



República de Cuba  
Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero - Metalúrgico  
Facultad Metalurgia – Electromecánica  
Especialidad Metalurgia

## *Trabajo de Diploma*

**TÍTULO:** *Influencia del régimen de operaciones en el proceso de molienda de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara.*

*Autores: Boris Suárez Galindo.*

*Yulio Feria Tamayo.*

**“Año del 45 Aniversario del Triunfo de la Revolución ”**

**MOA – 2004**

*“Sobre la Tierra no hay más que un poder definido: La  
inteligencia Humana, fundada en la volunta y templada por la  
conciencia”.*

*Ernesto Che Guevara.*

# *Dedicatorias*

**A mis padres que con su Esfuerzo, Amor y Dedicación han contribuido al desarrollo de mi formación.**

**A mi hermana.**

**A mis abuelos.**

**A la Revolución Cubana.**

**B. Suárez Galindo.**

**A toda mi familia por apoyarme en todo momento.**

**A mis padres por tener paciencia y ayudarme siempre.**

**A mi hermana .**

**A la revolución cubana por darme la oportunidad de formarme como profesional.**

**Y. Feria Tamayo.**

# *Agradecimientos*

Reciban nuestro sincero agradecimiento, el colectivo de profesores del ISMM los cuales contribuyeron a nuestra formación como profesionales, a nuestro tutor por ser el motor impulsor de esta tesis, en fin a todas aquellas personas que de una forma u otra aportaron su granito de arena para la realización de este trabajo.

A todos los compañeros de aula.

Al Ing. Carlos Remón Fernández.

Además a la Revolución Cubana que ha permitido que jóvenes como nosotros seamos hoy los ingenieros del mañana.

A todos muchas gracias...



## **Resumen.**

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos de un estudio realizado en la planta de preparación de minerales (sección de molienda), para determinar como influyen el régimen dinámico y la operación del clasificador sobre los indicadores tecnológicos de este proceso, para esto se hizo un análisis variando el flujo de aire y el ángulo de separación de las paletas del clasificador logrando así varias combinaciones, permitiéndonos conocer, para el material que se estaba utilizando, el régimen de trabajo más favorable.

## **Summary.**

In this work the obtained results of a study are exposed carried out in the plant of preparation of minerals (mill section), to determine like they influence the dynamic régime and the operation of the classifier on the technological indicators of this process, for this an analysis was made varying the flow of air and the angle of separation of the yokels of the classifier achieving this way several combinations, allowing us to know, for the material that was using, the régime of more favorable work.

## Índice.

| Contenido                                                                                                                                       | pág |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPITULO I Introducción.                                                                                                                        | 1   |
| 1.1 Introducción.                                                                                                                               | 1   |
| 1.2 Análisis bibliográfico.                                                                                                                     | 2   |
| 1.3 Problema de la investigación.                                                                                                               | 3   |
| 1.4 Hipótesis del trabajo.                                                                                                                      | 3   |
| 1.5 Objetivo.                                                                                                                                   | 3   |
| 1.6 Tareas para alcanzar el objetivo.                                                                                                           | 4   |
| 1.7 Fundamentos teóricos.                                                                                                                       | 4   |
| CAPITULO II Materiales y Métodos.                                                                                                               | 19  |
| 2.1 Diseño de la investigación.                                                                                                                 | 19  |
| 2.2 Materiales y equipos.                                                                                                                       | 19  |
| 2.3 Técnica experimental.                                                                                                                       | 35  |
| CAPITULO III Resultados y discusión.                                                                                                            | 38  |
| 3.1 Comportamiento del sistema con un flujo alto de aire hacia el molino y un grado alto de inclinación de las paletas del clasificador.        | 38  |
| 3.1.1 Caracterización del mineral de entrada al molino.                                                                                         | 38  |
| 3.1.2. Caracterización del mineral a la salida del molino.                                                                                      | 41  |
| 3.1.3. Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).                                                       | 42  |
| 3.1.4. Caracterización del producto.                                                                                                            | 44  |
| 3.1.5. Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador.                                                                                 | 46  |
| 3.1.6. Cálculo de la carga circulante.                                                                                                          | 48  |
| 3.1.7. Balances de masa y de clase.                                                                                                             | 48  |
| 3.2. Comportamiento del sistema con un flujo alto de aire hacia el molino, con un ángulo mínimo de inclinación de las paletas del clasificador. | 49  |
| 3.2.1. Caracterización del mineral de entrada al molino.                                                                                        | 49  |
| 3.2.2. Caracterización del mineral a la salida del molino.                                                                                      | 52  |
| 3.2.3. Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).                                                       | 53  |
| 3.2.4. Caracterización del producto.                                                                                                            | 55  |
| 3.2.5. Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador.                                                                                 | 57  |
| 3.2.6. Cálculo de la carga circulante.                                                                                                          | 59  |
| 3.2.7. Balances de masa y de clase.                                                                                                             | 59  |
| 3.3. Comportamiento del sistema con un flujo bajo de aire hacia el molino y el mayor ángulo de inclinación de las paletas del clasificador.     | 60  |
| 3.3.1. Caracterización del mineral de entrada al molino.                                                                                        | 61  |
| 3.3.2. Caracterización del mineral a la salida del molino.                                                                                      | 63  |
| 3.3.3. Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).                                                       | 64  |
| 3.3.4. Caracterización del producto.                                                                                                            | 66  |
| 3.3.5. Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador.                                                                                 | 68  |

| Contenido                                                                                                                                          | pág |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.6. Cálculo de la carga circulante.                                                                                                             | 70  |
| 3.3.7. Balances de masa y de clase.                                                                                                                | 70  |
| 3.4 .- Comportamiento del sistema con un flujo bajo de aire hacia el molino, con un ángulo mínimo de inclinación de las paletas del clasificador . | 71  |
| 3.4.1. Caracterización del mineral de entrada al molino.                                                                                           | 71  |
| 3.4.2. Caracterización del mineral a la salida del molino.                                                                                         | 74  |
| 3.4.3. Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).                                                          | 75  |
| 3.4.4. Caracterización del producto.                                                                                                               | 77  |
| 3.4.5. Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador.                                                                                    | 79  |
| 3.4.6. Cálculo de la carga circulante.                                                                                                             | 81  |
| 3.4.7. Balances de masa y de clase.                                                                                                                | 81  |
| 3.5. Análisis de los resultados.                                                                                                                   | 82  |
| 3.6. Valoración económica.                                                                                                                         | 84  |
| 3.7. Conclusiones del capítulo.                                                                                                                    | 84  |
| Conclusiones.                                                                                                                                      | 85  |
| Recomendaciones.                                                                                                                                   | 86  |
| Bibliografía.                                                                                                                                      | 87  |
| Anexos.                                                                                                                                            | 88  |

## Capítulo I





## I.- Introducción

### 1.1 Introducción:

La Empresa "Cmde Ernesto Che Guevara" dedicada a la explotación de la Laterita con el fin de extraer los minerales de Níquel y Cobalto, esta dividida en una serie de plantas en las que se encuentra la de Preparación del Mineral, donde dedicamos especial atención a la sección de molienda.

Esta empresa es la mayor productora de níquel de nuestro país y ha incrementado su capacidad en los últimos años, actualmente se encuentra trabajando por encima de la capacidad de diseño, brindando grandes aportes a nuestra economía, pero al mismo tiempo representa una de las principales fuentes consumidoras de energía eléctrica, de ahí que no han sido pocos los esfuerzos que se realizan en aras de disminuir los costos de producción mediante la búsqueda de tecnologías más eficientes sin grandes inversiones de capital.

Los procesos de reducción de tamaño vienen a constituir generalmente un 45 % del costo general del proceso de obtención del mineral útil. Cuando se realiza una reducción de tamaño, es con la finalidad de liberar ciertas partículas valiosas y darles el tamaño adecuado para su proceso posterior.

Dentro de la gran diversidad de equipos empleados en la industria minero – metalúrgica, los molinos de bolas constituyen uno de los mayores consumidores de energía eléctrica en comparación con los demás equipos que se emplean en una planta determinada, por ello cuando se emplea el método de cálculo experimental para la determinación de los consumos específicos y de las normas en las industrias de esta rama, los molinos de bolas constituyen uno de los primeros equipos que deben estudiarse, por cuanto constituyen fuentes de consumos irracionales de energía eléctrica.

El estudio fue realizado en esta sección, ya que desde el punto de vista energético los principales equipos de la unidad son los molinos de bolas, accionados por motores sincrónicos y los ventiladores de recirculación accionados por motores asincrónicos, los cuales cumplen las funciones de extraer el mineral molido y de reincorporarlo al mismo molino después de salir del separador neumático para obtener la granulometría deseada.



## 1.2.- Análisis bibliográfico:

A continuación se realiza un análisis bibliográfico de las principales fuentes consultadas.

Artículo 1: “Productividad y eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico”.

En el trabajo se analiza la influencia del grado de llenado con bolas del molino, sobre la productividad y la estrecha relación de esta última con la eficiencia energética del proceso. Se demuestra la existencia de reservas energéticas en el proceso. Se detectan las principales causas del fenómeno que son: irregular alimentación al molino creando ausencias ocasionales de mineral dentro del sistema o baja productividad, pero a pesar de la profundidad con que son tratados los temas de dicha obra tampoco obtiene una forma concreta de resolver el problema.

Artículo 2: “Consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda de la laterita.”

En este trabajo se realiza un análisis sobre los principales factores que determinan el consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda de la laterita, en la empresa Cdte. “Ernesto Che Guevara”. Se demuestra la existencia de reservas energéticas en el sistema que permiten lograr ahorros ascendentes a 11500 USD anuales y se propone un modelo para la simulación matemática del proceso capaz de resolver las causas de la pérdida de energía, pero a pesar de la profundidad con que son tratados los temas de dicha obra no lo desarrolla.

Artículo 3: “Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales”.

En esta obra se brindan los aspectos teóricos fundamentales acerca de las tres operaciones básicas en los procesos de preparación de minerales que son cribados, trituración y molienda.

En ella aparecen:

- Metodologías para el cálculo de molinos, trituradoras, etc.
- Procedimientos para el análisis de tamices tanto por vía húmeda como por vía seca.
- Formas de expresar en tablas las características del tamaño de un material en %, y en % en peso acumulativo según ( $\pm$ ), así como su representación gráfica lineal, semilogarítmica y logarítmica.



Este libro aunque es sumamente importante para la realización de las prácticas en el laboratorio, pero a pesar de la profundidad con que son tratados los temas de dicha obra no hace referencia alguna acerca del mineral laterítico.

Artículo 4: “Análisis granulométrico y magnético de las lateritas de balance”.

En este trabajo se realizó un estudio de la laterita de balance desde el punto de vista granulométrico y magnético; pero a pesar de la profundidad con que son tratados los temas de dicha obra, al igual que la bibliografía anterior, no se analizan otros materiales que integran el mineral laterítico.

### **1.3.- Problema de la investigación:**

La no existencia de un sistema de control automático que regule el flujo de aire a través del aire del molino, para el barrido del mineral y que regule también el ángulo de las paleta del clasificador, trae como consecuencia que estas dos operaciones no se ajusten adecuadamente en dependencia de las características del mineral que se procesa, y esto se refleja en un alto consumo específico de energía durante el proceso de molienda.

### **1.4.- Hipótesis:**

Si se investiga el comportamiento del proceso de molienda bajo variaciones del régimen dinámico y del ángulo de las paleta del clasificado en una unidad de molienda es posible establecer los regímenes de operaciones mas favorables de la unidad, para lograr resultados en los indicadores energéticos lógicos del proceso.

### **1.5.- Objetivo del trabajo:**

Determinar la influencia que tienen el régimen dinámico y la operación del clasificador sobre los indicadores tecnológicos del proceso de molienda en la empresa comandante Ernesto Che Guevara.





### 1.6.- Tareas para alcanzar el objetivo:

1. Investigación bibliográfica.
2. Estudio sobre el comportamiento actual del proceso de molienda en la empresa Ernesto Che Guevara.
3. Desarrollo del trabajo experimental en una de las unidades de la molienda, toma de muestras en diferentes puntos del sistema bajo diferentes valores del flujo de aire a través del molino y del ángulo de inclinación de las paletas del separador.
4. Análisis granulométrico de las muestras tomadas en el sistema industrial.
5. Proceso y análisis de los resultados.

### 1.7.- Fundamento teórico:

Flujo tecnológico de la planta de Preparación de Mineral

En la Planta de Preparación de Mineral es donde se inicia el proceso productivo de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniacal.

El mineral procedente de la Planta de trituración primaria puede ser suministrado a la Planta de Preparación de Mineral por dos vías.

1. A través de grúas gantry.
2. Directamente por los transportadores de enlace (No.14) ó (15).

Una vez descargado el mineral en galería es remontado y alimentado por las grúas gantry (215-GR-5, A, B, C) Estas remontan el mineral y lo homogeneizan en el depósito exterior que posee una capacidad de 360 000 t húmedos (360000000 kg) ó 28 días de trabajo de la Planta.

Estas grúas poseen dos capacidades de trabajo que son: 660 t/h (183.333 kg/s) al remontar y 690 t/h (191.666kg/s) al alimentar a las correas.

El mineral suministrado por las grúas o el transportador No. 14 ó 15 es descargado en los transportadores 215 TR-5-5A 215-TR6-6A cuyas capacidades son 750 t/h (208.333kg/s) cada uno.





El paso del mineral desde las grúas hacia los transportadores 5 y 5A, 6 y 6A se realiza a través de un alimentador que se mueve solidario con las grúas 215- AL -2 A, B, C y que posee para este trabajo ( de alimentación) un transportador 215-TR- 8 AB, C y de capacidad 750 t/h (208.333kg/s).

Los transportadores 5 Y 5A, 6 Y 6A alimentan a los transportadores 215 TR-7 y 7A las que se encargan de llevar el mineral homogeneizado hasta el edificio de los secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h (208.333kg/s) y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores 215-TR8 y 8A que tiene cómo función la de alimentar a los secaderos y al deposito de mineral interior o de emergencia.

La alimentación a los secaderos se realiza a través de unos desviadores que se encuentran justamente sobre las tolvas de los secaderos. La alimentación al deposito interior se realiza de la misma forma, o sea, mediante desviadores de mineral que se encuentran situados sobre tres correas colocadas entre los secaderos 2 y 3, 4 y 5 y al final del edificio. Estos transportadores 215- TR-10-1,10-2,10-3 poseen capacidad 750t/h (208.333kg/s).

El mineral almacenado en el deposito interior que se usará cuando por cualquier tipo de avería surgida en el proceso antes de los secaderos, se interrumpa el suministro de la materia prima a esta sección. La capacidad de este almacén posibilita a la planta trabajar durante 4 días.

Este depósito posee para la manipulación del material, 2 grúas de puente 215- GRL-101 A y B de capacidad igual a 350 t/h (97.222kg/s) cada una. Se encargan de alimentar a los secaderos en los casos que se explicaron en el párrafo anterior. El mineral llegará a los secaderos 215-SC-101-107 pasando a través de alimentadores de esteras 215-AL-101-107 de capacidad variable 70, 105, 125 t/h y los transportadores de bandas 215-TR-9-1 9-7 de capacidades igual a 125 t/h (3.472 kg/s) cada uno.

El tambor secador posee una longitud igual a 4800 mm y un diámetro 4500 mm. El mineral al entrar al secadero lo hará con una humedad aproximadamente igual a 36 % y saldrá del mismo con 4.5 % según esta establecido.

Para lograr esto cada secadero posee una cámara de combustión 21-CC-101-107 dotada de un quemador de petróleo. Se suministra aire de combustión, aire de pulverización, aire secundario o gases procedente de la planta de hornos.



Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan una temperatura de 1500 °C y bajan hasta 800-850 °C al ponerse en contacto con el aire el exceso que se suministra y que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral.

Con esta última temperatura es con la que entran los gases al tambor secador. La de los gases al tambor secador se realiza en dirección a corriente con el mineral alimentado de forma que, ese contacto gases calientes – mineral permita que este último se vaya secando y se obtenga al final del secadero un producto con las características adecuadas. Los gases al salir del secadero tendrán una temperatura de 80-100 °C.

Los gases calientes pueden atravesar el secadero debido a la succión que crea un ventilador 215-VE-108 - 114, de tiro situado a la salida del electrofiltro que posee cada secadero individualmente.

Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos el 28 % del polvo, que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado y que por lo general poseen una granulometría – 0,074 mm el que será introducido al sistema de colección.

El mineral después de secado, es descargado en las correas 215-TR-11 y 11A. Estas correas son denominadas comúnmente correas calientes debido a que son las primeras que hacen contacto con el mineral caliente que sale de los secaderos. La capacidad es de 490 t/h (136.111 kg/s).

En estas correas se encuentran instaladas las romanas encargadas del pesaje del mineral seco.

Este mineral secado es llevado (descargado) en las correas 215-TR12 Y 12A que son la vía de unión entre los secaderos y los molinos. Estas correas transportadoras poseen una capacidad de 490 t/h (136.111 kg/s) cada una y descargan su contenido en 4 tolvas (una para cada molino) 215-TV-201.204 mediante desviadores de mineral colocados sobre las correas y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Sobre estas correas se encuentran montado un sistema de adición de petróleo aditivo en forma de ducha que se mezclara conjuntamente con el mineral de forma dosificada mediante un sistema automático que regulara la relación petróleo – mineral instalada en la misma área, siendo utilizado como agente reductor en la Planta de Horno de Reducción.



Desde cada tolva el mineral llegará a los molinos en forma dosificada y este trabajo corresponde hacerlo a los alimentadores de disco 215 AL 201 A Y B 215 AL 204 A Y B que poseen cada tolva y que pueden entregar 55-120 t/h (15.277-3.333 kg/s) a las correas 215-TR -13-1...13-4 las que descargan el mineral en el molino de bolas 215. ML -201... 204, la capacidad de esta correa es de 160 t/h (44.44 kg/s).

De esta forma el mineral llega al molino de bolas cuya capacidad es de 120 t/h (33.333 kg/s) y tiene como dimensiones 5 700 mm de longitud y 3 200 mm de diámetro.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 Ton, siendo sus dimensiones (de las bolas).

100 mm - 10 % 5.5 t (5500 kg)

70 mm - 10 % 5.5 t (5500 kg)

60 mm - 15 % 8.0 t (8000 kg)

40 mm - 25 % 13.5 t (13500 kg)

32 mm - 40 % 21.5 t (21500 kg)

54 t (54000 kg)

El producto que el molino debe entregar tendrá una humedad de 4,5 -5,5 % y una granulometría de 85 -87 % de - 0,074 mm.

Todo lo que entra al molino saldrá del mismo mediante barrido con aire, que es producido por un ventilador de recirculación 215-VE-205.208 de 134 000 m<sup>3</sup>/h (3.722 m<sup>3</sup>/s de capacidad situado a la descarga del molino y cerrando un circuito que esta formado por el molino, 1 separador 215 - SÉ-201. 204 4 ciclones 215-CN-201 104 A, B, C y de 2 baterías de 6 ciclones 215-CN-205.210 A, B, C, D, E, F. Con este ventilador se barre el mineral molido y se succiona este doble efecto propicia la obtención del mineral molido.

El mineral barrido y succionado es introducido en un separador neumático de diámetro 4 250 mm donde sufre una clasificación de forma que, el que tenga características de producto final pasará al sistema de colección primaria (a los ciclones) y el que no posea estas características pasará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada.





Este equipo puede realizar este trabajo a merced de dampers que posee y que son regulados para obtener la granulometría del mineral que se quiera.

El sistema de colección primaria formada por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final 215-TV-205 A y B. Lo que no se recoge en los ciclones y que es por lo general, un mineral con granulometría  $-0,044$  mm pasará por un sistema de limpieza de gases electrostáticos o electrofiltros donde se captura la casi totalidad del polvo que entra en él. .

