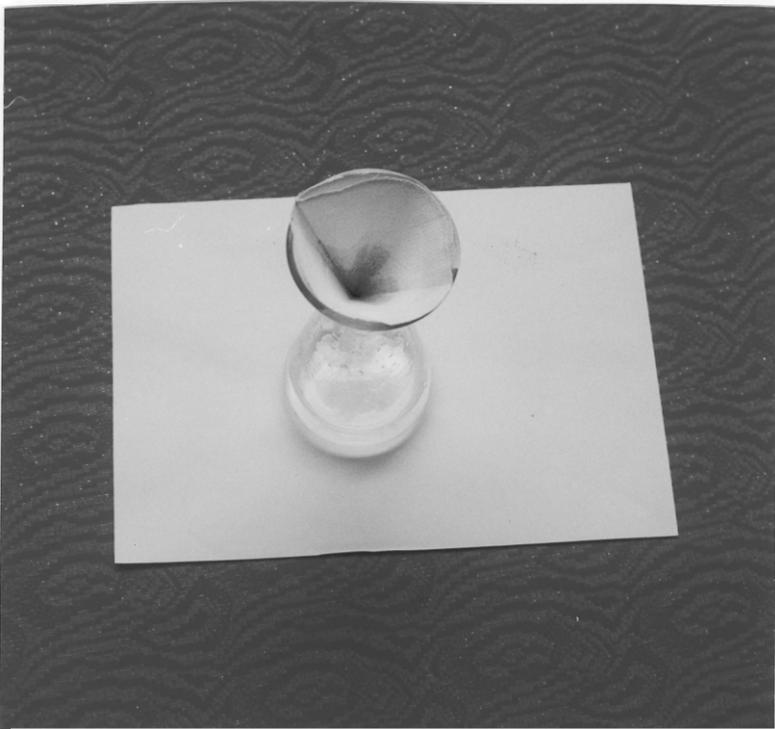


FOTO 5 PRECIPITADO DE Ti y Fe

que se mantiene en suspensión hasta un PH de 4; Después de este PH la solución se vuelve sumamente serisible y pequeñisimas cantidades de hidróxido de sodio llevan la solución a PH alcalinos altos ocasionando la precipitación del hierro.

El PH de precipitación teórico para la concentración 0.1 M de Ti es de 5.8 .

Resumen de los resultados

TABLA X

PRUEBA DE PRECIPITACION DEL TITANIO		
CANTIDAD INICIAL DE ARENA = 10 gr.		
CANTIDAD DE SOLUCION = 100 ml.		
CONCENTRACION DE Ti EN LA SOLUCION = 0.1 M.		
CONCENTRACION DE Fe EN LA SOLUCION = 0.14 M.		
PH	Na(OH) (gr.)	OBSERVACION
0	-	-
1	11.5	-
2	26.3	-
3	1	-
4	1 ml.1M.	Precipitado soluble.
5.8	0,5 ml.1M.	Precipitado insoluble.
6	0,1 ml.1M.	Precipitado insoluble.

CONSUMO DE NaOH = 38.9 gr

3.2 OBTENCION DEL PIGMENTO

Una vez que el precipitado de hidróxido de titanio esta presente en la solución se procede a filtrarlo, a lavarlo y luego a calcinarlo en un horno a una temperatura de 900 C obteniéndose el dióxido de titanio.

3.2.1 CARACTERISICAS DEL PIGMENTO OBTENIDO

Con el fin de determinar el % de dióxido de titanio y de óxido de hierro que contiene el pigmento, se realizaron 2 pruebas de absorción atómica en la solución inicial inmediatamente después de que se observaba la formación de un precipitado con la finalidad de determinar la cantidad de titanio que precipitaba.

Los resultados que se encuentran en la tabla XI muestran los porcentajes de hierro y de titanio que precipitan a diferentes PH para una solución 0.1 de Ti y 0.14 de Fe.

Debe destacarse que la coloración del pigmento es variable y depende de la cantidad de hierro que precipite.

