

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



“INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE MOLIENDA, PARA LA PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I.”

## TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

## INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

KARINA DEL PILAR ABAD LÉVANO

WILLY ALDO MARTÍNEZ HUAROC

LIMA – PERÚ

2009

A la memoria de Oscar Huaroc  
A mis dos madres: Silvia  
Quispe y María Huaroc,  
A mis amigos de UNMSM,  
quienes me apoyaron en un  
momento crucial de mi vida.

## DEDICATORIA

A la memoria de mis abuelitos  
Víctor Lévano, José Abad, y  
Clotilde Mendoza.

A mis padres y hermanos por  
su apoyo incondicional.

## AGRADECIMIENTO

Nuestros sinceros agradecimientos: a la Empresa **Cementos Lima S.A.** por el apoyo brindado para la realización de este proyecto; a la Gerencia General, a los Ingenieros Rubén Gilvonio y Emilio Palacio, por las facilidades dadas para el desarrollo de la parte experimental tanto en planta como en laboratorio, también al Ing. Rafael Medina por su motivación y asesoría técnica, así como al personal de la División de Control de Calidad y Producción por su apoyo en las diversas actividades. De la misma manera, a la empresa **Cemento Andino S.A.**, en especial al Ing. Víctor Hugo Cisneros por las facilidades brindadas en el uso del Granulómetro Láser. Por otro lado, agradecemos a la **Asociación de Productores de Cemento** (ASOCEM) por facilitarnos la bibliografía especializada.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Química y Textil, quienes con su experiencia nos han sabido guiar para el desarrollo de este trabajo, sin dejar de mencionar al Asesor Ing. Marcelo Astocondor; así como también al Ing. Gilberto García por su apoyo moral y asesoría académica.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	iv
RESUMEN.....	x
ABREVIATURAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE TABLAS.....	xvii
INDICE DE GRÁFICAS.....	xix
GLOSARIO.....	xx
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.1.1. Justificación del estudio.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivos Generales.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Metodología.....	4
1.4. Estructura de la Tesis.....	6

## CAPITULO 2

2.	CEMENTO PORTLAND.....	7
2.1.	Definición.....	7
2.2.	Componentes del Cemento Portland Tipo I.....	7
2.2.1.	Clínker.....	8
2.2.2.	Yeso.....	8
2.3.	Proceso de Fabricación del Cemento.....	9
2.4.	Tipos de Cemento.....	10
2.5.	Aplicaciones de los principales tipos de Cementos.....	11

## CAPÍTULO 3

3.	CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I.....	13
3.1.	Características del cemento.....	13
3.1.1.	Composición Química.....	13
3.1.1.1.	Composición química porcentual.....	13
3.1.1.2.	Composición potencial por fases.....	15
3.1.2.	Finura de molienda.....	20
3.2.	Propiedades del cemento.....	21
3.2.1.	Propiedades químicas del cemento.....	21
3.2.2.	Propiedades físicas y mecánicas del cemento.....	22

## CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN

EL CEMENTO.....	25
4.1. Variables químicas mineralógicas.....	25
4.2. Métodos usuales de análisis químico.....	26
4.2.1. Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X.....	26
4.2.2. Ensayos por difracción de Rayos X.....	28
4.3. Variables de superficie específica.....	30
4.4. Métodos para determinar la superficie específica.....	30
4.4.1. Método de Blaine.....	31
4.5. Variables de distribución de tamaño de partículas.....	33
4.6. Método para determinar tamaños de partículas.....	34
4.6.1. Tamizado.....	34
4.6.2. Separación por corriente de aire.....	35
4.6.3. Granulómetro Laser.....	36
4.7. Función de distribución de Rosin Rammler.....	37
4.8. Normalización del cemento portland.....	40

## CAPÍTULO 5

5. ESTUDIOS DE LOS MODELOS MATEMATICOS EN LA ETAPA DE MOLIENDA.....	42
5.1. Teoría Moderna de la Conminución.....	42
5.1.1. La molienda como un proceso unitario.....	44
5.1.1.1. Tiempos de residencia.....	45
5.1.1.2. Molino de bolas.....	48
5.1.2. Modelo Cinético general de conminución para un	

proceso Batch.....	50
5.1.3. Modelo Cinético General de conminución para un proceso continuo.....	52
5.1.4. Aproximación al Modelo de Mezcla Perfecta.....	53
5.1.5. Consideraciones del Modelo de Mezcla Perfecta para molinos cementeros.....	56
5.1.6. Función de Distribución de Fractura.....	58
5.2. Teoría Moderna de la Clasificación.....	60
5.2.1. Tipos de Separadores.....	61
5.2.1.1. Separadores de aire estático.....	61
5.2.1.2. Separadores de aire dinámico.....	62
5.2.2. Curvas de Partición.....	65
 CAPITULO 6.	
6. EJERCICIO PARA LA PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO- CASO INDUSTRIAL.....	68
6.1. Circuito de molienda base.....	68
6.2. Modelos aplicados.....	70
6.2.1. Molino de bolas.....	70
6.2.2. Separadora.....	71
6.2.3. Resistencia a la Compresión del Cemento.....	72
6.2.4. Superficie específica.....	72
6.3. Procedimientos y actividades desarrolladas.....	73
6.3.1. Molino de bolas.....	73

6.3.1.1.	Determinación de la Función de Fractura.	73
6.3.1.2.	Determinación de la Función Combinada.	80
6.3.1.3.	Determinación del modelo de clasificación interna.....	88
6.3.2.	Separadora.....	91
6.3.2.1.	Condiciones de operación.....	91
6.3.2.2.	Puntos de muestreo.....	92
6.3.2.3.	Determinación de los parámetros de la separadora.....	92
6.3.2.4.	Relación entre los parámetros y las variables de operación de la separadora...	92
6.3.3.	Modelo para la predicción de la Resistencia del cemento.....	94
6.3.3.1.	Muestreo.....	94
6.3.3.2.	Ensayos realizados.....	95
6.3.3.3.	Desarrollo del modelo matemático.....	104
6.3.4.	Modelo para la predicción de la superficie específica del cemento.....	107
6.3.4.1.	Muestreo.....	107
6.3.4.2.	Análisis de regresión.....	109
6.3.5.	Circuito de Molienda.....	110
6.3.5.1.	Variables del circuito de molienda.....	110
6.3.5.2.	Balance de masa.....	112
6.4.	Estudios de simulación.....	114

6.4.1. Predicción de la distribución granulométrica a la salida del circuito.....	115
6.4.2. Predicción de la superficie específica.....	117
6.4.3. Predicción de la resistencia a la compresión del cemento.....	117
CAPITULO 7	
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	121
APENDICES	
ANEXOS	
BIBLIOGRAFIA	

## RESUMEN

El presente trabajo muestra la influencia que tiene la distribución de los tamaños de partículas (DTP), en la resistencia a la compresión del cemento. Esta DTP es gobernada por la variabilidad del proceso de molienda. Por tal motivo, el objetivo de este estudio es predecir la resistencia del Cemento Portland Tipo I a las 24 horas, 3, 7 y 28 días sobre su base granulométrica, para lo cual es necesario estudiar el circuito de molienda.

Como primer punto, se estudiaron las características del cemento que influyen en la resistencia, teniendo para ello: información técnica, que relaciona esta propiedad con la fineza y la granulometría del material; además de los ensayos previos realizados que corroboran dicho sustento. Por consiguiente, el estudio de la distribución de tamaño de partículas, es un factor clave y necesario para el desarrollo del presente trabajo.

Considerando, que la granulometría del cemento depende estrictamente de la molienda de clínker, este estudio usa los fundamentos de la Teoría Moderna de la Conminución con el criterio de mezcla perfecta para modelar el molino de bolas; y la Teoría Moderna de Clasificación con la aproximación de Lippek-Espig para modelar la separadora de alta eficiencia que se encuentra en circuito cerrado con el molino, todo con el propósito de controlar y predecir la granulometría del material a la salida y por ende su resistencia. De la misma manera para el circuito de molienda, mediante un análisis de regresión se determinaron las ecuaciones que relaciona la distribución de tamaño de partícula, la superficie específica y la composición química- mineralógica con la resistencia a la compresión del cemento.

Elegido los modelos, el siguiente paso fue estimar los parámetros que definen sus ecuaciones y caracterizarlo para una molienda de cemento, por lo que se realizaron ensayos tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial.

Obtenidos los modelos de manera individual para el molino de bolas, separadora y la predicción de la resistencia, el punto más importante fue acoplarlos para predecir la resistencia desde el circuito de molienda, obteniendo resultados satisfactorios.

Finalmente, con el presente trabajo, se espera obtener beneficios con la predicción temprana de la resistencia, ya que permitirá realizar las correcciones necesarias para garantizar la calidad del producto.

## ABREVIATURAS

A	Flujo de masa de la alimentación a la separadora.
AE	Porcentaje de abertura del exhaustor
ASTM	Asociación Americana para Ensayos y Materiales.
ASOCEM	Asociación de Productores de Cemento.
$b_{ij}$	Función de distribución de Fractura.
Bij	Función de distribución de Fractura Acumulada.
C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico.
C <sub>2</sub> S	Silicato Bicálcico.
C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico.
C <sub>4</sub> FA	Ferroaluminato Tetracálcico.
D	Diámetro del molino.
DTR	Distribución de tiempos de residencia.
$f(x)$	Fracción de material retenido.
F	Flujo de masa de alimentación fresca al molino.
$f_i$	Flujo de entrada al sistema.
G	Flujo de masa de los gruesos de la separadora.
G(x)	Porcentaje retenido acumulado.
h	Hora.
J	Carga del molino.
Kg	Kilogramo.
L	Longitud del molino.
m	Metro.
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado.
m <sup>3</sup>	Metro cúbico.
n	Pendiente de la ecuación de Rosin Rammler.
Nc	Velocidad crítica.
NTP	Norma Técnica Peruana.
Obs	Condiciones observadas.
P	Flujo de masa del producto final.

$\rho_i$	Flujo de salida del sistema.
Pa	Pascal.
Pp	Parámetro de posición.
$P_{80}$	Tamaño de partícula correspondiente al 80% Pasante acumulado.
R	Flujo de masa de retorno al molino.
RCC	Resistencia a la compresión del cemento.
$R_1$	Resistencia a la compresión del cemento a 24 horas.
$R_3$	Resistencia a la compresión del cemento a 3 días.
$R_7$	Resistencia a la compresión del cemento a 7 días.
$R_{28}$	Resistencia a la compresión del cemento a 28 días.
r/d	Función combinada.
RPM	Revoluciones por minuto.
Sim	Condiciones simuladas.
S	Función de Selección.
S.E	Superficie Específica.
$T_i$	Eficiencia real de la separadora.
s	Segundo.
Ton	Tonelada.
$T_0$	Bypass de la separadora.
$T_c$	Eficiencia corregida de la separadora.
$X_{Ai}$	Proporción en peso del material de tamaño $i$ , en la alimentación.
$X_{Gi}$	Proporción en peso del material de tamaño $i$ , en el retorno.
$X_{Wi}$	Proporción en peso del material de tamaño $i$ , en los finos.
$X_T$	Tamaño de corte de la curva de eficiencia de la separadora.
$X_0$	Tamaño de partícula correspondiente a $T_0$ .
V	Flujo de masa o flujo volumétrico.
VS	Velocidad de la separadora
$W_i$	Índice de trabajo.
W	Flujo de masa de los finos de la separadora.
$\phi$	Parámetro de la función Bij.
$\gamma$	Parámetro de la función Bij.
$\beta$	Parámetro de la función Bij.
$\delta$	Inclinación de la curva de eficiencia de la separadora.

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Metodología de la Investigación.....	5
Figura 2.1. Esquema para la obtención del cemento.....	7
Figura 2.2. Esquema de producción del cemento.....	10
Figura 3.1. Microfotografía de una superficie pulida de clínker.....	15
Figura 4.1. Equipo de Rayos X, por fluorescencia.....	28
Figura 4.2. Difractograma del clínker.....	29
Figura 4.3. Equipo de Difracción por Rayos X.....	30
Figura 4.4. Permeabilímetro del Blaine.....	32
Figura 4.5. Equipo electrónico Blaine.....	33
Figura 4.6. Instrumentos para tamizado.....	34
Figura 4.7. Equipo de tamizado por succión de aire.....	36
Figura 4.8. Aparato de difracción laser.....	37
Figura 4.9. Granulómetro Laser.....	37
Figura 4.10. Distribución de tamaño de partícula.....	38
Figura 4.11. Gráfica de Rosin Rammler.....	39
Figura 5.1. Esquema Real para un Circuito de Molienda de Cemento Portland Tipo I.....	43
Figura 5.2. Evento de Fractura.....	45
Figura 5.3. Distribución de Tiempos de Residencia para diferentes modelo de Flujos en un Reactor Continuo.....	47
Figura 5.4. Molino de Bolas cementero.....	48
Figura 5.5. Diafragma o tabique del molino	49
Figura 5.6. Blindaje en el interior del molino	49
Figura 5.7. Representación Esquemática de los eventos de fractura y generación de partículas durante un instante $\Delta t$ , en un	

	molino Batch.....	50
Figura 5.8.	Modelo de Conminución de Mezcla Perfecta.....	54
Figura 5.9.	Modelo de aproximación para un molino de bolas en circuito abierto.....	57
Figura 5.10.	Modelo de aproximación para un molino de bolas en circuito cerrado.....	57
Figura 5.11.	Molino de Bolas en circuito cerrado.....	58
Figura 5.12.	Matriz $b_{ij}$ de las partículas fracturadas en distintos tiempos...	59
Figura 5.13.	Esquema de un separador Estático de aire.....	61
Figura 5.14.	Partes de la Separadora.....	64
Figura 5.15.	Balace de Fuerzas en la separadora.....	64
Figura 5.16.	Curva de Eficiencia real y corregida de la Separadora.....	66
Figura 6.1.	Esquema del circuito de molienda del Cemento Portland Tipo I en estudio.....	69
Figura 6.2.	Molino de Pruebas de Bond.....	73
Figura 6.3.	Cuarteo de la muestra de clínker para realizar el tamizado....	75
Figura 6.4.	Uso de cribas en serie de $\sqrt{2}$ para partículas mayores a 4750 $\mu\text{m}$ .....	75
Figura 6.5.	Uso de mallas en serie de $\sqrt{2}$ para partículas menores a 4750 y mayores a 100 $\mu\text{m}$ .....	75
Figura 6.6.	Molino de Bolas utilizado para las pruebas a nivel industrial.	80
Figura 6.7.	Puntos de Muestreo externas e internas en el molino.....	82
Figura 6.8.	Primer Compartimiento del molino.....	82
Figura 6.9.	Puntos de muestreo en el segundo compartimiento del molino.....	83
Figura 6.10.	Descripción esquemática de la estructura del molino de bolas.....	86
Figura 6.11.	Esquema de clasificación en el diafragma del molino.....	88
Figura 6.12.	Puntos de muestreo en la separadora O-Sepa.....	92
Figura 6.13.	Punto de muestreo para la prueba de Resistencia del cemento.....	95

Figura 6.14.	Preparación de las muestras para el análisis por difracción de Rayos X.....	96
Figura 6.15.	Difractómetro de Rayos X.....	96
Figura 6.16.	Metodología para determinar los componentes químicos en el equipo de Rayos –X por fluorescencia.....	97
Figura 6.17.	Termogravímetro para determinar la pérdida por ignición de la muestra.....	99
Figura 6.18.	Permeabilímetro del Blaine.....	100
Figura 6.19	Granulometría laser.....	101
Figura 6.20.	Aparatos utilizados en la Prueba de la Resistencia a la Compresión.....	103
Figura 6.21.	Preparación de la probeta.....	104
Figura 6.22.	Balance de masa del circuito en estudio.....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1. Composición química del cemento portland Tipo I.....	14
Tabla 3.2. Características y propiedades de las principales fases del clínter.....	19
Tabla 4.1. Equivalencias entre la Norma Técnica Peruana (NTP) y Sociedad Americana para ensayos y materiales (ASTM)	41
Tabla 6.1. Condiciones de molienda en el molino de Bond.....	76
Tabla 6.2. Porcentaje de retenido de una fractura de monotamaños 8/12 para determinar el tiempo de molienda.....	77
Tabla 6.3. Porcentaje de retenido para 0,5 min de monotamaños 8/12, 12/16, 16/20 y 20/30.....	78
Tabla 6.4. Condiciones de molienda.....	81
Tabla 6.5. Condiciones de operación en el Clasificador O-Sepa.....	91
Tabla 6.6. Parámetros obtenidos para la separadora a diferentes condiciones.....	93
Tabla 6.7. Variables seleccionadas por el método de regresión Stepwise para determinar los parámetros de la eficiencia de la separadora.....	94
Tabla 6.8. Resultados del modelo para la predicción de la resistencia a la compresión por el método de Stepwise.....	106
Tabla 6.9. Variables seleccionadas por el método de regresión Stepwise para determinar el modelo para la predicción de la superficie específica.....	109
Tabla 6.10. Variables seleccionadas por el método de regresión Stepwise para predecir el flujo de retorno del molino.....	113

Tabla 6.11.	Condiciones de operación para las pruebas realizadas.....	114
Tabla 6.12.	Comparación del porcentaje retenido de los resultados obtenidos de la simulación del circuito de molienda y los resultados experimentales.....	116
Tabla 6.13.	Parámetros de Rosin Rammler y fracción por tamaños obtenidos mediante la simulación del circuito de molienda...	117
Tabla 6.14.	Resultados de Blaine observados y predecidos.....	117
Tabla 6.15.	Variables químicas para la predicción de la resistencia del cemento.....	118
Tabla 6.16.	Comparación de la resistencia del cemento, de los valores observados y los predecidos luego de la simulación.....	118

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 6.1. Función de distribución de fractura para el clínker 16/20 y 20/30 .....	79
Gráfica 6.2. Distribución de Tamaños en el interior del molino.....	84
Gráfica 6.3. Porcentaje Pasante Acumulado Primer Compartimiento del molino.....	85
Gráfica 6.4. Porcentaje Pasante Acumulado Segundo Compartimiento del molino.....	85
Gráfica 6.5. Función combinada (r/d) para cada molino ideal.....	87
Gráfica 6.6. Distribución de las muestras tomadas de la parte frontal y posterior del tabique.....	89
Gráfica 6.7. Eficiencia Real del Tabique (observada y simulada).....	90
Gráfica 6.8. Distribución de tamaños simulados para la estimación de los gruesos desconocidos.....	90
Gráfica 6.9. Ajuste de Regresión para la Resistencia a la Compresión de Cemento observada Vs la predecida a 24 horas, 3, 7 y 28 días.....	107
Gráfica 6.10. Resistencia predecido y observada con respecto al número de ensayo, para 24 horas, 3, 7 y 28 días.....	108
Gráfica 6.11. Ajuste de Regresión del Blaine Predecido y el Blaine Observado.....	110
Gráfica 6.12. Porcentaje Pasante Acumulado de las partículas Predecido y Observado para la prueba N° 1.....	115
Gráfica 6.13. Regresión para la Resistencia a la Compresión de Cemento observada Vs lo predecido a 24 horas, 3, 7 y 28 días.....	119
Gráfica 6.14. Desarrollo de la Resistencia a la Compresión de Cemento observada y simulada para la prueba N° 1 y 2.....	120
Gráfica 6.15. Desarrollo de la Resistencia a la Compresión de Cemento observada y simulada para la prueba N° 3 y 4.....	120

## GLOSARIO

- Blaine: Parámetro que define la finura del cemento en términos de  $\text{cm}^2$  por cada gramo de ese material. Ejemplo: un Blaine de  $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  significa que la suma de las superficies de todas las partículas de un gramo de esta muestra pueden cubrir un área de  $0.30 \text{ m}^2$ .
- Bypass: Es el punto más bajo de la curva de la eficiencia de la separadora. Significa que las partículas finas son arrastradas por el aire hacia la descarga del separador, retornando al molino.
- Cal libre: Material que normalmente se encuentra en baja proporción en el clínker (cal no combinada).
- Calor de Hidratación: Es el calor liberado por las reacciones que se producen en el cemento por acción del agua. En cementos normales es de 85 a  $100 \text{ cal/g}$ . Es un factor a tomar en cuenta en trabajos masivos de concreto.
- Cemento hidráulico: Cualquier cemento, que fragua y se endurece con agua debido a la reacción química entre el agua y el cemento.
- Cementante: Cualquier producto que tenga la capacidad de unir piezas entre sí mismas, por ejemplo: cemento portland, asfalto, resinas, etc.
- Concreto: Es el material constituido por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, que inicialmente denota una estructura plástica y moldeable y que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, lo que hace un material ideal para la construcción.

- Compartimientos: Cámaras internas del molino para la molienda.
- Conminución: Es un proceso en el cual un material degrada su tamaño con el fin de separar un mineral de otro, o bien alcanzar un tamaño ideal para un proceso industrial.
- Desencofrado: Quitar el encofrado.
- Diafragma: Tabique de separación entre los compartimientos del molino.
- Difractograma: Es el resultado de un experimento de difracción de rayos X que consiste en una curva donde en el eje abscisas aparecen los ángulos de difracción  $\theta$  (generalmente  $2\theta$ ) y en el eje de las ordenadas la intensidad del rayo difractado.
- Encofrado: Molde formado con tableros o chapas de metal, en el que se vacía el hormigón hasta que fragua, y que se desmonta después.
- Escoria de alto horno: Material no metálico formado por silicatos y otras bases producto de la fusión del hierro en un alto horno.
- Exudación: Es un tipo de segregación en la que parte del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del concreto recién colocado. Esto se debe a que los componentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua de mezclado cuando se asientan en el fondo.
- Exahustor: ventilador.
- Fineza del cemento: Tamaño de las partículas del cemento, siendo la parte más activa del cemento la que posee un diámetro menor de 10 a 15 micrones. La importancia de la fineza en un cemento radica en la influencia que puede tener sobre la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado.

- Fraguado: El cemento al ser mezclado con agua forma una pasta, que tiene la propiedad de rigidizarse progresivamente hasta constituir un sólido de creciente dureza y resistencia.
- Fluidez: Es la capacidad que tiene el concreto para compactarse como un líquido en determinadas circunstancias.
- Fundente: Agente que reduce la temperatura de formación de la fase líquida y así disminuye la temperatura de clinkerización.
- Granulometría: Ensayos que tiene por finalidad determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas de acuerdo a su tamaño.
- Granulómetro: Equipo para determinar la granulometría de las partículas.
- Hidratación: Es una reacción química exotérmica que se produce a partir de la interacción de sus componentes básicos con el agua.
- Hidraulicidad: Es la capacidad de fraguado tanto al aire como en agua
- Hormigón: También denominado concreto, es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro conglomerante) con áridos (grava, gravilla y arena) y agua.
- Monotamaños: Son partículas que tienen un rango homogéneo de tamaño.
- Mortero: Es la mezcla de cemento con arena y agua.
- Pastilla: Material compactado, necesario para realizar la lectura en el equipo de Rayos X.
- Permeabilidad: Propiedad que tiene una sustancia para permitir el paso de otra a través de sus poros.
- Polvo: Pequeñas partículas sólidas producidas por la ruptura de partículas de mayor tamaño mediante procesos mecánicos como molturación, perforación, pulido, explosiones, etc. Las partículas de polvo pueden pasar al aire a causa de operaciones como tamizado, transporte, etc.

- Puzolanas: Son materiales silíceos o alumino-silíceos los cuales por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.
- Radiotrazadores: También llamados, trazadores radiactivos, son sustancias radiactivas que incorporadas al sistema en estudio, proporcionan información sobre su comportamiento, la que se obtiene mediante la detección y el análisis de la radiación emitida.
- Retracción: Reducción de tamaño de la mezcla durante el fraguado, lo que ocasiona grietas en el concreto.
- Tamiz: Instrumento similar a una coladera, que se usa para separar las partículas gruesas de las finas, que integran un conjunto o una mezcla.
- Trabajabilidad: Es el mayor o menor trabajo que hay que aportar al concreto en estado fresco en los procesos de fabricación, transporte, colocación, compactación y acabado.

## INTRODUCCION

La resistencia a la compresión del cemento, es un criterio de calidad de suma importancia en la industria cementera, ya que se trata de una característica vital para la estabilidad y la duración a largo plazo de las estructuras. La resistencia del cemento, según la norma Técnica Peruana (NTP) y la Sociedad Americana para ensayos de materiales (ASTM), es aquella que se realiza a 28 días. Sin embargo, 28 días es un periodo muy largo, y es posible que el producto llegue al mercado y se aplique por el usuario final antes de que se realice dicha evaluación en el laboratorio. De ahí que, la determinación rápida de la resistencia es muy conveniente. Actualmente, existen dos métodos para determinar la resistencia temprana: Mediante ensayos para acelerar la resistencia y el desarrollo de modelos matemáticos apropiados. En este trabajo se optó por el segundo método.

En los últimos años, investigadores como *Tsivilis* [39], *García* [19], *Agrawl* [1], *Kheder* [23], han desarrollado modelos matemáticos para la predicción de la resistencia del cemento, obteniendo resultados aceptables; es por eso, que el presente trabajo hace uso también de los mismos principios.

En la industria cementera, se sabe, que las características químicas así como la fineza tienen gran influencia en la resistencia del cemento, por otro lado; información técnica, *Zhang* [43], describe la relación que existe entre la distribución de tamaños de partícula del producto final y la fineza; por lo que se puede decir que la resistencia se ve influenciada por la distribución de tamaños de partículas producidos en la molienda del clínker. Estos valores pueden ser predecidos por medio de la simulación del proceso de molienda, *Benzer* [11], [12], [13], [27], *Austin* [6].

Este estudio se enfoca en predecir la resistencia del cemento sobre la base de la distribución granulométrica de la partícula, considerando además su composición química – mineralógica.

Para la elaboración de la Tesis, se realizaron las pruebas pertinentes en las instalaciones de la empresa CEMENTOS LIMA S.A., en el distrito de Villa María del Triunfo y las pruebas para la determinación de la granulometría en la empresa CEMENTO ANDINO S.A. en Condorcocha – Tarma.

El desarrollo de este trabajo se basará en tres etapas. Siendo la primera, la determinación de los parámetros del modelo de mezcla perfecta para el molino de bolas, así como también, los parámetros que determinan la eficiencia de la separadora para distintas condiciones de operación; para lo cual se realizarán ensayos a nivel de laboratorio como a nivel industrial.

Así mismo, la segunda etapa consistirá en determinar el modelo para la predicción de la resistencia mediante análisis de regresión, para lo cual se realizarán ensayos mecánicos, ensayos granulométricos, determinación de la finza, así como análisis químicos - mineralógicos.

Obteniendo los modelos tanto para el circuito de molienda como para la resistencia del cemento, la tercera etapa consistirá en acoplar ambos modelos para predecir la resistencia desde la etapa de molienda, para lo cual se realizaran ensayos en planta y se validarán dichos resultados.

Lo novedoso de este trabajo es poder predecir la resistencia del cemento, tan solo conociendo la granulometría del clínker y las condiciones de operación del proceso, mediante modelos matemáticos del circuito de molienda; lo que permitirá anticiparse y hacer las correcciones necesarias para obtener el producto deseado.

# **CAPITULO 1.**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La prueba estandarizada de la Resistencia a la Compresión del Cemento (RCC) a 28 días, en la actualidad es ampliamente realizada para la caracterización de las propiedades del cemento. La resistencia a la compresión es la propiedad más importante del cemento, en la medida que es el principal parámetro de calidad. Sin embargo, para obtener resultados experimentales la industria debe esperar un periodo muy largo. Por lo tanto, la rápida determinación de la RCC es una necesidad para la industria cementera y merece la atención para su investigación.

En la industria cementera, se sabe que los factores claves que determinan las características de la RCC son la composición química, fineza, y su distribución de tamaños de partículas. Estas dos últimas dependen de las variables de operación del circuito de molienda, por lo que se hará uso de modelos matemáticos con el propósito de predecir la granulometría del cemento a la salida del circuito.

Llevando la predicción de la RCC a la etapa de molienda, se logrará ganar tiempo en la obtención de dichos resultados.

#### **1.1.1. Justificación del estudio.**

Desde el punto de vista de control de procesos, predecir la RCC desde la etapa de molienda, permitirá realizar los ajustes técnicos necesarios en el proceso, para obtener y mantener la RCC dentro de un intervalo determinado, cumpliendo con los objetivos impuestos por calidad.

Desde el punto de vista de calidad, se minimizará la variabilidad del producto, cumpliendo de esta manera con las exigencias del cliente.

Desde el punto de vista de la construcción, entregar un cemento con resistencias uniformes ayudará a las empresas concreteras, realizar en forma óptima y constante, la proporción de mezclas para evitar situaciones donde el concreto no alcance la resistencia requerida, o evitar que el concreto sea innecesariamente resistente.

## **1.2. OBJETIVOS.**

### **1.2.1. Objetivo general.**

Predecir la resistencia a la compresión del cemento Portland Tipo I, sobre la base de la distribución granulométrica del tamaño de partículas

### **1.2.2. Objetivo específico.**

Obtener un modelo matemático para el circuito de molienda que prediga la distribución de tamaño de partícula del cemento.

## **1.3. METODOLOGÍA.**

La metodología de la siguiente tesis está graficada en la figura 1.1 y se detalla a continuación.

Para el desarrollo experimental, el material de estudio será el Cemento Portland Tipo I. Los métodos de ensayo para la resistencia a la compresión, fineza o superficie específica, y el análisis químico están de acuerdo a la norma ASTM.

En el desarrollo del modelo matemático para la predicción de la RCC se utilizará el método de regresión "Paso a Paso" con ayuda de softwares estadísticos especializados.

Para el desarrollo del molino de bolas se utilizará el modelo de mezcla perfecta referida a la Teoría Moderna de la Conminución. Así también, se hará uso de la Teoría Moderna de la clasificación para el desarrollo del modelo de la eficiencia de la separadora.

Todo el análisis, junto con la toma de decisión final, se los realizará al 95 % de confiabilidad.

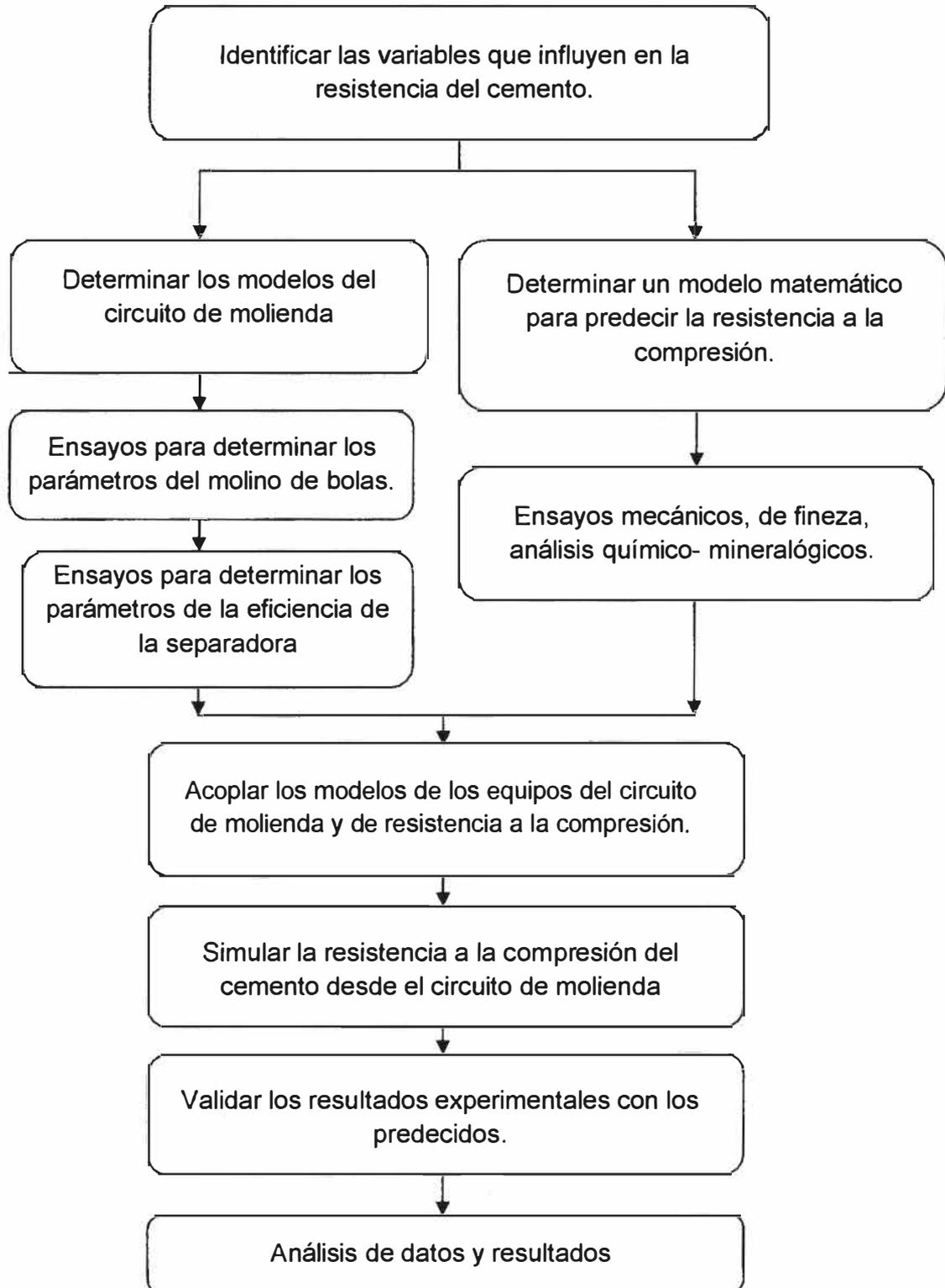


Figura 1.1. Metodología de la Investigación

#### 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

El presente trabajo se encuentra estructurado como se indica:

Capítulo 1: **Generalidades**, en él se detalla la información referente al planteamiento del problema y la justificación correspondiente, el objetivo tanto general como específico, la metodología y la estructura de la tesis.

Capítulo 2: **Cemento Portland**, muestra la definición, componentes, proceso de fabricación, tipos y aplicaciones.

Capítulo 3: **Característica y Propiedades del Cemento**, se presentan las características químicas y de fineza del cemento, así como también las propiedades que éstos determinan.

Capítulo 4: **Análisis y Estudio de las variables que afectan la Resistencia del Cemento**, para lo cual se identifican las variables a utilizar en la predicción de la resistencia y los métodos usuales de análisis.

Capítulo 5: **Estudio de los modelos matemáticos en la etapa de molienda**, hace referencia a la Teoría Moderna de la Conminución y la Teoría de la Clasificación para modelar el circuito de molienda y determinar la distribución de tamaños de partícula a la salida del proceso.

Capítulo 6: **Ejercicio para la predicción de la Resistencia a la Compresión del Cemento – Caso Industrial**, en el se recolectará los datos referentes a los ensayos experimentales desarrollados. En él se determinarán los parámetros del modelo matemático para el molino de bolas y la separadora. Por otro lado encontrar los modelos matemáticos para determinar la superficie específica y la resistencia del cemento y se definirán por análisis de regresión. A partir de estos resultados previos, se realizará los estudios de simulación para predecir la RCC.

En el Capítulo 7: **Conclusiones y Recomendaciones**, se darán las respuestas a los objetivos planteados inicialmente, así como todas las precauciones a tomar para futuros experimentos respecto a lo ocurrido en el desarrollo de esta tesis.

Finalmente, se adjuntan la sección **Apéndices**, en el que se anotan los detalles de los cálculos experimentales del Capítulo 6; y la sección **Anexos**, en el que se encuentra el Proceso de Producción del Cemento y las Normas ASTM para el desarrollo de los ensayos experimentales.

## CAPÍTULO 2.

### CEMENTO PORTLAND.

#### 2.1. DEFINICIÓN.

El Cemento Portland es el producto que se obtiene de la molienda del clinker, yeso (no mayor del 5%) y la puzolana (compuesto silicio aluminoso de origen volcánico).

El Cemento es relativamente impuro, y estas impurezas pueden tener una marcada influencia sobre sus propiedades. Un cemento de buena calidad, es aquel que cumple cabalmente la función para la que fue elaborado, para esto se han creado diversos tipos de cementos para usos específicos. Desde este punto de vista, la calidad de cada tipo de cemento está normalizada por especificaciones oficiales en las cuales se establecen los límites mínimos y máximos para los diferentes parámetros tanto químicos como físicos con cuyo cumplimiento se garantiza la calidad.

#### 2.2. COMPONENTES DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I.

El cemento Portland Tipo I, motivo del presente estudio, tiene como componentes al clinker y al yeso.

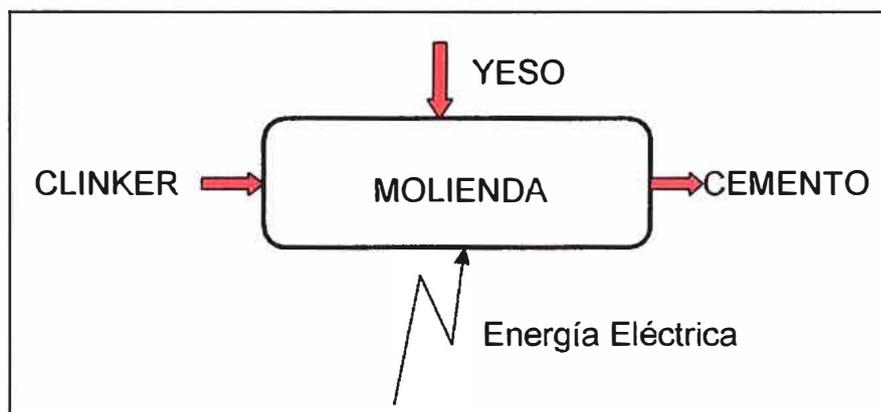


FIGURA 2.1. Esquema para la obtención del cemento.

### **2.2.1. Clínter.**

El clínter es el producto que se obtiene a partir de una mezcla homogénea de cal ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro como óxido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Todos estos componentes son parcialmente fusionados en un horno para formar clínter, el cual consta básicamente de silicatos de calcio.

Los minerales del clínter no son una combinación pura, sino fases de cristales mixtos, los principales componentes mineralógicos del clínter son:  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{FA}$ .

#### **Materias Primas para la elaboración del clínter.**

La industria del cemento, para su correcto funcionamiento, depende de un adecuado suministro de recursos naturales. Así pues, una planta de cemento que posea la tecnología más avanzada, pero con una materia prima de composición química o mineralógica desfavorable, podría considerarse como una pésima inversión.

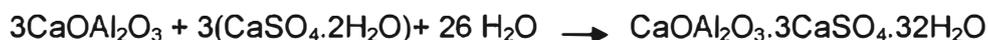
Las materias primas principales son los materiales calizos, representadas en la caliza  $\text{CaCO}_3$ , en la roca sedimentaria como la Creta o en las Margas; y los materiales arcillosos cuyos componentes principales son los silicatos de aluminio hidratados. Los materiales calizos presentan impurezas de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ ; estos no se encuentran en proporciones deseadas, por lo que es necesario una segunda materia prima para ajustar la proporción adecuada de óxidos, a esto se le llama componentes correctores. Esta segunda materia prima usualmente son arcillas, para elevar el contenido en  $\text{SiO}_2$  o para incrementar el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Algunas veces se agrega minerales de hierro para aumentar el contenido de fundente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Los componentes correctores tienen como objetivo dar los componentes químicos necesarios para la elaboración del crudo.