De igual forma, todo el polvo recogido es enviado hacia las tolvas de producto final mediante el empleo de bombas en vacío 215-BO-201 A, B, C, D, E Y F de 50 t/h (13.888 kg/s) de capacidad todo el mineral molido es transportado hacia los silos del mineral del taller de hornos de reducción mediante el empleo de bombas neumáticas 215 – BO-107 a 112 colocadas en la descarga de las tolvas.

#### Representación del comportamiento de los clasificadores:

Se conocen a niveles de representación del comportamiento de los clasificadores:

1. Solamente se considera la masa total del flujo grueso (o del fino) con relación a la masa de la alimentación, resultando el término Yield. Esta es la forma más cruda de cálculo.
2. Se incluyen las distribuciones de tamaño de la alimentación, al grueso y el fino, conduciendo al término recovery (recubrimiento).
3. Se realiza una medición con una extensión tal que las partículas del grueso aparecen en el fino y viceversa. Esta es la representación más útil del comportamiento del clasificador, que resulta en la función de selectividad y en la función de clasificador. Aquí están implicados dos importantes conceptos, los cuales deben ser calculados, ellos son
  - a) El módulo de tamaño o el tamaño de corte para el cual ocurre la separación.
  - b) El módulo de distribución, o agudeza del corte, el cual es una medida de la dispersión alrededor del tamaño del corte.



4. Previsión de los errores estocástico, que son inherentes en las mediciones prácticas.

Yield es simplemente la relación entre la masa  $M_g$  de la fracción gruesa y la masa  $M_o$  de la alimentación

$$\Psi = \frac{M_c}{M_o} = 1 - \frac{M_f}{M_o} \quad (1)$$

algunos autores le denominan eficiencia total  
la masa de partículas del tamaño  $x$  en las fracciones de la alimentación, el grueso y el fino son respectivamente:

$$M_o \frac{d}{dx} F_o(x), M_c \frac{d}{dx} F_c(x) \text{ y } M_f \frac{d}{dx} F_f(x)$$

Del balance de masa tenemos:

$$M_o \frac{d}{dx} F_o(x) = M_c \frac{d}{dx} F_c(x) - M_f \frac{d}{dx} F_f(x) \quad (2)$$

Aplicando la ecuación (1) a la (2), tenemos:

$$\frac{d}{dx} F_o(x) = \Psi \frac{d}{dx} F_c(x) + (1 - \Psi) \frac{d}{dx} F_f(x)$$

la integración da:

$$F_o(x) = \Psi F_c(x) + (1 - \Psi) F_f(x) \quad (3)$$

Después del arreglo tenemos:

$$\Psi = \frac{F_o(x) - F_f(x)}{F_c(x) - F_f(x)} \quad (4)$$





La ecuación (4) brinda un método útil para obtener un valor medio de  $\Psi$  a parte de las distribuciones acumulativas de tamaño de la alimentación, del grueso y del fino.

La pendiente de la recta determina  $\Psi$  (Svarovsky, 1977).

#### Recovery (Recubrimiento)

El recubrimiento toma en cuenta la distribución de tamaño, hasta la extensión que es definida como:

$$\text{Masa del haz fino, con fineza mayor que } x = \frac{(1 - \Psi)Ff(x)}{Fo(x)}$$

Masa de la alimentación, más fina que  $x$

$$\text{Masa del haz grueso, con grosor mayor que } x = \frac{\Psi[1 - Fc(x)]}{1 - Fo(x)}$$

Masa de alimentación más fina que  $x$

Lo que caracteriza mejor el proceso de separación. Han sido desarrolladas otras expresiones más complejas (Leschonski 1981), pero la tendencia actual es hacia las funciones de selectividad y de clasificación como medidas del comportamiento mejores que los conceptos de recubrimiento.

#### Curva de clasificación (Tromp)

La ecuación 2 puede ser planteada para la distribución de densidad como:

$$Mo\ fo(x) = Mcfc(x) + MfFf(x)$$

Dividiendo por  $Mo$  obtenemos:

$$fo(x) = \Psi fc(x) + (1 - \Psi)Ff(x) \quad (5)$$

los tres términos de la ecuación 5 son denominados funciones de distribución de la densidad ponderada.

Para cualquier tamaño particular de una partícula así como  $x_1$ , la ordenada da la cantidad de ese tamaño en el flujo grueso, es decir  $\Psi fc(x_1)$ . De forma análoga la ordenada completa en  $x_1$  da la cantidad de ese tamaño en la alimentación denominado  $fo(x_1)$ .



La razón  $\Psi f_c(x_1)/f_o(x_1)$  da la fracción de alimentación de tamaño  $x_1$  que aparece en el flujo grueso. Cuando se obtiene esta razón para un rango de valores de  $x$  y plotados contra  $x$ , se obtiene la curva de clasificación.

Con frecuencia esta curva es llamada la curva del grado de eficiencia porque es el resumen de la partición del comportamiento de cada tamaño de molienda. También es conocida como el diagrama de Tromp(1937).

La representación matemática de la curva de clasificación, es la función de clasificación  $c(x)$ . entonces, de acuerdo a las definiciones anteriores, en términos de las distribuciones de densidades:

$$C(x) = \Psi f_c(x)/f_o(x) \quad (6)$$

O en términos de distribuciones acumulativas:

$$C(x) = \Psi \frac{d}{dx} F_c(x) / \frac{d}{dx} F_o(x)$$

$$C(x) = \Psi \frac{dF_c}{dF_o} \quad (7)$$

Características de la curva de clasificación:

1. límites de separación.
2. módulo de tamaño o tamaño de corte.
3. distribución del módulo o agudeza de corte.

Límites de separación:

El sufijo m lo usaremos para denotar mínimo y el M para denotar máximo.

En la curva de clasificación, se observa que por encima de  $x_m$ ,  $c(x)$  continua hasta hacerlo cero.

De forma análoga, para distribuciones de densidades la fig se indican los límites de separación para la fracción gruesa desde  $x_{cm}$  y para la fracción fina desde  $x_{fm}$  hasta  $x_{Fm}$ .



Módulo de tamaño o tamaño de corte:

En principio, cualquier valor de  $x$  en la región de solapamiento entre la separación del grueso y del fino, es decir entre  $x_{cm}$  y  $x_{fm}$ , en la fig. podría ser utilizado como el tamaño de corte. Sin embargo, se utilizan tres definiciones por lo general; (1) la equiprobabilidad del tamaño de la partición,  $d_{50}$ ; (2) el tamaño de corte analítico, desde la distribución de densidad,  $d_a$ ; y (3) un tamaño de corte a partir de consideraciones de la distribución acumulativa,  $d_p$ .

- (1) El tamaño de corte  $d_{50}$  corresponde al 50% de la alimentación que pasa hacia el flujo grueso. Es por eso ese tamaño que tiene igual probabilidad de pasar al grueso o al fino.
- (2) El tamaño de corte analítico  $d_a$ , es tal que los flujos de grueso y de fino contienen iguales cantidades de materiales intercambiados. Cuando no existen errores en las distribuciones, el siguiente análisis basado en Leschonski (1981) es bueno para  $d_a$ :

$$\text{Área I} = \Psi \int_{x_{cm}}^{d_a} f_c(x) dx = \Psi F_c(d_a) \quad (8)$$

$$\text{Área II} = \int_{d_a}^{x_{fm}} ((1 - \Psi) f_f(x)) dx$$

Utilizando la expresión (5), esto puede ser planteado como;

$$\text{Área II} = \int_{d_a}^{x_{fm}} (f_o(x) - \Psi f_c(x)) dx \quad (9)$$

Lo cual es representativo del área sombreada III. Entonces si el área I=área II, entonces cada una es igual al área III.

Integrando (9) e igualando al área, de (8), obtenemos:

$$\Psi F_c(d_a) = F_o(x_{fm}) - \Psi F_c(x_{fm}) \quad (10)$$

Módulo de distribución o agudeza de corte:

Para especificar la agudeza de corte, se necesita de una medida que se aplica al rango de solapamiento entre  $x_m$  y  $x_M$ .

Muchas medidas de esta índole han sido adoptadas como las resumidas por Leschonski (1981), pero tal vez, la más común es  $d_{25}/d_{75}$ , o si se va a acomodar una expansión mayor,  $d_{10}/d_{90}$ . En ambos casos, cuando más aguda es la separación. Para las curvas de clasificación  $\text{paso}(d_{90}-d_{10})/d_{50}$  puede ser apropiado.



En la modelación matemática de los clasificadores, Austin y Klimpel (1981) han preferido la siguiente:

$$1/c(x) = 1 + (x/d_{50})^{-\lambda} \quad (11)$$

donde  $\lambda$  es la pendiente de la curva de clasificación en  $d_{50}$ . De forma alternativa (Klimpel 1982), el exponente puede tomar la forma:

$$\lambda = K_1 / \ln(d_{25}/d_{75}) \quad (12)$$

donde  $K_1$  es una constante.

Curva de selectividad:

Aplicando la ecuación (3) obtenemos:

$$Fo(da) = (1 - \Psi) F_f(x_{fm})$$

O, puesto que  $F_f(x_{fm})$  tiene a la unidad ;

$$Fo(da) = (1 - \Psi) \quad (6)$$

Como  $\Psi$  es fácil de determinar, da es igualmente fácil de determinar como la abscisa en la ordenada  $(1 - \Psi)$ .

- (3) El tamaño de corte dp, es aquel para el cual la fracción acumulativa del haz grueso es igual a la fracción sobre tamaño del haz fino, dp es aún más sensitivo a la distribución de tamaño de la alimentación que da, pero ambos pueden ser derivados a partir de las distribuciones de tamaño sin tener primeramente que obtener la curva de clasificación, en esto radica su valor práctico, da y dp están próximos a  $d_{50}$  para pequeñas diferencias entre las áreas I y II, pero a medida que se incrementa la diferencia, entonces da y dp pueden alejarse de  $d_{50}$ .

(2) el efecto de la comunicación dentro del clasificador

(3) una caída brusca de la data para valores pequeños de x.

(4) el efecto del anzuelo.

Los gráficos que tienen en cuenta estas desviaciones se denominan curvas de selectividad, para distinguirlos de las curvas de clasificación. Algunos autores llaman a la curva de selectividad "curva real del grado de eficiencia" y a la curva de clasificación "la curva reducida del grado de eficiencia". La representación matemática de la curva de selectividad es la función de selectividad  $s(x)$ .





Efecto aparente de bypass.

Plitt(1971), en el contexto de la operación de un hidrociclón, analizó el líquido que es descargado con el producto grueso, el cual llena los intersticios entre partículas. En este líquido está una proporción compartida de todos los tamaños de las partículas, y por lo tanto una porción de cada fracción de tamaño evade la acción del clasificador (bypass). Otros autores catalogan este como flujo muerto.

Esto provoca que en las curvas de selectividad, el efecto asintótico se produce para la ordenada de valor  $\alpha$ . Lucic y Austin (1974) han expresado el efecto más general, considerando el parámetro  $\alpha$  como el que representa la llegada de partículas en el haz grueso independientemente de su tamaño.

Para tener en cuenta del efecto de bypass en el yield, ha sido definido un yield neto  $\psi$  (también llamada una eficiencia total reducida  $\Psi$ ) y expresado como:

$$\Psi = (\phi - \alpha) / (1 - \alpha)$$

Kelsall(1963) y Schonert(1969), entre otros, han demostrado que el parámetro de bypass  $\alpha$  varía con la razón de alimentación del clasificador, y por lo tanto es difícil describir una función simple de selectividad que sea representativa del clasificador. Sin embargo, Yoshiota y Hotta (1955) evidenciaron que cuando las funciones de selectividad que corresponden a diferentes condiciones de operación, son planteadas contra el parámetro normalizado  $x/d_{50}$ , el problema queda resuelto, porque todas las curvas adoptan una forma funcional común, dentro del scatter experimental.

El efecto de conminución dentro del clasificador:

Leschonski(1981) nota el efecto de cualquier conminución que puede ocurrir dentro del clasificador. Esto significa claramente que el haz grueso es más fino de lo que debería ser sin esta reducción de tamaño, y por lo tanto, en los tamaños más grandes separados existe una proporción menor que en el caso anterior. Esto provoca que la curva de selectividad sea asintótica a una ordenada  $(1-b')$ .

Luckie y Austin han expresado este parámetro de una forma más general, considerándolo como representante de la llegada de la partícula en el haz fino, independientemente de un tamaño.

Una ausencia de datos para los valores pequeños de  $x$ .



Una dificultad mas es representada en la fig 6; donde la curva de selectividad no llega lo suficiente hasta los tamaños mas pequeños de la partícula para poder determinar los valores de  $\bar{a}$ . Los intentos de extrapolación de la curva de selectividad no han sido exitoso y por eso Austin y Klimpel(1981) proponen un sistema de pruebas y error de calculo del parámetro  $\bar{a}$ , minimizando la diferencia entre los valores observados y calculados de la parte conocida de la curva de selectividad ,sobre la base de un trabajo teórico de Klimpel (1980).

#### Efecto anzuelo.

Es un rasgo de ciertos separadores mecánicos que poseen vanes rotatorios ,que el haz de las partículas finas procedente de la clasificación primaria es encontrado mediante un haz de aire recirculante que contiene partículas todavía mas finas bajo condiciones que permiten el recubrimiento de las partículas separadas mediante las partículas aun mas finas .Esta acción secundaria conduce a un patrón de anzuelo de la curva de selectividad.

Leschonski(1981) muestra un efecto similar en los clasificadores donde hay una dispersión incompleta de la alimentación a la entrada del clasificador ,o incluso en la zona de clasificación, donde agregados de la partículas finas pueden ser clasificados, como partículas gruesas, y así pasan al haz gruesos durante los análisis los agregados son dispersados ,el análisis detecta mas finos que el producido por el clasificador .Claramente la cura es mejor dispersión de la alimentación peor a la clasificación ;pero sin esta cura , Luckie y Austin(1975)han propuesto un modelo matemático con los clasificadores en serie , incluyendo la recirculación de fino, para manipular el análisis, teniendo las funciones de selectividad  $S_I(x)$  para la acción primaria y la  $S_{II}(x)$  para la acción secundaria .Entonces la función total de selectividad  $S(x)$ para el sistema esta dada por:

$$S_X = S_I(X) / [1 - [1 - S_I(X)] [1 - S_{II}(X)]]$$

#### Representación de la función de selectividad:

Para utilizar expresiones matemáticas conocidas para la función de clasificación  $c(x)$ , se requiere de una relación entre  $s(x)$  y  $c(x)$ . De acuerdo a Luckie y Austin (1974):

$$S(x) = (1 - a - b) c(x) + a \quad (14)$$



Svarovsky (1977) ha propuesto un método gráfico para hallar  $s(x)$  a partir de la distribución acumulativa de tamaño de dígitos, del fino y del grueso. Se aplica la ecuación (7) resultando:

$$S(x) = \Psi dF_c / dF_0 \quad (15)$$

Ahora el valor máximo de  $s(x)$ , es  $(1-b)$ , correspondiente a  $x \rightarrow \infty$ , dando:

$$dF_c / dF_0 = (1-b) / \Psi \quad (16)$$

de forma análoga, el valor mínimo de  $s(x)$  es  $a$ , correspondiente a  $x \rightarrow 0$ , dando:

$$dF_c / dF_0 = a / \Psi \quad (17)$$

entonces  $F_c$  es plotada contra  $F_0$  sobre un rango de valores de  $x$ .

### Régimen dinámico:

Los ventiladores centrífugos son equipos empleados para el trasiego de aire u otros gases industriales en aquellos casos en los cuales no se requiera elevar la presión del gas mas de 1,15 veces se emplean en los sistemas de alimentación de aire a los quemadores de los generadores de vapor, en los sistemas de extracción de gases productos de la combustión.

Los principales elementos que componen un ventilador centrífugos estos son: conducto de entrada ;impelente; alabes; voluta y conducta de descarga.

El primero es el encargado de conducir el gas desde el exterior del ventilador hacia el interior del impelente .Los parámetros que caracterizan este elementos son tres: Diámetro de entrada ,diámetro mínimo y longitud del conducto.

En el impelente como toda maquina centrífuga ocurre la entrega de energía del fluido que penetra en el ,estas están formada mordiscos delanteros y traseros, y los alabes que se encuentran fijos entre estos discos.

El parámetro característico de los impelentes de los ventiladores es su diámetro exterior, el cual se define por el borde de salida de los alabes , ya que existen ventiladores en los cuales este diámetro es menor que el diámetro exterior de los discos del impelentes.

Los alabes de los impelentes de los ventiladores centrífugos generalmente son curvos se caracterizan por un parámetro denominado densidad de la corona que se define como la relación entre la longitud del alabe y el paso o distancia media sobre la cuerda, entre dos alabes contiguos en el radio medio.





La voluta de un ventilador centrífugo tienen como función la recolección del flujo que sale del impelente y conducirlo en una dirección determinada, así como, convertir parte de la carga dinámica en presión.

La presión total se define como la suma de la presión estática más la dinámica

$$P_T = P_{T2} - P_{T1}$$

$P_{T1}$  = presión total a la entrada.

$P_{T2}$  = presión total a la salida.

La presión dinámica se calcula tomando como base la velocidad media en la sección de salida del ventilador.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho C_B^2$$

$Q$  = gasto ( $m^3/s$ )

$\rho$  = densidad del gas ( $Kg/m^3$ )

$C_B$  = velocidad media del ventilador ( $m/s$ )

El coeficiente adimensional de gasto se determina por la expresión:

$$\varphi = \frac{4Q}{\pi V_2^2 \varphi_2}$$

una vez seleccionado el coeficiente de gasto ( $\varphi$ ) el gasto estará dado a partir de la ecuación anterior.

$$Q = \varphi \frac{\pi V_2^2}{4} \varphi_2 = \frac{\pi^2}{240} \varphi V_2^3 n \text{ (m/s)}$$

El coeficiente de potencia ( $\lambda$ ) caracteriza la potencia consumida por el ventilador ( $N_e$ ) y se determina como:

$$\lambda = \frac{1000 N_e}{\frac{\rho}{2} A \varphi_2^3}$$

donde

$$A = \frac{\pi \rho_2^2}{4}$$





$\rho$ =densidad del flujo (Kg/m<sup>3</sup>)

$N_e$ =potencia del eje (Kw)

El rendimiento total es función de la presión total desarrollada por el ventilador se puede determinar en función de los demás coeficientes.

$$n = \frac{QP_T}{1000N_e} = \frac{\eta\phi}{\lambda}$$

El rendimiento estático se define en función de la presión estática, este parámetro resulta de utilidad en la evaluación de ventiladores a partir de la medición de las presiones estáticas en la succión y descargas de estos y se expresa como:

$$n = \frac{QP_A}{1000N_e}$$

$P_A$ = Presión estática (Pa)

$Q$ = gasto (m<sup>3</sup>/s)

La determinación del ventilador adecuado para instalar en un sistema dado, requiere primeramente que se determine las pérdidas hidráulicas que se producen en el sistema cuando circule el flujo deseado conociendo esto permitirá establecer la presión requerida en el ventilador. Se recomienda escoger un ventilador cuyo gasto sea 1,05 y la presión 1,1 en el caso de ventiladores empleados como sopladores se recomienda seleccionarlos para un gasto 1,10 y presiones de 1,20.

## Capítulo II



## II.-Materiales y métodos.

### 2.1.- Diseño de la investigación:

Luego de la formulación del problema y partiendo de la hipótesis de nuestro trabajo se propuso realizar un análisis bibliográfico sobre el tema que investigamos y luego a realizar las tareas que fueron propuestas a desarrollar.

1. Estudiar la instalación industrial.
2. Seleccionar los puntos para la toma de muestras.
3. Seleccionar y construir los dispositivos para la toma de muestras.
4. Seleccionar los niveles de los factores a considerar ( Flujo de aire y el ángulo de inclinación de las paletas del clasificador).
5. Toma de muestras en diferentes puntos del sistema.
6. Realización de un experimento factorial completo a partir de los resultados obtenidos con el análisis granulométrico.