TABLA XI

CARACTERISTICAS DEL PIGMENTO PRECIPITADO		
PH	%Fe	%Ti
0	-	-
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	38,46	47,10
6	61,79	99,99
7	100	100

COMPORTAMIENTO DEL TITANIO EN SOLUCIONES ACUOSAS

(DIAGRAMA DE POURBAIX)

 $[\text{TiO}_2] = 1 \text{ M}$

E(V)

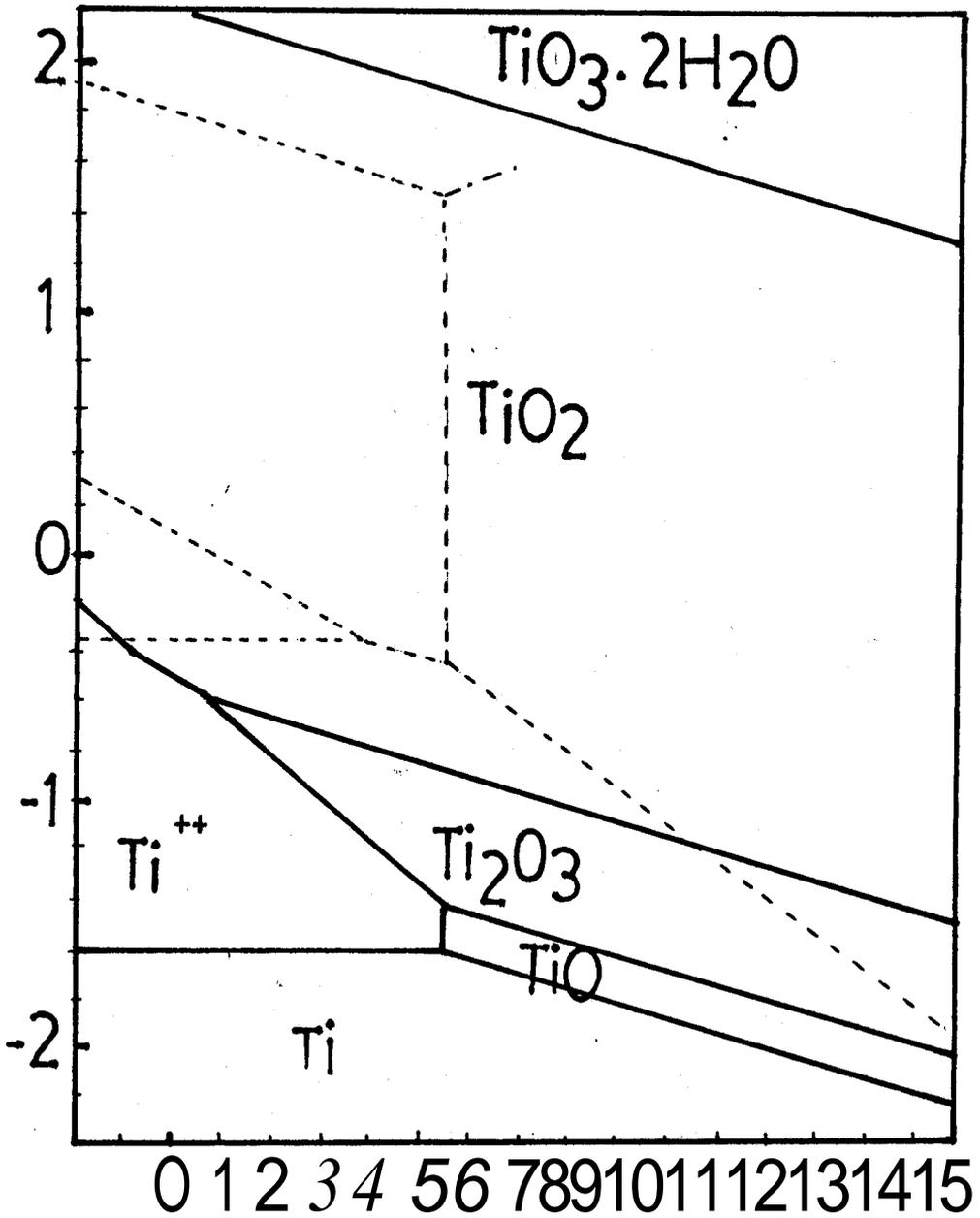


Fig.9

PH

3.3 PROCESAMIENTO MINERAL PARA LA OBTENCION DEL PIGMENTO

Para el diseño de este proceso (ver figura 9) se asumió una producción de 2 TPH de pigmento. El proceso consta de las siguientes etapas:

CONCENTRACION

A. Criba vibratoria

Apertura de malla: 48 Tyler.

