

T
547.969
C198



Escuela Superior
POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA ~~TERRA~~

PRODUCCION DE PIGMENTOS A PARTIR DE MINERALES
DE OXIDOS DE HIERRO PARA SU APLICACION EN
HORMIGONES INTEGRALMENTE COLOREADOS

TESIS DE GRADO

Previo a la Obtención del Título de:
INGENIERO DE MINAS

Presentada por:

Alexis | Campoverde Gallardo

1994

GUAYAQUIL

ECUADOR



D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MI HERMANA

A MIS HERMANOS

A MI **SOBRINA**

A MIS TIOS

A G R A D E C I M I E N T O

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

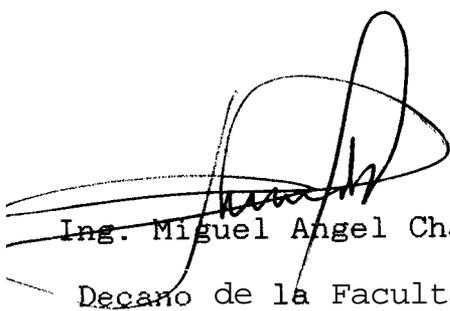
Al Centro Técnico del Hormigón y todo
su personal. en especial al Ing. Carrión.
por todo el apoyo que me **han** brindaaao.

Al Ing. Alvaro Villanueva de Pinturas
Cóndor por su atenta colaboración.

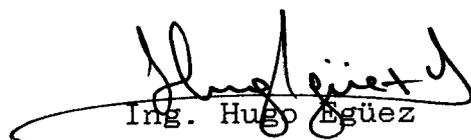
A mis amigos William. Davicho. Diego Y
Julio García.

A los profesores de la Escuela de Minas.





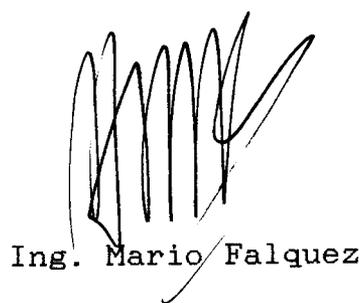
Ing. Miguel Angel Chávez
Decano de la Facultad



Ing. Hugo Egüez
Director de Tesis



Ing. Walter Camacho



Ing. Mario Falquez

Miembros del Tribunal

DECLARACION EXPRESB

"La responsabilidad por 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 Titulos profesionales de la ESFOL)

Alexis Campoverde G.

Alexis Campoverde Gallardo



RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad demostrar la utilidad de 4 pigmentos minerales en la producción de hormigones integralmente coloreados (HIC). Para ello se eligieron tres óxidos de hierro naturales existentes en el país: hematita para producir pigmento rojo; limonita para pigmentos rojo y amarillo; y magnetita para pigmento negro.

El mineral de hematita fue recolectado en la concesión minera "Los Lojas" cerca de la ciudad de Guayaquil. El análisis químico dió como resultado un contenido de óxido de hierro de 87.26%, y de la prueba de molienda se obtuvo un índice de trabajo de 22.4 Kw-hr/ST. Se obtuvo un pigmento con un 80% porcentaje de peso pasante (PPP) de 12.1 μm . La probeta de HIC que resultó de este pigmento fue de un color rojo pálido satisfactorio.

El mineral de limonita fue recolectado en una anomalía cerca del cantón Chunchi, provincia del Chimborazo. El análisis químico mostró un contenido de óxido hidratado de hierro de 87%, y la prueba de molienda indicó un índice de trabajo de 9.38 Kw-hr/ST. Se obtuvieron pigmentos amarillos con dos granulometrías: uno con un 80% PPP de 15.2 μm y otro con 80% PPP de 8.4 μm . Las probetas de HIC

que se realizaron con estos pigmentos fueron de un color amarillo limoso.

De la limonita también se obtuvieron pigmentos rojos de dos granulometrías: uno con 80% PPP de 4.4 μm y otro con 80% PPP de 4.0 μm . Las probetas probetas de HIC producidas a partir de estos pigmentos fueron de un color rojo ladrillo muy satisfactorio.

La magnetita fue obtenida a partir de una muestra de arenas negras del área de Chanduy. El análisis mineralógico mostró que estas arenas tienen una ley promedio de 48% de magnetitas, las mismas que están concentradas entre las mallas 60 y 140 Tylsr según el análisis granulométrico.

Para recuperar las magnetitas de las arenas se hicieron pruebas con un concentrador magnético, un cilindro magnético. y con un concentrador gravimétrico, una mesa concentradora. La máxima recuperación se logra con la mesa, esta es de 94% con una pureza del 98%. Las magnetitas contienen 73% de óxido de hierro y 24% de óxido de titanio, y poseen un índice de trabajo de 13.51 Kw-hr/ST. Se obtuvieron pigmentos con dos granulometrías diferentes: uno con 80% PPP de 19.5 μm y otro con un 80% PPP de 12.1 μm . La probeta de HIC producida con el pigmento más fino fue de un color negro satisfactorio.

INDICE GENERAL

	Pagina
RESUMEN	5
INDICE GENERAL	7
INDICE DE FIGURAS	12
INDICE DE TABLAS	13
INDICE DE GRAFICOS	15
INDICE DE FOTOGRAFIAS	16
ABREVIATURAS	17
INTRODUCCION.....	22
CAPITULO 1	
PIGMENTOS	24
1.1 Generalidades	24
1.2 Clasificación.....	27
1.3 Minerales óxidos de hierro como pigmentos..	27
1.3.1 Clasificación.....	28
1.3.2 Pigmentos negros	30
1.3.3 Pigmentos rojos.....	31
1.3.4 Pigmentos amarillos.....	33
1.3.5 Propiedades químicas.....	37
1.3.6 Propiedades físicas.....	38
1.3.7 Manufactura	42
1.3.8 Estadísticas Económicas.....	44
1.3.9 Aplicaciones	46

CAPITULO II	
HEMATITA COMO PIGMENTO NATURAL.....	49
2.1 Ocurrencia en el país.....	49
2.2 Recolección de la muestra.....	51
2.3 Preparación de la muestra.....	51
2.4 Composición Mineralógica.....	51
2.5 Contenido de Oxido de Hierro.....	52
2.6 Proceso de Reducción de Tamaño.....	52
2.6.1 Teoría de la Trituración/Molienda...	54
2.6.2 Relaciones de Energía/Reducción de tamaño de una mena.....	58
2.6.3 Secuencias de Trituración/Molienda..	61
2.6.4 Análisis Granulométrico.....	62
2.6.5 Principios del Molino de Bolas.....	63
2.6.6 Prueba de Trituración.....	66
2.6.7 Prueba de Molienda.....	67
2.7 Proceso de Obtención del pigmento.....	78
2.8 Características del pigmento obtenido.....	79
2.8.1 Gravedad específica.....	79
2.8.2 Granulometría.....	82
2.9 Procesamiento Mineral para la obtención del pigmento (Diseño Tentativo).....	91
CAPITULO III	
LIMONITA COMO PIGMENTO NATURAL.....	95

3.1	Ocurrencia en el país.....	95
3.2	Recolección de la muestra.....	95
3.3	Preparación de la muestra.....	95
3.4	Descripción Mineralógica..	96
3.5	Contenido de Oxido de Hierro.....	96
3.6	Análisis del proceso de molienda.....	96
3.6.1	Prueba de Trituración.....	96
3.6.2	Prueba de Molienda.....	96
3.7	Proceso de obtención del pigmento amarillo.	104
3.8	Proceso de obtención del pigmento rojo.....	104
3.9	Características de los pigmentos obtenidos.	105
3.9.1	Gravedad específica.....	105
3.9.2	Granulometría.....	105
3.10	Procesamiento Mineral para la obtención de los pigmentos (Diseño Tentativo).....	106

CAPITULO IV

MAGNETITA COMO FIGMENTO NATURAL.....	113
4.1 Ocurrencia en el país.....	113
4.2 Recolección de la muestra.....	115
4.3 Preparación de la muestra.....	116
4.4 Análisis Mineralógico Semicuantitativo.....	117
4.5 Composición Química de las magnetitas.....	118
4.6 Distribución Granulométrica de las arenas y las magnetitas.....	118
4.7 Proceso de Obtención de las Magnetitas.....	123

4.7.1	Separación Magnética por vía seca...	123
4.7.2	Separación Gravimétrica por vía húmeda.....	132
4.8	Proceso de Molienda	144
4.9	Proceso de Obtención del Pigmento.....	154
4.10	Características del Pigmento Obtenido.....	154
4.10.1	Gravedad Específica.....	154
4.10.2	Granulometría.....	154
4.11	Procesamiento Mineral para la Obtención del Pigmento (Diseño Tentativo).....	157
 CAPITULO V		
	HORMIGON INTEGRALMENTE COLOREADO.....	160
5.1	Introducción al Hormigón Integralmente Coloreado.....	163
5.1.1	Hormigones y morteros coloreados...	160
5.1.2	Tipos y Propiedades de los Agentes Colorantes.....	161
5.1.3	Efectos del color de los componentes del hormigón integralmente coloreado	165
5.1.4	Formas de realizar el mezclado del HIC.....	167
5.1.5	Efecto de los pigmentos sobre las propiedades físicas de las mezclas frescas.....	167
5.2	Metodología para la elaboración de una	

probeta de hormigón integralmente coloreado	168
5.3 Resultados de color obtenidos de los ensayos con las probetas de hormigón integralmente coloreado.....	169.
5.3.1 Resultados de las pruebas con las probetas para el pigmento rojo de hematita.....	169
5.3.2 Resultados de las pruebas con las probetas para el pigmento amarillo de limonita.....	172
5.3.3 Resultados de las pruebas con las probetas para el pigmento rojo de limonita.....	172
5.3.4 Resultados de las pruebas con las probetas para el pigmento negro de magnetita.....	174
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	178
BIBLIOGRAFIA	180



INDICE DE FIGURAS

No		Página
1.	DIAGRAMA DE TRATAMIENTO PARA PRODUCIR PIGMENTO ROJO A PARTIR DE HEMATITA Y LIMONITA.....	92
2.	DIAGRAMA DE TRATAMIENTO PARA PRODUCIR PIGMENTO AMARILLO A PARTIR DE LIMONITA ..	112
3	CURVAS TÍPICAS DE MAGNETIZACION	
3a.	MINERALES FERROMAGNETICOS (MAGNETITA)....	130
3b.	MINERALES PARAMAGNETICOS (HEMATITA) Y PARAMAGNETICOS (CUARZO).....	130
4.	CILINDRO MAGNETICO DE POLO AXIAL TIPO AGITADOR	130
5.	ACCION EN UN PELICULA QUE FLUYE	
6.	MESA CONCENTRADORA.....	139
7.	DISTRIBUCION DE LOS PRODUCTOS EN UNA MESA CONCENTRADORA.....	139
8.	ESTRATIFICACION VERTICAL ENTRE RIFFLES..	139
9.	DIAGRAMA DE TRATAMIENTO PARA PRODUCIR PIGMENTO NEGRO A PARTIR DE MAGNETITA ...	158

INDICE DE TABLAS

NO		Página
I .	PRODUCCION MUNDIAL DE PIGMENTOS NATURALES DE OXIDOS DE HIERRO. POR PAIS	45
II .	DESCRIPCION MINERALOGICA DE LA HEMATITA	53
III .	CONTENIDO DE OXIDO DE HIERRO DE LA HEMATITA	53
IV .	PRUEBA DE TRITURACION DE LA HEMATITA	68
V .	CARGA DE BOLAS	68
VI .	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA HEMATITA	75
VII .	INDICE DE TRABAJO DE LA HEMATITA	75
VIII .	PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA HEMATITA	89
IX .	ENSAYO HIDROMETRICO DEL PIGMENTO ROJO DE HEMATITA	89
X .	DESCRIPCION MINERALOGICA DE LA LIMONITA	97
XI .	CONTENIDO DE OXIDO DE HIERRO DE LOS PIGMENTOS DE LIMONITA	97
XII .	PRUEBA DE TRITURACION DE LA LIMONITA	99
XIII .	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA LIMONITA	99
XIV .	INDICE DE TRABAJO DE LA LIMONITA	101
XV .	GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS PIGMENTOS DE LIMONITA	101
XVI .	ENSAYO HIDROMETRICO DEL PRIMER PIGMENTO AMARILLO	107
XVII .	ENSAYO HIDROMETRICO DEL SEGUNDO	

	PIGMENTO AMARILLO.....	107
XVIII.	ENSAYO HIDROMETRICO DEL PRIMER PIGMENTO ROJO.....	109
XIX.	ENSAYO HIDROMETRICO DEL SEGUNDO PIGMENTO ROJO.....	109
XX.	RESULTADOS DEL ANALISIS MINERALOGICO DE LA ARENA.....	119
XXI.	GRANULOMETRIA DE LA ARENA Y DE LA MAGNETITA.	119
XXII.	COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITAS FERROMAGNETICAS.....	120
XXIII.	COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITAS PARAMAGNETICAS.....	120
XXIV.	PRUEBAS CON EL CONCENTRADOR MAGNETICO.....	145
XXV.	PARAMETROS DE LA MESA CONCENTRADORA.....	145
XXVI.	BALANCE EN LA PRUEBA CON EL CONCENTRADOR MAGNETICO.....	146
XXVII.	BALANCE EN LA PRUEBA CON EL CONCENTRADOR GRAVIMETRICO.....	146
XXVIII.	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA MAGNETITA.....	151
XXIX.	PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECICA DE LA MAGNETITA.	151
XXX.	ENSAYO HIDROMETRICO DEL PRIMER PIGMENTO NEGRO.....	155
XXXI.	ENSAYO HIDROMETRICO DEL SEGUNDO PIGMENTO NEGRO.....	155
XXXII.	COMPOSICION DE LAS PROBETAS DE HORMIGON INTEGRALMENTE COLOREADO.....	170

INDICE DE GRAFICOS

No		Página
1.	PRUEBA DE TRITURACION DE LA HEMATITA.....	69
2.	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA HEMATITA	77
3.	CURVA GRANULOMETRICA DEL PIGMENTO ROJO DE HEMATITA.....	90
4.	PRUEBA DE TRITURACION DE LA LIMONITA.....	100
5.	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA LIMONITA.....	102
6.	CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PIGMENTO AMARILLO DE LIMONITA.....	108
7.	CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PIGMENTO ROJO DE LIMONITA.....	110
e.	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA ARENA CONTENIDO DE MAGNETITA POR TAMIZ.....	122
9.	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA MAGNETITA (MATERIAL DESCONOCIDO).....	152
10.	PRUEBA DE MOLIENDA DE LA MAGNETITA (MATERIAL CONOCIDO).....	153
11.	CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PIGMENTO NEGRO DE MAGNETITA.....	156

INDICE DE FOTOGRAFIAS

No	Página
1	Probetas de HIC con rojo de hematita..... 171
2	Se presenta el lado no expuesto de las probetas de la fotografía 1..... 171
3	Probetas de HIC con amarillo de limonita..... 173
4	Se presenta el lado no expuesto de las probetas de la fotografía 3..... 173
5	Probetas de HIC con rojo de limonita..... 175
6	Se presenta el lado no expuesto de las probetas de la fotografía 5..... 175
7	Probetas de HIC con negro de magnetita..... 177
8	Se presenta el lado no expuesto de las probetas de la fotografia 7..... 177

ABREVIATURAS

B	Inducción Magnética
CC	Promedio de los dos Últimos periodos
Ct	Factor de temperatura
CT	Carga circulante inicial
D1	Tamaño de la partícula inicial
D2	Tamaño de la partícula final
D	Diámetro interno del molino de bolas
De	Diámetro efectivo
Dh	Gravedad específica del mineral pesado
Df	Gravedad específica del medio fluído
Dl	Gravedad específica del mineral liviano
DS	Densidad de la partícula
d	diámetro de una partícula
db	Diámetro de la bola más grande en un molino de bolas
dx	Diferencial en el eje x
dy	Diferencial en el eje y
E	Energía de entrada
F(d)	Fracción Acumulada de Peso
g	Aceleración de la gravedad
G	Gravedad específica
Gs	Densidad del pigmento
Gw	Densidad del agua
H	Campo Magnético Aplicado

HIC	Hormigón integralmente coloreado
J	Volumen de carga en un molino de bolas
k	Tamaño máximo de la curva granulométrica
he	Pendiente de la curva de magnetización
K	Constante de la ley de Rittinger
L	Largo del Molino
m	Pendiente
n	Viscosidad del agua
N	Porcentaje de material de diámetro menor que el considerado
Nc	Masa de material representativo
*N	Fracción de Velocidad Crítica
Pr	Tamaño en μm de los cuales pasa el 80% del producto
P	Potencia del molino
PPI	Producto de período ideal
P _l	Peso de material pasante
PN _i	Producto neto del período
PNR	Producto neto por revolución
PPP	Porcentaje de peso pasante
Q	Tasa de producción
R	Lectura corregida de hidrómetro
R	Lectura de hidrómetro + 1
Re	Razón de reducción
Rc	R - caso de corrección + Ct
R _l	Peso de material pasante
t	Lapso de tiempo

T	Temperatura
U	Intensidad de magnetización
V	Velocidad de rotación del molino de bolas
V_p	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
ws	Peso seco de la muestra
Wmsl	Peso de picnómetro + pigmento
Wml	Peso de picnómetro + agua
x	Malla de prueba
X _p	80% del pasante de la carga del producto
X _f	80% del pasante de la carga de alimentación
X _{pt}	80% del pasante del producto de material desconocido
X_{pr}	80% del pasante del producto de material conocido
X _{ft}	80% del pasante de la carga de alimentación de material desconocido
X _{fr}	80% del pasante de la carga de alimentación de material conocido
Z	Distancia entre la superficie de suspensión y el centro de inmersión del hidrómetro
$\bar{\sigma}$	Densidad de bolas

- P** Densidad de bolas de acero
- O** Densidad de empaque de **las** bolas
- P** Promedio de los dos últimos periodos

UNIDADES

- A** Ampere
- cc Centímetro cúbico
- cm Centímetro
- °C Grados Celcius
- gr** Gramo
- hr Hora
- Kg** Kilogramo
- Kpa** Kilopascal
- Kw Kilovatio
- m Metro
- ml Mililitro
- mm** Milímetro
- min Minuto
- p** Pie
- pulg Pulgada
- rev Revolución
- rpm Revolución por minuto
- ST Tonelada corta
- T Tesla
- Ton Tonelada métrica
- TPH Tonelada métrica por hora



Wb Weber

μm Micra

INTRODUCCION

Los óxidos de hierro tienen la cualidad especial de ser los Únicos minerales significativamente coloreados que se encuentran en la naturaleza relativamente disponibles para su uso como pigmentos después de ser pulverizados.

Los pigmentos minerales de óxidos de hierro además de utilizarse en hormigones también se aplican en la obtención de pinturas, en la electrónica para la producción de ferritas, y en el coloreado integral de cauchos, plásticos y compuestos relacionados.

El uso de hormigón y morteros integralmente coloreados para revestimientos, tejas, adoquines y juntas, ha crecido rápidamente a pesar de que se tienen muy pocos datos a largo plazo sobre su comportamiento y durabilidad.

El presente trabajo tiene como finalidad demostrar la utilidad de tres minerales de óxidos de hierro que existen en nuestro país para la producción de pigmentos. Estos minerales son la magnetita que se encuentra en las arenas negras de nuestras playas, la hematita de los filones de hierro localizados al norte de la ciudad de Guayaquil en el sitio denominado Los Lojas, y la limonita que existe en

una anomalía cercana al cantón Chunchi, provincia de Chimborazo.

La metodología que se sigue comprende: primero, la obtención de **los pigmentos** a partir de los minerales de óxido de hierro, para lo cual se utilizaron las facilidades de los laboratorios de Mineralurgia y Mecánica de Suelos de la ESPOL; y segundo, la utilización de estos pigmentos en la elaboración de probetas de hormigón integralmente coloreado, lo cual **se** realizó en **los** laboratorios del Centro Técnico del Hormigón.

CAPITULO I

PIGMENTOS

1.1 GENERALIDADES

La palabra pigmento deriva del latin pingere, pintar. Los pigmentos son materias colorantes que se desempeñan como los principales componentes de los sistemas de revestimiento y contribuyen directamente a la utilidad de éstos en su función protectora, su función decorativa o artística y otras funciones varias, como la de seguridad en pinturas para señales de tráfico, indicadores de temperaturas críticas y para fines generales de marcar. En cada uno de estos fines, el pigmento desempeña un papel importante en la capacidad de la pintura para realizar su función. De manera análoga, los pigmentos son componentes importantes de otras clases de productos relacionados con revestimientos orgánicos; por ejemplo linóleo, tintas, revestimientos de telas, caucho, plásticos y revestimientos para papeles (17).

La propiedad característica de un pigmento, que lo

distingue de un colorante, es su insolubilidad sustancial en un portador o vehículo sólido o líquido. Los colorantes (o materiales para teñir) suelen ser compuestos orgánicos que sirven para dar color a diversas sustancias, entre otras las siguientes: fibras animales, vegetales o sintéticas y otros productos tales como lana, seda, algodón, lino, rayón, nailon, papel, cuero o pieles, u también materiales como aceites, ceras, caucho o plásticos. En estos casos el colorante puede formar una combinación química con la sustancia que se tiñe, o bien unirse a ésta físicamente. Los colorantes que son solubles en agua, o que se pueden volver solubles por medio de alguna simple reacción química (como la reducción) se usan generalmente para teñir o estampar fibras y materiales similares. Los colorantes para disolventes, aceites, ceras, o plásticos son solubles en estos medios, o bien pueden ser divididos en partículas tan pequeñas que se pueden dispersar eficazmente para dar gran intensidad de color. Las materias colorantes insolubles se conocen con el nombre de pigmentos. Algunos colorantes solubles son convertidos en pigmentos orgánicos para ser usados en barnices y pinturas. Los colorantes naturales que se usaron en otras épocas han sido reemplazados casi en su totalidad por

colorantes sintéticos, casi todos de estructura compleja. Hay que ejecutar una larga serie de operaciones para convertir las materias primas, por ejemplo, como las procedentes de la hulla o del petróleo, en productos que puedan reaccionar entre sí y formar colorantes.

Aparte del color y la opacidad, los pigmentos contribuyen a la calidad de los sistemas de revestimientos, con ciertas propiedades físicas y químicas más especializadas. Son ejemplo de propiedades químicas las inhibidoras de la herrumbre que se exigen en las pinturas marinas, el mejoramiento de la duración exterior en las pinturas para casas y esmaltes de exterior, etc.

En la actualidad se usan como pigmentos una variedad casi infinita de sustancias. El uso de los pigmentos naturales se remonta a los tiempos prehistóricos; el número de materias usadas como pigmentos aumentó lentamente hasta el siglo XIX; entonces, el desarrollo de la Química fue acompañado por un enorme aumento en el número de estas sustancias. Sin embargo, las materias pigmentarias más antiguas no fueron fácilmente reemplazadas por las nuevas y muchas de ellas se usan todavía en cantidades sustanciales en la industria moderna.



1.2 CLASIFICACION

Los pigmentos se clasifican en orgánicos e inorgánicos. Los pigmentos orgánicos se obtienen por síntesis química orgánica de azoicos insolubles. Los pigmentos inorgánicos se clasifican a su vez en naturales y sintéticos. Los pigmentos inorgánicos naturales son aquellos obtenidos de fuentes minerales. Los pigmentos inorgánicos sintéticos se obtienen por síntesis química inorgánica de sales como cromatos, ferrocianuros, etc.

1.3 MINERALES DE OXIDOS DE HIERRO COMO PIGMENTOS.

Los óxidos de hierro se clasifican como pigmentos inorgánicos, y como se vió anteriormente pueden ser naturales o sintéticos. Los óxidos de hierro naturales tienen la cualidad especial de ser los únicos minerales significativamente coloreados que se encuentran en la naturaleza, relativamente disponibles para su uso como pigmentos después de ser pulverizados a tamaño pigmentario. El hecho de que depósitos altamente coloreados de óxidos de hierro se encuentran en todo el mundo explica su uso en las pinturas artisticas de las cavernas por el hombre prehistórico. En adición a la abundancia, constituyen cerca del 7% de la corteza terrestre, los minerales de óxidos de hierro tienen la ventaja de su

bajo costo, permanencia, y no son tóxicos. A lo largo de los siglos, civilizaciones subsecuentes han utilizado los óxidos de hierro como la mayor fuente para decoración y protección cuando se quiere color. En el siglo pasado la industria química ha desarrollado un rango completo de pigmentos de óxido de hierro sintéticos los cuales superan los pigmentos producidos de menas de hierro natural en uniformidad, calidad de color, y pureza química (25). En 1991 en los Estados Unidos solamente, la producción minera y las ventas de pigmentos de óxidos de hierro en bruto fueron de 34.083 y 40.220 toneladas métricas respectivamente (26).

1.3.1 CLASIFICACION

Una característica importante de un pigmento es su color y, por lo tanto, sobre esta base se puede clasificar a los pigmentos de óxidos de hierro.

A. Pigmentos amarillos

1. Pigmentos naturales

- a) Goetita
- b) Lepidocrocita
- c) Ogres
- d) Sienas

e) Limonita

2. Pigmentos sintéticos

a) Goetita

B. Pigmentos **rojos**

1. Pigmentos naturales

a) Hematita

b) Siderita (calcinada)

c) Piritas (calcinada)

d) Limonita (calcinada)

2. Pigmentos sintéticos

a) Hematita

C. Pigmentos de color café.

1. Pigmentos naturales

a) Umbers

b) Limonita (calcinada)

c) Siderita (calcinada)

d) Goetita

2. Pigmentos sintéticos

a) Mezclas de hematita, goetita y magnetita

b) Coprecitado de hematita-magnetita

c) Magemita

D. Pigmentos negros

1. Pigmentos naturales

a) Magnetita

b) Pizarra (mezcla de minerales)

2. Pigmentos sintéticos

a) Magnetita

1.3.2 PIGMENTOS NEGROS

Entre los pigmentos negros de óxido de hierro tenemos el óxido natural de hierro y el óxido sintético de hierro. El óxido negro natural de hierro, conocido como magnetita, se encuentra en muchas partes del mundo. Un análisis típico es: **94.0-95.0%** de Fe_3O_4 (óxido ferroso férrico), **2.25%** de SiO_2 y menos de 1.0% de Al_2O_3 . El mineral seleccionado se muele en seco y se clasifica para producir el pigmento negro grisáceo, que tiene las siguientes propiedades típicas: peso específico 4.73; absorción de aceite 16 Kg de aceite de linaza por 100 Kg de pigmento; tamaño de las partículas, 1.0-40 μm ; **3%** queda retenida en el tamiz No 325 Tyler. Como los pigmentos rojo, pardo y amarillo se óxido de hierro, el óxido negro de hierro es relativamente barato y bastante permanente. Se **usa** mucho en pinturas para imprimación de metales (17).