### 2.2.- Materiales y equipos:

El material fundamental que se utiliza en esta planta es la laterita proveniente de la mina, cuenta con las siguientes características puestas a continuación

Laterita: se define como “Suelo rojo residual” que se desarrolla en regiones húmedas tropicales y subtropicales con buen drenaje. La sílice y el magnesio son lixiviados y contienen concentraciones, particularmente, de hidróxidos de hierro y aluminio. Puede representar una mena de hierro, aluminio, manganeso o níquel.

Limonita: se define como  $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  para referirse a los óxidos de hierro, naturalmente hidratados de identidad incierta (tabla 2.1).

Serpentina: se define como un mineral con una fórmula química definida  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  formador de rocas en dos variedades fundamentales Antigorita y Crisotilo (tabla 2.2).

Ambos minerales tanto la limonita como la serpentina son considerados minerales secundarios puesto que se formaron de minerales previamente existentes, mediante procesos en los que participa la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera.



Características generales del mineral :

La constitución del mineral laterítico se compone de una mezcla de limonita (de carácter terroso) y de serpentinas parcialmente descompuestas y duras.

La limonita aparece como tierra suelta o en terrones de color amarillo; por su parte el material serpentínico presenta toda la gama desde mineral terroso hasta fracciones de rocas duras de diversos tamaños.

Este mineral está acompañado de una humedad promedio de 38%, variando desde un 30 a un 40%. El peso volumétrico del mineral seco "in situ" es de  $1,20 \text{ t/m}^3$  y el del mineral húmedo "in situ" es de  $1,78 \text{ t/m}^3$ .

La dureza del mineral laterítico es otra de sus características, la misma varía a escala de Mohs, entre los rangos de 2-5, no es abrasivo, ni químicamente activo.

Composición mineralógica.

En la corteza de intemperismo del yacimiento se distingue, en general, una tonalidad mineralógica bien definida según los distintos horizontes.

Los horizontes lateríticos están compuestos básicamente por óxidos e hidróxidos de hierro: goletita, espinela (magnetita y cromoespinela), maghemita y hematites, los cuales representan de un 75 a un 85 % de estos horizontes.

Además están presentes en el material laterítico fases minerales de hidróxido de aluminio, gibbsita (con contenido variable de un 8 a un 15 %), en cantidades subordinadas minerales de manganeso (asbolanas), sílice ( en forma amorfa y cuarzo) y minerales del grupo de la serpentina (antigorita y lizardita).

Para las zonas serpentínicas, el panorama mineralógico es básicamente de silicatos de hierro y magnesio. Aquí predominan los minerales del grupo de la serpentina (antigorita y lizardita) que están en un 60 a un 85 %, cloritas y piroxeno (enstatita) y esmectitas, nepouita (más abundante en el horizonte de serpentinita alterada o lixiviada).





Tabla 2.1 Composición mineralógica de la limonita.

| Nº | Nombre         | Fórmula                                           | Contenido (%) |
|----|----------------|---------------------------------------------------|---------------|
| 1  | Goethita       | $\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$          | 67            |
| 2  | Hematita       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                           | 7             |
| 3  | Magnetita      | $\text{Fe}_3\text{O}_4$                           | 5             |
| 4  | Espinelas      | $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_4$     | 10            |
| 5  | Asbolanas      | $\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$          | 1             |
| 6  | Gibbsita       | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 7             |
| 7  | Aluminocromita | $\text{Fe}(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$             | 2             |
| 8  | Cuarzo         | $\text{SiO}_2$                                    | 1             |

Tabla 2.2 Composición mineralógica de la serpentina.

| Nº | Nombre     | Fórmula                                                                                        | Contenido (%) |
|----|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 1  | Clorita    | $\text{Mg}_4\text{Al}_2[(\text{Si,Al})_3(\text{SiO}_{10})](\text{OH})$                         | 5             |
| 2  | Galvasita  | $\text{Al}_4(\text{SiO}_{10})(\text{OH})_8$                                                    | 3             |
| 3  | Nontronita | $\text{Fe}_2(\text{Fe,Al})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ | 10            |
| 4  | Antigorita | $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$                                           | 61            |
| 5  | Cuarzo     | $\text{SiO}_2$                                                                                 | 3             |
| 6  | Goethita   | $\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$                                                       | 18            |

## Composición química.

Las características químicas de los horizontes de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa muestran un cuadro geoquímica en correspondencia con la génesis de estos depósitos exógenos, evidenciando una tonalidad química vertical muy bien definida (tabla 2.3).

En los horizontes inferiores de rocas poco alteradas a alteradas existe una buena cantidad de sílice y magnesio, representado por los minerales serpentiniticos, olivinos y cloritas; las cuales tienden a disminuir hacia los horizontes superiores, donde en condiciones oxidantes y de pH más ácido se concentran los minerales de hierro, aluminio y cromo.



Los horizontes lateríticos son fundamentalmente ferrosos, con casi un 70 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 5 – 8 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y alrededor de un 4 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y con un contenido de  $\text{NiO}$  de 0,95 – 1,51 %, donde la tendencia del aluminio, al igual que la del cromo, es de concentrarse en las zonas superiores, en la zona de concreciones ferruginosas para el primero, y los ocre superiores para el segundo.

Sin duda alguna los minerales de hierro desempeñan un importante papel en las lateritas, y deben influir de cierta forma en la distribución y grado de retención del níquel en estos materiales.

Tabla 2.3 Composición química del yacimiento Moa.(según Rojas Purón, 1994).

| Compuestos                     | Contenido por horizontes (en %) |       |       |       |
|--------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|                                | C                               | O     | SA    | S     |
| MgO                            | 0,36                            | 0,55  | 16,63 | 29,32 |
| SiO <sub>2</sub>               | 2,02                            | 2,37  | 23,77 | 37,71 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,36                            | 5,9   | 3,86  | 0,87  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 67,32                           | 68,84 | 22,45 | 7,59  |
| NiO                            | 0,96                            | 1,51  | 1,89  | 1,62  |
| CoO                            | 0,1                             | 0,12  | 0,06  | 0,02  |
| MnO                            | 0,5                             | 0,85  | 0,39  | 0,19  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,96                            | 4,18  | 2,01  | 0,41  |

Horizontes: C: concreciones Ferruginosas, O: ocre, SA: serpentinitas alteradas, S: serpentinitas duras

La laterita de balance de frentes de explotación pertenecientes a sectores con un nivel evolutivo distinto, en el yacimiento Moa, presentan diferencias bien definidas en su composición química (tabla 2.4).



De acuerdo con los resultados de esta tabla, donde existe frente perteneciente al sector Atlantic (D - 43 y D - 38), y frentes (D - 23 y D - 52) del sector de la zona sur y Yamanigüey respectivamente, la corteza de intemperismo de cada uno de los sectores se encuentra a un nivel evolutivo determinado; existiendo por una parte frentes con un material laterítico de balance con un contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mayor de un 65 %, mayor de un 2 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y contenidos de  $\text{MgO}$  menor de 0,6 % (D - 43 y D - 38); y por otro; una laterita de balance con contenidos más bajos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (por debajo de un 62 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (alrededor de 1,40 - 1,75 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) y altos contenidos de  $\text{MgO}$  (mayor de 0,60 % de  $\text{MgO}$  (D - 23 y D - 52)).

Tabla 2.4. Composición química de las lateritas de balance en frentes de explotación del yacimiento Moa. (Según Rojas Purón y Beyris, 1994). (\*)

| Compuestos                     | Contenido por horizontes (en %) |        |        |        |
|--------------------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|
|                                | D - 38                          | D - 43 | D - 52 | D - 23 |
| MgO                            | 0,59                            | 0,24   | 1,45   | 0,62   |
| SiO <sub>2</sub>               | 1,48                            | 4,6    | 5,97   | 3,74   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,45                            | 3,74   | 4,17   | 3,22   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 68,29                           | 67,3   | 60,89  | 58,49  |
| NiO                            | 1,54                            | 1,43   | 1,72   | 1,76   |
| CoO                            | 0,92                            | 0,17   | 0,13   | 0,13   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,79                            | 3,44   | 1,49   | 1,72   |

\*: Los datos son los valores de la media ponderada de muestras compósitos de LB para cada frente de explotación.

#### Composición granulométrica.

Las menas lateríticas niquelíferas se caracterizan por la composición granular en la que prevalecen las partículas de granos finos inferiores a 0.074 mm. El contenido de estas partículas sobrepasa normalmente el 70 % de la composición general de las rocas, alcanzando en ocasiones hasta 80-90%.

Características del mineral secado:

Humedad: 4,5 %

Peso volumétrico: 1,1 - 1,3 t/m<sup>3</sup>



Contenido de elementos metálicos principales.

Ni 1,32%

Fe 38,5 %

Co 0,105 %

El material es homogenizado según la relación siguiente:

$$\frac{LB}{LS} = 3$$

Como ha sido descrito el material laterítico está compuesto en su mayoría por mineral serpentínico y limonítico con características físicas y químicas muy diferentes lo cual hace de él una masa heterogénea. En la bibliografía consultada solo se hace referencia a materiales con un comportamiento homogéneo (16), (18).

Para la realización de los experimentos fue necesario emplear un conjunto de equipos de laboratorio sin los cuales sería imposible el cumplimiento de los objetivos trazados. Estos son:

Juego de tamices

| N <sub>o</sub> | Tamaño<br>(mm) | N <sub>o</sub> | Tamaño<br>(mm) | N <sub>o</sub> | Tamaño<br>(mm) | N <sub>o</sub> | Tamaño<br>(mm) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1              | 40             | 6              | 8              | 11             | 1              | 16             | 0,2            |
| 2              | 25             | 7              | 5              | 12             | 0,8            | 17             | 0,16           |
| 3              | 20             | 8              | 3,5            | 13             | 0,6            | 18             | 0,1            |
| 4              | 18             | 9              | 3              | 14             | 0,42           | 19             | 0,074          |
| 5              | 10             | 10             | 1,6            | 15             | 0,3            | 20             | 0,044          |

Balanza técnica.

Características:

Rango de peso: 1-1500g

Error = 0,1g

Estufa.

T: 0°-350°C

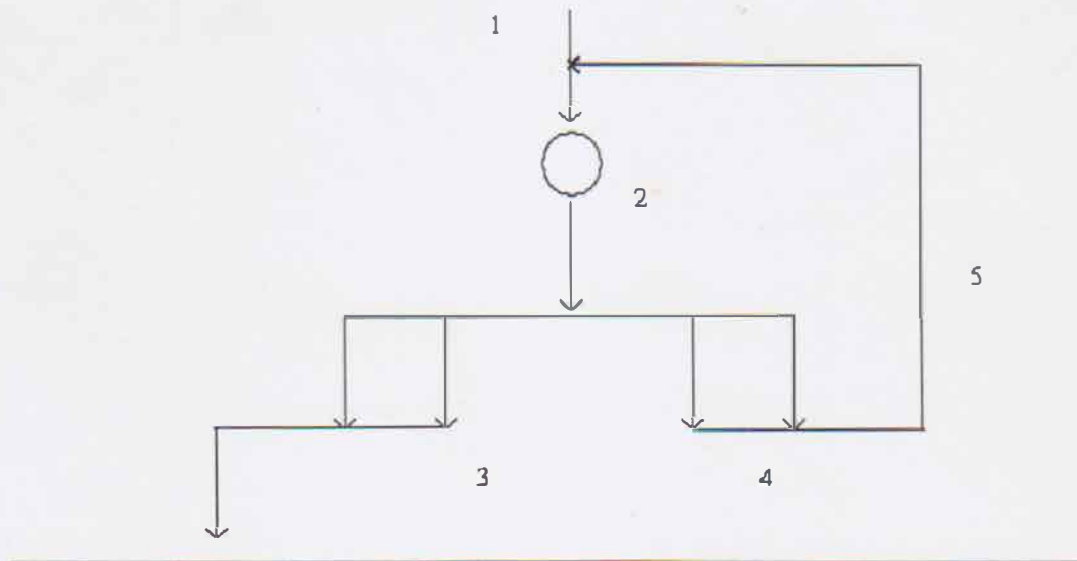
Equipos industriales:





En la investigación fueron realizadas varias mediciones, tanto a los equipos auxiliares como a los equipos principales de la sección de molienda que es donde se basa nuestro trabajo, para ello se tuvo en cuenta la relación de equipos de la planta .

Esquema típico de una unidad de molienda.



1. Entrada al molino.
2. salida del molino.
3. ciclón primario y secundario.
4. cono interior y exterior
5. recirculación del mineral.

- Equipos para granulometría.

Equipo: Balanza Sartorius (BP3100P).

Peso máximo: 3100 g.

Precisión: d: 0.01 g (600 g).

0.02 g (1200 g).

0.05 g (3100 g).

Equipo: Tamizador vibratorio Analisette 3 Pro.

Marca: Frisch.



Tamices mod: BS410.

Montado en marco de: 200 mm de diámetro.

75  $\mu\text{m}$  -- 200 mesh

150  $\mu\text{m}$  – 100 mesh

A continuación se relacionan los diferentes equipos eléctricos que intervienen en el proceso tecnológico de la planta y las características técnicas de los mismos:

- Correas transportadoras 215-TR-6 Y 6A

Fabricante: URSS Código: 215-TR-6 y 6A Trans: 02008.

Descripción: Estas correas son las que reciben el mineral que descargan las grúas del depósito exterior e inician el trayecto hacia los secaderos.

Capacidad: 750 t/h(208.333kg/s).

Velocidad: 1.87 m/s

Ancho: 1400 mm

Largo: 220400 mm

Motor eléctrico: Potencia: 110 kW

n= 1200 r/min

Reductor: i = 43,4

Peso unitario: 100640 kg

- Correas transportadoras 215 – TR –9-1-- 9-7

Fabricante: URSS Código 215-TR- 9-1-- 9- 7 Trans 03020

Descripción: Estas correas reciben el mineral desde las tolvas de los secaderos y los descargan en los secaderos. Entre la correa y la tolva existe un alimentador de estera.

Capacidad: 125 t / h (34.722kg/s).

Velocidad: 1.15 m/s.

Largo: 2200 mm

Ancho: 1000 mm

Peso: 3640 kg

Motor eléctrico: A 02-62- 4T Potencia: 17 kW

n: 1800 r/min



Equipo dinámico.

- Alimentador de esteras.

Fabricante: URSS    Código 215-AL- 101...107    Trans. 03028

Descripción: Este equipo se utiliza para dosificar el mineral a la correa que alimenta al secadero.

Ancho: 1500 mm

Distancia entre ejes (piñón de la cadena): 1500 mm

Velocidad: 0.025, 0.004, 0.06, 0.08 m/s

Capacidad: 70-105- 125 t/h (19.444-29.166-34.722kg/s)

Pesos: 110.857 kg

Velocidad recomendable: 0.04 m/s

Equipo dinámico.

- Tambor secador.

Fabricante: Checoslovaquia    Código 215-SC –101... 107    Trans 00130

Descripción: Este equipo se usa para secar el mineral que llega desde la mina con 36 % de humedad y que lo entrega con 4,5 – 5,5 %.

Largo: 48 00 mm. Diámetro: 45 00 mm.

No. De levantadores: 49 12 en la parte cónica y 37 en la parte cilíndrica.

Motor principal: Potencia: 250 kW

n: 725 r/min

Datos de diseño.

Humedad de entrada: 36 %

Humedad de salida: 4,5 - 5,5 %

Consumo de combustible: 37 kg/t (fuel Oil)

33 kg/ t de mineral alimentado al secadero para el Fuel Oil. (Nueva norma).

39 kg/t de mineral alimentado del secadero para el crudo mejorado.

Temperatura de la cámara de combustión: 1500 ° C.



Equipo dinámico.

- Ventiladores de combustión.

Fabricante: Checoslovaquia Código 215 – VE-101 -107 A Trans 03001

Descripción: Son los encargados de ayudar a la combustión del petróleo que se inyecta a las cámaras de combustión de los secaderos de aumentar el caudal de gases del secador capaz de provocar del mineral.

Tipo: RVE = 1600- 6 N

Capacidad: 16 m<sup>3</sup>/s

Presión: 3800 pascal

Motor eléctrico: Potencia: 90 kW

n: 880 r/min

Frecuencia 60 Hz

Tensión: 440 V

- Ventiladores de aire de exceso.

Fabricante: Checoslovaquia Código 215-VE-101 -107 B Trans 03001

Descripción: Son los encargados de aumentar el caudal de gases capaz de provocar el secado del minera.

Tipo: RVE – 800-3 N-L

Capacidad: 1.85 m<sup>3</sup>/s

Presión: 3620 pascal

Motor eléctrico: Potencia: 75 kW.

Tensión: 440 V

Frecuencia: 60 Hz

n: 1715 r/min

Equipo dinámico.

- Ventilador de pulverización.

Fabricante: España Código: VE-101 -107C Trans. 03001

Descripción:





Son los encargados de ayudar a la pulverización del petróleo a la salida de la boquilla del quemador para su mejor combustión en las cámaras de combustión.

$$Q = 180 \text{ m}^3 / \text{min} (3 \text{ m}^3/\text{s})$$

Motor eléctrico: Potencia: 75 kW

Tensión: 440 V

Frecuencia: 60 Hz

Equipo dinámico.

- Ventiladores de tiro de los secaderos. DH-26.

Fabricante: URRS Código: 215 VE-108 - 114 Trans: 06112.

Descripción:

Estos equipos arrastran el polvo que se crea durante el proceso de secado dentro del tambor secador y lo lleva primero hasta los ciclones y de ahí hacia los electrofiltro.

Rendimiento: 279000 – 240000 m<sup>3</sup>/h (7.749-6.666 m<sup>3</sup>/s)

Altura de presión: 320 kgf/ cm<sup>2</sup>

- Correas transportadoras 215-TR-11 y 11A (Correas calientes).

Fabricante: URRS Código: 215-TR-11 A IIA Trans: 03022

Descripción: Recogen el mineral secado que descargan los secaderos y lo inician en la transportación hacia los molinos.

|                         | <u>215-TR-11</u>      | <u>215-TR- 11A</u>    |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <u>Capacidad:</u>       | 490 t/h (136.111kg/s) | 490 t/h (136.111kg/s) |
| <u>Velocidad:</u>       | 1,82 m/s              | 1,82 m/s              |
| <u>Largo:</u>           | 183700 mm             | 180100 mm             |
| <u>Ancho:</u>           | 1400 mm               | 1400 mm               |
| <u>Peso:</u>            | 66650 kg              | 65520 kg              |
| <u>Motor eléctrico:</u> | Potencia: 110 kW      |                       |
|                         | n: 1200 r/min         |                       |
|                         | Tensión: 440          |                       |



Equipo dinámico.

- Correas transportadoras 215-TR-12 y 12A. Trans: 05017

Descripción: Reciben el mineral que les entregan las correas No. 11 y 11A y lo descargan en las tolvas que alimentan a los molinos, en estas correas se le añade el petróleo aditivo.

Capacidad: 490 t/h (136.111kg/s)

Velocidad: 1,82 m/s

Ancho: 1400 mm

Largo: 169600 mm

Peso: 54080 kg

Reductor:  $i = 43,4$

Equipo dinámico

Alimentador de disco AR-16.

Fabricante: URRS Código: 215- AL- 201....204 A Y B Trans: 05047

Descripción: Este equipo es el encargado de dosificar la cantidad de mineral que se alimenta a los molinos.

Capacidad: 55 - 120 t/h (15.277 – 33.333kg/s)

n: 8.8 r/min del disco

Longitud: 2540 mm

Ancho: 1890 + 8.5 mm

Peso: 2,150 kg

Diámetro del disco: 1600 mm

Potencia del motor: 4 kW

Equipo dinámico.

- Correas transportadoras 215-TR-13-1 - 13-4

Fabricante: URRS Código: 215-TR-201.....204 Transp. 05017

Descripción: Se encargan de alimentar a los molinos de bolas con el mineral que recibe de las tolvas.

Capacidad: 160t/h (44.444kg/s)

Velocidad: 1,15 m/s

Largo: 13500 mm



Ancho: 1000 mm

Peso: 1600 mm

Equipo: Dinámico.