Capacidad: 5.5 T.P.H.

B. Tanque Acondicionador

Tamaño (Diámetro x altura): 1 x 1.5 m.

Diámetro de descarga : 7.5 cm.

C. Cuatro mesas Deister Diagonal-Deck No 6.

Las mesas procesarán 5 TPH de arena con una ley media de 45 % de magnetita, con una eficiencia del 94% como se demuestra en la tabla VI del capítulo 11, se obtiene un concentrado casi del 100%.

MOLIENDA

D. Tanque acondicionador.

Tamaño (Diámetro x altura): 1 x 1.5m.

Diámetro de descarga: 7.5 cm

E. Molino de bolas.

Tamaño 1.7 X 1.7 (Diámetro x altura) m.

Capacidad: 2 TPH de material -200 Tyler Mesh

H. Hidrociclón clasificador.

Diámetro : 14 cm.

Caída de presión: 28 Kpa

Se recomienda un modelo D-6 Krebs de acuerdo al Krebs

Cyclone Performance Chart .

F. Tanque recolector.

G. Bomba de lodos

I. Hidrociclón desaguador.

Capacidad: 5 metros cúbicos por hora.

Q: 2 TPH , - 200 Tyler mesh.

PRECIPITACION

J y k. Tanques de precipitación.

Volumen (10 metros cúbicos)

Diámetro de descarga: 30 cm.