El óxido precipitado de hierro de color negro se obtiene por la reacción de **una** sal ferrosa y

un álcali, seguida de oxidación. Es un pigmento con **gran** capacidad de recubrimiento y excelente potencia colorante. El tamaño de **las** partículas varía entre 0.10 y 1.25 micras.

1.3.3 PIGMENTOS ROJOS

En el grupo de pigmentos inorgánicos de color rojo el subgrupo más importante es el formado por los óxidos de hierro. Estos óxidos se obtienen de fuentes minerales y también se fabrican por procedimientos químicos. Los pigmentos minerales se obtienen de cinco minerales de hierro: hematites, limonita, magnetita, pirita y siderita. Estos minerales se encuentran en todo el mundo y se tratan por tres procedimientos para usarlos como pigmentos: purificación, reducción del tamaño de las partículas y calcinación para cambiar la composición química. El material del que se parte más comúnmente para la fabricación de los óxidos de hierro sintéticos es la caparrosa ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); **se** hace uso también de otras sales de hierro (17).

La hematita, la limonita y la siderita son los principales minerales convertidos en pigmentos

rojos. **Los** pigmentos de hematita más conocidos y más antiguos son el óxido español y el óxido del Golfo Pérsico, así llamados por la procedencia de **los** minerales.

En España el mineral seleccionado se muele en seco o en agua y luego se clasifica por aire o por levigación. Los pigmentos de óxido español se caracterizan por un contenido relativamente elevado de hierro, por lo general comprendido entre 78 y 90% de Fe_2O_3 ; las mejores calidades se suministran con un contenido mínimo de 85% de Fe_2O_3 . Un análisis típico del pigmento es 6.1-8.1% de SiO_2 , 1.0-1.5% de Al_2O_3 , 4% de $\text{CaO} + \text{MgO}$; pérdida por calcinación, 2.4-3.0%. Un óxido español con esta composición tiene un peso específico de 4.35-4.46, una absorción de aceite de 12-19 Kg de aceite por 100 Kg de pigmento y un máximo de 2% retenido sobre el tamiz del No 325 Tyler. Ninguno de los pigmentos rojos de óxido de hierro pueden compararse por su brillo y la pureza de su color con los pigmentos rojos orgánicos mejores y más comunes. El óxido español se **usa** en casi todas las clases de pinturas y es el óxido férrico natural preferido para las pinturas de imprimación que inhiben la herrumbre por su

elevado contenido de hierro.

La siena quemada se prepara partiendo de tierra de Siena bruta, limonita amarilla que se produce en de Italia. Contiene principalmente silicato y aluminato de hierro juntamente con óxido férrico, sílice, alúmina y agua combinada. La siena bruta se seca y se calcina para eliminar el agua combinada, oxidar la materia orgánica y el óxido ferroso, que se convierte en óxido férrico. El color del pigmento varía según las condiciones de la calcinación y depende también del contenido de hierro del mineral usado. Este pigmento es relativamente transparente en aceite y en los vehículos usuales para pinturas. Por esta razón, encuentra un *uso* considerable en colores de tinción, pero se usa también como pigmento primario en otras clases de pinturas.

1.3.4 PIGMENTOS AMARILLOS

Los óxidos de hierro están entre los grupos de pigmentos inorgánicos amarillos que tienen más importancia comercial. Estos se obtienen de fuentes minerales y se producen sintéticamente. Los principales pigmentos naturales de óxido de

hierro amarillos son **los** ocres y las sienas; todos se obtienen de minerales de limonita. La composición y la **pureza** de las limonitas es **muy** variable; son principalmente óxido **férrico** hidratado; **su** composición varía entre **2Fe2O3.H2O** y **Fe2O3.4H2O**. **Las** impurezas son sílice y alúmina, y el color varia entre amarillo claro y negro pardusco. El mineral purificado se pulveriza hasta el grano de finura adecuado. La limonita está muy distribuida por todo el mundo y los procedimientos usados para preparar los pigmentos varían entre las operaciones manuales muy primitivas y los procedimientos altamente mecanizados. No existe una división clara entre los ocres y las sienas en lo que respecta al contenido de hierro. Por lo general, los pigmentos con un contenido más bajo de óxido de hierro y color más claro se clasifican como ocres, y los más ricos en óxido de hierro y más oscuros se llaman sienas. **Los** ocres están estrechamente relacionados con las arcillas naturales: cantidades sustanciales del óxido férrico hidratado amarillo comunican las características de color. En las sienas, una porción importante del hierro está combinado

como silicato y aluminato. El ocre es uno de los pigmentos más antiguos y se menciona por Homero hacia el siglo IX a. de C. **LOS** principales yacimientos se encuentran en Estados Unidos, Francia, India y Sudáfrica. **Los** ocrees americanos se obtienen de minerales de limonita que contienen sílice y alúmina en combinación con el óxido férrico amarillo hidratado; éste varía entre 15 y 60%, según el yacimiento. Los ocrees se obtienen por explotación a cielo abierto o subterránea; los minerales se seleccionan por su pureza y se concentran por lavado mecánico y clasificación con agua. El exceso de agua se elimina de la lechada de pigmento, que se seca después, se pulveriza y se empaqueta. Si se ha de mejorar la finura, se muele la lechada de pigmento con agua en molinos de bolas. El análisis químico de los ocrees americanos varía entre 15 y 60% de Fe_2O_3 , entre 27 y 53% de SiO_2 , 4.5 a 17% de Al_2O_3 , hasta 1% de CaO y MgO ; pérdida por calcinación hasta 12%. El peso específico varía entre 2.67 y 3.81 y la absorción de aceite está comprendida entre 16 y **49** Kg de aceite por 100 Kg de pigmento; menos de 2% queda retenido sobre el tamiz No 325. El color

varía entre el amarillo claro **y** el amarillo pardusco. Se usan para colores de masa **y** tinturas en muchas **clases** de pinturas **y** tintes para interior **y** exterior, así como también en papeles **y** revestimientos para papeles, caucho, cemento, etc. **Las** sienas más importantes **son** la siena cruda italiana **y** la siena cruda americana. Las sienas crudas americanas son semejantes a los ocreos americanos más oscuros. El análisis de estas sienas da entre 26 **y** 80% de Fe_2O_3 **y** 9 a **64%** de silicatos; pérdida por calcinación, hasta 13.5%. El peso específico varía entre 2.71 **y** 3.84, **y** la absorción de aceite es de 19-36 Kg de aceite de linaza por 100 Kg de pigmento. Las sienas americanas se usan para las mismas aplicaciones que los ocreos americanos (17).

Los óxidos de hierro hidratados sintéticos se fabrican en varios tonos que van desde el amarillo limón claro al anaranjado oscuro amarillento, pasando por el amarillo **y** el amarillo anaranjado. **Los** diferentes tonos **se** obtienen por la selección minuciosa del tamaño **y** la forma de las partículas, cuyo diámetro es inferior a 1 μm . Su fabricación empieza con una solución de una sal de hierro en la cual se

forma un precipitado de hidrato férrico coloidal por la adición de precipitantes y oxidantes. Este tipo de pigmentos se caracterizan por su tamaño sumamente fino y uniforme de partículas y gran contenido de hierro, cualidades que le dan gran capacidad de cubrimiento, fuerte intensidad de tintura y producción de colores y tintes claros y uniformes. Por todas estas razones y porque su costo es relativamente bajo, reemplazan con ventaja a las sienas crudas y los ocre naturales, que son más débiles, menos uniformes y más apagados.

1.3.5 PROPIEDADES QUIMICAS

La mayoría de las menas de hierro pigmentario son no reactivas, químicamente inertes, y contienen solo trazas de metales pesados y elementos tóxicos, usualmente químicamente enlazadas en la forma de silicatos complejos. Los pigmentos sintéticos producidos de materia prima básica tienen la ventaja de que se pueden emplear pasos de purificación para reducir el contenido de metales pesados: plomo, antimonio, arsénico, cadmio, mercurio, y selenio de la materia prima. Si se siguen precauciones

subsecuentes evitando la contaminación durante el proceso, las impurezas de metales pesados en los óxidos sintéticos serán cerca de **un** décimo de lo que contienen **los** mejores pigmentos minerales naturales. Los pigmentos de óxidos de hierro tienen un alto grado de resistencia a la decoloración (lightfastness). Este es un término que se refiere a la habilidad de una película pigmentada a resistir la exposición a energía radiante con mínimos cambios físicos **y** / o químicos (25).

1.3.6 PROPIEDADES FISICAS

Las propiedades físicas de los óxidos de hierro son más importantes que las propiedades químicas en vista de que ellos son químicamente inertes. Algunas propiedades físicas requieren definición para proveer una clara comprensión del mérito de un pigmento y distinguir entre naturales **y** sintéticos o pigmentos de otras familias.

Absorción de aceite: La absorción de aceite se define como el peso de vehículo requerido para mojar una cantidad definida de pigmento para formar una pasta. Hay numerosos

métodos y dispositivos para determinar la absorción de aceite. La absorción de aceite o demanda de ligante, **es una** propiedad importante pues se relaciona con el tamaño de la partícula, forma, Y características superficiales y coloca ciertas limitaciones sobre la formulación de la pintura **y** otros **usos** finales donde **las** interacciones sólido-líquido son importantes.

Area Superficial: Dos pigmentos de esencialmente el mismo tamaño medio de partícula pueden tener áreas superficiales ampliamente divergentes. Esto puede ser debido a características superficiales o de forma tales como porosidad, tamaño de poro, y suavidad. Puesto que las propiedades de energía superficial y espectral dependen de la superficie, su medida se convierte en un factor importante. El área superficial de **una** partícula puede ser definida como el área de las superficies externas totales incluyendo poros pero excluyendo poros internos (aislados). Cuando los poros internos son **mas** pequeños que la molécula del medio a ser absorbido, ellos no serán medidos. El método fundamental y más ampliamente aceptado para

determinar el Brea superficial es **por** absorción de un gas, usualmente nitrógeno **y** se designa como el método **BET**. El valor obtenido de área superficial se expresa en metros cuadrados por gramo.

Tamaño de partícula: Ningún método o instrumento actualmente en existencia medirá adecuadamente partículas en el rango de tamaños de 100 a 0.01 μm . Libros completos se han dedicado a este tema, el cual es probablemente la propiedad física más importante de los pigmentos. No es suficiente declarar un tamaño promedio de partícula puesto que la distribución de tamaños es igualmente importante. **A** menos que se especifique, el diámetro de la partícula será el diámetro de una esfera teniendo la misma velocidad terminal como partícula. Esto es comúnmente llamado un diámetro de Stokes **y** se deriva de la ecuación de Stokes para partículas depositándose bajo la acción de la gravedad a través de un fluido infinito. Términos **que** son comunes en la tecnología de partículas son:

1) Partícula discreta: Una unidad individual de materia la cual puede cambiar de tamaño solo por la rotura o la fractura de los enlaces

químicos dentro de su estructura.

2) **Cristalito:** Una unidad cristalina individual, esto es, esa parte de una partícula que tiene sus átomos y moléculas arregladas en una perfecta red cristalina.

3) **Agregado:** Un grupo de partículas discretas ligadas por fuertes uniones químicas.

4) **Aglomerado:** Un grupo de partículas discretas o agregados ligados por débiles uniones químicas.

5) **Flóculo:** Grupos de agregados o partículas usualmente formados en suspensiones y fácilmente dispersados con fuerzas mínimas.

Forma: En algunas aplicaciones la forma de la partícula puede tener un efecto más profundo que el tamaño. El óxido de hierro micáceo y partículas aciculares contribuyen con características completamente diferentes a un sistema pigmentado que su contraparte esférica equivalente. Varias técnicas han sido concebidas para aplicar valores numéricos para factores de forma. Los pigmentos pueden ser clasificados de acuerdo a la forma dentro de cinco categorías: esferoidal, cúbica, nodular, circular, y laminar.



Propiedades Ópticas: Las propiedades ópticas de los pigmentos son dependientes de la estructura cristalina y molecular y son influenciadas por el tamaño y la forma de las partículas discretas. Puesto que los pigmentos son raramente usados en su estado pulverizado, el efecto último depende del sistema. La luz entrando a un sistema pigmentado puede ser absorbida, reflejada, o refractada a través de interacciones partícula a partícula. La forma y la intensidad de la luz reflejada resulta en refractancia espectral la cual puede ser medida por un espectrofotómetro.

Propiedades Magnéticas: Los óxidos de hierro son usualmente antiferromagnéticos pero también pueden ser ferromagnéticos como los producidos sintéticamente y en ciertas especies minerales naturales. Las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos pueden ser determinadas por varias técnicas, entre las más comunes tenemos: balance de momento magnético, magnetómetro vibrante de muestras, etc.

1.3.7 MANUFACTURA

Los procedimientos de manufactura para los

minerales debe ser deseñada desde la mena base. Por ejemplo, la siderita (FeCO_3) requiere calcinación para convertirla en óxido mientras que la pirita calcinada, aunque esencialmente es Fe_2O_3 , debe ser liberada de sus residuos ácidos. También, ciertas menas, aunque disponibles para su uso por simple molienda, desarrollan colores más deseables si son calcinadas. Otras menas naturales, siennas, son producidas en forma bruta y calcinada.

Algunas de las hematitas y de las magnetitas son beneficiadas magnéticamente para incrementar la pureza química y remover minerales silíceos indeseables. Esto es particularmente verdad si el uso final tiene requerimientos de pureza química tales como las ferritas. La beneficiación magnética es más eficiente si el tamaño de la malla se controla dentro de límites bastante estrechos. Por lo tanto, la beneficiación magnética húmeda usualmente sigue a la trituración y cribado y previo a la molienda fina y calcinación. El proceso produce un superconcentrado con purezas en exceso de 99.5% Fe_2O_3 o Fe_3O_4 desde concentrados con leyes más bajas.

El uso de molinos de energía fluida,

micronizadores, y métodos mejorados de clasificación han capacitado al manufacturador a producir pigmentos naturales de óxidos de hierro que compiten con **los** sintéticos en muchas aplicaciones donde la pureza química **y** el tamaño último de **la** partícula discreta no es un factor (25).

1.3.8 ESTADÍSTICAS ECONÓMICAS

En 1991 los EEUU la producción de pigmentos naturales de óxidos de hierro ascendió a 46169 toneladas métricas por un valor de US \$16.015.000. En el mismo año este país realizó importaciones de esta materia prima por un valor de US \$1.624.000 (25).

La producción mundial de pigmentos naturales de óxidos de hierro desde 1987 hasta 1991 se ha mantenido como se deduce de la tabla I.

Según datos del Banco Central, entre los años 1980 y 1985 en nuestro país se importaron un promedio anual de 280 toneladas métricas de óxidos e hidróxidos de hierro y 204 toneladas métricas de **óxidos** de hierro micáceo por un valor de US \$318.000 y US \$153.408 respectivamente.

TABLA I

PRODUCCION MUNDIAL DE PIGMENTOS NATURALES DE
OXIDOS DE HIERRO, POR PAIS. (TONELADAS METRICAS)*

PAIS	1987	1988	1989	1990	1991
Argentina	1.022	815	578	600	600
Austria	10.807	9.938	10.924	9.936	10.000
Brazil	5.803	5.223	5.500	5.500	5.500
Chile	8.145	6.542	23.653	15.557	16.000
China	12.500	10.000	8.534	7.700	8.000
Francia	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
Alemania	10.000	8.143	7.596	6.218	6.000
India	145.245	151.781	173.366	180.000	125.000
Irán	4.300	4.300	4.300	4.500	4.500
Italia	850	850	850	850	700
Pakistán	1.792	1.040	2.394	1.382	1.400
Paraguay	285	250	250	250	250
Sudáfrica	768	2.070	1.327	2.903	908
España					
Ocre	10.500	10.500	10.500	10.500	8.200
Oxid. rojos	20.500	20.500	20.500	20.500	20.000
Estados Unidos					
Unidos	31.186	30.747	36.661	32.421	34.083
Yugoslavia	1.061	444	853	1.212	800
Zimbabwe	200	363	287	416	400

*Tomado de "IRON OXIDE PIGMENTS IN 1991" de MINERAL INDUSTRY SURVEYS, editado por el U.S Department of the Interior - Bureau of Mines.

1.3.9 APLICACIONES

Muchas de las aplicaciones de los óxidos naturales de hierro se deriva de su bajo costo y permanencia. Cuando se consideran las aplicaciones y los usos finales, existe una superposición de magnitud entre los naturales y los sintéticos; ambos, por ejemplo, son usados extensivamente en pinturas (25).

Pinturas y revestimientos: La variedad y tipo de revestimientos industriales son demasiado numerosos para mencionarlos individualmente. Hay algunos tipos generales de pinturas en donde los óxidos naturales de hierro proveen propiedades excelentes. Los primarios, los extendedores y los modificadores varían en el grado de la carga de pigmento y funcionan como una base para varios revestimientos superiores. Los pigmentos primarios son usualmente hematitas y pueden ser altamente concentrados debido a la alta densidad, al tamaño de partícula bastante grande, y baja absorción de aceite. Las sienas tienen características únicas de color las cuales no son fácilmente igualadas con los sintéticas y de aquí que sean los más usados en tinción. Los óxidos

naturales de hierro también se **usan** en pinturas interiores y exteriores **para el hogar, pero** en menor grado que los **sintéticos**.

Electrónica: Los óxidos naturales de hierro son usados regularmente en la preparación de ferrita de bario y en menor proporción en la preparación de ferrita de manganeso y zinc. **Las** ferritas de manganeso y zinc son muy sensibles a las impurezas y de aquí que el uso de los óxidos naturales ha sido limitado. Magnetita y hematita altamente beneficiada pueden ser usadas para preparar ferritas de bario.

Caucho, plásticos y compuestos relacionados: Los pigmentos naturales son usados en caucho y muchos de los plásticos más comunes tales como vinilo, poliuretanos y epóxicos. La tendencia general ha sido hacia el mayor uso de los pigmentos sintéticos debido al valor de color por unidad de precio.

Productos de Hormigón y materiales de construcción: Los óxidos naturales están disponibles en todos los aspectos para su uso en hormigón coloreado, morteros, tejas y materiales de construcción similares. En el

concreto coloreado, el tinte es la característica importante y los pigmentos sintéticos han reemplazado muchos de los naturales debido a su poder de tinción más alto.

CAPITULO II

HEMATITA COMO PIGMENTO NATURAL

2.1 OCURRENCIA EN EL PAIS

Los yacimientos de hematita se encuentran comúnmente asociados con los de limonita. En nuestro país se encuentran indicios de hierro (hematita y/o limonita) en Mangahurco en Azuay, Guanujo en Bolívar, Sierra Macas en Cotopaxí, en Pascuales y Los Lojas en Guayas, Cariamanga y Catacocha en Loja, Pedernales en Manabí, y Juan Montalvo y Cotacachi en Pichincha (19).

Una de las anomalías más conocidas de hematita es el de la concesión minera de "Los Lojas" de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Esta conceeión se halla ubicada pocos kilómetros al norte de los límites metropolitanos de la ciudad de Guayaquil, en los cerros de la Eetancia, en la jurisdicción de la Parroquia "Los Lojae" del cantón Daule. El área coneiete en un número de vetas o



filones minerales cuyo contenido, en sus afloramientos, es de hematita y de limonita. Estos afloramientos de hematita han sido examinados en varias oportunidades por geólogos en relación o dependientes del Gobierno. El último y posiblemente más completo exámen, aunque de carácter superficial, fue el denominado: "Operation No 7. Guayas-Manabí" "Survey of Metallic and Non-Metallic Minerals". El mismo fue realizado por el "United Nations Development Programme" y sus resultados fueron publicados en 1969. Según este reporte la mineralización de hematita ocurre como relleno de fisuras en una serie de 5 vetas paralelas a e 100 y 630 metros aparte entre sí. Su rumbo varía de N 15 E a N 33 E y el buzamiento de 50 a 60 SE dentro del cerro. Las vetas están localizadas en las rocas de diabasa del complejo igneo básico son de carácter lenticular y su anchura es por lo tanto variable, siendo de un máximo de 1.5 metros disminuyendo a cero, con un promedio estimado de 5 cm. Estas vetas están también interrumpidas por caballetes de roca y ocasionalmente desplazadas hasta un metro por fallas menores transversales. La mineralización consiste en hematita localmente masiva pero impura, promediando 47% Fe; 13.8% SiO₂; 0.4% TiO₂; 0.3% P₂O₅; y, 0.3% S, con zonas localmente ricas de 60% Fe y raramente

pobres de **5%** Fe. A pesar de que alguna magnetita está presente con la hematita, los perfiles de pruebas magnetométricas superficiales que se hicieron prueban que ocurre en cantidades muy insignificantes para poder ser reconocida de esta forma. En cambio, se puede observar que si algo caracteriza **las** vetas de hematita es una anomalía magnética negativa (5).

2.2 RECOLECCION DE LA MUESTRA.

Las muestras de hematita con las que se trabajó se recolectaron en uno de **los** filones de la concesión minera de "Los Lojas".

2.3 PREPARACION DE LA MUESTRA.

La preparación de las muestras de hematita consiste en reducir las de tamaño con ayuda de un concho a un tamaño menor de 5 cm, para luego ser trituradoras primero en la trituradora de quijadas y luego en la de rodillos, obteniendo un producto de tamaño menor de la malla 4 Tyler.

2.4 COMPOSICION MINERALOGICA.

Para la descripción mineralógica se utilizó la mineralogía física. Las propiedades físicas son una herramienta muy importante para la determinación

rápida de los minerales. Las propiedades físicas que se utilizaron para la descripción de los minerales fueron: la dureza, la gravedad específica, la raya, el brillo, el color, la fractura, la exfoliación y la fusibilidad.

La descripción mineralógica de la hematita se presentan en la tabla II.

2.5 COMPOSICION QUIMICA.

El análisis químico de la muestra de pigmento obtenido de la hematita se realizó en el Instituto de Química de la ESPOL. El análisis que se hizo fue para contenido de óxido de hierro. El mismo dio como resultado 87.26% de óxido de hierro, ver tabla III.

2.6 PROCESO DE REDUCCION DE TAMANO.

El proceso de reducción de tamaño, es una etapa importante en el procesamiento de la mayoría de los minerales, ya que se utiliza para:

- * Producir partículas del tamaño y la forma requeridas.

- * Liberar minerales valiosos de la ganga para que puedan concentrarse.

- * Incrementar el área de superficie disponible para exhibirse a la reacción química.

TABLA II

DESCRIPCION MINERALOGICA DE LA HEMATITA

PROPIEDADES	HEMATITA
Dureza	6.5
Gravedad especifica	5.0
Paya	Pojo indio
Brillo	Metálico
Color	Gris rojizo
Fractura	Ganchuda
Exfoliacion	No
Fusibilidad	Infusible

TABLA III

CONTENIDO DE OXIDO DE HIERRO DE LA HEMATITA

MINERAL (Pigmento)	CONTENIDO DE OXIDO DE HIERRO (Porcentaje por peso)
HEMATITA (Rojo)	87.26

2.6.1 TEORIA DE LA TRITURACION/MOLIENDA.

La teoría de la reducción de tamaño, o conminución como se conoce en **inglés**, se refiere a la relación entre la entrada de energía y el tamaño de la partícula del producto realizada desde un tamaño de alimentación dado. Varias teorías han sido expuestas, ninguna de las cuales **es** enteramente satisfactoria.

El problema más grande radica en el hecho de que la energía de entrada a la máquina de trituración o molienda es absorbida **por** la máquina misma, y solamente una pequeña fracción de la energía total está disponible para la rotura del material. Es de esperar que exista una relación entre la energía requerida para romper el material y la nueva superficie producida en el proceso, pero esta relación sólo se puede hacer manifiesta si la Energía consumida en crear una superficie nueva puede ser medida separadamente.

En el molino de bolas, por ejemplo, se ha mostrado que menos del 1% de la energía total de entrada está disponible para la reducción real de tamaño, siendo el resto de la energía

utilizada en la producción de calor. Otro factor es que un material plástico consumirá energía en cambiar la forma, una forma que el material retendrá sin crear nuevas superficies significativas. Todas las teorías de conminución asumen que el material **es** quebradizo, de forma que ninguna energía se adsorbe en los procesos tales como elongación o contracción la cual no es finalmente utilizada en la rotura.

La teoría más vieja es la de Rittinger (1867), la cual afirma que la energía consumida en la reducción de tamaño es proporcional al área de la nueva superficie producida. El área de la superficie de un peso conocido de partículas de diámetro uniforme es inversamente proporcional al diámetro, de aquí que la ecuación de la ley de Rittinger es

$$E = K \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right),$$

donde E es la energía de entrada, D1 es el tamaño de partícula inicial, D2 **es** el tamaño de partícula final, y K **es** un constante.

La segunda teoría (1885) es la de Kick. El

afirmó que el trabajo requerido es proporcional a la reducción en volumen de las partículas involucradas. Donde f es el diámetro de las partículas de alimentación y p el diámetro de las partículas del producto, la razón de reducción $R = f/p$. De acuerdo a la ley de Kick, la energía requerida **para** la molienda es proporcional al $\log R / \log 2$.

Bond desarrolló una ecuación que se basa en la teoría de que el trabajo de entrada es proporcional a la nueva longitud de la fisura producida en la rotura de la partícula, y es igual al trabajo representado por el producto menos aquel representado por la alimentación. En partículas de tamaño similar, el área superficial por unidad de volumen de material es inversamente proporcional al diámetro. La longitud de la microfractura en unidad de volumen se considera como proporcional a un lado de esa área y por lo tanto inversamente proporcional a la raíz cuadrada del diámetro.

Para cálculos prácticos el tamaño en micras que pasa el 80% se selecciona como criterio de tamaño de partícula. El diámetro en micras de los cuales el 80% del producto pasa se designa

como P_r , el tamaño del cual el 80% de la alimentación pasa se designa como F , y el trabajo de entrada en Kw-hr por tonelada corta es W , la ecuación de la teoría de Bond es

$$W = \frac{10W_i}{\sqrt{P_r}} - \frac{10W_i}{\sqrt{F_r}}$$

Donde W_i es el índice de trabajo. El índice de trabajo es el parámetro de molienda que expresa la resistencia del material a ser triturado y molido; numéricamente se expresa en Kw-hr/ST requerido para reducir el material desde un tamaño de alimentación teóricamente infinito al 80% pasante 100 μm .

Varios intentos han sido hechos para mostrar que las relaciones de Rittinger, Kick y Bond son interpretaciones de ecuaciones generales únicas. Hukki sugiere que la relación entre la energía y el tamaño de partícula es una forma compuesta de tres leyes. La probabilidad de rotura en molienda es alta para partículas grandes, y disminuye rápidamente para tamaños finos, muestra que la ley de Kick es razonablemente precisa en el rango de trituración sobre cerca de 1 cm de diámetro; la teoría de Bond se aplica razonablemente en

el **rango** de la molienda en molinos de **bolas** y de barras, y la ley de Rittinger se aplica bastante bien en el rango de molienda fina de 10-100 μm (27).