- Ventilador de recirculación: BM-20A

Fabricante: URSS Código: 215-VE-205... 208 Trans: 05125

Descripción: Es el encargado de barrer y soplar el polvo que se produce durante la molienda, llevarlo hasta el sistema de colección de polvo y recircularlo al sistema de molienda.

Capacidad : 134000 m<sup>3</sup>/h (3.722 m<sup>3</sup>/s).

Altura de presión: 2840 kgf/m<sup>2</sup>

Motor eléctrico: Potencia: 400 kW.

Tensión: 6 kV.

n: 1180 r/min.

Frecuencia: 60Hz.

Equipo dinámico.

- Ventilador de tiro de los Molinos:

Fabricante: URSS Código: 215-VE-201 204 Trans. 05192

Descripción: Recoge el polvo que se forma en todo el sistema de molienda así como la sección y lo lleva hasta los electrofiltros de los molinos. También expulsan el aire limpio hasta la atmósfera a través de la chimenea.

Capacidad: 89900 m<sup>3</sup>/h (2.497 m<sup>3</sup>/s)

Altura de presión: 212 kgf/cm<sup>2</sup>

Motor eléctrico: Potencia: 90 kW

Tensión: 440 V.

n: 880 r/min.

Frecuencia: 60 Hz

Equipo dinámico.

- Bomba neumática:

Fabricante : URSS Código: 215 – BO – 202 A,B,C,D,E,F. Trans: 03038.



Descripción: Se encarga de impulsar el mineral desde las tolvas de productos final de los molinos hasta los silos de almacenaje de mineral a través de tubería.

Capacidad: 120 t/h (33.333 kg/s)

Largo de la tubería: 300 m

Presión de aire alimentado: 3 kgf/cm<sup>2</sup>

Presión de trabajo: 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>

Máximo flujo de aire que pueda comprimir: 60 m<sup>3</sup>/min (1 m<sup>3</sup>/s)

Longitud: 5420 mm

Ancho: 1500 mm

Alto: 1120 mm

Peso: 5455 kg

Equipo dinámico

- Molinos de Bolas

Fabricante: URSS Código: 215-ML-201 ....204 Trans: 05001

Descripción: Son los encargados de triturar el mineral hasta obtener la granulometría de – 0.074 mm.

Capacidad: 120t/h (33.333kg/s)

Carga de bolas: 54 t (54 000 kg)

Diámetro: 3200 mm

Largo: 5700 mm

Motor del molino: CC 3-15-49-10 T3.

Voltaje: 10 kV.

Potencia: 800 kW

N: 720 r/min

Equipo dinámico.

Propiedades de los indicadores de producción.





Las propiedades físico – químicas de este producto son.

|                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| Humedad de salida | 4,5 a 5,5 %               |
| Fineza            | + 0.149 mm 5 %            |
|                   | 0.074 mm 85-87 %          |
|                   | 0.044 mm 73 %             |
|                   | 0.149 + 0.74 mm el resto. |

Angulo de reposo: 15°

Contenido promedio de:

|                    |                                |         |
|--------------------|--------------------------------|---------|
| Ni: 1.25 – 1.279 % | AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.49    |
| Fe: 39 %           | Si O <sub>2</sub> (libre):     | 1.94 %  |
| Co: 0.099 %        | Si O <sub>2</sub> (Total):     | 10.71 % |
| Mg: 5-8,1 %        | Cromo:                         | 1.62 %  |

Materiales auxiliares:

- Petróleo:

El petróleo se suministra a la planta para combustionarlos en las cámaras de combustión de los secaderos. El mismo transfiere calor al aire en exceso que también se adiciona a las cámaras de combustión de los secaderos, formando así una masa de gases calientes capaces de secar el mineral que entra en el tambor secador.

Las características del petróleo son:

- Marca : Fuel Oil

|                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| Poder calorífico:          | 9660,7 Kcal/Kg. |
| Viscosidad cinemática:     | 2.5 – 3° E      |
| Temperatura de suministro: | 110 °C          |



Características químicas:

Carbono fijo: 86,58 %

Hidrógeno: 10,52 %

Azufre: 2,5 %

Nitrógeno + Oxígeno: 0,40 %

- Marca crudo mejorado:

Poder calórico: 9350 kcal / Kg

Viscosidad cinemática: 50 °C 650 CSTOK a 80°C 180 CSTOK

Temperatura de suministro: 130-140 °C

Carbono fijo: 81 %

Hidrógeno: 10 %

Azufre: 5.8 %

Nitrógeno + Oxígeno: El resto.

- Características del mineral secado:

Humedad: 4,5 %

Peso volumétrico: 1,1 – 1,3 t/m<sup>3</sup>

La granulometría en esta fase intermedia esta sujeta a investigación, por ello no la plasmamos en este documento.

El contenido metálico debe permanecer igual.

Ni 1,32%

Fe 38,5 %

Co 0,105 %

- Área de molienda

El mineral después de secado sufre otro proceso de molienda, que es el responsable de descompensar la fineza necesaria para el producto final.

La humedad y su composición química son la misma del mineral secado.

-Normas de Consumo específicos para producir una unidad de producto (t) según la el manual de operaciones de la Planta Preparación de Mineral.

- Fuel Oil 33 kg/t de mineral seco alimentado.



- Crudo mejorado 39 kg/t de mineral seco alimentado
- Electricidad 0,027 mW/t de mineral seco alimentado
- Aire comprimido 0,024 m<sup>3</sup>/t de mineral seco alimentado
- Agua 0,34 m<sup>3</sup>/t de mineral seco alimentado
- Banda transportadora 0,004 m/t de mineral seco alimentado
- Bolas para los molinos 0,000029 t/t de mineral seco alimentado
- Refractarios 0,00012 t/t de mineral seco alimentado.

### 2.3.- Técnica experimental:

Técnica para el análisis de tamices.

El análisis de tamices consiste en cernir la muestra a través de un juego estándar de tamices, y en determinar el porcentaje de residuos en cada uno de estos, con respecto a la masa de la muestra inicial. A menudo se utiliza el estándar elaborado por Taylor, en el que el tamaño de la tela metálica anterior, se diferencia del tamaño de la tela metálica posterior en  $\sqrt{2}$  veces.

El tiempo de cernido de la muestra se elige empíricamente respecto a la muestra sometida a investigación. El tamizado se considera concluido cuando el aumento de peso del residuo en el más fino de los tamices, durante el tiempo doble de cernido, constituye no más del 5 %.

En el proceso de tamizado, algunos minerales se aglomeran considerablemente, en algunos casos por la presencia de petróleo en estas muestras alterando los resultados del análisis. La aglomeración disminuye secando la muestra con minuciosidad antes del análisis.

Con frecuencia, durante el cernido seco, sobre todo a través de los tamices de 74 y 44  $\mu\text{m}$ , no se logra evitar la aglomeración y prácticamente la obstrucción completa de éstos.

En este caso se procede a la diseminación en medio acuoso (tamizado húmedo). Las muestras se tamizan por el método húmedo o seco en dependencia del grosor del material y a la exactitud necesaria de los resultados del análisis.



Método húmedo de tamizado.

Cuando la muestra contiene una cantidad considerable de material fino, siendo necesaria una exactitud alta del análisis, o cuando el material se aglomera sobre la superficie tamizante, se utiliza el método húmedo. La muestra se carga en un tamiz con orificios de menor dimensión, por ejemplo 0,044 mm, y las partículas más diminutas (de lodo) se lavan con un chorro débil o sumergiendo el tamiz en un depósito con agua. El lavado se realiza hasta que el agua se pone clara.

El resto de la muestra que queda en el tamiz se seca y pesa, y por las diferencias entre las masas se determina la masa de lodo lavado. El producto bajo la rejilla de este último tamiz se añade a la masa del lodo lavado, obtenida anteriormente.

Para recoger la masa de material que quedó sobre el tamiz se procedió del siguiente modo:

1° se inclinó el tamiz sobre un recipiente.

2° si quedó material en las paredes del tamiz este se inclina nuevamente y se rocía ligeramente con agua por detrás del mismo hasta que no quede nada.

Los resultados del análisis de tamices se anotan en una tabla. Se calculan las salidas sumarias, equivalentes a la suma de salidas de todas las clases más gruesas (salida sumaria por más) y menos gruesa (salida sumaria por menos) que los orificios de dicho tamiz.

El tamizado húmedo de materiales finos, con una suministración ininterrumpida de agua, depende de la mojabilidad de las muestras. Las pérdidas de material, durante el análisis de tamices, deben ser no superiores al 1%.

La masa de muestra para el análisis de tamices se toma conforme al grosor del mayor trozo en dicha muestra según la fórmula:

$$Q_{\min} = 0.02d_{\max}^2 + 0.5d_{\max}.$$

Donde:

$Q_{\min}$  es masa de muestra para realizar análisis granulométrico.

$d_{\max}$ : diámetro del trozo mayor del mineral.

Cuando no es necesaria una exactitud y el material no se aglomera, debe utilizarse el método seco de tamizado. Los tamices se establecen de arriba abajo, de agujeros de tamaños grandes a pequeños. La muestra se carga en el tamiz superior y todo el conjunto de tamices se sacude en una tamizadora durante un tiempo de 10 a 30 minutos, los restos que quedan en cada tamiz se pesan.





La suma de las masas de todas las clases obtenidas no debe diferenciarse en más de 1% de la masa de la muestra inicial. Si esta condición se mantiene, la suma de las masas de todas las clases se toma como 100%. La salida de las clases se obtiene dividiendo la masa de cada clase por su masa total.

Técnica experimental a escala industrial:

Inicialmente se tomaron muestras en la banda transportadoras que alimenta al molino de la siguiente forma, se detuvo la banda y se procedió a tomar el mineral que se encontraba a lo largo de 1,5 m de la banda transportadora. Luego con un dispositivo de forma cónica en la salida del molino se tomaron muestras.

Después se tomaron las demás en las válvulas de los conos interiores y exteriores entre punto y punto nos tardábamos entre 15 a 20 minutos, cada prueba fue repetida de 4 a 5 veces en cada punto variando el flujo de aire(30,50,70) y el ángulo de inclinación de las paletas del clasificador(4,5,6) logrando así 9 combinaciones.

### *Capítulo III*



### **III.- Resultados y discusión**

#### **3.- Resultados experimentales.**

A continuación exponemos los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a nivel industrial y de los análisis granulométricos realizados a las muestras que obtuvimos en el proceso de molienda.

##### **3.1.- Comportamiento del sistema con un flujo alto de aire hacia el molino (30) y un grado alto de inclinación de las paletas del clasificador (6°).**

Exponemos a continuación los resultados experimentales obtenidos al ajustar el flujo de aire hacia el molino a un valor de  $75639 \text{ m}^3 / \text{h}$ , que corresponde a la posición de un 30 % en el instrumento indicador que se encuentra ubicado en el panel de control de la válvula de distribución del flujo del ventilador de recirculación, y las paletas del clasificador inclinadas hacia la posición de  $6^\circ$ .

##### **3.1.1.- Caracterización del mineral de entrada al molino.**

En las tablas 3.1 a 3.3, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral de entrada al molino durante la realización de las pruebas.



Tabla 3.1. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral de entrada al molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 30\%$

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |        |        |        |
|------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|            | 14600                          | 14200  | 14700  | 15300  |
|            | Distribución de los pesos en g |        |        |        |
|            | 1                              | 2      | 3      | 4      |
| 40         | 150,2                          | 61     | 789    | 608    |
| 25         | 122,4                          | 325    | 510,2  | 642    |
| 20         | 111,7                          | 151    | 219,2  | 241,3  |
| 18         | 152,1                          | 147    | 260    | 376,7  |
| 10         | 542                            | 470    | 818    | 867,2  |
| 8          | 412,1                          | 270    | 284    | 390,6  |
| 5          | 1175,9                         | 890,5  | 808,4  | 1236   |
| 3,5        | 2105,9                         | 1447   | 1032   | 1334   |
| 3          | 27,9                           | 11     | 10,1   | 10     |
| 1,6        | 3556,9                         | 3073   | 2353   | 2279   |
| 1          | 1815,2                         | 1889   | 2107,1 | 1799,5 |
| 0,8        | 305,9                          | 363,2  | 575,3  | 555,6  |
| 0,6        | 811,5                          | 899,5  | 964,8  | 731,8  |
| 0,42       | 568,1                          | 719,8  | 905,9  | 837,3  |
| 0,3        | 105,5                          | 183,5  | 225,6  | 380,6  |
| 0,2        | 290,5                          | 356,6  | 302,6  | 375,3  |
| 0,16       | 237,0                          | 227,3  | 271,8  | 379,3  |
| 0,074      | 405,8                          | 542,9  | 481,1  | 609,0  |
| 0,044      | 243,5                          | 308,1  | 166,7  | 767,9  |
| -0,044     | 1460                           | 1864,6 | 1615,3 | 878,9  |





Tabla 3.2. Distribución de los pesos a partir del tamaño de 8 mm.

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |         |         |
|------------|--------------------------------|-------|---------|---------|
|            | 13521,7                        | 13046 | 12103,6 | 12564,8 |
|            | Distribución de los pesos en g |       |         |         |
|            | 1                              | 2     | 3       | 4       |
| 8          | 3,05                           | 2,07  | 2,35    | 3,11    |
| 5          | 8,70                           | 6,83  | 6,68    | 9,84    |
| 3,5        | 15,57                          | 11,09 | 8,53    | 10,62   |
| 3          | 0,21                           | 0,08  | 0,08    | 0,08    |
| 1,6        | 26,31                          | 23,56 | 19,44   | 18,14   |
| 1          | 13,42                          | 14,48 | 17,41   | 14,32   |
| 0,8        | 2,26                           | 2,78  | 4,75    | 4,42    |
| 0,6        | 6,00                           | 6,89  | 7,97    | 5,82    |
| 0,42       | 4,20                           | 5,52  | 7,48    | 6,66    |
| 0,3        | 0,78                           | 1,41  | 1,86    | 3,03    |
| 0,2        | 2,15                           | 2,73  | 2,50    | 2,99    |
| 0,16       | 1,75                           | 1,74  | 2,25    | 3,02    |
| 0,074      | 3,00                           | 4,16  | 3,97    | 4,85    |
| 0,044      | 1,80                           | 2,36  | 1,38    | 6,11    |
| -0,044     | 10,80                          | 14,29 | 13,35   | 6,99    |

Tabla 3.3. Resumen de la distribución en peso para el mineral de entrada al molino, en %.

| Tamaño, mm | Distribución de pesos, en % |       |       |       |
|------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                           | 2     | 3     | 4     |
| 0,16       | 84,40                       | 79,10 | 81,30 | 82,00 |
| 0,074      | 3,00                        | 4,16  | 3,97  | 4,85  |
| 0,044      | 1,80                        | 2,36  | 1,38  | 6,11  |
| -0,044     | 10,80                       | 14,29 | 13,35 | 6,99  |

**3.1.2.- Caracterización del mineral a la salida del molino.**

En las tablas 3.4 y 3.5, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral a la salida del molino durante la realización de las pruebas.

Tabla 3.4. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral a la salida del molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^0$  y  $Q_a = 30\%$

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 900                            | 900   | 900   | 900   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     |
| 1          | 2,8                            | 16,4  | 7,3   | 6,1   |
| 0,8        | 21,7                           | 33,5  | 25,3  | 34,1  |
| 0,6        | 30                             | 40    | 42,4  | 40    |
| 0,42       | 6,6                            | 10    | 6,5   | 10    |
| 0,3        | 44,9                           | 50    | 44,5  | 45,1  |
| 0,2        | 41,5                           | 44,4  | 32,2  | 40    |
| 0,16       | 137,1                          | 152,3 | 118,3 | 122,3 |
| 0,074      | 83                             | 76,3  | 103   | 66,4  |
| 0,044      | 76,5                           | 40    | 30    | 22,1  |
| -0,044     | 455,9                          | 437,1 | 490,5 | 513,9 |

Tabla 3.5. Resumen de la distribución en peso para el mineral a la salida del molino, en %

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     |
| 0,16       | 31,62                           | 38,51 | 30,72 | 33,06 |
| 0,074      | 9,22                            | 8,48  | 11,44 | 7,38  |
| 0,044      | 8,50                            | 4,44  | 3,33  | 2,46  |
| -0,044     | 50,66                           | 48,57 | 54,50 | 57,10 |



### 3.1.3.- Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).

El mineral que retorna al molino sale del clasificador a través del cono interior y del cono exterior, para luego unirse en una sola tubería y formar el haz grueso. En las tablas 3.6 a la 3.7, mostramos los resultados obtenidos para el cono interior.

Tabla 3.6. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono interior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 500                            | 456   | 500   | 500   | 500   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 27,4                           | 7,2   | 41,5  | 35,6  | 32,1  |
| 0,8        | 10                             | 4,3   | 30    | 20    | 15,3  |
| 0,6        | 24,6                           | 12,3  | 40    | 36,3  | 28,3  |
| 0,42       | 42,3                           | 23,5  | 56    | 56,6  | 35,5  |
| 0,3        | 13,3                           | 10,5  | 12,1  | 12,6  | 16,2  |
| 0,2        | 29,1                           | 25,3  | 23,5  | 26,8  | 27,8  |
| 0,16       | 29,7                           | 28    | 23,5  | 27,4  | 26,6  |
| 0,074      | 103                            | 121,8 | 87,7  | 90    | 96    |
| 0,044      | 50                             | 50    | 34,2  | 40    | 42,5  |
| -0,044     | 170,6                          | 173,1 | 151,5 | 154,7 | 179,7 |

Tabla 3.7. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono interior del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 35,28                           | 24,36 | 45,32 | 43,06 | 36,36 |
| 0,074      | 20,60                           | 26,71 | 17,54 | 18,00 | 19,20 |
| 0,044      | 10,00                           | 10,96 | 6,84  | 8,00  | 8,50  |
| -0,044     | 34,12                           | 37,96 | 30,30 | 30,94 | 35,94 |



Tabla 3.8. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono exterior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |      |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|------|-------|
|            | 500                            | 500   | 500   | 500  | 500   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |      |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4    | 5     |
| 1          | 30                             | 22,6  | 50    | 47,3 | 48,2  |
| 0,8        | 13                             | 4,5   | 20    | 19,6 | 16,2  |
| 0,6        | 39,7                           | 12,8  | 65,4  | 75,6 | 53    |
| 0,42       | 55,8                           | 48,1  | 60    | 60   | 60    |
| 0,3        | 8,2                            | 5,3   | 3,7   | 9,3  | 6,5   |
| 0,2        | 36                             | 28,6  | 32,5  | 38   | 30    |
| 0,16       | 34,8                           | 35,4  | 22,8  | 28   | 28    |
| 0,074      | 103,6                          | 123,1 | 71    | 85,2 | 67,5  |
| 0,044      | 45,2                           | 48,7  | 26,4  | 30   | 37,2  |
| -0,044     | 133,7                          | 170,9 | 148,2 | 107  | 153,4 |

Tabla 3.9. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono exterior del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 43,5                            | 31,46 | 50,88 | 55,56 | 48,38 |
| 0,074      | 20,72                           | 24,62 | 14,2  | 17,04 | 13,5  |
| 0,044      | 9,04                            | 9,74  | 5,28  | 6     | 7,44  |
| -0,044     | 26,74                           | 34,18 | 29,64 | 21,4  | 30,68 |

En la tabla 3.10 mostramos el resultado estimado de la granulometría del mineral que forma el haz grueso, formado por los haces del cono interior y del cono exterior.