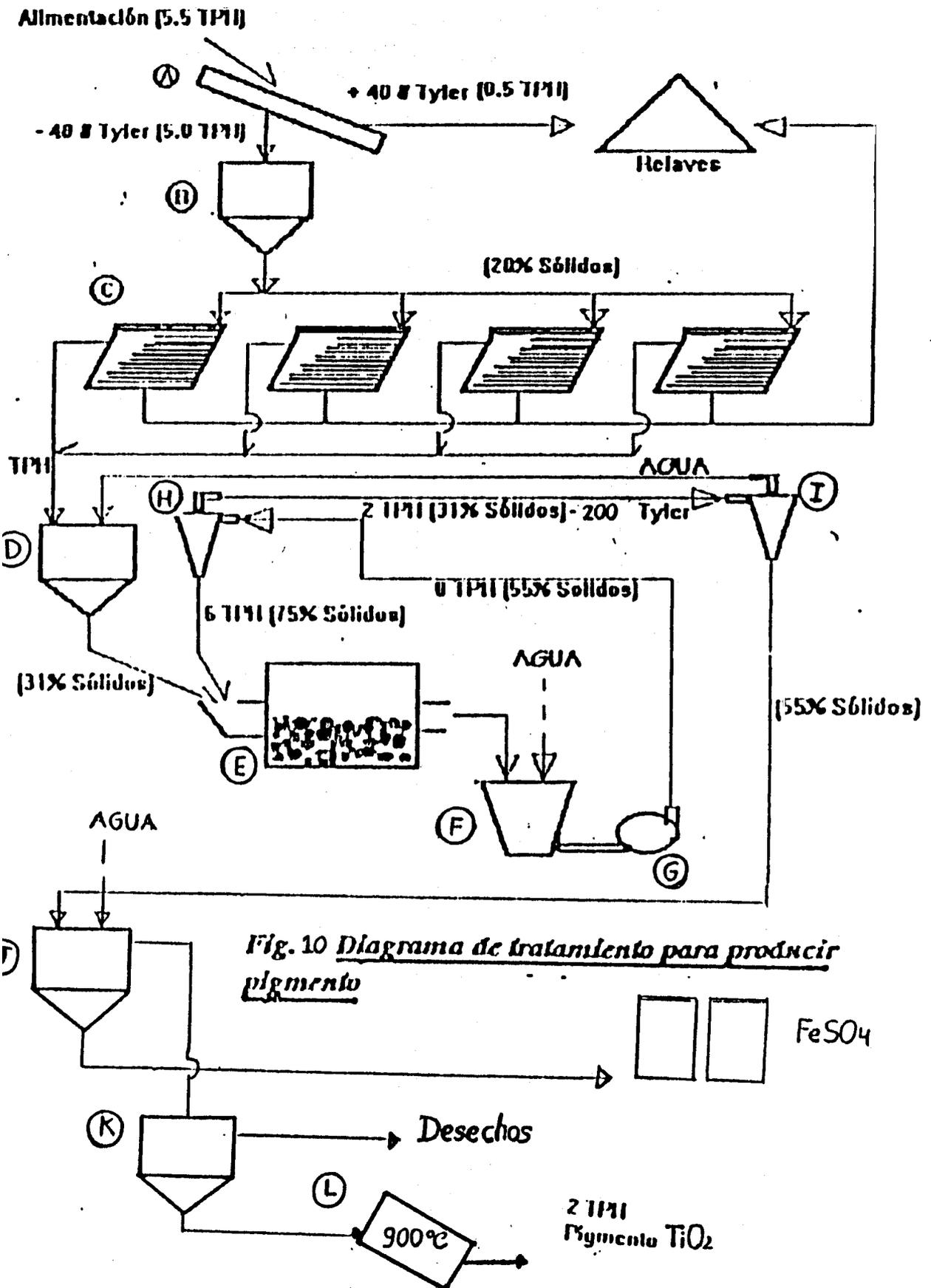
CALCINACION

L. Horno horizontal.

Capacidad 20 toneladas por día.

Tamaño 1 x 6 (Diámetro x largo) m.

Aunque esta tesis no se incluyen los cálculos y consideraciones de dimensionamiento, estos fueron realizados tomando en cuenta todas las normas técnicas con las que se pudo contar.



3.4 DECCRIPCION DE OTROS PROCESOS PARA OBTENER EL DIOXIDO DE TITANIO.

3.4.1 PROCESO DEL CLORHIDRATO

En el proceso del clorhidrato, se produce el tetraclorhidrato de titanio ($TiCl_4$) por la clorinación de materiales con alto contenido de titanio a una temperatura de 850 a 900 grados centígrados en la presencia de carbón de petróleo .

El tetraclorhidrato de titanio es altamente reactivo en estado líquido a temperaturas de cuarto (25 C - 30 C) y reacciona violentamente con el polvo. Por tal razón, el proceso debe ser realizado **bajo** condiciones inertes para evitar la contaminación por el oxígeno o por el polvo contenido en el aire.

Desafortunadamente las impurezas existentes en la mena también forman clorhidratos, los cuales se deben separar por condensación fraccional, de otra manera serían precipitados con el dióxido de titanio alterando el color del pigmento. Hierro, Vanadio y silicón son las impurezas más comunes. También se puede separar las impurezas por destilación o tratamiento químico. El tetraclorhidrato de titanio

purificado es convertido directamente a dióxido de titanio oxidándolo con aire u oxígeno a alta temperatura.

3.4.2 PROCESO DEL FLUROTITANATO

Este proceso fue anunciado en Septiembre de 1984 por la compañía Albany Titanium Inc. En su método patentado, fluorosilicato de sodio *se* agrega a la ilmenita para formar fluorotitanato de sodio, separando el hierro. El fluorotitanato de sodio obtenido *es* reducido con un material de aluminio-zinc, produciendo un material de titanio-zinc, del que *se* obtiene la esponja de titanio por evaporación del zinc.

CAPITULO IV

ESTUDIO DE COSTOS PARA EL PROCESO DE OBTENCION Y PRODUCCION DEL PIGMENTO

4.1 CONSUMO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO DEL SULFATO.

De acuerdo al capitulo III, los materiales que se requieren para la producción del óxido de titanio son:

- Concentrado de Arena negra.
- Acido Sulfúrico.
- Viruta de Hierro.
- Hidróxido de Sodio.

Basado en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el capitulo III de la presente investigación, el consumo estimado de los materiales necesarios para producir una tonelada de óxido de Titanio esta dado por las cantidades señaladas en la tabla XTI; en ésta se indican las cantidades en peso de materia prima utilizadas para obtener una tonelada de dióxido de titanio partiendo de la arena negra previamente concentrada.