### **2.2.2. Yeso.**

El yeso es un agente que retrasa el fraguado del cemento. Se agrega en un porcentaje adecuado de tal manera que el proceso de fraguado concluya aproximadamente en 45 minutos.

Formula Química:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

El yeso reacciona con el aluminato tricálcico para formar una sal expansiva llamada Etringita, y la reacción es como sigue:



### **2.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO.**

El proceso de fabricación de cemento constituye una gama de etapas de subprocesos, con sus propias condiciones de operación bien definidas, con el objetivo de obtener productos de buena calidad.

Se puede nombrar como parte de estas etapas, a la simple reducción del tamaño de la piedra caliza, luego puede ser molido vía un proceso termoquímico que se lleva dentro del horno; luego pasa al proceso de molienda de cemento, llegando al envase y finalmente el despacho. El esquema de producción del cemento se aprecia en la Figura 2.2.

De manera muy general se puede dividir el proceso de fabricación de cemento en seis etapas:

- Extracción de materias primas
- Trituración de materias primas
- Molienda de crudo
- Fabricación de clínker
- Molienda de cemento
- Envase y despacho

En el Anexo – 1 se detallan éstas etapas.

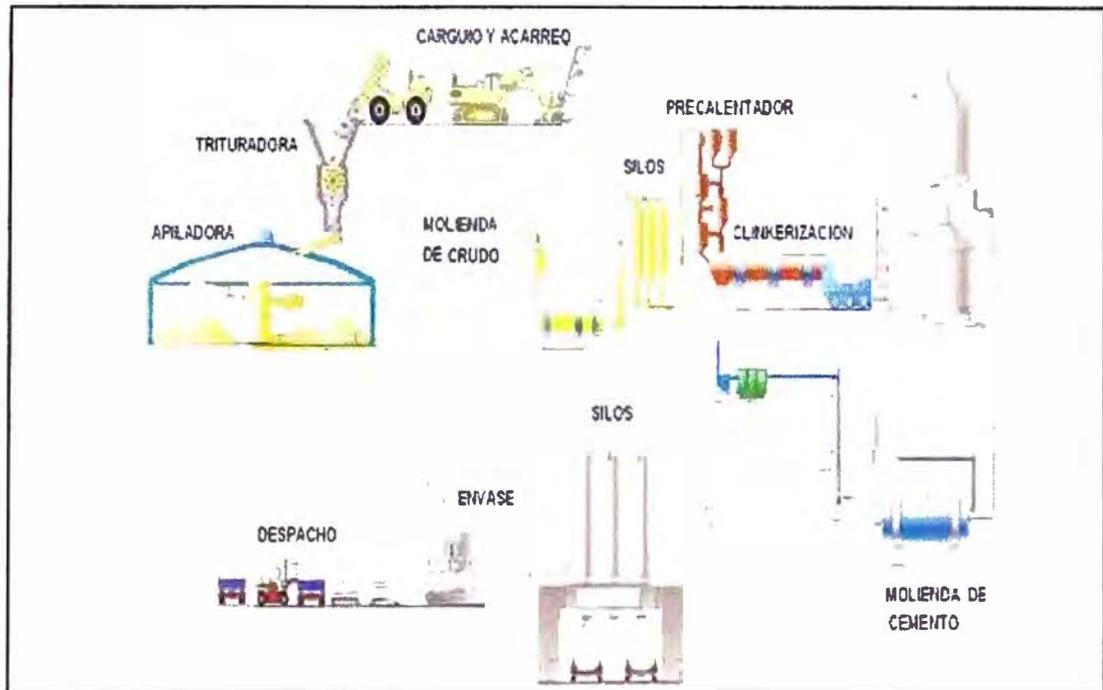


FIGURA 2.2. Esquema de Producción del Cemento

#### 2.4. TIPOS DE CEMENTOS.

Las características de un cemento dependen de la composición porcentual del clinker, específicamente de sus componentes mineralógicos. Por éste motivo la norma A.S.T.M. C-150 clasifica los cementos portland en ocho tipos:

- **Tipo I:** (común). Apto para toda obra que no requiere un cemento con requisitos especiales.
- **Tipo IA:** Uso general, donde se desea incorporación de aire.
- **Tipo II:** De moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos con un contenido máximo de 8% de  $C_3A$ .
- **Tipo IIA:** Moderado. Igual que el tipo II, pero con inductor de aire.
- **Tipo III:** De alta resistencia a edades tempranas.
- **Tipo IIIA:** Altas resistencias. Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
- **Tipo IV:** De bajo calor de hidratación con un contenido máximo de  $C_3S$  y 7% de  $C_3A$ .

- **Tipo V:** Resistente a los sulfatos, Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos, con un contenido máximo de 5% de  $C_3A$  y la suma máxima de  $C_4AF + C_3A$  es de 20%.

Los cementos hidráulicos mezclados han sido desarrollados debido al interés de la industria por el ahorro de la energía y la economía en su producción. La norma ASTM C-595 reconoce la existencia de cinco tipos de cementos mezclados:

- Cemento Portland de escoria de alto horno - Tipo IS.
- Cemento Portland puzolana - Tipo IP y Tipo P.
- Cemento de escoria - Tipo S.
- Cemento Portland modificado con puzolana - Tipo I (PM).
- Cemento Portland modificado con escoria - Tipo I (SM).

## 2.5. APLICACIONES DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE CEMENTOS.

- **El Cemento Portland Tipo I:** Es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados.
- **El cemento Portland tipo II:** Se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando las concentraciones de sulfatos sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas (En caso de presentarse concentraciones mayores se recomienda el uso de cemento Tipo V, el cual es altamente resistente al ataque de los sulfatos). Puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc.
- **El Cemento Portland Tipo III:** Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que

ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas.

- **El Cemento Portland tipo IV:** Su uso y aplicación está dirigida a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas.
- **El cemento portland tipo V:** Este tipo de cemento, es muy bueno para resistir ataques químicos severos, tales como: sulfatos, cloruros, carbonatos, etc.

## **CAPÍTULO 3.**

### **CARATERISTICAS Y PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I.**

#### **3.1. CARACTERISTICAS DEL CEMENTO.**

La influencia que el cemento portland ejerce en el comportamiento y propiedades de la pasta cementante, derivan fundamentalmente de la composición química del clinker y de su finura de molienda.

##### **3.1.1. Composición Química.**

Las características y propiedades del cemento portland está íntimamente ligadas a su composición química porcentual y a su constitución potencial por fases.

##### **3.1.1.1. Composición química porcentual.**

La composición química aproximada del cemento portland tipo I se observa en la Tabla 3.1. Siendo los componentes principales  $\text{CaO}$  y  $\text{SiO}_2$  y los secundarios  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{SO}_3$ . También existen otras sustancias como álcalis, óxido sulfúrico, óxido de magnesio, óxido de calcio libre, residuo insoluble y pérdida por ignición.

**a. Álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ).**- Proviene en general de las materias primas, específicamente de las impurezas feldespáticas de las arcillas.

Altos contenidos de álcalis en el clinker determinan una disminución en la resistencia final; mientras que la resistencia inicial se ve incrementada. La acción de los álcalis dependen de la forma como están presentes en el clinker; en ausencia del  $\text{SO}_3$ , los óxidos alcalinos son incorporados dentro de la red cristalina del clinker, mientras que en presencia de  $\text{SO}_3$ , se forman los sulfatos álcalis. Una alta cantidad de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  disminuye la resistencia a temprana y tardía edad.

TABLA 3.1. Composición Química del Cemento Portland Tipo I.

Componente	Símbolo Químico	Porcentaje (%)
Cal Combinada.	CaO	62,5
Sílice (óx. de silicio)	SiO <sub>2</sub>	21,0
Alúmina (óx. de Aluminio)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5
Hierro ( óx. férrico )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5
Azufre (óx. Sulfúrico )	SO <sub>3</sub>	2,0
Cal libre	CaO	<1,3
Magnesia (óx. de Magnesio)	MgO	2,0
Perdida por Ignición	P.I.	2,0
Residuo insoluble	R.I.	< 0,75
Álcalis	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0,5

**b. Oxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>).**- El azufre proviene de la adición del yeso durante la molienda y en algunos casos del combustible empleado en el horno y se encuentra en el clinker. Un incremento del porcentaje SO<sub>3</sub> en el clinker tiende a reducir la resistencia del cemento debido a un decrecimiento del contenido de C<sub>3</sub>S. Bajo este concepto existen métodos normados que permiten encontrar el contenido óptimo del SO<sub>3</sub> en el cemento y que contribuyen favorablemente a un mejor desarrollo de sus resistencias. El concepto óptimo de SO<sub>3</sub> es basado sobre el principio que existe un nivel óptimo de SO<sub>3</sub> en el cual la máxima resistencia es desarrollada para una relación clinker/cemento dada, particularmente a temprana edades. Un contenido de azufre < 5% es aceptable.

**c. Óxido de magnesio y óxido de calcio libre.**- Más adelante ambos son objetos de una explicación detallada.

**d. Pérdida por Ignición.**- Proviene de la presencia de adiciones de naturaleza caliza o similar, lo cual no suele ser conveniente. Si el cemento ha experimentado un prolongado almacenamiento, la pérdida por ignición al fuego puede provenir del vapor de agua o del CO<sub>2</sub> presentes en el

conglomerante, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.

**e. Residuo Insoluble.-** El residuo insoluble son sustancias adicionadas al cemento durante la molienda o de la presencia de adiciones de naturaleza silícica. No debe superar el 2,5 – 3,0%. Elevadas cantidades disminuyen las resistencias, a no ser que esta disminución sea simultáneamente contrarrestada por la mejora de otras variables, por ejemplo aumentando la finura. Los cementos especiales con aditivos son los que poseen alto valor de residuo insoluble.

### 3.1.1.2. Constitución potencial por fases.

Los cuatro componentes principales anteriormente citados como  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no se encuentran libres en el cemento, sino combinados formando fases, que son los constituyentes del mismo o componentes potenciales.

El clinker de cemento portland es un compuesto poroso porque consta mayoritariamente de cuatro fases cristalinas: alita, belita, aluminato tetracálcico, y ferroaluminato tetracálcico, íntimamente asociados entre sí, y en la mayor parte de casos se encuentra cal libre ( $\text{CaO}$  sin combinar), así como magnesia libre de combinar (periclasa). La Figura 3.1 muestra una microfotografía típica del clinker en donde se aprecian sus principales fases.

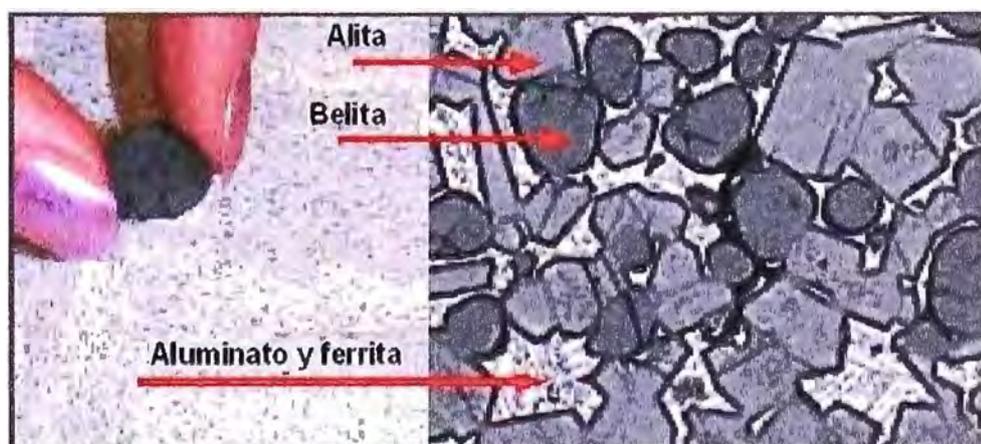


FIGURA 3.1. Microfotografía de una superficie pulida de clinker

### a. Alita (C<sub>3</sub>S)

Formula Química: 3CaO.SiO<sub>2</sub> (Silicato Tricálcico).

Reacción Química:



Su proporción media en el clínker es del 60%.

No suele encontrarse puro en el clínker sino que incorpora en su estructura hasta un 2% de óxidos extraños (de magnesio, aluminio, hierro).

Características que confiere al cemento:

- Gran velocidad de hidratación.
- Calor de hidratación elevado.
- Resistencias mecánicas iniciales altas y finales buenas.
- Estabilidad química aceptable.

Por su elevado calor de hidratación, los cementos muy ricos en C<sub>3</sub>S no son utilizables para formar grandes masas de hormigón, donde la gran liberación de calor y posterior enfriamiento producen dilataciones y contracciones que podrían originar fisuras en el hormigón.

Los cementos “calientes” (ricos en C<sub>3</sub>S) son muy aptos para estructuras en periodos de temperatura fríos.

El C<sub>3</sub>S es el compuesto activo por excelencia del clínker, porque desarrolla una resistencia inicial elevada, por tanto, un cemento que contenga elevada proporción de C<sub>3</sub>S tendrá una curva de endurecimiento muy rápida y permitirá, en igualdad de condiciones un desencofrado más rápido en su puesta en obra.

El C<sub>3</sub>S, tiene baja estabilidad química cuando se encuentra a altas temperaturas.

### b. Belita (C<sub>2</sub>S)

Formula Química: 2CaO.SiO<sub>2</sub> (Silicato Bicálcico)

Reacción Química:



El porcentaje promedio en el clínker es del 15%.

Tampoco se encuentra puro en el clinker, sino que incorpora otros óxidos en su estructura.

Características que confiere al cemento:

- Baja velocidad de hidratación.
- Bajo calor de hidratación.
- Resistencias mecánicas buenas a largo plazo.
- Estabilidad química buena, mejor que la del C<sub>3</sub>S.

Su estabilidad química es mayor que el C<sub>3</sub>S. Si la velocidad de enfriamiento de clinker es lenta, el C<sub>3</sub>S se convierte en C<sub>2</sub>S. Por ello, los cementos con alto contenido de silicato bicálcico son muy resistentes a los sulfatos que los de bajo contenido.

**c. Aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A)**

Formula Química: 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Reacción Química:



Su proporción media en el clinker es del 11%.

Contiene también óxidos extraños, incluyendo óxidos de metales alcalinos (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O).

Características que confiere al cemento:

- Alta velocidad de hidratación.
- Alto calor de hidratación.
- Proporciona escasas resistencias mecánicas, pero con la presencia del C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S, contribuye a aumentar ligeramente la resistencia del cemento a corto plazo a causa de su elevado calor de hidratación, lo cual proporciona resistencias tempranas.
- Su estabilidad química es buena frente a ciertas aguas agresivas (de mar, por ejemplo), pero muy débil frente a sulfatos.

La velocidad de hidratación del  $C_3A$  es muy grande, la cual se incrementa aún más por la inclusión de álcalis, por eso es preciso añadir yeso al clínker en la fabricación del cemento Portland, para retrasar su fraguado.

#### d. Ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ )

Formula Química:  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

Reacción Química:



Esta fase otorga color al cemento.

Características que confiere al cemento:

- Gran velocidad de hidratación.
- Bajo calor de hidratación.
- Muy poca resistencias mecánicas al cemento.
- Estabilidad química buena frente a los sulfatos, siempre que el contenido de  $C_4AF$  no sea excesivo.
- No posee una composición química constante.

La Tabla 3.2 muestra un resumen de las características y propiedades que confieren las principales fases del clínker al cemento.

#### e. Óxido de Magnesio (MgO).

Cuando el clínker es rico en MgO puede contener MgO libre (periclasa).

El óxido de magnesio procede del carbonato de magnesio que puede estar mezclado con las materias primas, sobre todo con la caliza. Al enfriarse el clínker se puede transformar en periclasa, y esta al hidratarse aumenta considerablemente su volumen, este proceso ocurre una vez que el cemento esta solidificado, por lo que el aumento de uno de sus componentes, le supone al cemento la aparición de una serie de tensiones internas no deseadas, de manera que si las concentraciones de óxido de magnesio fueran altas, estas tensiones podrían terminar agrietando la estructura. Por tal motivo, la periclasa

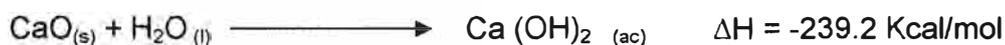
TABLA 3.2. Resumen de las características y propiedades de las principales fases de clínker

Fases Cristalinas	Formula	Color	Proporción media en el clínker	Impurezas	Velocidad de hidratación	Calor de hidratación	Resistencias Mecánicas	Estabilidad química.
Silicato Tricálcico (C <sub>3</sub> S)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	Blanco	60%	2% de óxidos extraños (magnesio, aluminio, hierro)	Alta	Elevado	Iniciales altas y finales muy buenas.	Aceptable, aunque menor que la del C <sub>2</sub> S
Silicato Bicálcico (C <sub>2</sub> S)	2CaO.SiO <sub>2</sub>	Blanco	15%		Pequeña	Baja	Buena a largo plazo.	Buena, mejor que la del C <sub>3</sub> S
Aluminato Tricálcico (C <sub>3</sub> A)	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Blanco	11%	Óxidos extraños, incluyendo óxidos de metales alcalinos (Na <sub>2</sub> O y KO).	Muy Alta	Muy elevado	Escasa resistencia mecánica, adquirida bastante rápido. Produce retracción.	Buena frente a ciertas aguas agresivas y muy débil frente a sulfatos.
Aluminoferrito tetracálcico: (C <sub>4</sub> AF)	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pardo o grisáceo si contiene MgO	Variable	Contiene óxidos extraños	Alta	Bajo	Muy poca	Buena frente a sulfatos, si el contenido de C <sub>4</sub> AF no es excesivo.

es indeseable, siendo el máximo permisible de 5%. Esta expansión es más maligna que la que produce el óxido de calcio libre, pues a veces sus daños no son detectados sino después de años.

#### f. Óxido de calcio libre (CaO)

La mayor parte de los clínker contienen óxido de calcio libre o cal libre (cal no combinada) en proporción menor o igual al 2% en masa. Su presencia se debe a los siguientes casos: a una inadecuada preparación del crudo (demasiado grueso o no homogéneo); a una cocción insuficiente (tal que no permite su combinación con otros óxidos); a un enfriamiento lento (que posibilita la descomposición del C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A) y finalmente, a un contenido demasiado alto de cal. La cal libre se puede hidratar al igual que el óxido de magnesio. En este proceso de hidratación de CaO libre, ocurre lo mismo que en el proceso de hidratación del óxido de magnesio, y presenta lo mismos efectos no deseados, esto puede ocasionar tensiones internas que producen resquebrajamiento en una determinada estructura. Concentraciones altas (>2,5%) puede ocasionar expansión en los morteros. La reacción química de hidratación del óxido de calcio es:



#### 3.1.2. Finura de Molienda.

Es una característica íntimamente ligada al valor de hidraulicidad del cemento, ya que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie al interior, el área total superficial de las partículas del cemento constituye el material de hidratación.

Al aumentar la finura, aumenta la rapidez de hidratación del cemento dando una mayor retracción y calor de hidratación, por tanto es más susceptible a la fisuración. Una molienda muy fina dará lugar a cementos que se endurecen rápidamente y por tanto, tienen un desarrollo más rápido de su resistencia, Pero siendo así, que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento portland debe estar finamente molido,

pero no en exceso. Además, cuanto más fino sea un cemento éste se deteriorará más rápido por la exposición a la atmósfera.

Por otro lado los cementos con granos gruesos se hidratan y endurecen lentamente y puede producir exudación de agua por su escasa rapidez por retenerla.

El tamaño de los granos del cemento está comprendido entre 2 y 150 micrones. Los granos más activos son aquellos comprendidos entre 3 y 32 micrones. Los granos menores de 3 micrones se hidratan casi instantáneamente al entrar en contacto con el agua, mientras que los granos superiores a 60 micrones son prácticamente inertes, ya que su hidratación es extremadamente lenta.

Cuando se fabrica cemento portland simple, prácticamente se muele un solo material (clínker) que es relativamente homogéneo y de dureza uniforme, de manera que al molerlo se produce una fragmentación y pulverización gradual que se manifiesta en el cemento por curvas de granulometría continua. En tales condiciones, la superficie específica es un buen índice de la finura del cemento y de sus efectos correspondientes en el concreto.

### **3.2. PROPIEDADES DEL CEMENTO.**

#### **3.2.1. Propiedades químicas del cemento.**

Las propiedades químicas son aquellas que resultan al producirse la reacción entre las fases del cemento y el agua es la hidratación del cemento.

##### **a. Hidratación del cemento.**

Los cementos fraguan y endurecen al ser mezclados con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua. La hidratación del cemento es una reacción exotérmica.

El estudio de las reacciones de hidratación del cemento suele hacerse en la pasta de cemento, que físicamente está constituido por sólidos, agua y vacíos o poros.

En cuanto a los sólidos; los constituyentes básicos como  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4FA$ , al estar en contacto con el agua reaccionan dando los siguientes productos:

- Silicato cálcico hidratado CSH, que se forma principalmente por la hidratación de  $C_3S$  y  $C_2S$ .
- El hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$  o Portlandita, resulta de la precipitación del calcio presente en la fase líquida de la hidratación.
- La fase Etringita (AFt), que se forma como productos de la hidratación del  $C_3A$  en presencia del  $CaSO_4$  proveniente del yeso.
- La fase Monosulfato (AFm), conformada por la hidratación del  $C_3A$  y  $C_4AF$ .
- Los poros que difieren principalmente en tamaño, controlan el movimiento y comportamiento del agua necesaria para los procesos químicos de hidratación.

b. Calor de hidratación.

El proceso de hidratación es un proceso exotérmico, el cual hace que los cementos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura.

c. Resistencia a los sulfatos.

Los sulfatos atacan el concreto endurecido porque reaccionan con el aluminato tricálcico, para formar el sulfoaluminato de calcio el cual tiene un volumen mayor que el de los dos componentes que lo originan. Este aumento de volumen se produce por la aparición de esfuerzos internos que puedan desintegrar el concreto. Por lo que es conveniente, controlar el contenido de  $C_3A$ .

### **3.2.2. Propiedades Físicas y mecánicas del cemento**

Las propiedades físicas y mecánicas del cemento Portland permiten complementar las propiedades químicas y conocer otros aspectos de su bondad como material cementante.

a. Fraguado

Es el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento.

En la práctica, cuando una cantidad de cemento se mezcla con agua se forma una pasta plástica, que se pierde a medida que transcurre el tiempo, hasta que llega un momento en que la pasta pierde su viscosidad y se eleva su temperatura. El tiempo transcurrido desde la adición del agua se llama fraguado inicial del cemento e indica que el cemento está hidratado y está semiduro. Posteriormente la pasta sigue fraguando hasta que deja de ser deformable, se vuelve rígida y llega al máximo de temperatura, este es el tiempo de fraguado final e indica que el cemento se encuentra aun más hidratado y la pasta se encuentra dura.

Los factores que tienen mayor influencia en los tiempos de fraguado son:

- La composición química del cemento.
- La finura del cemento. Mientras más finos sean los granos, mayor será la velocidad de hidratación.
- Mientras mayor sea la cantidad de agua de amasado, más rápido será el fraguado.
- A menor temperatura ambiente, más lentamente ocurrirán las reacciones de hidratación. A temperaturas debajo de  $-1^{\circ}\text{C}$  el cemento no fragua.
- A mayor temperatura ambiente más rápido ocurrirán las reacciones de hidratación. Sin embargo, a  $32^{\circ}\text{C}$  ocurre el efecto inverso.

#### b. Resistencia mecánica

La resistencia mecánica del cemento endurecido es una propiedad del material en cuanto a los requisitos para usos estructurales. La resistencia de un cemento es función de su fineza, composición química, grado de hidratación, así como el contenido de agua en la pasta.

Es importante tener en cuenta las causas que puedan provocar pérdidas de resistencia de este material, las cuales son: envejecimiento, humedecimiento, e incorrecto almacenamiento del cemento.

La resistencia de los cementos se desarrolla en periodos de tiempos relativamente largos. La velocidad de desarrollo de la resistencia es mayor durante el periodo inicial de endurecimiento y tiende a disminuir gradualmente

con el tiempo. El valor de la resistencia a los 28 días se considera como la resistencia del cemento.

c. Pérdida por Ignición

Una elevada pérdida por ignición es una indicación de pre-hidratación o carbonatación que puede ser producida por un almacenamiento incorrecto y prolongado. No debe exceder el 2%.

d. Peso específico

Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto. Este valor varía poco en un Cemento Portland donde no hay adiciones distintas al yeso, el peso específico suele estar comprendido entre 3,1 a 3,2 g/cm<sup>3</sup>.

e. Consistencia normal

La cantidad de agua que se le agrega al cemento, le comunica una determinada fluidez, el cual aumenta al incrementarse el contenido de agua. Existe una determinada fluidez para lo cual se agrega una cierta cantidad de agua, a esta fluidez se le llama consistencia normal. El contenido normal de una pasta se expresa en porcentaje de peso en seco y suele variar entre 23-33% dependiendo de las características del cemento.

## **CAPÍTULO 4.**

### **ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL CEMENTO.**

El presente capítulo realiza un estudio de las variables que influyen en la resistencia a la compresión del cemento a edades de 24 horas, 3, 7 y 28 días, de forma que puedan iniciarse medidas correctivas o preventivas en una etapa temprana, controlando de esa manera su proceso de producción.

Los factores claves que determinan las propiedades del cemento y en especial su resistencia son las siguientes variables:

- Químicas-mineralógicas.
- Superficie específica.
- Distribución de tamaño de partículas.

#### **4.1. VARIABLES QUÍMICAS- MINERALÓGICAS.**

Entre las variables que influyen en la resistencia del cemento se pueden citar:

- Silicato Tricálcico ( $C_3S$ ), contribuye al desarrollo de resistencias iniciales altas.
- Silicato Bicálcico ( $C_2S$ ), contribuye al desarrollo de resistencias finales.
- Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ ), contribuye a aumentar ligeramente las resistencias del cemento a corto plazo.
- Cal Libre, afecta la resistencia del cemento principalmente induciendo expansión, inestabilidad en su volumen, y agrietamiento.
- Modulo de saturación, mide el grado de formación de compuestos cálcico, o saturación total por la cal en el clínker. Esta saturación ocurre cuando la cal puede combinarse con la sílice, alúmina y hierro en condiciones ideales. El modulo de saturación viene dado por:

$$MS = \frac{CaO}{2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3} \quad (1)$$

- Altos contenidos de álcalis en el clínker determinan una disminución en la resistencia final, mientras que la resistencia inicial se ve incrementada. Una alta cantidad de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  disminuye la resistencia a temprana y tardía edad.
- Incrementando el contenido de  $\text{SO}_3$  en el clínker tiende a reducir la resistencia del cemento debido a un decrecimiento del contenido de alita.

#### **4.2. MÉTODOS USUALES DE ANÁLISIS QUÍMICOS.**

El análisis químico tiene particular incidencia en el control de la producción del cemento, análisis que se han mejorado en los últimos años por las nuevas tecnologías métodos instrumentales y sistemas de muestreo que permiten una rápida reacción para adoptar decisiones que regulen el proceso de fabricación.

Las modernas fábricas de cemento utilizan los métodos de Rayos X. Estos métodos analíticos “no destructivos” se vienen utilizando en la industria desde hace mas de 15 años, bien sea para el análisis elemental cuantitativo por fluorescencia (espectrometría de Rayos X), o la determinación cuantitativa de fases por difracción (difractometría de Rayos X).

La determinación de los principales óxidos:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  se efectúa básicamente por fluorescencia de rayos X, tanto en la materia prima, los crudos y el cemento.

Por razones de rapidez y precisión, los álcalis  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , son analizados por métodos de fotometría de llama.

##### **4.2.1. Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X.**

El Espectrómetro de Rayos X es una técnica usada para determinar los elementos presentes en cualquier sustancia en particular.

##### **Principio de Funcionamiento:**

Un haz de Rayos X de alta energía es dirigida a la muestra, esta radiación se desaloja electrones de las “capas internas” de los átomos, siendo de inmediato ocupadas las posiciones o plazas libres por los electrones de las “capas

externas". Estos electrones exteriores pasan así a un estado de menor energía, emitiéndose simultáneamente la energía liberada como radiación X secundaria o fluorescencia. Esta radiación secundaria contiene longitudes de onda que son características de cada elemento presente, y pueden ser separados geoméricamente usando apropiados cristales analizadores para una individual detección y medición (dispersión de longitud de onda) o puede ser coleccionada como una radiación mezclada y analizadas en bandas de energía electrónicamente (energía dispersiva).

El fundamento físico de este análisis es la ecuación de Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \text{Sen}\theta \quad (2)$$

En la que:

$\lambda$ : Es la longitud de onda de la radiación.

$\theta$ : Ángulos de incidencia y difracción.

d: Espaciado de los planos reticulares del cristal.

n: Número entero.

En el análisis por fluorescencia de Rayos X se conocen d y  $\theta$  mediante los dispositivos de que consta el equipo, mientras que  $\lambda$ , que es, la longitud de onda característica de la radiación, es determinada por medición experimental.

De la ecuación de Bragg (2) se deduce que las radiaciones X hay que medirlas para ángulos determinados entre la muestra y el detector. Para tal efecto, el sistema de medición dispone de varios canales medidores instalados de forma fija, una por cada elemento que se desea detectar (Sistema Simultáneo Multicanal), que lo hace más rápido, para programas de rutina.

Los métodos de preparación de las muestras son decisivos en cuanto a la fiabilidad de los resultados. La radiación X solo penetra unas cuantos micrones dentro de la superficie de la muestra, por esta razón la muestra de polvo debe ser molida a – 20 micrones.

El equipo de Rayos X da a conocer los porcentajes de óxidos tales como: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, MgO, SO<sub>3</sub>.

Para cuantificar las fases, el equipo usa una aproximación matemática basada en el análisis elemental del clínker, mediante las fórmulas de Bogue.

**Fórmulas de Bogue:**

$$C_3S = 4,071CaO - 7,6SiO_2 - 6,718Al_2O_3 - 1,43 Fe_2O_3 - 5,852 SO_3 \quad (3)$$

$$C_2S = 2,867 SiO_2 - 0,7544 C_3S \quad (4)$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,692 Fe_2O_3 \quad (5)$$

$$C_4AF = 3,043 Fe_2O_3 \quad (6)$$

La Figura 4.1 muestra un equipo típico de Rayos X por fluorescencia en la industria cementera.

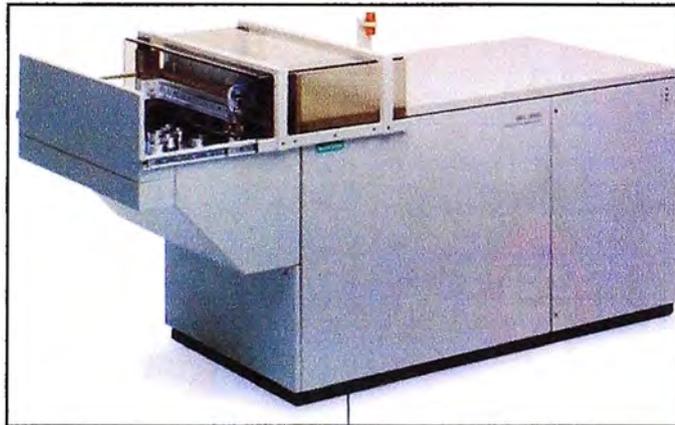


Figura 4.1. Equipo de Rayos X, por fluorescencia.

**4.2.2. Ensayos por Difracción de Rayos x.**

La difracción por Rayos X es una técnica no-destructiva utilizada para identificar y cuantificar las fases mineralógicas presentes en una muestra, a diferencia de la fluorescencia de rayos X que permite conocer únicamente el porcentaje de los óxidos en la composición.

**Principio de Funcionamiento:**

La difracción es uno de los fenómenos físicos que se producen al interactuar un haz monocromático de Rayos X con una sustancia cristalina. La dispersión coherente que se produce por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y la interferencia constructiva de las ondas que están en

fase, producen la difracción de Rayos X obteniéndose un difractograma. El difractograma de una muestra policristalina permite identificar las fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico), tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. En el cemento, aporta con el conocimiento más definido sobre los productos de hidratación del cemento. La Figura 4.2 muestra el difractograma del clínker; los picos muestran las fases del clínker.

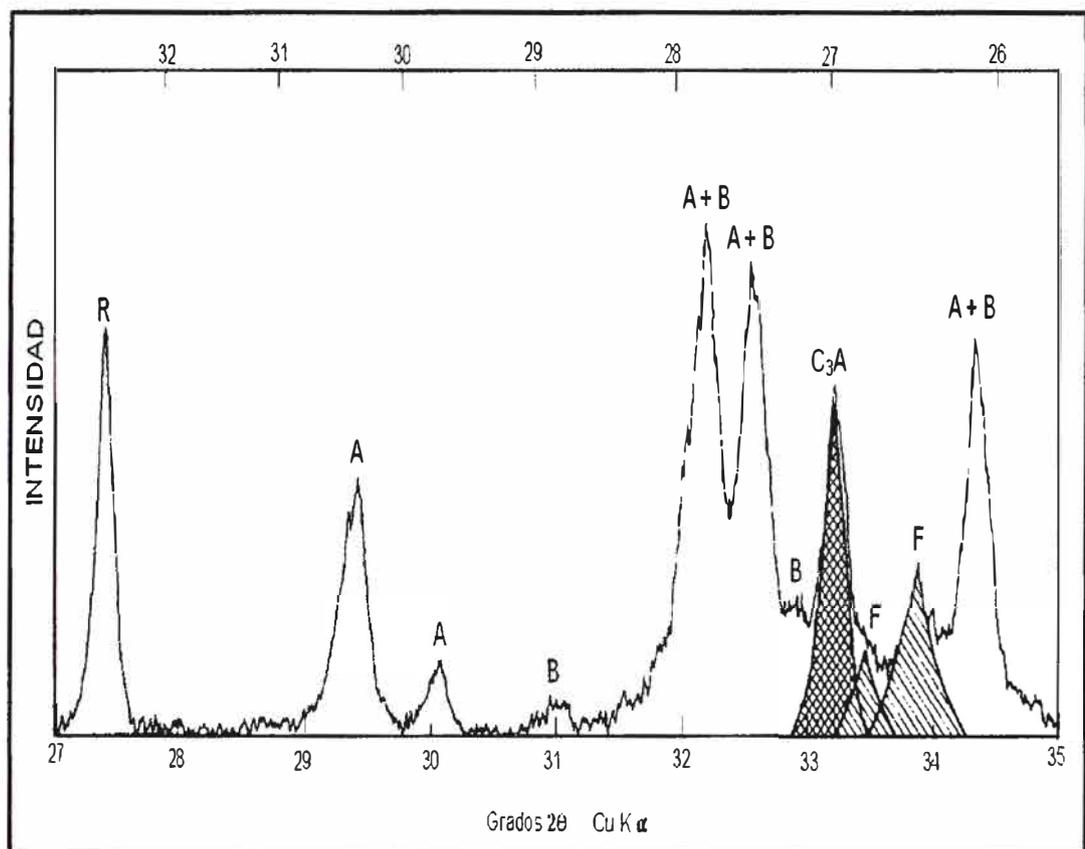


Figura 4.2. Difractograma del clínker (A) Alita, (B) Belita, (F) Fase Ferrítica.



Figura 4.3. Equipo de Difracción por Rayos X.  
Fuente: Cementos Lima S.A

#### **4.3. VARIABLES DE SUPERFICIE ESPECÍFICA.**

El valor de la finura decide la calidad del cemento, de modo que cuanto más elevado sea el grado de finura, le corresponde una mayor superficie de exposición a las reacciones de hidrólisis, dando lugar a un mayor desarrollo en la formación de los hidrosilicatos, hidroaluminatos y geles por unidad de volumen, aumentando la gradiente de resistencia a la compresión en el endurecimiento, sobre todo a corto plazo.

#### **4.4. METODOS PARA DETERMINAR LA SUPERFICIE ESPECÍFICA.**

Los ensayos para determinar la superficie específica consisten en la determinación del tamaño de partículas del polvo de cemento, ya que este es muy fino, no se puede calcular con un proceso granulométrico a través de tamices, por esta razón se desarrollaron otros procedimientos, los más usados son:

- El Turbidímetro de Wagner, para determinar la finura por medio del turbidímetro.

- El Permeabilímetro de Blaine, para determinar la finura por medio del aparato de Blaine de permeabilidad. Este equipo es utilizado para el desarrollo del presente proyecto.

#### **4.4.1. Método de Blaine.**

##### **Principio de Funcionamiento:**

Se basa en la permeabilidad de una capa de cemento en cierto grado de compactación al paso del aire.

Este método consiste en hacer pasar una cantidad determinada de aire a través de una capa de cemento de porosidad definida. La cantidad y el tamaño de los poros existentes en dicha capa, están en función del tamaño de las partículas y determinan el gasto de aire a través de la capa. El cemento se coloca en un recipiente (tubo en U), y éste es compactado por un émbolo, y, mediante una pera de caucho conectada, se inyecta aire, el cual al pasar mueve un líquido que se encuentra en un manómetro instalado al recipiente, como se observa en la Figura 4.4.

La superficie específica esta expresada en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Los valores típicos de la superficie específica de los cementos oscilan entre los 2 800 y 4 500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Ventajas del Método:

- Es rápido.
- Existe una aceptable correlación con la resistencia y el fraguado.
- Es un método normalizado.

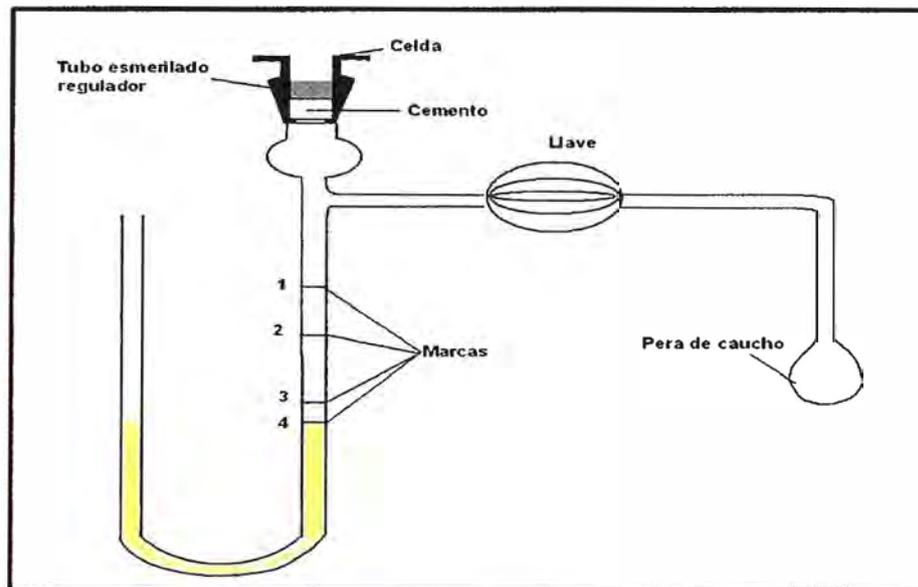


Figura 4.4. Permeabilímetro de Blaine

Desventajas del método:

- Se obtiene un solo resultado y no da idea de la distribución del tamaño de partícula
- Influencias externas, tales como; las variaciones en la humedad de la muestra, alteraciones en la calidad del clinker (muy bajo peso por litro), o con cementos adicionados que requieren de otra calibración, pueden alterar considerablemente el resultado.
- No tiene una buena reproductibilidad
- Existe diferencia en la forma de las partículas de los cementos generados por procesos de molienda diferentes, como en molinos de bolas y prensa de rodillos y se obtienen resultados diferentes.