Tabla 3.10. Composición granulométrica del mineral de retorno al molino, teniendo en cuenta el resultado de los dos conos del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     |
| 1          | 5,74                            | 3,05  | 9,15  | 8,29  |
| 0,8        | 2,3                             | 0,92  | 5     | 3,96  |
| 0,6        | 6,43                            | 2,63  | 10,54 | 11,19 |
| 0,42       | 9,81                            | 7,39  | 11,6  | 11,66 |
| 0,3        | 2,15                            | 1,68  | 1,58  | 2,19  |
| 0,2        | 6,51                            | 5,63  | 5,6   | 6,48  |
| 0,16       | 6,45                            | 6,61  | 4,63  | 5,54  |
| 0,074      | 20,66                           | 25,67 | 15,87 | 17,52 |
| 0,044      | 9,52                            | 10,35 | 6,06  | 7     |
| -0,044     | 30,43                           | 36,07 | 29,97 | 26,17 |

### 3.1.4.- Caracterización del producto.

El material que sale del clasificador pasa en primer lugar hacia el ciclón primario y luego el material más fino pasa al ciclón secundario. En las tablas 3.11 y 3.12 mostramos el comportamiento de la granulometría en el ciclón primario y en las tablas 3.13 y 3.14, el comportamiento en el ciclón secundario.

Tabla 3.11 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón primario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |      |      |      |      |
|------------|--------------------------------|------|------|------|------|
|            | 150                            | 150  | 150  | 150  | 150  |
|            | Distribución de los pesos en g |      |      |      |      |
|            | 1                              | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 0,16       | 16,7                           | 19,2 | 19   | 20   | 22,6 |
| 0,074      | 7                              | 17,5 | 10   | 10,4 | 11,7 |
| 0,044      | 43,1                           | 41,1 | 38,3 | 47,8 | 45,6 |
| -0,044     | 83,2                           | 72,2 | 82,7 | 71,8 | 70,1 |





Tabla 3.12 Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón primario, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 11,13                           | 12,80 | 12,67 | 13,33 | 15,07 |
| 0,074      | 4,67                            | 11,67 | 6,67  | 6,93  | 7,80  |
| 0,044      | 28,73                           | 27,40 | 25,53 | 31,87 | 30,40 |
| -0,044     | 55,47                           | 48,13 | 55,13 | 47,87 | 46,73 |

Tabla 3.13. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón secundario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 150                            | 150   | 150   | 150   | 150   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,074      | 0,2                            | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,2   |
| 0,044      | 0,2                            | 0,2   | 0,2   | 6,7   | 0,2   |
| -0,044     | 149,6                          | 149,6 | 149,6 | 149,6 | 149,6 |

Tabla 3.14. Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón secundario, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,074      | 0,13                            | 0,13  | 0,13  | 0,13  | 0,13  |
| 0,044      | 0,13                            | 0,13  | 0,13  | 4,47  | 0,13  |
| -0,044     | 99,73                           | 99,73 | 99,73 | 99,73 | 99,73 |

Obtenemos el haz de fino del clasificador como la media ponderada de las granulometrías del mineral en las descargas de los ciclones primario y secundario, como mostramos en la tabla 3.15.



Tabla 3.15 Composición granulométrica del producto, en %

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 11,13                           | 12,80 | 12,67 | 13,33 | 15,07 |
| 0,074      | 2,40                            | 5,90  | 3,40  | 3,53  | 3,97  |
| 0,044      | 14,43                           | 13,77 | 12,83 | 18,17 | 15,27 |
| -0,044     | 72,03                           | 67,53 | 71,10 | 64,97 | 65,70 |

### 3.1.5. - Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador .

Para el cálculo de la eficiencia  $\psi$ , empleamos el método que especificamos en (1.7.-). En las tablas 3.16, 3.17 y 3.18 mostramos los resultados de los cálculos preliminares realizados para la determinación de  $\psi$ .

Tabla 3.16. Cálculos de  $[F_c(x) - F_f(x)]$  para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. mm | $[F_c(x) - F_f(x)]$ , % |       |       |       |       |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 5,74                    | 3,05  | 9,15  | 8,29  | 8,03  |
| 0,8        | 8,04                    | 3,97  | 14,15 | 12,25 | 11,18 |
| 0,6        | 14,47                   | 6,60  | 24,69 | 23,44 | 19,31 |
| 0,42       | 24,28                   | 13,99 | 36,29 | 35,1  | 28,86 |
| 0,3        | 26,43                   | 15,67 | 37,87 | 37,29 | 31,13 |
| 0,2        | 32,94                   | 21,30 | 43,47 | 43,77 | 36,91 |
| 0,16       | 28,26                   | 15,11 | 35,43 | 35,98 | 27,30 |
| 0,074      | 46,52                   | 34,88 | 47,90 | 49,96 | 39,69 |
| 0,044      | 41,60                   | 31,46 | 41,13 | 38,80 | 32,39 |
| -0,044     | 0,00                    | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |

Tabla 3.17. Cálculos de  $[F_o(x) - F_f(x)]$ , para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. mm | $[F_o(x) - F_f(x)]$ , % |       |       |       |   |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|---|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5 |
| 1          | 0,31                    | 1,82  | 0,81  | 0,68  | - |
| 0,8        | 2,72                    | 5,54  | 3,62  | 4,47  | - |
| 0,6        | 6,06                    | 9,99  | 8,33  | 8,91  | - |
| 0,42       | 6,79                    | 11,10 | 9,06  | 10,02 | - |
| 0,3        | 11,78                   | 16,66 | 14,00 | 15,03 | - |
| 0,2        | 16,39                   | 21,59 | 17,58 | 19,48 | - |
| 0,16       | 20,49                   | 25,71 | 18,06 | 19,73 | - |
| 0,074      | 27,31                   | 28,29 | 26,10 | 23,58 | - |
| 0,044      | 21,38                   | 18,97 | 16,60 | 7,87  | - |
| -0,044     | 0,00                    | 0,00  | 0,00  | 0,00  | - |

Tabla 3.18 Valores promedios de las funciones para el cálculo de la eficiencia.

| Tamaño | $[F_c(x) - F_f(x)]$ | $[F_o(x) - F_f(x)]$ |
|--------|---------------------|---------------------|
| 1      | 6,56                | 0,91                |
| 0,8    | 9,6                 | 4,09                |
| 0,6    | 17,3                | 8,32                |
| 0,42   | 27,41               | 9,24                |
| 0,3    | 29,31               | 14,37               |
| 0,2    | 35,37               | 18,76               |
| 0,16   | 28,69               | 21                  |
| 0,074  | 44,82               | 26,32               |
| 0,044  | 38,25               | 16,2                |
| -0,044 | 0                   | 0                   |



En la fig 3.1. mostramos la gráfica correspondiente a los datos de la tabla 3.17, y que nos permite conocer la eficiencia del separador para las condiciones analizadas.

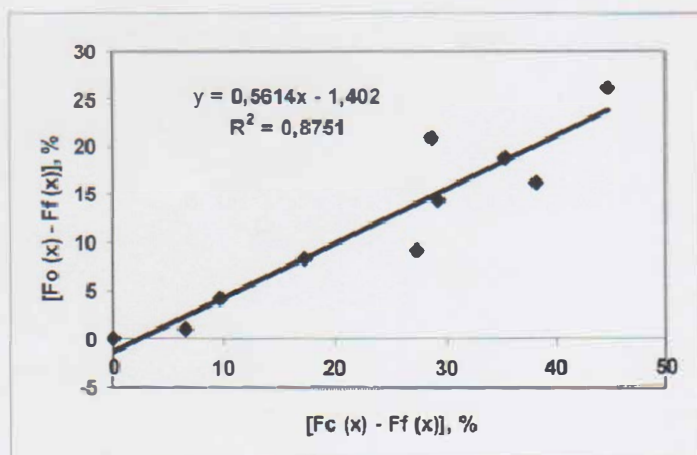


Fig. 3.1 Gráfica para la determinación de la eficiencia del separador.

En la fig. 3.1 la pendiente de la recta nos da directamente el valor de la eficiencia  $\psi$ , luego  $\psi = 56.1 \%$  para un flujo de aire, con una inclinación de las paletas de  $6^\circ$ .

### 3.1.6- Cálculo de la carga circulante.

Según la metodología explicada, determinamos la carga circulante mediante la relación:

$$C = \frac{(\alpha - \beta)}{(\theta - \alpha)} 100$$

En nuestro caso, los valores promedios de contenidos de la clase -0.074 son:

$$\alpha = 57.39 \% \quad ; \quad \beta = 83.16 \% \quad y \quad \theta = 39.4 \%$$

luego,

$$C = 143 \%$$

### 3.17- Balances de masa y de clase.

Para el balance de masa, según el circuito que presentamos en (2.2.-), tenemos.

$$Q_3 = Q_4 + Q_5$$

en nuestro caso,





$$Q_4 = Q_1 = 53 \text{ t/h}$$

$$Q_5 = C \quad Q_4 = 75.8 \text{ t/h}$$

$$Q_3 = 128.79 \text{ t/h}$$

Para el balance de clase, tenemos

$$\alpha Q_3 = \beta Q_4 + \theta Q_5$$

$$0.57 Q_3 = 0.87 Q_4 + 0.39 Q_5$$

$$73.4 \approx 73.5$$

### **3.2.- Comportamiento del sistema con un flujo alto de aire hacia el molino (30), con un ángulo mínimo de inclinación de las paletas del clasificador (4°).**

Exponemos a continuación los resultados experimentales obtenidos al ajustar el flujo de aire hacia el molino, que corresponde a la posición de un 30 % en el instrumento indicador que se encuentra ubicado en el panel de control de la válvula de distribución del flujo del ventilador de recirculación, y las paletas del clasificador inclinadas hacia la posición de 4°.

#### **3.2.1.- Caracterización del mineral de entrada al molino**

En las tablas 3.19 a 3.21, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral de entrada al molino durante la realización de las pruebas.



Tabla 3.19. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral de entrada al molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |        |        |        |
|------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|            | 14800                          | 13800  | 13800  | 13200  |
|            | Distribución de los pesos en g |        |        |        |
|            | 1                              | 2      | 3      | 4      |
| 40         |                                | 72,1   | 802,3  | 783,6  |
| 25         |                                | 211,3  | 174    | 19,8   |
| 20         |                                | 58,3   | 160,4  | 155,8  |
| 18         |                                | 90,2   | 247,5  | 183,6  |
| 10         |                                | 218,5  | 362,9  | 318,7  |
| 8          | 155                            | 182,6  | 172,5  | 214,1  |
| 5          | 607                            | 738,9  | 750    | 724,4  |
| 3,5        | 1492                           | 1382,8 | 1214   | 962,1  |
| 3          | 13,3                           | 94     | 77,1   | 39,4   |
| 1,6        | 2972                           | 3777,8 | 2990,2 | 3089,3 |
| 1          | 1934                           | 2073,3 | 1981,4 | 1992,9 |
| 0,8        | 619,5                          | 1041,3 | 683,7  | 710,1  |
| 0,6        | 709,4                          | 1020,9 | 895,4  | 818,8  |
| 0,42       | 605,0                          | 445,5  | 622,0  | 781,7  |
| 0,3        | 150,9                          | 443,6  | 91,5   | 211,9  |
| 0,2        | 225,2                          | 226,4  | 228,4  | 260,0  |
| 0,16       | 188,7                          | 242,2  | 330,5  | 202,9  |
| 0,074      | 314,5                          | 481,7  | 395,2  | 452,9  |
| 0,044      | 125,8                          | 118,8  | 186,0  | 200,2  |
| -0,044     | 973                            | 879,8  | 1435,1 | 1077,9 |



Tabla 3.20. Distribución de los pesos a partir del tamaño de 8 mm.

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |         |         |         |
|------------|--------------------------------|---------|---------|---------|
|            | 11085,3                        | 13149,6 | 12052,9 | 11738,5 |
|            | Distribución de los pesos en g |         |         |         |
|            | 1                              | 2       | 3       | 4       |
| 8          | 155                            | 182,6   | 172,5   | 214,1   |
| 5          | 607                            | 738,9   | 750     | 724,4   |
| 3,5        | 1492                           | 1382,8  | 1214    | 962,1   |
| 3          | 13,3                           | 94      | 77,1    | 39,4    |
| 1,6        | 2972                           | 3777,8  | 2990,2  | 3089,3  |
| 1          | 1934                           | 2073,3  | 1981,4  | 1992,9  |
| 0,8        | 619,5                          | 1041,3  | 683,7   | 710,1   |
| 0,6        | 709,4                          | 1020,9  | 895,4   | 818,8   |
| 0,42       | 605,0                          | 445,5   | 622,0   | 781,7   |
| 0,3        | 150,9                          | 443,6   | 91,5    | 211,9   |
| 0,2        | 225,2                          | 226,4   | 228,4   | 260,0   |
| 0,16       | 188,7                          | 242,2   | 330,5   | 202,9   |
| 0,074      | 314,5                          | 481,7   | 395,2   | 452,9   |
| 0,044      | 125,8                          | 118,8   | 186,0   | 200,2   |
| -0,044     | 973                            | 879,8   | 1435,1  | 1077,9  |

Tabla 3.21. Resumen de la distribución en peso para el mineral de entrada al molino, en %.

| Tamaño, mm | Distribución de pesos, en % |       |       |       |
|------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                           | 2     | 3     | 4     |
| 0,16       | 87,2                        | 88,74 | 83,2  | 85,25 |
| 0,074      | 2,83                        | 3,66  | 3,27  | 3,85  |
| 0,044      | 1,13                        | 0,90  | 1,54  | 1,70  |
| -0,044     | 8,77                        | 6,69  | 11,90 | 9,18  |

**3.2.2.- Caracterización del mineral a la salida del molino.**

En las tablas 3.22 y 3.23, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral a la salida del molino durante la realización de las pruebas.

Tabla 3.22. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral a la salida del molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^0$  y  $Q_a = 30$  %

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 900                            | 900   | 900   | 900   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     |
| 1          |                                | 7,7   | 5,8   | 3,6   |
| 0,8        |                                | 37,2  | 24    | 20,8  |
| 0,6        |                                | 12,7  | 22    | 48,4  |
| 0,42       |                                | 58    | 6,8   | 7     |
| 0,3        |                                | 45,9  | 40    | 54,1  |
| 0,2        |                                | 40    | 35,7  | 42,7  |
| 0,16       |                                | 116,4 | 74,2  | 135,3 |
| 0,074      |                                | 31,8  | 72    | 99    |
| 0,044      |                                | 44    | 18,2  | 26,3  |
| -0,044     |                                | 506,3 | 601,3 | 462,8 |

Tabla 3.23. Resumen de la distribución en peso para el mineral a la salida del molino, en %

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     |
| 0,16       |                                 | 35,32 | 23,16 | 34,65 |
| 0,074      |                                 | 0,035 | 8     | 11    |
| 0,044      |                                 | 0,048 | 2,02  | 2,92  |
| -0,044     |                                 | 0,56  | 66,81 | 51,42 |





### 3.2.3.- Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador. (retorno al molino).

El mineral que retorna al molino sale del clasificador a través del cono interior y del cono exterior, para luego unirse en una sola tubería y formar el haz grueso. En las tablas 3.24 a la 3.25, mostramos los resultados obtenidos para el cono interior.

Tabla 3.24. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono interior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 950                            | 500   | 500   | 500   | 401   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 21                             | 19    | 19,5  | 18,4  | 18,4  |
| 0,8        | 24,6                           | 14,3  | 17,2  | 12,4  | 12,4  |
| 0,6        | 52,2                           | 32,9  | 27,8  | 30    | 20    |
| 0,42       | 84,6                           | 78,2  | 74,7  | 72,9  | 59,4  |
| 0,3        | 300                            | 10,8  | 13,2  | 13    | 10    |
| 0,2        | 54,2                           | 33    | 39    | 38,3  | 25    |
| 0,16       | 71,2                           | 34,1  | 33,5  | 38,6  | 26,5  |
| 0,074      | 196,1                          | 98,7  | 94,5  | 94,5  | 76,2  |
| 0,044      | 81,2                           | 42,2  | 34,5  | 36,2  | 28,7  |
| -0,044     | 64,9                           | 136,8 | 146,1 | 145,7 | 124,4 |

3.25. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono interior del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 63,97                           | 44,46 | 44,98 | 44,72 | 34,34 |
| 0,074      | 20,64                           | 19,74 | 18,9  | 18,9  | 15,24 |
| 0,044      | 8,54                            | 8,44  | 6,9   | 7,24  | 5,74  |



|        |      |       |       |       |       |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| -0,044 | 6,83 | 27,36 | 29,22 | 29,14 | 24,88 |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|

Tabla 3.26. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono exterior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |        |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|
|            | 500                            | 500   | 500   | 500   | 500    |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |        |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5      |
| 1          | 4,1                            | 5,90  | 6,43  | 5,64  | 5,6    |
| 0,8        | 2,29                           | 6,00  | 2,92  | 2,24  | 2,18   |
| 0,6        | 7,745                          | 10,29 | 7,02  | 6     | 4,69   |
| 0,42       | 13,45                          | 15,56 | 18,56 | 13,17 | 11,49  |
| 0,3        | 16,785                         | 2,35  | 1,86  | 2,3   | 1,71   |
| 0,2        | 5,85                           | 4,70  | 8,39  | 8,83  | 7,5    |
| 0,16       | 6,365                          | 6,53  | 6,8   | 7,48  | 6,01   |
| 0,074      | 16,89                          | 16,17 | 16,95 | 16,45 | 10,705 |
| 0,044      | 6,27                           | 6,46  | 5,62  | 5,62  | 5,22   |
| -0,044     | 20,225                         | 25,99 | 25,62 | 32,27 | 35,095 |

Tabla 3.27.- Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono exterior del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |      |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4    | 5     |
| 0,16       | 49,24                           | 58,3  | 58,98 | 46,6 | 44,02 |
| 0,074      | 13,14                           | 12,6  | 15    | 14   | 6,17  |
| 0,044      | 4                               | 4,48  | 4     | 4    | 4,7   |
| -0,044     | 33,62                           | 24,62 | 22,02 | 35,4 | 45,31 |

En la tabla 3.28 mostramos el resultado estimado de la granulometría del mineral que forma el haz grueso, formado por los haces del cono interior y del cono exterior.



Tabla 3.28. Composición granulométrica del mineral de retorno al molino, teniendo en cuenta el resultado de los dos conos del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     |
| 1          | 5,74                            | 3,05  | 9,15  | 8,29  |
| 0,8        | 2,3                             | 0,92  | 5     | 3,96  |
| 0,6        | 6,43                            | 2,63  | 10,54 | 11,19 |
| 0,42       | 9,81                            | 7,39  | 11,6  | 11,66 |
| 0,3        | 2,15                            | 1,68  | 1,58  | 2,19  |
| 0,2        | 6,51                            | 5,63  | 5,6   | 6,48  |
| 0,16       | 6,45                            | 6,61  | 4,63  | 5,54  |
| 0,074      | 20,66                           | 25,67 | 15,87 | 17,52 |
| 0,044      | 9,52                            | 10,35 | 6,06  | 7     |
| -0,044     | 30,43                           | 36,07 | 29,97 | 26,17 |

### 3.2.4.- Caracterización del producto.

El material que sale del clasificador pasa en primer lugar hacia el ciclón primario y luego el material más fino pasa al ciclón secundario. En las tablas 3.29 y 3.30 mostramos el comportamiento de la granulometría en el ciclón primario y en las tablas 3.31 y 3.32, el comportamiento en el ciclón secundario.