TABLA XII

CONSUMO DE MATERIALES PARA PRODUCIR UNA TONELADA DE TiO_2	
Acido sulfúrico al 98%.....	13.800 kilos
Hidróxido de Sodio.....	4.000 kilos
Viruta de Hierro	50 kilos

4.2 COSTOS PARA PRODUCIR UNA TONELADA DE PIGMENTO

Los costos para producir una tonelada de dióxido de titanio se dividen en:

- Costo de transportación de la arena.
- Costos de concentración de la magnetita.
- Costo de la Molienda.
- Costo de tratamiento ácido.
- Costo de calcinación del pigmento.
- Costo por el consumo de materia prima.

Es importante **destacar** que los cálculos de costos de producción están directamente relacionados con los **costos** de los diversos equipos utilizados en la planta de tratamiento y que el volumen de producción constituye un factor decisivo en la rentabilidad del proceso pues justifica la inversión inicial y asegura la recuperación del capital a corto, mediano o largo plazo.

Si existe un estudio de mercado que demuestre la presencia de una demanda satisfactoria para el **producto** entonces su comercialización estará garantizada.

Con estos antecedentes **se** pretende informar al lector que los costos de producción presentados en esta investigación no son específicos, sino que

pueden variar dependiendo de la capacidad la planta de tratamiento, del costo respectivo de cada equipo en particular y del volumen total de producción.

El análisis de costos realizado en la **presente** investigación esta orientado a utilizar la información obtenida al **realizar**- un estudio de laboratorio y cuantificarla con la finalidad de **tener** una idea aproximada del costo total para producir una tonelada de dióxido de titanio.

Una vez obtenido el **valor** total del costo para producir una tonelada de pigmento se realizará una estimación del costo de una planta de tratamiento para **dos** toneladas diarias.

4.2.1 COSTO DE TRANSPORTACION DE LA ARENA

Si la planta de tratamiento se cibera a unos dos Km. de distancia se estima un costo de **transporte** de \$20.000 la tonelada.

4.2.2 COSTOS DE CONCENTRACION

Si **se** utilizan mesar; concentradoras Deister Diagonal-Deck No 6, éstas tienen un valor de 6.000 dólares, por lo que se justifica un costo de operación de \$10.000 la **hora**. Si la tasa de procesamiento es de 1.33 kg/minuto y

existe un 49% de concentrados pesados y una recuperación de magnetita en la mesa de un 94% según la tabla V del capítulo II, entonces:

$$1000\text{kg} = 12,53 \text{ horas} ; 1000 \times .49 \cdot .94 = 460.6 \\ 1.33 \times 60$$

Es decir se necesitan 12,53 horas para obtener una 460.6 kg. de concentrado puro en una mesa. Si requerimos 1 Ton . , entonces se necesitan 27,2 horas. Si consideramos que en el proceso concentración también interviene el tanque de acondicionamiento, entonces un precio razonable para gastos de operación en la concentración de la arena es de \$ 12.000 la hora.

4.2.3 COSTO DE MOLIENDA

Considerando que el índice de trabajo obtenido para la magnetita es de 13.51 Kw-hr/ST podemos obtener un costo para moler una tonelada del concentrado en función del gasto energético.

$$1000\text{Kg} \times 13.51 \text{ kw-hr} \times 1 \text{ ST} = 14,86 \text{ Kw-hr} \\ \text{ST} \quad 909,1\text{Kg.}$$

Si el precio del Kw-hr está en \$ 600,00 y además se realiza un recargo del 30% por gasto de operación del molino entonces:

$$14,86 \times \$600,00 \times 1,30 = \$ 11.590,80$$

4.2.4 COSTO DE TRATAMIENTO ACIDO

De acuerdo a la tabla IX del capítulo 3 existe un consumo de 7.5 ml. de ácido concentrado por cada gramo de arena concentrada a malla 200 Tyler; si consideramos que el litro de ácido sulfúrico concentrado tiene un precio de \$5.133 entonces para tratar una tonelada de arena se necesita:

$$1000 \text{ kg arena} \times \frac{7.500.000 \text{ ml.}}{1.000.000 \text{ gr.}} \times \frac{1 \text{ lt.}}{1000 \text{ ml.}} \times \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ Kg.}}$$