2.6.2 RELACIONES DE ENERGIA/REDUCCION DE TAMANO DE UNA MENA.

Probablemente el parámetro más ampliamente usado para medir la facilidad de moler una mena es el índice de trabajo de Bond W_i . Si las características de rotura del material se mantienen constantes sobre todos los rangos de tamaños, entonces el índice de trabajo calculado sería de esperarse que se mantenga constante puesto que el mismo expresa la resistencia del material a ser roto. Sin embargo, para la mayoría de las materias primas que ocurren naturalmente, las diferencias que existen en las características de rotura dependen del tamaño de partícula, el cual puede resultar en variaciones en el índice de trabajo. Por ejemplo, cuando un mineral se rompe fácilmente en sus bordes pero los granos individuales son duros, entonces la resistencia a la molienda se incrementa con la finura de molienda. Consecuentemente los valores de

índice de trabajo se obtienen generalmente para algún tamaño de molienda especificaao que tipifica la operación de conminución a ser evaluada.

El índice de Bond se basa en el desempeño en una pieza cuidadosamente definida de un equipo de acuerdo a un estricto procedimiento. Bond ha concebido algunos métodos para predecir los requerimientos de energía de los molinos de barras y de bolas, los cuales proveen una medida precisa del índice de molienda de la mena. La baja eficiencia del equipo de molienda en términos de la energía real usada para romper las partículas de la mena es una característica común de todos los tipos de molino, pero hay diferencias substanciales entre varios diseños. Algunas máquinas son construidas de tal forma que mucha energía es adsorbida en las partes componentes y r.o está disponible para la rotura.

Los índices de trabajo han sido obtenidos para ensayos sobre tamaños diferentes de varios tipos de equipos, usando materiales ae alimentación idéntico. Los valores de índices de trabajo obtenidos son indicaciones de las

eficiencias de las máquinas. **Así** el equipo que obtiene valores altos de índice de trabajo, y **por** lo tanto los consumidores más grandes de energía, son las trituradoras de quijada y las giratorias y **los** molinos de tambor giratorio; consumidores intermedios son las trituradoras de impacto **y** los molinos vibradores, y los molinos de rodillos son los que menos consumen. Los consumidores más pequeños de energía son aquellas máquinas que aplican un constante, continuo, y compresivo esfuerzo sobre el material.

Los valores de índices de trabajo operante obtenido de unidades específicas pueden ser usadas para determinar el efecto de variables operantes, tales como la velocidad del molino, tamaño del medio de molienda, tipo de revestimiento, etc. Mientras más alto sea el valor de W_i , más baja es la eficiencia de molienda. Debe ser notado que el valor de W es la energía aplicada al eje del piñón del molino. La entrada de energía al motor así tiene que ser convertida en energía en el eje del piñón del molino a menos que esté acoplado directamente al eje del piñón (27).

2.6.3 SECUENCIAS DE TRITURACION Y MOLIENDA

Los métodos de reducción de tamaño pueden agruparse de varias maneras, pero como la reducción ocurre en etapas, el tamaño de las partículas aporta el método primario de agrupamiento. Si el cuerpo de mineral es de carácter masivo, el minado o extracción es en realidad la primera etapa de reducción de tamaño, y generalmente se realiza con explosivos, aunque pueden usarse medios mecánicos en los minerales blandos. El término trituración se aplica a las reducciones subsecuentes de tamaño hasta alrededor de 25 mm. considerándose las reducciones a tamaños más finos como molienda. Tanto la trituración como la molienda pueden subdividirse aún más en etapas primarias, secundarias, terciaria, y a veces cuaternaria. Como estas etapas se relacionan con la maquinaria que se emplea, los límites de la división no son rígidos. y en cualquier operación dada pueden no requerirse todos. La molienda puede subdividirse todavía más por el tipo de molino. el tipo de los medios de molienda y el hecho de que la molienda se efectúe en medio húmedo o seco (16).

Al grado de reducción de tamaño que se logra por medio de cualquier máquina se le describe por la relación de reducción, la cual puede definirse en sentido amplio como el tamaño de la alimentación dividido entre el tamaño del producto. En realidad, deben definirse ambos tamaños, y si bien es posible establecer varias definiciones, la que más se utiliza es aproximadamente el 80% del tamaño que pasa de la distribución acumulativa de los mismos.

2.6.4 ANALISIS GRANULOMETRICO

La evaluación del tamaño de la partícula es de máxima importancia como medida de control para los procesos de reducción de tamaño. En la mayoría de los casos puede efectuarse un análisis de tamaño para determinar la cantidad de material mayor o menor que un tamaño especificado. Por esta razón lo más común es trazar los datos como la cantidad acumulativa de material contra el tamaño en escala logarítmica.

La representación más favorecida en cuanto a su uso es el trazo relativamente conveniente del tamaño d_u contra el porcentaje acumulativo

abajo del tamaño d_u ; al cual con frecuencia **se** le llama trazo de Gaudin-Schuhmann o de Gates-Gaudin-Shuhmann, cuya representación matemática es

$$F(d) = (d/k)^m$$

donde $F(d)$ es la fracción acumulada de **peso**, d es el tamaño, k es el tamaño máximo en la distribución m es la pendiente de la curva de distribución granulométrica en un grafo **log-log**.

De aquí en adelante para realizar los análisis granulométricos se utilizará el sistema de medida de los tamices en la malla Tyler.

2.6.5 PRINCIPIOS 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 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

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{(D-d)}}, \text{ donde}$$

D : Diámetro interno del molino.

d : Diámetro de la bola más grande.

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

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

El volumen de carga (J) de un molino de bolas es el porcentaje del volumen interior del molino que está 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 están restringidos a menos del **45%** de carga para evitar que se descarguen las bolas. El volumen

de carga de un molino **es** :

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

WB : **Peso** de la carga de bolas.

V_o : Volumen del molino.

Ō : Densidad de bolas 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 menor 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 será 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 de molino. La potencia *P* en

base a relaciones empíricas, se calcula mediante la fórmula

$$P = 7.040 \cdot \frac{3.4}{(L/D)^{\frac{1}{3}} (J - 0.94J^2)^{\frac{1}{3}}} \cdot N^{10 \cdot N - 9} (1 - 0.1(2))$$

donde **P** está dado en Kw.

2.6.6 PRUEBA DE TRITURACION.

Objetivo.

Preparar el material para las pruebas posteriores de molienda. Obteniendo un producto pasante la malla Tyler No 4 se cumple este propósito.

Equipo.

-Trituradora de quijada de rodillera simple marca Denver Tipo HA, de 3.25x4.50, con una entrada de material no mayor a 90 mm de diámetro, arrojando un producto inferior a 30 mm.

-Trituradora de rodillo marca Denver tipo DA de 10x6m con una entrada de material no mayor a 30mm de diámetro, arrojando un producto de tamaño inferior a 2 mm.

-Vibrador Ro-Tap.

-Balanza.

-Sarta de tamices.

Procedimiento.

1. El material de hematita con tamaño menor de 90 mm de diámetro someterlo a trituración primaria en la trituradora de quijadas
2. Someter el material a trituración secundaria en la trituradora de rodillos.
3. Realizar el análisis granulométrico del material obtenido de los dos **pasos** anteriores.
4. Encontrar la ecuación que caracteriza al material en la fase de trituración.

Resultados

Los resultados se presentan en la tabla IV. Del gráfico 1 de la curva de la distribución granulométrica deducimos que:

$$m \text{ (Pendiente)} = dy/dx = 4.8/6.1 = 0.7869$$

Asumiendo la distribución Gates-Gaudin-Schuhmann tenemos la siguiente ecuación:

$$F(d) = (d/2319)^{0.7869}$$

2.6.7 PRUEBA DE MOLIENDA

Objetivo.

Obtener el Índice de Trabajo (WI) del material para la molienda.

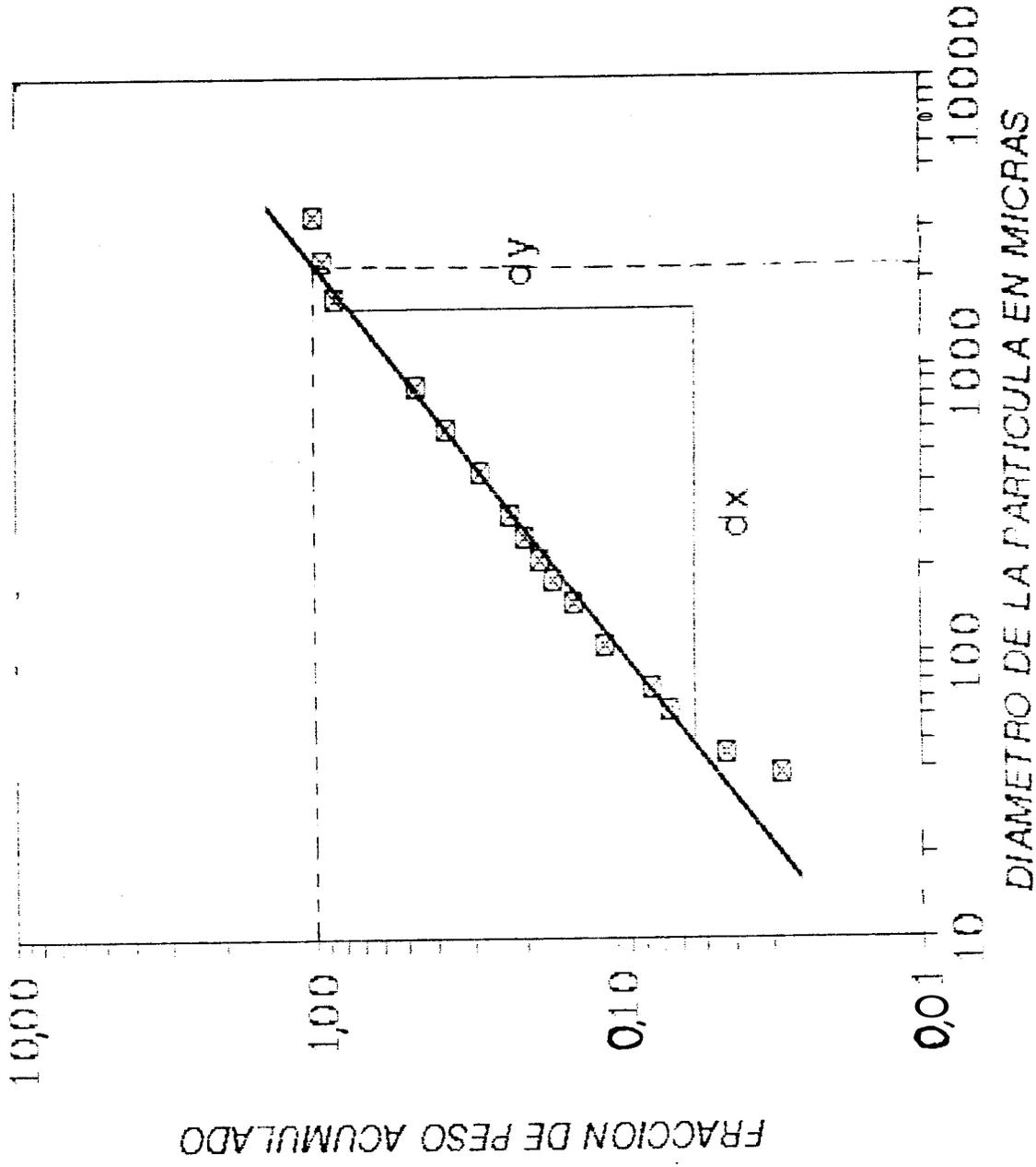
TABLA IV
PRUEBA DE TRITURACION DE LA HEMATITA

Tyler Meeh	Abertura en Micras	Peso Retenido	% Peso Retenido	F(d)
FONDO		48.7	2.8	0.03
400	38	25.2	1.4	0.04
325	45	40.7	2.3	0.07
250	63	16.0	0.9	0.07
200	75	57.1	3.3	0.11
150	106	54.1	3.1	0.14
100	150	38.0	2.2	0.16
80	180	31.3	1.8	0.18
65	212	38.8	2.2	0.20
60	250	41.1	2.4	0.22
48	300	100.2	5.8	0.28
35	425	140.2	8.1	0.36
28	600	170.3	9.8	0.46
20	850	678.3	39.0	0.85
10	1700	132.1	7.6	0.95
8	2360	129.1	7.4	

TABLA V
CARGA DE BOLAS

DIAMETRO (PULG.)	NUMERO	MASA (GR)
1.45	43	9094
1.17	67	7444
1.00	10	694
0.75	71	2078
0.50	94	815
TOTAL	285	20125

PRUEBA DE TRITURACION DE LA HEMATITA



Equipo-

-Molino cilindrico de bolas de **27** cm de diámetro y 31.5 cm de longitud del eje (dimensiones interiores).

-Vibrador-tamizador Ro-Tap.

-Sarta de tamices.

-Balanza.

-Balanza de precisión.

-Cronómetro.

Procedimiento.

1. Se seca la carga y se tritura a -3360 micras (-6 Mesh).
2. Determine la densidad de empaque de la carga en un recipiente de 0.1 pies cúbicos.
3. Calcule el peso de la carga que ocuparía 700 ml. con técnicas de muestreo.
4. Calcule el producto de período ideal (PPI), asumiendo el 250% de carga circulante.
5. Obtenga el análisis granulométrico de la carga.
6. Calcule el porcentaje de material de tamaño inferior a la malla de prueba (X%). Si el análisis muestra que este porcentaje es mayor del 28%, asigne cero al número de revoluciones y al producto neto por revolución (PNR) para el primer período, separe el material de tamaño

inferior a la malla de prueba y complete la carga inicial agregando igual cantidad de nuevo material representativo (N_{co}).

7. Coloque las bolas (ver tabla V) y la carga en el molino.

8. Arranque el molino para un número arbitrario de revoluciones.

9. Una vez terminada la molienda descargue el molino limpiándolo bien junto con las bolas.

10. Tamice la descarga del molino al tamaño de la malla de prueba.

11. Pese y reporte el material retenido (R_i).

12. Pese y reporte el material pasante (P_i).

13. Calcule la cantidad del producto que ya tenía tamaño inferior a la malla de prueba antes del primer período de molienda (P_o).

14. Calcule el producto neto del período (PN_i).

$$PN_i = P_i - P_o$$

15. Calcule el producto neto por revolución (PNR_i).

16. Separe el material pasante (P_i) y complete la carga con igual cantidad de nuevo material representativo (N_{ci}).

17. Calcule la cantidad de producto en la nueva carga que ya tiene un tamaño inferior a la malla de prueba (P_{oi}).

$$Poi = Nci.X\%$$

18. Calcule la cantidad de material **que** debe ser molido en el siguiente período para mantener la carga circulante inicial (CT).

$$CT = PPI - Poi$$

19. Calcule el número de revoluciones para el siguiente período (# de rev.).

$$\# \text{ de rev.} = CT / PNRi$$

20. Coloque la carga y la carga de bolas en el molino, y corra la prueba de la misma manera como se ha descrito desde el paso 7 hasta el 20. Se estima que se logren por lo menos cinco períodos de molienda.

21. Se espera que el valor del producto neto por revolución (PNR) se estabilice, de lo contrario, se continúa con los períodos de molienda.

22. Obtenga un promedio de los dos o tres últimos períodos y calcule el correspondiente valor de la carga circulante y el producto neto por revolución. Este último promedio es el valor de P, que se utilizará más adelante.

23. Realice los análisis granulométricos del pasante y retenido de la malla de prueba en el último período.

24. Grafique en escala log-log el porcentaje en

peso del pasante vs. el tamaño de malla en micras, de las distribuciones de los pasos 5 y 23. Determine del gráfico los tamaños de producto (X_p) y alimentación (X_f) donde se obtiene el 80% de pasante.

25. Se calcula el índice de trabajo de la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{E}{10((1/\sqrt{X_p}) - (1/\sqrt{X_f}))}$$

Calculos efectuados,

Datos:

Diámetro interno del molino (D) = 1.0335 p

Longitud del molino = 0.8858 p

Porosidad de empaque de las bolas = 44.44%

Densidad de bolas de acero (β) = 0.2355

ST/p^3 .

Densidad de empaque de las bolas (\tilde{O}):

$$O = \beta \times (1 - 0.4444)$$

$$\tilde{O} = 0.1308 ST/p^3.$$

Peso específico del material = 5.01 gr./cc.

Peso de 700 cc de material = 1764 gr.

Producto de período ideal (PPI)

$$PPI = 1764 \text{ gr}/3.5$$

$$PPI = 504 \text{ gr}$$

Promedio de los dos últimos períodos (P)

$$P = 1.1783 \text{ gr / min. (de la tabla VI).}$$

Carga circulante para los últimos 2 periodos (CC): 1764 gr. - ((540+517)/2) = 1235.5 gr.

$$CC = 1235,5 \times 100 / (528.5) = 233.77\%.$$

233.77% de la carga circulante.

Velocidad de rotación del molino (V)

$$V = 66.66 \text{ RPM.}$$

Peso de la carga de bolas (WB) = 0.0222233 ST

Operaciones:

Velocidad crítica (Vc): $V_c = 76.63 / \sqrt{(D - d)}$.

$$V_c = 76.63 / \sqrt{(1.0335 - 0.0625)}.$$

$$V_c = 77.77 \text{ RPM.}$$

Fracción de Velocidad crítica (*N):

$$*N = V / V_c.$$

$$*N = 66.66 \text{ RPM} / 77.77 \text{ RPM.}$$

$$*N = 0.8571.$$

Volumen de carga (J):

$$J = WB / (\text{Vol. Cil.} \times \tilde{O}).$$

$$J = (0.0222233 \text{ ST}) / ((0.7431p^3) \times (0.1308 \text{ ST} / p^3))$$

$$J = 0.2286$$

Potencia (P):

$$P = 7.04D^{3.4} (L/D)\tilde{O}(J-0.94J^2)*N(1-0.1 \cdot 2^{10*N-9}).$$

TABLA VI
PRUEBA DE MOLIENDA DE LA HEMATITA

PERIODO	NUMERO DE REVOLUCIONES	PESO PRO- DUCIDO (gr)	PESO DE ALI- MENTACION (gr)	PRODUCTO NETO (gr)	P.N./REV. (gr./rev)
1	150	295.65	132.30	163.35	1.089
2	442	443.60	22.17	420.83	0.952
3	494	566.00	33.27	532.73	1.078
4	428	540.00	42.45	497.55	1.163
5	399	516.95	40.50	476.45	1.194

TABLA VII
INDICE DE TRABAJO DE LA HEMATITA

Tyler Mesh	Abertura en Micras	Porcentaje de Peso Pasante		
		Alimentacion	Carga Circul.	Producto
6	3350	100.0	100.0	
8	2360	89.4	97.2	
10	1700	82.0	95.2	
20	850	46.2	89.2	
28	600	36.5	75.0	
35	425	28.3	84.6	
48	300	22.8	80.1	
60	250	20.0	76.4	
65	212	18.1	71.7	
80	180	16.2	65.8	
100	150	14.1	56.0	
150	106	11.1	30.0	
200	75	7.5	0.0	100.0
250	63	6.6		82.0
325	45	4.7		64.0
400	38	3.4		57.3
FONDO		0.0		0.0

$$P = 7.04 \times 1.1184 \times 0.857 \times 0.1308 \times 0.1795 \times 0.8571 \times 0.9257$$

$$P = 0.1256696908 \text{ Kw.}$$

Energía (E):

$$E = P / Q, \text{ donde } Q = P \cdot V$$

$$Q = (1.1783 \text{ gr/rev}) \cdot (66.66 \text{ rev/min}).$$

$$Q = 78.5455 \text{ gr/min.}$$

$$E = (0.1257 \text{ Kw}) / (78.5455 \text{ gr/min})$$

$$E = 0.0016 \text{ Kw-min/gr, transformando}$$

$$E = 24.25 \text{ Kw-hr/ST.}$$

Resultados

Del gráfico de la prueba de Bond se tiene que:
80% del pasante de la carga de alimentación
(Xf):

$$Xf = 1700.0 \text{ } \mu\text{m, de la curva A del gráfico 2.}$$

80% del pasante de la carga del producto (Xp):

$$Xp = 57.0 \text{ } \mu\text{m, de la curva P del gráfico 2.}$$

Conociendo que la energía consumida es de 24.25
Kw-hr/ST, tenemos que el índice de trabajo Wi:

$$Wi = \frac{E}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{Xp}} - \frac{1}{\sqrt{Xf}} \right)}$$

$$Wi = \frac{24.25 \text{ Kw-hr/ST}}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{57.0}} - \frac{1}{\sqrt{1700.0}} \right)}$$

$$Wi = 22.4 \text{ Kw-hr/ST.}$$

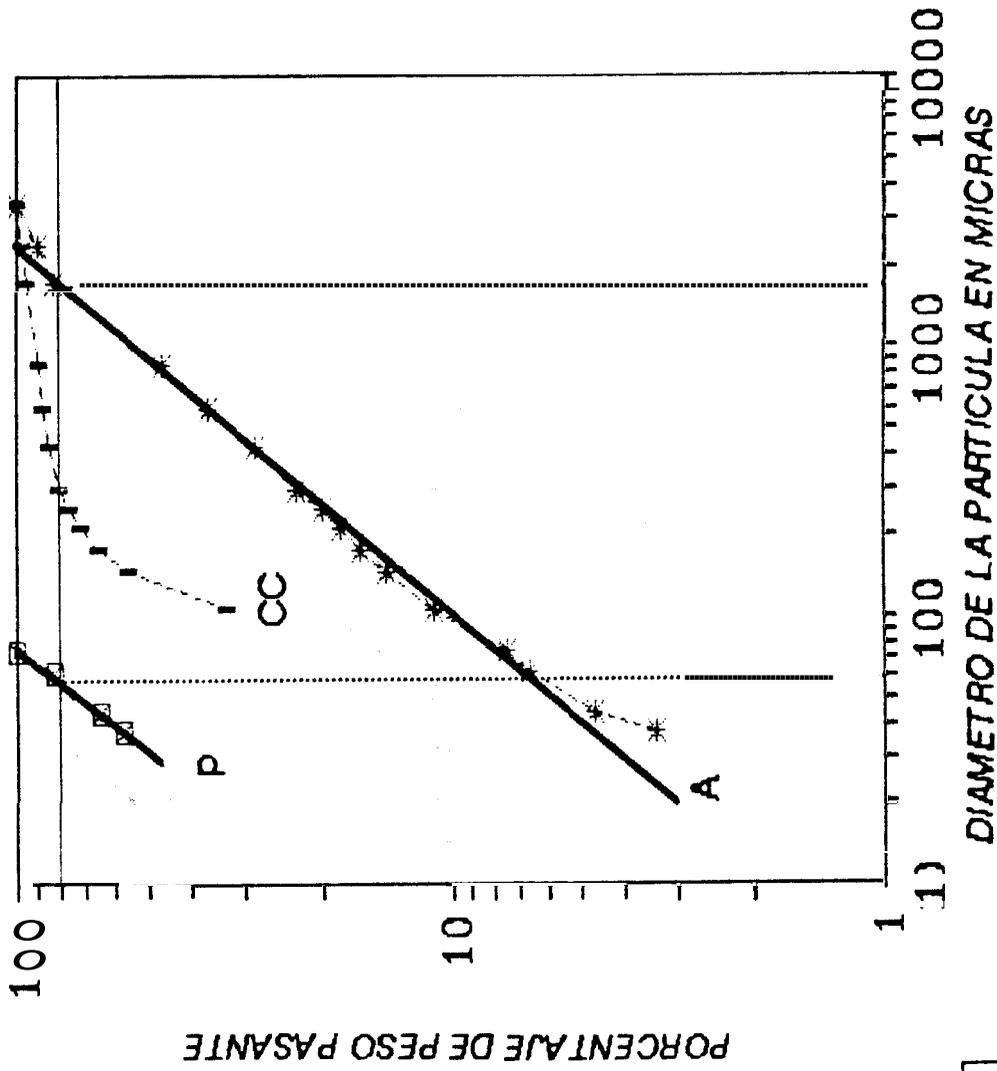


GRAFICO 2

2.7 PROCESO DE OBTENCION DEL PIGMENTO.

Objetivo.

Obtener el pigmento rojo de hematita para realizar las pruebas de hormigón coloreado.

Equipo.

- Molino de bolas de cerámica.
- Balanza.
- Vibrador Ro-Tap.
- Tamiz malla 400 Tyler.

Procedimiento.

1. Realizar una molienda en húmedo en el molino de bolas de cerámica, utilizando una pulpa con un porcentaje de sólidos del 50 %, con una masa de hematita y una carga de bolas del 30 %. Moler durante 10 horas.
2. Tamizar en húmedo a - 400 Tyler Mesh.
3. Completar la masa de la carga del molino y repetir el proceso hasta obtener unos 2 kg de pigmento para realizar pruebas posteriores.
4. Secar la pulpa en un horno de baja temperatura (> 100 °C).
5. Disgregar el cake de pigmento en el molino de bolas de cerámica, para lo cual el interior del molino debe estar completamente seco al igual que el cake.

6. Para las pruebas con las probetas de cemento, el pigmento obtenido es tamizado otra vez a - 400 Tyler Mesh pero en seco con el objeto de asegurarnos del tamaño de la partícula.

2.8 CARACTERISTICAS DEL PIGMENTO OBTENIDO.

2.8.1 GRAVEDAD ESPECIFICA

Se define como gravedad específica de un material la relación entre el peso de los sólidos del material y el peso del volumen de agua que dichos sólidos desalojan.

Ensayo para determinar la gravedad específica.

Objetivo.

Determinar la gravedad específica del pigmento obtenido.

Equipo.

-Balanza sensible a 0.001 gr.

-Estufa.

-Horno de secado a temperatura constante de 105°C

-Termómetro graduado de 0 a 50°C., con divisiones de 0.1 grado.

M raz calibrado de 500 c.c. de capacidad.



-Cápsulas de porcelana.

-Pipeta.

-Embudo de vidrio.

Procedimiento,

1. De **la** muestra preparada se toman unos 200 gr., se colocan en un cápsula de porcelana **y se** dejan secar en el horno a temperatura constante de **105" C** durante **12** horas. Transcurrido este tiempo, se retira la cápsula con el material del horno, se deja enfriar a la temperatura ambiente en un lugar seco de manera que no adquiera humedad y se pesan **50 gr.**

2. Se lava perfectamente un matraz de **500 c.c.**, calibrada con anterioridad, con agua, jabón y un escobillón que pueda introducirse en el matraz, enjuagándolo al final con agua destilada.

3. Los **50 gr.** del material seco **se** vacían en el matraz y luego se llena éste con agua destilada hasta el cuello; esta operación **se** facilita mediante un embudo de vidrio.