En el mercado existen actualmente equipos electrónicos Blaine para medir la superficie específica, este equipo se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5. Equipo electrónico Blaine  
Fuente: Cementos Lima

#### 4.5. VARIABLES DE DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE PARTICULAS.

La superficie específica determinada por el método de Blaine, se puede tener un estimado del tamaño de partículas del polvo de cemento, que es un buen indicador; sin embargo, diferentes tamaños de partículas pueden tener una misma superficie específica, es por eso, que en la actualidad para determinar la granulometría de partículas finas se utiliza el granulómetro láser.

La mayoría de autores está de acuerdo en que el tamaño óptimo de las partículas del cemento se ubica entre 10-30  $\mu\text{m}$ . Las partículas muy grandes no hidratan completamente, lo que lleva a una disminución de la calidad, y las partículas muy finas solamente mejoran las resistencias iniciales, además de provocar una demanda de molienda extra, que resulta ser muy costosa.

Numerosos intentos se han realizado para correlacionar el desarrollo de la resistencia a la compresión producido en el cemento con su distribución de tamaño de partícula. Una opinión generalizada dice que la fracción 3-30  $\mu\text{m}$  da mayor contribución a la resistencia a los 28 días. *Tsivilis* [37] y *García* [19] obtuvieron resultados con diferentes fracciones de tamaños y señala que la influencia de partículas <3  $\mu\text{m}$  es alta en resistencias de tempranas edades.

#### 4.6. METODOS PARA DETERMINAR TAMAÑOS DE PARTICULAS.

Existen varios métodos de análisis de tamaño de partícula entre los que se puede mencionar: el tamizado, y el método de difracción láser.

##### 4.6.1. Tamizado

Es un proceso probabilístico de separación de las partículas de acuerdo con su tamaño, se tiene dos formas de tamizado:

##### a. Separación por vibración:

Esta forma se usa generalmente para tamaños de partículas mayores y depende principalmente de:

- La cantidad de partículas alimentada.
- La frecuencia de vibración.
- El tiempo de tamizado.

##### Principio de Funcionamiento:

Consiste en pasar la muestra a través de un cedazo, mientras el equipo vibra por determinado tiempo, de modo que las partículas mayores a la abertura de la malla queden retenidas. La Figura 4.6 muestra en (a) Los tamices, y en (b) El equipo Rotap.

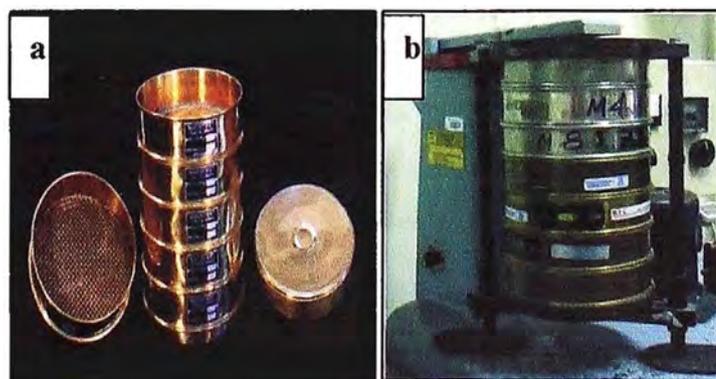


Figura 4.6. Instrumentos para tamizado: (a) Tamices y (b) Rotap para tamizado.

Ventajas:

- Confiable, económico para rango de tamaños grandes de partículas.
- Los procedimientos están normalizados.

Desventajas:

- La medición de partículas menores a 38  $\mu\text{m}$  resulta muy dificultosa, haciéndolo poco práctico.
- Si bien existen tamices para partículas de hasta 15  $\mu\text{m}$ , resulta imposible la medición menos de 5  $\mu\text{m}$ .
- La forma de las partículas puede generar resultados inciertos, pues la medición depende de su orientación respecto al plano del tamiz.
- En cemento, la mayoría de las partículas son menores a 38 micras, por lo que el uso de tamices es poco práctico.

b. Separación por corriente de aire

Esta forma se utiliza para tamaños de partícula menores,

**Principio de Funcionamiento:**

El producto que se va a analizar es movido solo por una corriente de aire. Este sistema permite evitar cualquier influencia mecánica del tamizado. Con depresión y duración idéntica es posible efectuar, en cualquier momento análisis exactamente reproducibles de granulometrías. El fuerte chorro de aire que sale de la tobera provoca la limpieza continua del tejido del tamiz.

La figura 4.7 (a) muestra un equipo típico de tamizado por succión de aire. Las partes del equipo se muestra en la Figura 4.7 (b), donde: (1) Tapa. (2) Tamiz. (3) Chorro de aire. (4) Tobera giratoria. (5) Cuerpo.

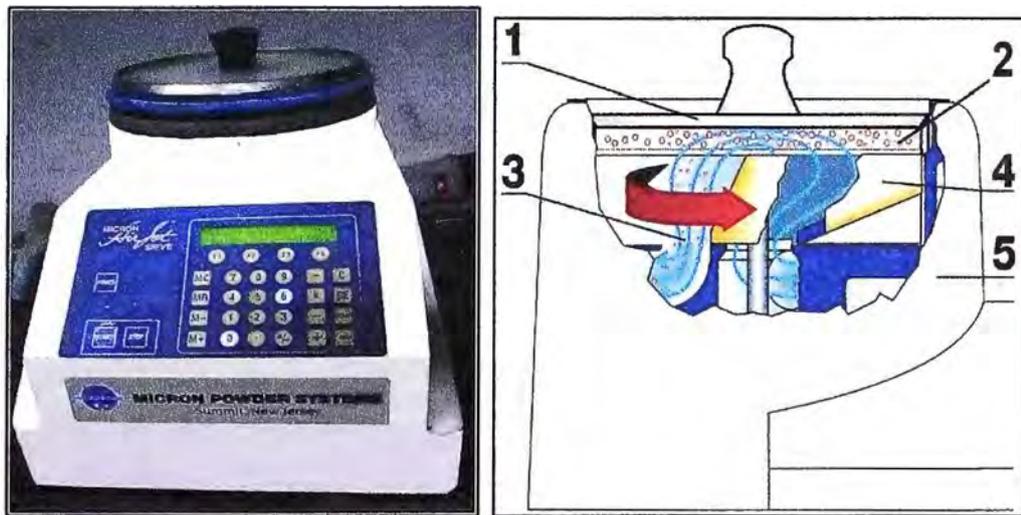


Figura 4.7. Equipo de tamizado por succión de aire. (a) Tamizador por succión de aire. b) Partes del equipo.

#### 4.6.2. Granulómetro láser

La técnica de difracción láser, es uno de los métodos de empleo más común para medir tamaños de partícula y distribuciones de tamaño de 0,1 a 2 000  $\mu\text{m}$ . Su aplicación es muy difundida debido a su amplio intervalo dinámico, precisión, y su facilidad de uso. Las mediciones se hacen exponiendo la muestra a un haz de luz y detectando los patrones angulares de luz dispersada por partículas de distintos tamaños. Debido a que los patrones producidos del tamaño de partícula son muy característicos, un análisis matemático de ellos puede producir una medición reproducible exacta de la distribución de tamaño. En la figura 4.8 se muestra un diagrama típico de difracción láser. El haz proveniente de un láser de onda continua, es colimado y se hace pasar por la muestra donde las partículas provocan la dispersión. El haz se enfoca después sobre una serie de detectores donde se mide el patrón de dispersión, que se muestra en la Figura 4.8 como un patrón de difracción. El patrón de dispersión se analiza entonces de acuerdo con modelos teóricos para dar la distribución del tamaño de partículas. La Figura 4.9 muestra el Equipo Granulómetro por difracción láser

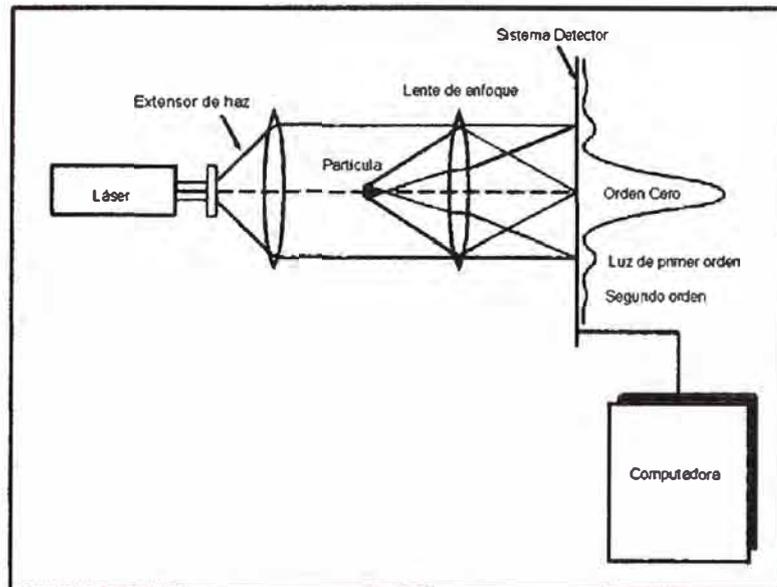


Figura 4.8. Aparato de difracción Láser



Figura 4.9. Granulómetro Láser. Cilas 1064.  
Fuente: Cementos Andino S.A

#### 4.7. FUNCION DE DISTRIBUCION DE ROSIN RAMMLER

Una distribución de tamaño de partículas es usualmente representada como una curva de porcentaje acumulado y para la mayoría de los cementos Portland este se ajusta a la ecuación propuesta por Rosin Rammler.

$$G(x) = 100 e^{-\left(\frac{x}{P_p}\right)^n} \quad (7)$$

Donde:

$G(x)$ : Es el porcentaje retenido acumulado.

$x$ : Es el diámetro del tamaño de partículas ( $\mu\text{m}$ ).

La Figura 4.10 muestra la curva de distribución típica de los tamaños de partícula, donde la línea de color marrón muestra el porcentaje retenido acumulado (0-100%) con la ordenada del eje derecho; y la línea de color negro muestra el porcentaje retenido para la ordenada del eje izquierdo.

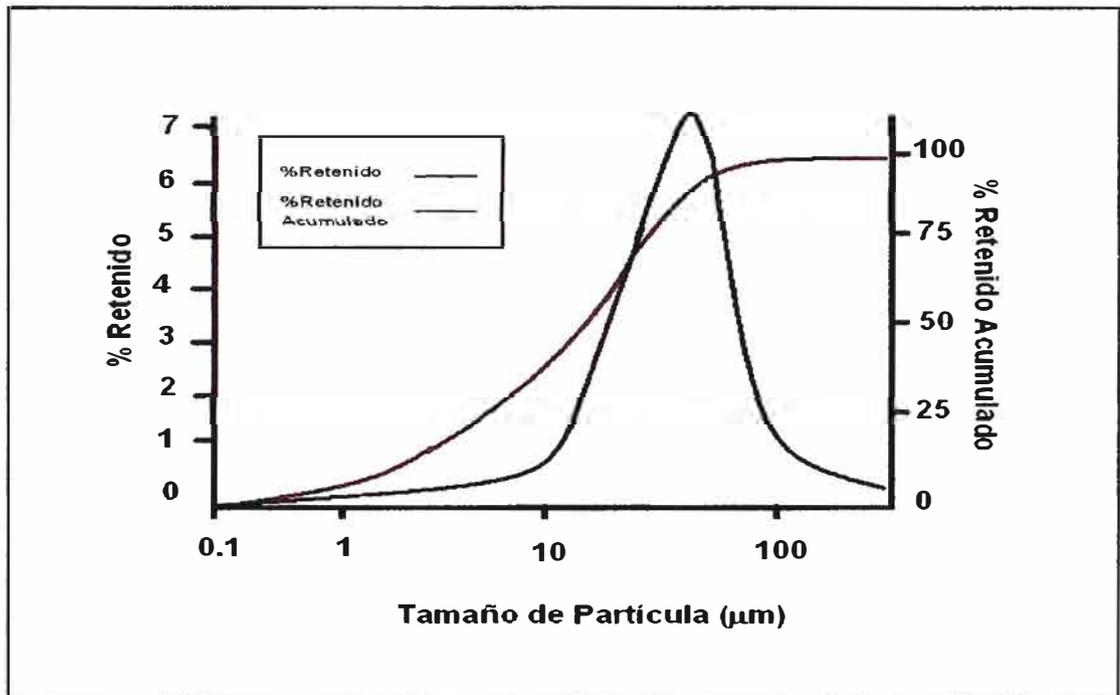


Figura 4.10. Distribución de tamaños de partículas

Si se quiere representar en forma lineal la ecuación 7 queda:

$$\text{Log} \left( \text{Ln} \left( \frac{100}{G(x)} \right) \right) = n \cdot \text{Log} (x) - n \cdot \text{Log}(P_p) \quad (8)$$

Al graficar el  $\text{Log} \left( \text{Ln} \left( \frac{100}{G(x)} \right) \right)$  versus  $\text{Log} (x)$ , se obtendrá una línea recta de pendiente  $n$  y ordenada en el origen  $n \cdot \text{Log}(x_0)$ .

Un gráfico de Rosin –Rammler tiene la forma indicada de la Figura 4.11. El eje de la ordenada derecho representa el porcentaje retenido acumulado y el eje de las abscisas el tamaño de partícula.

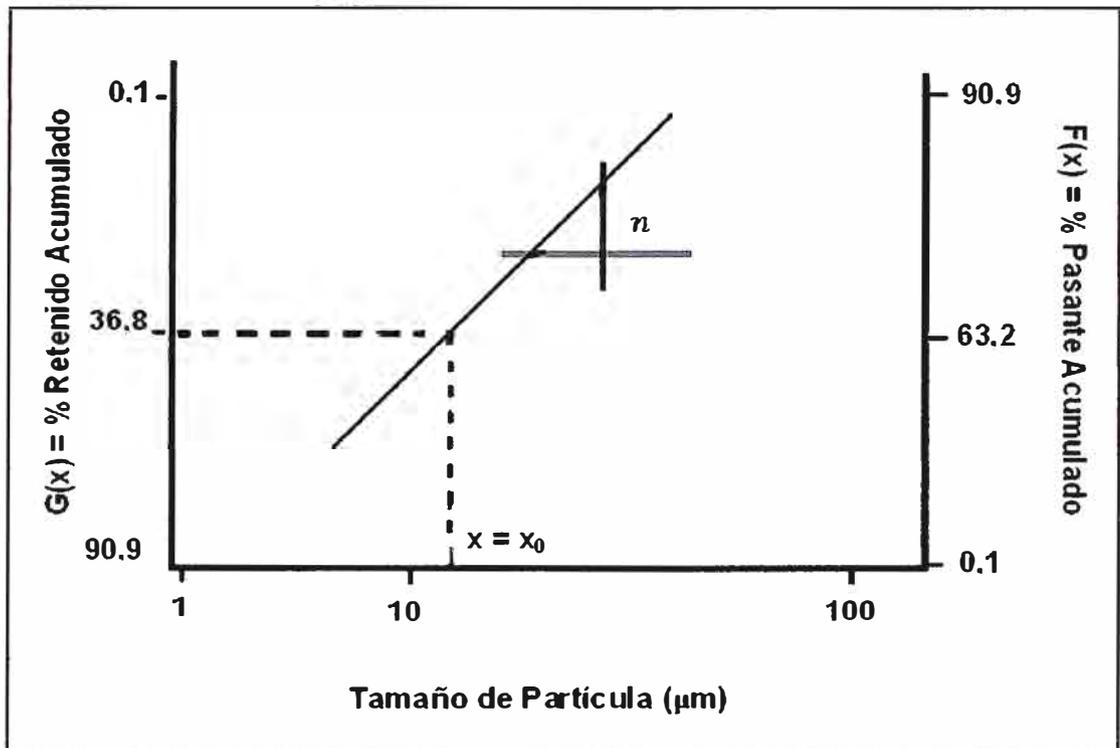


Figura 4.11. Gráfica de Rosin Rammler

Mediante la gráfica de la ecuación (8), que se muestra en la figura 4.11, se determinan el parámetro de posición y la pendiente  $n$ .

Para determinar  $P_p$  ubicamos gráficamente  $G(x) = 36,8\%$  hacemos un trazo como se ve en la figura 4.11 y hallamos  $P_p$ . Por otro lado  $n$  lo determinamos de la pendiente de la recta.

#### **Significado de $P_p$ y $n$ :**

**$P_p$ :** Es el parámetro de posición, en el cual el retenido acumulado es 36,8% y es usado para caracterizar el grado de molienda de un material.

**$n$ :** Es el valor de la pendiente y tiene una influencia muy importante en las características de la calidad del cemento.

La pendiente y el parámetro de posición son valores que definen a una distribución y junto con la superficie específica se utiliza para describir la superficie del cemento.

#### **4.8. NORMALIZACION DEL CEMENTO PORTLAND.**

El cemento en el Perú cuenta con: 7 normas sobre especificaciones, 1 de muestreo e inspección, 5 sobre adiciones y 30 sobre método de ensayo. En la actualidad, la responsabilidad de la normalización se encuentra en el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). La práctica internacional, efectúa la normalización por intermedio de comités técnicos tripartitos que congregan a especialistas de la producción, el consumo y la tecnología.

La normalización del cemento se lleva a cabo por el Comité Técnico Permanente de Normalización de Cementos y Cales, cuya gestión tiene a su cargo la Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM) quien ejerce la secretaría técnica.

Así mismo las normas internacionales adoptadas para la fabricación de cemento son las de la Sociedad Americana para ensayos de materiales (ASTM), Sección 04 – CONSTRUCTION. Volumen 04.01 **Cemento; Caliza; Yeso.**

La Tabla 4.1 muestra las equivalencias entre la NTP y la ASTM, para todos los ensayos que se realizarán en el desarrollo experimental del presente proyecto.

TABLA 4.1. Equivalencias entre la Norma Técnica Peruana (NTP) y la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM)

CATEGORIA	METODO DE ENSAYO	NTP	(ASTM)
ANALISIS DE COMPOSICION	Método de ensayo para determinar la densidad del cemento Portland	334.005:2001	C 188
	Método para el análisis químico del cemento	334.086:1999	C 114
	Método de ensayo para la determinación de la proporción de fases en cemento Portland y clínker mediante análisis por difracción de rayos X.	334.108:2001	C 1365
CURADO	Ambientes, gabinetes y tanques de almacenamiento utilizados en los ensayos de cemento y concreto. Requisitos	334.077:1997	
RESISTENCIA DEL CEMENTO	Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento portland cubos de 50 mm de lado.	334.051:1998	C 109
	Prácticas para mezcla mecánica de pasta de cemento hidráulica y consistencia plástica de morteros		C 305
	Métodos de Prueba para la fluencia del mortero de cemento hidráulico		C 1437
FINURA	Cementos. Determinación de la finura expresada por la superficie específica (Blaine)	334.002:2003	C 204
	Cemento. Método de ensayo para determinar la finura por tamizado seco con tamices 45 $\mu\text{m}$ (M-325)	334.058:1980	C 430

## **CAPÍTULO 5.**

### **ESTUDIO DE LOS MODELOS MATEMATICOS EN LA ETAPA DE MOLIENDA.**

En el capítulo anterior se mencionó que la hidratación del cemento se inicia en la superficie de sus partículas. A mayor fineza, significa que mayor área superficial por unidad de peso reacciona con el agua; por tanto, las reacciones de hidratación se realizan con mayor rapidez, ocasionando el desarrollo de la resistencia del cemento.

La superficie específica está relacionada con la distribución de tamaños de partículas [43] y éste a su vez con el proceso de molienda; por esta razón, el presente proyecto realiza un estudio de la resistencia a la compresión del cemento, sobre la base de los diferentes grupos de tamaño de partículas.

El esquema industrial estudiado correspondiente a la etapa de molienda es el que se muestra en la Figura 5.1, el cual será analizado a detalle en el Capítulo 6.

#### **5.1. Teoría Moderna de la Conminución**

En estos últimos años se han venido realizando investigaciones con el objetivo de desarrollar modelos matemáticos semi – empíricos que permitan describir en forma independiente las operaciones de conminución y de clasificación dentro del proceso de molienda, lográndose detalles satisfactorios para una gran variedad de aplicaciones; el cual representa el criterio técnico aplicado en el presente trabajo, es decir la determinación granulométrica de las partículas en el circuito de molienda.

Antes de revisar las razones que afectan al molino de bolas, es fundamental definir el concepto de “sistema”. En términos muy simples, este concepto reconoce al molino de bolas como parte de un proceso, y por tanto nos permite, modelar o evaluar la distribución de tamaño de partícula a su salida. Por otro lado es necesario considerar al clasificador de aire o separadora como parte de este proceso (Ver Figura 5.1).

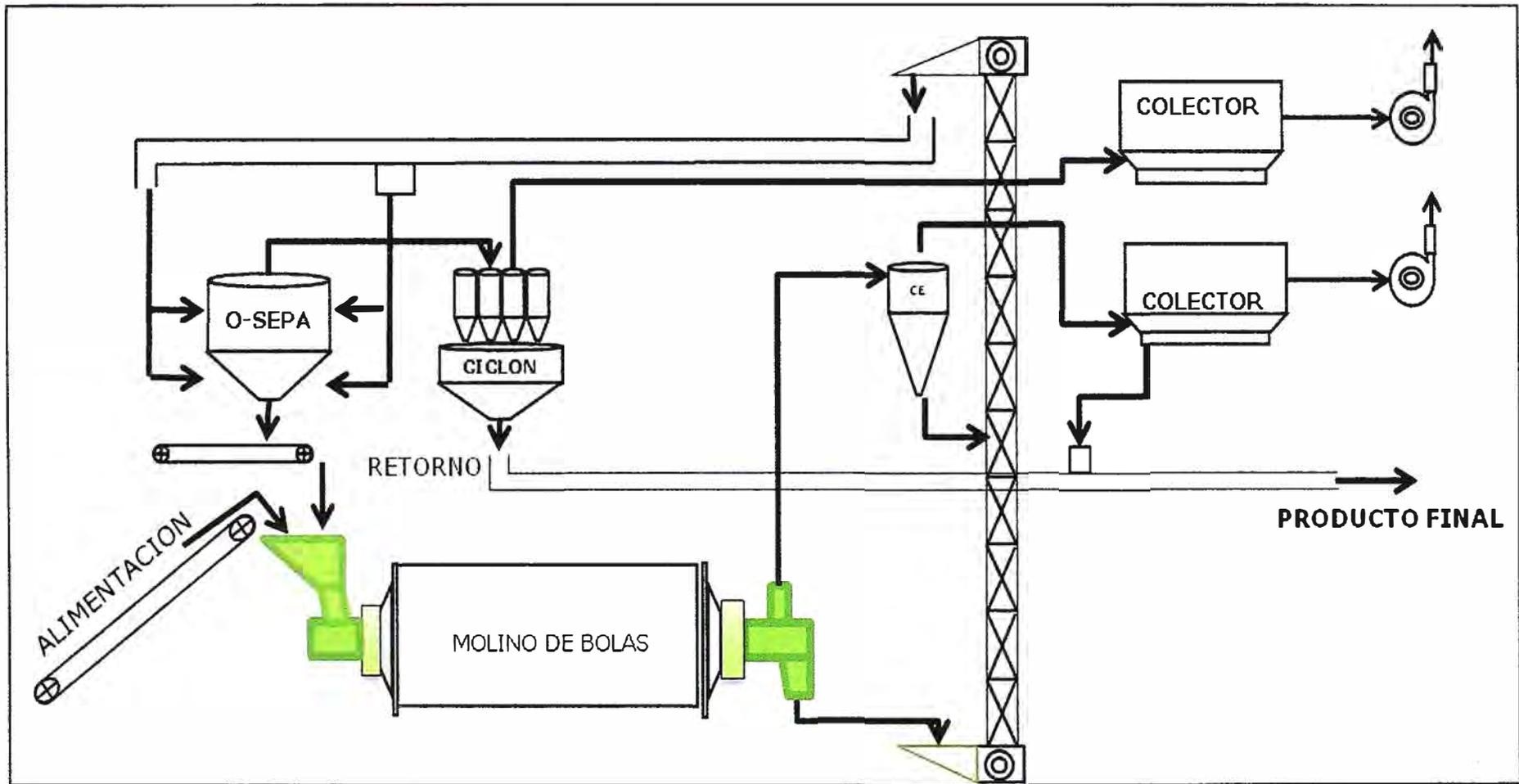


Figura 5.1. Esquema Real para un Circuito de Molienda de Cemento Portland Tipo I.

### 5.1.1. La molienda como un proceso unitario.

La reducción de tamaño por trituración y molienda es una operación importante en la industria minera-metalúrgica, de energía y química. La base teórica que se usa en la actualidad, se puede comparar, por ejemplo, a la que existe para la transferencia de calor y la destilación; tiene gran similitud con la teoría del diseño de reactores químicos, usando muchos conceptos en común con la terminología usada en este campo.

Un molino es esencialmente un **reactor** que está transformando partículas grandes a partículas más pequeñas.

El **reactivo** en el molino es la alimentación que en él ingresa, que raramente es de un solo tamaño y normalmente tiene una distribución granulométrica completa, de tal manera que puede considerarse como un conjunto de reactivos.

El **producto** es la distribución de tamaños del material que sale del molino. Nuevamente, estos resultados no son de un solo monotamaño por lo que se utiliza una curva o un conjunto de números para caracterizar su distribución granulométrica, de la misma manera que se indicó para el material de alimentación.

La velocidad a la cual las partículas se fracturan en un equipo de molienda depende del tamaño de partículas y otras variables. A diferencia de un reactor químico simple que convierte un reactivo "A" en producto "B", la alimentación al molino es de diferentes tamaños de partículas obteniendo un tamaño máximo, y los productos obtenidos también son de diferentes tamaños, pero el tamaño máximo es menor con respecto a la alimentación, o el porcentaje de los tamaños menores se va incrementando. En forma semejante a un reactor químico, el conocimiento de la velocidad a la cual cada tamaño se fractura permite la predicción de la rapidez de desaparición de estas partículas de la carga del molino.

La comprensión detallada del molino involucra el conocimiento de la distribución de tamaño de la progenie, esto es, de la función de distribución de fractura primaria, que se verá posteriormente con mayor detalle. Un evento de fractura primaria típico se muestra en la Figura 5.2.

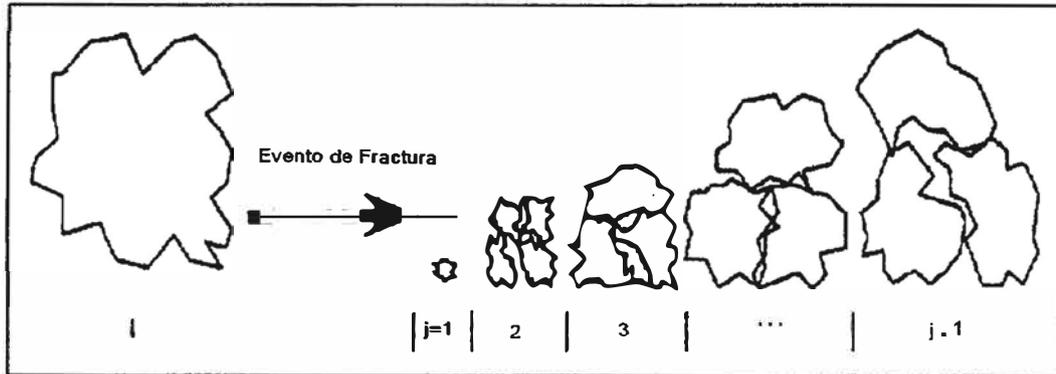


Figura 5.2. Evento de fractura ([33]).

El conocimiento de la rapidez con que un determinado tamaño se fractura y en que tamaño aparece su producto, constituye la descripción elemental del balance de masa por tamaños o **balance de población del molino**.

La velocidad de fractura se ve influenciada por la geometría del molino o las condiciones de operación. Esto es equivalente a cambiar la temperatura en un reactor químico.

Si se considera nuevamente al molino como un reactor, surge otro nuevo concepto. Si la velocidad de alimentación de un molino de bolas de determinado tamaño se disminuye, el material permanece por más tiempo en el molino, se fractura más y también se muele más finamente. Por lo tanto, el tiempo de retención, que también recibe el nombre de tiempo de residencia, es un componente fundamental en la descripción de la operación del molino, aplicable a un conjunto particular de condiciones de operación.

Como en cualquier tipo de reactor, lo mencionado anteriormente lleva al concepto de distribución de tiempo de residencia (DTR).

#### 5.1.1.1. Tiempos de Residencia.

En la molienda Batch, todo el material que es alimentado al molino, permanece por un mismo periodo de tiempo, y la cantidad de material retenido en el molino (Hold-up) no cambia con el tiempo. Sin embargo, para llevarlo a molienda continua es diferente, ya que tiene partículas que permanecen distintos periodos de tiempo en el molino.

La variación de tiempo en que las partículas permanecen en el interior del molino se puede representar por una función de Distribución de Tiempos de Residencia (DTR). Ésta describe las características del flujo a través del molino y da el tiempo en que las partículas permanecen dentro del molino para cada porción de una muestra instantánea en la descarga del molino.

Haciendo la equivalencia a un reactor continuo, en el molino existen tres tipos de mezcla que se asocian a tres modelos de flujos que se describen a continuación: Flujo Pistón, Mezcla Perfecta y Flujo Real.

El modelo de **Flujo Pistón** presupone ausencia de mezcla en cualquier dirección del reactor, produciéndose una salida de partículas en el mismo orden en que ellas ingresaron al equipo (Ver figura 5.3.a). En este caso, todas las partículas que ingresa al reactor en el instante  $t = 0$  saldrán del mismo en el instante  $t = \tau$  (es decir todas las partículas tienen el mismo tiempo de residencia  $t = \tau$ , dentro del reactor).

El modelo de **Mezcla perfecta** considera que se mezcla en forma total con una distribución homogénea – instantánea de todas las partículas a través del reactor (ver Figura 5.3.b). En este caso, la concentración de partículas a la salida del reactor en cualquier instante  $t$  considerado es idéntica a la del interior del reactor (en cualquier posición dentro del mismo), alcanzando la función  $E(t)$  su valor máximo ( $1/\tau$ ) en el instante inicial  $t = 0$ , y decreciendo exponencialmente el valor de  $E(t)$  a través del tiempo: Para  $t \rightarrow \infty$ ,  $E(t) = 0$

El modelo de **Flujo Real** corresponde a una situación intermedia entre ambos casos hipotéticos (ideales) descritos anteriormente, siendo el caso más común encontrado en la práctica industrial. (Ver Figura 5.3.c). En este caso, el tiempo promedio que demora el material en salir del proceso se define por:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt \quad (9)$$

Donde  $E(t)$  es la frecuencia de distribución de edad de los elementos que abandona un recipiente.

No obstante lo anterior, el modelo de “N” reactores en serie perfectamente mezclados e idénticos ha demostrado ser lo suficientemente preciso para

representar cualquier situación real, ya que cuando  $N=1$  se obtiene el modelo de mezcla perfecta, mientras que cuando  $N \rightarrow \infty$ , se obtiene el otro caso de flujo pistón. El mejor valor de  $N$  se obtiene a partir de la distribución experimental.

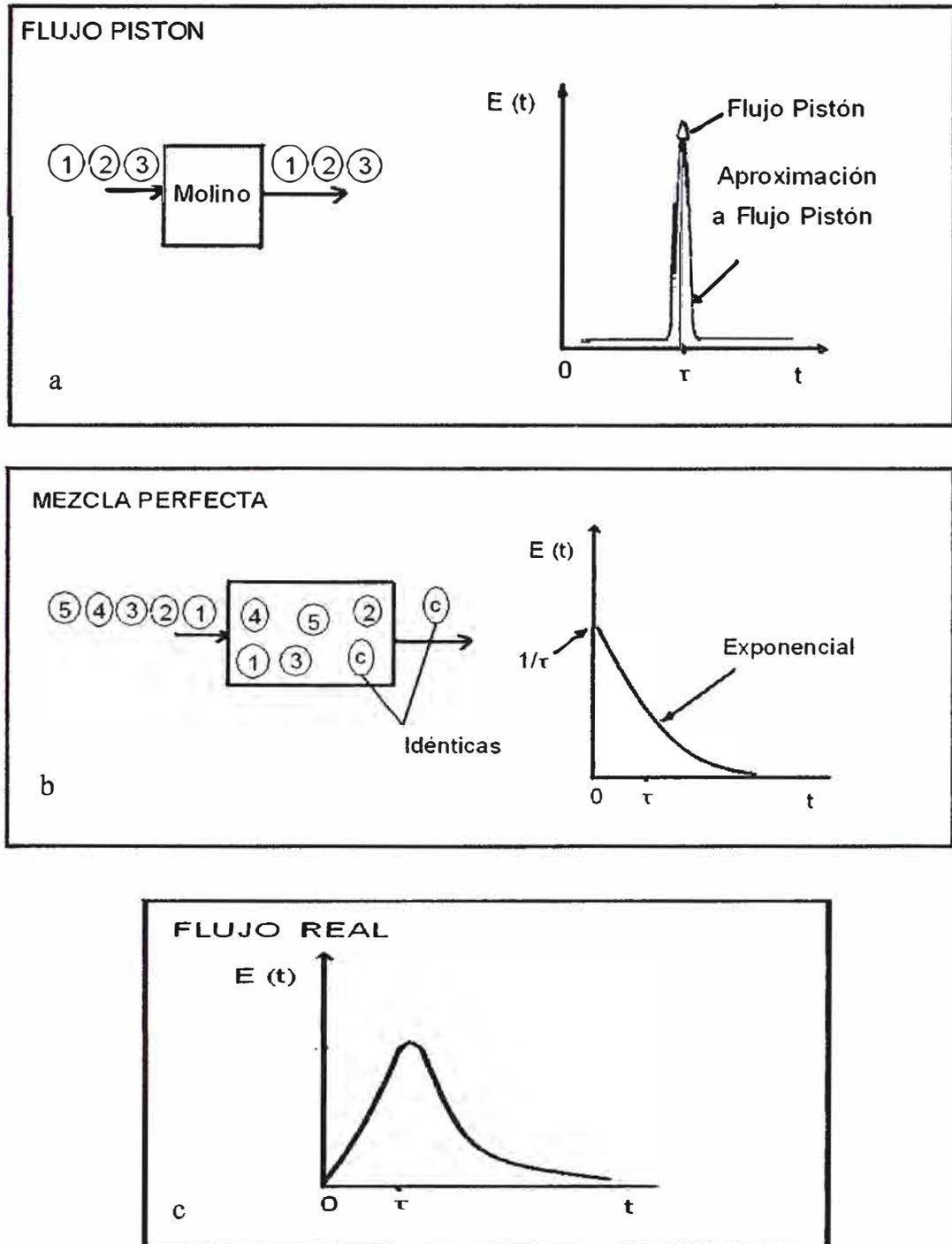


Figura 5.3. Distribución de Tiempos de Residencia para diferentes modelo de Flujos en un Reactor Continuo ([36]).

#### 5.1.1.2. Molino de bolas.

Los molinos utilizados en la industria del cemento pueden ser de una o más cámaras. Aquellas que poseen más de dos cámaras están divididas mediante diafragmas (tabique intermedio) en la cual cada cámara tiene una función determinada en el proceso de molienda. La Figura 5.4 muestra un molino de bolas típico de la industria cementera, en la cual se observan dos cámaras divididas por un diafragma.

Los diafragmas, como se muestra en la figura 5.5, han de impedir el paso de partículas sobredimensionadas a la cámara próxima; por lo tanto las ranuras abiertas en el diafragma sólo dejan pasar material de un determinado tamaño. El diseño del diafragma tiene gran influencia sobre la finura del producto molido así como sobre el caudal del molino.

Las dos cámaras presentan diferentes tamaños de cuerpos moledores. Las bolas más grandes se utilizan en la primera cámara para aplastar a los nódulos de clínker (que pueden ser de más de 25 mm de diámetro), y las bolas más pequeñas van a la segunda cámara para refinar el material.

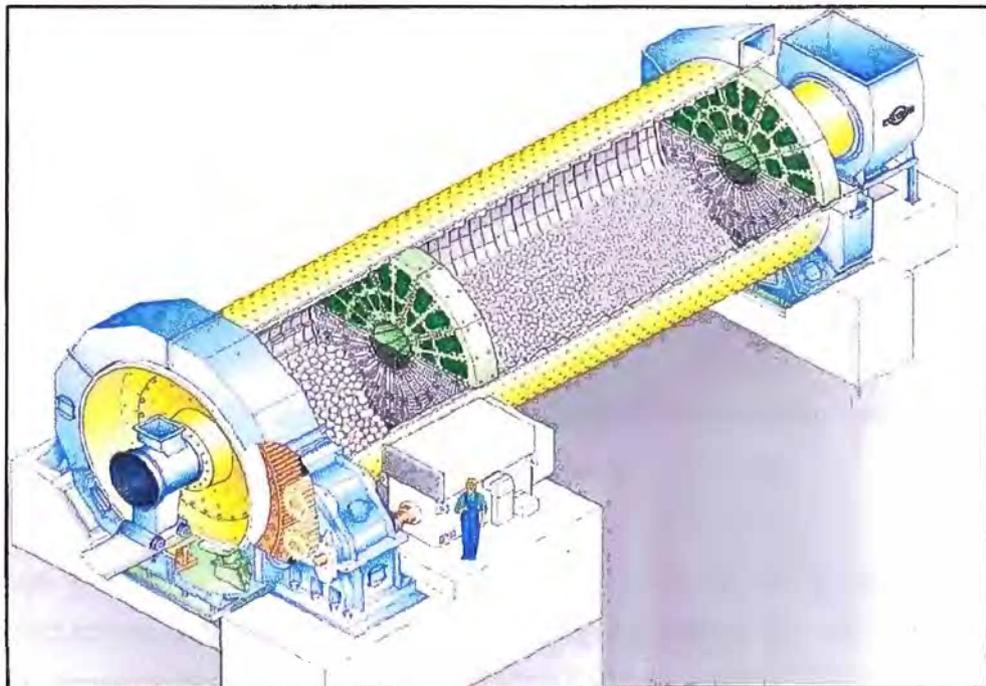


Figura 5.4. Molino de Bolas cementero

Cortesía de Christian Pfeiffer: [www.christianpfeiffer.de/fileadmin/user\\_upload/Download/wand-span.pdf](http://www.christianpfeiffer.de/fileadmin/user_upload/Download/wand-span.pdf)

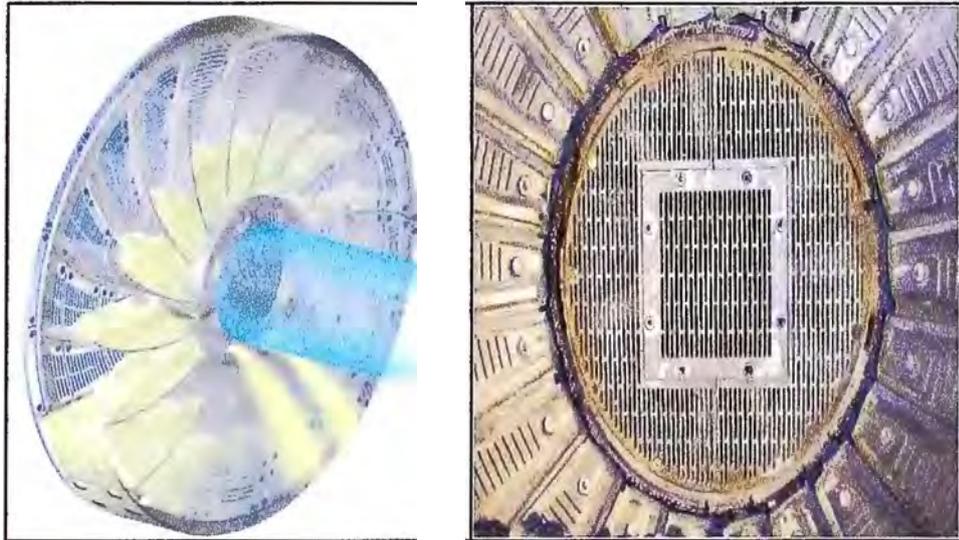


Figura 5.5. Diafragma o Tabique del molino.