$$= 7.500 \text{ litros de ácido sulfúrico.}$$

$$\text{Y } 7.500 \times \$ 5.133 = \$ 3.849.750$$

4.2.5 COSTO DE CALCINACION DEL PIGMENTO

Para obtener el pigmento es necesario calcinar el precipitado obtenido a 900 C por lo que el costo de calcinación del pigmento depende directamente del gasto energético del horno y del costo de éste; Se puede estimar un gasto de energía para el horno 3 a 4 veces mayor al del molino y un recargo del 40% se usa para justificar el costo de operación que tiene el uso del horno, entonces:

$$14,86 \times 4 \times \$600,00 \times 1,40 = \$ 49.761,60$$

4.2.6 COSTOS POR CONSUMO DE MATERIA PRIMA

De acuerdo a la tabla XII de éste capítulo, el consumo respectivo de materia prima por cada gramo de arena tratado es:

	CONSUMO	PRECIO
- Viruta de hierro	0,05 gr.	\$ 1000 Ky.
-Hidróxido de Sodio	3.5 - 4 gr.	\$ 2000 Ky.

Los costos totales para una tonelada de arena concentrada son:

- 50 kilos de viruta	\$ 50.000
- 4000 Kilos de NaOH	\$ 8.000.000

4.2.7 COSTOS TOTALES PARA UNA TONELADA DE TI02

- Costos por transportación	\$ 20.000
- Costos por concentración	* 326.400
- Costos por molienda	\$ 11.590
- Costas por calcinación	\$ 49.761
- Costos por tratamiento ácido	\$ 3.049.755
- Costos consumo de materia prima	\$ U.000.000
TOTAL	\$ 12.257.506

4.2.8 COSTOS PARA UNA PLANTA DE 2 TONELADAS DIARIAS DE TI02

Se estima que una planta de procesamiento mineral como la diseñada en la figura 9 puede tener un costo aproximado de 40.000 dólares.

4.3 PRODUCCION MUNDIAL Y PRECIOS.

La producción de concentrados de titanio en el mundo es amplia. En la tabla 23 se puede observar los países productores de estos concentrados en el año de 1971, además en la tabla 11 se muestra el consumo de pigmento de TiO_2 de los Estados Unidos para el mismo año.

De acuerdo al reporte de industrias publicado por el departamento del interior de minas de los Estados Unidos, el consumo del pigmento de titanio en el año de 1991 para Norteamérica debería incrementarse en un 2.1% anual hasta 1995. Mientras tanto la demanda en el este de Europa se incrementaría en un 2.6% por año. En Asia y Oceanía la demanda se predecía en un 4.3% hasta 1995. Aunque de 1985 a 1990 la producción del pigmento se incremento en 177.000 toneladas anuales, de 1990 a 1995 esta programado incrementar la capacidad en 295.000 toneladas. Expansiones futuras son anticipadas en áreas de alta demanda como Asia, América Latina.

Se debe destacar que la capacidad para producir dióxido de titanio hasta ese entonces era de 120.000 toneladas métricas por año utilizando el proceso del sulfato y de 1.135.000 toneladas utilizando el proceso del clorhidrato.

La relación Tiempo-precio para el titanio esta dada por la tabla XIII.

TABLA XIII

RELACION TIEMPO- PRECIO PARA EL TITANIO	
(Dólares por libra)	
Año	Precio
1971	0.45
1972	0.45
1973	0.50
1974	0.72
1975	0.73
1976	0.78
1977	0.81
1978	0.85
1979	0.98
1980	1.05
1981	1.25
1982	1.25
1983	1.25
1984	1.25
1985	1.30
1986	1.37
1987	1.37
1988	1.60
1989	1.75
1990	1.67
1991	1.64

TABLA XIV

PRODUCCION MUNDIAL DE CONCENTRADOS DE TITANIO (ILMENITA, RUTILO Y ARENA TITANIFERA)	
PAIS	1991 (Toneladas metricas ?
	Ilmenita
Australia	1.363 .000
Brazil	120 .000
China	150 .000
India	160 .000
Malasia	336.347
Noruega	800 .000
Portugal	40
Sierra Leona	60 .400
Tailandia	17.071
U.R.R.S	400 .000
	TOTAL 3.425 .319
	Rutilo
Australia	201.000
Brazil	2 .000
India	5 .000
Sierra Leona	154.800
Sur Africa	75.000
Tailandia	3.000
U.S.S.R.	9 .000
	TOTAL 3.425319
	Arena Titanifer
Canadá	600.000
Africa des Sur	900 .000
	TOTAL 1 .500.000