4. Se pone el matraz en baño de maría a fin de expulsar el aire contenido en el material; si se cuenta con un trompa o bomba de vacío, su uso mejora la operación, permitiendo, además, hervir la suspensión a temperatura más baja.

5. Se saca el matraz del baño de maría y se deja enfriar; una vez que adquiere la temperatura ambiente se agrega agua destilada hasta llenarlo al nivel de la marca de aforo e inmediatamente se toma la temperatura **al** 0.1°C introduciendo el termómetro hasta el centro de la suspensión. La temperatura obtenida se anota en el renglón "temperatura T" del registro de cálculos para el ensayo.

6. Después de tomar la temperatura, debe aforarse perfectamente de manera que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración del matraz; esto se logra fácilmente con ayuda de una pipeta.

7. Debe evitarse que quede agua adherida al interior del cuello del matraz sobre la marca de aforo, para lo cual se introduce un rollito de papel secante o absorbente para eliminarla. También debe secarse perfectamente el matraz exteriormente.

8. Después de aforado y limpio, se pesa el matraz con una precisión de 0.001 gr., anotando el peso en el renglón Wmsl del Registro de cálculo.

9. Se echa todo el contenido del matraz en una cápsula de porcelana y se coloca en el horno.

Luego se obtiene el peso seco de la muestra W_s y se anota en el respectivo renglón del formulario. (La expresión $W_s + W_{ml} - W_{msl}$ representa el peso del volumen de agua desalojado por los sólidos a la temperatura de la prueba).

El valor W_{ml} para la temperatura T se saca de la curva de calibración del matraz. Por lo tanto la gravedad específica será igual a:

$$G = \frac{W_s}{W_s + W_{ml} - W_{msl}}$$

Esta prueba debe realizarse simultáneamente con tres matraces. con el mismo material, con objeto de tener comprobación. Si los valores no difieren en más de 1% se deberán promediar. Si difieren en más de 1% se deberá repetir el ensayo.

Resultados

Los resultados del ensayo **se** presentan **en** la tabla VIII.

2.8.2 GRANULOMETRIA.

El análisis de hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de partículas

con tamaños desde 0.075 hasta 0.001 mm. El hidrómetro sirve para determinar la variación de la densidad de la suspensión con el transcurso del tiempo y medir la altura de caída del grano de tamaño más grande correspondiente a la densidad media.

Si se distribuye un gran número de granos, que pasen la malla Num. 200 Tyler, en un líquido y se sumerge un hidrómetro, el empuje hidrostático ejercido en el bulbo, es igual al **peso** de la suspensión desalojada por el bulbo. El hidrómetro mide el promedio de la densidad de la suspensión desalojada por el bulbo. De la lectura del hidrómetro puede determinarse directamente el porcentaje de granos por peso con relación a la concentración original, calibrando la escala del hidrómetro en gramos por litro.

El tamaño de los granos obtenidos con el hidrómetro es el equivalente de una esfera cuya velocidad de caída sea igual a la del grano del suelo. El diámetro equivalente de los granos para una lectura dada se obtiene por medio de la ley de Stokes, considerando como altura de caída la distancia entre la superficie del

liquido y el centro de flotación del bulbo. El centro de flotación es variable y no se comete un error grave si en lugar de la distancia al centro de flotación se **usa** la distancia al centro del volumen del bulbo.

Equipo

- Hidrómetro.
- Agitador mecánico.
- Cilindros graduados de 1000 c.c. de capacidad.
- Balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Horno eléctrico a 105° C.
- Desecador.
- Termómetro graduado en 0.1° C.
- Recipientes de evaporación.
- Cronómetro.

Procedimiento.

1. Mézclese la muestra de pigmento, formada por aproximadamente 50 gr. de peso seco, con agua destilada hasta formar una pasta uniforme.
2. Añádese el desfloculante a la pasta, y viértase toda la mezcla dentro de la copa metálica del agitador mecánico. Como desfloculante úsese 20 c.c. de una solución de silicato de sodio con una gravedad específica de 1.023.

3. Agítese la mezcla hasta obtener una suspensión uniforme (por un período de 10 minutos).
4. Entre lecturas se debe colocar el hidrómetro dentro de un cilindro graduado con agua destilada, el cual debe haber sido preparado previamente.
5. Una vez que la muestra esté uniforme, viértase dentro de un segundo cilindro graduado y añádese agua destilada hasta el nivel de la graduación de 1.000 c.c.
6. Mézclase la muestra con el agua cuidadosamente colocando la palma de la mano en la parte superior del cilindro y agitándolo verticalmente por 30 segundos más o menos.
7. Colóquese el cilindro graduado sobre una mesa, introdúzcase el hidrómetro en la suspensión y empiécese a tomar tiempo con el cronómetro.
8. Tómense lecturas al cabo de $1/4$, $1/2$, 1 y 2 minutos sin sacar el hidrómetro de la suspensión. Reagítese la suspensión y tómense nuevamente las mismas lecturas hasta obtener un par de valores consistentes.
9. Después de la última lectura, sáquese el hidrómetro, reagítese la suspensión y emyiécese

de nuevo el ensayo introduciendo el hidrómetro sólo después de 2 minutos. El hidrómetro será introducido más o menos 15 segundos **antes** de cada lectura con el fin de contar con tiempo suficiente **para** hacerlo adecuadamente **y** será limpiado con cuidado antes de su inmersión-

10. Tómense lecturas a los 2, 5, 10, 20 minutos etc. doblándose cada vez el lapso a que se tomó la lectura anterior. Entre lecturas, el hidrómetro deberá ser conservado dentro del cilindro graduado conteniendo solamente agua destilada. Lecturas de la temperatura de la suspensión deberán ser tomadas con frecuencia.

11. Tómense lecturas de la temperatura del hidrómetro en el agua destilada cada 30 minutos.

12. Determínese la altura del menisco del agua destilada. Dicha altura llamada corrección del menisco es usada en los cálculos. La corrección por menisco es aproximadamente +0.5 y la corrección por el defloculante indicado en (2) es aproximadamente -0.5, así que estas dos correcciones se anulan entre **sí**. Si se usa una cantidad diferente de defloculante, hay que determinar la corrección respectiva y substraerse de **la** corrección por menisco. Para

determinar la corrección por desfloculante, sumérgase el hidrómetro en agua limpia y tómesese lectura de la escala. Añádese después la cantidad de desfloculante que se va a usar en la prueba, sumérgase el hidrómetro de nuevo y tómesese una nueva lectura. La diferencia entre las lecturas de la corrección por desfloculante.

13. Continúese tomando lecturas hasta que el hidrómetro indique aproximadamente 1.001 o hasta que el tiempo transcurrido sea el mínimo necesario calculado para el tamaño de partícula requerido.

14. Después de la lectura final, viértase la suspensión en un recipiente de evaporación, sin perder ninguna porción de la muestra.

15. Déjese evaporar la suspensión en el horno a 105° C. hasta que se seque completamente; luego déjese enfriar en el desecador y pésese con una aproximación de 0.1 gr.

Cálculos:

1. Diámetro efectivo, D_e ,

$$D_e = \frac{\sqrt{(30n)}}{\sqrt{(980(G_s - G_w))}} \times \frac{\sqrt{(Z)}}{\sqrt{(t)}}, \quad \text{donde}$$

n = Viscosidad del agua a la temperatura del

ensayo.

G_s = Densidad del pigmento.

G_w = Densidad del agua a la temperatura del ensayo.

t = Lapso de tiempo transcurrido en minutos.

Z = Distancia entre la superficie de suspensión y el centro de inmersión del hidrómetro. Esta se obtiene de la curva de calibración del hidrómetro utilizado. En el presente trabajo esta curva responde a la ecuación:

$$Z = 18.9 - 0.18625R, \text{ donde}$$

R_n = Lectura corregida de hidrómetro

R = Lectura de hidrómetro + 1

2. Porcentaje de material de diámetro menor que el considerado, N ,

$$N = \frac{(R_c)(G_s)(1.65)(100)}{(W_s)(G_s-1)(2.65)}, \text{ donde}$$

R_c = R - cero de corrección + C_t , donde C_t es un factor de temperatura

W_s = Peso del pigmento seco al horno.

Resultados

Los resultados de la granulometría del pigmento rojo de hematita se muestran en el gráfico 3 y la tabla IX.

TABLA VIII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA HEMATITA

TARA	PESO (gr)	PESO DE PIC. + PIGMENTO (gr)	TEMP. (C)	PESO DE PIC. + AGUA (gr)	TEMP. (C)	PESO DE PIGMENTO (gr)	GRAVEDA ESPECIFIC gr/cc
1	60.94	390.19	29	350.31	29	49.46	5.15
2	59.83	391.01	29	351.50	29	49.37	5.01
3	59.83	389.10	29	349.80	29	49.12	5.00

TABLA IX
ENSAYO HIDROMETRICO DEL PIGMENTO ROJO DE HEMATITA

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temperatura (C)	Z de la ecuacion	Diametro efect.(um)	Porcentaje peso pasant
2	59.0	24.5	7.69	16.0	98.9
3	56.0	24.6	8.25	14.0	94.2
4	54.0	24.5	8.62	12.0	91.0
5	52.0	24.5	8.99	11.0	87.9
6	50.0	24.5	9.37	10.0	84.7
8	46.5	24.5	10.02	9.3	79.2
12	39.5	24.5	11.33	8.1	68.2
15	33.9	24.5	12.38	7.5	59.4
19	27.0	24.5	13.67	7.0	48.5
23	20.9	24.5	14.81	6.6	38.9
32	10.0	24.7	16.84	6.0	21.7
34	9.5	24.7	16.94	5.8	20.9
42	4.0	24.7	17.97	5.4	12.3
71	1.0	24.7	18.53	4.2	7.6

CURVA GRANULOMETRICA DEL PIGMENTO ROJO DE HEMATITA

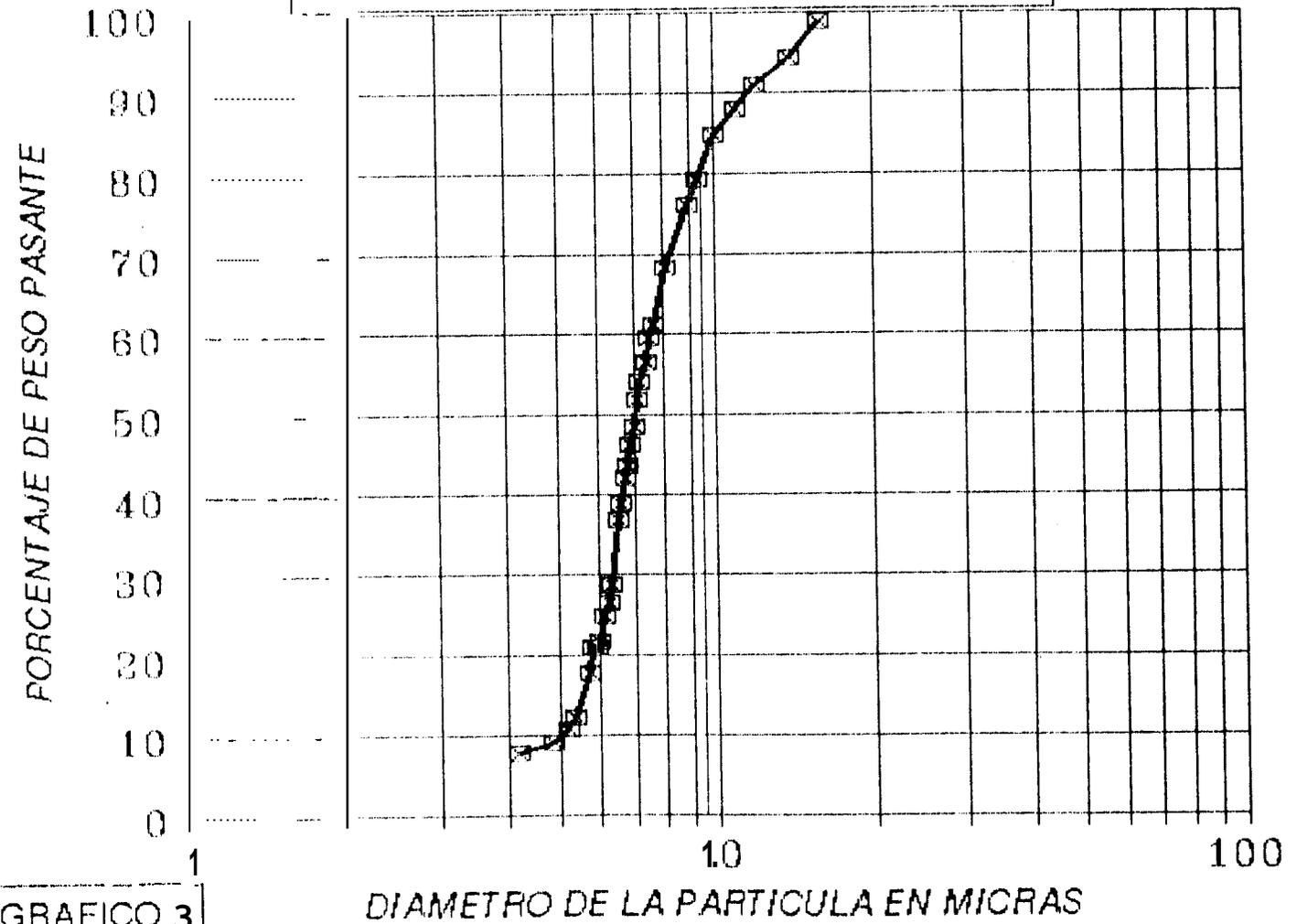


GRAFICO 3

De la curva de distribución granulométrica del gráfico 3 se deduce que el pigmento de hematita tiene un 80% porcentaje de **peso** pasante 12.1 μm .

2.9 PROCESAMIENTO MINERAL PARA LA OBTENCION DEL PIGMENTO (DISEÑO TENTATIVO).

Para el diseño del proceso de producción de todos los pigmentos se asume una producción de 2 toneladas métricas por hora.

Aunque en 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.

El proceso para la producción de pigmento rojo a partir de hematita es el mismo que se aplicará para obtener el pigmento del mismo color a partir de la limonita.

El proceso (ver fig. 1) consta de cuatro etapas: trituración, calcinación, molienda y micronización.

La etapa de trituración consta de:

A. Trituradora primaria de quijetas.

Tamaño: 255x405 (Abertura x ancho) mm.

Asentamiento Cerrado: 50 mm.

Capacidad: 11 metros cúbicos por hora.

B. Tolva de almacenamiento.

C. Criba Vibratoria.

Tamaño: **1x2** (Anchoxlargo)m.

Abertura: 12.5 mm.

D. Trituradora secundaria de quijas.

Tamaño: **150x200**

Asentamiento Cerrado: 14 mm.

Capacidad: 1 - 2 metros cúbicos por hora.

En esta etapa la trituradora primaria está sobredimensionada de tal forma que pueda triturar en el menor tiempo posible todo el material que se producirá durante el día. La tolva sirve como un regulador de la alimentación de la trituradora secundaria de tal forma que el circuito de trituración produzca 2 TPH de material -12 mm.

La etapa de calcinación consta de:

E. Horno Horizontal.

Capacidad: **48** Ton por día. de pigmento.

Tamaño: 1x11 (diámetroxlargo)m.

En esta etapa la función del horno es calcinar el material triturado a -12.5 mm.

La etapa de molienda consta de:

F. Tanque acondicionador.

Tamaño: 1x1.5 (Diámetro **por** altura)m

Diámetro de descarga: **7.5** cm.

G. Molino de bolas.

Tamaño: 1.7x1.7 (Diámetroxlargo)m

Capacidad: 2 TPH de material -150 Tyler **Mesh.**

H. Hidrociclón clasificador.

Diámetro: 14 cm.

Caida de presión: 28 Kpa.

Se recomienda un modelo D-6 Krebs de acuerdo al Krebs Cyclone Performance Chart.

I. Tanque recolector.

J. Bomba de lodos.

K. Hidrociclón desaguador.

Capacidad: 5 metros cúbicos por hora.

En esta etapa la molienda es en circuito cerrado. La carga circulante del mismo es de 300%. Este circuito está diseñado para que produzca 2 TPH de material -150 Tyler Mesh. El molino se diseñó para el índice de trabajo de la hematita que es mayor que el de la limonita.

La etapa de micronización consta de 2 micronizadores horizontales (L) montados en serie del tipo DYNOMILL que consisten en una cámara cilíndrica dentro de la cual la suspensión de partículas -150 Tyler Mesh es bombardeada a **través** de glóbulos de molienda, que giran rápidamente y poseen alta energía cinética.

CAPITULO 111

LIMONITA COMO PIGMENTO NATURAL

3.1 OCURRENCIA EN EL PAIS.

La ocurrencia de la limonita **se** halla asociada a la de la hematita como se **pudo** ver en el capítulo anterior.

Una de las anomalías más conocidas de limonita **es** la de Chunchi, en la provincia de Chlmborazo. El posible yacimiento es **de** origen hidrotermal sedimentario **y se** encuentra el noreste de la ciudad de Chunchi.

3.2 RECOLECCION DE LA MUESTRA.

Se tomaron unos 100 kg. de mineral en el afloramiento de limonita existente en **las** cercanías de **Chunchi**.

3.3 PREPARACION DE LA MUESTRA.

Es la misma que se aplica a la hematita.

3.4 DESCRIPCION MINERALOGICA.

Para la descripción de la limonita, igual que para la hematita, se aplicó la mineralogía física. Los resultados de este análisis mineralógico se muestran en la tabla X.

3.5 COMPOSICION QUIMICA.

Los análisis químicos de los pigmentos de limonita se realizaron en el Instituto de Química de la ESPOL, analizándose contenido de hierro. Los resultados se presentan en la tabla XI.

El contenido de Óxido hidratado de hierro para el pigmento amarillo, de mineral de limonita, fue de 87.00%.

El contenido de óxido de hierro para el pigmento rojo, limonita calcinada, fue de 82.74%.

3.6 ANALISIS DEL PROCESO DE MOLIENDA.

Para el análisis del proceso de conminución de la limonita se aplican las mismas pruebas que se utilizaron para la hematita.

3.6.1 PRUEBA DE TRITURACION.

Resultados.

Los resultados se presentan en la tabla XII. En el gráfico 4 se presenta la distribución granulométrica para la etapa de trituración. De la curva de este gráfico deducimos que:

$$m(\text{Pendiente}) = dy/dx = 4.8/6.3 = 0.7619$$

Asumiendo una distribución Gates-Gaudin-Schuhmann tenemos la siguiente ecuación:

$$F(d) = (d/2321)^{0.7619}$$

3.6.2 PRUEBA DE MOLIENDA.

Resultados,

Los resultados de la prueba de molienda se presentan en las tablas XIII y XIV y del gráfico 5.

Datos.

Diámetro interno del molino (D): 1.0335 pies.

Longitud del molino (L): 0.8858 pies.

Densidad de empaque de las bolas (\tilde{O}):

$$\tilde{O} = 0.1308 \text{ STon/pie}^3$$

Peso de 700 cc de material: 938 gr.

Producto de período ideal (PPI):

$$\text{PPI} = 938 \text{ gr.}/3.5 = 268 \text{ gr.}$$

TABLA XII
PRUEBA DE TRITURACION DE LA LIMONITA

Tyler Mesh	Abertura en Micra	Peso (gr) Retenido	% Peso Retenido	F(d)
FONDO		39.8	4.0	0.04
400	38	14.3	1.4	0.05
325	45	22.9	2.3	0.08
250	63	9.4	0.9	0.09
200	75	30.6	3.1	0.12
150	106	29.7	3.0	0.15
100	150	21.8	2.2	0.17
80	180	18.5	1.9	0.19
65	212	20.3	2.0	0.21
60	250	23.1	2.3	0.23
48	300	60.5	6.1	0.29
35	425	90.7	9.1	0.38
28	600	114.3	11.4	0.50
20	850	402.0	40.2	0.90
10	1700	63.0	6.3	0.96
8	2360	39.7	4.0	

TABLA XIII
PRUEBA DE MOLIENDA DE LA LIMONITA

PERIODO	NUMERO DE REVOLUCION	PESO PRO- DUCIDO (gr.)	PESO DE ALI- MENTACION (gr)	PRODUCTO NETO (gr)	P.N./REV. (gr/rev)
1	150	415.15	76.82	338.18	2.254
2	104	322.20	33.99	288.01	2.769
3	87	276.10	26.37	249.63	2.869
4	86	268.05	22.60	245.4	2.853

TABLA XIV
INDICE DE TRABAJO DE LA LIMONITA

Tyler Mesh	Abertura en Micras	Porcentaje de <i>Peso Pasante</i>		
		Alimentacio	Carga Circul.	Producto
6	3350	100.0		
8	2360	81.3	100.0	
10	1700	72.5	99.9	
20	850	44.1	99.2	
28	600	36.8	93.1	
35	425	30.0	94.7	
48	300	25.3	88.1	
60	250	20.5	82.1	
65	212	18.7	75.0	
80	180	16.9	66.3	
100	150	14.8	52.9	
150	106	12.0	27.5	
200	75	8.2	0.0	100.0
250	63	7.6		82.2
325	45	5.9		63.8
400	38	4.0		58.6
FONDO		0.0		0.0

TABLA XV
PRUEBAS DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS PIGMENTOS DE LIMONITA

FIG- MEN- TO	TARA	PESO DE TARA	PESO DE PIG- - PIGMENTO	TEMP C	PESO DE PIG + AGUA	TEMP C	PESO DE PIGMENT	GRAVEDAD ESPECIFICA
		(gr)	(gr)		(gr)		(gr)	(gr/cc)
AMA-	1	60.89	386.30	29	350.30	29	50.11	3.51
Ri	2	60.75	387.55	29	351.50	29	50.25	3.52
LLO	3	61.70	385.60	29	349.75	29	50.20	3.46
ROJO	1	60.99	390.00	28	350.37	28	49.56	4.99
	2	61.79	391.05	28	351.61	28	49.46	4.98
	3	60.70	389.35	28	349.82	28	49.87	4.78

PRUEBA DE MOLIENDA DE LA LIMONITA

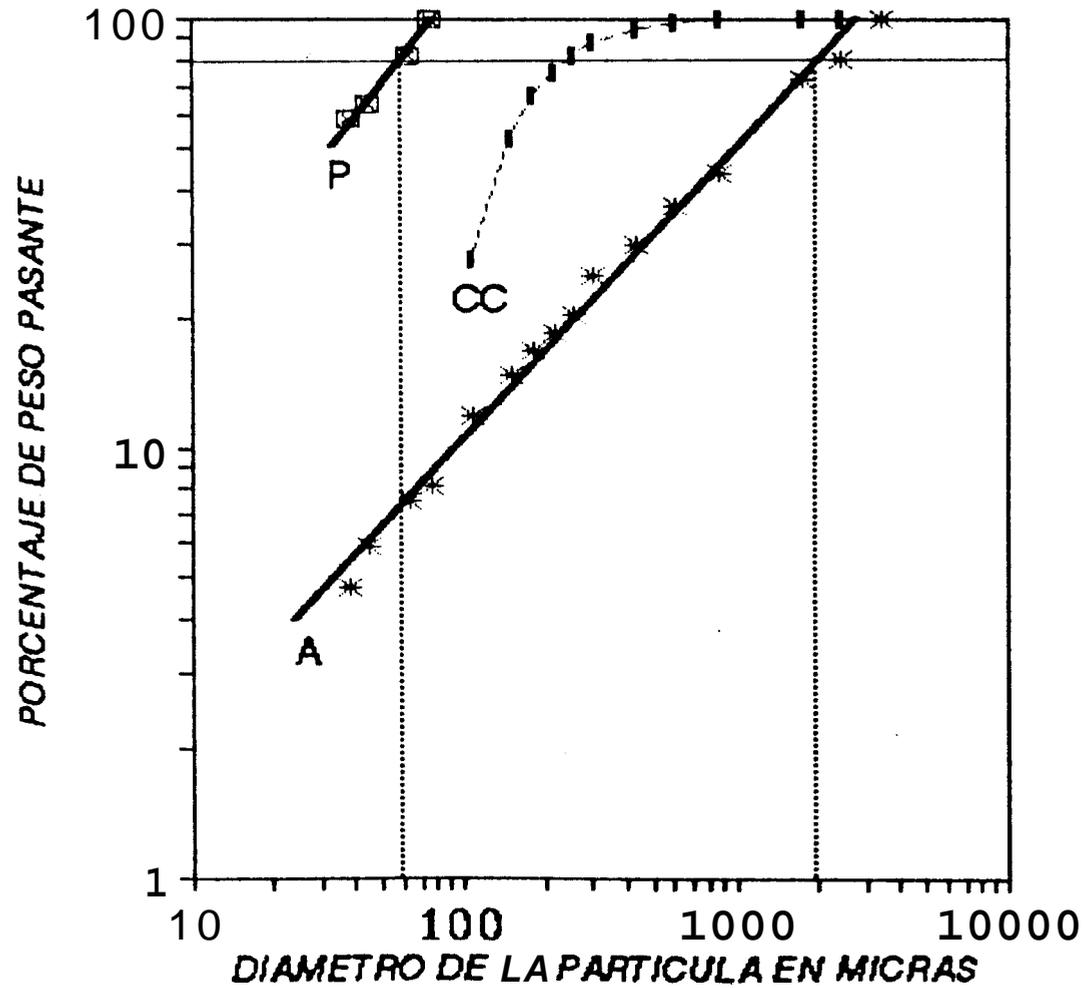


GRAFICO 5

Porcentaje de **tamaño** inferior a 200 Tyler mesh: 8.19%.

Velocidad de rotación del molino (V):

$$V = 66.66 \text{ RPM.}$$

Velocidad Crítica (Vc):

$$V_c = 77.77 \text{ RPM.}$$

Fracción de velocidad crítica (*N):

$$*N = 0.8571.$$

Carga máxima de bolas (J):

$$J = 0.2286$$

Promedio de los dos últimos periodos (D):

$$D = 2.861$$

Potencia: 0.1257 Kw.

$$Q = D \times N = (2.861) \times (66.66)$$

$$Q = 190.71 \text{ gr./min.}$$

$$E = P / Q = (0.1257 \text{ Kw}) / (190.71 \text{ gr/min})$$

$$E = 0.000659 \text{ Kw.gr/min., transformando}$$

$$E = 9.99 \text{ Kw-hr/ST.}$$

Del gráfico de la prueba de Bond se tiene que:

80% del pasante de la carga de alimentación:

$$1961.9 \text{ } \mu\text{m.}$$

80% del pasante de la carga de'l producto:

$$60.0 \text{ } \mu\text{m.}$$

Índice de **Trabajo** (WI)

$$W_i = \frac{E}{10((1/\sqrt{X_p}) - (1/\sqrt{X_f}))}$$

$$W_i = \frac{9.99 \text{ kw-hr/ST}}{10(1/\sqrt{(60.0\mu\text{m})} - (1/\sqrt{(1961.9\mu\text{m})}))}$$

$$W_i = 9.38 \text{ Kw-hr/ST.}$$

3.7 PROCESO DE OBTENCION DEL PIGMENTO AMARILLO.

El proceso aplicado para la obtención del pigmento amarillo es el mismo que se utiliza para la consecución del pigmento rojo de hematita. Se obtienen dos pigmentos amarillos, uno con un tiempo de molienda de 20 horas, y otro con un tiempo de molienda de 40 horas.