Tabla 3.29 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón primario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 150                            | 150   | 150   | 150   | 150   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 7                              | 10,1  | 10,8  | 6,1   | 8,4   |
| 0,074      | 4,5                            | 8,8   | 5,9   | 4,1   | 1     |
| 0,044      | 32                             | 31    | 27,7  | 24,2  | 38    |
| -0,044     | 106,5                          | 100,1 | 105,6 | 115,6 | 102,6 |



Tabla 3.30 Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón primario, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 4,6                             | 6,73  | 7,2   | 4,06  | 5,6   |
| 0,074      | 3,0                             | 5,87  | 3,93  | 2,73  | 0,66  |
| 0,044      | 21,3                            | 20,6  | 18,46 | 16,13 | 25,33 |
| -0,044     | 71                              | 66,73 | 70,4  | 77,07 | 68,4  |

Tabla 3.31. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón secundario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 30\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |      |       |     |     |
|------------|--------------------------------|------|-------|-----|-----|
|            | 150                            | 73   | 150   | 150 | 150 |
|            | Distribución de los pesos en g |      |       |     |     |
|            | 1                              | 2    | 3     | 4   | 5   |
| 0,074      | 0,1                            | 0,5  |       |     |     |
| 0,044      |                                | 0,8  | 1,3   |     |     |
| -0,044     | 149,9                          | 71,7 | 148,7 | 150 | 150 |

Tabla 3.32. Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón secundario, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |      |       |     |     |
|------------|---------------------------------|------|-------|-----|-----|
|            | 1                               | 2    | 3     | 4   | 5   |
| 0,074      | 0,06                            | 0,68 | 0     | 0   | 0   |
| 0,044      | 0                               | 1,09 | 0,86  | 0   | 0   |
| -0,044     | 99,93                           | 98,2 | 99,13 | 100 | 100 |

Obtenemos el haz de fino del clasificador como la media ponderada de las granulometrías del mineral en las descargas de los ciclones primario y secundario, como mostramos en la tabla 3.33.





Tabla 3.33 Composición granulométrica del producto, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 2,36                            | 3,71  | 3,60  | 2,03  | 2,80  |
| 0,074      | 1,21                            | 3,27  | 1,97  | 1,37  | 0,33  |
| 0,044      | 10,67                           | 10,88 | 9,66  | 8,07  | 12,67 |
| -0,044     | 85,47                           | 82,47 | 84,77 | 88,53 | 84,20 |

**3.2.5. - Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador .**

Para el cálculo de la eficiencia  $\psi$ , empleamos el método que especificamos en (1.7.-). En las tablas 3.34, 3.35 y 3.36 mostramos los resultados de los cálculos preliminares realizados para la determinación de  $\psi$ .

Tabla 3.34. Cálculos de  $[F_c(x) - F_r(x)]$  para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. mm | $[F_c(x) - F_r(x)]$ , % |       |       |       |       |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 4,1                     | 5,90  | 6,43  | 5,64  | 5,6   |
| 0,8        | 6,39                    | 11,90 | 9,35  | 7,88  | 7,78  |
| 0,6        | 14,135                  | 22,19 | 16,37 | 13,88 | 12,47 |
| 0,42       | 27,585                  | 37,75 | 34,93 | 27,05 | 23,96 |
| 0,3        | 44,37                   | 40,10 | 36,79 | 29,35 | 25,67 |
| 0,2        | 50,22                   | 44,80 | 45,18 | 38,18 | 33,17 |
| 0,16       | 54,23                   | 47,63 | 48,38 | 43,63 | 36,38 |
| 0,074      | 69,91                   | 60,53 | 63,37 | 58,72 | 46,76 |
| 0,044      | 65,51                   | 56,11 | 59,33 | 56,27 | 39,31 |
| -0,044     | 0,27                    | -0,37 | 0,18  | 0,01  | 9,80  |

Tabla 3.35. Cálculos de  $[F_o(x) - F_f(x)]$ , para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. mm | $[F_o(x) - F_f(x)]$ , % |       |       |       |   |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|---|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5 |
| 1          | 0,31                    | 1,82  | 0,81  | 0,68  | - |
| 0,8        | 2,72                    | 5,54  | 3,62  | 4,47  | - |
| 0,6        | 6,06                    | 9,99  | 8,33  | 8,91  | - |
| 0,42       | 6,79                    | 11,10 | 9,06  | 10,02 | - |
| 0,3        | 11,78                   | 16,66 | 14,00 | 15,03 | - |
| 0,2        | 16,39                   | 21,59 | 17,58 | 19,48 | - |
| 0,16       | 29,26                   | 34,81 | 27,12 | 31,04 | - |
| 0,074      | 37,27                   | 40,01 | 36,60 | 37,05 | - |
| 0,044      | 35,11                   | 33,58 | 30,28 | 31,44 | - |
| -0,044     | 0,30                    | 0,32  | 0,01  | 0,01  | - |

Tabla 3.36 Valores promedios de las funciones para el cálculo de la eficiencia.

| Tamaño | $[F_c(x) - F_f(x)]$ | $[F_o(x) - F_f(x)]$ |
|--------|---------------------|---------------------|
| 1      | 6,85                | 0,91                |
| 0,8    | 9,92                | 4,09                |
| 0,6    | 17,70               | 8,32                |
| 0,42   | 27,70               | 9,24                |
| 0,3    | 29,68               | 14,37               |
| 0,2    | 35,68               | 18,76               |
| 0,16   | 46,05               | 30,56               |
| 0,074  | 59,85               | 37,73               |
| 0,044  | 55,31               | 32,60               |
| -0,044 | 1,94                | 0,00                |



En la fig 3.2. mostramos la gráfica correspondiente a los datos de la tabla 3.36, y que nos permite conocer la eficiencia del separador para las condiciones analizadas.

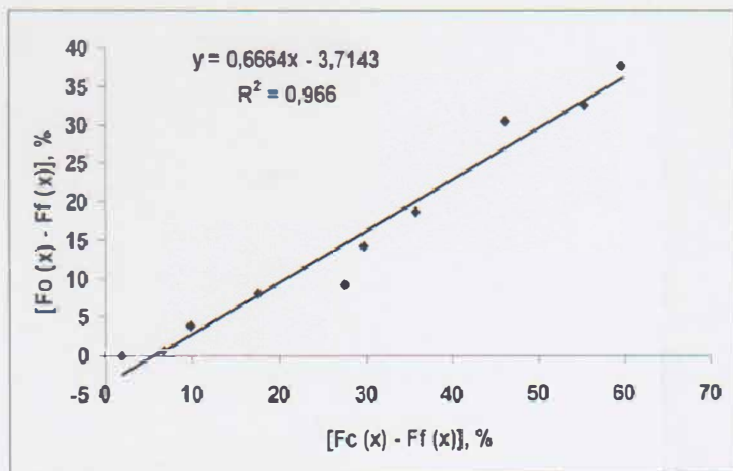


Fig. 3.2 Gráfica para la determinación de la eficiencia del separador.

En la fig. 3.2 la pendiente de la recta nos da directamente el valor de la eficiencia  $\psi$ , luego  $\psi = 66,6 \%$  para un flujo de aire, con una inclinación de las paletas de  $4^\circ$ .

### 3.2.6- Cálculo de la carga circulante.

Según la metodología explicada, determinamos la carga circulante mediante la relación:

$$C = \frac{(\alpha - \beta)}{(\theta - \alpha)} 100$$

En nuestro caso, los valores promedios de contenidos de la clase  $-0,074$  son:

$$\alpha = 61,29 \% ; \quad \beta = 95,47 \% \quad y \quad \theta = 33,68 \%$$

luego,

$$C = 123,8 \%$$

### 3.17- Balances de masa y de clase

Para el balance de masa, según el circuito que presentamos en (2.2.-), tenemos.

$$Q_3 = Q_4 + Q_5$$

en nuestro caso,



$$Q_4 = Q_1 = 50 \text{ t/h}$$

$$Q_5 = C \cdot Q_4 = 61,9 \text{ t/h}$$

$$Q_3 = 111,9 \text{ t/h}$$

Para el balance de clase, tenemos

$$\alpha Q_3 = \beta Q_4 + \theta Q_5$$

$$0,61 Q_3 = 0,95 Q_4 + 0,33 Q_5$$

$$68,0 \approx 68,2$$

### **3.3.- Comportamiento del sistema con un flujo bajo de aire hacia el molino y el mayor ángulo de inclinación de las paletas del clasificador.**

Exponemos a continuación los resultados experimentales obtenidos al ajustar el flujo de aire hacia el molino a un valor de  $55003 \text{ m}^3 / \text{h}$ , que corresponde a la posición de un 70 % en el instrumento indicador que se encuentra ubicado en el panel de control de la válvula de distribución del flujo del ventilador de recirculación, y las paletas del clasificador inclinadas hacia la posición de  $6^\circ$ .

#### **3.3.1.- Caracterización del mineral de entrada al molino**

En las tablas 3.37 a 3.39, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral de entrada al molino durante la realización de las pruebas.





Tabla 3.37 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral de entrada al molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^0$  y  $Q_a = 70 \%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |        |            |        |
|------------|--------------------------------|--------|------------|--------|
|            | 21200                          | 21200  | 20400      | 20500  |
|            | Distribución de los pesos en g |        |            |        |
|            | 1                              | 2      | 3          | 4      |
| 40         | 304                            | 178    | 346,7      | 106,7  |
| 25         | 484                            | 47     | 324        | 457    |
| 20         | 186                            | 154    | 300        | 376    |
| 18         | 317                            | 231    | 338,2      | 300    |
| 10         | 730,4                          | 570,5  | 598        | 614    |
| 8          | 344                            | 410    | 295        | 268,3  |
| 5          | 901,7                          | 1588   | 710,2      | 849    |
| 3,5        | 1260,4                         | 2528,6 | 1156,3     | 1499   |
| 3          | 50,4                           | 154    | 75         | 100    |
| 1,6        | 4293,1                         | 5734,2 | 4162,8     | 4785,3 |
| 1          | 3218,3                         | 2381,7 | 2892,3     | 3071,4 |
| 0,8        | 1622,2                         | 726,8  | 1255,2291  | 1806,2 |
| 0,6        | 2514,8                         | 759,4  | 1643,29611 | 1320,8 |
| 0,42       | 1278,2                         | 732,2  | 970,646621 | 846,5  |
| 0,3        | 167,2                          | 433,9  | 684,147766 | 316,9  |
| 0,2        | 639,1                          | 473,0  | 383,27606  | 440,3  |
| 0,16       | 369,6                          | 353,6  | 0          | 295,7  |
| 0,074      | 699,8                          | 797,3  | 547,126575 | 460,5  |
| 0,044      | 213,0                          | 433,9  | 383,27606  | 276,3  |
| -0,044     | 1606,9                         | 2512,9 | 3334,5     | 2310,1 |



Tabla 3.38. Distribución de los pesos a partir del tamaño de 8 mm.

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |        |            |         |
|------------|--------------------------------|--------|------------|---------|
|            | 19178,6                        | 20019  | 18493,1    | 18646,3 |
|            | Distribución de los pesos en g |        |            |         |
|            | 1                              | 2      | 3          | 4       |
| 8          | 344                            | 410    | 295        | 268,3   |
| 5          | 901,7                          | 1588   | 710,2      | 849     |
| 3,5        | 1260,4                         | 2528,6 | 1156,3     | 1499    |
| 3          | 50,4                           | 154    | 75         | 100     |
| 1,6        | 4293,1                         | 5734,2 | 4162,8     | 4785,3  |
| 1          | 3218,3                         | 2381,7 | 2892,3     | 3071,4  |
| 0,8        | 1622,2                         | 726,8  | 1255,2291  | 1806,2  |
| 0,6        | 2514,8                         | 759,4  | 1643,29611 | 1320,8  |
| 0,42       | 1278,2                         | 732,2  | 970,646621 | 846,5   |
| 0,3        | 167,2                          | 433,9  | 684,147766 | 316,9   |
| 0,2        | 639,1                          | 473,0  | 383,27606  | 440,3   |
| 0,16       | 369,6                          | 353,6  | 0          | 295,7   |
| 0,074      | 699,8                          | 797,3  | 547,126575 | 460,5   |
| 0,044      | 213,0                          | 433,9  | 383,27606  | 276,3   |
| -0,044     | 1606,9                         | 2512,9 | 3334,5     | 2310,1  |

Tabla 3.39 Resumen de la distribución en peso para el mineral de entrada al molino, en %.

| Tamaño, mm | Distribución de pesos, en % |       |       |      |
|------------|-----------------------------|-------|-------|------|
|            | 1                           | 2     | 3     | 4    |
| 0,16       | 86,8                        | 81,3  | 76,93 | 83,7 |
| 0,074      | 3,6                         | 3,98  | 2,95  | 2,46 |
| 0,044      | 1,11                        | 2,16  | 2,07  | 1,48 |
| -0,044     | 8,37                        | 12,55 | 18,03 | 12,3 |

**3.3.2.- Caracterización del mineral a la salida del molino.**

En las tablas 3.40 y 3.41, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral a la salida del molino durante la realización de las pruebas.

Tabla 3.40 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral a la salida del molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^0$  y  $Q_a = 70 \%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 900                            | 900   | 900   | 900   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     |
| 1          | 4,1                            | 8,6   | 3,9   | 6,7   |
| 0,8        | 18,1                           | 40    | 27    | 33,5  |
| 0,6        | 35,7                           | 47    | 42,4  | 57,1  |
| 0,42       | 10                             | 16,2  | 15,5  | 9,8   |
| 0,3        | 45,7                           | 60    | 61,9  | 50    |
| 0,2        | 44,9                           | 42,3  | 41,5  | 43,2  |
| 0,16       | 210                            | 180   | 130   | 132,8 |
| 0,074      | 100                            | 120   | 50    | 63,6  |
| 0,044      | 15,2                           | 30    | 16,1  | 36,2  |
| -0,044     | 416,3                          | 355,9 | 511,7 | 467,1 |

Tabla 3.41 Resumen de la distribución en peso para el mineral a la salida del molino, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |        |        |       |
|------------|---------------------------------|--------|--------|-------|
|            | 1                               | 2      | 3      | 4     |
| 0,16       | 4095                            | 4379   | 3579   | 3701  |
| 0,074      | 1111                            | 1333,3 | 555,5  | 706,6 |
| 0,044      | 169                             | 333,3  | 178,8  | 402,2 |
| -0,044     | 4626                            | 3954,4 | 5685,5 | 5190  |



### 3.3.3.- Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).

El mineral que retorna al molino sale del clasificador a través del cono interior y del cono exterior, para luego unirse en una sola tubería y formar el haz grueso. En las tablas 3.42 a la 3.43, mostramos los resultados obtenidos para el cono interior.

Tabla 3.42 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono interior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 500                            | 500   | 500   | 500   | 500   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 34                             | 46,8  | 33,9  | 54,6  | 53,6  |
| 0,8        | 16,7                           | 20    | 15,8  | 16,7  | 21,9  |
| 0,6        | 30                             | 30    | 26    | 29    | 36,8  |
| 0,42       | 82,2                           | 66,9  | 54,3  | 51,8  | 48    |
| 0,3        | 8,1                            | 10    | 12    | 14,9  | 18,4  |
| 0,2        | 16,5                           | 25,4  | 30    | 25,3  | 28    |
| 0,16       | 14,9                           | 21,3  | 30    | 28,9  | 27    |
| 0,074      | 68,4                           | 87,9  | 98    | 82,8  | 80    |
| 0,044      | 27,3                           | 36,1  | 37,5  | 27,1  | 30    |
| -0,044     | 201,9                          | 155,6 | 162,5 | 168,9 | 156,3 |

3.43. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono interior del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |      |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3    | 4     | 5     |
| 0,16       | 40,48                           | 44,08 | 40,4 | 44,24 | 46,74 |
| 0,074      | 13,68                           | 17,58 | 19,6 | 16,56 | 16    |
| 0,044      | 5,46                            | 7,22  | 7,5  | 5,42  | 6     |
| -0,044     | 40,38                           | 31,12 | 32,5 | 33,78 | 31,26 |





Tabla 3.44 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono exterior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 500                            | 500   | 500   | 500   | 500   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          |                                | 60    | 71,9  | 75    | 90    |
| 0,8        |                                | 5,8   | 5,8   | 12,8  | 13,1  |
| 0,6        |                                | 24,4  | 25,8  | 36,1  | 33,6  |
| 0,42       |                                | 50    | 33,4  | 66,3  | 43    |
| 0,3        |                                | 8,1   | 11,6  | 13    | 7,4   |
| 0,2        |                                | 40    | 47,8  | 45,8  | 44,8  |
| 0,16       |                                | 30    | 38,2  | 31,3  | 34,1  |
| 0,074      |                                | 92,1  | 71,5  | 70    | 75,2  |
| 0,044      |                                | 20    | 28,1  | 25,2  | 32,4  |
| -0,044     |                                | 169,2 | 165,9 | 124,5 | 124,5 |

Tabla 3.45. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono exterior del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |      |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4    | 5     |
| 0,16       |                                 | 43.66 | 46.9  | 56.6 | 53.2  |
| 0,074      |                                 | 18.42 | 14.3  | 14   | 15.04 |
| 0,044      |                                 | 4,0   | 5.62  | 5.04 | 6.48  |
| -0,044     |                                 | 33.84 | 33.18 | 24.9 | 24.9  |

En la tabla 3.46 mostramos el resultado estimado de la granulometría del mineral que forma el haz grueso, formado por los haces del cono interior y del cono exterior.



Tabla 3.46. Composición granulométrica del mineral de retorno al molino, teniendo en cuenta el resultado de los dos conos del clasificador.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |        |        |        |
|------------|---------------------------------|--------|--------|--------|
|            | 1                               | 2      | 3      | 4      |
| 1          | 17                              | 53,40  | 52,90  | 64,80  |
| 0,8        | 8,35                            | 12,90  | 10,80  | 14,75  |
| 0,6        | 15                              | 27,20  | 25,90  | 32,55  |
| 0,42       | 41,1                            | 58,45  | 43,85  | 59,05  |
| 0,3        | 4,05                            | 9,05   | 11,80  | 13,95  |
| 0,2        | 8,25                            | 32,70  | 38,90  | 35,55  |
| 0,16       | 7,45                            | 25,65  | 34,10  | 30,10  |
| 0,074      | 34,2                            | 90,00  | 84,75  | 76,40  |
| 0,044      | 13,65                           | 28,05  | 32,80  | 26,15  |
| -0,044     | 100,95                          | 162,40 | 164,20 | 146,70 |

### 3.3.4.- Caracterización del producto.

El material que sale del clasificador pasa en primer lugar hacia el ciclón primario y luego el material más fino pasa al ciclón secundario. En las tablas 3.47 y 3.48 mostramos el comportamiento de la granulometría en el ciclón primario y en las tablas 3.49 y 3.50, el comportamiento en el ciclón secundario.

Tabla 3.47 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón primario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |      |      |      |      |
|------------|--------------------------------|------|------|------|------|
|            | 150                            | 150  | 150  | 150  | 150  |
|            | Distribución de los pesos en g |      |      |      |      |
|            | 1                              | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 0,16       | 22,7                           | 24,3 | 23,6 | 20   | 24,9 |
| 0,074      | 1,6                            | 28,7 | 1    | 2,2  | 21,5 |
| 0,044      | 40                             | 36,3 | 40   | 47,6 | 41,5 |
| -0,044     | 85,7                           | 60,7 | 85,4 | 80,2 | 62,1 |



Tabla 3.48 Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón primario, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |      |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5    |
| 0,16       | 15,13                           | 16,2  | 15,73 | 13,3  | 16,6 |
| 0,074      | 1,06                            | 19,13 | 0,66  | 1,46  | 14,3 |
| 0,044      | 26,6                            | 24,2  | 26,66 | 31,73 | 27,6 |
| -0,044     | 57,13                           | 40,46 | 56,93 | 53,46 | 41,4 |

Tabla 3.49. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón secundario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 6^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |     |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-----|
|            | 150                            | 150   | 150   | 150   | 150 |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |     |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5   |
| 0,074      | 2,3                            | 1,2   | 1,4   | 3     | 0   |
| 0,044      | 1,2                            | 0,9   | 0,4   | 0,4   | 0   |
| -0,044     | 146,5                          | 147,9 | 148,2 | 146,6 | 150 |

Tabla 3.50. Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón secundario, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |      |      |       |     |
|------------|---------------------------------|------|------|-------|-----|
|            | 1                               | 2    | 3    | 4     | 5   |
| 0,074      | 1,53                            | 0,8  | 0,93 | 2     | 0   |
| 0,044      | 0,8                             | 0,6  | 0,26 | 0,26  | 0   |
| -0,044     | 97,6                            | 98,6 | 98,8 | 97,73 | 100 |

Obtenemos el haz de fino del clasificador como la media ponderada de las granulometrías del mineral en las descargas de los ciclones primario y secundario, como mostramos en la tabla 3.51.