CONSUMO DE PIGMENTO DE U.S.A. AÑO DE 1991 (Toneladas métricas)	
Material	Pigmento
Ilmenita	474,440
Arena Titanífera	273,976
Rutilo	335,872

CAPITULO V

5.1 CONCLUSIONES

1.-Se puede concluir de acuerdo al reconocimiento realizado por (F. Mosquera y Gaston Ruales) a la largo de las zonas del litoral en el año de 1973 que existen zonas con un posible valor económico según la extensión e intensidad de las manchas de arena negra en el siguiente orden de prioridad decreciente:

- Isla Puná.
- Cojimies.
- N. de Sta. Elena
- Bolibar
- Ensenada de Surrones
- Ensenada de Bálsamo
- Chanduy.
- Punta Galera.
- Atacames.

2.-En la distribución granulométrica de las arenas se encontró que la mayor parte de magnetita se encuentra entre la malla 60 y 140 ; Los retenidos de las mallas 80 y 100 son casi en su totalidad de magnetita.

3.-La recuperación de magnetita en la mesa vibratoria es del. 94% y el concentrado es del. 98% , por lo que se recomienda su uso para separar magnetita.

4.--El índice de trabajo para la magnetita es 13.51 kw-hr, se recomienda la molienda en húmedo por ser más eficiente que la molienda en seco.

5.-El ácido sulfúrico concentrado no digiere la magnetita finamente molida; El ácido sulfúrico diluido si, pero estrictamente en las proporciones indicadas en la tabla del capítulo III. y con calor.

6.--El porcentaje de disolución de la prueba para el TiO_2 fue del 80%. Si asumimos que todo el hierro presente en el concentrado se disolvió, un 44% precipito como sulfato ferroso heptahidratado y el 31% quedo aún disponible en la solución.

7-La precipitación del hidróxido de titanio se inicia en cantidades muy ligeras a un PH = a 4; En éste punto la solución es sumamente sensible a alcanzar PH alcalinos con pequeñisimas cantidades de hidróxido de Sodio. Es más a PH cercanos a 6 existe la precipitación de Fe en conjunto con el titanio por lo que se recomienda evitar la presencia de Fe en la solución.

5.2 RECOMENDACIONES

1.-Se recomienda un estudio geoquímico más detallado de las zonas de la península con cierta interés económico de acuerdo al reconocimiento aéreo que en 1973 realizó (F.Mosquera y Gaston Ruales) con el fin de establecer la presencia de arenas con un alto contenido de TiO_2 que representen valores alentadores para un futuro proceso hidrometalúrgico.

2.-La concentración de la magnetita de las arenas es efectiva y eficiente con la utilización de mesas concentradoras. Su uso es recomendada.

3.--La molienda en húmedo de la magnetita a una finura pasante malla 200 es eficiente. Se recomienda el uso de un molino de bolas para este proceso.

4.--El éxito de la separación hidrometalúrgica del dióxido de titanio de las arenas negras esta en el enriquecimiento de titanio del mineral a ser tratada, pues así se evita la precipitación posterior del hierro en el proceso.

5.--Suponiendo que generalidad de las arenas negras de la península tengan un contenido promedio de TiO_2 de 26% entonces se recomienda métodos pirometalúrgicos para la obtención de una escoria rica en titanio que permita un proceso hidrometalúrgico efectivo y económico para la obtención del TiO_2 puro.

6.-Se recomienda continuar investigando métodos que que puedan disminuir los costos de consumo de materia prima como el uso de cal. en vez del hidróxido de Sodio.

A continuación se expone al diagrama de flujo de la Quebec Iron and Titanium Corporation para procesar una gran cantidad de ilmenita que contiene un 88% de óxidos combinados, entre estos de 30% TiO_2 y 42,3% de Fe. El proceso consiste en una reducción selectiva del óxido de hierro formando una escoria que contiene un 70% de TiO_2 y 6% de óxido de hierro y hierro fundido que contiene como impurezas carbono y azufre principalmente. Se recomienda éste tratamiento de pirometalurgia antes de realizar la separación hidrometalúrgica con el fin de obtener resultados más óptimos en la pureza del pigmento.