Cortesía de Christian Pfeifer

El interior del molino, se encuentra revestido por blindajes acerados (figura 5.6) en la que se encuentran bolas de acero de diferentes diámetros las cuales al impactar con el material originan la molienda.



Figura 5.6. Blindajes en el interior del molino

Cuando el material sale del molino, se extrae el material con ayuda de canales transportadores neumáticos y un elevador al separador de alto rendimiento, donde se realiza la separación entre material fino y grueso.

La refrigeración se consigue con el aire suministrado por el sistema de elevación neumática.

### 5.1.2. Modelo Cinético General de Conminución para un Proceso Batch.

La teoría moderna de la conminución aporta dos nuevos conjuntos de parámetros [37]: La función de selección "S" y la función de Distribución de Fractura Acumulada "B". La primera guarda relación con la cinética o velocidad de fractura de cada partícula independiente; y la segunda, caracteriza la distribución granulométrica de los fragmentos producidos como consecuencia de un evento dado de fractura.

La Figura 5.7 ayuda a definir con mayor claridad ambos conceptos. Considérese que en un tiempo "t" cualquiera, la distribución granulométrica de la carga de un molino "Batch" hipotético queda cuantificado por las fracciones "f" retenidas en los distintos tamices representados en el sector izquierdo de la Figura 5.7.

Transcurrido un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ), la granulometría resultante quedará cuantificada por el contenido de la serie de tamices al lado derecho de la misma Figura 5.7.

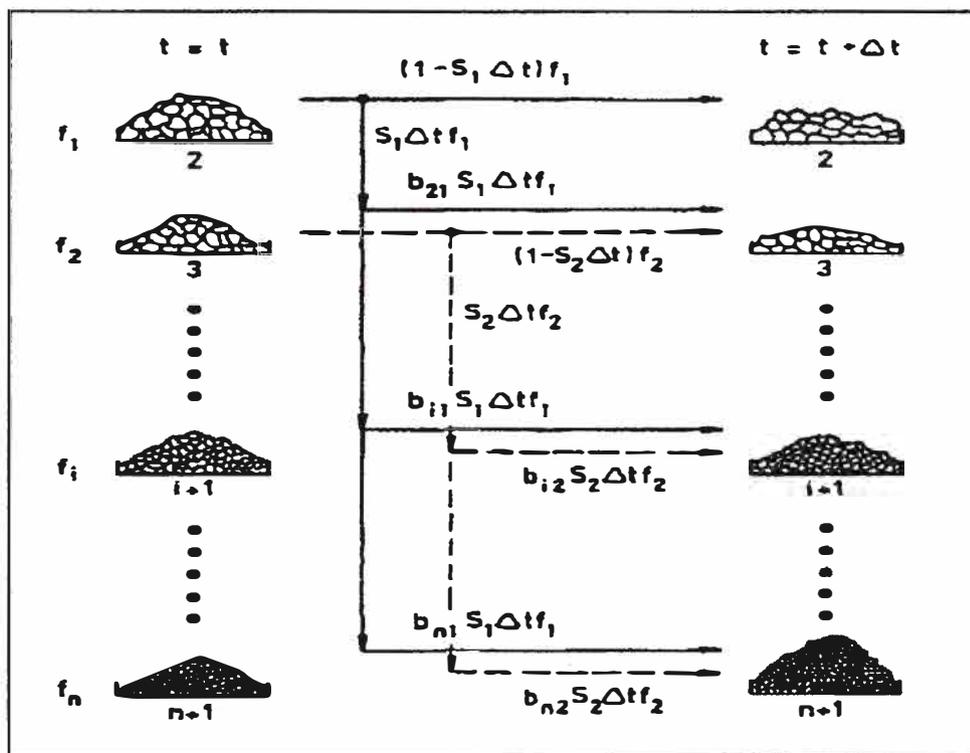


Figura 5.7. Representación Esquemática de los eventos de fractura y generación de partículas durante un instante  $\Delta t$ , en un molino Batch ([36]).

Durante este intervalo, algunas partículas son fracturadas y sus fragmentos distribuidos entre las mallas inferiores, según el tamaño resultante. Para el material retenido en una malla “i” cualquiera, la Función de Selección ( $\text{min}^{-1}$ ) denota la velocidad de fractura de tamaño “i”; es decir, la fracción de las partículas en este rango de tamaños que se fracturan por unidad de tiempo. De manera que el producto ( $S_i, \Delta t$ ) representa la fracción del material retenido en la malla “i” en el instante “t”, que se fractura por la acción del molino de bolas durante el periodo  $\Delta t$  posterior. Su expresión matemática es:

$$f_i(t + \Delta t) = f_i(t) - S_i \Delta t f_i(t) + b_{i1} S_1 \Delta t f_1(t) + b_{i2} S_2 \Delta t f_2(t) + b_{i3} S_3 \Delta t f_3(t) + \dots + b_{i(i-1)} S_{i-1} \Delta t f_{(i-1)}(t) \quad (10)$$

De la ecuación (10), el segundo término del lado derecho de la ecuación representa la cantidad de mineral que abandona la malla “i” por fractura y los siguientes términos representan la cantidad de nuevos fragmentos retenidos en la malla “i”, originados por la fractura de partículas más gruesas originalmente contenidas en la malla “i-1” a “1” (Véase Figura 5.7).

En el límite cuando  $\Delta t \rightarrow 0$ , se obtiene:

$$\frac{d(f_i)}{dt} = -S_i f_i + \sum_{j=i-1}^1 b_{ij} S_j f_j ; \quad \text{Donde: } i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

La ecuación (11), constituye la Ecuación General del Modelo Cinético de Conminución Batch.

La solución analítica de la ecuación (11), desarrollada por Reid es:

$$[f_i(t)]_{\text{BATCH}} = \sum_{j=1}^i A_{ij} \cdot \exp(-S_j \cdot t) \quad ; i = 1 \dots n \quad (12)$$

Donde los valores  $A_{ij}$  se calculan como sigue:

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & ; \text{para } i < j \\ f_i(0) - \sum_{k=1}^{i-1} A_{ik} & ; \text{para } i = j \\ \sum_{k=j}^{i-1} \frac{b_{ik} \cdot S_k}{S_i - S_j} A_{kj} & ; \text{para } i > j \end{cases} \quad (13)$$

Observase además que  $A_{ij}$  corresponde a una matriz triangular inferior  $\underline{A}$  ( $n \times n$ ), de modo que la solución planteada queda:

$$\left[ \underline{f}(t) \right]_{BATCH} = \underline{A} \cdot \underline{e}(t) \quad (14)$$

Donde  $\underline{e}(t)$  es un vector columna ( $n \times 1$ ) dependiente del tiempo de molienda, cuyo  $i$ -ésimo elemento se define como:  $\exp(-S_i t)$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$

### 5.1.3. Modelo Cinético General de Conminución para un Proceso Continuo.

Este modelo se basa en el modelo de Flujo Real visto anteriormente. La ecuación (12) además de su utilidad para representar un proceso Batch de conminución, juega un papel preponderante en el proceso de conminución continua [35]. En tal caso:

$$\underline{f}_p = \int_0^{\infty} \left[ \underline{f}(t) \right]_{BATCH} \cdot E(t) dt \quad (15)$$

En la ecuación (15),  $\left[ \underline{f}(t) \right]_{BATCH}$  representa la respuesta del equipo operado en proceso Batch. La expresión  $E(t) dt$  representa la fracción de partículas que, habiendo entrado al sistema de conminución en el instante  $t = 0$ , abandonará el mismo en el intervalo de tiempo  $[t, t + \Delta t]$ . Esta función  $E(t)$  está relacionada con los conceptos de tiempos de residencia determinados experimentalmente mediante el uso de radiotrazadores aplicados en forma de impulso a la entrada del equipo de conminución.

La solución a la ecuación (15) está dada por:

$$f_{pi} = \sum_{j=1}^i \frac{A_{ij}}{\left[ 1 + \frac{\tau S_j}{N} \right]^N} \quad (16)$$

Donde los valores de  $A_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, n$ ) se calculan de acuerdo a la ecuación (13), y  $N$  representa el numero de reactores idénticos en serie perfectamente mezclados, determinados a partir de ensayos especiales con trazadores, a objeto de determinar el grado de mezcla y la distribución real de tiempos de residencia existente en el equipo continuo de conminución.

#### 5.1.4. Aproximación al Modelo de Mezcla Perfecta.

A diferencia del modelo Cinético Continuo, la aproximación del modelo de Mezcla Perfecta [30] no requiere los valores tiempo de residencia. La curva de DTR es modelada en términos de un número de mezcladores perfectos en serie o molinos ideales en serie, que son determinados experimentalmente cuando el molino se encuentra operando en estado estacionario.

La suposición de considerar al molino como un reactor perfectamente mezclado, puede ser criticada por los resultados de los trazadores líquidos (Flujo Real del modelo cinético continuo), el cual demuestra que una serie de desiguales mezcladores se ajustan más a los datos experimentales de tiempo de residencia. *Weller [40]*, ajustó a su data de tiempo de residencia este modelo y encontró que estos mezcladores en serie variaban en un rango de 3 a 5 molinos ideales, los cuales compartían las mismas características que su distribución de tiempo de residencia.

La falta de la relación física entre el diseño del molino y la configuración del mezclador son desventajas de esta aproximación, particularmente en situaciones donde el diseñador debe escoger una configuración conveniente. En tales casos, si no fuera posible predecir la configuración requerida de los mezcladores en serie para un molino dado, la suposición de un reactor singular perfectamente mezclado, es una elección obvia.

El modelo se expresa como un balance de masa por tamaños del material contenido en el molino y velocidad de fractura de las partículas dentro del mismo.

$$[Alimentación] - \left[ \begin{array}{l} \text{Material} \\ \text{descargado} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Materiales rotos} \\ \text{por las partículas} \\ \text{más grandes} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Material} \\ \text{seleccionado} \\ \text{por la fractura} \\ \text{del molino} \end{array} \right] = [Acumulación] \quad (17)$$

La ecuación 17 es representada por:

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i b_{ij} r_j s_j - r_i s_i = \frac{d s_i}{d t} \quad (18)$$

Pero en estado estacionario:  $\frac{dS}{dt} = 0$

Entonces:

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i b_{ij} r_j s_j - r_i s_i = 0 \quad (19)$$

La Figura 5.6 muestra un esquema del balance de masa expresado en la ecuación (19).

Donde:

$f_i$  = Flujo de masa de la alimentación. Para tamaños  $i = 1 \dots n$  (Ton/h)

$p_i$  = Flujo de masa del producto. Para tamaños  $i = 1 \dots n$  (Ton/h)

$b_{ij}$  = Función de Fractura o de Apariencia. Fracción de masa de partículas de tamaño  $j$ , que aparece de tamaño  $i$  después de la fractura.

$r_j$  = Velocidad de Fractura de la partícula de tamaño  $j$  ( $h^{-1}$ ).

$s_j$  = Cantidad de tamaño  $j$  de partículas dentro del molino.

$d_i$  = Velocidad de descarga de tamaño  $i$  ( $h^{-1}$ ).

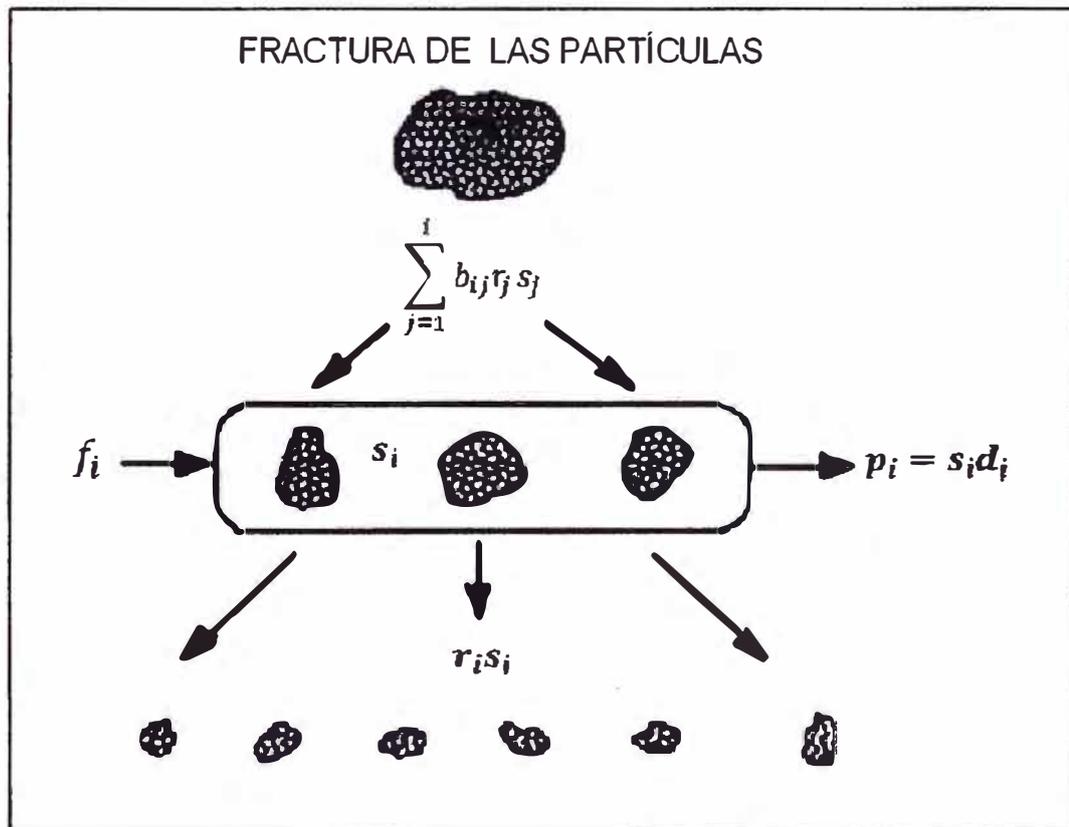


Figura 5.8. Modelo de Conminución de Mezcla Perfecta.

$$\text{También: } p_i = s_i d_i \quad (20)$$

El valor del contenido del molino  $s_j$ , es difícil de determinar experimentalmente. Por lo tanto el contenido del molino es determinado por medio de la ecuación (19).

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i b_{ij} \frac{r_j}{d_j} p_j - \frac{r_i}{d_i} p_i = 0 \quad (21)$$

Si la función de distribución de fractura  $b_{ij}$  es conocida, la función combinada de velocidad de fractura/velocidad de descarga ( $r/d$ ) es determinada de la ecuación (21), usando el flujo de alimentación y producto para cada fracción de tamaño obtenido bajo condición de operación conocida.

La aproximación ( $r/d$ ) usa una simple corrección por variación del tiempo de residencia,  $d_i$  es escalado en términos del volumen del molino y del flujo de masa o flujo volumétrico,  $V$ , al termino  $d_i^*$ .

$$d_i^* = \left( \frac{D^2 L}{4V} \right) d_i \quad (22)$$

Donde:  $D$ ,  $L$ : Es el diámetro y la longitud del molino respectivamente. Por lo que la función combinada queda:

$$\left( \frac{r}{d} \right) = \left[ \frac{4V}{D^2 L} \right] \left( \frac{r}{d} \right)^* \quad (23)$$

Los cambios por otro material y equipos, son simulados ajustando la función combinada  $r/d^*$  a las nuevas condiciones de operación. La siguiente ecuación se utiliza para simular los efectos del diámetro del molino, carga del molino, velocidad crítica é índice de trabajo ( $W_i$ ). [30]

$$\frac{r/d_{sim}^*}{r/d_{obs}^*} = \frac{[D_{sim}]^{0.5} [1-J_{sim}] [J_{sim}] [Nc_{sim}] [Wi_{sim}]^{-0.8}}{[D_{obs}]^{0.5} [1-J_{obs}] [J_{obs}] [Nc_{obs}] [Wi_{obs}]^{-0.8}} \quad (24)$$

**D**: Diámetro del molino.

**J**: Carga del molino.

**Nc**: Velocidad crítica.

**Wi**: Índice de trabajo.

**Obs**: Condiciones observadas.

**Sim:** Condiciones simuladas.

Al operar en el mismo equipo el diámetro del molino  $D$ , es constante, y la velocidad crítica  $N_c$ , no varía. Por lo tanto:

$$\frac{r/d_{sim}^*}{r/d_{obs}^*} = \frac{[1-J_{sim}][J_{sim}][W_{i_{sim}}]^{-0.8}}{[1-J_{obs}][J_{obs}][W_{i_{obs}}]} \quad (25)$$

Para cambiar de una condición a otra, se tiene:

$$\frac{r/d_1^*}{r/d_2^*} = \frac{[1-J_1][J_1][W_{i_1}]^{-0.8}}{[1-J_2][J_2][W_{i_2}]}$$

$$\frac{\frac{D^2 L}{4V_1} \left[ \frac{r}{d} \right]_1}{\frac{D^2 L}{4V_2} \left[ \frac{r}{d} \right]_2} = \frac{[1-J_1][J_1][W_1]^{-0.8}}{[1-J_2][J_2][W_2]}$$

$$\left[ \frac{r}{d} \right]_1 = \left[ \frac{V_1}{V_2} \right] \frac{[1-J_1][J_1][W_1]^{-0.8}}{[1-J_2][J_2][W_2]} \left[ \frac{r}{d} \right]_2 \quad (26)$$

Si se trabaja con las mismas condiciones de carga de bolas  $J$  y moliendabilidad del material  $W_i$ , entonces solo va a depender del flujo de material  $V$ .

$$\left[ \frac{r}{d} \right]_1 = \left[ \frac{V_1}{V_2} \right] \left[ \frac{r}{d} \right]_2 \quad (27)$$

De la ecuación (27) podemos observar que la función  $r/d$  varía de acuerdo al flujo de alimentación.

### 5.1.5. Consideraciones del modelo para molinos cementeros.

*L. Austin* [6] y [7], pionero en estos temas, desarrolló el modelo matemático para un molino de cemento a escala total. Su aproximación se basó en el concepto de velocidad de fractura específica y tiempos de residencia. Esta técnica ha sido validada por muchos investigadores.

*Y. Zhang* [43], consideró el molino de cemento como un molino de bolas perfectamente mezclado. Los dos compartimientos del molino fueron descritos por un balance de masa, en la que se incorporó la función de fractura. Estos

estudios fueron exitosos porque explicaban las condiciones pero no tenían la capacidad de explicar los efectos de las variables tales como: la partición interna entre los dos compartimientos debido a que no incluía datos sobre la distribución de tamaños dentro del molino.

*J. Lynch y H. Benzer [11], [12] y [27]* desarrollaron un modelo de aproximación para los dos compartimientos del molino de cemento, usando data proveniente del alrededor e interior del molino. La condición para extraer muestra del interior del molino debe realizarse una parada en seco del circuito de molienda cuando se encuentra operando en estado estacionario.

Estudios de los investigadores H. Benzer y J. Lynch (2 000), y Benzer (2 005) en molinos de multi – cámaras de cemento a escala industrial han mostrado que el diafragma o tabique del molino, puede ser considerado como una clase de clasificador el cual es alimentado por el producto de la primera cámara y produce un producto fino que es el alimento de la segunda cámara. Los productos gruesos de esta clasificación retornan a la primera cámara para mayor reducción de tamaño. El comportamiento del diafragma como un separador fue confirmado por C. Özer, L. Ergün y H. Benzer (2 006), al realizar evaluaciones en diferentes plantas industriales cementeras.

Los trabajos de Lynch (2 000) y Benzer (2 001) demuestran que:

- El molino puede ser modelado como varios molinos en serie.
- La partición interna puede ser modelada como un clasificador.

De acuerdo a Lynch y Benzer, la Figura 5.9 y 5.10 muestra el Modelo de aproximación para un molino de bolas que opera en circuito abierto y circuito cerrado, respectivamente.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizará el modelo de aproximación para un molino de bolas en circuito cerrado.

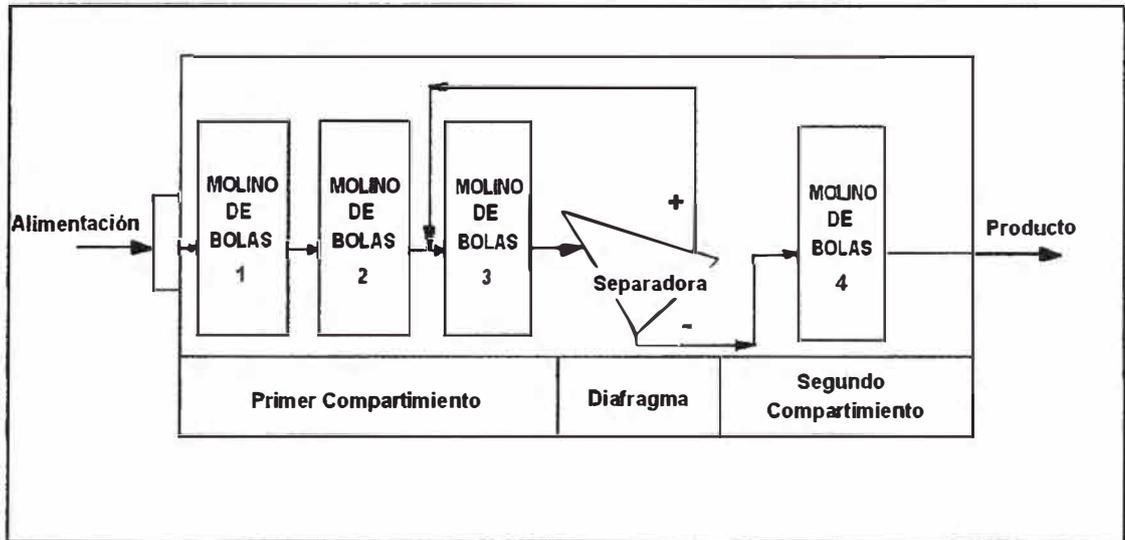


Figura 5.9. Modelo de aproximación para un molino de bolas en circuito abierto

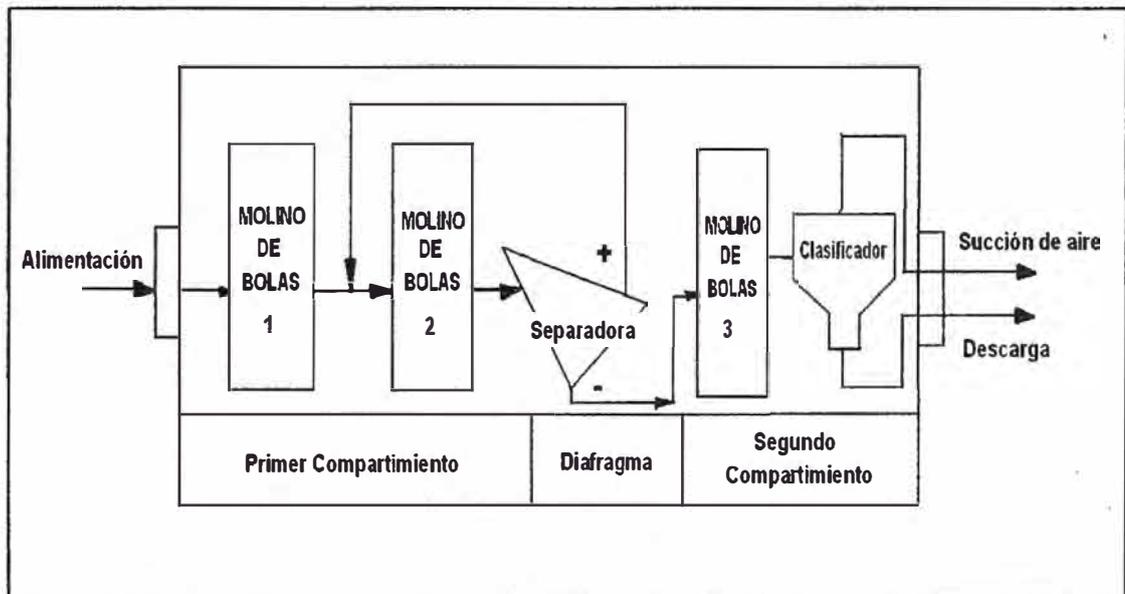


Figura 5.10. Modelo de aproximación para un molino de bolas en circuito cerrado.

En la figura 5.11 se muestra el esquema de un circuito cerrado de molienda.

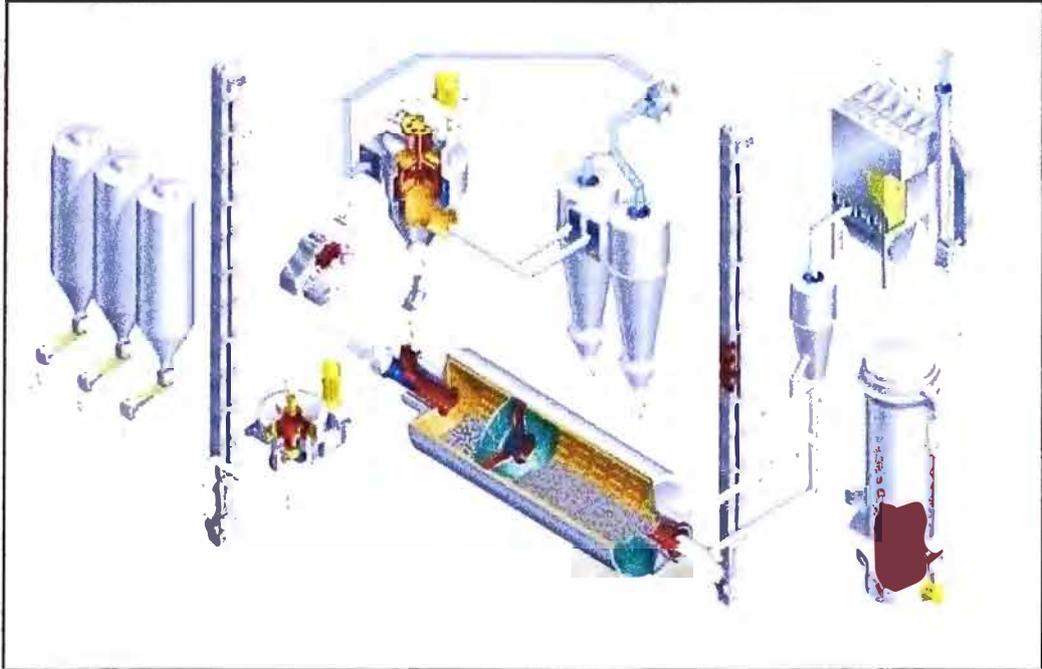


Figura 5.11. Molino de Bolas en circuito cerrado.

#### 5.1.6. Función de Distribución de Fractura Acumulada $B_{ij}$ .

La Función de Distribución de Fractura Acumulada o Función de Fractura Acumulada, representa la distribución de los productos procedentes de una muestra inicial de mayor tamaño, debido a la fractura primaria del mismo y se convierten en todo un rango de menor tamaño. Este valor es constante para cada material en particular.

Existen dos formas convenientes para caracterizar la distribución del tamaño de la progenie:

Primero, si el material de tamaño 1 es fracturado, la fracción en peso del producto que aparece en el intervalo de tamaño "i" es llamada " $b_{i1}$ ". El conjunto de números  $b_{i1}$ , en que  $i$  varía desde 2 a  $n$ , describe entonces la distribución de fragmentos producidos por el tamaño 1. La matriz  $b_{ij}$  generada de estas fracturas sucesivas se muestra en la figura 5.12.

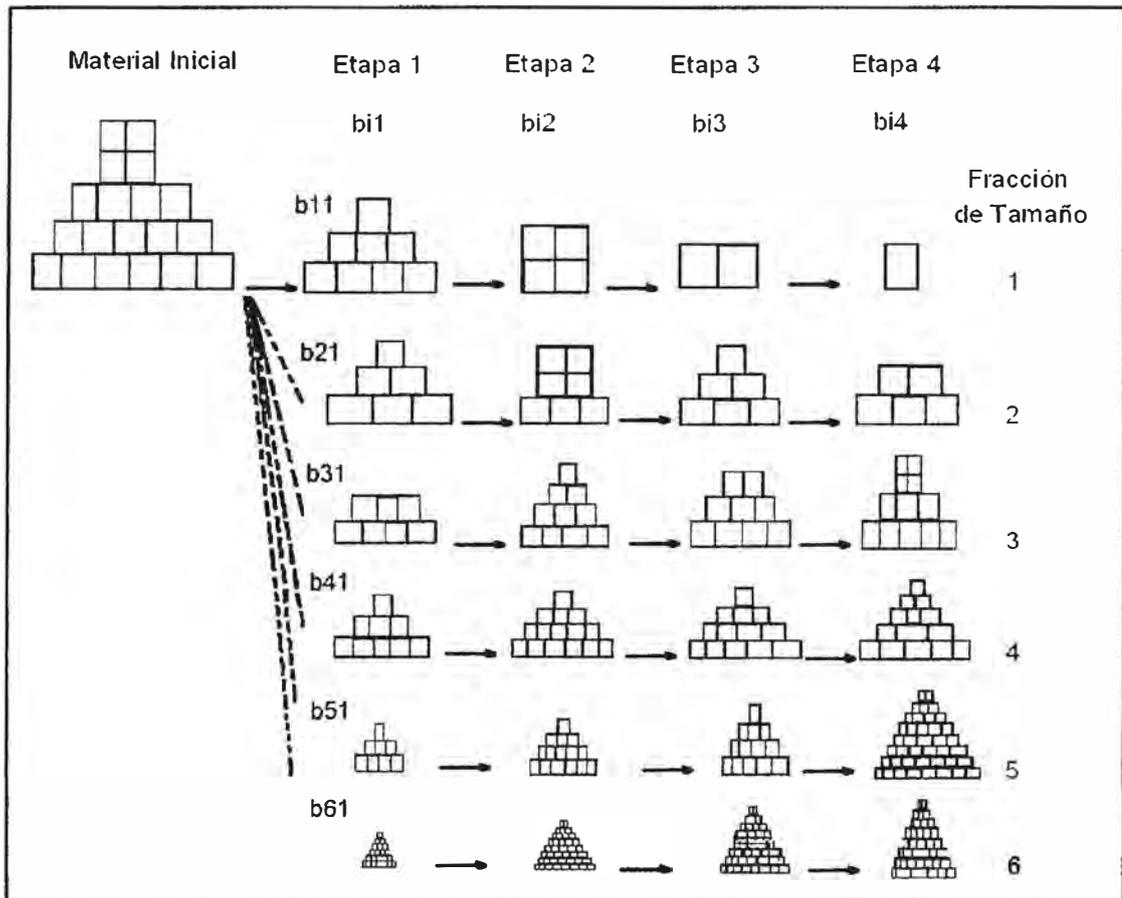


Figura 5.12. Matriz  $b_{ij}$  de las partículas fracturadas en distintos tiempos.

Segundo, describir la distribución de tamaño de la progenie, es acumulando los valores de  $b_{ij}$  desde el intervalo inferior y hacer que  $B_{i1}$  represente la fracción en peso acumulativa de material fracturado de tamaño 1 que resulta ser menor que el tamaño superior del intervalo de tamaño  $i$ , esto es:

$$B_{ij} = b_{n,j} + b_{n-1,j} + \dots + b_{ij} = \sum_{k=i}^n b_{k,j} \quad \text{ó} \quad b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j} \quad (28)$$

Muchos investigadores han intentado describir la función de Distribución de Fractura, sin embargo, para el desarrollo de este proyecto se utilizará el Método propuesto por Austin and Luckie (1972) [4] (Véase Apéndice B).

Los valores de  $B_{ij}$  pueden ser estimados del análisis de tamaño de los productos por periodos cortos de molienda (Método BII).

La ecuación usada es:

$$B_{ij} = \frac{\text{Log} \left[ \frac{1-P_i(0)}{1-P_i(t)} \right]}{\text{Log} \left[ \frac{1-P_{j+1}(0)}{1-P_{j+1}(t)} \right]} \quad (29)$$

Donde:

$P_i(t)$  es la fracción en peso de tamaños menores a  $X_i$  en un tiempo  $t$ .

$B_{ij}$  puede ser ajustado a una ecuación empírica:

$$B_{ij} = \Phi \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\gamma + (1 - \Phi) \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\beta \quad n \leq i \quad (30)$$

Donde:  $\beta, \gamma, \Phi$ , son parámetros que dependen del material y se determinan gráficamente (Véase Apéndice B).

## 5.2. Teoría Moderna de la Clasificación.

Se denomina clasificación a la operación de separación de los componentes de una mezcla de partículas en dos o más fracciones de acuerdo a su tamaño, siendo cada grupo obtenido más uniforme en esta propiedad que la mezcla original.

La mayoría de los circuitos industriales de molienda generalmente operan en circuito cerrado con clasificadores, de manera tal que:

- El producto final del circuito de molienda generalmente corresponde al producto fino o rebalse del clasificador.
- La alimentación al circuito de molienda consiste en parte, o totalmente, de producto grueso o descarga proveniente de un clasificador.

La clasificación para la industria cementera es primordial debido a que el producto obtenido tiene especificaciones estrictas de tamaño.

Se habla de la operación de molienda en circuito cerrado donde los objetivos de la clasificación hace más eficientes la molienda y asegura que el producto de la operación esté bajo un determinado tamaño, recirculando al molino las partículas mayores.

Hay varias ventajas al operar la molienda en circuito cerrado, en comparación a un circuito abierto, esto es, sin incluir una etapa de clasificación. La principal

ventaja es que una proporción significativa del material que ya está suficientemente fino es removido del molino evitando la sobremolienda. La eliminación parcial del material fino puede también reducir el efecto de “desaceleración” de la molienda causado por la acumulación de finos en el molino, los que producen un efecto de colchón en la molienda seca.

Finalmente, el uso de la clasificación añade un grado de libertad en el control del molino ayudando a corregir los cambios en el tamaño o dureza del material de la alimentación.

### 5.2.1. Tipos de Separadores.

Existen dos tipos: Separadores estáticos. (Ciclón simple y separador estático) y los Separadores dinámicos.

#### 5.2.1.1. Separador estático de aire.

Los separadores estáticos de aire son los más simples y se les llama así por no tener ninguna parte en movimiento mecánico (Rotatorias). Solamente usan aire para el transporte del material y se recogen los gruesos. Los finos son arrastrados con el aire. Se usan, principalmente, en instalaciones de molienda con barrido por aire (Funcionando con molinos tubulares o de rodillos).

En la Figura 5.13 se observa el esquema de este tipo de separador.

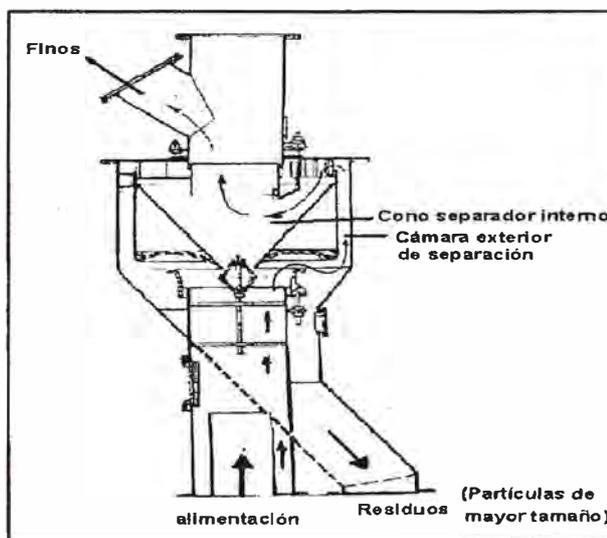


Figura 5.13. Esquema de un separador Estático de aire.

El material a clasificar entra en el separador por la parte inferior a través de un tubo, merced al arrastre que ejerce la corriente de aire que proviene del molino. El material, después de abandonar el tubo de alimentación discurre entre la pared cónica exterior y el cono separador interno. Como consecuencia del aumento de la sección transversal de paso de la corriente de aire, su velocidad disminuye, y las partículas de mayor tamaño (más pesadas) se separan de la corriente de aire. Al mismo tiempo, la admisión tangencial del flujo de aire imprime a este un movimiento de rotación, con lo que también se da una cierta proporción de separación centrífuga. El material recogido en dicha cámara se descarga por el fondo, formando lo que se denomina residuos (partículas de mayor tamaño). Por la parte alta del separador, el aire cargado con las partículas no separadas entra en el cono interior y son sometidas a una fuerza centrífuga, tal y como en un ciclón separador, el aire imprime a las partículas un movimiento en espiral descendente y acelerado.

En tal situación el peso y la fuerza centrífuga prevalecen sobre la fuerza ejercida por la corriente de aire en las partículas de mayor tamaño, que son proyectadas contra la pared del cono separador interno donde pierden su velocidad y caen resbalando por dicha pared hacia la salida de los residuos del separador, los cuales regresan al molino para ser de nuevo molidos.

Por su parte, las partículas más finas permanecen en suspensión en el aire, siendo transportadas en movimiento en espiral hacia la salida del separador situada en la parte superior. Este aire con los finos (Producto final de la molienda) se lleva a un colector de polvo, generalmente un ciclón o un filtro, donde las partículas finas se separan de la corriente de aire.

#### 5.2.1.1. Separadores de aire dinámicos.

Este tipo de separadores de aire son los de uso más extendido en la industria del cemento. Difieren de los dos tipos de separadores antes mencionados en algunos aspectos como:

- El material a clasificar se dispersa en la zona en que se efectúa la separación mediante un disco o plato distribuidor giratorio.

- La corriente de aire necesaria para la separación se genera mediante un ventilador situado dentro de ellos mismos o exteriormente encima del aparato.
- La alimentación del separador con material molido se efectúa mecánicamente por medio de transportadores continuos adecuados.