3.8 PROCESO DE OBTENCION DEL PIGMENTO ROJO.

Objetivo:

Obtener pigmento rojo de limonita para realizar las pruebas de hormigón coloreado.

Equipo:

- Molino de bolas de cerámica.
- Balanza.
- Vibrador Ro-Tap.
- Tamiz 400 Tyler Mesh.
- Horno de alta temperatura.

Procedimiento:

1. Obtener pigmento amarillo de limonita.
2. Someter el pigmento a calcinación en un horno de alta temperatura.
3. Someter el pigmento calcinado a molienda húmeda por un lapso de horas.
4. Tamizar en húmedo a -400 Tyler Mesh.
5. Completar la masa de la carga del molino y repetir el proceso de molienda hasta obtener unos 2 kg de pigmento para realizar pruebas posteriores.
6. Secar la pulpa en un horno de baja temperatura (-100" C).
7. Disgregar el cake de pigmento en el molino de bolas de cerámica.
8. Se obtienen pigmentos rojos para 20 y 30 horas de molienda.

3.9 CARACTERISTICAS DE LOS PIGMENTOS OBTENIDOS.

3.9.1 GRAVEDADES ESPECIFICAS.

Los resultados de los tests granulométricos de gravedad específica para los pigmentos amarillo y rojo se muestran en la tabla XV.

3.9.2 GRANULOMETRIAS

Los resultados de **los** ensayos hidrométricos para encontrar las granulometrías de los pigmentos amarillos se muestran en el gráfico **6** y las tablas **XVI** y **XVII**.

El pigmento amarillo con un tiempo de molienda de 20 horas (curva 1 en el gráfico 6) tiene un 80% porcentaje de peso pasante de 15.2 μm , mientras que el pigmento del mismo color con un tiempo de molienda de **40** horas tiene un 80% porcentaje de peso pasante de **8.4** μm .

Los mismos resultados para los pigmentos rojos (limonita calcinada) se presentan en el gráfico 10 y las tablas XVIII y XIX. El pigmento rojo con un tiempo de molienda de 20 horas (curva 1 en el gráfico 7) tiene un 80% porcentaje de peso pasante de **4.4** μm , mientras que el pigmento de igual color con un tiempo de molienda de 30 horas tiene un 80% porcentaje de peso pasante de 4.0 μm .

3-10 PROCESAMIENTO MINERAL PARA LA OBTENCION DE LOS PIGMENTOS.

Para obtener el pigmento rojo a partir de la limonita, se aplica el mismo proceso que se diseñó para obtener el pigmento del mismo color a partir de

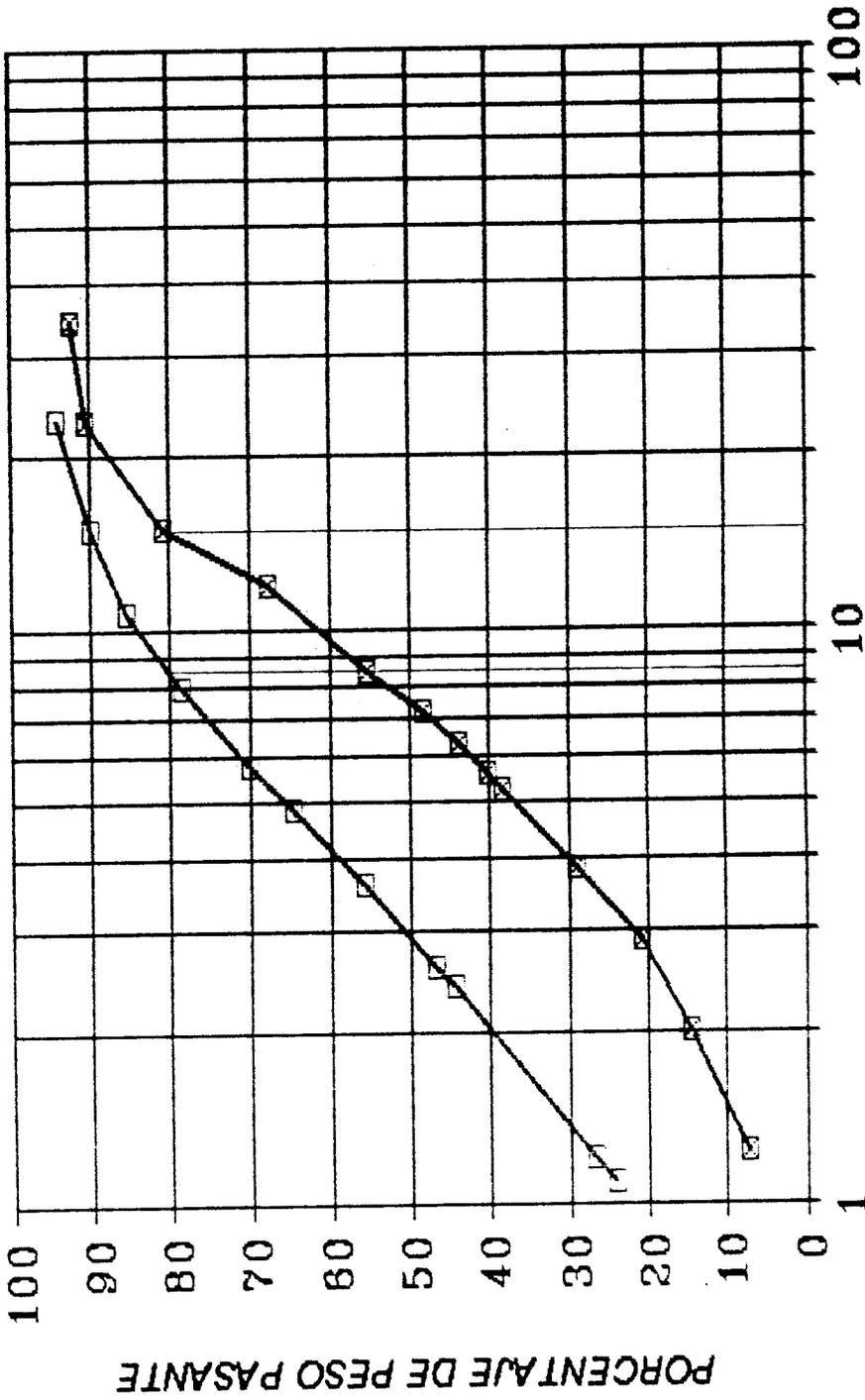
TABLA XVI
ENSAYO HIDROMETRICO DEL PRIMER PIGMENTO AMARILLO

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temp. (C)	Z de la ecuacion	Diametro efectivo (um)	Porcentaje peso pasante
2	47.5	25.0	9.87	23.0	90.7
5	42.0	25.0	10.89	15.0	81.0
10	34.5	25.0	12.29	12.0	67.7
20	27.5	25.0	13.59	8.5	55.4
30	23.5	25.0	14.34	7.2	48.3
40	21.0	25.0	14.80	6.4	43.9
50	19.0	25.0	15.18	5.7	40.3
60	18.0	24.5	15.46	5.3	38.6
120	13.0	23.8	16.29	3.9	29.2
240	8.5	23.0	17.13	2.9	20.7
480	5.1	23.0	17.76	2.0	14.7
1320	1.0	25.0	18.53	1.3	7.4

TABLA XVII
ENSAYO HIDROMETRICO DEL SEGUNDO PIGMENTO AMARILLO

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temp. (C)	Z de la ecuacion	Diametro efectivo (um)	Porcentaje peso pasante
2	51.0	23.0	9.20	22.9	94.2
5	48.5	23.0	9.70	14.9	89.8
10	46.0	23.0	10.10	10.7	85.4
20	42.0	23.0	10.90	7.9	78.4
40	37.2	23.0	11.80	5.8	70.0
60	34.1	23.0	12.40	4.9	64.6
120	29.0	23.0	13.30	3.6	55.6
247	24.0	22.0	14.20	2.6	46.8
294	22.5	22.0	14.50	2.4	44.2
1225	12.5	23.0	16.40	1.2	26.7
1490	11.0	24.0	16.70	1.1	24.0

**CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PIGMENTO
AMARILLO DE LIMONITA**



DIAMETRO DE LA PARTICULA EN MICRAS

GRAFICO 6



TABLA XVIII

ENSAYO HIDROMETRICO DEL PRIMER PIGMENTO ROJO DE LIMONITA

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temp. (C)	Z de la ecuacion	Diametro efectivo (um)	Porcentaje peso pasante
2	58.2	25.0	7.87	16.4	97.9
5	57.0	25.0	8.10	10.5	96.0
10	55.0	25.0	8.47	7.6	92.9
20	52.0	25.0	9.03	5.5	88.1
30	48.5	25.0	9.68	4.7	82.6
40	45.5	25.0	10.24	4.2	77.9
50	43.5	24.5	10.61	3.8	74.7
60	41.2	24.9	11.04	3.6	71.1
120	31.5	25.0	12.85	2.7	55.8
240	12.5	24.5	16.39	2.2	25.7
480	4.3	25.2	17.80	1.2	13.7
1415	1.6	25.0	18.42	1.0	8.6

TABLA XIX

ENSAYO HIDROMETRICO DEL SEGUNDO PIGMENTO ROJO DE LIMONITA

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temp. (C)	Z de la ecuacion	Diametro efectivo (um)	Porcentaje peso pasante
2	56.0	23.0	8.20	17.2	99.4
5	54.5	23.0	8.50	11.0	96.8
10	53.2	23.0	8.70	7.9	94.6
20	50.2	23.0	9.30	5.8	89.6
40	46.0	23.0	10.00	4.2	82.5
68	40.5	23.0	11.10	3.4	73.1
130	32.5	23.0	12.60	2.6	59.6
275	23.0	23.0	14.30	1.9	43.5
366	20.5	22.0	14.80	1.7	38.8
1295	14.0	22.0	16.05	1.0	29.0

CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PIGMENTO
ROJO DE LIMONITA

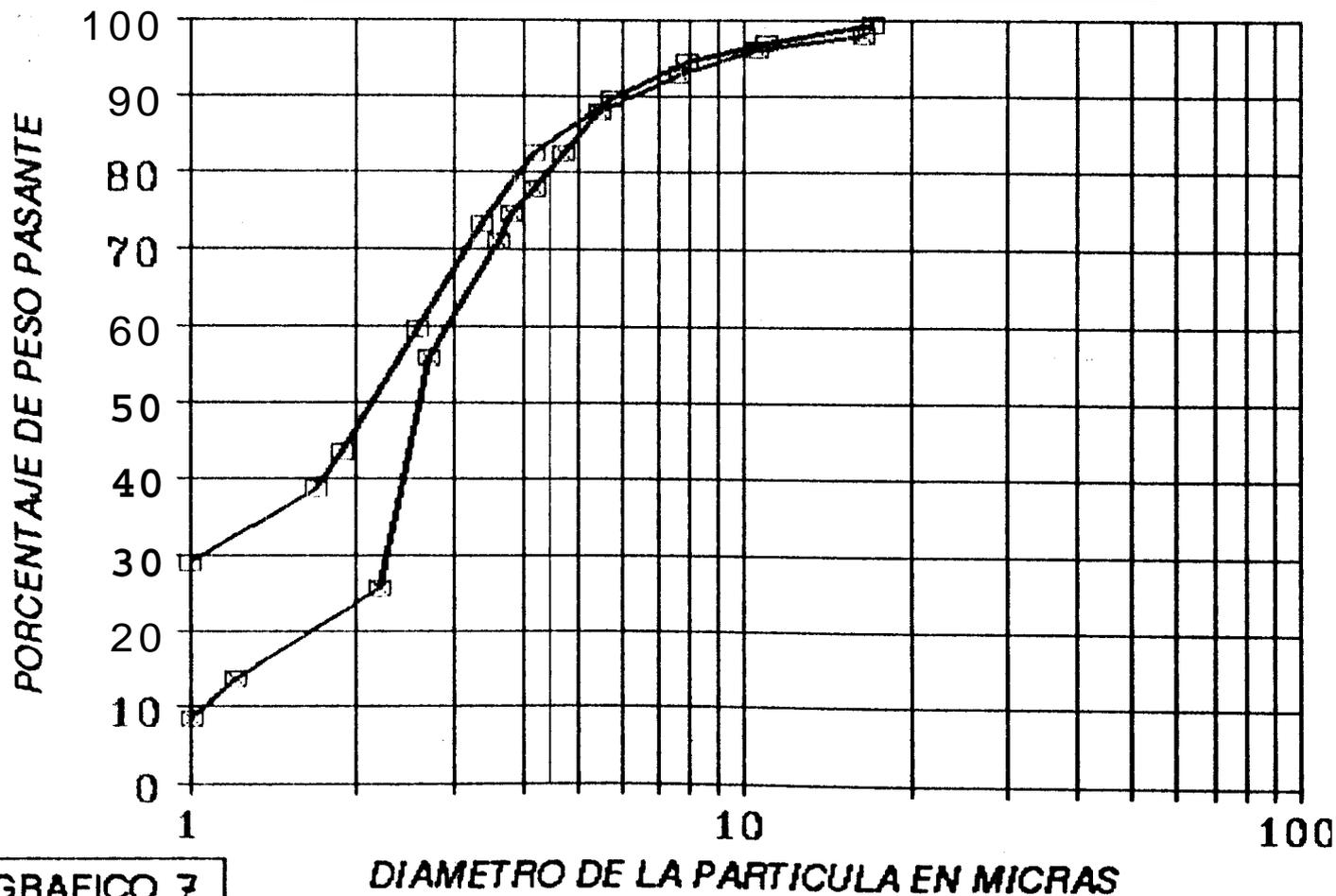


GRAFICO 7

la limonita.

El proceso que se aplica para la producción de pigmento amarillo de limonita es el mismo que se diseñó para la producción del pigmento rojo, **pero sin** la fase de calcinación (ver la figura 2).

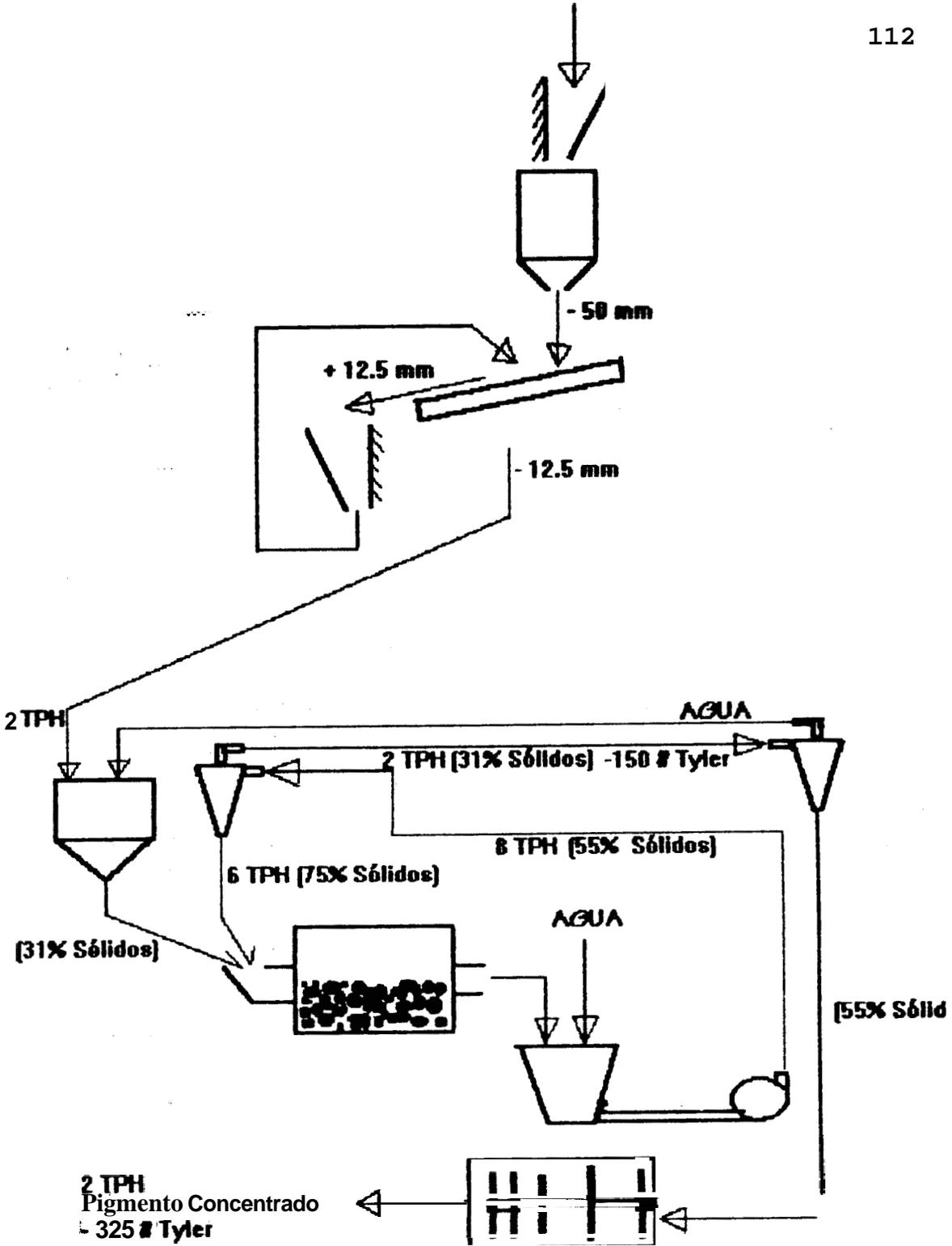


Fig. 2 Diagrama de tratamiento para producir pigmento amarillo de limonita.

CAPITULO IV

MAGNETITA COMO PIGMENTO NATURAL

4.1 OCURRENCIA EN EL PAIS

En nuestro país las magnetitas se encuentran en las arenas de las costas de las provincias de Guayas, Manabí y Esmeraldas.

De los estudios de Mosquera y Ruales (1973), según la extensión e intensidad de las manchas de arenas negras de las playas, las zonas de interés tienen el siguiente orden de prioridad decreciente:

- Puná
- Cojimies
- N Sta. Elena
- Bolivar
- Ensenada de Surronee
- Ens. de Bálsamo
- Chanduy
- Punta Galera
- Atacames.

De **los** estudios de Wilkinson se identifican **4** Breas que indican arena negra anómala:

- Al este de Lagarto, Esmeraldas
- Punta Ostiones, Esmeraldas
- Entre San Vicente y Canoa, Manabi
- Punta Brava, Manabi.

G. Mora y F. Ruales (1985), desarrollan su tesis sobre la composición de las arenas negras en la zona de Chanduy y concluyen diciendo que no es de interés económico debido a la escasez del material disponible.

Actualmente las arenas negras son utilizadas por la Cemento Nacional, aprovechando su alto contenido de hierro, para aumentar **los** niveles de este elemento en el cemento. El material en la actualidad se explota de manera artesanal y generalmente sin realizar estudios geológicos que permitan pensar en una explotación a mayor escala (23).

Según el estudio de Ana Saa (1988), realizado en General Villamil Playas, los minerales magnéticos provienen de rocas ígneas máficas y por 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 encontradas. 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 explotado en sicigia, época en que el enriquecimiento ocurre.

4.2. RECOLECCION DE LA MUESTRA.

Objetivo

En la acción de recoger una muestra debe primar el sentido de obtener una muestra representativa, es decir obtener una porción cuyas características y condiciones sean similares e identifiquen el total relativo del material.

Procedimiento

En el presente estudio **se** trabajó con las arenas negras del stock que tiene la Cemento Nacional en la vieja planta de San Eduardo. Estas arenas son originarias de Chanduy. **Se** recogieron unos 5 sacos de diferentes partes del stock para tener una muestra representativa. Es importante señalar que de los estudios realizados sobre las arenas negras de playa en nuestro país se ha observado que la concentración de minerales pesados (ilmenita, titanomagnetita) es

muy variable según el espacio **y** el tiempo.

4.3 PREPARACION DE LA MUESTRA.

Objetivo

Adecuar el material de trabajo para posteriores análisis granulométrico, mineralógico, pruebas de recuperación magnética **y** de mesa concentradora.

Procedimiento

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

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

Finalmente se procedía a homogenizar mediante constante remoción de la muestra con una pala. El material es homogéneo cuando la textura del mismo no ofrece variaciones internas ni externas en color **y** tamaño. Aunque fue difícil homogenizar una muestra con granos de una diferencia importante de densidad,

se procuró obtener un material lo más homogéneo posible.

Una vez homogenizado, el material está listo para cualquier prueba a realizarse, y es así como para cada **ensayo se** procede a cuartear hasta obtener el **peso de** muestra necesaria.

4.4. ANALISIS MINERALOGICO SEMICUANTITATIVO.

Objetivo

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

Equipos y materiales

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

Procedimiento

1. Tomar 200 gr. de muestra preparada para análisis.
2. Separar mediante batea inicialmente y microbatea posteriormente los minerales pesados y no pesados,
3. Secar concentrados y ganga
4. Separar con ayuda de imán los minerales pesados para obtener sus porcentajes por **peso**.
5. Identificar con ayuda del microscopio **los** minerales pesados y los no pesados.

Resultados-

Los resultados del análisis se muestran en la tabla XX. Del análisis realizado se encuentra **que** las arenas utilizadas contienen un **52%** de minerales livianos como **sílice y granates,** **y** un **48%** de magnetitas. **A su vez** las magnetitas se dividen en ferromagnéticas **y** paramagnéticas, **y** además las magnetitas no son puras sino que se encuentran asociadas con minerales de titanio.

4.5 COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITAS

Se realizó un análisis químico completo de las 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 XXII y XXIII.

Como **se** observa en esta tabla, estas magnetitas contienen Óxido de titanio. El contenido de óxido de hierro está por debajo del contenido estándar.

4.6 DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LAS ARENAS Y LAS MAGNETITAS.

Objetivos.



TABLA XX
RESULTADOS DEL ANALISIS MINERALOGICO DE LA ARENA

ARENA DE PLAYA		
GANGA (LIVIANO (52%))	CONCENTRADOS PESADOS (48%)	
Cantidades iguales de cuarzo, granate restos de conchas y fragmentos de rocas	16%	27%
	Material Ferromagnetico	Material Paramagnetico
	Magnetita, intercrecimientos de ilmenita magnetita y hematita.	Exsoluciones de ilmenita y magnetita

TABLA XXI
GRANULOMETRIA DE LA ARENA Y DE LA MAGNETITA

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

TABLA XXII
COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITAS
FERROMAGNETICAS (PORCENTAJE POR PESO)

ELEMENTO	MAGNETITA
Cl	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
SO ₃	
Total	99.70

TABLA XXIII
COMPOSICION QUIMICA DE LAS MAGNETITAS
PARAMAGNETICAS (PORCENTAJE 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
SO ₃	-
Total	100.00



Conocer la distribución granulométrica del material y de las magnetitas.

Equipo y materiales,

- Vibrador-agitador RO-TAP.
- Sarta de tamices.
- Balanza.
- Horno de baja temperatura.
- Batea.
- Microbatea.
- Arena de playa.

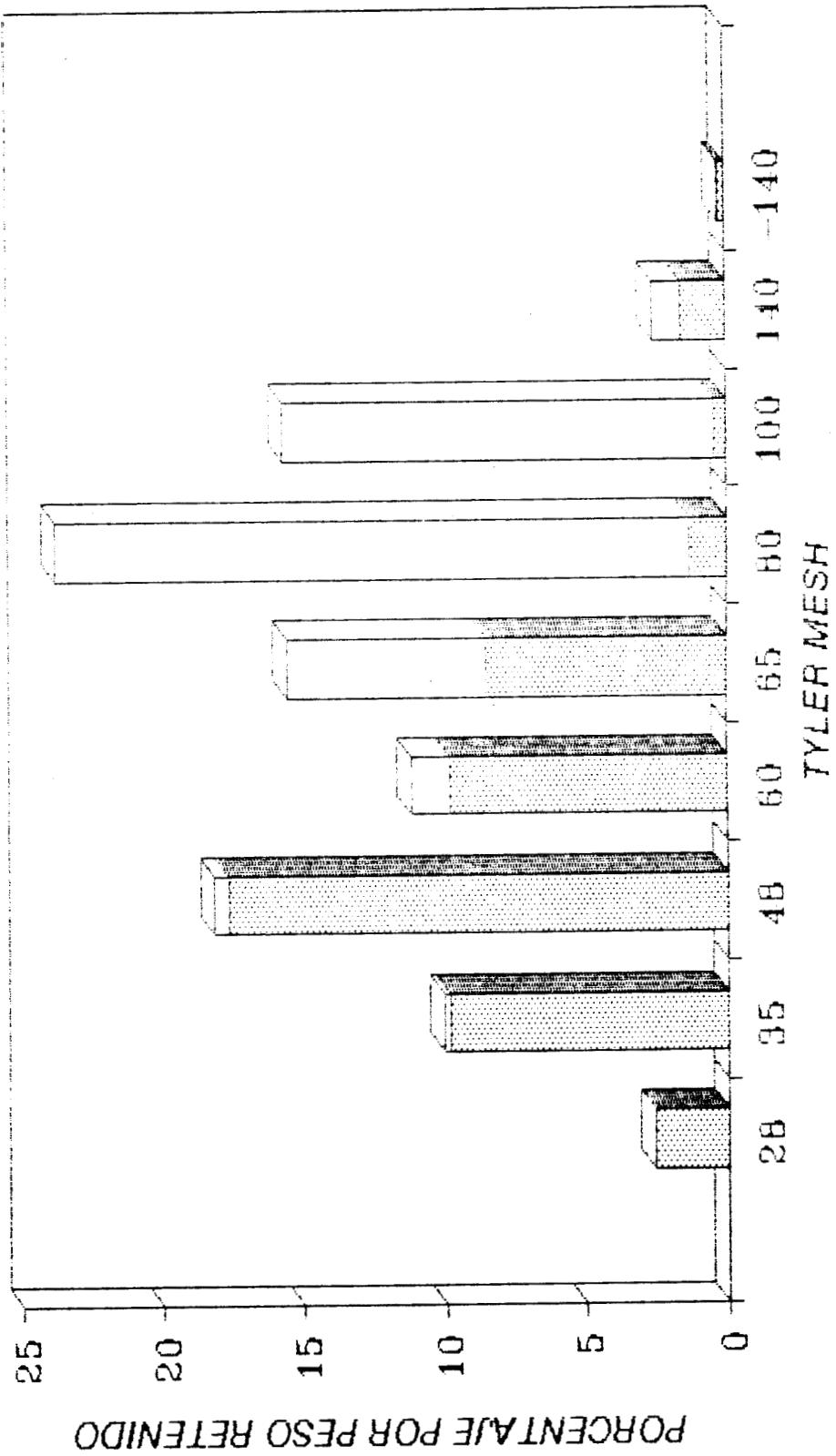
Procedimiento.