Tabla 3.51 Composición granulométrica del producto, en %.

| Tamaño. mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 22,7                            | 24,3  | 23,6  | 20    | 24,9  |
| 0,074      | 1,95                            | 14,95 | 1,20  | 2,60  | 10,75 |
| 0,044      | 20,60                           | 18,60 | 20,20 | 24,00 | 20,75 |
| -0,044     | 72,03                           | 67,53 | 71,10 | 64,97 | 65,70 |

**3.3.5. - Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador .**

En las tablas 3.52, 3.53y 3.54 mostramos los resultados de los cálculos preliminares realizados para la determinación de  $\psi$ .

Tabla 3.52. Cálculos de  $[F_c(x) - F_f(x)]$  para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. mm | $[F_c(x) - F_f(x)]$ , % |        |        |        |        |
|------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
|            | 1                       | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1          | 17                      | 53,40  | 52,9   | 64,8   | 71,8   |
| 0,8        | 25,35                   | 66,30  | 63,7   | 79,55  | 89,3   |
| 0,6        | 40,35                   | 93,50  | 89,6   | 112,1  | 124,5  |
| 0,42       | 81,45                   | 151,95 | 133,45 | 171,15 | 170    |
| 0,3        | 85,5                    | 161,00 | 145,25 | 185,1  | 182,9  |
| 0,2        | 93,75                   | 193,70 | 184,15 | 220,65 | 219,3  |
| 0,16       | 78,50                   | 195,05 | 194,65 | 230,75 | 224,95 |
| 0,074      | 110,75                  | 270,10 | 278,20 | 304,55 | 291,80 |
| 0,044      | 103,80                  | 279,55 | 290,80 | 306,70 | 302,25 |
| -0,044     | 132,72                  | 374,62 | 383,90 | 388,43 | 377,90 |



Tabla 3.53. Cálculos de  $[F_o(x) - F_f(x)]$ , para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. mm | $[F_o(x) - F_f(x)]$ , % |       |       |       |       |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 0,46                    | 0,96  | 0,43  | 0,74  | 0,37  |
| 0,8        | 2,47                    | 5,40  | 3,43  | 4,46  | 2,31  |
| 0,6        | 6,44                    | 10,62 | 8,14  | 10,80 | 5,64  |
| 0,42       | 7,55                    | 12,42 | 9,86  | 11,89 | 6,42  |
| 0,3        | 12,63                   | 19,11 | 16,74 | 17,45 | 10,86 |
| 0,2        | 17,62                   | 23,81 | 21,36 | 22,25 | 15,30 |
| 0,16       | 18,25                   | 19,51 | 12,20 | 17,01 | 6,53  |
| 0,074      | 27,41                   | 17,89 | 16,56 | 21,48 | 5,78  |
| 0,044      | 8,50                    | 2,62  | 1,85  | 1,50  | 13,14 |
| -0,044     | 17,27                   | 25,37 | 16,09 | 11,57 | 21,12 |

Tabla 3.54 Valores promedios de las funciones para el cálculo de la eficiencia.

| Tamaño | $[F_c(x) - F_f(x)]$ | $[F_o(x) - F_f(x)]$ |
|--------|---------------------|---------------------|
| 1      | 51,98               | 0,592               |
| 0,8    | 64,84               | 3,614               |
| 0,6    | 92,01               | 8,328               |
| 0,42   | 141,6               | 9,628               |
| 0,3    | 151,95              | 15,358              |
| 0,2    | 182,31              | 20,068              |
| 0,16   | 184,78              | 14,70               |
| 0,074  | 251,08              | 17,82               |
| 0,044  | 256,62              | 0,47                |
| -0,044 | 331,51              | 18,28               |



En la fig 3.3. mostramos la gráfica correspondiente a los datos de la tabla 3.54, y que nos permite conocer la eficiencia del separador para las condiciones analizadas.

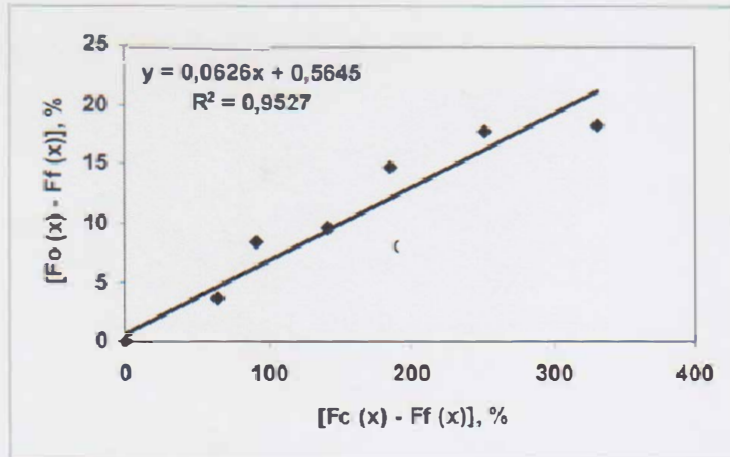


Fig. 3.3 Gráfica para la determinación de la eficiencia del separador.

En la fig. 3.3 la pendiente de la recta nos da directamente el valor de la eficiencia  $\psi$ , luego  $\psi = 6,2\%$  para un flujo de aire, con una inclinación de las paletas de  $6^\circ$ .

### 3.3.6- Cálculo de la carga circulante.

Según la metodología explicada, determinamos la carga circulante mediante la relación:

$$C = \frac{(\alpha - \beta)}{(\theta - \alpha)} 100$$

En nuestro caso, los valores promedios de contenidos de la clase -0.074 son:

$$\alpha = 89,1\% \quad ; \quad \beta = 169,53\% \quad y \quad \theta = 52,99\%$$

luego,

$$C = 222,7\%.$$

### 3.3.7- Balances de masa y de clase.

Para el balance de masa, según el circuito que presentamos en (2.2.-), tenemos.

$$Q_3 = Q_4 + Q_5$$

en nuestro caso,



$$Q_4 = Q_1 = 76,32 \text{ t/h}$$

$$Q_5 = C \quad Q_4 = 169,4 \text{ t/h}$$

$$Q_3 = 245,7 \text{ t/h}$$

Para el balance de clase, tenemos

$$\alpha Q_3 = \beta Q_4 + \theta Q_5$$

$$0,89 Q_3 = 1,69 Q_4 + 0,53 Q_5$$

$$218,7 \approx 218,8$$

### **3.4 .- Comportamiento del sistema con un flujo bajo de aire hacia el molino (70), con un ángulo mínimo de inclinación de las paletas del clasificador(4°) .**

Exponemos a continuación los resultados experimentales obtenidos al ajustar el flujo de aire hacia el molino, que corresponde a la posición de un 70 % en el instrumento indicador que se encuentra ubicado en el panel de control de la válvula de distribución del flujo del ventilador de recirculación, y las paletas del clasificador inclinadas hacia la posición de 4 °.

#### **3.4.1.- Caracterización del mineral de entrada al molino**

En las tablas 3.55 a 3.57, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral de entrada al molino durante la realización de las pruebas.



Tabla 3.55. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral de entrada al molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |        |        |        |
|------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|            | 14000                          | 16200  | 14700  | 14000  |
|            | Distribución de los pesos en g |        |        |        |
|            | 1                              | 2      | 3      | 4      |
| 40         | 87                             | 344    | 751    | 320    |
| 25         | 181                            | 490,6  | 417,1  | 220,6  |
| 20         | 144                            | 124    | 156,4  | 196,4  |
| 18         | 164                            | 130    | 128,8  | 177    |
| 10         | 355                            | 454    | 411,7  | 440    |
| 8          | 184                            | 217,4  | 194    | 225    |
| 5          | 561,4                          | 681,2  | 561    | 576    |
| 3,5        | 824                            | 905,2  | 620    | 574    |
| 3          | 37                             | 37,7   | 34     | 40,5   |
| 1,6        | 2983,5                         | 2743   | 2248,9 | 2196,1 |
| 1          | 2245                           | 2926,7 | 2279,6 | 2207   |
| 0,8        | 579,4                          | 855,6  | 648,6  | 1206,8 |
| 0,6        | 825,1                          | 1096,4 | 1146,3 | 1410,4 |
| 0,42       | 801,3                          | 1066,0 | 805,8  | 1007,6 |
| 0,3        | 350,2                          | 317,4  | 201,9  | 297,1  |
| 0,2        | 377,7                          | 495,6  | 486,4  | 436,9  |
| 0,16       | 252,1                          | 385,2  | 325,9  | 305,8  |
| 0,074      | 608,7                          | 782,5  | 457,2  | 375,8  |
| 0,044      | 312,6                          | 337,4  | 544,0  | 353,0  |
| -0,044     | 2127                           | 1810,3 | 2281,3 | 1434   |





Tabla 3.56. Distribución de los pesos a partir del tamaño de 8 mm.

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |         |        |        |
|------------|--------------------------------|---------|--------|--------|
|            | 13069                          | 14657,5 | 12835  | 12646  |
|            | Distribución de los pesos en g |         |        |        |
|            | 1                              | 2       | 3      | 4      |
| 8          | 184                            | 217,4   | 194    | 225    |
| 5          | 561,4                          | 681,2   | 561    | 576    |
| 3,5        | 824                            | 905,2   | 620    | 574    |
| 3          | 37                             | 37,7    | 34     | 40,5   |
| 1,6        | 2983,5                         | 2743    | 2248,9 | 2196,1 |
| 1          | 2245                           | 2926,7  | 2279,6 | 2207   |
| 0,8        | 579,4                          | 855,6   | 648,6  | 1206,8 |
| 0,6        | 825,1                          | 1096,4  | 1146,3 | 1410,4 |
| 0,42       | 801,3                          | 1066,0  | 805,8  | 1007,6 |
| 0,3        | 350,2                          | 317,4   | 201,9  | 297,1  |
| 0,2        | 377,7                          | 495,6   | 486,4  | 436,9  |
| 0,16       | 252,1                          | 385,2   | 325,9  | 305,8  |
| 0,074      | 608,7                          | 782,5   | 457,2  | 375,8  |
| 0,044      | 312,6                          | 337,4   | 544,0  | 353,0  |
| -0,044     | 2127                           | 1810,3  | 2281,3 | 1434   |

Tabla 3.57. Resumen de la distribución en peso para el mineral de entrada al molino, en %.

| Tamaño, mm | Distribución de pesos, en % |       |       |       |
|------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                           | 2     | 3     | 4     |
| 0,16       | 76,67                       | 80    | 74,42 | 82,89 |
| 0,074      | 4,65                        | 5,33  | 3,56  | 2,97  |
| 0,044      | 2,38                        | 2,30  | 4,23  | 2,79  |
| -0,044     | 16,27                       | 12,35 | 17,77 | 11,33 |

**3.4.2.- Caracterización del mineral a la salida del molino.**

En las tablas 3.58 y 3.59, mostramos los resultados obtenidos en cuanto a la composición granulométrica del mineral a la salida del molino durante la realización de las pruebas.

Tabla 3.58. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral a la salida del molino, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^0$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 900                            | 900   | 900   | 900   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     |
| 1          | 4,2                            | 4,2   | 3,1   | 2,9   |
| 0,8        | 25,7                           | 14,8  | 16,5  | 24,2  |
| 0,6        | 49                             | 28,5  | 25,3  | 32,2  |
| 0,42       | 10                             | 6,1   | 10    | 10    |
| 0,3        | 43,6                           | 42,1  | 43,7  | 50    |
| 0,2        | 42,7                           | 40    | 40    | 40    |
| 0,16       | 237                            | 165,3 | 189,6 | 200   |
| 0,074      | 153                            | 104,1 | 110   | 105,9 |
| 0,044      | 21,4                           | 22    | 23,6  | 19,5  |
| -0,044     | 314                            | 472,9 | 438,2 | 415,3 |

Tabla 3.59. Resumen de la distribución en peso para el mineral a la salida del molino, en %.

| Tamaño. Mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     |
| 0,16       | 45,79                           | 33,44 | 36,46 | 39,92 |
| 0,074      | 17                              | 11,56 | 12,22 | 11,76 |
| 0,044      | 2,37                            | 2,44  | 2,62  | 2,16  |
| -0,044     | 34,88                           | 52,54 | 48,68 | 46,14 |



### 3.4.3.- Caracterización del mineral en el haz grueso del clasificador (retorno al molino).

El mineral que retorna al molino sale del clasificador a través del cono interior y del cono exterior, para luego unirse en una sola tubería y formar el haz grueso. En las tablas 3.60 a la 3.61, mostramos los resultados obtenidos para el cono interior.

Tabla 3.60. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono interior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 500                            | 500   | 500   | 500   | 500   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 20                             | 29,3  | 24,2  | 16,5  | 20    |
| 0,8        | 8,4                            | 12    | 11,5  | 10    | 6     |
| 0,6        | 20                             | 23,9  | 23,4  | 25,5  | 15,8  |
| 0,42       | 37,5                           | 50    | 40    | 32,2  | 46,3  |
| 0,3        | 13,3                           | 14,2  | 13,6  | 12,6  | 13    |
| 0,2        | 31                             | 27,5  | 31,4  | 48,3  | 23,5  |
| 0,16       | 37,1                           | 33,2  | 25,8  | 31,9  | 26,8  |
| 0,074      | 120                            | 108,4 | 94,5  | 112,7 | 86,2  |
| 0,044      | 47,4                           | 41,1  | 31,8  | 40,9  | 25,7  |
| -0,044     | 165,3                          | 160,4 | 203,8 | 169,4 | 236,7 |

3.61. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono interior del clasificador.

| Tamaño. Mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 33,46                           | 38,02 | 33,98 | 35,40 | 30,28 |
| 0,074      | 24,0                            | 21,68 | 18,90 | 22,54 | 17,24 |
| 0,044      | 9,48                            | 8,22  | 6,36  | 8,18  | 5,14  |
| -0,044     | 33,06                           | 32,08 | 40,76 | 33,88 | 47,34 |



Tabla 3.62. Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en el cono exterior del clasificador, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |      |       |      |       |
|------------|--------------------------------|------|-------|------|-------|
|            | 500                            | 500  | 500   | 505  | 508,3 |
|            | Distribución de los pesos en g |      |       |      |       |
|            | 1                              | 2    | 3     | 4    | 5     |
| 1          | 31,6                           | 144  | 28,9  | 142  | 42,4  |
| 0,8        | 10                             | 13   | 4,7   | 7,4  | 10    |
| 0,6        | 30                             | 50   | 13,1  | 30   | 28,5  |
| 0,42       | 90                             | 40   | 13,8  | 69,8 | 41,7  |
| 0,3        | 4,3                            | 5,2  | 4,7   | 3,2  | 5,1   |
| 0,2        | 26,7                           | 32,8 | 13,3  | 34,7 | 22,3  |
| 0,16       | 37,5                           | 26,3 | 11    | 28   | 22,4  |
| 0,074      | 74                             | 69,7 | 30    | 92,9 | 70    |
| 0,044      | 30                             | 22,2 | 10    | 45,7 | 33,4  |
| -0,044     | 165,9                          | 96,8 | 370,5 | 46,3 | 232,2 |

Tabla 3.63. Resumen de la distribución en peso para el mineral en el cono exterior del clasificador.

| Tamaño, Mm | Distribución de los pesos, en % |       |      |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3    | 4     | 5     |
| 0,16       | 46,02                           | 62,26 | 17,9 | 63,02 | 34,48 |
| 0,074      | 14,8                            | 13,94 | 6    | 18,58 | 14    |
| 0,044      | 6                               | 4,44  | 2    | 9,14  | 6,68  |
| -0,044     | 33,18                           | 19,36 | 74,1 | 9,26  | 46,44 |

En la tabla 3.64 mostramos el resultado estimado de la granulometría del mineral que forma el haz grueso, formado por los haces del cono interior y del cono exterior.





Tabla 3.64. Composición granulométrica del mineral de retorno al molino, teniendo en cuenta el resultado de los dos conos del clasificador.

| Tamaño. Mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     |
| 1          | 5,16                            | 17,33 | 5,31  | 15,85 |
| 0,8        | 1,84                            | 2,50  | 1,62  | 1,74  |
| 0,6        | 5                               | 7,39  | 3,65  | 5,55  |
| 0,42       | 12,75                           | 9,00  | 5,38  | 10,2  |
| 0,3        | 1,76                            | 1,94  | 1,83  | 1,58  |
| 0,2        | 5,77                            | 6,03  | 4,47  | 8,3   |
| 0,16       | 7,46                            | 5,95  | 3,68  | 5,99  |
| 0,074      | 19,4                            | 17,81 | 12,45 | 20,56 |
| 0,044      | 7,74                            | 6,33  | 4,18  | 8,66  |
| -0,044     | 33,12                           | 25,72 | 57,43 | 21,57 |

#### 3.4.4.- Caracterización del producto.

El material que sale del clasificador pasa en primer lugar hacia el ciclón primario y luego el material más fino pasa al ciclón secundario. En las tablas 3.65 y 3.66 mostramos el comportamiento de la granulometría en el ciclón primario y en las tablas 3.67 y 3.68, el comportamiento en el ciclón secundario.

Tabla 3.65 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón primario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^\circ$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |      |      |      |      |
|------------|--------------------------------|------|------|------|------|
|            | 150                            | 150  | 150  | 150  | 150  |
|            | Distribución de los pesos en g |      |      |      |      |
|            | 1                              | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 0,16       | 13,6                           | 17   | 17,6 | 16,7 | 20,5 |
| 0,074      | 12,1                           | 11,7 | 16,9 | 11   | 11   |
| 0,044      | 48,3                           | 45,7 | 43,7 | 41,9 | 44,5 |
| -0,044     | 76                             | 75,6 | 71,8 | 80,4 | 74   |



Tabla 3.66 Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón primario, en %.

| Tamaño. Mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 9,06                            | 11,33 | 11,73 | 11,13 | 13,66 |
| 0,074      | 8,06                            | 7,8   | 11,26 | 7,33  | 7,33  |
| 0,044      | 32,2                            | 30,46 | 29,13 | 27,93 | 29,66 |
| -0,044     | 50,66                           | 50,4  | 47,86 | 53,6  | 49,33 |

Tabla 3.67 Distribución de los pesos, según las clases de tamaños, en gramos, para el mineral en la descarga del ciclón secundario, durante la realización de la prueba con  $\alpha = 4^0$  y  $Q_a = 70\%$ .

| Tamaño, mm | Peso de las muestras en g      |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 130                            | 150   | 150   | 150   | 150   |
|            | Distribución de los pesos en g |       |       |       |       |
|            | 1                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,074      | 1,8                            | 1,2   | 1,7   | 1,6   | 0,5   |
| 0,044      | 2,9                            | 2,6   | 1,8   | 2,5   | 3,7   |
| -0,044     | 125,3                          | 146,2 | 146,5 | 145,9 | 145,8 |

Tabla 3.68 Composición granulométrica del mineral en la descarga del ciclón secundario, en %.

| Tamaño. Mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |      |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5    |
| 0,074      | 1,38                            | 0,8   | 1,13  | 1,06  | 0,33 |
| 0,044      | 2,23                            | 1,73  | 1,2   | 1,66  | 2,46 |
| -0,044     | 96,38                           | 97,46 | 97,66 | 97,26 | 97,2 |

Obtenemos el haz de fino del clasificador como la media ponderada de las granulometrías del mineral en las descargas de los ciclones primario y secundario, como mostramos en la tabla 3.69.



Tabla 3.69 Composición granulométrica del producto en %.

| Tamaño. Mm | Distribución de los pesos, en % |       |       |       |       |
|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,16       | 9,06                            | 11,33 | 11,73 | 11,13 | 13,66 |
| 0,074      | 4,72                            | 4,30  | 6,20  | 4,20  | 3,83  |
| 0,044      | 17,22                           | 16,10 | 15,17 | 14,80 | 16,06 |
| -0,044     | 72,03                           | 67,53 | 71,10 | 64,97 | 65,70 |

### 3.4.5. - Cálculo de la eficiencia total (yield) del clasificador .

Para el cálculo de la eficiencia  $\psi$ , empleamos el método que especificamos. En las tablas 3.70, 3.71 y 3.72 mostramos los resultados de los cálculos preliminares realizados para la determinación de  $\psi$ .