Se pueden dividir en cuatro grupos: Separadores con ventilador interno, con ventilador externo, ciclones planetarios, y los de alta eficiencia; siendo este último el más importante por su ahorro en energía.

Los llamados separadores de alta eficiencia desarrollados en los últimos años, a diferencia de los separadores convencionales, se distinguen por su efecto de separación notablemente mejorada, pues conduce a mayores rendimientos y a un menor consumo de energía referido a la masa, sobre todo cuando se trata de productos de mayor finura. Sin embargo, en la distribución de tamaños del producto influye, también la forma de trabajar de los separadores. Debido a la mayor nitidez de separación, la distribución granulométrica del producto resulta ser más estrecha, y por ello, la resistencia de los cementos (24 horas, 3,7, y 28 días) con la misma superficie específica resulta ser más alta. Por otro lado, puede verse afectada la trabajabilidad del cemento.

Este grupo forma una nueva generación de separadores de alta eficacia, siendo la Separadora O – Sepa de *Onoda* la que se detallará a continuación debido a que forma parte del presente estudio.

## **SEPARADORA O – SEPA**

**Principio:** En la separadora de la Figura 5.14, las partículas a ser clasificadas son alimentadas a través de un ducto (1) y son altamente dispersadas por una placa dispersante y una placa de amortiguamiento; luego son succionadas a través de los ductos de aire primario y secundario (4, 5). Después de pasar a través de una veleta fija (6), el clasificador de aire forma un vórtice por medio de un flujo vorticial, ajustando las paletas rotativas (7) y las placas de partición horizontal (8).

Las partículas son toscamente clasificadas a la entrada de la zona de clasificación, por el vórtice de flujo uniforme de acuerdo al balance de dos

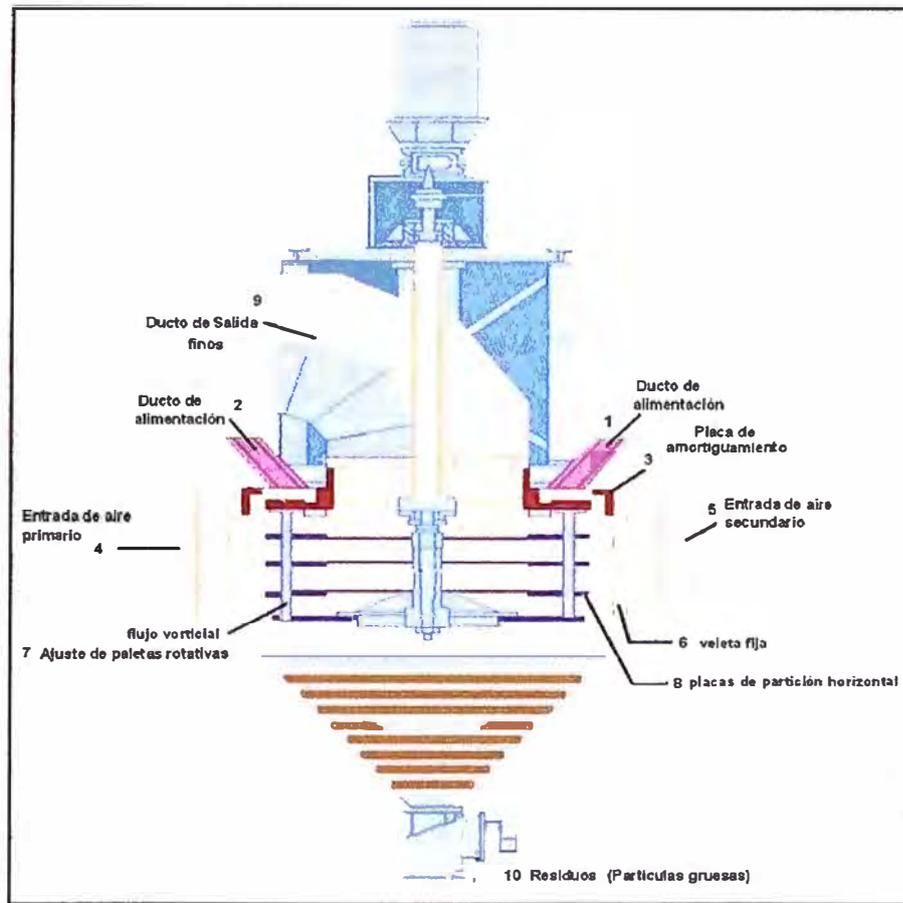


Figura 5.14. Partes de la Separadora ([46]).

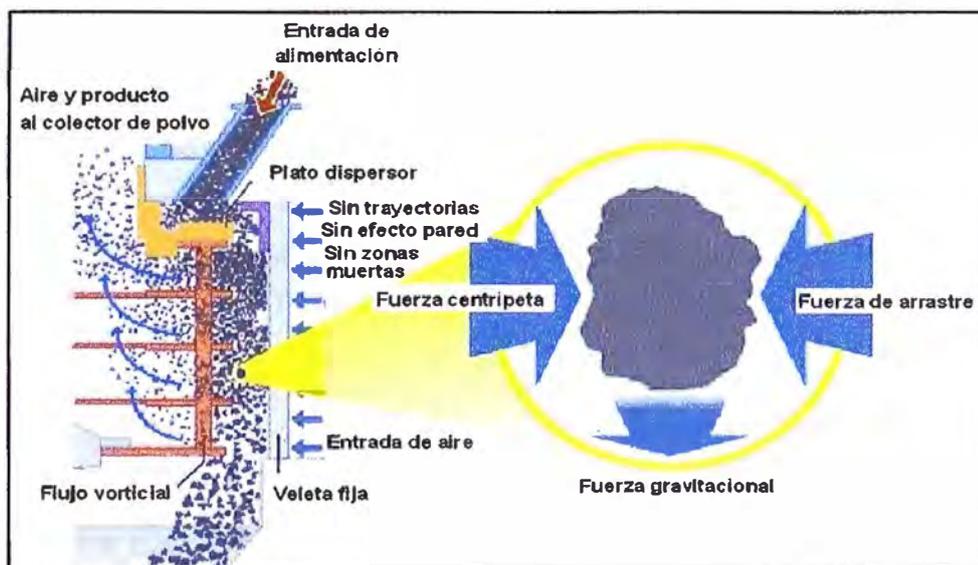


Figura 5.15. Balance de Fuerzas en la separadora ([46]).

fuerzas: La fuerza centrífuga y la fuerza de arrastre por el aire que circula por dentro (Ver Figura 5.15).

Después, los productos finos son llevados externamente por la parte superior (9) y colectados. Las partículas gruesas, por la turbulencia caen en la dirección de las veletas (6), son lavadas por el aire que viene de la parte inferior de los ductos (4, 5), y reclasificados por el aire terciario. Finalmente salen por la parte baja del separador (10).

La finura final puede ser fácilmente ajustada variando la velocidad de rotación del separador.

El aire de separación procede de tres fuentes:

- El aire primario caliente que proviene del molino, más un 30 - 50% de aire frío.
- El aire secundario que puede ser aire frío o aire procedente del desempolvado del elevador, alimentadores, aparatos de transporte, etc.
- El aire terciario que siempre es aire frío.

### 5.2.2. Curvas de Partición.

La eficiencia de un clasificador se caracteriza mediante un parámetro, uno por cada intervalo de tamaño, que describe cómo se divide la masa de la alimentación de cada tamaño en la descarga y rebalse. Este parámetro recibe el nombre de "Selectividad" y queda definido por la razón entre la masa de partículas de tamaño "i" que es enviada a la descarga y la masa total de partículas de tamaño "i" alimentadas al clasificador.

La Eficiencia real o Selectividad de un separador se define por la relación:

$$T_i = \frac{G \cdot x_{Gi}}{A x_{Ai}} \quad (31)$$

Donde:

$T_i$ : Es la eficiencia real para partículas de tamaño "i".

$x_{Ai}, x_{Gi}$ : Es la proporción en peso del material de tamaño "i", en la alimentación y retorno respectivamente.

A, G: Flujo de masa de la alimentación y retorno respectivamente (ton/h).

Para describir el proceso de clasificación dentro de la separadora, se acostumbra definir a la Curva de Selectividad, como Curva de Partición, o Curva de Eficiencia Real, tal como se ilustra en la Figura 5.16. En dicha figura se puede observar que para los tamaños más gruesos la eficiencia real es casi 100%, indicando que en este rango granulométrico casi todas las partículas saldrán por la descarga de la separadora. No obstante, se observa que para los tamaños más finos la eficiencia no es 0%, indicando que una pequeña cantidad de finos será arrastrada por el aire hacia la descarga del separador, este fenómeno se denomina "Bypass" o cortocircuito ( $T_o$ ), y se ilustra en la Figura 5.16, bajo el nombre de Curva de Eficiencia Corregida.

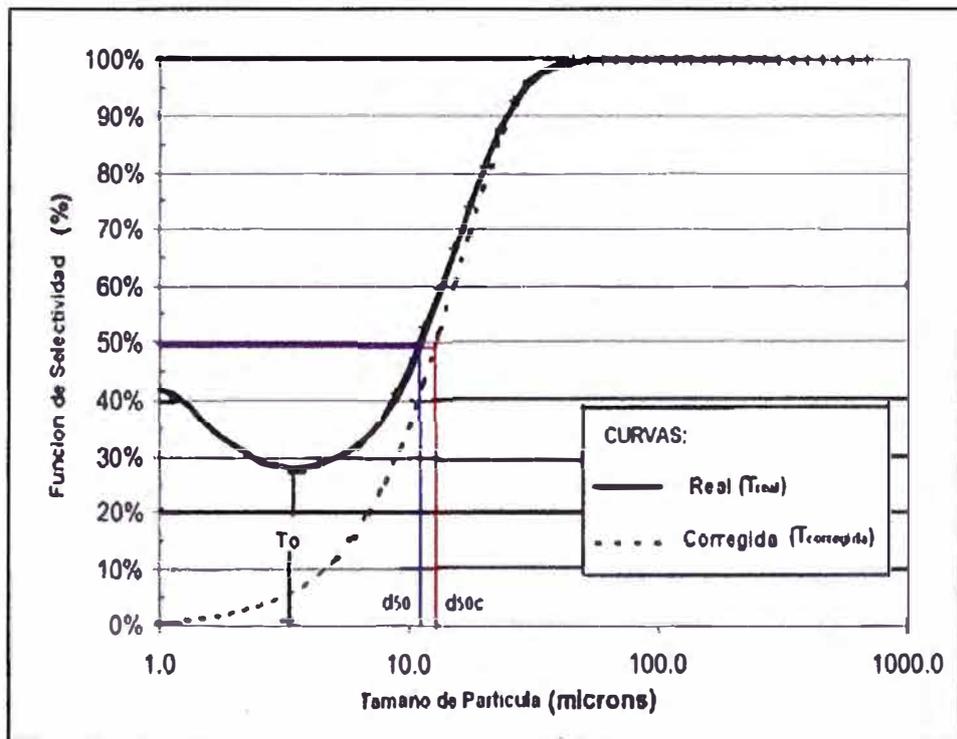


Figura 5.16. Curva de Eficiencia Real y Corregida de la Separadora

Efectuando un balance de masa global, se establece la siguiente relación matemática entre la Curva de Eficiencia Real y Corregida; en la cual los parámetros se expresan en porcentajes en masa.

$$T_{(x)} = T_C(1 - T_0) + T_0 \quad (32)$$

Donde:

$T_{(x)}$ : Eficiencia real o selectividad para partículas de tamaño  $x_i$ .

$T_C$ : Eficiencia corregida para partículas de tamaño  $x_i$ .

$T_0$ : Fracción en peso correspondiente al bypass.

a. Aproximación de Lippek-Espig.

La eficiencia corregida  $T_C$  [18], [27], (aproximada por Plitt y expandida por Lippek- Espig), está representada por la siguiente ecuación:

$$T_C = \left[ 1 - \exp \left( - \ln 2 \left[ \frac{x - X_0}{X_T - X_0} \right]^\delta \right) \right] \quad (33)$$

Donde:

$X_T$ : Tamaño de corte, evaluado en  $\frac{(1+T_0)}{2}$  de la eficiencia de la curva de partición ( $\mu\text{m}$ ).

$X_0$ : Tamaño de partícula correspondiente a  $T_0$  ( $\mu\text{m}$ ).

$\delta$  : Inclinación de la curva comprendida entre  $X_0$  y  $X_{i=100\%}$ .

Remplazando (33) en (32), se obtiene la Eficiencia Real o Selectividad para los diferentes tamaños de partícula.

$$T_{(x)} = T_0 + (1 - T_0) \left[ 1 - \exp \left( - \ln 2 \left[ \frac{x - X_0}{X_T - X_0} \right]^\delta \right) \right] \quad (34)$$

## **CAPÍTULO 6.**

### **EJERCICIO PARA LA PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO - CASO INDUSTRIAL.**

El ejercicio para la predicción de la resistencia a la compresión, se llevó a cabo, en su totalidad en las instalaciones de Cementos Lima S.A, ubicado en Villa María del Triunfo – Lima; y la prueba para la determinación del tamaño de partículas finas se realizó en los laboratorios de Cementos Andino S.A. Condorcocha – Tarma.

Analizar el circuito de molienda a diferentes condiciones de operación, es un paso fundamental para caracterizar el modelo matemático de la separadora así como también del molino de bolas; sobre todo, para predecir la resistencia a la compresión del cemento desde la base de la distribución de tamaño de partícula. En este capítulo se determinará experimentalmente los parámetros de los modelos matemáticos y se hará una regresión para determinar las variables que afectan en la resistencia del cemento; una vez alcanzado esto se realizarán corridas para validar dichos resultados.

#### **6.1. CIRCUITO DE MOLIENDA BASE.**

Este estudio de simulación se llevó a cabo realizando una abstracción del circuito real de molienda (Figura 5.1, pág. 43), a un circuito más sencillo como se muestra en la Figura 6.1. Esta simplificación del circuito se realizó principalmente por el diseño en la que se encuentra actualmente la planta de Cementos Lima S.A., cual dificulta la toma de muestras en algunos puntos. Como se puede apreciar en la Figura 6.1, el molino de bolas se encuentra en circuito cerrado con la separadora, por tal motivo se aplicará modelos matemáticos para cada uno de ellos, para luego analizar el circuito.

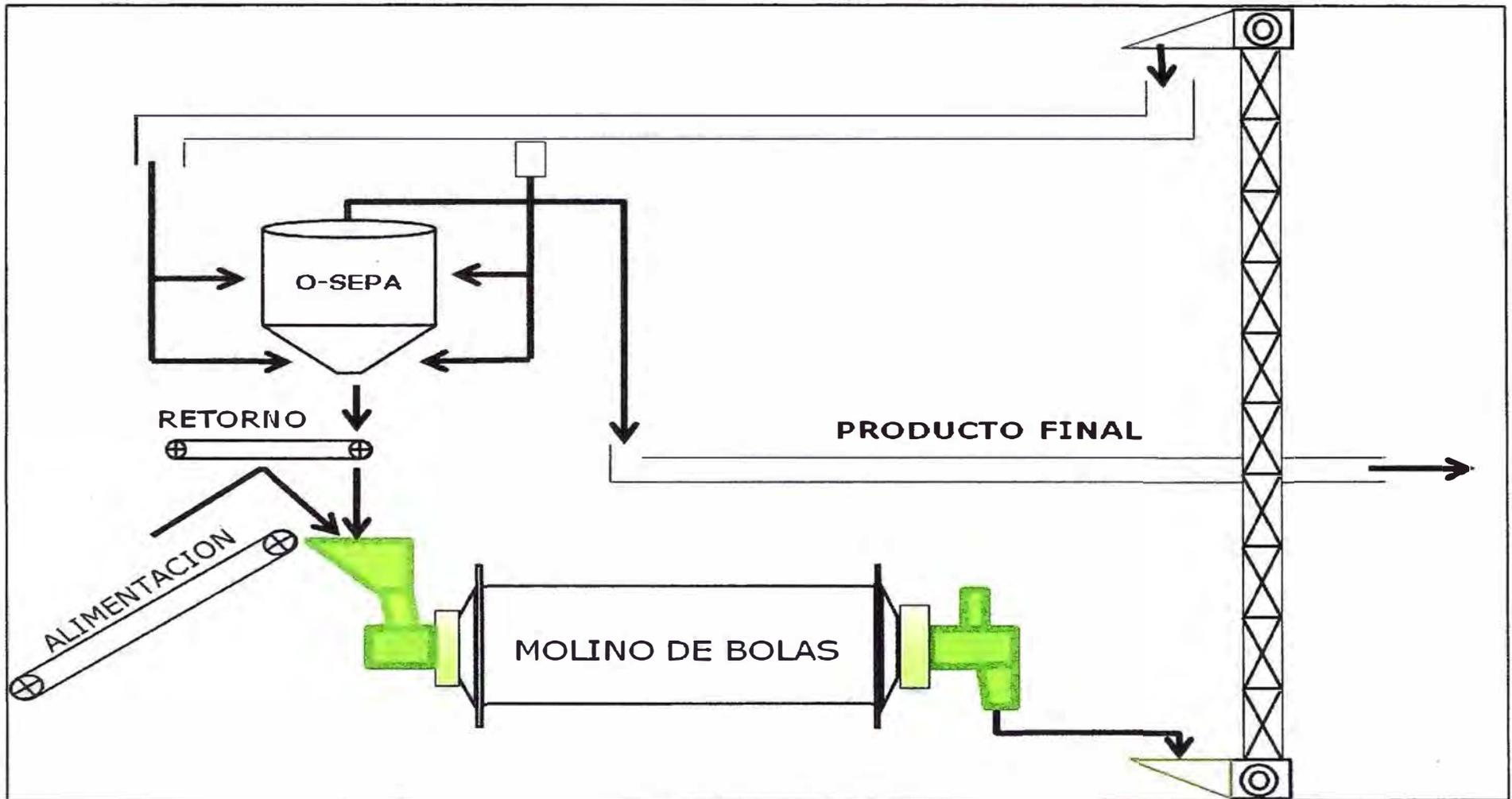


Figura 6.1. Esquema del circuito de molienda del Cemento Portland Tipo I en estudio.

## **6.2. MODELOS APLICADOS.**

### **6.2.1. Molino de bolas.**

En el molino de bolas se ha considerado el modelo de Mezcla Perfecta.

#### a) Criterios:

Las razones fundamentales para la elección del modelo de Mezcla Perfecta se basan en los siguientes criterios técnicos:

- El uso del modelo cinético continuo implica estudios de tiempos de residencia, que solo es posible con el uso de radiotrazadores. Estas sustancias, son de uso exclusivo del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), debido al transporte especial que requieren, así como también del personal especializado que las manipula.
- El modelo de mezcla perfecta a diferencia del modelo cinético continuo no requiere del valor de tiempo de residencia para modelar al molino, los parámetros se determinan a nivel de planta cuando éste se encuentra operando, hace que sea más práctico y manejable. Además, es una técnica muy utilizada para la simulación y automatización de procesos de molienda en la Industria Cementera.

#### b) Objetivo.

Determinar la distribución de tamaños de partículas a la salida del molino.

#### c) Variables.

Las variables a considerar en el modelo por aplicar son:

- El índice de trabajo del material (kw - h/ton)
- La carga de bolas dentro del molino.
- La distribución de tamaño de bolas dentro de los compartimientos del molino.
- La granulometría del clínker a la entrada del molino.

- El flujo de alimentación del molino (ton/h)

d) Etapas de cálculo.

Para determinar el modelo del molino de bolas se consideran las siguientes etapas:

- Determinación de la función de fractura.
- Determinación de la función combinada  $r/d$
- Modelamiento del diafragma del molino.

### **6.2.2. Separadora.**

Para la separadora se utilizó el modelo de Lippek – Espig.

a) Objetivos.

- Determinar la eficiencia o selectividad de la separadora a diferentes condiciones de operación.
- Determinar la granulometría del material que retorna al circuito de molienda así como la del producto final.

b) Variables.

- Granulometría de las partículas a la entrada de la separadora.
- El flujo de alimentación a la separadora.
- La velocidad de la separadora.
- La succión determinada por la abertura del exhaustor

c) Etapas de cálculo.

Para determinar el modelo de la separadora se consideran las siguientes etapas:

- Determinar los parámetros de la eficiencia de la separadora a diferentes condiciones de operación.
- Regresión de las variables para determinar los parámetros de la separadora.

### 6.2.3. Resistencia a la Compresión del Cemento Portland Tipo I.

La prueba de resistencia a la compresión a 28 días es ampliamente usada para caracterizar las propiedades del cemento. Sin embargo, en la práctica industrial, es un periodo muy largo, por lo que la rápida determinación de la resistencia del cemento es el objetivo favorito de muchos investigadores y el de este proyecto. *Zhang* [45], realizó un estudio que relaciona la distribución de tamaño de partícula, la superficie específica y la composición química para la predicción de la resistencia. Así mismo *Tsivilis* [39], [40] en sus trabajos de investigación reporta que la fracción de tamaños  $<3 \mu\text{m}$ ,  $3-32 \mu\text{m}$ ,  $3-16 \mu\text{m}$ ,  $16-24 \mu\text{m}$ , influyen de manera importante en la resistencia del cemento.

*Tsivilis* [39], describe un modelo basado en la regresión múltiple para la predicción de la resistencia del cemento. Para predecir la resistencia, el presente trabajo tomará como base, lo que se viene realizando actualmente en Cementos Lima, lo propuesto por la bibliografía [1], [19], [41]; así como también por la información resultante del ejercicio propio del desarrollo experimental.

### 6.2.4. Superficie específica.

En la industria del cemento las mediciones de finura del material se efectúan por procedimientos sencillos y rápidos. Sin embargo, estudios como el presente proyecto que busca predecir la distribución de tamaños de partículas con solo conocer información del material clinker a la entrada del circuito de molienda; la predicción de la superficie específica resulta ser muy interesante. *Tsivilis* [39], en sus trabajos de investigación dio a conocer un procedimiento que permite la determinación aproximada de la superficie específica sobre la base de distribución granulométrica. *Zhang* [45], estableció una correlación entre la distribución de tamaño de partículas y la superficie específica.

Para obtener un modelo matemático de predicción de la superficie específica del cemento, se realizó un análisis de regresión, en el cual las variables a analizar son la fracción de tamaños de las partículas y los parámetros de la curva de Rosin Rammler.

### 6.3. PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS.

#### 6.3.1. Molino de bolas

Para poder modelar los eventos producidos en el molino se realizaron pruebas experimentales de acuerdo con la teoría moderna de la Conminución, estas son:

- La velocidad específica de fractura y la descarga de las partículas de cada tamaño son fracturadas por unidad de tiempo, expresada en la función combinada  $r/d$ .
- La distribución de tamaño resultante de cada partícula fracturada, expresada en la función  $bij$ .
- La clasificación interna de las partículas dentro del respectivo equipo de Conminución, específicamente por el diafragma dentro del molino.

##### 6.3.1.1. Determinación de la Función de Fractura.

Esta prueba se determina a nivel de laboratorio y depende estrictamente del tipo de material.

##### a) Equipos

La prueba para determinar la función de fractura se desarrolló en un molino de bolas a escala de laboratorio, como se muestra en la Figura 6.2, a éste molino se le llama molino de Bond.

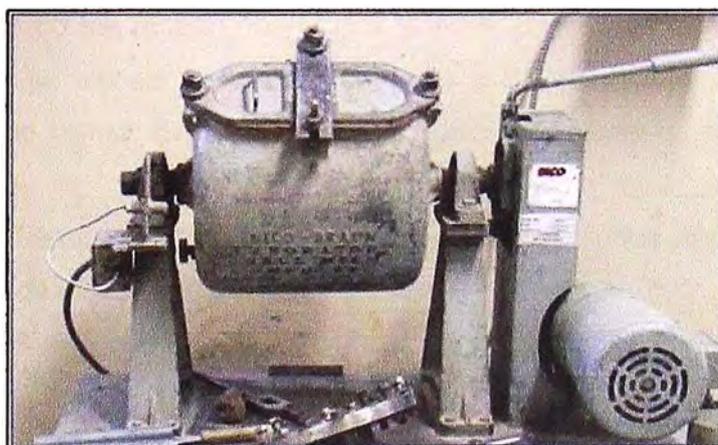


Figura 6.2. Molino de Pruebas de Bond

### Características del molino de bolas de Bond:

- **Modelo:** Bico.
- **Dimensiones:** 12" diámetro x 12" largo, con esquinas redondeadas.
- **Velocidad de Trabajo:** 77 RPM
- **Carga de bolas:** 285 piezas de bolas de Acero.
- **Distribución de Carga de Bolas.** Ver Apéndice (B).

#### b) Condiciones de Molienda.

Las condiciones de molienda se muestran en la Tabla 6.1, y los cálculos obtenidos en el Apéndice B.

#### c) Pruebas de Molienda.

La información técnica [8], menciona que el material fracturado en la molienda no debe ser superior de 30 a 40% para el monotamaño estudiado, para cumplir tal condición, se realizó evaluaciones a diferentes tiempos de molienda y diferentes monotamaños de partículas a analizar.

En esta prueba se trabajó con monotamaños pasante *malla 8* y retenido *malla 12* (8/12) a diferentes tiempos:  $t = 0,5$ ; 1,0; y 2,0 min, en el molino de Bond; con un tiempo de tamizado en el Rotap de 10 min por cada 200 g. Las Gráficas: 6.3, 6.4 y 6.5 muestra el tratamiento seguido para obtener los diferentes monotamaños.

En primer lugar se iniciaron las pruebas moliendo los monotamaños de clínker en un tiempo de 2 min, llegando a fracturarse el material en un 73,6%. Este resultado obtenido fue mucho mayor que el 40%, por lo que quedó descartado. Por esa razón se trabajo a 1 min y después a 0,5 min, obteniendo resultado óptimo con este último. En la Tabla 6.2 se puede apreciar el resultado óptimo para 0,5 min.

Encontrado el tiempo óptimo, se procedió a realizar corridas con fracciones de monotamaños de 8/12, 12/16, 16/20 y 20/30.

En la Tabla 6.3 se observa los resultados para las mallas 16/20 y 20/30 y se determina que cumplen con una molienda entre 30 - 40%, con lo cual queda determinado el monotamaño óptimo para esta prueba.



Figura 6.3. Cuarteo de la muestra de clíinker para realizar el tamizado.



Figura 6.4. Uso de cribas en serie de  $\sqrt{2}$  para partículas mayores a 4750  $\mu\text{m}$ .



Figura 6.5. Uso de mallas en serie de  $\sqrt{2}$  para partículas menores a 4750  $\mu\text{m}$  y mayores a 100  $\mu\text{m}$ .

TABLA 6.1. Condiciones de molienda en el molino de Bond.

		Símbolo	Unidad	Resultado
Molino	Diámetro	D	cm	30,48
	Longitud	L	cm	30,48
	Volumen	V	cm	22 240,1
Velocidad del molino	Crítica	Nc	rpm	81
	Operacional		rpm	77
	<i>%Velocidad de operacional</i>	$\phi$	%	96
Cuerpos molidores	Diámetro	d	cm	2,92
	Gravedad Especifica		g/cm <sup>3</sup>	7,27
	Material			Acero
	Porosidad asumida		%	40
	Fracción de volumen de llenado de las bolas	J	%	20,88
Material	Gravedad específica		g/cm <sup>3</sup>	1,32
	Índice de Trabajo *	Wi	KW-hr/ton	15,48
	Fracción de volumen de llenado del material clínker	fc	%	4,07
Material / bolas	Fracción Intersticial	U	%	48,78

\*. Los cálculos para determinar el Índice de Trabajo se incluye en el apéndice A.

TABLA 6.2. %Retenido de una fractura de monotamaños 8/12, para determinar el tiempo de molienda.

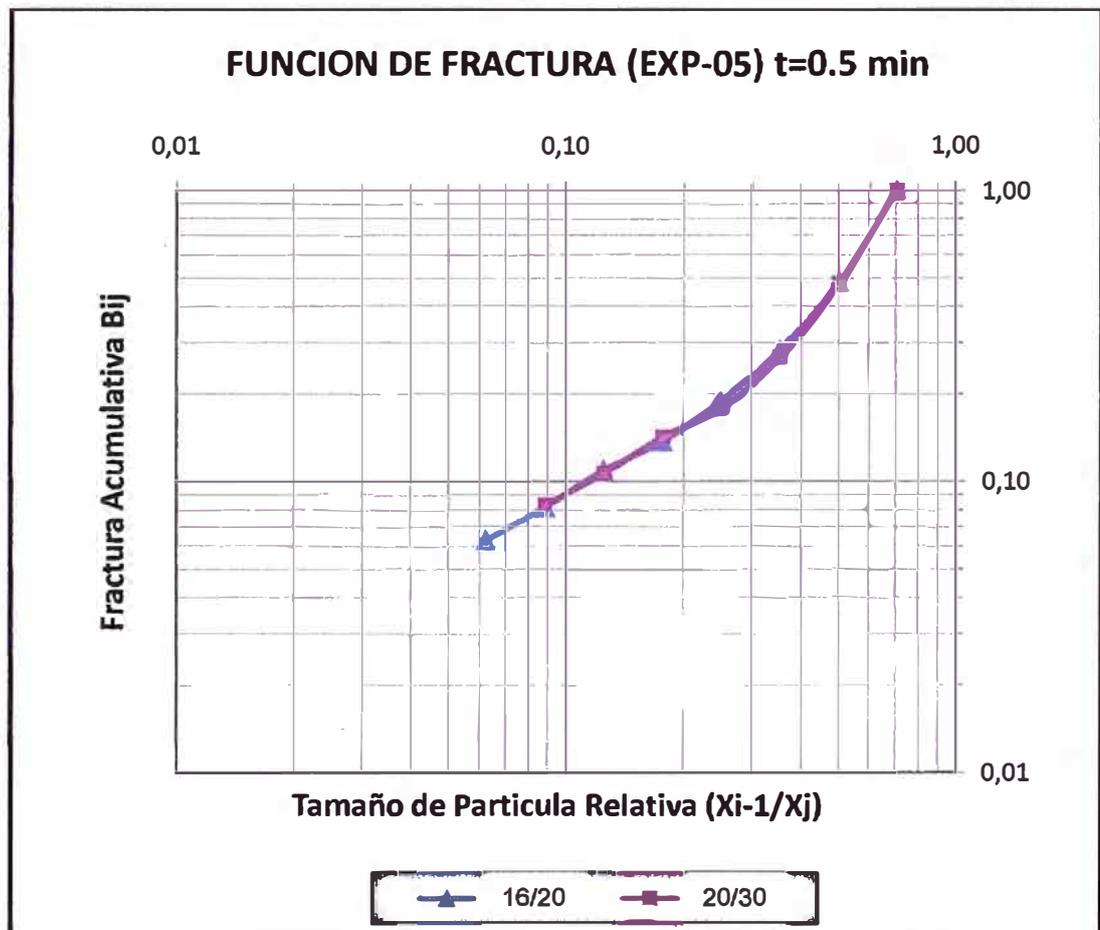
MONOTAMAÑO 8/12			% RETENIDO					
			PRUEBA 1			PRUEBA 2		
Abertura $\mu\text{m}$		$X_{i-1}/X_j$	Tiempo (min)			Tiempo (min)		
			2,0	1,0	0,5	2,0	1,0	0,5
2360	1700	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1700	1180	0,69	26,4	45,3	62,1	26,0	44,7	62,2
1180	850	0,50	18,4	20,9	18,3	16,8	19,3	17,1
850	600	0,35	11,5	9,5	6,3	11,1	9,3	6,3
600	425	0,25	8,3	5,7	3,3	8,0	5,5	3,3
425	300	0,18	6,5	3,7	2,0	6,2	3,8	2,0
300	212	0,12	5,1	2,8	1,4	5,2	2,9	1,5
212	150	0,09	4,3	2,3	1,6	4,7	2,6	1,4
150	106	0,06	3,2	1,6	0,8	3,4	1,8	0,9
106	75	0,04	3,3	1,8	0,9	3,8	2,2	1,2
75	45	0,03	2,8	1,4	0,8	3,2	1,9	1,0
45	0	0,00	7,2	3,7	1,9	8,6	4,8	2,5
			2,9	1,3	0,5	3,0	1,4	0,6



Una vez determinado el tiempo de molienda y el monotamaño a utilizar se procede al cálculo de la función de Distribución de Fractura Acumulada. Los resultados Bi1 se muestran en la Gráfica 6.1 y los parámetros de la ecuación  $\Phi, \gamma, \beta$ . Ver apéndice B.

$$B_{ij} = \Phi \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\gamma + (1 - \Phi) \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\beta \quad (30)$$

Por lo que los parámetros óptimos para el clínker de la ecuación (30), son:



GRAFICA 6.1. Función de distribución de fractura para el clínker 16/20 y 20/30

### 6.3.1.2. Determinación de la Función combinada $r/d$ .

Esta prueba se realiza a nivel industrial y depende mucho de las condiciones de operación del molino.

#### a) Equipos.

El molino tiene un diámetro de 4,40 m y 13,5 m de longitud. La primera cámara mide 5,0 m y cuenta con 100 toneladas de bolas de 17-30 mm de diámetro y la segunda cámara de 8,5 m, cuenta con 180 toneladas de 40–90 mm de diámetro. El molino usado en estas pruebas se muestra en la Figura 6.6.



Figura 6.6. Molino de Bolas utilizado para las pruebas a nivel industrial.

#### b) Condiciones de molienda.

Las condiciones de molienda se muestran en la Tabla 6.4. Los cálculos para determinar la carga de bolas  $J$  se muestran en el Apéndice C.

#### c) Muestras de molienda.

Antes de realizar el muestreo se verificó las condiciones del proceso en estado estacionario. Primero se tomaron las muestras de las corrientes externas, mientras el molino se encuentra operando, e inmediatamente después se realizó una parada en seco y se obtuvieron muestras del interior del molino.

TABLA 6.4. Condiciones de molienda operando en continuo.

		Unidad	Resultados
<b>Molino</b>	Diámetro D	m	4,4
	Longitud L	m	14,0
	Cámara I:		5,0
	Cámara II:		8,5
	Capacidad	ton/h	100
Velocidad del molino	Operacional	rpm	15
Cuerpos Moledores	<u>Cámara I:</u>		
	Diámetro:	mm	17 – 30
	Peso:	ton	100
	Carga de bolas, J	%	21
	<u>Cámara II:</u>		
	Diámetro:	mm	40 – 90
	Peso:	ton	180
	Carga de bolas, J*	%	19
Material		Acero	
Alimentación al molino	<u>Componentes:</u>		
	Clinker	%	94
	Yeso	%	6
	Flujo	Ton/h	85
Clínker	Índice de Trabajo	(Kw – h)/ton	15,80

Las muestras fueron tomadas a lo largo del eje del molino como se aprecia en la Figura 6.7.

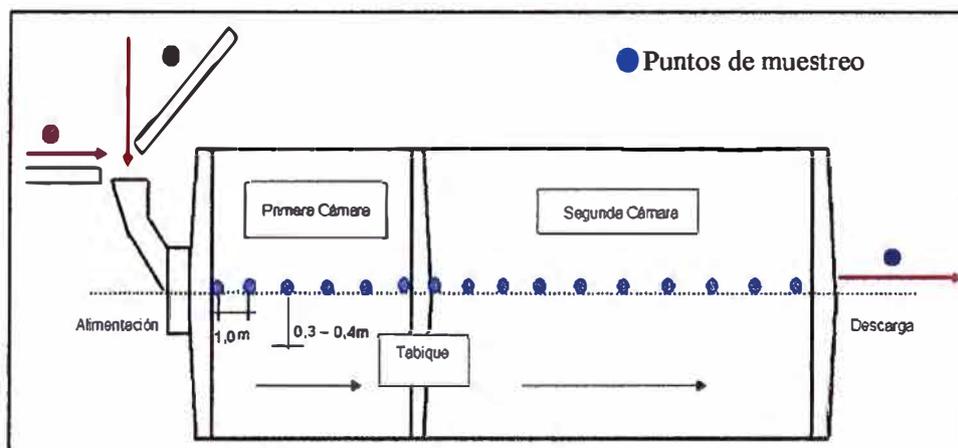


Figura 6.7. Puntos de Muestreo externas e internas en el molino.

Cada punto de muestreo representa la acumulación de tres muestras (tomadas en el centro del eje y se ubica dos puntos transversales a sus extremos, tal como se aprecia en las Figuras 6.8 y 6.9), para lo cual se tuvo que cavar aproximadamente a una profundidad 0,3 a 0,4 m, obteniendo por cada punto de muestreo de 3,0 a 4,0 kg.

La distribución de tamaños de partículas de las muestras fueron determinadas combinando dos métodos: Tamizado en seco desde 37 500 a 100  $\mu\text{m}$ , y la técnica de difracción láser para muestras desde 100 a 0,4  $\mu\text{m}$ .