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 XXI y el gráfico 8. Como se puede observar en el gráfico. entre las mallas 28 y 4R 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, dependiendo del tiempo y del lugar de procedencia. Es notorio que los retenidos

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA ARENA
CONTENIDO DE MAGNETITA POR TAMIZ



de las mallas 80 y 100 son casi en su totalidad magnetitas.

4.7 PROCESO DE OBTENCION DE LAS MAGNETITAS.

4.7.1 SEPARACION MAGNETICA POR VIA SECA- DESCRIPCION GENERAL.

La separación magnética se ha usado durante casi 200 años en la concentración de minerales de hierro, y todavía se emplea extensamente en la actualidad. Para lograr esto, se ha utilizado una gran variedad de dispositivos. Desde el comienzo de este siglo ha tenido lugar una expansión constante tanto en el equipo disponible como en la gama de minerales para los que es aplicable la separación magnética. La separación de pequeñas cantidades de hierro y minerales ferríferos de los minerales industriales se ha tornado en una importante aplicación, al igual que la concentración de diversos minerales ferrosos y no ferrosos.

La propiedad de un mineral que determina su respuesta a un campo magnético es la susceptibilidad magnética. Con base en esta propiedad, los materiales pueden dividirse en

La naturaleza de la alimentación abarca su distribución de tamaños, la susceptibilidad magnética y otras propiedades físicas y químicas que pueden afectar a las diversas fuerzas que intervienen.

PISICA BASICA DEL MAGNETISMO

Cuando se coloca un objeto en un campo magnético (campo magnético aplicado H), la inducción magnética B en el objeto está expresado por

$$B = H + U \quad (\mathbf{A})$$

U = magnetización o intensidad de magnetización del material del objeto). La magnetización puede interpretarse como un momento magnético dipolar por unidad de volumen del material. El campo magnético aplicado **se** expresa en función ya sea de la intensidad del campo magnético con unidades de amperes por metro, o de la densidad de flujo magnético en teslas. (La relación es $1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}$). La magnetización se expresa normalmente en amperes por metro, mientras que la inducción magnética se expresa normalmente en teslas. Por la ecuación **(A)**, es obvio que H , U y E pueden expresarse todas ya

sea en **amperes** por metro o en teslas, pero para que la ecuación sea válida, **todas** deben expresarse en las mismas unidades.

Otra cantidad que se usa en el magnetismo es el flujo magnético, expresado en **webers** (Wb). El weber es el flujo magnético que, cerrando un circuito de vuelta, produce en éste una fuerza electromotriz de un volt mientras **se reduce** a cero a un régimen uniforme en un segundo. El tesla, entonces, es la densidad de flujo magnético dada por un flujo magnético de un weber por metro cuadrado.

En la figura 3a **se** ilustra la relación entre la magnetización y el campo magnético aplicado para minerales típicos ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos. Existe una relación lineal más simple para los materiales paramagnéticos y diamagnéticos. Tal relación no basta para los materiales ferromagnéticos, su comportamiento es mucho más complicado (figura 3b).

La pendiente de la curva de magnetización es la susceptibilidad magnética k_m del material, es decir

$$k_m = \frac{U}{H} \quad (B)$$

La susceptibilidad magnética es una pequeña constante para los materiales paramagnéticos, **una** constante negativa muy pequeña para **los** materiales diamagnéticos, y para **los** materiales ferromagnéticos es variable y depende del campo magnético aplicado y de la historia previa de la muestra.

EQUIPO Y APLICACIONES,

El equipo para separación magnética se divide con toda propiedad en dos categorías: separadores magnéticos de baja intensidad y de alta intensidad, usándose los primeros primordialmente para minerales ferromagnéticos, aunque también para minerales paramagnéticos de alta susceptibilidad magnética, y los segundos para minerales paramagnéticos de más baja susceptibilidad magnética. Ambas separaciones, de baja y alta intensidad magnética, pueden llevarse a cabo en húmedo o en seco. Predomina el procesamiento en húmedo en las operaciones de baja intensidad magnética, si bien existen plantas de procesamiento en seco de gran capacidad. Los separadores de alta intensidad

magnética han sido tradicionalmente de proceso seco y de **baja** capacidad. Con **base** en los adelantos logrados en el diseño de imanes, ha sido posible construir separadores de gran capacidad para proceso húmedo, de alta intensidad magnética, y se han aplicado con éxito en la concentración de minerales paramagnéticos.

CILINDROS MAGNETICOS.

Los cilindros magnéticos son separadores magnéticos de baja intensidad que trabajan con alimentación **seca**. **Estos** cilindros son de polo axial y se usan para concentrar minerales ferromagnéticos. Se presentan en diseños de imán permanente y electromagnético, con un arco magnético de cobertura variable. El número de polos dentro del arco dado es también variable, así como lo son los diámetros de los cilindros de polo axial, van de las 18 a 48 pulgadas. Los diámetros de las partículas a ser tratadas influyen en el cilindro seleccionado; el material de alimentación de hasta 1 pulg. de diámetro puede ser sucesivamente tratado sobre cilindros con polaridad alternante. La polaridad alternante del polo axial produce considerable agitación de las partículas al

atravesar ellas el arco magnético, produciendo un concentrado magnético muy limpio dado el caso. La velocidad del cilindro puede variar, siendo **baja** si va de **20-45 rpm** 6 alta si es de 200 rpm. El principio de operación de este aparato es ilustrado en la figura 4.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Objetivo.

Determinar la recuperación de ferromagnetita que se consigue con el tambor magnético.

Equipo.

- Cilindro magnético.
- Recipientes.
- Cronómetro.
- Balanza.
- Tamices.

Procedimiento,

1. Obtener 5 Kg. de material homogenizado de - 50 Tyler Mesh.
2. Adecuar el cilindro magnético, ubicando correctamente los recipientes recogedores de las colas, los medios y el concentrado.
3. Para una abertura dada del alimentador medir el tiempo de procesamiento de los 5 Kg.

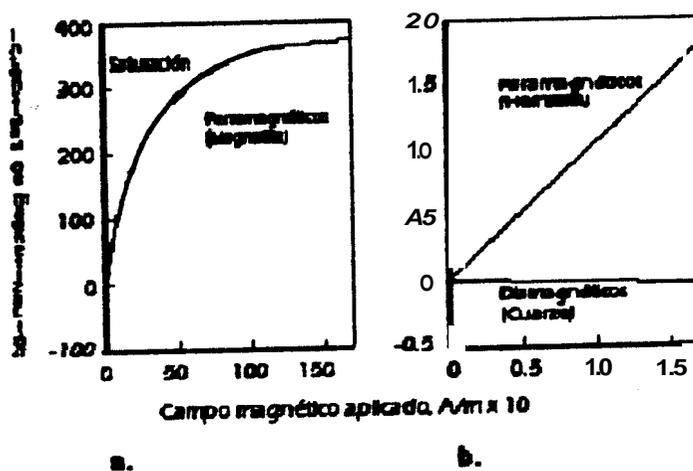


Fig No. 3 Curvas típicas de magnetización. a) Minerales ferromagnéticos (magnetita). b) Minerales paramagnéticos (hematita) y diamagnéticos (cuarzo) [16].

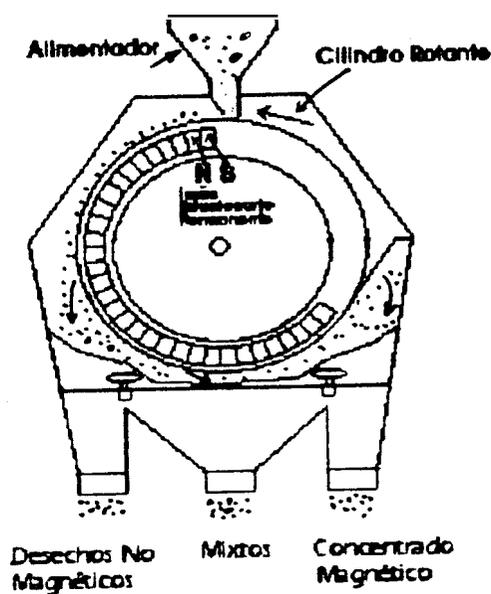


Fig No. 4 Cilindro magnético de polo axial tipo agitador [6].

4. Pesar el concentrado, las colas y los medios.
5. Determinar el contenido de ferromagnetita en cada uno de los productos.
6. Mezclar las colas, los medios y el concentrado hasta obtener una mezcla homogénea y repetir el proceso del 1 al 5 para una otra abertura de alimentación. Repetir el proceso para cinco aberturas diferentes.

Resultados

De la tabla XXIV se puede observar que una abertura óptima de alimentación del tambor magnético es la de 4 mm, con la cual se producen concentrado con un pureza del 98%, lo cual es bastante aceptable para los pigmentos. La prueba para obtener los resultados de la tabla XVI, se realizó para la abertura de alimentación anterior. En la tabla XXVII se muestra un balance de los productos de la prueba realizada con el tambor magnético. De esta tabla se deduce que el porcentaje de recuperación de magnetitas con el concentrador magnético es 32%, con una pureza del concentrado del 98%.

La recuperación es muy baja por lo cual se descarta el concentrador magnético para

procesar las arenas.

4.7.2 SEPARACION GRAVIMETRICA POR VIA HUMEDA.

Los métodos gravimétricos de concentración son usados para tratar **una** gran variedad de materiales, desde sulfuros de metales pesados tales como galena (gravedad específica 7.5) hasta carbón (gravedad específica 1.3), en tamaños de partículas en algunos casos por de **bajo** de 50 micras.

En años recientes, muchas compañías han re-evaluado los sistemas de separación gravimétrica debido a los costos crecientes de los agentes de flotación, la relativa simplicidad de los métodos gravimétricos y a que éstos producen relativamente poca contaminación.

PRINCIPIOS DE CONCENTRACION GRAVIMETRICA.

Los métodos de concentración gravimétrica separan minerales de diferente gravedad específica por su movimiento relativo en respuesta a la gravedad y 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.

Es esencial para una separación efectiva que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga. Alguna idea del tipo de separación posible puede ser ganada del criterio de concentración

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

donde D_h es la gravedad específica del mineral pesado. D_l es la gravedad específica del mineral liviano, y D_f es la gravedad específica 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 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 grandes serán afectadas en grado mayor que las

más 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 moverse de acuerdo con la **ley** de Newton de resistencia turbulenta, según la cual cuando una partícula sólida cae libremente en un medio viscoso, tal como 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 del fluido, el cuerpo alcanza su 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 resistencia turbulenta la velocidad terminal de una partícula cayendo en un medio fluido es:

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

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 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.

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 la películas, las partículas pequeñas no se moverán tan rápidamente como las partículas 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, (figura 5).

película que fluye depende de el tamaño **y** la densidad de las partículas, ellas **se** dispersarán en abanico sobre la mesa, las más pequeñas **y** pesadas corriendo más rápidamente hacia el recipiente de concentrados hacia el otro extremo, mientras que las partículas más grandes **y** ligeras son depositadas en el recipiente de colas, **el** cual corre longitudinalmente a la tabla. La figura 7 presenta un diagrama idealizado de la distribución de productos de la mesa. Un partidador ajustable en el **lado** donde se depositan los concentrados se usa a menudo para separar este producto en dos fracciones: un concentrado de alto grado y la fracción de los medios.

Aunque la película de concentración que fluye requiere una capa individual de alimentación, en la práctica se introduce a la mesa una alimentación de capa múltiple, lo cual posibilita una capacidad de procesamiento más grande. Una estratificación ,vertical, debido al acto de agitación, toma lugar detrás de los riffles, los cuales generalmente corren paralelos con el eje longitudinal de la mesa y **se** disponen desde una altura máxima en el lado

de la alimentación hasta una altura mínima en el lado opuesto (ver fig. 7). En los espacios entre los riffles las partículas se estratifican con el fin de que las partículas más finas y pesadas estén en el fondo y las más grandes y livianas cerca de la superficie (ver fig. 8). Capas de partículas se mueven a través de los riffles por una acción de agrupamiento de la nueva alimentación y por la película de agua de lavado que fluye. Debido a la disminución paulatina del grosor de los riffles, partículas progresivamente más finas y densas son continuamente traídas en contacto con la película de agua que fluye que pasa por encima de los riffles. La concentración final toma lugar en el área sin riffles hacia el final del deck, donde la capa de material es en esta etapa usualmente solo de una o dos partículas de grosor.

Los decks se construyen usualmente de madera, revestidos con materiales con un alto coeficiente de fricción, tales como linóleo, caucho y plásticos. Los decks echos de fibra de vidrio son también usados, aunque más caros pero más duraderos. Los riffles en tales decks se incorporan como parte del molde.

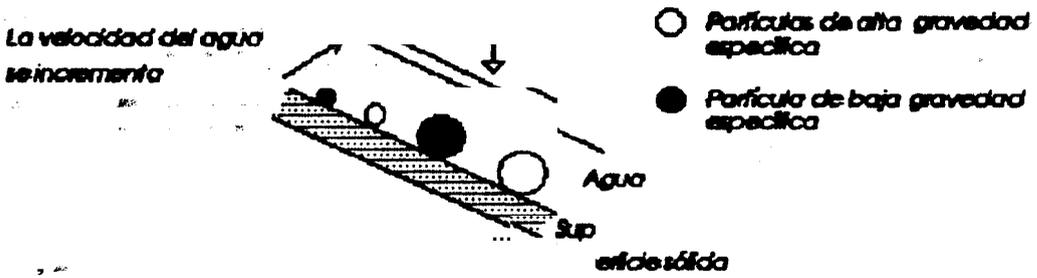


Fig No. 5 Acción en una película que fluye (27)

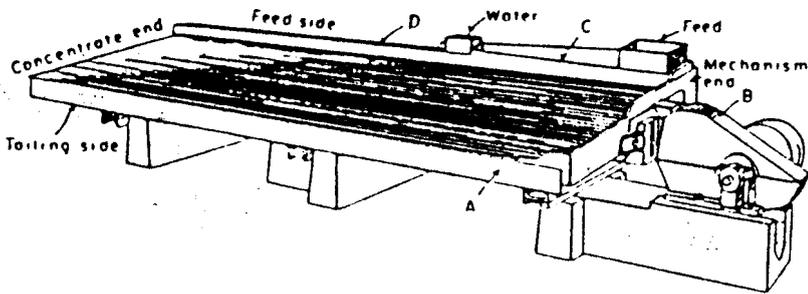


Fig No. 6 Mesa Concentradora (27)

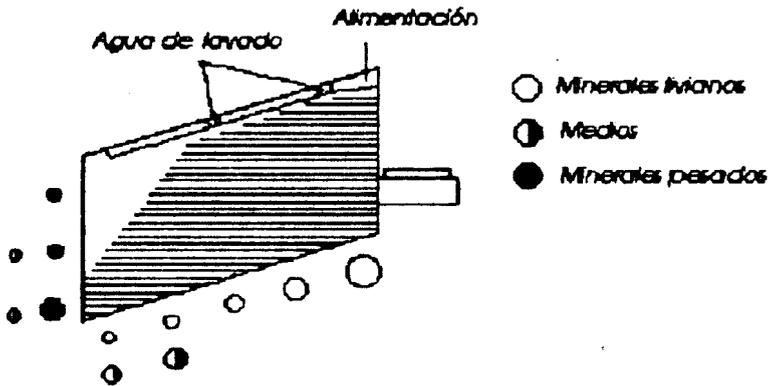


Fig No. 7 Distribución de productos de la mesa concentradora (27)

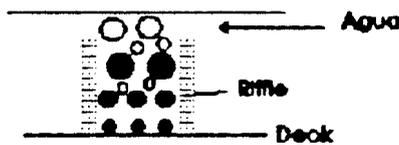


Fig No. 8 Estratificación vertical entre rifles (27)

El tamaño de la partícula juega un rol muy importante en las mesas concentradoras; conforme el **rango** de tamaños de la alimentación de la mesa se incrementa, la eficiencia de la separación disminuye. Si una alimentación de mesa comprende un amplio rango de partículas, algunos de estos tamaños **serán** limpiados ineficientemente. Como se puede ver en la fig. 7, en una separación idealizada, los medios producidos no son "verdaderos medios", i.e. partículas de mineral asociado a ganga, sino partículas relativamente grandes y densas y partículas finas y ligeras. Si estas partículas son retornadas al circuito de molienda, junto con los verdaderos medios, entonces ellas serán remolidas innecesariamente.

Puesto que la mesa concentradora separa efectivamente partículas grandes y ligeras de partículas finas y densas, **es** práctica común clasificar la alimentación, ya que los clasificadores ponen tales partículas en el mismo producto, sobre la base de sus rapidezces de asentamiento iguales.

La capacidad de las **mesas** varía de acuerdo al

tamaño de las partículas de alimentación y al criterio de concentración. **Las** mesas pueden procesar hasta **2** TPH de arena de **1.5 mm** y tal **vez** 1 TPH de arena fina. Con **tamaños** de partículas entre **100 y 150 μ m**, las capacidades de las mesas pueden ser tan **bajas** como 0.5 TPH. Con materiales como el carbón, sin embargo, **son** comunes capacidades mucho más altas, con **tamaños** de hasta 15 mm.

La separación puede ser influenciada por **la** amplitud del golpe, la cual puede ser controlada. La amplitud del golpe usualmente varía dentro **del** rango de 10 mm a **25** mm o más, estando la velocidad en el rango de 240 **a** 325 golpes por minutos. Generalmente, una arena fina requiere una velocidad más alta y golpes más cortos que una alimentación gruesa.

La cantidad de agua usada en la pulpa varía, pero para menas la dilución normal de la alimentación es 20-25% de sólidos por peso, mientras **que para** carbón se utilizan pulpas de 33 a 40% de sólidos. En adición al agua en la **pulpa** de alimentación, agua limpia fluye sobre la mesa para la limpieza del concentrado final. Esto varía desde unos pocos litros a casi 1000

litros por minuto de acuerdo a la naturaleza del material de alimentación.

La mesa está ligeramente elevada a lo largo de la línea de movimiento desde la alimentación hasta el lado de **los** concentrados. Esta inclinación moderada, la misma que las partículas de alta densidad remontan más fácilmente que **los** minerales de baja densidad, mejora sustancialmente la separación, permitiendo cortes más acentuados entre los concentrados, medios y las colas. La elevación correcta varía con la granulometría de la alimentación y es mayor con alimentaciones más gruesas y pesadas. La elevación final nunca debería ser menor que la altura del riffle de mayor grosor. Elevaciones finales normales para procesar menas van desde 90 mm para una arena muy pesada y gruesa hasta 6 mm para alimentaciones de tamaño muy fino. Vale indicar que la inclinación se subdivide en longitudinal y lateral. La inclinación longitudinal se la mide en dirección paralela a la diagonal mayor de la mesa y la inclinación lateral se mide en dirección paralela a la diagonal menor del deck.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Objetivo.

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

Equipos y materiales,

- Mesa concentradora Deister 15-S.
- Tanque cilindrico (reservorio de agua).
- Toma de agua.
- Una manguera.
- Tamices.
- Recipientes.
- Balanza.
- Mesa.
- Inclinómetro.

Procedimiento.

1. Adecuar la mesa.
2. Adecuar la pulpa. En estas pruebas se usará una pulpa con un 25% de sólidos por peso.
3. Regular los parámetros de la mesa: inclinación longitudinal, inclinación lateral, amplitud, velocidad del golpe, flujo de agua; hasta conseguir una línea de corte (separación del material según densidad). La línea de separación es recomendable que coincida con la bisectriz del ángulo de la esquina 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. Determinar la recuperación de ferromagnetita en los productos.

Resultados

En la tabla **XXV** se muestran los parámetros óptimos con los cuales se realizó la prueba de concentración magnética.

En la tabla **XXVII** se presenta el balance de los productos de la prueba con la mesa concentradora. En esta tabla se puede observar que con la mesa se logra una recuperación de magnetitas del **94%**. con una pureza del concentrado del **98%**.

La recuperación lograda con la mesa es muy buena, por lo cual **se** recomienda su uso para la concentración de magnetita de las arenas.

4.8 PROCESO DE MOLIENDA

TABLA XXIV
PRUEBAS CON EL CONCENTRADOR MAGNETICO

RUEBA	MASA (gr)	ABERTU- RA (mm)	TASA DE PROCESAMIENTO (kg/min)	COLAS (gr)	MEDIOS (gr)	CONCEN- TRADOS (gr)	PUREZA DEL CON- CENTRADO
1	3954	2	4.5	2892	206	846	1%
2	3951	4	7.65	2774	281	880	2%
3	3947	8	14.35	2538	386	1004	8%
4	3946	14	26.31	2633	768	1120	15%
5	3944	16	50.35	1819	772	1345	25%

TABLA XXV
PARAMETROS EXPERIMENTALES DE LA MESA VIBRATORIA

PARAMETROS	MAGNITUDES
Velocidad de golpe (R.P.M.)	310
Amplitud del golpe (mm)	9
Inclinacion Lateral (mm-m)	3.6
Inclinacion Longitudinal (mm-m)	64
Agua de Lavado (lt/min)	22
Tasa de procesamiento (kg min)	1.66

TABLA XXVI
BALANCE EN LA PRUEBA CON LA MESA VIBRATORIA

GRUPO	PESO (gr.)	% PESO	% CONTENIDO DE MAGNETIT	% DE MAGNETI- TA TOTAL
Cabeza	5000	100	70	100
Concentrado	3347	67	98	94
Medios	765	15	29	6
Colas	88	18	0	0

RECUPERACION DE MAGNETITA: 94%

TABLA XXVII
BALANCE EN LA PRUEBA CON EL CILINDRO MAGNETICO

GRUPO	PESO (gr.)	% PESO	% CONTENIDO DE MAGNETIT	% DE MAGNETI- TA TOTAL
Cabeza	5000	100	70	100
Concentrado	1155	23	99	32
Medios	275	5	85	7
Colas	3549	71	60	61

RECUPERACION DE MAGNETITA: 32%

En el caso de la magnetita **solo** necesita la etapa de molienda. Puesto que el método de Bond para determinar el índice de trabajo requiere una relación de reducción de 8:1 para obtener resultados confiables, el mismo no sería aplicable en el caso de la magnetita.

Además del ensayo estándar de Bond, varios métodos han sido usados para obtener **los** índices que se relacionan con **los** índices de trabajo de Bond. Smith y **Lee** usaron ensayos de moliendabilidad tipo batch para obtener el índice de trabajo, y compararon sus resultados con los índices de trabajo de los ensayos estándar de Bond, los cuales requieren un cribado continuo del material fino con la finalidad de simular una operación de circuito cerrado. Los ensayos tipo batch se compararon muy favorablemente con los datos de ensayos de molienda estándar, siendo la ventaja de que se requiere menos tiempo para determinar el índice de trabajo.

Berry and Bruce desarrollaron un método comparativo de determinar el índice de trabajo de una mena. 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 período 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 bajo ensayo, de la ecuación de Bond,

$$E_r = E_t = W_{ir} \left(\frac{10}{\text{Pr}} - \frac{10}{\text{Fr}} \right) = W_{it} \left(\frac{10}{\text{Pt}} - \frac{10}{\text{Fr}} \right)$$

Por lo tanto

$$W_{it} = W_{ir} \left(\frac{10}{\text{Pr}} - \frac{10}{\text{Fr}} \right) / \left(\frac{10}{\text{Pt}} - \frac{10}{\text{Fr}} \right)$$

Valores razonables para índices de trabajo se obtienen por este método tanto como las menas de ensayo y de referencia son molidas a casi la misma distribución de tamaño del producto (27).

PRUEBA DE LABORATORIO

Objetivo.

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

Equipo.

-Molino cilindrico de bolas de 0.9583 pies de diámetro 0.6458 pies de longitud.

-Carga de bolas que ocupaba 30% de 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 (**F3(d)**) versus diámetro de las partículas (d) en micras.
3. Determinar el tamaño del 80% de alimentación del material patrón en curvas de alimentación del mismo.
4. Preparar 200 gr. de material desconocido (arena de magnetita) de índice de trabajo desconocido.
5. Tamizar en la sarta estándar para realizar diagramas y establecer el tamaño del 80% del material desconocido en curvas de alimentación del mismo material.
6. Moler en el molino de bolas durante 5 minutos en etapas separadas, las muestras de los dos materiales bajo las mismas condiciones de velocidad de rotación del molino y carga de bolas en el molino.
7. Obtener los productos y pasar en la sarta de tamices de la prueba y realizar diagramas para establecer el tamaño del 80% de los materiales conocidos y desconocidos respectivamente.
8. Calcular el índice de trabajo (WI) del material desconocido, igualando energía para cada material, recordando que

$$E = \frac{W_i}{10((1\sqrt{X_p}) - (1\sqrt{X_f}))}$$

Sabiendo que la energía consumida es la misma para ambos materiales, **luego**

$$W_{it} = W_{ir} \cdot \frac{((1\sqrt{X_{pt}}) - (1\sqrt{X_{ft}}))}{((1\sqrt{X_{pr}}) - (1\sqrt{X_{fr}}))}, \text{ donde}$$

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

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

X_{pt} y X_{pr} : Tamaños en micras del 80% del pasante del del producto de **los** materiales desconocidos y conocidos respectivamente.

X_{ft} y X_{fr} : Tamaños en micras del 80% del pasante de la carga de alimentación de **los** materiales desconocidos y conocidos respectivamente.