Tabla 3.70. Cálculos de  $[F_c(x) - F_f(x)]$  para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. Mm | $[F_c(x) - F_f(x)]$ , % |       |       |       |       |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1          | 5,16                    | 17,33 | 5,31  | 15,85 | 6,24  |
| 0,8        | 7                       | 19,83 | 6,93  | 17,59 | 7,84  |
| 0,6        | 12                      | 27,22 | 10,58 | 23,14 | 12,27 |
| 0,42       | 24,75                   | 36,22 | 15,96 | 33,34 | 21,07 |
| 0,3        | 26,51                   | 38,16 | 17,79 | 34,92 | 22,88 |
| 0,2        | 32,28                   | 44,19 | 22,26 | 43,22 | 27,46 |
| 0,16       | 30,68                   | 38,81 | 14,21 | 38,08 | 18,72 |
| 0,074      | 45,36                   | 52,32 | 20,47 | 54,45 | 30,51 |
| 0,044      | 35,89                   | 42,56 | 9,48  | 48,31 | 20,36 |
| -0,044     | 3,03                    | 0,75  | 4,19  | 4,91  | 1,55  |

Tabla 3.71. Cálculos de  $[F_o(x) - F_f(x)]$ , para la determinación de  $\psi$ .

| Tamaño. Mm | $[F_o(x) - F_f(x)]$ , % |       |       |       |   |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|---|
|            | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5 |
| 1          | 0,47                    | 0,47  | 0,34  | 0,32  | - |
| 0,8        | 3,33                    | 2,11  | 2,17  | 3,31  | - |
| 0,6        | 8,77                    | 5,28  | 4,98  | 6,89  | - |
| 0,42       | 9,88                    | 5,96  | 6,09  | 8,00  | - |
| 0,3        | 14,72                   | 10,64 | 10,95 | 13,56 | - |
| 0,2        | 19,46                   | 15,08 | 15,39 | 18,00 | - |
| 0,16       | 36,73                   | 22,12 | 24,72 | 29,09 | - |
| 0,074      | 49,01                   | 29,39 | 30,75 | 36,67 | - |
| 0,044      | 34,18                   | 15,79 | 18,20 | 24,04 | - |
| -0,044     | 2,97                    | 0,80  | 4,21  | 5,21  | - |

Tabla 3.72 Valores promedios de las funciones para el cálculo de la eficiencia.

| Tamaño | $[F_c(x) - F_f(x)]$ | $[F_o(x) - F_f(x)]$ |
|--------|---------------------|---------------------|
| 1      | 6,85                | 0,91                |
| 0,8    | 9,92                | 4,09                |
| 0,6    | 17,70               | 8,32                |
| 0,42   | 27,70               | 9,24                |
| 0,3    | 29,68               | 14,37               |
| 0,2    | 35,68               | 18,76               |
| 0,16   | 28,06               | 28,17               |
| 0,074  | 40,58               | 36,45               |
| 0,044  | 31,29               | 23,05               |
| -0,044 | 0,03                | 0,29                |





En la fig 3.4 mostramos la gráfica correspondiente a los datos de la tabla 3.72, y que nos permite conocer la eficiencia del separador para las condiciones analizadas.

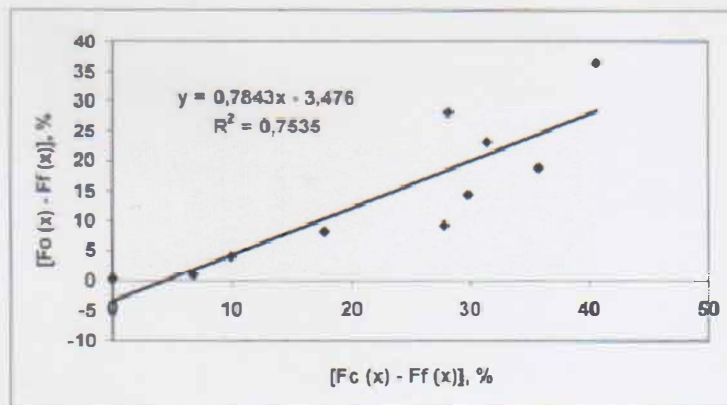


Fig. 3.4 Gráfica para la determinación de la eficiencia del separador.

En la fig. 3.4 la pendiente de la recta nos da directamente el valor de la eficiencia  $\psi$ , luego  $\psi = 78,4 \%$  para un flujo de aire, con una inclinación de las paletas de  $4^\circ$ .

#### 3.4.6- Cálculo de la carga circulante.

Según la metodología explicada, determinamos la carga circulante mediante la relación:

$$C = \frac{(\alpha - \beta)}{(\theta - \alpha)} 100$$

En nuestro caso, los valores promedios de contenidos de la clase  $-0.074$  son:

$$\alpha = 47,97 \% ; \beta = 84,12 \% \text{ y } \theta = 43,51 \%$$

luego,

$$C = 810,5 \%$$

#### 3.47- Balances de masa y de clase

Para el balance de masa, según el circuito que presentamos en (2.2.-), tenemos.

$$Q_3 = Q_4 + Q_5$$

en nuestro caso,

$$Q_4 = Q_1 = 53,01 \text{ t/h}$$

$$Q_5 = C \quad Q_4 = 429,3 \text{ t/h}$$

$$Q_3 = 482,3 \text{ t/h}$$



Para el balance de clase, tenemos

$$\alpha Q_3 = \beta Q_4 + \theta Q_5$$

$$0.48 Q_3 = 0.84 Q_4 + 0.43 Q_5$$

$$230.5 \approx 229.2$$

### **3.5.- Análisis de los resultados.**

1. Durante los días en que se realizaron las pruebas el mineral contenía gran cantidad de serpentina como se puede apreciar en las tablas de entrada al molino para las distintas combinaciones, se puede ver claramente el alto contenido de material en las clases más gruesas y los flujos de alimentación fueron relativamente bajos durante el periodo que duraron las pruebas.
2. Según los resultados obtenidos, el porciento de mineral a la salida del molino en los cuatros casos analizados está en un rango aceptable teniendo en cuenta que no sobrepasan el 75% de la carga, dentro de los cuatro casos se destaca la combinación con flujo de aire elevado(30%) y con el máxima ángulo de inclinación de las paletas del clasificador(6°), seguida muy de cerca por la combinación (30-4°), o sea un flujo de aire elevado y el menor ángulo de inclinación de las paletas del clasificador.
3. Analizando el comportamiento del mineral en los conos interiores y exteriores para cada combinación llegamos a la conclusión de que con un flujo de aire máximo y con la mínima inclinación de las paletas del clasificador (30-4°) se logra el menor retorno de mineral fino al molino, lo que trae consigo un menor consumo de energía y de tiempo.
4. Por los datos obtenidos en las pruebas realizadas en los ciclones primaros y secundarios podemos decir que en los ciclones secundarios prácticamente todo el mineral está por debajo de 0,044mm en las distintas combinaciones, lo cual es muy beneficioso para el proceso porque este mineral no necesita retornar al molino y en los ciclones primarios hay un alto contenido de material fino pero inferior al del los ciclones secundarios. En esta prueba se destaca la combinación (30-4°) por el alto contenido de partículas finas.



5. Al realizar el experimento factorial llegamos a la siguiente conclusión:

N: cantidad de experimentos

a: Número de factores =2

n: número de niveles =2

$$N=n^a=2^2$$

$$N=4$$

Qm = 30      Alfm = 6  
Qmin = 70      Alfmin = 4  
Qo = 50      Alfo = 5

Tabla 3.73 resultados del experimento factorial.

| Factores |      | Parámetros       |                   |                  |
|----------|------|------------------|-------------------|------------------|
| Q        | Alfa | $\gamma^{0.150}$ | $\gamma^{-0.074}$ | $\gamma^{0.044}$ |
| -1       | -1   | 11,38            | 84,13             | 68,26            |
| -1       | 1    | 23,1             | 89,09             | 68,26            |
| 1        | -1   | 2,9              | 95,47             | 85,08            |
| 1        | 1    | 13               | 83,1              | 68,26            |

Como se puede apreciar en la tabla anterior en la combinación (30-4°) aparece un porcentaje de material menor de 0,044mm superior al 75 % en la tolva final, por lo tanto ocurrió una sobremolienda y esto trae aparejado grandes gastos energéticos. Al apreciar las otras combinaciones llegamos a la conclusión de que el régimen de trabajo óptimo en este caso está dado por un flujo de aire máximo (30) con el mayor ángulo de separación de las paletas del clasificador (6°).



### 3.6.- Valoración económica.

En el presente trabajo no se realiza un análisis económico integral, solo se tiene en cuenta la influencia del consumo de energía eléctrica en los costos de producción, lo que da una visión de la posible implantación de este trabajo en la planta de preparación de mineral (sección de molienda) de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara.

Para un consumo específico de energía ( $W_e$ ) igual a 13 KWh/t con una productividad 80 t/h, la energía consumida diaria por una unidad de molienda completa (molino y ventilador) es de 24960 KWh (24,96 MWh).

Teniendo en cuenta que existen diferentes tarifas para consumos de energía

Horario día .....(6:00 AM a 7:00 PM).....0,056 USD.

Horario pico.....(7:00 PM a 11:00 PM).....0,065 USD.

Horario de madrugada...(11:00 PM a 6:00 AM).....0,037 USD.

El consumo de energía de una unidad de molienda por horario es

Horario día .....(6:00 AM a 7:00 PM).....13478,4 KWh...754,79 USD.

Horario pico.....(7:00 PM a 11:00 PM).....3993,6 KWh.....259,58 USD.

Horario de madrugada.....(11:00 PM a 6:00 AM)... .....8236,8 KWh.....304,76 USD.

Total diario consumido por unidad de molienda es de 1319,13 USD y el total mensual es de 39573,9 USD.

Durante el período que duro la toma de muestra la productividad promedio fue de 65 t/h y un consumo específico de energía de 13 KWh/t lográndose una producción de 1950 toneladas al mes( en una unidad de molienda) con un costo promedio por tonelada de 20,29 USD mientras que el consumo específico de energía para una productividad de 80 t/h es igual al anterior, obteniéndose una producción de 2400 toneladas al mes, con un costo promedio por tonelada de 16,48 USD, permitiendo una disminución de costo por tonelada del 18 %.

### 3.7.- Conclusiones del capítulo.

Después de analizado este capítulo llegamos a la conclusión de que la combinación más favorable para el tipo de material que se utilizó es el de mayor flujo de aire y el mayor ángulo de separación de las paletas del clasificador (30-6). Utilizando este régimen de trabajo se puede lograr una productividad de 80 t/h y disminuir en un 18 % los costos de producción por toneladas.





## **Conclusiones.**

Después de analizar los resultados llegamos a la conclusión de que:

1. Se logrará un mejor comportamiento de molienda con un flujo de aire máximo y el mayor ángulo de inclinación de las paletas del clasificador ( $30-6^0$ ).
2. El material observado tiene alto porcentaje de serpentina, no se cumple la norma  $3/4$  de limonita y un  $1/4$  de serpentina.
3. Los factores analizados influyen sobre el producto final, una regulación inadecuada pudiera traer una disminución de la producción de molienda y traería consigo un aumento del consumo específico de energía.



### **Recomendaciones.**

1. Que se continúe este estudio incluyendo un tercer factor, la productividad.
2. Cuando pase esta línea de mineral debe ponerse un flujo de aire máximo y el mayor ángulo de inclinación de las paletas del clasificador ( $30-6^0$ ).
3. Guiándose por los datos y resultados se debe maniobrar por el momento el flujo de aire y la posición de las paletas del clasificador hasta encontrar la adecuada.



## **Bibliografía.**

1. González Fernández Freddy, Estudio de las Características Energéticas de una Unidad de Molienda y Mineral Laterítico en la Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara, Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2000.
2. Milian López Yunaydi, Análisis de la Eficiencia Eléctrica de la Planta de Preparación de Mineral en la Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara, Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2000.
3. Laborde B. Reinaldo y Otros, Productividad y Eficiencia Energética en el Proceso de Molienda del Mineral Laterítico, Rev. Min y Geol, Vol. 17, No 2 CICT, ISMM, Moa, 2000.
4. Ramos Páez Néstor, Bombas, Ventiladores y Compresores, Editora ISPJAE, 1995.
5. Manual de Operaciones. Planta de Preparación del Mineral, 256,26, Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara, Moa, 2002.
6. Rodes Condís Alexis y Pérez Pérez Rodolfo, Comportamiento energético en la planta de molienda de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara, Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2003.
7. Núñez Gonzáles Yusmay y Pérez Gonzáles Solnier, Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico procedente de los yacimientos de Punta Gorda, Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2003.
8. Mitrofánov, S. "investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales". Editorial Mir, 1982.



## Anexos.

Aquí aparecen una serie de datos procedentes de distintas combinaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo.

Ciclón primario 30 - 5

| tamaño | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------|------|------|------|------|------|
| 0,16   | 10   | 10,7 | 11,4 | 11,7 | 11,8 |
| 0,074  | 22,7 | 23,1 | 22,7 | 23,8 | 23,6 |
| 0,044  | 20   | 21,4 | 18,8 | 21,6 | 20   |
| -0,044 | 97,3 | 94,8 | 97,1 | 92,9 | 94,6 |

Ciclón primario 50 - 4

| tamaño | 1    | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| 0,16   | 10   | 9,7   | 9,4   | 8,8   | 8     |
| 0,074  | 23,5 | 22,8  | 23,5  | 23,1  | 23,6  |
| 0,044  | 19,9 | 16,6  | 16,8  | 17,4  | 16,5  |
| -0,044 | 96,6 | 100,9 | 100,3 | 100,7 | 101,9 |

Ciclón primario 50 - 5

| tamaño | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------|------|------|------|------|------|
| 0,16   | 11,9 | 11,8 | 11,7 | 12,9 | 10   |
| 0,074  | 27,5 | 28,1 | 27   | 25,9 | 27,3 |
| 0,044  | 16,6 | 15,6 | 17,3 | 15,3 | 17   |
| -0,044 | 94   | 94,5 | 94   | 95,9 | 95,7 |

Ciclón primario 50 - 6

| tamaño | 1     | 2  | 3    | 4    | 5    |
|--------|-------|----|------|------|------|
| 0,16   | 8,8   | 11 | 10   | 12,4 | 8,9  |
| 0,074  | 20,5  | 21 | 23,1 | 22,6 | 20,9 |
| 0,044  | 14,8  | 30 | 26   | 21,8 | 28,5 |
| -0,044 | 105,9 | 88 | 90,9 | 93,2 | 91,7 |

Ciclón primario 70 - 5

| tamaño | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------|------|------|------|------|------|
| 0,16   | 10   | 11,8 | 10   | 11,3 | 11,3 |
| 0,074  | 23,6 | 24,3 | 22,9 | 23,8 | 24,5 |
| 0,044  | 21,2 | 21,4 | 21,5 | 21,1 | 20,8 |
| -0,044 | 95,2 | 92,5 | 95,6 | 93,8 | 93,4 |





Cono Exterior CE - 30-5

| tamaño | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1      | 30    | 37,8  | 38,3  | 44,1  | 43    |
| 0,8    | 12,2  | 15,1  | 15,3  | 22    | 10,9  |
| 0,6    | 25,5  | 20    | 32,1  | 35,6  | 40    |
| 0,42   | 35,7  | 54    | 51,1  | 65,8  | 61,7  |
| 0,3    | 11,9  | 6,5   | 10    | 8     | 13,4  |
| 0,2    | 44,1  | 45,6  | 50    | 44,8  | 47,1  |
| 0,16   | 35,6  | 40    | 50    | 31    | 42,2  |
| 0,074  | 82,3  | 91,6  | 102,5 | 64,7  | 94,9  |
| 0,044  | 25,4  | 55,2  | 20,8  | 33,1  | 30    |
| -0,044 | 197,3 | 134,2 | 129,9 | 150,9 | 116,8 |

Cono Exterior CE -50-4

| tamaño | 1     | 2    | 3     | 4     | 5    |
|--------|-------|------|-------|-------|------|
| 1      | 38    | 53,3 | 51,3  | 35    | 45,2 |
| 0,8    | 9,1   | 13,2 | 11,3  | 10    | 12,3 |
| 0,6    | 35,5  | 29,8 | 30,5  | 31,7  | 31,2 |
| 0,42   | 58,5  | 75,8 | 89,9  | 66,5  | 69,1 |
| 0,3    | 11,3  | 6,9  | 10,8  | 7     | 12,9 |
| 0,2    | 37,5  | 42,8 | 40,1  | 47,4  | 38,9 |
| 0,16   | 35,4  | 36,7 | 36,3  | 43    | 40,1 |
| 0,074  | 90,1  | 85,3 | 102,5 | 110   | 95,2 |
| 0,044  | 45,3  | 59,6 | 51,1  | 43,3  | 41,1 |
| -0,044 | 139,3 | 96,6 | 76,2  | 106,1 | 114  |

Cono Exterior CE -50-5 480 g

| tamaño | 1     | 2     | 3    | 4     | 5    |
|--------|-------|-------|------|-------|------|
| 1      | 82    | 80    | 80   | 70    | 51,7 |
| 0,8    | 16,5  | 12,7  | 16,9 | 14    | 10   |
| 0,6    | 46,8  | 47,8  | 50   | 36,2  | 37,1 |
| 0,42   | 47    | 40    | 65,2 | 51,4  | 40   |
| 0,3    | 10    | 10    | 14,4 | 8     | 5,8  |
| 0,2    | 40    | 36,2  | 48,4 | 38    | 40,5 |
| 0,16   | 27,2  | 21,7  | 40   | 28,3  | 32,8 |
| 0,074  | 68,2  | 80    | 75,2 | 72,8  | 90   |
| 0,044  | 35    | 30    | 85   | 33,2  | 41,1 |
| -0,044 | 107,3 | 121,6 | 4,9  | 128,1 | 131  |



CE -50-6

| Cono<br>Exterior | 500   | 500   | 500   | 500   | 457,4 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| tamaño           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1                | 39,6  | 46,2  | 58,2  | 50    | 35,1  |
| 0,8              | 15,1  | 17,5  | 12,9  | 21    | 10    |
| 0,6              | 32,5  | 31,9  | 45,9  | 38,5  | 30    |
| 0,42             | 69,3  | 57,5  | 70    | 61,5  | 46,3  |
| 0,3              | 16,4  | 20    | 14,4  | 30    | 10,4  |
| 0,2              | 43,3  | 45    | 58,5  | 50    | 40    |
| 0,16             | 28,8  | 31,3  | 45    | 32,7  | 30    |
| 0,074            | 75,4  | 63    | 105,3 | 80    | 59    |
| 0,044            | 22,2  | 23,3  | 20    | 25,1  | 29,4  |
| -0,044           | 157,4 | 164,3 | 69,8  | 111,2 | 167,2 |

CE -70 - 5

| Cono<br>Exterior | 500   | 500   | 500   | 400  | 420   |
|------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| tamaño           | 1     | 2     | 3     | 4    | 5     |
| 1                | 61,4  | 60    | 78,1  | 66,3 | 50    |
| 0,8              | 10    | 10,2  | 10    | 10   | 10    |
| 0,6              | 35,8  | 30    | 36,1  | 34,8 | 28    |
| 0,42             | 45,8  | 51,7  | 40    | 40   | 40    |
| 0,3              | 12,4  | 10    | 11    | 14,2 | 11,8  |
| 0,2              | 52    | 56,1  | 34,8  | 32   | 50    |
| 0,16             | 40    | 35,6  | 26    | 50   | 35,6  |
| 0,074            | 71,8  | 108,2 | 83,4  | 86   | 63,4  |
| 0,044            | 27,3  | 37,1  | 30    | 30   | 20    |
| -0,044           | 142,5 | 101,1 | 150,6 | 36,7 | 111,2 |