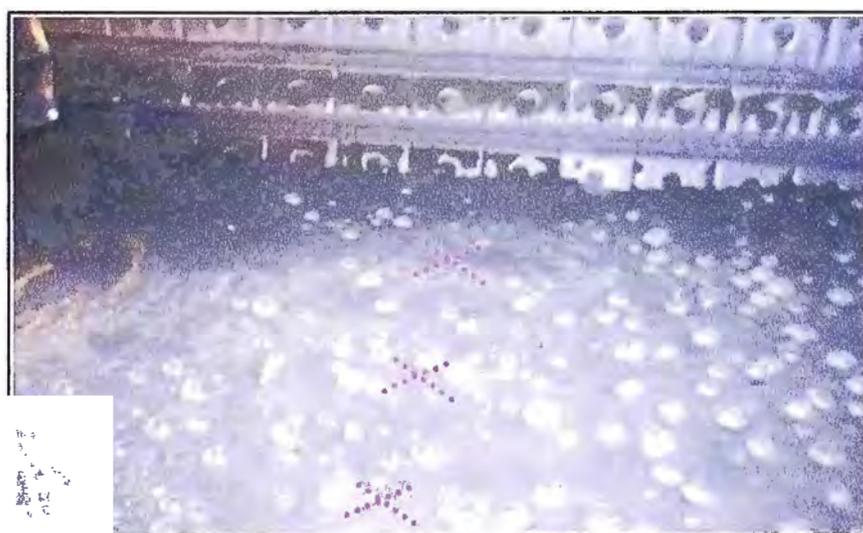


Figura 6.8. Primer Compartimiento del molino

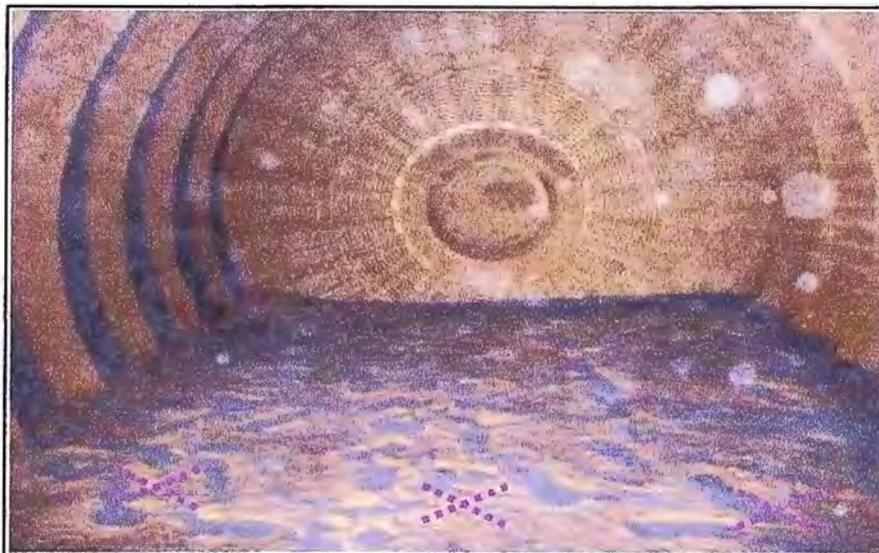
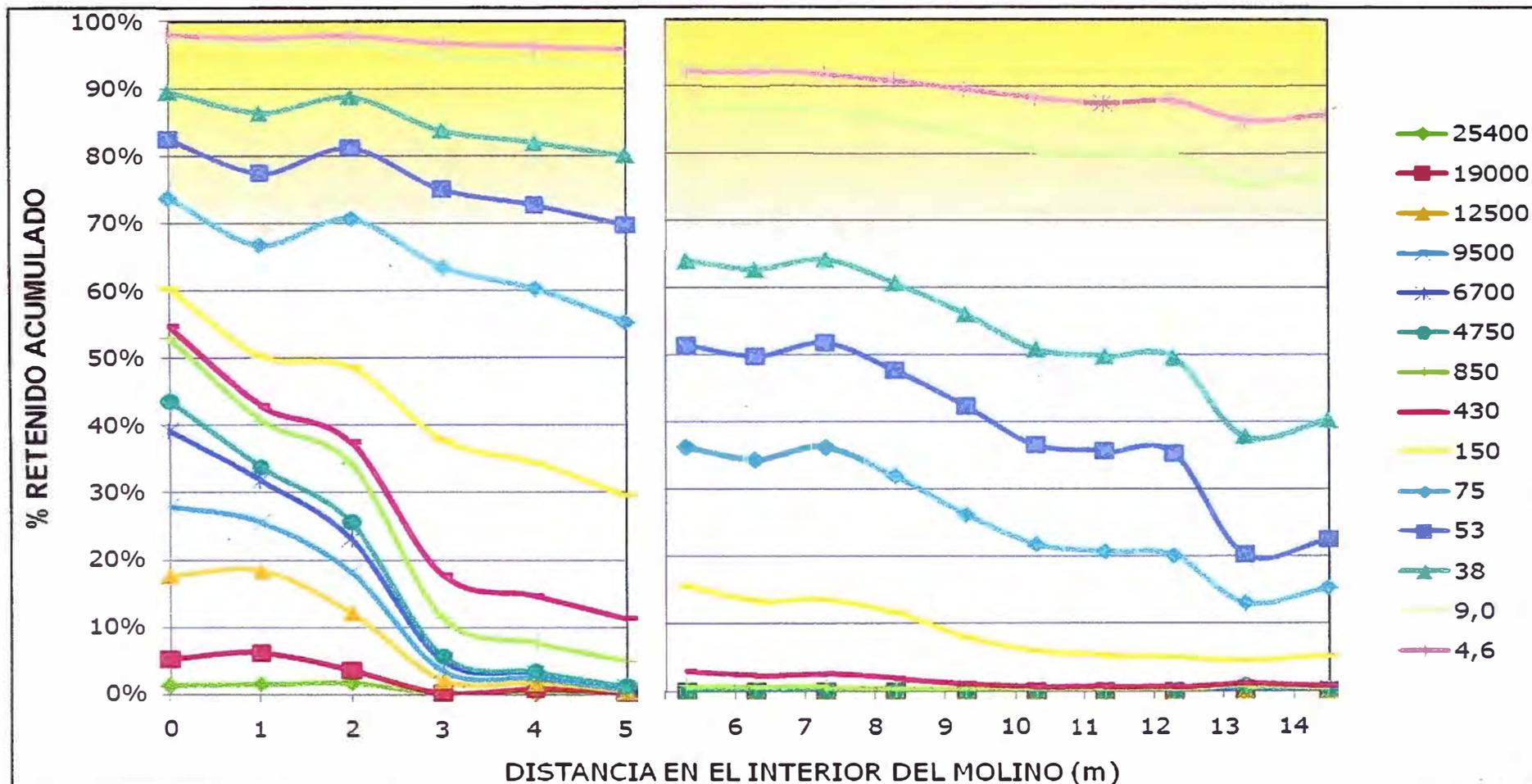


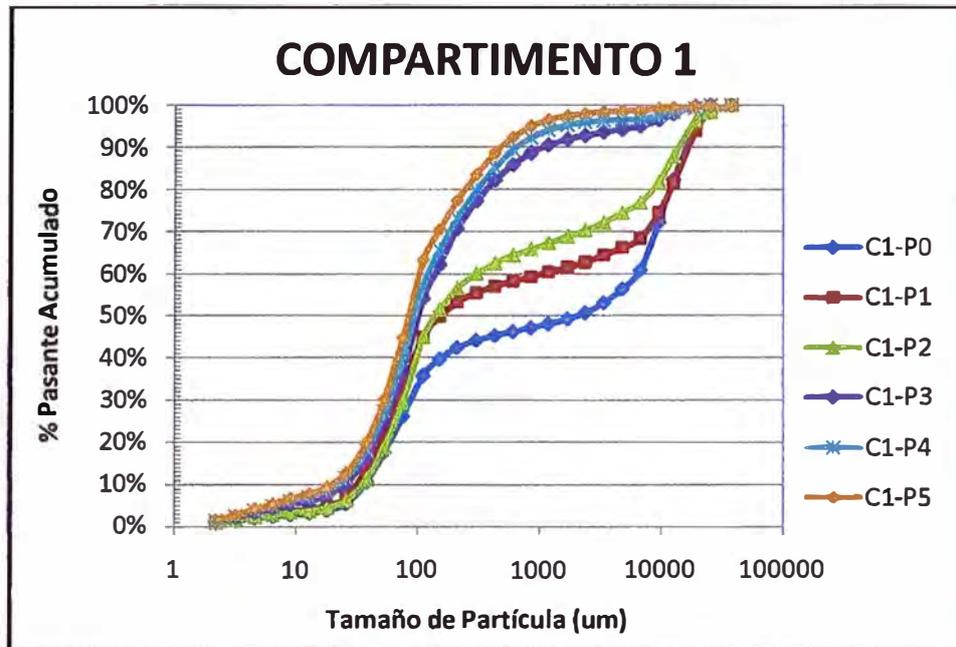
Figura 6.9. Puntos de Muestreo en el segundo Compartimiento del Molino.

La Gráfica 6.2, muestra el porcentaje retenido acumulado en el interior del molino por unidad de longitud del molino. Como se observa las partículas gruesas se fracturan con mayor rapidez, mientras que las partículas finas se fracturan lentamente. La distribución de tamaños del material en el interior del molino llega a ser más fino conforme avanza en longitud desde el punto de alimentación hasta el diafragma, sufriendo una caída considerable en el segundo compartimiento donde es más fino, lo que indica la presencia de una especie de separadora, entre cada compartimiento.

En la Gráfica 6.3 se muestran los resultados del primer compartimiento, en el cual, el eje de las abscisas representa los tamaños de partículas y, el eje de las ordenadas el porcentaje pasante acumulado. Del gráfico se observa claramente dos familias de curvas. La primera familia está formada por los tres primeros puntos de muestreo, y la segunda familia por los tres últimos puntos. Estas evidencias nos indican la existencia de dos molinos ideales en serie perfectamente mezclados en este compartimiento, cada uno con su forma peculiar de molienda, en donde el primer molino, que recibe material grueso, se encuentra en circuito abierto; y el segundo molino ideal, se encuentra en circuito cerrado con el clasificador ideal (Diafragma).

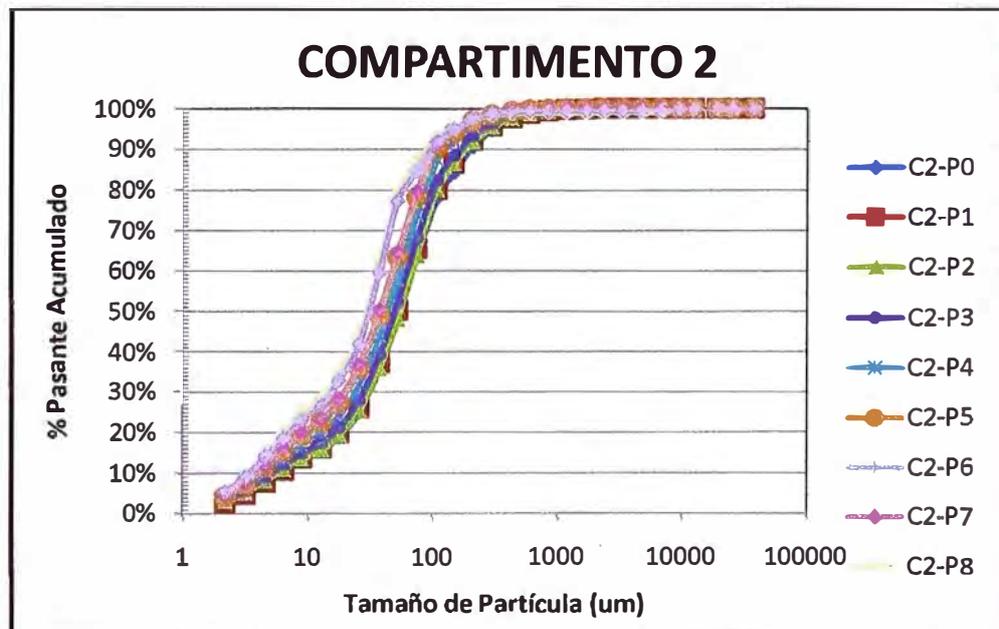


Gráfica 6.2. Distribución de tamaños de partícula en el interior del molino



Gráfica 6.3. Porcentaje Pasante Acumulado Primer Compartimiento del molino.

De la Gráfica 6.4 se observa que el segundo compartimiento presenta una sola familia de curvas, todas con la misma tendencia, del cual se deduce que hay un molino ideal en circuito abierto.



Gráfica 6.4. Porcentaje Pasante Acumulado Segundo Compartimiento del molino.

Por lo expuesto en el capítulo anterior, y por el análisis de los resultados experimentales obtenidos del interior del molino se deduce que:

- El primer molino ideal, mide aproximadamente 2,5 m y opera en circuito abierto.
- El segundo molino ideal, el cual opera en circuito cerrado con el clasificador ideal, mide aproximadamente 2,5 m.

Analizando el segundo compartimiento se deduce que el tercer molino ideal mide aproximadamente 8,5 m.

El esquema del análisis realizado para los molinos ideales en serie se muestra en la Figura 6.10.

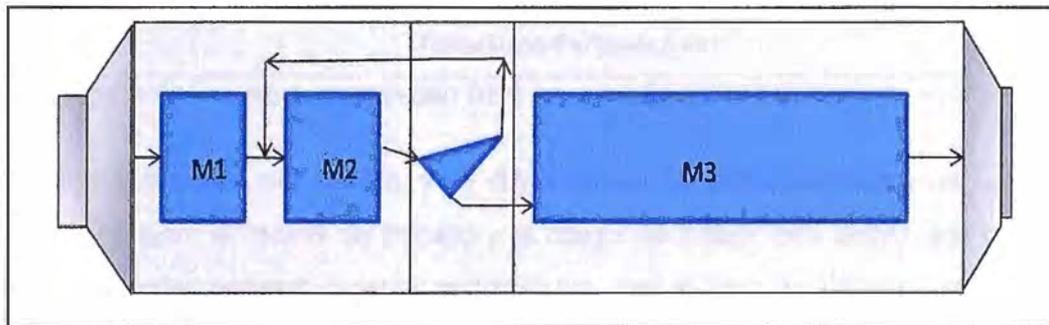
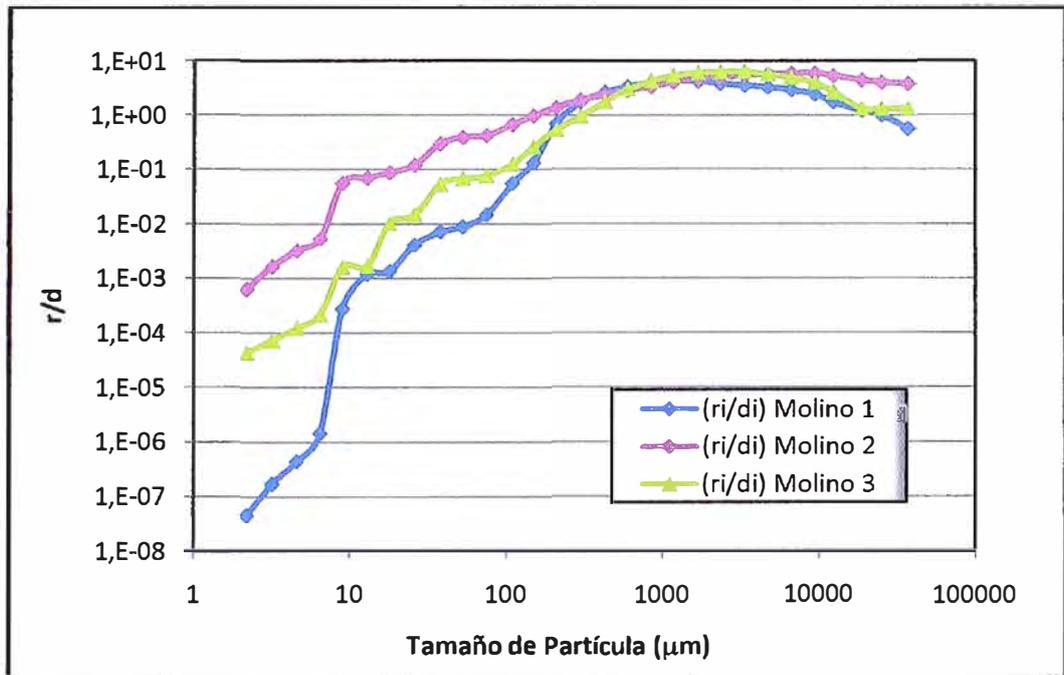


Figura 6.10. Descripción esquemática de la estructura del molino de bolas.

En el modelo de mezcla perfecta, conociendo la distribución de tamaños de la alimentación y el producto, se puede calcular la función combinada ( $r/d$ ) según la ecuación (21), para cada fracción de tamaños. Ver cálculo Apéndice D. Los resultados de la función combinada para cada molino ideal se muestran en La Gráfica 6.5.

Los valores de  $r/d_i$  son obtenidos para una sola condición de operación, si se desea llevar a otras condiciones se debe hacer uso de la ecuación (24).



Gráfica 6.5: Función combinada ( $r/d$ ) para cada molino ideal.

La velocidad crítica del molino, y su diámetro es un dato conocido y no varía, las que varían son: el índice de trabajo y la carga de bolas, que deben ser tomadas en cuenta para escalar a otras condiciones, por lo que se utilizará la ecuación (25), que se indica:

$$\frac{r/d_{sim}^*}{r/d_{obs}^*} = \frac{[1-J_{sim}][J_{sim}][W_{i_{sim}}]^{-0,8}}{[1-J_{obs}][J_{obs}][W_{i_{obs}}]^{-0,8}}$$

Haciendo uso de la ecuación (25) con los datos de Índice de Trabajo y carga de bolas mostradas en la tabla 6.4 se deduce para:

Cámara I:

$$\left(\frac{r}{d}\right)_1^* = \left(\frac{1-J_1}{0,79}\right) \left(\frac{J_2}{0,21}\right) \left[\frac{W_1}{15,48}\right]^{-0,8} \left(\frac{r}{d}\right)_2^* \quad (35)$$

Cámara II:

$$\left(\frac{r}{d}\right)_1^* = \left(\frac{1-J_1}{0,81}\right) \left(\frac{J_2}{0,19}\right) \left[\frac{W_1}{15,48}\right]^{-0,8} \left(\frac{r}{d}\right)_2^* \quad (36)$$

Si se mantienen las mismas condiciones de carga de bolas e Índice de Trabajo, la función combinada dependerá solo del flujo de la alimentación (ton/h).

La prueba experimental se realizó a 214 ton/h, para otras condiciones de flujo de alimentación la función combinada  $r/d$ , está dada por la ecuación (27), en:

$$\left(\frac{r}{d}\right)_{v_2} = \frac{v_2}{214} \left(\frac{r}{d}\right)_{v=214} \quad (37)$$

### 6.3.1.3. Determinación del Modelo de Clasificación Interna.

Haciendo uso de la distribución de tamaños de partícula obtenido de los estudios de muestreo, y el flujo de la alimentación al molino se realizó los cálculos para determinar los flujos de las corrientes al diafragma.

Se asume que las muestras tomadas en el último punto del primer compartimento (en la parte frontal del diafragma) es de la alimentación al clasificador ideal, y el primer punto del segundo compartimento (parte posterior del diafragma) es del producto fino que sale del clasificador ideal. El esquema de esta representación se muestra en la figura 6.11.

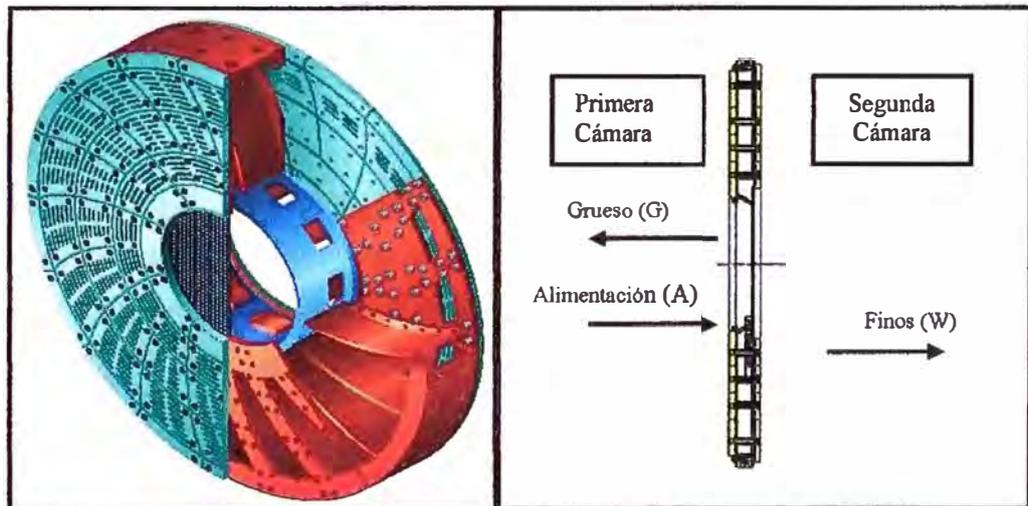
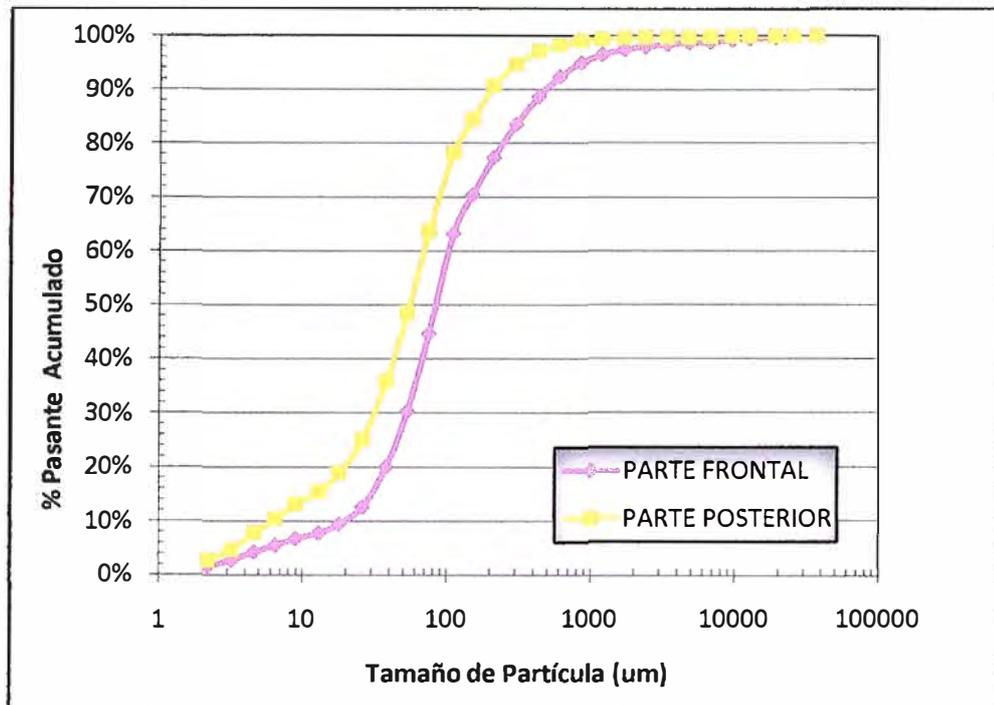


Figura 6.11. Esquema de clasificación en el diafragma del molino

La gráfica 6.6 muestra la distribución pasante acumulado de las partículas en la parte frontal y posterior al tabique.



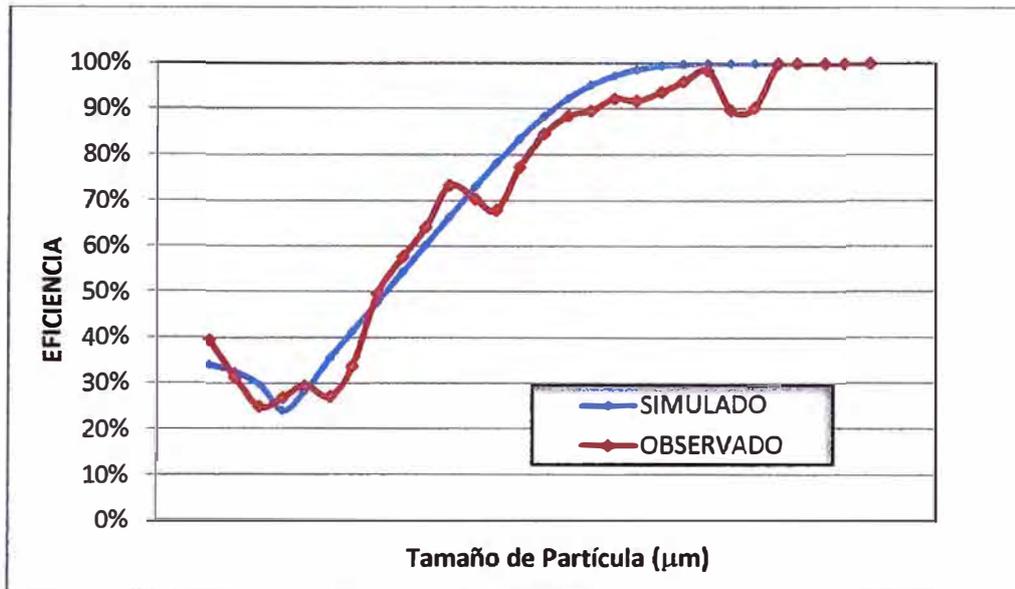
Gráfica 6.6. Distribución de las muestras tomadas de la parte frontal y posterior del tabique.

Debido a que el diafragma se comporta como un separador; se utilizará el modelo para separadoras.

De las muestras tomadas, solo se dispone el flujo de alimentación y el flujo del producto con sus respectivas granulometrías; sin embargo, el flujo de gruesos es desconocido e imposible de determinar por métodos experimentales, por lo que la simulación es una gran alternativa (Véase los cálculos en el Apéndice E).

Las curvas de eficiencia para el clasificador ideal observado y simulado son mostradas en la Gráfica 6.7.

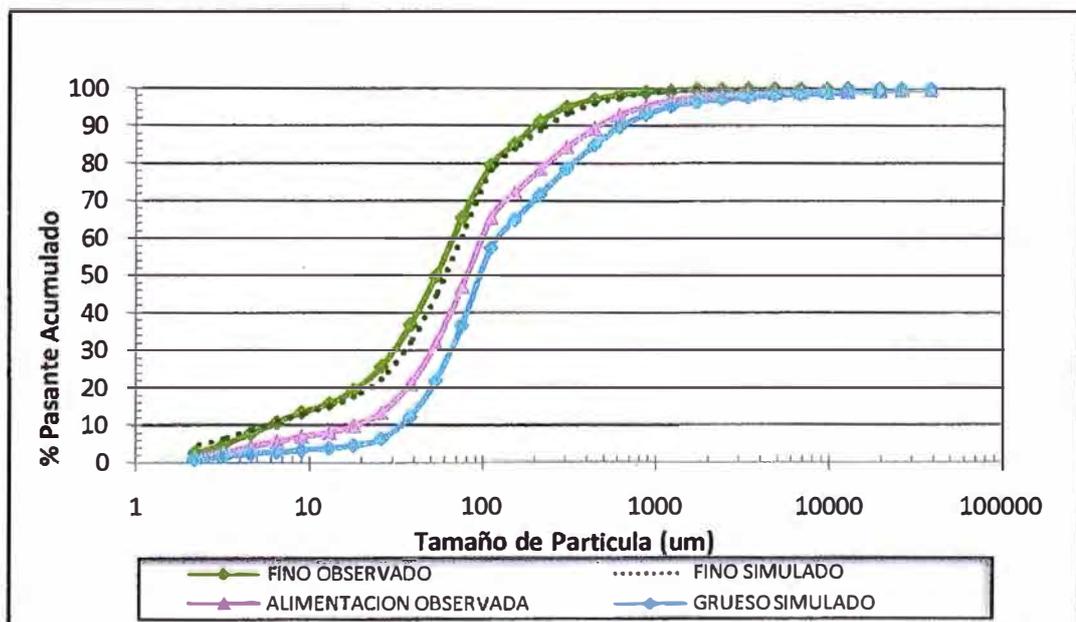
Modelando el diafragma, se logra predecir el flujo en ton/h de los gruesos y su granulometría, consiguiendo de esta manera, determinar la cantidad de material rechazado por el diafragma que es el alimento del segundo molino ideal.



Gráfica 6.7. Eficiencia Real del Tabique (observada y simulada)

La Gráfica 6.8 muestra el Porcentaje Pasante acumulado de los finos observados experimentalmente y los simulados, el error es del 0,80%, también se grafica el Porcentaje Pasante acumulado de la alimentación real y del grueso simulado.

Los parámetros de la ecuación (34) para el clasificador ideal son:



Gráfica 6.8. Distribución de tamaños simulados para la estimación de los gruesos desconocidos.

### 6.3.2. Separadora.

Para obtener los parámetros del modelo de la separadora, se realizaron pruebas en el separador de alta eficiencia tipo O-SEPA, y se tomaron en cuenta dichos conceptos:

- El incremento de la fineza es controlado únicamente por el aumento de la velocidad del rotor.
- El flujo de aire es controlado por el ventilador del separador y la distribución uniforme del aire está garantizada por el diseño de sus conductos y las veletas de guía.
- La salida del material fino depende de la extracción de aire.

#### 6.3.2.1. Condiciones de operación.

Para determinar los parámetros de la separadora  $X_0$ ,  $X_T$ ,  $T_0$ , y  $\delta$  de la ecuación (34), se realizaron 27 pruebas a distintas condiciones de operación de la separadora.

Las condiciones de operación en la que se trabajó se muestran en la Tabla 6.5.

TABLA 6.5. Condiciones de operación del Clasificador O-Sepa

VARIABLES	UNIDADES	VALORES
Alimentación fresca al molino	Ton/h	85, 90, 100
Velocidad rotor de la separadora	<i>rpm</i>	145, 155, 165
Abertura del ventilador de la separadora.	%	60, 80, 90

### 6.3.2.2. Puntos de muestreo.

En la Figura 6.12, se indican los puntos de muestreo; estos son: Alimentación a la separadora (1), Retorno al molino (2) y Producto final (3).

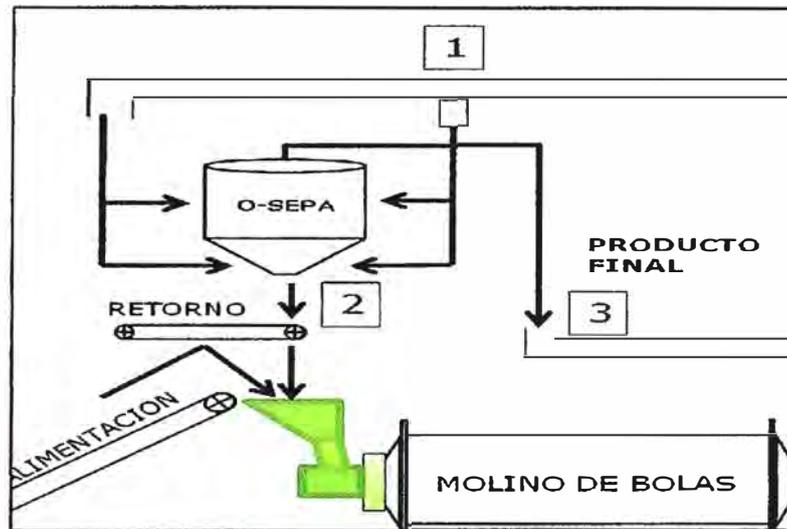


Figura 6.12. Puntos de muestreo en la separadora O-Sepa.

### 6.3.2.3. Determinación de los parámetros de la separadora.

Los parámetros de la separadora, se determinan gráficamente (Véase cálculos Apéndice F). Los resultados se muestran en la Tabla 6.6.

### 6.3.2.4. Relación entre los parámetros y las variables de operación de la separadora.

Para determinar la influencia de las variables de operación de la separadora sobre los parámetros que determinan su eficiencia (Tabla 6.6), se realizó un análisis de regresión por el método de "Paso a Paso". (Véase Apéndice F).

Las variables seleccionadas por el análisis de Regresión se muestran en la Tabla 6.7. Como se puede apreciar los parámetros  $X_0$ ,  $X_T$ ,  $T_0$ , y  $\delta$ , se ven influenciados por las variables que se encuentran sombreadas; por ejemplo,  $X_0$  queda determinada con el valor de velocidad de la separadora y una constante.

TABLA 6.6. Parámetros obtenidos para la separadora a diferentes condiciones

Alimentación Fresca ton/h	Velocidad Separadora RPM	% Abertura exhaustor	$X_0$	$T_0$	$X_T$	$\delta$
85	165	60	10,9507	0,2006	22,7151	1,7045
85	165	80	10,7901	0,1457	22,3180	1,7311
85	165	90	11,1298	0,1547	22,9908	1,7010
85	155	60	10,5887	0,3302	22,6383	1,6234
85	155	80	10,7538	0,1090	24,9288	1,7981
85	155	90	11,2182	0,1545	24,6490	1,7371
85	145	60	11,6875	0,1629	26,9015	1,7986
85	145	80	11,4505	0,1669	26,1802	1,7740
85	145	90	11,4898	0,0760	30,8995	1,9079
90	165	60	10,2584	0,1823	23,1378	1,7921
90	165	80	10,2356	0,1077	23,9654	1,7712
90	165	90	10,7621	0,1780	22,7689	1,6205
90	155	60	10,5462	0,2117	24,1164	1,7316
90	155	80	11,0102	0,1658	25,0001	1,7205
90	155	90	11,1089	0,1536	23,9135	1,7505
90	145	60	10,9784	0,2124	24,7795	1,7641
90	145	80	10,9914	0,0796	27,1994	1,8385
90	145	90	10,5590	0,0694	29,7747	1,9023
100	165	60	10,6708	0,2196	21,3287	1,6421
100	165	80	10,1031	0,2128	23,5757	1,7016
100	165	90	10,7048	0,1807	22,9920	1,6696
100	155	60	11,0579	0,1762	23,5827	1,7022
100	155	80	9,40150	0,0881	25,9694	1,8199
100	155	90	10,8933	0,1427	25,1975	1,7012
100	145	60	10,9016	0,2902	24,1882	1,6025
100	145	80	10,9359	0,1208	27,9857	1,7602
100	145	90	10,9120	0,0961	27,9889	1,7788

TABLA 6.7. Variables seleccionadas por el método de Regresión "Paso a Paso" para determinar los parámetros de eficiencia de la Separadora

Variables	Símbolo	$X_0$	$T_0$	$X_T$	$\delta$
Velocidad Separadora (RPM)	<b>VS</b>	-0,0248	0,0005	-0,1861	-
Alimentación Separadora (ton/h)	<b>A</b>	-	0,0006	-0,0121	0,0048
%Abertura Exhaustor	<b>AE</b>	-	-0,0014	0,0384	-
Constante		14,5911	-	54,613	-
Ajuste de Regresión	<b>R<sup>2</sup></b>	0,927	0,999	0,908	0,920

De la Tabla 6.7 obtienen las siguientes relaciones matemáticas:

$$X_0 = 14,5911 - 0,0248 * (VS) \quad (38)$$

$$T_0 = 6,0 \times 10^{-4} * (A) - 1,4 \times 10^{-3} * (AE) + 5,0 \times 10^{-4} * (VS) \quad (39)$$

$$X_T = 54,613 - 0,1861 * (VS) - 0,0121 * (A) + 0,0384 * (AE) \quad (40)$$

$$\delta = 4,8 \times 10^{-3} * (A) \quad (41)$$

La calidad de ajuste ( $R^2$ ) de las ecuaciones (38); (39); (40) y (41) son 0,927; 0,999; 0,908 y 0,920, respectivamente.

### 6.3.3. Modelo para la Predicción de la Resistencia a la Compresión del Cemento.

En el presente proyecto, el modelo matemático para la predicción de la resistencia a la compresión, es desarrollado tomando en cuenta tres aspectos importantes: composición química mineralógica, parámetros de distribución del tamaño de partículas y las fracciones de tamaños de partículas.

#### 6.3.3.1. Muestreo

Se tomaron 53 muestras de Cemento Portland Tipo I a la salida de la separadora, como se muestra en la Figura 6.13.

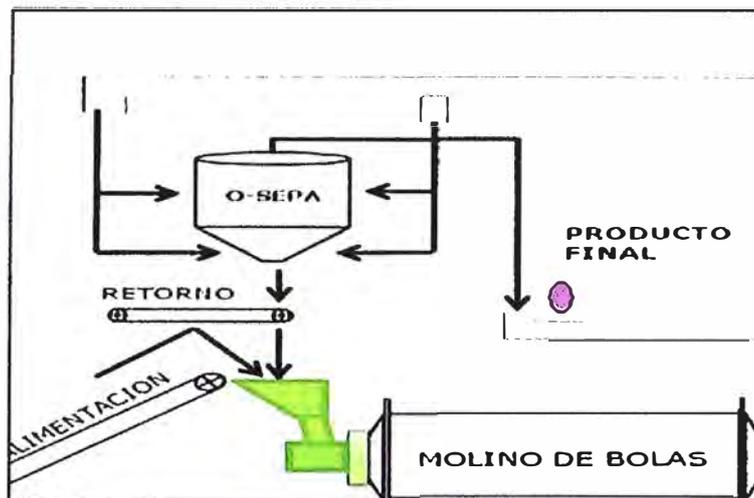


Figura 6.13. Punto de muestreo para la prueba de Resistencia del cemento

### 6.3.3.2. Ensayos Realizados.

El siguiente grupo de variables han sido probadas para certificar su efecto en la resistencia del cemento.

#### a) Variables químicas mineralógicas:

- a.1) Análisis de las fases mineralógicas del cemento  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ , fueron determinadas por el Difractómetro de Rayos – X.

#### Metodología.

Para analizar el cemento, la muestra debe estar ligeramente compactada. Una vez obtenida la muestra en forma de pastilla se coloca en una de las posiciones que contiene el porta muestra y estará a la espera de ingresar al equipo de difracción. La orden para el análisis se da por intermedio de una computadora conectada con el equipo D4 –ENDEAVOR de la firma BRUKER y por medio del programa TOPAS se logra determinar las fases del cemento. La Figura 6.14 muestra la forma como se prepara la muestra para la lectura en el difractómetro de la Figura 6.15.

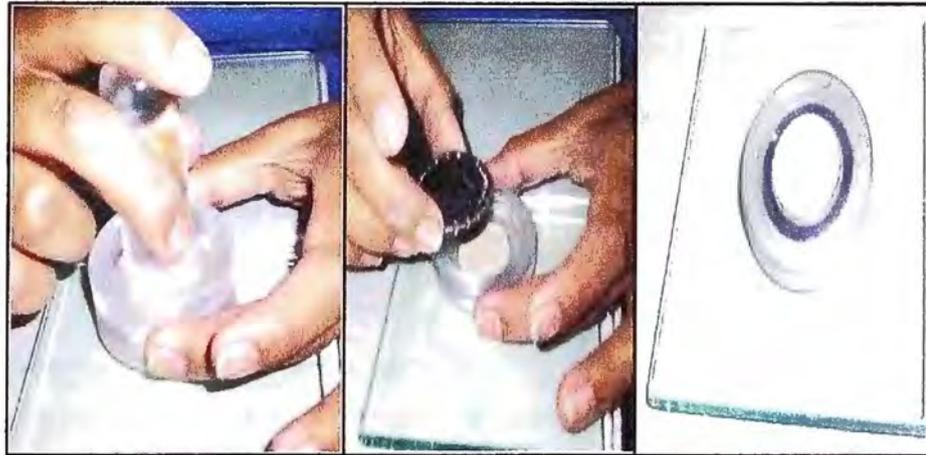


Figura 6.14. Preparación de las muestras para el análisis por difracción de Rayos X.



Figura 6.15. Difractómetro de Rayos X.

a.2) Los %CaO, %SiO<sub>2</sub>, %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %MgO, %Na<sub>2</sub>O, %K<sub>2</sub>O y %SO<sub>3</sub> fueron determinados por fluorescencia de Rayos X (XRF).

#### Metodología.

El método prueba para la determinación del análisis químico (composición) del cemento, debe realizarse de acuerdo a la norma ASTM C-114 o equivalente mediante fluorescencia de Rayos X.

Para analizar el cemento, la muestra debe estar pulverizada, luego por intermedio de una prensa, preparar una pastilla compacta con la muestra pulverizada. Para lograr mayor compactación se añade cera en polvo y/o alcohol etílico. Una vez obtenida la muestra en forma de pastilla se coloca en una de las 58 posiciones que contiene el porta muestra y estará a la espera de ingresar al equipo de Fluorescencia de Rayos X para su análisis. Toda orden para el análisis desde su inicio hasta obtener el resultado se da por intermedio de una computadora conectada con el equipo XRF SRS 3000 SIEMENS y por medio de un programa se puede realizar y controlar el análisis.

En la Figura 6.16 se observa (a) el equipo pulverizador de muestras, y en (b) la maquina compactadora para convertir el material pulverizado en pastillas, para ser leído por el equipo de Rayos X por fluorescencia (c).



a. Equipo pulverizador de muestras



b. Maquina compactadora



c. Equipo de Rayos X por fluorescencia.

Figura 6.16. Metodología para determinar los componentes químicos en el equipo de Rayos X por fluorescencia.

### a.3) Determinación del % CaO libre.

#### Metodología.

Para determinar la cal libre se realizó de acuerdo a la norma ASTM C -114.