Resultados

Del gráfico 9 y 10 y la tabla XXVIII se obtienen los siguientes datos:

$$X_{pt} = 131.4 \mu\text{m} \qquad X_{ft} = 199.5 \mu\text{m}$$

$$X_{pr} = 129.6 \mu\text{m} \qquad X_{fr} = 199.5 \mu\text{m}$$

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

$$W_{it} = (14 \text{ Kw-hr/ST}) \cdot \frac{((1\sqrt{131.4\mu\text{m}}) - (1\sqrt{199.5\mu\text{m}}))}{((1\sqrt{129.6\mu\text{m}}) - (1\sqrt{199.5\mu\text{m}}))}$$

$$W_{it} = 13.51 \text{ Kw-hr/ST}$$

TABLA XXVIII
PRUEBA DE MOLIENDA DE LA MAGNETITA
(MATERIAL DESCONOCIDO: MAGNETITA)
(MATERIAL CONOCIDO: CUARZO)

Tyler Mesh	Diámetro (um)	Porcentaje de peso pasante			
		Material Desconocido		Material Conocido	
		Alimentación	Producto	Alimentación	Producto
65	212	100.0	100.0	100.0	100.0
80	180	65.0	95.0	65.0	96.6
100	150	47.5	87.6	47.5	87.2
150	106	19.0	66.1	19.0	66.8
200	75		37.8		41.2
250	63		31.4		34.0
325	45		20.7		22.3
400	38		16.3		17.3
FONDO			0		0

TABLA XXIX
GRAVEDAD ESPECIFICA DEL PIGMENTO DE MAGNETITA

TARA	PESO DE TARA	PESO DE PIGN. + PIGMENTO	TEMP. C	PESO DE PIGN. + AGUA	TEMP. C	PESO DE PIGMENTO	GRAVEDAD ESPECIFICA (gr/cc)
1	60.99	390.20	29	350.32	29	49.87	4.99
2	61.79	391.20	29	351.50	29	49.83	4.92
3	60.70	389.60	29	349.80	29	49.96	4.92

PRUEBA DE INDICE DE TRABAJO DE LA MAGNETITA

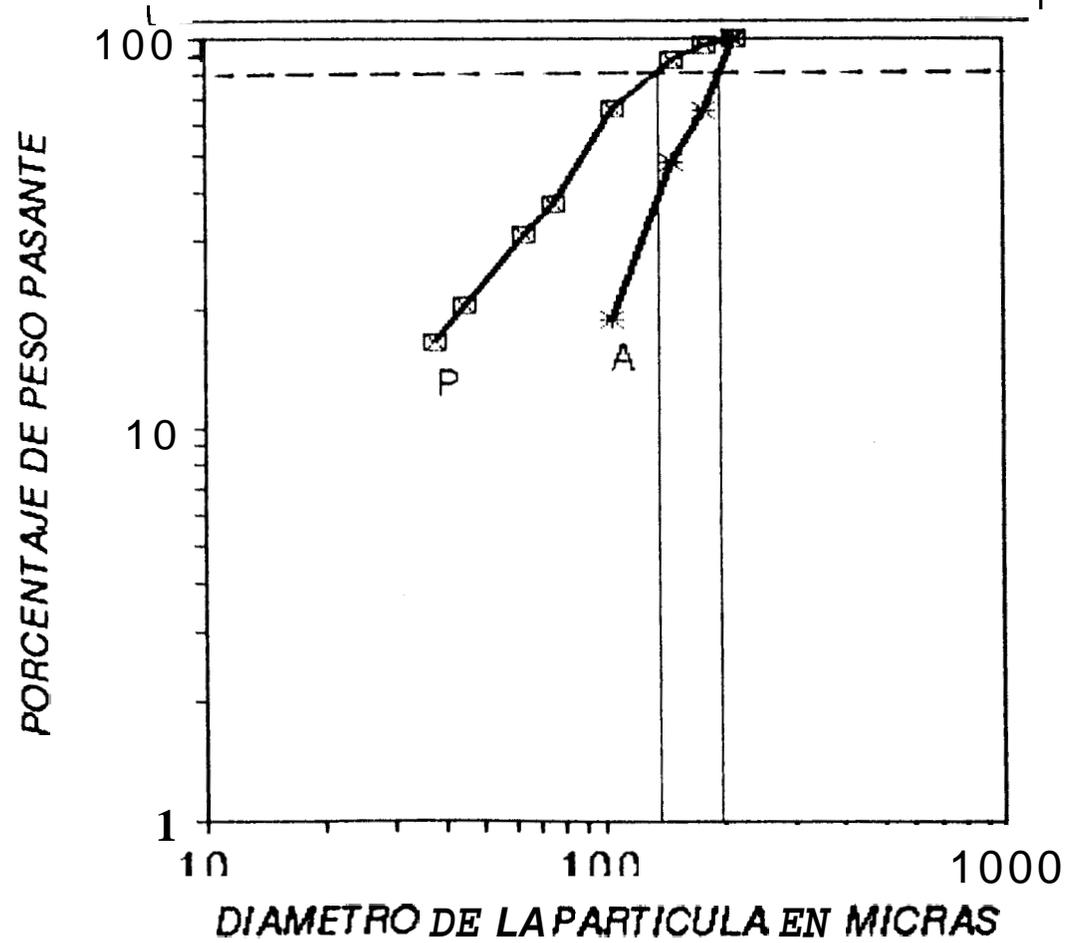


GRAFICO 9

PRUEBA DE INDICE DE TRABAJO DE LA MAGNETITA

CURVAS GRANULOMETRICAS DEL CUARZO

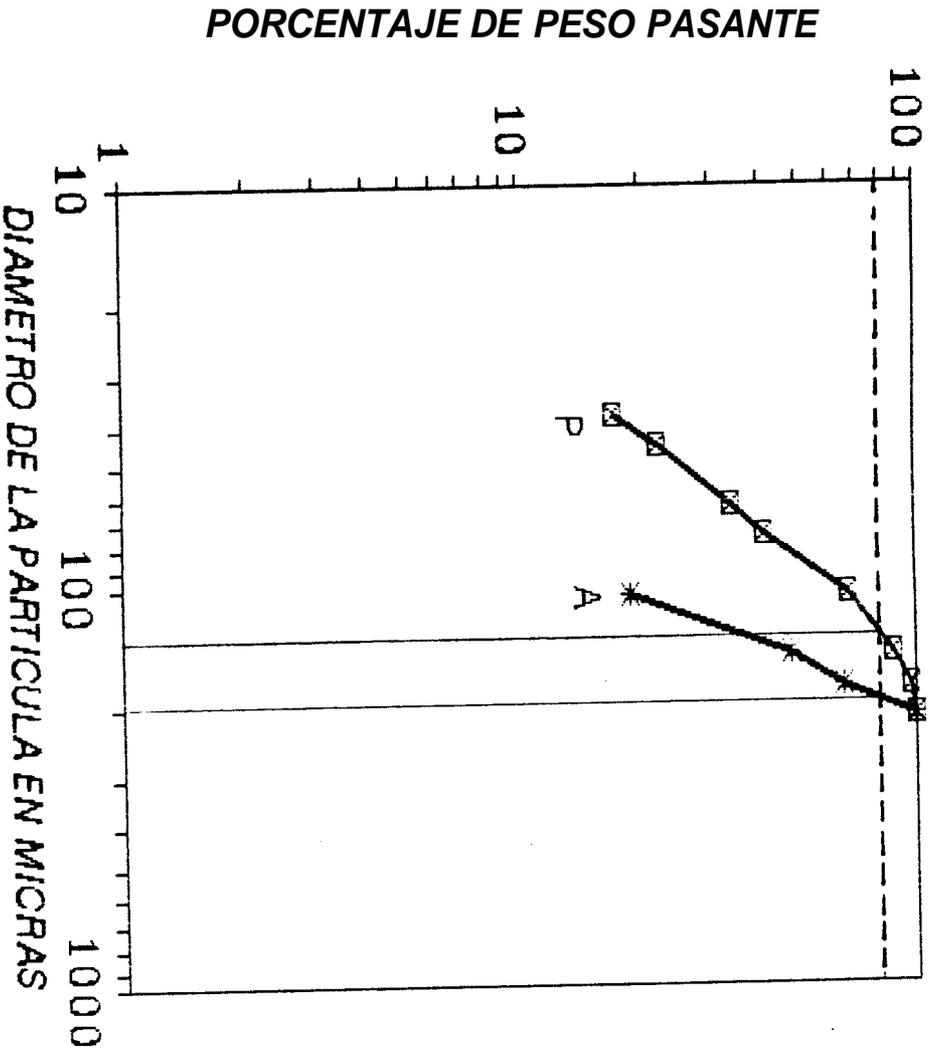


GRAFICO 10

4.9 PROCESO DE OBTENCION DEL PIGMENTO.

El proceso aplicado en la obtención del pigmento negro es el mismo que se utilizó en la obtención del pigmento de hematita. Se obtuvieron pigmentos negros para dos tiempos de molienda diferentes, a saber 20 y 40 horas, usando un molino de cerámica.

4.10 CARACTERISTICAS DEL PIGMENTO OBTENIDO.

Para obtener la gravedad específica y las granulometrías del pigmento negro se aplican las mismas pruebas de los capítulos anteriores.

4.10.1 GRAVEDAD ESPECIFICA.

Los resultados de el test de gravedad específica del pigmento negro se presentan en la tabla XXIX.

4.10.2 GRANULOMETRIA.

Con el ensayo hidrométrico se obtuvo la granulometría para pigmentos con diferentes tiempos de molienda. Los resultados se presentan en el gráfico 11 y las tablas XXX y XXXI.

El pigmento negro con un tiempo de molienda de

TABLA XXX
ENSAYO HIDROMETRICO DEL PRIMER PIGMENTO NEGRO

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temperatura (C)	Z de la ecuacion	Diametro efectivo (um)	Porcentaje peso pasante
1	56.0	24.5	9.45	25.6	92.0
2	47.0	24.5	9.96	18.7	78.2
3	38.5	24.5	11.61	16.0	64.8
4	31.5	24.5	12.90	15.0	59.8
5	25.0	24.5	14.10	14.0	43.6
7	16.0	24.5	15.76	13.0	29.5
10	9.5	24.5	16.96	11.0	19.3
13	7.0	24.5	17.42	10.0	15.4
17	5.0	24.5	17.79	9.0	12.2
22	3.9	24.5	18.00	8.0	10.5
29	2.8	24.5	18.20	7.0	8.8
35	2.0	24.5	18.35	6.0	7.5
44	1.5	24.5	18.44	5.4	6.7
53	1.0	24.5	18.53	4.9	6.0

TABLA XXXI
ENSAYO HIDROMETRICO DEL SEGUNDO PIGMENTO NEGRO

Lapso de tiempo (min)	Lectura de hidrometro	Temperatura (C)	Z de la ecuacion	Diametro efectivo (um)	Porcentaje peso pasante
2	60.5	24.0	7.30	16.0	99.5
5	46.0	24.0	9.90	11.9	76.7
6	40.0	24.0	11.10	11.5	67.5
7	35.0	24.0	12.00	11.1	59.5
8	30.0	24.0	13.00	10.8	51.7
9	25.0	24.0	13.90	10.5	43.9
11	20.0	24.0	15.80	9.8	36.0
12	15.0	24.0	15.80	9.7	28.2
14	10.0	24.0	16.80	9.3	20.4
16	5.0	24.0	17.70	8.9	12.5
17	3.5	24.0	17.95	8.7	10.2
18	2.0	24.0	18.25	8.5	7.8
27	1.0	24.0	18.24	7.0	6.3

**CURVAS GRANULOMETRICAS DEL PIGMENTO
NEGRO DE MAGNETITA**

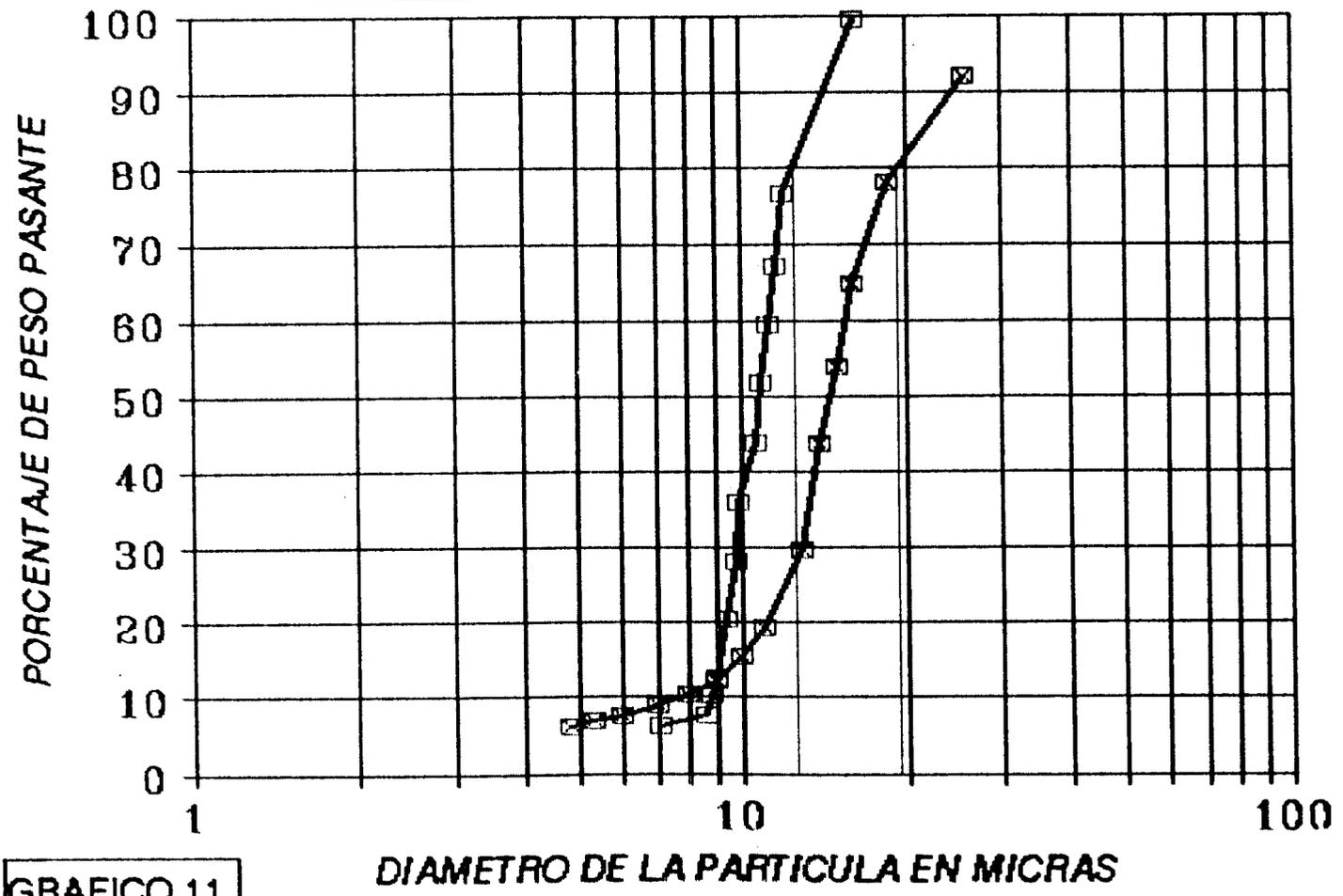


GRAFICO 11

20 horas (curva 1 del gráfico 11) tiene un 80% porcentaje de peso pasante de 19.5 μm , mientras que el pigmento del mismo color con un tiempo de molienda de 40 horas (curva 2 en el gráfico 11) tiene un 80% porcentaje de peso pasante de 12.1 μm .

4-11 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 negro. El proceso consta de tres etapas: concentración, molienda y micronización.

Las etapas de molienda y micronización son las mismas que se han diseñado para los procesos de obtención de los pigmentos anteriores.

La etapa de concentración consta de:

A. Criba vibratoria

Abertura malla: 48 Tyler.

Capacidad: 5.5 TPH.

B. Tanque Acondicionador

Tamaño: 1x1.5 (Diámetroxaltura) m.

Diámetro de descarga: 7.5 cm.

C. 4 Mesas Deister Diagonal-Deck No 6.

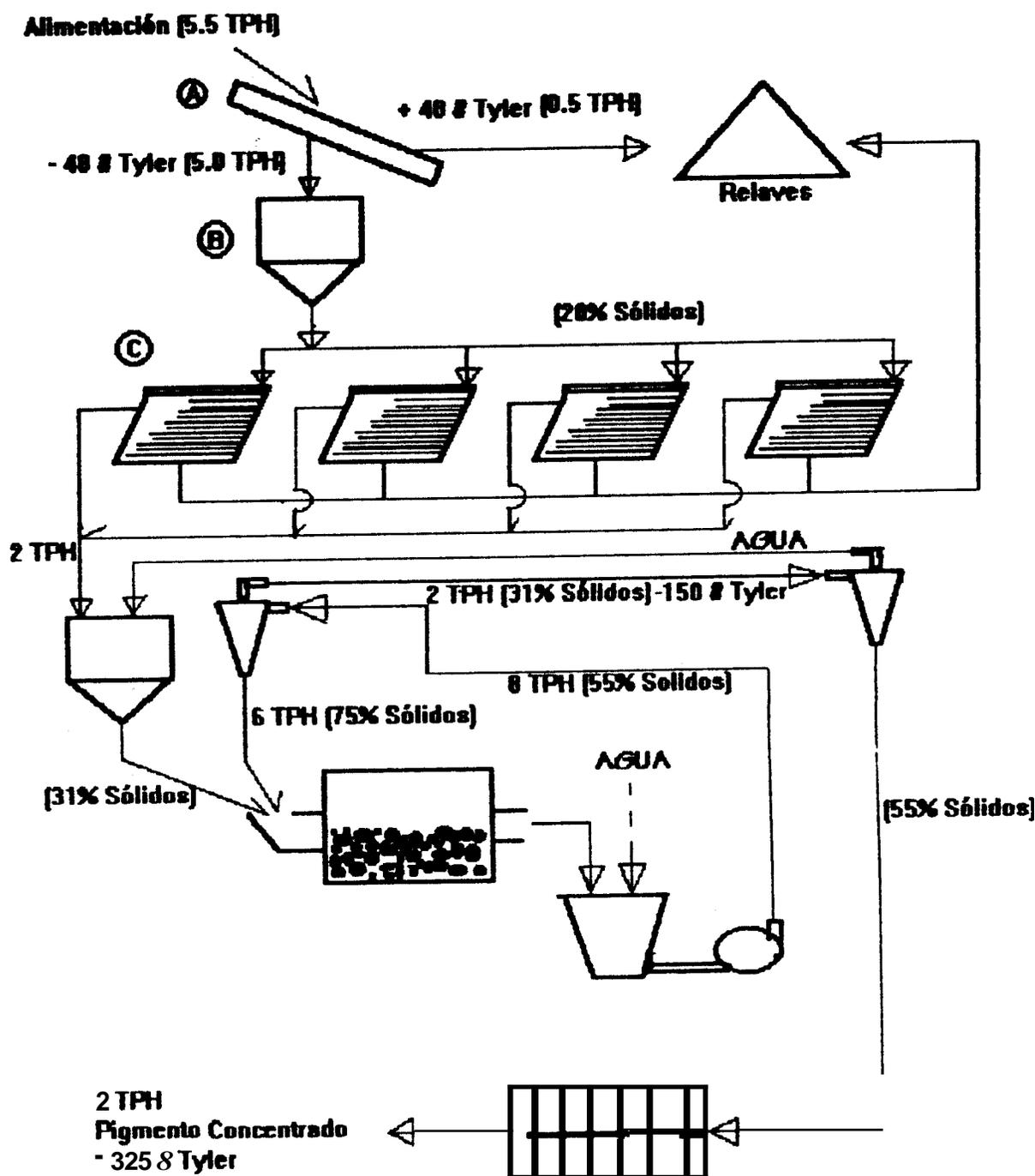


Fig. 9 Diagrama de tratamiento para producir pigmento negro a partir de magnetita.

En esta etapa se elimina la fracción +48 Tyler Mesh mediante la criba vibratoria, mientras que el material pasante es preparado en el acondicionador para su posterior concentración en las mesas vibratorias. Las mesas en conjunto procesarán 5 TPH de arena con una ley media de magnetita de 45%, asumiendo una eficiencia del 90% para obtener un concentrado con una pureza cercana al 100%.

CAPITULO V

HORMIGON INTEGRALMENTE COLOREADO

5.1 INTRODUCCION AL HORMIGON INTEGRALMENTE COLOREADO.

5.1.1 HORMIGONES Y MORTEROS COLOREADOS.

El hormigón y los morteros coloreados, pueden producirse pintando sus superficies luego de que estas hayan endurecido, incorporando agentes colorantes cuando las mezclas **se** encuentran en estado plástico **y** empleando agregados coloreados (Hormigón integralmente coloreado).

Sin embargo, es de uso más común el coloreado con pigmentos en razón de que el color se integra a la mezcla y teóricamente no requiere mantenimiento para que el mismo perdure.

El uso de hormigón y morteros coloreados **para** revestimientos, tejas, adoquines y juntas, ha crecido rápidamente a pesar que se tienen muy

pocos datos a largo plazo sobre su comportamiento y durabilidad.

5.1.2 TIPOS Y PROPIEDADES DE LOS AGENTES COLORANTES.

Los agentes colorantes son de dos tipos: las mezclas colorantes (color-conditioning admixtures) y los pigmentos (12).

Mezclas Colorantes: Uno de los mejores métodos de alcanzar un color integral uniforme es mediante el uso de mezclas colorantes. Consisten de ingredientes compatibles cuidadosamente proporcionados. Estas mezclas sirven para incrementar la resistencia del hormigón en todas sus edades, mejoran la trabajabilidad, las características de colocación y el acabado, así como también aseguran una dispersión equilibrada del color para alcanzar una excelente uniformidad.

A causa de que las mezclas colorantes son manufacturadas exclusivamente para su uso en hormigón, los clientes y los productores están seguros de su compatibilidad, estabilidad y su resistencia al desvanecimiento.

Pigmentos Un pigmento (natural o artificial)

es definido como un polvo fino **seco** o una suspensión acuosa o espesa, inerte con los ingredientes del hormigón o el mortero, el cual imparte **un** color específico al producto.

Los pigmentos **usados** para **la** coloración de morteros y hormigones deben tener un pH completamente estable, una buena resistencia a la acción de la luz y del clima y un excelente poder colorante. Deben ser tan insolubles en el agua como los agregados, mezclarse fácilmente con el cemento **y** los finos, encontrarse libres de sales solubles **y** ácidos y virtualmente libres de sulfato de calcio.

Las partículas pigmentarias son mucho más finas que los cementos (diámetro 1 micra, lo cual significa que son 10 veces más pequeñas que las partículas de cemento).

La mayoría de los colorantes son hechos de pigmentos de óxido de hierro (ya que son los únicos que cumplen con los requisitos anteriormente expuestos).

Estos pigmentos no son tóxicos, dan un fuerte color, son químicamente estables en las mezclas y son resistentes **a** la radiación ultravioleta.

El óxido de hierro viene en amarillo, rojo, café y negro. **Los** óxidos de cromo (que produce verde) **y** cobalto (que produce azul) son también estables ante los alcalis **y** resisten radiación ultravioleta. El negro carbón (empleado para obtener color negro) es menos resistente a los ataques del medio ambiente que **los** óxidos de hierro.

Como se vio anteriormente **los** pigmentos de Óxido de hierro pueden ser naturales o sintéticos. Los óxidos sintéticos tienen más poder colorante: se requiere menos pigmento para obtener un tono determinado, además de producir colores más brillantes y nítidos. La desventaja radica en el costo; los óxidos sintéticos son 2 veces más caros que los óxidos naturales.

Luego de un cierto punto, llamado punto de saturación, la intensidad del color no aumenta con la dosificación. Este punto varía de acuerdo con el poder colorante de cada pigmento en particular.

El óxido de hierro sintético alcanza este punto a una dosis del 5% del peso de cemento mientras **que** los naturales lo logran al 10%. **Así** que a

pesar de que el costo de **los** sintéticos es mayor **que** el de **los** naturales por peso, la dosis necesaria para obtener un tinte determinado es menor para **los** primeros que para **los** segundos. **Los** pigmentos naturales **y** sintéticos pueden ser mezclados entre sí.

Si se usan en las dosis recomendadas, el empleo de los pigmentos no causa ningún detrimento en la resistencia de la mezcla ni de las unidades. En algunos casos los colorantes han incrementado el valor de la resistencia a la compresión. Los valores de dosificación permitidos están entre el 1 **y** el 10% del peso del cemento. El tiempo de mezclado debe ser mas largo que el normal para asegurar uniformidad. Los pigmentos usados en cantidades menores que el 6% generalmente no afectan las propiedades del hormigón; cantidades mas grandes pueden incrementar el requerimiento de agua de la mezcla de tal forma que la resistencia y otras propiedades, tales como la resistencia a la abrasión, pueden ser adversamente afectadas (15).

Los tipos de pigmentos típicos manufacturados para el hormigón coloreado son:

- Oxidos de hierro sintético, amarillos, rojos, oaféces y negros.
- Algunos óxidos de hierro naturales.
- Oxido de cromo.
- Azul de cobalto.
- Dióxido de titanio, y
- Negro de humo.

5.1.3 EFECTOS DEL COLOR DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGON INTEGRALMENTE COLOREADO.

Efectos del Color del Cemento.

Puesto que el cemento es el principal ingrediente del hormigón, su apariencia **tendrá** un efecto importante en el color **del** mismo. **El** color **del** cemento representa esencialmente el tono base o punto de partida en la determinación del color final del hormigón. El cemento Portland blanco producirá colores más claros y más brillantes y es recomendado en preferencia al cemento gris, excepto para colores grises oscuros o negros.

Efectos del Color de los Agregados,

La selección de los agregados con colores cercanos al del hormigón deseado produce una mayor estabilidad. A menos que se especifique

una textura de color expuesto, el color de los agregados gruesos en la mezcla no es usualmente un factor significativo en la apariencia final del hormigón coloreado. La apariencia de la arena, sin embargo, puede serlo. El usar demasiada arena ocasiona inconsistencia en el color; siempre debe tratar de mantenerse una relación de arena cemento de 3:1 por volumen.

Efecto del Agua.

La medición adecuada del agua, de la mezcla, es también de gran importancia. Demasiada agua en una mezcla ocasiona que el color sea más claro. Demasiada agua también crea burbujas microscópicas en la superficie del mortero. Estas burbujas hacen que lo claro se vuelva borroso y afectan la apariencia de la superficie coloreada.

Las proporciones de la mezcla para propósitos arquitectónicos deben dar como resultado un hormigón de trabajabilidad y resistencia apropiada **para** el tipo de aplicación que se trate, con relación máxima agua/cemento de 0.46. Para las probetas de prueba finales se utilizó una relación de agua cemento de 0.57.



5.1.4 FORMAS DE REALIZAR EL MEZCLADO DEL HORMIGÓN.

Básicamente existen **4** formas **para** adicionar el pigmento a la mezcla (11).

- Adicionando el pigmento ~~seco~~ por volumen.
- Adicionando el pigmento seco por peso.
- Adicionando la suspensión de pigmento por volumen.
- Adicionando la suspensión de pigmento por **peso.**

Cualquiera de los métodos puede hacerse manual o automáticamente. Estos últimos dan mayor confiabilidad, consistencia en color y reducción de costos.

Las probetas de hormigón coloreado se hicieron adicionando el pigmento ~~seco~~ por peso.

5.1.5 EFECTO DE LOS PIGMENTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LAS MEZCLAS FRESCAS.

Trabajabilidad.- La incorporación de los pigmentos al hormigón y mortero generalmente reduce su trabajabilidad.