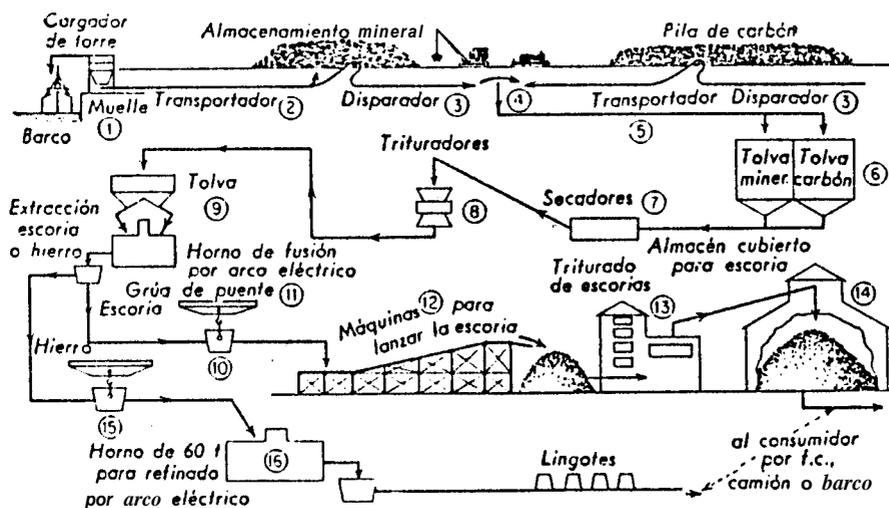


FIGURA 11

BIBLIOGRAFIA

- 1.-CARRION PAUL. Recuperación de Oro de relaves utilizando mesa concentradora y cianuración por concentración (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL, 1991). pp. 1 - 76.
- 2.-CORNELIOUS S. MURLUT. Manual de Mineralogía de Dana. (2da Edición; 1974). pp. 134-150,219-231,346-348,320-323.
- 3.-CAMPOVERDE ALEXIS. Producción de pigmentos a partir de Minerales de Oxidos de Hierro para su aplicación en Hormigones Integralmente Coloreados, (Tesis; F.I.C.T.) .pp 113-157
- 4 -GAMBOGI JOSEPH. Titanium Annual Report, U S Department of the Interior Bureau of Mines, 1991, pp. 13-30.
- 5 -GAMBOGI JOSEPH. Mineral Industry Surveys, U S Department of the Interior Bureau of Mines, 1992, pp. 210.
- 6.-KELLY SPOTTISWOOD Introducción al Procesamiento de Minerales(Noriega editores). pp. 151-186, 303-311
- 7.-KIRK, MUMMER, SOOTH Y STANDEN. Enciclopedia de tecnología Química. Tomo XII (1ra Edición; México: Unión tipográfica Editorial Hispanoamericana, 1962 pp 11-263.

8.- PIMENTEL DIEGO. Estudio Mineralúrgico para la recuperación de estibina. Yacimiento Loma Larga. (Tesis, Facultad de Ingeniería de Ciencias de la Tierra, ESPOL,1990). pp. 20-132.

9.-MARCEL POURBAIX. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous solutions, Pergamon Press,1971, pp. 214- 221.

10.-SAA ANA. Estudio de la concentración natural y artificial de Arenas negras en General Villamil Playas. (Tesis, Facultad de Ingeniería de Ciencias de la Tierra, ESPOL,1991). pp. 130-163.

11.-SEMINARIO DE TRATAMIENTO Y ENRIQUECIMIENTO DE MINERALES, Guayaquil, 1980. Tratamiento de Arenas Titaníferas, por Ing. Sergio Aguayo (Guayaquil: ESPOL, 1980). pp 172 -213.

12.STANLEY J. LEFOND. Industrial Mineral and rocks. Volumen I, (5ta Edición; Nueva York, Society of Mining Engineers). pp 349-371

13.-WILLS.- Mineral Processing Technology. (4ta Edición; Pergamon Press, 1988). pp. 204-208, 258

13.-Zwicker U. Titanium Science and Technology, Technische Universitat Hamburg, FRG,1984, pp 3-15.