Tiempo de fraguado,- Se ha reportado **que** la mayoría de los pigmentos no tienen efectos



importantes sobre esta propiedad, siempre **y** cuando se utilicen en las dosis recomendadas.

Contenido de aire.- Los pigmentos **en** general no ejercen efecto sobre el contenido de aire de las mezclas.

Exudación y asentamiento,- Se ha reportado que la incorporación de pigmentos no tiene efectos adversos **sobre** estas propiedades cuando se usan en los niveles recomendados (11).

5.2 METODOLOGIA PARA LA ELABORACION DE UNA PROBETA DE HORMIGON INTEGRALMENTE COLOREADO.

El primer paso fue determinar las proporciones de los componentes de la probeta: agua, cemento, agregados, y pigmento. Para ello **se** tomó como referencia, para las probetas iniciales las proporciones que se usan para la fabricación de tejas Rocafuerte y después **para** las probetas de prueba final, basado en los datos bibliográficos existentes, se decidió **usar** las siguientes proporciones:

AGUA: 166 ml.; relación agua/cemento total = 0.56.

CEMENTO FINO ROCAFUERTE GRIS TIPO I: 291 gr.

ARENA: 960 gr.

PIGMENTO: 29 gr.; 10% en peso del cemento.

POZZOLIT 322-N: 2 gr; 0.69% del cemento.

La lista de las probetas de prueba está en la tabla XXXII.

5-3 RESULTADOS DE COLOR, OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS,

5.3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON LAS PROBETAS PARA EL PIGMENTO ROJO DE HEMATITA.

En las fotografías 1 y 2 se observan las probetas H coloreadas con pigmento rojo de hematita comparadas con las probetas A sin colorear.

En la fotografía 1 se ve un lado de las probetas, mientras que en la fotografié 2 se observa el otro lado de las mismas.

En la fotografía 1 se observa más contraste de color **que** en la 2. Esto **se** debe a que cuando se (funden) elaboran las probetas, alguna cantidad de pigmento **se** concentra **sobre** la superficie expuesta de las mismas.

Las probetas A1 y H1 son muy oscuras en comparación con las A2 y H2 respectivamente, debido a que en las primeras se usaron agregados oscuros (arena basáltica), mientras que en las últimas se utilizó agregados claros

TABLA XXXII
COMPOSICION DE LAS PROBETAS DE HORMIGON INTEGRALMENTE
COLOREADO

Probeta	Cemento (gr)	Arena Clase (gr)	Arena Homogenizada (gr)	Agua (ml)	Pigmento (gr)	Aditivo Puzzolit 3-22N (gr)
A1	300	960		166	-	-
A2	300		960	166		
H1	291	960		166	(1) Rojo de	2
H2	291		960	166	nematita	2
L1	291	960		166	(2) Amarillo	2
L2	291		960	166	de limonita	2
L3	291		960	166	(3) Amarillo	2
L4	291		960	166	de limonita	2
LC1	291	960		166	(4) Rojo de	2
LC2	291		960	166	limonita	2
LC3	291	960		166	(5) Rojo de	2
LC4	291		960	166	limonita	2
M1	291	960		166	(6) Negro d	2
M2	291		960	166	magnetita	2
M3	291	960		166	(7) Negro d	2
M4	291		960	166	magnetita	2

(1) Pigmento con un 80% porcentaje de peso pasante de 9.4 micras

(2) Pigmento con un 80% PPP de 15.2 micras

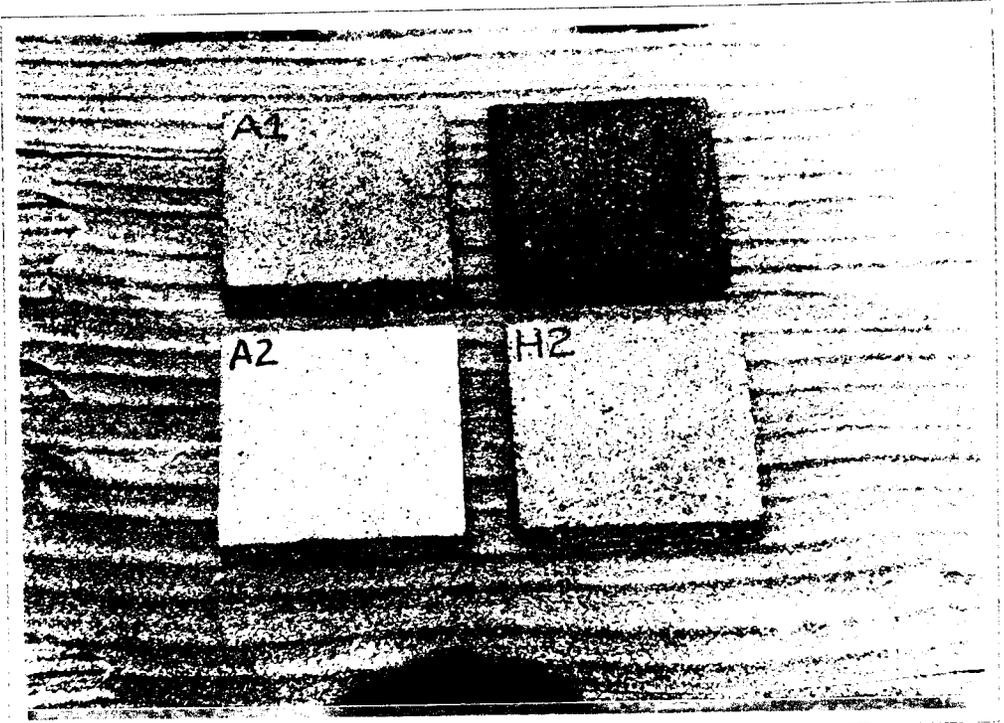
(3) Pigmento con un 80% PPP de 8.4 micras

(4) Pigmento con un 80% PPP de 4.4 micras

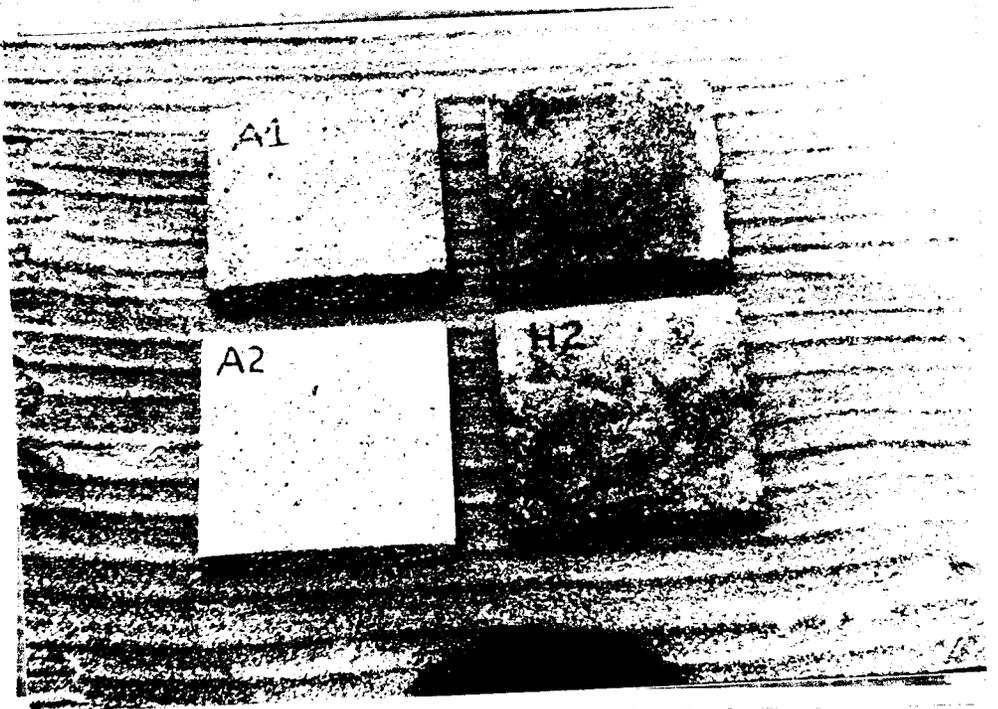
(5) Pigmento con un 80% PPP de 4.0 micras

(6) Pigmento con un 80% PPP de 19.5 micras

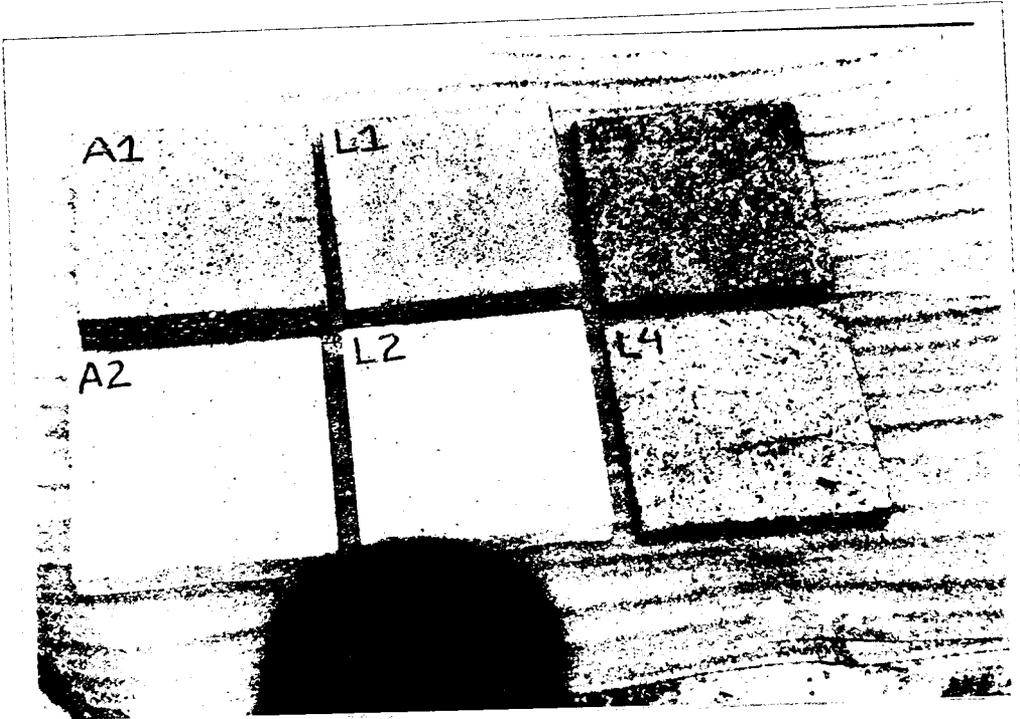
(7) Pigmento con un 80% PPP de 12.1 micras



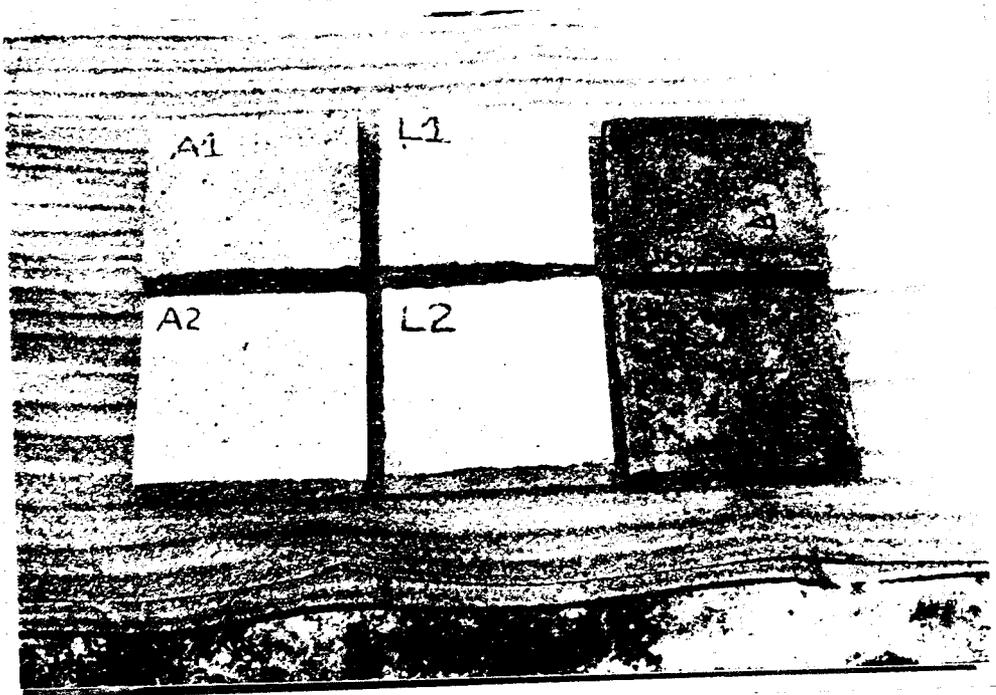
Fotografía 1. Las probetas H están pigmentadas con polvo de hematita. Las probetas A no están pigmentadas.



Fotografía 2. Se muestra el color de las probetas mezcladas. El color de las probetas mezcladas es el mismo que el de las probetas A.



Faint, illegible text located below the first image, possibly bleed-through from the reverse side of the page.



Faint, illegible text located below the second image, possibly bleed-through from the reverse side of the page.

En las fotografías 5 y 6 se presentan las probetas LC coloreadas con pigmento rojo de limonita, comparadas con las probetas A sin pigmentar.

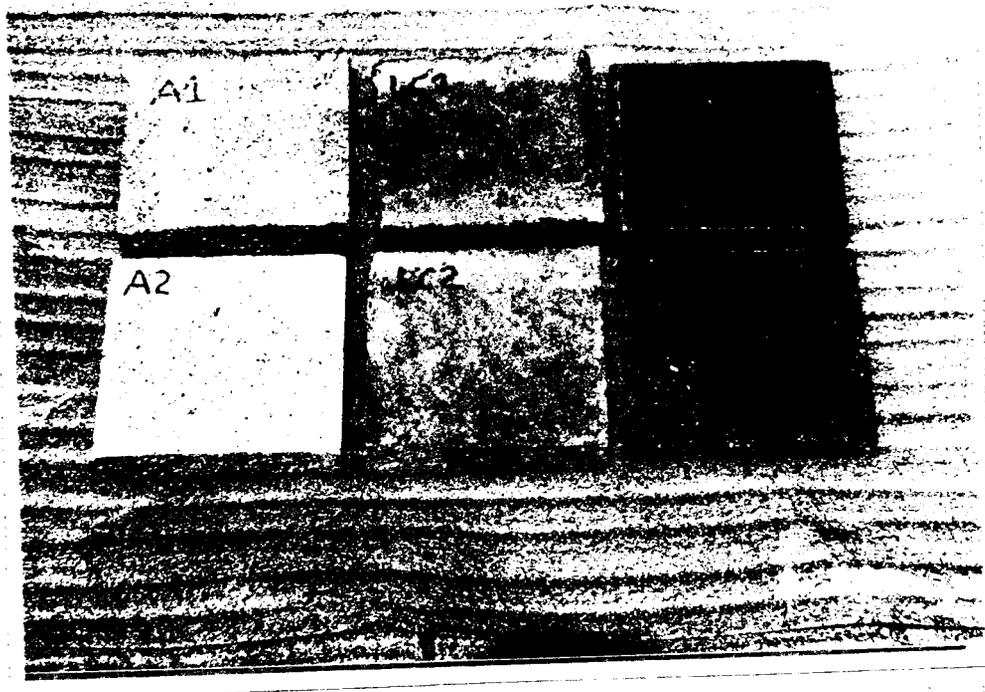
La fotografía 5 muestra un lado de las probetas, mientras que la fotografía 6 presenta el otro lado de las mismas. En primer lugar se observa el contraste de color de las probetas pigmentadas con las que no lo son. En segundo lugar se aprecia que las probetas LC3 y LC4 son más oscuras que las LC1 y LC2. Esto es debido a que en las primeras se utilizó el pigmento más fino (80% porcentaje de peso pasante 3 μm)

En la fotografía 6 se observa que las probetas A1, LC1 y LC3 son más oscuras comparadas respectivamente a la A2, LC2 y LC4. Esto se debe a que en las primeras se usó el agregado oscuro (arena basáltica), mientras que en las últimas se utilizó un agregado claro (arena de trituración de caliza). También se muestran perfiles transversales de las probetas LC3 y LC4.

5.3.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON LAS PROBETAS PARA EL PIGMENTO NEGRO DE MAGNETITA.



Fotografía 5. Las probetas de esta muestra se encuentran en un rango de humedad, mientras que las probetas de la muestra:



Fotografía 6. Se presenta el lado no expuesto de las probetas mostradas arriba.

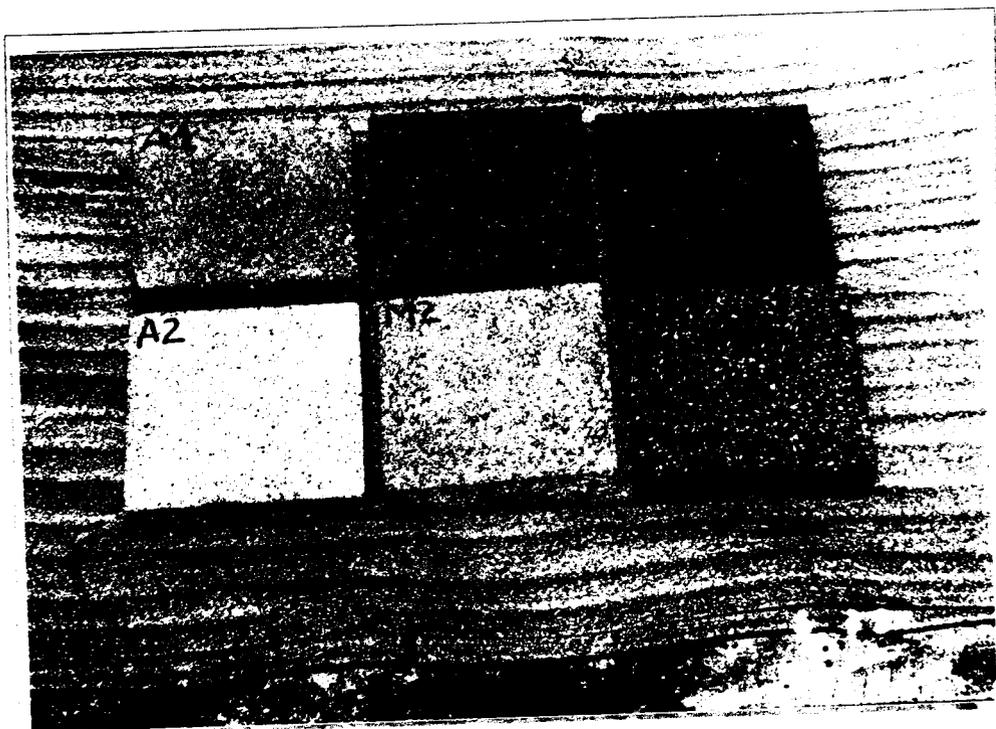
En las fotografías 7 y 8 se presentan las probetas M coloreadas con pigmento negro de magnetita, comparadas con las probetas A sin pigmentar.

En la fotografía 7 se muestra un lado de las probetas, mientras que en la 8 se puede ver el otro lado de las mismas.

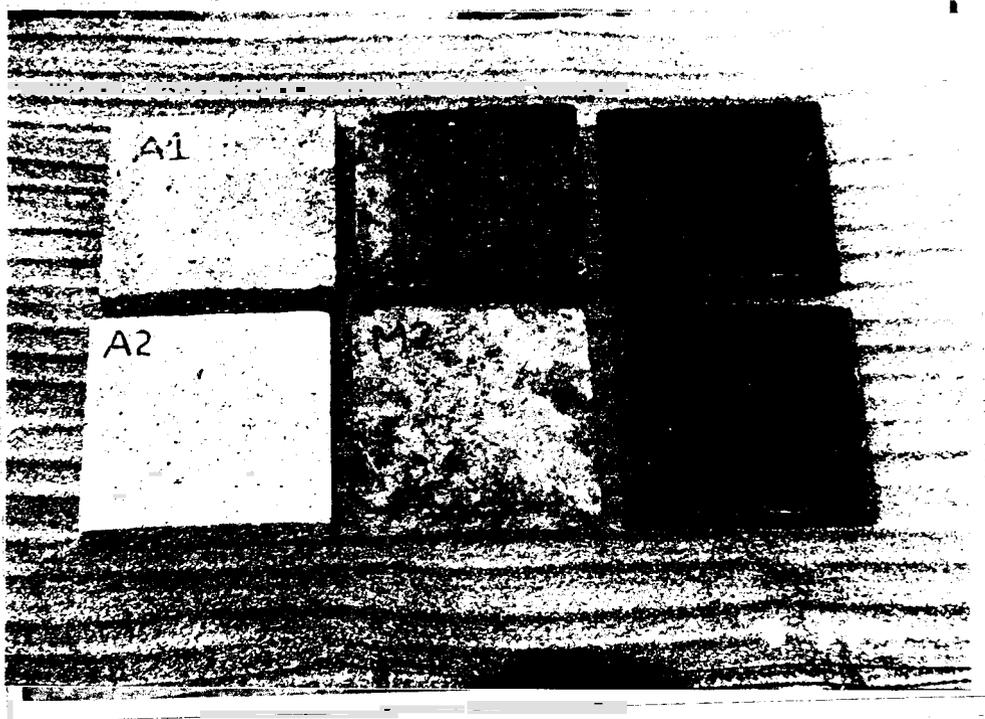
En primer lugar se observa que entre las probetas A y las M1 y M2 hay un ligero contraste de color, mientras que entre las probetas A y las M3 y M4 el contraste de color es notorio.

En segundo lugar se observa que las probetas M3 y M4 son más negras que las probetas M1 y M2; esto se debe a que en las primeras se utilizó el pigmento de granulometría más fina (80% porcentaje de peso pasante 12.1 μm).

En la fotografía 7 se observa un ligero contraste de las probetas M1, y M3 con las probetas M2 y M4, lo cual se debe a que en las primeras se utilizó el agregado obscurc. Además se puede observar que M3 y M4 son perfiles transversales probetas.



Fotografía 7. Se muestran las probetas M y A2 en sus respectivos lugares de ubicación, dentro del material de prueba.



Fotografía 8. Se presenta el lugar de ubicación de las probetas mostradas arriba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

i.-Los colores de **las** probetas de hormigón integralmente coloreado son satisfactorios.

2.-La intensidad de los colores de las probetas aumenta con la finura del pigmento y con el uso de agregados oscuros.

3.-El pigmento de menor finura obtenido fue el rojo de limonita calcinada con un 80% porcentaje de peso pasante de 4.0 μm . Las probetas realizadas con este pigmento fueron de color **muy** satisfactorio, lo cual implica que se pueden mejorar los colores de las probetas elaboradas con los otros pigmentos.

4.-Se recomienda procesar todos los pigmentos en una sola planta que estaría ubicada en la ciudad de Guayaquil, para lo cual las materias primas serían transportadas **desde** sus fuentes. La **fase** de trituración sería común para la hematita y la limonita. La magnetita tendría su propia **fase** de concentración, mientras que la fase de molienda

sería común para los tres minerales.

5.-Se recomienda asegurarse de tener las suficientes reservas de los minerales que se han utilizado. Por el lado de las magnetitas y la hematita se tiene la certeza de tener garantizado el abastecimiento, no así la limonita de Chunchi para lo cual habría que emprender un programa de exploración.

6.-Se recomienda hacer una evaluación del mercado interno para determinar el volumen de producción necesario.

BIBLIOGRAFIA

- 1.-AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of Concrete Practice. Part I. 1991.
- 2.-AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of Concrete Practice. Part III. 1993.
- 3.-ACI SEMINARS, Course Manual SCM - 23, "How effectively use the newest admixtures, por Arnold Phillips". 1990.
- 4.-**BARBONE** PIERPAOLO. Instructivo para el trabajo en el laboratorio de Mineralurgia. (ESPOL)
- 5.-CAMACHO WALTER. Minas de "Los Lojas". Informe. 1972.
- 6.-CAMPOZANO MARIA. Concentración de Oro por separación magnética por vía seca de **los** concentrados del río Paute. (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de **la** Tierra, **ESPOL**, 1991). **pp.** 31-67.
- 7.-CANADIAN PORTLAND CEMENT ASOCIATION. Design and Control of Concrete Admixtures. 1991.

8.-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.

9.-CORNELIUS S. HURLBUT. Manual de Mineralogía de Dana. (2da Edición: Editorial Reverté, 1974). pp. 134-150, 219-231, 346-347, 336-338, 320-323.

10.-CORONEL J., Notas de Mecánica de suelos. Manual de Laboratorio (ESPOL).

11.-CHAPARRO MEDINA, "Concretos y morteros coloreados", Revista Técnica y de la Construcción Colombiana (NOTICRETO), No. 20 (1991). pp. 31-33.

12.-HODSON & KUSHER, "Ingredients, Texture, and Integrally-Colored Concrete", Revista del ACI (CONCRETE INTERNATIONAL), (Sep. 1992). pp. 21-25.

13.-INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Concreto Arquitectónico. (Noriega-Limusa. 1990).

14.-INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Concreto Arquitectónico Colado en Obra. (ACI 303. 1992).

15.-KEEHN ROD. "Mortero de Color", Revista Construcción y Tecnología; Vol. V, No 50 (Jul. 1992). pp. 18-22.

16.-KELLY, SPOTTISWOOD. "Introducción al Procesamiento de

Minerales". (Noriega Editores). pp. 151-186,303-311.

17.-KIRK, OTHMER, SOOTH Y STANDEN. Enciclopedia de Tecnología Química. Tomo XII. (1era Edición; México: Unión Tipográfica Editorial Hispanoamericana, 1962). pp. 181-263.

18.-LABHAN OTTO. Prontuario del Cemento. (Segunda edición; Barcelona; Ediciones Palestra, 1959). pp. 162-189.

19.-MAQUIZACA & RAMOS. Modelo Minero Ecuatoriano. (Documento de trabajo, Dirección General de Geología y Minas, 1982).

20.-MINERAL PROCESSING PLANT DESIGN SYMPOSIUM, Nueva York, 1978. "Rod and ball mills, por Mular y Norman", The Selection of Cyclone classifiers, pumps and pump boxes for grinding circuits, por Rowland y Kjos". (Nueva York, Society of Mining Engineers, 1978). pp. 239-278, 374-403.

21.-PEREZ JOSE. "Estética y propiedades del hormigón de color", Revista del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (CEMENTO-HORMIGON), No. 722 (Ago. 1993). pp. 897-920.

22.-PIMENTEL DIEGO. Estudio Mineralúrgico para la recuperación de estibina. Yacimiento Loma Larga. (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL,

1990). pp. 20-132.

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

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

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

26.-TEMPLETON & PEEBLES. Iron Oxide Pigments in 1991. (Washington, DC: U.S. Department of the Interior - Bureau of Mines, Septiembre 1992).

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