Se pesa aproximadamente 1,0000 g de muestra, 0,5000 g de NaCl y se transfiere a un frasco Erlenmeyer que contiene 60 mL de solución preparada de glicerina y etanol (1:2). Se agita bien para dispersar la muestra y se agrega 3 gotas de NaOH (2%) tornándose la solución rosada.

El Erlenmeyer con agitador magnético se lleva a una plancha caliente, y se conecta a un condensador con reflujo por 20 min. Se filtra al vacío, la solución filtrada se titula con acetato de amonio hasta viraje de color.

$$\% \text{ CaO libre} = C \times V \times 100 \quad (42)$$

V: volumen del acetato de amonio requerido por la muestra en mL.

C: Equivalente en CaO de la solución de acetato de amonio, g/mL.

### a.4) Pérdida por Ignición (PI).

#### Metodología.

El método para determinar la pérdida por ignición del Cemento Portland Tipo I, se efectuó de acuerdo a la norma ASTM C-114. La pérdida por ignición representa la humedad total y la presencia CO<sub>2</sub> en el cemento.

Se pesa 1,0000 g de muestra en un crisol de platino y se lleva a una mufla a una temperatura de 950 ± 50 °C, por un tiempo máximo de 30 min. Se retira y se pesa.

$$\%P.I. = \frac{(\text{Peso final} - \text{Peso inicial})}{\text{Peso inicial}} \cdot 100 \quad (43)$$

En la actualidad existen equipos especiales que determinan la pérdida por ignición, la Figura 6.17 muestra un Analizador Termogravimétrico TGA701 de la firma LECCO.



Figura 6.17. Termogravímetro para determinar la pérdida por ignición de la muestra.

a.5) Factor de Saturación (LSF)

Se determina por medio de la ecuación (1).

b) **Variables de distribución de tamaño de partículas.**

b.1) Superficie específica.

Método de Blaine

El método de prueba para determinar la superficie específica se realiza de acuerdo a la norma ASTM C-204. Se trata de un método comparativo y no es una medición directa.

El principio de operación del Método de Blaine consiste en medir, el tiempo (t) que demora el líquido del tubo en U cuando vuelve a nivel desde una altura inicial a una altura final marcada, haciendo pasar aire a través de la muestra de cemento. El tiempo está relacionado con la superficie específica por la siguiente ecuación:

$$S_w = k\sqrt{t} \quad (44)$$

donde t es el tiempo en segundos y k una constante para el equipo determinada por medio de un cemento de superficie conocida.

El equipo para determinar la superficie específica se llama Permeabilímetro de Blaine y es el que se muestra en la Figura 6.18. Realizar los ensayos en este equipo (A) lleva mucho tiempo y no es muy práctico para pruebas de rutina, sin embargo, el uso de equipos electrónicos (B) soluciona todos estos problemas. El permeabilímetro de Blaine simple es muy útil, porque sirve para calibrar los equipos electrónicos.

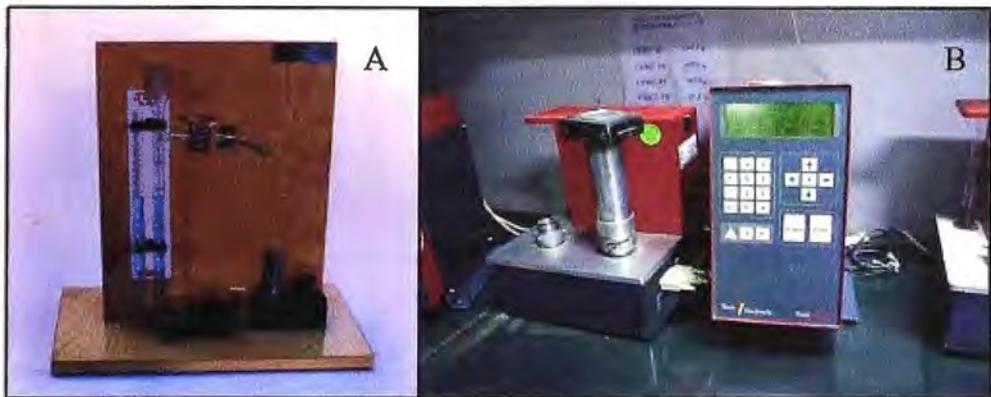


Figura 6.18. Permeabilímetro del Blaine (A) Simple (B) Electrónico.

b.2 El parámetro de posición ( $P_p$ ), 80% pasante ( $P_{80}$ ), y Factor de uniformidad ( $n$ ) se determinan con ayuda de la ecuación (8).

**c) Variable de fracción de tamaños:**

La fracción de tamaños  $<3 \mu\text{m}$ ,  $3-32 \mu\text{m}$ ,  $3-16 \mu\text{m}$  y  $16-24 \mu\text{m}$ , se determinó por granulometría Láser.

**Metodología.**

En principio es necesaria que la muestra puesta en la unidad deba ser previamente tamizada a  $200 \mu\text{m}$  tal que no falsifique los resultados. La cantidad de muestra usada depende del tamaño de la partícula y la densidad del producto a ser probado. Sin embargo, esto no es crítico y el peso de la muestra puede variar 1 g. No obstante, el pesado no es requerido.

La muestra se transfiere a un portador de muestra Figura 6.19 (A), donde el material circula en suspensión de un fluido (alcohol).

El material es analizado por un sistema de detección que consiste en un sistema de lentes y un detector foto-eléctrico. Este sistema se completa con un

preamplificador y amplificador; para luego ser llevado a un computador en una curva de distribución granulométrica. La Figura 6.19 (B) muestra el Granulómetro CILAS 1064 utilizado para encontrar la fracción de tamaños.

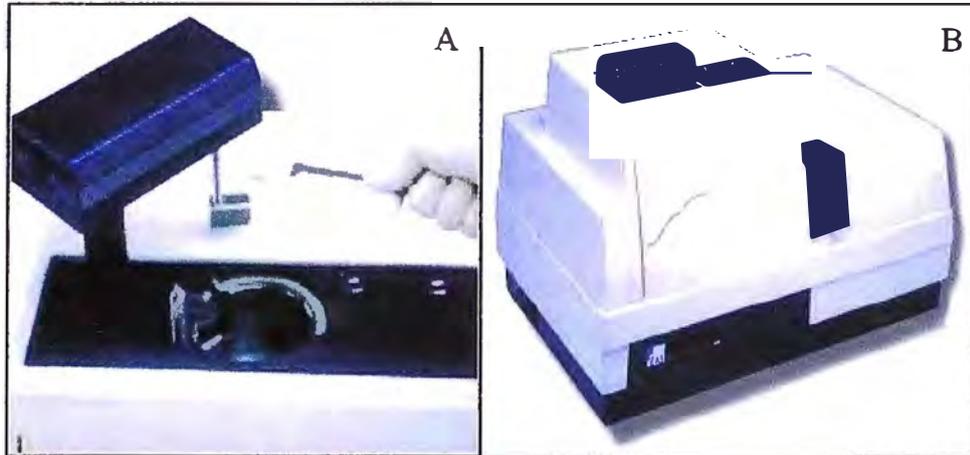


Figura 6.19. Granulometría Laser  
(A) Portador de muestra y (B) Granulómetro CILAS.

**d) Resistencia a la Compresión del cemento:**

Se realizaron 53 pruebas de resistencia a la compresión en base a la norma ASTM C -109, el cual especifica los requerimientos de resistencia a edades de 3, 7 y 28 días. En esto caso, también se determinará la resistencia a un día (24 horas), debido a que este valor se puede comparar tempranamente.

Metodología:

• **Aparatos:**

La Figura 6.19 muestra los equipos utilizados para el desarrollo de estas pruebas.

- ✓ Mezcladora, Tazón y Paleta (a)
- ✓ Mesa vibratoria y mesa de Fluencia (b)
- ✓ Pisón (c)
- ✓ Moldes de Especímenes (d)
- ✓ Fratás (e)

- ✓ Gabinete o cuarto húmedo (f)
- ✓ Máquina de ensayo (g)

- **Materiales:**

Arena graduada normalizada, cemento y agua.

- **Procedimiento.**

En un tazón como se muestra en la Figura 6.20-a, se mezcla 159 g de H<sub>2</sub>O destilada con 740 g de Cemento y se agrega gradualmente 2035 g de arena, y se mezcla de acuerdo a lo que indica la norma ASTM C-305, y se determina la fluencia según el Método de ensayo ASTM C-1437. Inmediatamente después de completar el ensayo de fluencia regresar la muestra al tazón y mezclar por 15 min más. Se procede el moldeado y el compactado con el pisón 32 veces en 4 rondas o se utiliza la mesa vibratoria previamente validada (0,2 vibraciones por 0,5 min). Realizada esta operación, se procede a nivelar la superficie con el fratás quedando como se observa en la Figura 6.21. Luego de completar el moldeo, se ubica los especímenes de ensayo en un cuarto húmedo ( $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\%HR \geq 98$ ). Después de transcurrir 24 horas se toma 2 especímenes y se ensaya la resistencia a la compresión, el resto se conserva en agua con cal hasta 3, 7 y 28 días para ser evaluadas las resistencias a estas edades mencionadas.



a. Maquina mezcladora

b. Mesa de fluencia



c. Mesa vibratoria



d. Pisón para presionar la mezcla



e. Molde de especímenes



f. Fratás para alisar las superficies



f. Cuarto húmedo para el reposo de las muestras



g. Máquina de Ensayo para la compresión de las probetas

Figura 6.20. Equipos y probetas utilizados en la Prueba de la Resistencia a la Compresión



Figura 6.21. Preparación de la probeta.

### 6.3.3.3. Desarrollo del modelo matemático.

El desarrollo del modelo matemático se ha efectuado sobre la base de las investigaciones de Tsivilis, García-Casillas, y en los trabajos de evaluación realizadas en los laboratorios de Cementos Lima S.A., que demuestran en que existe relación entre la resistencia a la compresión y las características del cemento. Se ha utilizado un Modelo de Regresión Lineal por el método de pasos. El análisis de la data (Apéndice G), permite que los coeficientes ( $|B|$ ), puedan ser determinados con ayuda de un software estadístico.

$$|A| = |B| \cdot |C| \quad (45)$$

$$\text{Donde: } |A| = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_3 \\ R_7 \\ R_{28} \end{bmatrix}; |C| = \begin{bmatrix} C3S \\ C2S \\ C3S/C2S \\ C3A/C4AF \\ LSF \\ Na_2O \\ SO_3 \\ CaO \text{ libre} \\ S.E. \left(\frac{cm^2}{g}\right) \\ Pp (\mu m) \\ P_{80}(\mu m) \\ < 3 (\mu m) \\ 3 - 32 (\mu m) \\ 3 - 16 (\mu m) \\ 16 - 24(\mu m) \end{bmatrix} \quad \text{y } |B| = \text{coeficientes}$$

Donde  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_7$  y  $R_{28}$  son las resistencias a la compresión después de 24 horas, 3, 7 y 28 días respectivamente, estas resistencias son medidas en  $\text{kg/cm}^2$ .

Los procedimientos estadísticos y los cálculos para el desarrollo del modelo son mostrados en el Apéndice G.

Las variables seleccionadas para el análisis de Regresión por pasos se muestran en la Tabla 6.8. Como se puede apreciar los valores de resistencia a la compresión del cemento a 24 horas, 3, 7 y 28 días, se ven influenciadas por las variables sombreadas de color gris. Con respecto a la composición mineralógica se deduce que la resistencia a temprana edad (24 horas) se ve influenciada por el  $C_3S$ , y a edades tardías se ve influenciada por el  $C_2S$ , que lo confirman los estudios realizados y la bibliografía existente. Se puede observar la importancia que tiene el  $\%SO_3$  aportado por el yeso a temprana edad, también el porcentaje de cal libre. El  $\%Na_2O$ , sólo contribuye de manera negativa, lo que significa que reduce la resistencia si éste se incrementa y es mayor a edades tardías. Por otro lado se aprecia que la resistencia del cemento se ve influenciada por la superficie específica (S.E) en todas sus edades; y de igual forma la fracción de tamaños de partículas.

La Tabla 6.8 permite determinar las siguientes ecuaciones:

$$R_1 = 3,251 * C_3S - 1,679 * \frac{C_3S}{C_2S} - 2,500 * LSF + 43,293 * \%SO_3 + 45,140 * \%CaO_{Libre} + 0,031 * S.E - 2,581 * P_{80} + 1,281 * (3 - 32 \mu m)\% - 1,625 * (3 - 16 \mu m)\% + 2,002 * (16 - 24 \mu m)\% \quad (46)$$

$$R_3 = -1,642 * C_2S - 81,745 * Na_2O + 0,044 * S.E + 0,595 * P_{80} + 0,752 * (3 - 32 \mu m)\% + 1,660 * (3 - 16 \mu m)\% + 0,957 * (16 - 24 \mu m)\% \quad (47)$$

$$R_7 = 2,837 * \left(\frac{C_3S}{C_2S}\right) + 0,345 * \%LSF - 242,323 * Na_2O + 0,044 * S.E + 4,109 * P_p - 1,438 * P_{80} - 0,942 (< 3 \mu m)\% + 4,374 * (3 - 16 \mu m)\% \quad (48)$$

$$R_{28} = 7,025 * C_2S + 9,344 * \left(\frac{C3S}{C2S}\right) - 9,253 * \left(\frac{C3A}{C4AF}\right) - 296,345 * Na_2O + 0,050 * S.E + 9,329 * P_p - 4,933 * P_{80} - 1,537 (< 3\mu m)\% + 1,320 * (3 - 32 \mu m)\% + 4,652 * (3 - 16 \mu m)\% - 5,244 * (16 - 24 \mu m)\% \quad (49)$$

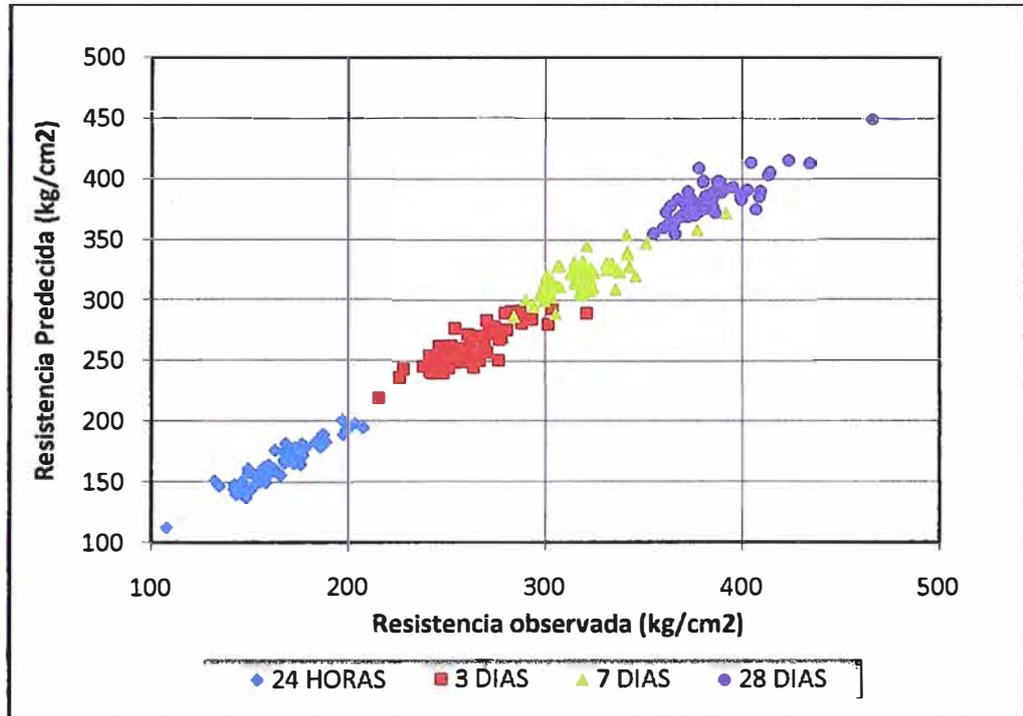
TABLA 6.8. Resultados del modelo para la predicción de la Resistencia a la Compresión por el método de regresión de "Paso a Paso"

EDADES VARIABLE	24 Horas	3 Días	7 Días	28 Días
%C3S	3,251			
%C2S		-1,642		7,025
C3S/C2S	-1,679		2,837	9,344
C3A/C4AF				-9,253
%LSF	-2,500		0,345	
%Na2O		-81,745	-242,323	-296,345
%SO3	43,293			
% Cal Libre	45,140			
S.E. (cm <sup>2</sup> /g)	0,031	0,044	0,044	0,050
Pp.(μm)			4,109	9,329
P80(μm)	-2,581	0,595	-1,438	-4,933
<3 μm			-0,942	-1,537
3-32 μm	1,281	0,752		1,320
3-16 μm	-1,625	1,660	4,374	4,652
16-24 μm	2,002	0,957		-5,244
R <sup>2</sup>	<b>0,998</b>	<b>0,998</b>	<b>0,998</b>	<b>0,999</b>

La calidad de ajuste del modelo de regresión múltiple de la ecuación (46), (47), (48) y (49) da un coeficiente R<sup>2</sup> de 0,998; 0,998; 0,998; 0,999 para el modelo de 24 horas, 3, 7 y 28 días, respectivamente.

La Gráfica 6.9 muestra los resultados del modelo con respecto al resultado experimental observado en las diferentes edades. Estos mismos resultados son observados en la Gráfica 6.10, en este caso se tiene la resistencia predcida y

observada con respecto a cada muestra realizada y ensayada para las diferentes edades.



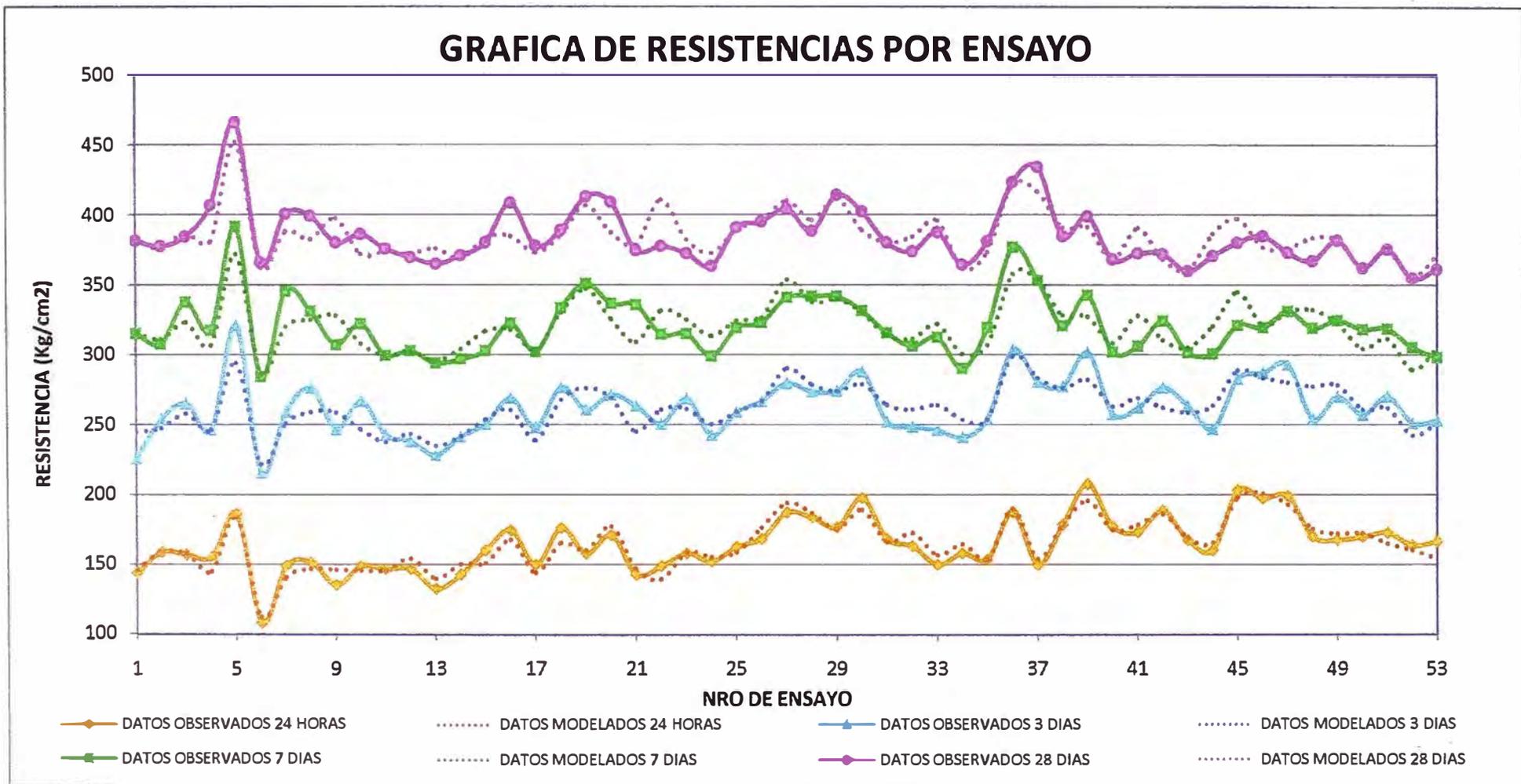
Gráfica 6.9. Ajuste de Regresión para la Resistencia a la Compresión de Cemento observada Vs la predecida a 24 horas, 3, 7 y 28 días

#### 6.3.4. Modelo para la Predicción de la Superficie Específica del Cemento.

La distribución de tamaños de partículas de todas las muestras fueron determinadas usando el analizador de partículas CILAS, y la superficie específica de estas muestras fueron determinadas por el método estandarizado de permeabilidad de aire tales como el Blaine.

##### 6.3.4.1. Muestreo.

Las muestras analizadas fueron las mismas que se utilizaron en el modelo de predicción de la resistencia a la compresión. La densidad promedio del cemento para estas pruebas fué de  $18,0 \text{ g/cm}^3$ .



Gráfica 6.10. Resistencia predecida y observada con respecto al número de ensayo, para 24 horas, 3, 7 y 28 días

### 6.3.4.2. Análisis de Regresión.

Para determinar la influencia que tienen la fracción de tamaños de partículas de: <3  $\mu\text{m}$ , 3-32  $\mu\text{m}$ , 3-16  $\mu\text{m}$ , 16-24  $\mu\text{m}$ ,  $P_p$  ( $\mu\text{m}$ ),  $P_{80}$  ( $\mu\text{m}$ ) y  $\eta$ ; en la S.E ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), se realizó un análisis de regresión, cuyos cálculos se muestran en el Apéndice G.

Las variables seleccionadas por el análisis de Regresión por el método de pasos se muestran en la Tabla 6.9. Como se puede apreciar los parámetros:  $\eta$ ,  $P_p$ ,  $P_{80}$ , <3  $\mu\text{m}$ , 3-16  $\mu\text{m}$  se ven influenciadas por las variables sombreadas de gris, en la que confirma que tamaños de partículas menores de 16  $\mu\text{m}$  influyen en la S.E.

TABLA 6.9. Variables seleccionadas por el método de regresión "Paso a Paso" para determinar el modelo para la Predicción de la Superficie Específica.

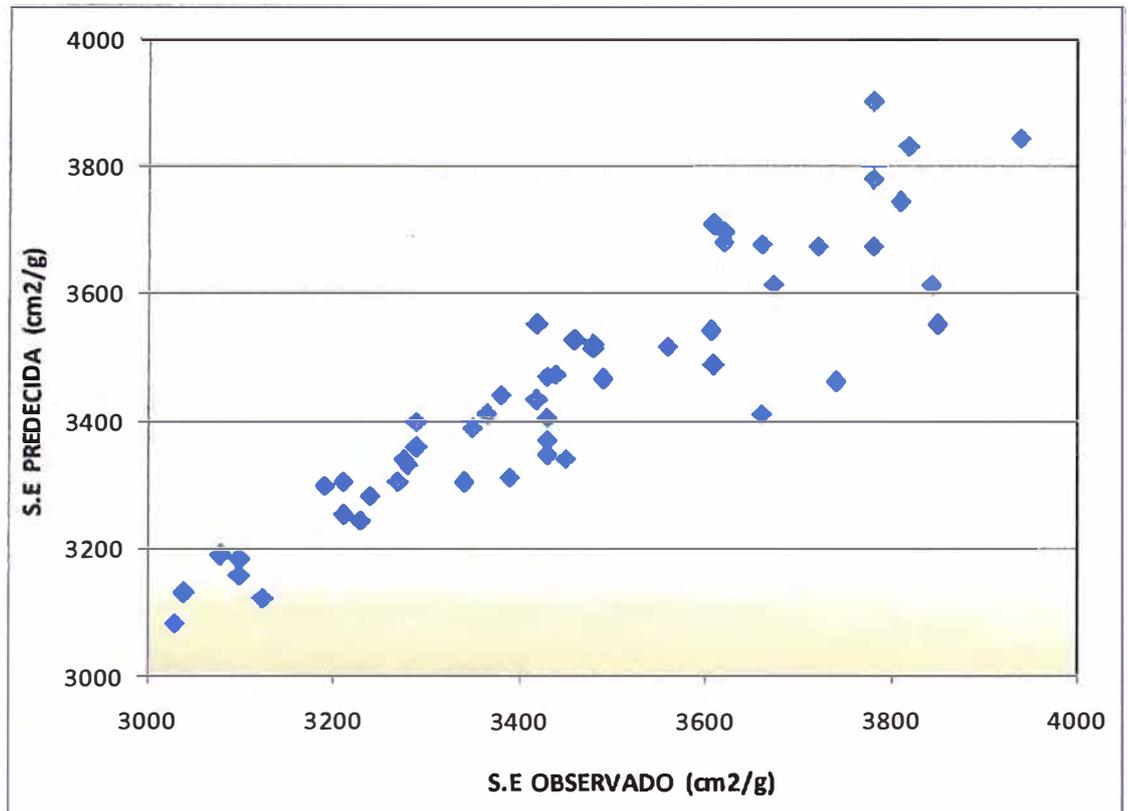
<b>Variables</b>	<b>S.E <math>\text{cm}^2/\text{g}</math></b>
$\eta$	-1076
$P_p$ ( $\mu\text{m}$ )	-170
$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	137,7
$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	
< 3 $\mu\text{m}$	30
3 – 32 $\mu\text{m}$	
3 – 16 $\mu\text{m}$	92,16
16 – 24 $\mu\text{m}$	
<b><math>R^2</math></b>	<b>0,914</b>

De la Tabla 6.9 se puede obtener la siguiente correlación matemática:

$$\text{S.E} = 92,16*(3-16 \mu\text{m}) + 30*(<3 \mu\text{m}) + 137,7*P_{80} - 170* P_p - 1 076 * \eta \quad (50)$$

La calidad de ajuste del modelo de regresión da un coeficiente  $R^2$  de 0,914.

La Gráfica 6.11 muestra el ajuste de regresión de la superficie específica por el Método Blaine observado y predecido.



Gráfica 6.11. Ajuste de Regresión del Blaine Predecido y el Blaine Observado.

### 6.3.5. Circuito de molienda.

Los modelos obtenidos en 6.3.1 (Molino de bolas) y 6.3.2 (Separadora) se acoplan para obtener un modelo del circuito de molienda con el objetivo de predecir la distribución de tamaños de partículas a la salida del circuito.

#### 6.3.5.1. Variables del circuito de molienda.

Existen muchas variables en el circuito de molienda que pueden afectar la distribución del tamaño de partículas del producto final y por ende la resistencia a la compresión del cemento, entre ellas se cita:

- La distribución de tamaños de bolas y su carga de llenado dentro de cada compartimiento del molino, que son reflejados en la función  $r/d$ , por tanto es una variable a considerar.

- La distribución de tamaño de partícula del clínker, así como el flujo de alimentación de éste, influyen mucho en la molienda, por lo que ambas variables son esenciales en el modelo.
- Como el objetivo de este trabajo es predecir la resistencia del cemento sobre la base granulométrica, no se considerará a la composición química del clínker como una variable de entrada, se asume que la composición química no se ve afectada por la molienda, debido a que en el interior del molino no existe reacción y la temperatura en el interior del molino es regulada por la succión de aire.
- La temperatura del clínker en la alimentación se encuentra a medio ambiente, debido a que el material está expuesto en canchas al aire libre. Por lo tanto no se considerará como una variable.
- El Índice de trabajo del clínker que es reflejado en la función  $r/d$ , por lo que se tomará en cuenta en el modelo.
- La velocidad de giro del molino es un parámetro de diseño y no varía, por lo tanto no es una variable.
- La succión o arrastre, así como la velocidad de la separadora, como se indica en (6.3.2), influye en la eficiencia de la separadora, por tal motivo se la considera como variable de entrada.
- La cantidad de  $SO_3$  no es una variable de molienda, sin embargo; se lo tomará en cuenta para la predicción de la resistencia del cemento.
- La composición química del cemento es una variable importantísima a considerar en la predicción de la resistencia, sin embargo esta se obtendrá experimentalmente y no del modelo matemático.

Para la predicción de la resistencia existen tres tipos de variables a considerar:

a) Variables de entrada.

- Granulometría del clínker de alimentación.
- Flujo de alimentación fresca (Ton/h).
- Índice de trabajo del clínker (kwh/Ton).
- Carga de llenado de bolas (%).

- Velocidad de la separadora (RPM).
  - Abertura del exhaustor (%).
- b) Variables intermedias.
- Flujo de retorno al molino (Ton/h).
  - Flujo de alimentación a la separadora (Ton/h).
- c) Variables de salida.
- Flujo del producto cemento (Ton/h).
  - Granulometría del cemento.
  - Superficie específica (cm<sup>2</sup>/g) o área superficial
  - Parámetros de Rosin Rammler.
- d) Variables para la predicción de la resistencia del cemento.

Las variables fueron analizadas en el ítem 6.3.3. Cabe resaltar que las variables de distribución de tamaños de partículas y de distribución de tamaños lo proporciona el modelo matemático; sin embargo, la composición química – mineralógica del cemento se determina experimentalmente.

#### 6.3.5.2. Balance de masa.

Para poder realizar la simulación del circuito solo se conoce el flujo de alimentación fresca y distribución granulométrica, entonces para determinar el flujo de salida, se realiza el balance de masa. De la figura 6.21 tenemos:

$$F = P \quad (51)$$

$$A = R + P \quad (52)$$

$$A = R + F \quad (53)$$

Donde:

A: Flujo Alimentación Separadora (Ton/h).

R: Flujo Retorno al molino (Ton/h).

P: Flujo de producto final (Ton/h).

F: Flujo de alimentación fresca (Ton/h).

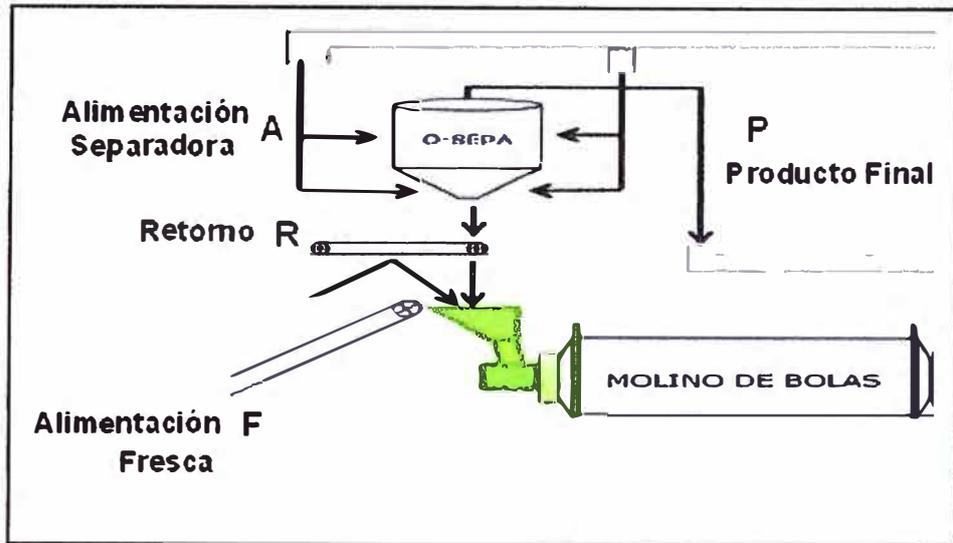


Figura 6.22. Balance de masa del circuito en estudio.

La eficiencia de la separadora, depende del flujo de alimentación ( $A$ ), es la que ingresa a la separadora. De la ecuación 52 se observa que para determinar  $A$  se requiere conocer el flujo de retorno al molino  $R$ , y el flujo de alimentación fresca  $F$  que es un valor conocido, por lo que  $A$  y  $R$  son nuestras variables intermedias. Para determinar las variables que influyen en el flujo de retorno  $R$  al molino se hizo un análisis de regresión por el Método "Paso a Paso" (Véase Apéndice H). Las variables seleccionadas el cual se muestra en la Tabla 6.10, nos indican que la velocidad de la separadora y el porcentaje de abertura del exhaustor determinan el flujo de retorno.

TABLA 6.10. Variables seleccionadas por el método de regresión "Paso a paso" para predecir el flujo de retorno al molino

Variables	Símbolo	Unidad	Flujo de Retorno (Ton/h)
Velocidad de la separadora	VS	RPM	3,1039
Abertura del exhaustor	AE	%	-3,1156
Alimentación fresca	F	Ton/h	
$R^2$			0,927

De la Tabla 6.10 se obtiene la siguiente relación matemática:

$$R = 3,1039 \cdot VS - 3,1156 \cdot AE \quad (53)$$

La calidad de ajuste del modelo de regresión da un coeficiente  $R^2$  de 0,927.

Conociendo R y F es posible determinar el flujo de alimentación de la separadora, su eficiencia y obtener la granulometría a la salida del circuito.

#### 6.4. Estudios de Simulación.

Los estudios de simulación fueron realizados para verificar el modelo, por lo que se realizaron cuatro pruebas a diferentes condiciones de operación, con el objetivo de predecir la granulometría del producto.

El muestreo se realizó en los alrededores del molino mientras operaba a una determinada granulometría y flujo de alimentación.

Las condiciones de operación para las cuatro pruebas experimentales se muestran en la Tabla 6.11.

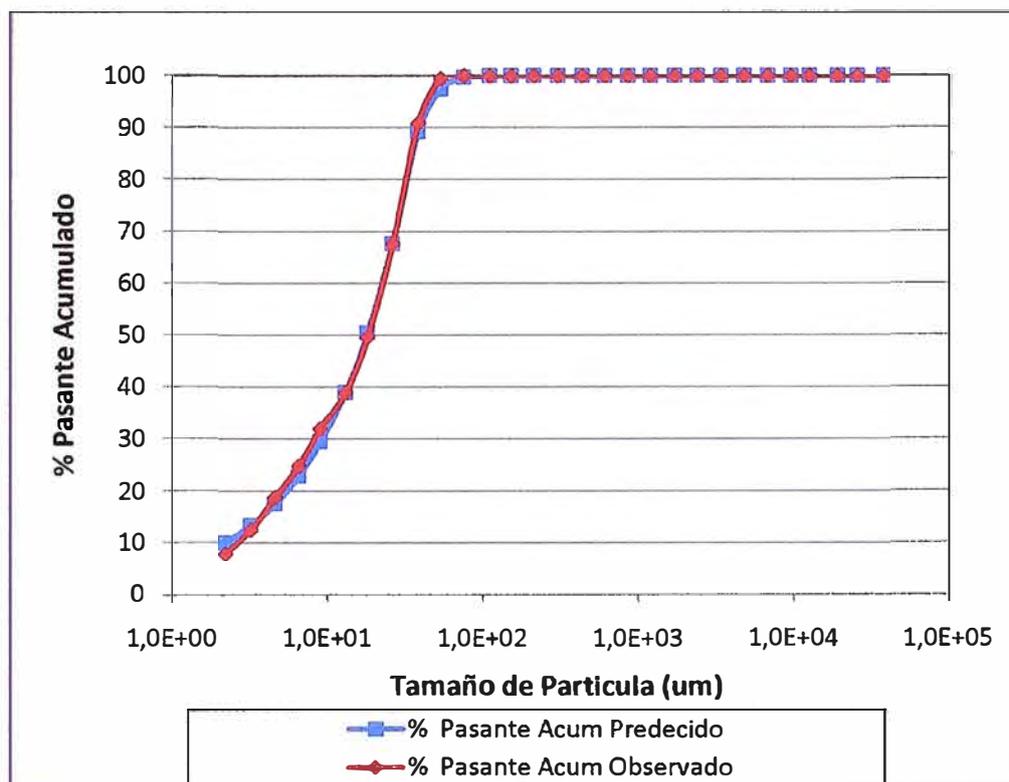
TABLA 6.11. Condiciones de operación para las pruebas realizadas.

	Prueba			
	1	2	3	4
Flujo de Alimentación (ton/h)	85	85	90	100
Velocidad separador (RPM)	155	145	145	165
% Abertura ventilador	90	80	80	90
% Clínger	95,3	95,2	96,0	95,0
% Yeso	4,7	4,8	4,0	5,0
Índice de Trabajo (kwh/ton)	15,02	15,80	15,80	15,80
% Carga de bolas Cámara I :		21		
Cámara II:		19		

#### 6.4.1. Predicción de la distribución granulométrica a la salida del circuito.

Los resultados de la simulación, a la salida del circuito de molienda, se tienen la distribución del tamaño de partícula del cemento a la salida del circuito, como se puede apreciar en la Tabla 6.12. El error máximo es del 0,79% el cual presenta un buen ajuste.

Así mismo en la Gráfica 6.12 se observa la distribución del porcentaje pasante acumulada de los resultados, tanto experimentales (observados), como los predichos de acuerdo al modelo de predicción (predichos).



Gráfica 6.12. %Pasante Acumulado de las partículas Predicho y Observado para la prueba Nro 1.

TABLA 6.12. Comparación del %retenido de los resultados obtenidos de la simulación del circuito de molienda y los resultados experimentales.

Abertura μm	% Retenido observada				%Retenido Predecido				% ERROR			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,25	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
53	0,33	0,47	0,54	2,48	1,53	2,27	1,54	0,21	0,01	0,03	0,01	0,05
38	7,29	8,64	9,11	6,65	7,06	8,32	7,27	3,20	0,00	0,00	0,03	0,12
26	22,70	23,24	22,52	13,10	21,40	21,48	21,58	19,86	0,02	0,03	0,01	0,46
18	18,15	17,93	16,78	18,57	17,86	17,26	17,79	19,52	0,00	0,00	0,01	0,01
13	10,64	10,74	10,37	14,30	11,82	11,40	11,74	13,09	0,01	0,00	0,02	0,01
9	7,19	6,94	6,97	7,89	9,77	9,46	9,69	10,74	0,07	0,06	0,07	0,08
6.5	7,33	7,25	7,11	7,44	6,95	6,73	6,91	7,67	0,00	0,00	0,00	0,00
4.6	6,24	6,02	6,14	6,75	5,48	5,32	5,45	6,01	0,01	0,00	0,00	0,01
3.2	6,75	6,35	6,59	6,66	4,34	4,22	4,32	4,75	0,06	0,05	0,05	0,04
2.2	4,83	4,57	4,76	4,76	3,38	3,28	3,36	3,70	0,02	0,02	0,02	0,01
0	8,55	7,86	9,13	11,41	10,29	10,00	10,23	11,25	0,03	0,05	0,01	0,00
$\Sigma$ %Error=									<b>0,23</b>	<b>0,25</b>	<b>0,24</b>	<b>0,79</b>
% Error máximo =									<b>0,79</b>			

De la distribución granulométrica a la salida del circuito, se obtuvieron los parámetros  $P_{80}$ ,  $P_p$ ,  $\eta$  (ec. 8); también la fracción de tamaños:  $<3 \mu\text{m}$ ,  $3-32 \mu\text{m}$ ,  $3-16 \mu\text{m}$  y  $16-24 \mu\text{m}$ .

Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la Tabla 6.13.

TABLA 6.13. Parámetros de Rosin Rammler y fracción por tamaños obtenidos mediante la Simulación del Circuito de Molienda.

Nro de Prueba	$P_p, \mu\text{m}$	$P_{80}, \mu\text{m}$	$\eta$	$<3 \mu\text{m}$	$3-32 \mu\text{m}$	$3-16 \mu\text{m}$	$16-24 \mu\text{m}$
1	18,632	31,914	1,169	12,919	67,248	34,368	17,289
2	19,762	33,001	1,143	12,551	65,521	33,288	16,829
3	18,697	32,058	1,171	12,852	67,036	34,146	17,248
4	15,447	29,955	1,277	14,126	71,794	37,836	18,403

#### 6.4.2. Predicción de la superficie específica.

La superficie específica (S.E), se determina por medio de la ecuación 50. La Tabla 6.14 muestra los resultados de Blaine observados y predecidos por la simulación del circuito de molienda. El error máximo fue de 4,57 %.

TABLA 6.14. Resultados de la Superficie Específica Observada y Predecida.

Nº Prueba	S.E, $\text{cm}^2/\text{g}$ Observada	S.E, $\text{cm}^2/\text{g}$ Predecida (ec. 50)	% Error
1	3490	3524	0,96
2	3340	3400	1,76
3	3480	3508	0,80
4	3720	3898	4,57

#### 6.4.3. Predicción de la resistencia a la compresión del cemento.

Para la predicción de la resistencia a la compresión del cemento se recurre a las ecuaciones (46), (47), (48) y (49) obtenidas por el análisis de regresión. Para ello se requiere los datos de composición química-mineralógica del cemento,

cuyos resultados experimentales se muestran en la Tabla 6.15, así como también son necesarios los valores de distribución de tamaño de partícula y de fracción de tamaños dados en las Tablas 6.13 y 6.14.

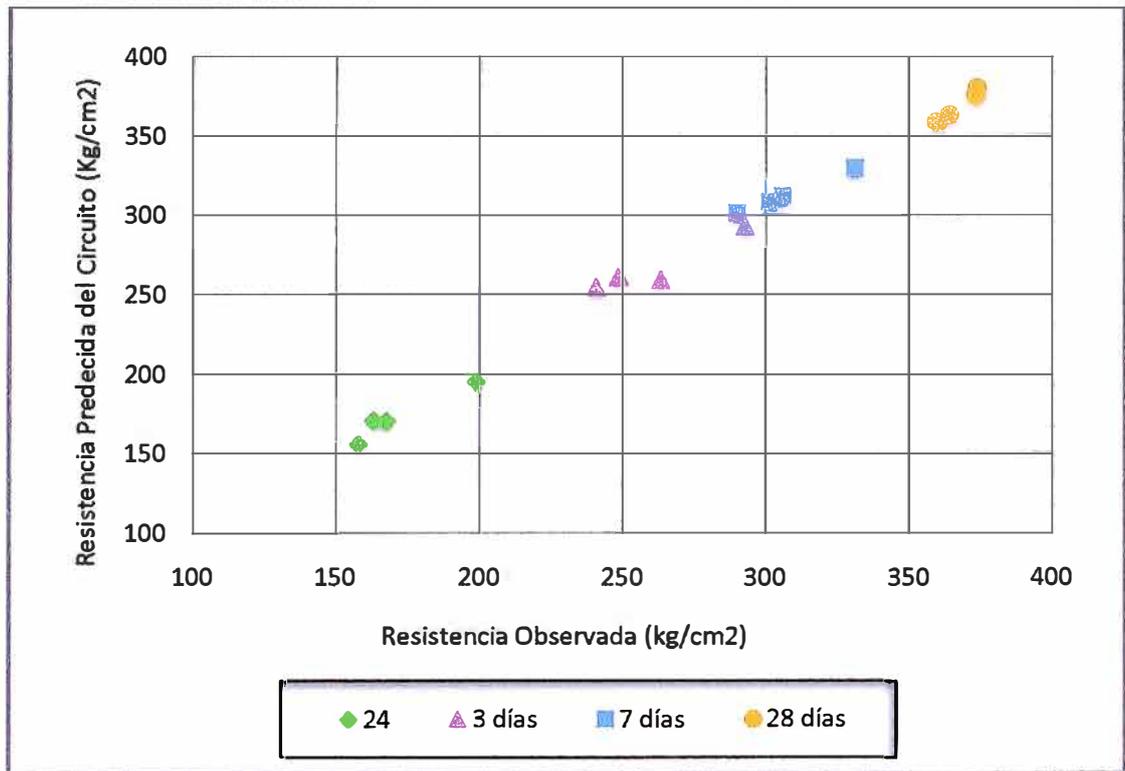
Los resultados obtenidos de la resistencia del cemento observados y predecidos con el modelo se muestran en la Tabla 6.16, como se puede apreciar los errores obtenidos son menores al 4,74%. La regresión de los resultados observados y predecidos se muestra en la Gráfica 6.13.

TABLA 6.15. Variables químicas para la predicción de la Resistencia a la Compresión del Cemento.

Nº Prueba	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	$\frac{C_3S}{C_2S}$	$\frac{C_3A}{C_4FA}$	%LSF	%Na <sub>2</sub> O	%SO <sub>3</sub>	%Cal Libre
1	60,40	11,90	5,08	0,68	98,03	0,25	2,90	0,18
2	64,10	9,00	7,12	0,87	98,46	0,29	2,64	0,24
3	65,10	7,90	8,24	1,39	100,24	0,30	2,91	0,18
4	64,00	6,90	9,28	1,26	99,88	0,32	2,85	0,33

TABLA 6.16. Comparación de resistencia del cemento, de los valores observados y los obtenidos luego de la simulación

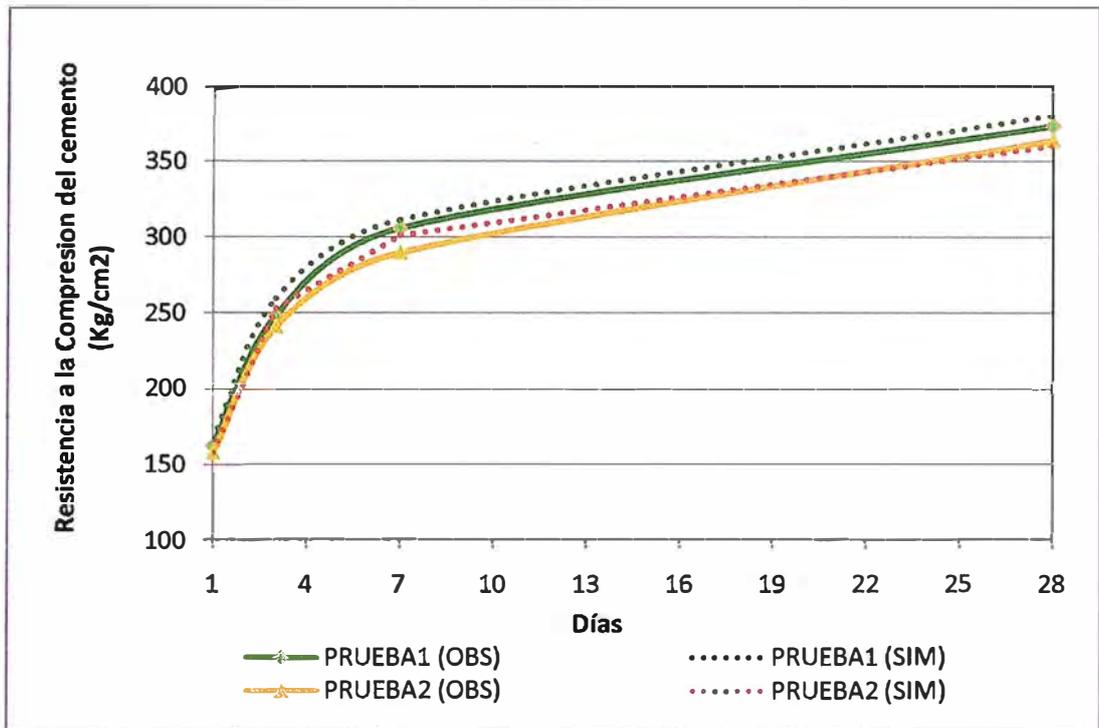
N	Resistencia Observada (kg/cm <sup>2</sup> )				Resistencia Predecida (kg/cm <sup>2</sup> )				%Error			
	24 horas	3 días	7 días	28 días	24 horas	3 días	7 días	28 días	24 horas	3 días	7 días	28 días
1	163,0	248,5	306,0	373,7	167,0	260,0	311,8	380,5	2,40	4,42	1,86	1,79
2	158,0	241,0	290,0	364,3	158,1	253,1	301,4	360,5	0,06	4,74	3,78	1,05
3	167,5	263,5	301,5	359,7	171,0	261,3	308,0	358,8	2,05	0,82	2,11	0,25
4	199,0	293,0	331,0	373,0	193,2	287,6	329,2	376,6	3,00	1,88	0,55	0,96
% Error Máximo =									3,00	4,74	3,78	1,79



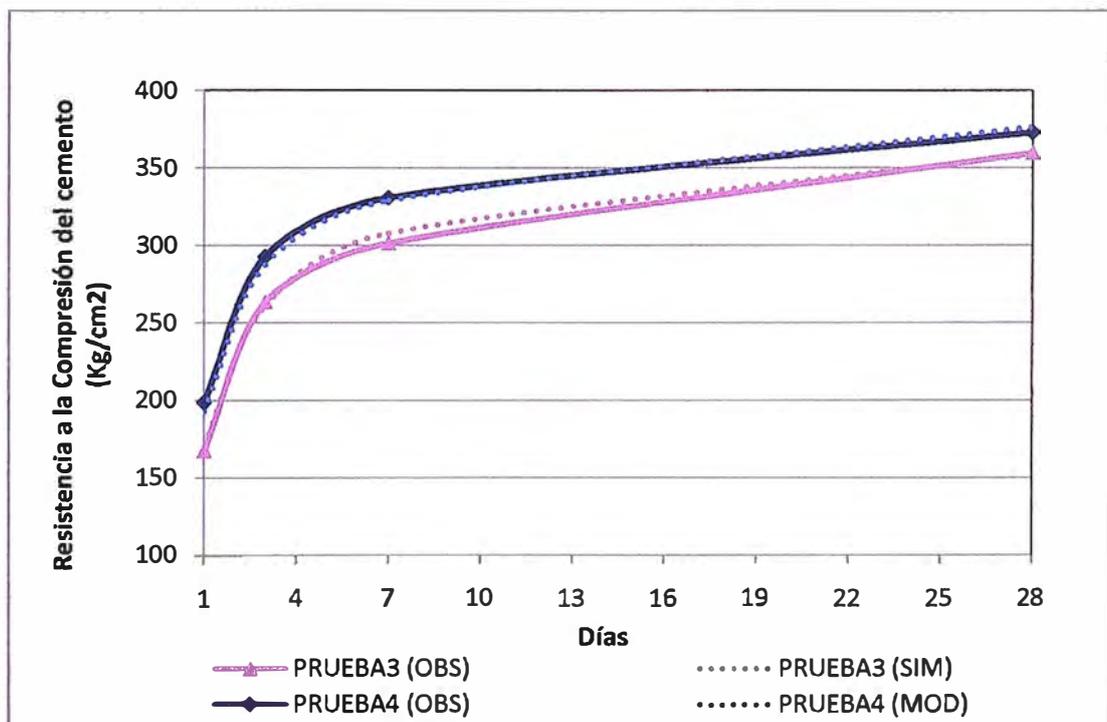
Gráfica 6.13. Regresión para la Resistencia a la Compresión de Cemento observada Vs la predecida a 24 horas, 3, 7 y 28 días.

Así también, al graficar los valores de resistencias observadas y predecidas la calidad de ajuste da un coeficiente  $R^2$  de 0,935; 0,888; 0,998; 0,973 para el modelo de 24 horas, 3, 7 y 28 días, respectivamente.

En la Gráfica 6.14 y 6.15 se puede observar el desarrollo de las resistencias con el transcurso de los días para las Pruebas 1-2 y 3-4, respectivamente; las líneas continuas son los resultados experimentales y las líneas punteadas son los resultados obtenidos con el modelo matemático.



Gráfica 6.14. Desarrollo de la Resistencia a la Compresión de Cemento observada y simulada para la prueba N° 1 y 2.



Gráfica 6.15. Desarrollo de la Resistencia a la Compresión de Cemento observada y simulada para la prueba N° 3 y 4.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

1. Este proyecto resalta la importancia de predecir la resistencia a la compresión del cemento a edades tempranas y tardías, para lo cual se hace uso del modelo matemático predice a partir del circuito de molienda sobre la base a la distribución del tamaño de partícula del material para lo cual tiene un error máximo del 4,74 %.
2. El estudio realizado en este proyecto corrobora que tamaños de partículas en el rango de: <3  $\mu\text{m}$ , 3-16  $\mu\text{m}$ , 3-32  $\mu\text{m}$  y 16-24  $\mu\text{m}$ , tiene alta incidencia en la resistencia a la compresión del cemento a diferentes edades.
3. La correlación establecida a través de la modelación estadística demuestra que está de acuerdo a los principios establecidos en la química de cemento.
4. La aproximación al Modelo de Mezcla Perfecta, para la simulación del molino, operando en circuito cerrado con la separadora, tiene un error máximo de 0,79%, lo que demuestra ser adecuado para la molienda de clínker de cemento. La completa verificación de este modelo será posible mediante un detallado muestreo, así como un análisis de datos en un amplio rango de trabajo.
5. El modelo desarrollado para el diafragma del molino, se realizó a una determinada condición de operación. Sin embargo, para ser usada en propósitos de optimización debería realizarse pruebas más rigurosas en las que el molino trabaje en un amplio rango de operación y se evalúe, además, el efecto de la succión de aire dentro del mismo. En cuanto al ciclón estático y a los multiciclones que se encuentran en serie con la separadora, es posible determinar la eficiencia de separación para cada uno de ellos, si se realiza un muestreo detallado en el circuito de molienda, permitiendo así, realizar un

balance de masa certero para conocer todos los flujos dentro del circuito de molienda.

6. Un trabajo muy interesante sería predecir la resistencia del cemento a través del Modelo Cinético para procesos continuo, que involucra el estudio de tiempos de residencia del material dentro del molino, para compararlo con los resultados obtenidos con el Modelo de Mezcla Perfecta.
7. Para la predicción de la resistencia del cemento, el presente proyecto centralizó su enfoque, en la distribución del tamaño de partículas y la fineza del cemento; sin embargo, la composición química – mineralógica es un factor difícil de desligar, ya que como se observó en el modelo para la predicción de las resistencias, esta afecta considerablemente. Por lo expuesto, los trabajos posteriores deberían predecir la resistencia conociendo la granulometría del clínker, la composición química, y las condiciones de operación; por lo que deberían validarse los resultados obtenidos por balance de masa y los obtenidos experimentalmente, para encontrar, una relación entre la entrada y salida de los componentes químicos; y de esa manera predecir la resistencia en forma precisa desde la etapa de molienda, lo que representaría una enorme ventaja en el control de calidad del producto.
8. La solidez del modelo para la predicción de la resistencia refleja que la utilización de modelos estadísticos de regresión puede ser utilizada para estos propósitos.
9. Las relaciones obtenidas para modelos de molienda y de clasificación en un amplio rango de operación, serán útiles para optimizar el circuito de molienda por simulación, permitiendo de esta manera que el desempeño del modelo sea expresado en términos de criterios significativos tales como la resistencia, o indicadores comúnmente usados tales como la superficie específica o la distribución de tamaño de partículas.

# **APÉNDICES**

**APÉNDICE A**  
**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TRABAJO**

## MÉTODO PARA LA DETERMINACION DEL ÍNDICE DE TRABAJO ( $W_i$ )

La prueba estándar de moliendabilidad de Bond (Bond 1961), es un proceso de molienda en seco y tamizado, el cual es continuado hasta conseguir el estado estable. Se simula un circuito cerrado de molienda – clasificación, asumiendo una carga circulante del 250%.

### A.1. Equipo

La prueba se desarrollada en un molino de bolas especial al cual se le denomina Molino de Bond. Las dimensiones del molino es de 30,5 tanto de largo y diámetro. Es operado a 77 RPM y está equipado por un contador de revoluciones. La carga de bolas consiste de 285 piezas de bolas de acero pesando alrededor de 19,947 kg y distribución de bolas de acuerdo a la Tabla A.1.

TABLA A.1. Distribución de carga de bolas, peso, tamaño, según Bond.

Diámetro de la bola	Número de bolas	Peso unitario	Peso bolas	% Peso de bolas	Rango de peso
pulgadas	Unidades	g	g	%	g
1 ½	25	219,6	5489,6	45,86	211,50 - 229,10
1 ¼	39	129,7	5057,8	27,08	124,20 – 129,90
1	60	64,3	3855,5	13,42	62,30 – 67,50
7/8	68	39,2	2664,1	8,18	36,00 – 42,50
3/4	93	26,1	2430,6	5,46	25,40 – 27,40
TOTAL	285	478,8	19497,6	100	

### A.2. Preparación de la muestra.

- El alimento de las pruebas es un material reducido a –M6. Es recomendable preparar para la prueba cerca de 8 a 10 kg de muestra.
- Al mineral preparado se le efectúa un análisis granulométrico para obtener el % de finos en la malla de corte y calcular el  $F_{80}$ .
- El Índice de trabajo puede ser determinado para cualquier malla (que cierre el circuito) pero usualmente se emplean las mallas 100 ó 200. Esto, debido a que a tamaños más finos se presenta dificultades en el tamizado en seco.

Un material con excesiva cantidad de finos en el alimento fresco prolonga la cantidad de ciclos necesarios para alcanzar el estado estacionario.

- La malla de corte utilizada en el presente estudio es M-200.

### A.3. Procedimiento.

- El peso de un volumen de 700 cm<sup>3</sup> de muestra, constituye el alimento inicial del molino y este peso es mantenido a través de toda la prueba.
- La prueba se inicia moliendo la muestra a 100 revoluciones, el producto molido se descarga, luego, es tamizado en seco en la malla de corte seleccionada. Se pesa y retira el pasante M-200 y seguidamente se adiciona muestra de alimentación fresca al retenido obtenido para mantener el peso inicial.
- Se continúa moliendo por un número de revoluciones calculado para producir 250% de carga circulante (equivalente a 1/3,5 veces el peso total de la muestra alimentada), repitiendo dicho procedimiento hasta alcanzar las condiciones de equilibrio (De 6 a 11 ciclos de molienda).
- Una vez alcanzado el equilibrio, se analiza granulométricamente el pasante del tamiza M-200 (producto final del circuito de molienda) y se calcula el P80. El índice de moliendabilidad de la muestra **G<sub>pb</sub>** (gramos de fino obtenido por revolución), se obtiene promediando los tres últimos valores
- El  $W_i$  es evaluado usando la siguiente ecuación empírica revisada por Bond en 1960.

$$W_i = \frac{44.5}{P_{100}^{0.23} G_{pb}^{0.82} \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (\text{a.1})$$

Donde:

$W_i$ : Índice de trabajo del material (kwh /ton).

$P_{100}$ : Abertura en micrones de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito (Tamaño 100% pasante del producto).

$G_{pb}$ : Índice de moliendabilidad del material en el molino de bolas (g/rev).

$F_{80}$ : Tamaño 80% pasante de la alimentación fresca al circuito (μm).

$P_{80}$ : Tamaño 80% pasante del producto final del circuito (μm).

De lo anterior se concluye que para medir el consumo energético en un sistema de reducción de tamaño por molienda, se deben tomar los valores de  $F_{80}$  y  $P_{80}$  a ser aplicados en la fórmula de Bond de los flujos de entrada y de salida del reactor (Véase Figura A.1).

Para la prueba estándar de moliendabilidad de Bond el clasificador lo constituye un tamiz de corte como se muestra en la Figura 26, en donde se simula un circuito con 250% de carga circulante.

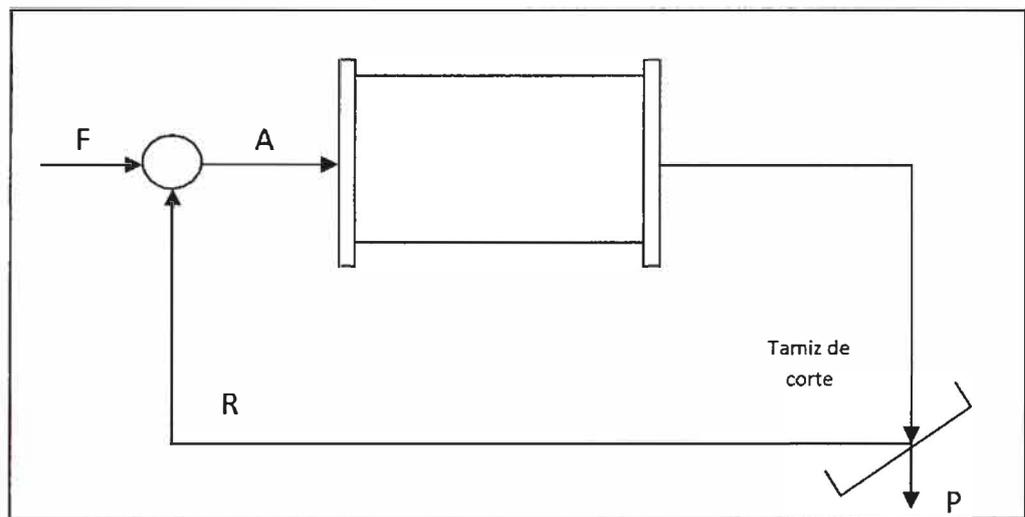


Figura A.1. Prueba estándar de la Moliendabilidad de Bond.

#### **A.4. Balances del Esquema de Simulación del circuito cerrado de molienda.**

De la figura B.1:

**A:** Alimentación total (peso total de 700 cm<sup>3</sup> de muestra).

**F:** Alimentación fresca.

**P:** Productos finos.

**R:** Retorno, carga circulante.

**$N_{REV}$**  = Número de revoluciones del molino para producir un producto calculado.

**Tamiz de corte:** M200

**% $f_1$**  = Fracción menor que la abertura del tamiz de corte en la alimentación fresca.

$$P_i = -M200$$

Fracción de carga circulante: **CC = 2.5**

Volumen de la Carga =  $700\text{cm}^3 = 0,7 \text{ L}$

$$\text{Balance Global: } F = P. \quad (\text{a.2})$$

$$\text{Alimentación Molino: } A = (\text{Gravedad específica}) \times 0,7 \quad (\text{a.3})$$

$$\text{Alimentación Fresca o Producto deseado: } F = \frac{A}{3,5} \quad (\text{a.4})$$

$$\text{Finos producidos por revolución: } PNR = \frac{(P_i - \%f_1 P_{i-1})}{N_{REV(i)}} \quad (\text{a.5})$$

$$\text{Número de revoluciones: } N_{REV(i+1)} = \frac{[F - (\%f_1 P_{i+1})]}{(N_{REV(i)})} \quad (\text{a.6})$$

#### **A.5. Tabulaciones de datos y cálculos.**

1. Se determinó la granulometría del alimento fresco del molino (-M6), para determinar  $F_{80}$ , esto se muestra en la Tabla A.2.

Haciendo una extrapolación de los datos se tiene:  $F_{80} = 2613,68 \mu\text{m}$ .

% finos en el tamiz de corte (M200),  $\% f_1 = 6,78$  (Tabla A.2)

2. Para determina la cantidad en gramos que ingresa al molino (ecuación a.3), y la alimentación fresca (ecuación a.4), tenemos

**Volumen:**  $700 \text{ cm}^3 = 0,7 \text{ L}$ . (Según Bond)

**Muestra alimentada:**  $(1\ 510,2 \text{ g/L}) (0,7 \text{ L}) = 1\ 057,14 \text{ g}$ .

**Alimentación Fresca o Producto potencial Ideal:**  $F = \frac{1\ 057,14}{3,5} = 302,04$ .

TABLA A.2. %Pasante Acumulado de la muestra – M6, para determinar  $F_{80}$ 

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
8	2 360	29,95	29,95	70,05
10	2 000	14,12	44,07	55,93
12	1 700	10,40	54,46	45,54
14	1 400	6,79	61,25	38,75
16	1 180	4,43	65,68	34,32
18	1 000	3,61	69,29	30,71
20	850	2,65	71,94	28,06
30	600	4,25	76,19	23,81
40	425	3,82	80,01	19,99
50	300	3,32	83,33	16,67
100	150	5,77	89,10	10,90
200	75	4,12	93,22	6,78
-200	0	<b>6,78</b>	100,00	0,00
		<b>100</b>		

3. La Tabla A.4. se divide en dos partes; la primera permite visualizar las características del mineral, y la segunda muestra los datos experimentales y el proceso de cálculo, el cual se describirá a continuación:

- ✓ Anotar el número de ciclos en la columna 1.
- ✓ Anotar el número de revoluciones que dará el molino en el correspondiente ciclo en la columna 2. En el caso de no contar con un contador de revoluciones, se anotará el tiempo de molienda equivalente, en la columna 3.
- ✓ Anotar el peso de material fresco agregado en la columna 4, y sus componentes en el tamiz de corte +M200 y –M200 en la columna 5 y 6 respectivamente.

**Columna 4:** 1 057,14.

**Columna 5:**  $1\ 057,14 - 71,69 = 985,45$ .

**Columna 6:**  $6,78\% \times 1\ 057,14 = 71,69$ .

- ✓ La cantidad de material que se obtiene luego de la molienda de 100 REV, PESO PRODUCTO +M200 se anota en la columna 7.

**Columna 7:** 897,5.

Se calcula a continuación el producto –M200, pues de este modo se asumen las perdidas del material en el manipuleo de esta fracción y se anota en la columna 8.

**Columna 8:**  $1\ 057,14 - 897,5 = 159,64$ .

- ✓ La molienda neta del ciclo o la diferencia del –M200 del Peso Producto con el alimento fresco –M200, se anota en la columna 9 y la moliendabilidad o gramos producidos por revolución (Molienda neta entre revoluciones en ese ciclo) en la columna 10.

Molienda Neta = Columna 8 - Columna 6

Molienda Neta =  $159,64 - 71,69 = 87,95$

$$G_{pb} = \frac{\text{Molienda Neta}}{N^{\circ} \text{ revoluciones}} = \frac{87,95}{100} = 0,8795$$

- ✓ La carga circulante se obtiene de la relación entre +M200 Peso Producto y el –M200 Peso Producto (Columna 7/ Columna 8), se anota en la columna 11.

$$\frac{897,5}{159,64} = 562$$

- ✓ El número de revoluciones necesarias para producir la cantidad de material –M200, se calcula del modo siguiente:

- El valor de la columna 8, será en el siguiente ciclo de la columna 4 (por balance establecido anteriormente, ecuación a.2), este es el alimento fresco:

**Columna 4** (ciclo i+1) =Columna 8 (ciclo i)

**Columna 4** (ciclo 2) = 159,64

- Se procede a calcular los componentes para la columna 5 y 6.

**Columna 6** (ciclo 2) = 6,78% x columna 4

**Columna 6** (ciclo 2) = 6,78% x 159,64 = 10,82

**Columna 5** (ciclo 2) = 159,64 – 10,82 = 148,82

- El número de revoluciones está dada por la ecuación a.6.

$$N_{REV(i+1)} = \frac{[F - (\%f_1 P_{i+1})]}{(N_{REV(i)})}$$

$$N_{REV} = \frac{(302,04 - (\frac{6,78}{100}) 159,64)}{0,8794} = 331$$

- ✓ Finaliza el cálculo cuando las revoluciones por segundo Gpb ó PNR alcanza un valor máximo y se promedia los tres últimos valores.

4. La granulometría del producto final obtenido de la última molienda se muestra en la Tabla A.3.

TABLA A.3. %Pasante Acumulado del producto final, para determinar  $P_{80}$ .

Malla	Abertura $\mu\text{m}$	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
100	150	0,0350	0,04	99,97
170	90	0,0086	0,12	99,88
200	75	0,2254	2,38	97,63
230	63	1,4694	17,07	82,93
325	45	5,1280	68,35	31,65
-325	0	3,1650	100,00	0,00

Haciendo una interpolación de los datos se tiene:  $P_{80} = 61,97 \mu\text{m}$ .

5. Con ayuda de la ecuación a.1. se determina el índice de trabajo.

TABLA A.4. Determinacion del Indice de Trabajo

**CARACTERISTICAS DEL MINERAL**

**MUESTRA:** CLINKER

**PROCEDENCIA:** CEMENTOS LIMA

Malla de Referencia (um) = 75

F<sub>80</sub> = 2613,68

P<sub>80</sub> = 61,97

Gravedad Especifica (g/cm<sup>3</sup>) = 1,510      Producto deseado (g) = 302,04

Volumen de la muestra (cm<sup>3</sup>) = 700

Muestra alimentada (g) = 1057,14

% finos (M200) = 6,78%

CICLO Nº	MOLIENDA		PESO DE ALIMENTO FRESCA			PESO PRODUCTO		MOLIENDA NETA		CARGA CIRCULANTE
	Nº REV	TIEMPO	PESO TOTAL	+ M200	- M200	+ M200	- M200	- M200	PNR	
1	100	-	1057,14	985,45	71,69	897,5	159,64	87,95	0,8795	562
2	331	-	159,64	148,82	10,82	792,0	265,14	254,32	0,7681	299
3	370	-	265,14	247,16	17,98	719,1	338,04	320,06	0,8654	213
4	323	-	338,04	315,12	22,92	730,7	326,44	303,52	0,9410	224
5	297	-	326,44	304,31	22,13	757,3	299,84	277,71	0,9337	253
6	302	-	299,84	279,51	20,33	747,8	309,34	289,01	0,9578	242
7	293	-	309,34	288,37	20,97	754,9	302,24	281,27	0,9585	250
8	294	-	302,24	281,75	20,49	749,7	307,44	286,95	0,9769	244
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

PNR (250% CC) =	0,9644	PNR
Índice de Dureza (Wi)=	15,8018	kw-h/ton

APÉNDICE B  
CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA FUNCIÓN DE  
FRACTURA

## DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE FRACTURA $b_{ij}$ .

### B.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE MOLINOS ROTATORIOS DE BOLAS.

El molino rotatorio de bolas contiene una masa de polvo que está siendo fracturada y la fineza de la molienda depende de cuánto tiempo el material permanece retenido.

Se define como velocidad crítica del molino a la velocidad de rotación a la cual las bolas empiezan a centrifugar en las paredes del molino y no son proyectadas en el interior del molino. Haciendo balance entre la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga sobre una bola en la pared del molino, la velocidad crítica resulta ser:

$$N_c = \frac{42,2}{\sqrt{D-d}} \quad (\text{b.1})$$

Donde:

$D$ , es el diámetro interno del molino (m).

$d$ , es el diámetro máximo de las bolas (m).

$N_c$ : Velocidad Crítica (RPM).

Es razonable esperar que el movimiento de volteo de la carga en un molino dependa de la fracción de velocidad crítica a la cual el molino opera, de tal manera que la velocidad de rotación de éste normalmente se especifica por medio de  $\varphi_c$ , la fracción de la velocidad crítica.

La acción de volteo de la carga y las velocidades de ruptura dependerá claramente de qué proporción del volumen del molino está lleno con bolas. La medida más precisa de esto es la fracción de volumen ocupado por las bolas. Sin embargo, en ensayos en molinos de gran tamaño, a menudo no es posible determinar su volumen, pero si es posible parar el molino, lo que permite la estimación de la fracción del volumen que está lleno con el lecho de las bolas. Por lo tanto la *Fracción de llenado* con bolas,  $J$ , se expresa, convencionalmente, como la fracción del molino lleno por el lecho de bolas en el reposo.

$$J = \left( \frac{\text{Masa de bolas} / \text{densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} \right) \cdot \left( \frac{1.0}{1 - \text{Porosidad del lecho}} \right) \quad (\text{b.2})$$

Para bolas de acero forjado de tipo normal, la porosidad es de 0,4.

$$J = \left( \frac{\text{Masa de bolas} / \text{densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} \right) \cdot \left( \frac{1,0}{0,6} \right) \quad (\text{b.3})$$

Similarmente, la carga de polvo de un molino se expresa como la fracción del volumen del molino ocupada por el lecho de polvo,  $f_c$ , se representa:

$$f_c = \left( \frac{\text{Masa del polvo} / \text{densidad del polvo}}{\text{volumen del molino}} \right) \quad (\text{b.4})$$

A fin de relacionar la carga de polvo con la carga de bolas, el volumen aparente de la carga de polvo se compara con la porosidad nominal del lecho de bolas mediante la variable  $U$ , que expresa la fracción de huecos entre las bolas en reposo ocupada por el lecho de partículas.

$$U = \frac{f_c}{0,4 J} \quad (\text{b.5})$$

### B.1.1. Condiciones de operación para el desarrollo experimental.

Las descripciones del molino así como la de los cuerpos moledores se muestran en la Tabla B.1

TABLA B.1. Descripción técnica del molino, cuerpos moledores y material

<b>Molinos</b>	Diámetro (D)= 30,48 cm Longitud (L) = 30,48 cm Volumen (V) = 22240,1 cm <sup>3</sup>
<b>Cuerpos moledores</b>	Diámetro (d) = 2,92 cm. Número de bolas = 200 Peso promedio de las bolas = 101.25 g Gravedad específica = 7,27 Material = Acero.
<b>Material</b>	Densidad Aparente: 1,32 g/cm <sup>3</sup> . Peso de la muestra: 1200 g

- **Velocidad del molino.**

Velocidad crítica  $N_c$  (ecuación b.1)

$$N_c = \frac{42,2}{\sqrt{0,3048 - 0,0292}} = 81 \text{ RPM}$$

Velocidad operacional: 77 RPM

% de Velocidad Crítica.

$$\% \text{ velocidad crítica} = \frac{77}{100} \cdot 81 = 96\%$$

- **Volumen de llenado de las bolas (J):** (ecuación b.3)

$$J = \left( \frac{101,25 / 7,27}{2 \cdot 2240,1} \right) \cdot \left( \frac{1,0}{0,6} \right) \cdot 100 = 20,88$$

- **Volumen de llenado del material  $f_c$ :** (ecuación b.4)

$$f_c = \left( \frac{1200 / 1,32}{2 \cdot 2240,1} \right) \cdot 100 = 4,07$$

- **Relación de llenado material / llenado de bolas:** (ecuación b.5)

$$U = \frac{4,07}{0,4 (20,88)} \cdot 100 = 48,78$$

## **D.2. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE FRACTURA MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO.**

La Función de Distribución de Fractura es determinada midiendo la distribución de tamaño del material fracturado después de un periodo corto de molienda. Idealmente, la distribución debería ser realizada con poco porcentaje de material fracturado. Sin embargo, tener una pequeña cantidad de material aumentaría el error de tamizado y es aconsejable determinar el  $B_{ij}$  cuando un 20 - 30% del

material haya sido fracturado. Por razones prácticas se toma un estándar de 30 - 40% de material fracturado.

### **B.2.1. Preparación de la muestra.**

Las muestras a utilizar deben ser de un monotamaño predefinido, entendiéndose como monotamaño a las partículas pasantes de la malla  $X_i$  y retenidas en la malla  $X_{i+1}$ .

### **B.2.2. Procedimiento.**

Una vez que la muestra de este material haya sido preparada y sometida a una prueba de tamizado en "blanco" para determinar su distribución granulométrica, se llena la carga de bolas y el material deseado al molino en un tiempo corto de tiempo. Luego, el contenido del molino se muestrea, efectuándose un análisis granulométrico de la muestra en tamices de la serie  $\sqrt{2}$ .

La experiencia sugiere que se puede obtener buenos resultados cuando se selecciona el tiempo de molienda en forma tal que la cantidad de material de tamaño  $X_i$  molido sea aproximadamente un 30% a 40% del total.

### **B.2.3. Técnicas de cálculo**

Por definición de los valores B, estos son deducidos de la distribución granulométrica para tiempos cortos de molienda, cuando la carga del molino está constituida predominantemente por el tamaño  $x_i$  y solamente cantidades menores de tamaño más pequeño. Así se asegura que no estén triturados. Sin embargo, en estas condiciones de molienda es seguro que ha habido un cierto grado de refractura y, por lo tanto, es necesario introducir una corrección. Una técnica de cálculo es la proporcionada por *Austin* [4] denominada Método BI, consiste en medir distribuciones granulométricas en función del tiempo y extrapolar para tiempos cercanos a cero. Entonces por definición los valores de B se calculan en la forma:

$$\text{Método BI: } b_{2,1} \sim \frac{\text{peso que llega al tamaño 2, para } t \rightarrow 0}{\text{peso eliminado de tamaño 1, para } t \rightarrow 0} \quad \dots(\text{b.6})$$

Desafortunadamente, es difícil obtener distribuciones granulométricas correctas para pequeñas grados de fractura y resulta tedioso hacer pruebas cuidadosas a varios tiempos cortos para permitir una extrapolación a tiempo cercana a cero. La extrapolación a tiempo cero desde tiempos más largos está sujeta a errores sistemáticos grandes, incluso cuando  $P(X_i, t)$  versus  $t$  parece ser lineal a tiempos grandes.

Para corregir por la fractura secundaria se utiliza un segundo método, denominado Método BII. [4]

$$B_{ij} = \frac{\text{Log} \left[ \frac{1-P_i(0)}{1-P_i(t)} \right]}{\text{Log} \left[ \frac{1-P_{j+1}(0)}{1-P_{j+1}(t)} \right]} \quad \dots(\text{b.7})$$

Los valores de B son descritos por Austin y Luckie [4] como la suma de dos funciones de potencia:

$$B_{ij} = \Phi \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\gamma + (1 - \Phi) \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\beta \quad n \leq i \quad \dots(\text{b.8})$$

Donde  $\phi$  es la intercepción de la muestra en la Figura B.1 y  $\gamma$  es la pendiente de la parte fina de la distribución. Como  $\gamma$  y  $\phi$  son estimados del diagrama, el último término del lado derecho de la ecuación (b.8) se calcula y grafica para dar valores de  $\beta$ .

Por medio de la ecuación (B.8), se determina todos los valores  $B_{i1}$ , y se ubican los puntos en una grafica como la que se muestra en la Figura B.1. De esta se observa que los puntos ubicados entre 0,04 - 0,3 de la relación  $X_i/X_j$ , se traza una recta tangente, cuya pendiente es el valor de  $\gamma$ , y el intercepto con  $X_i/X_j = 1$  nos da el valor de  $\phi$ . De los puntos ubicados en el otro extremo se traza una recta tangente cuya pendiente nos dará el valor de  $\beta$ .

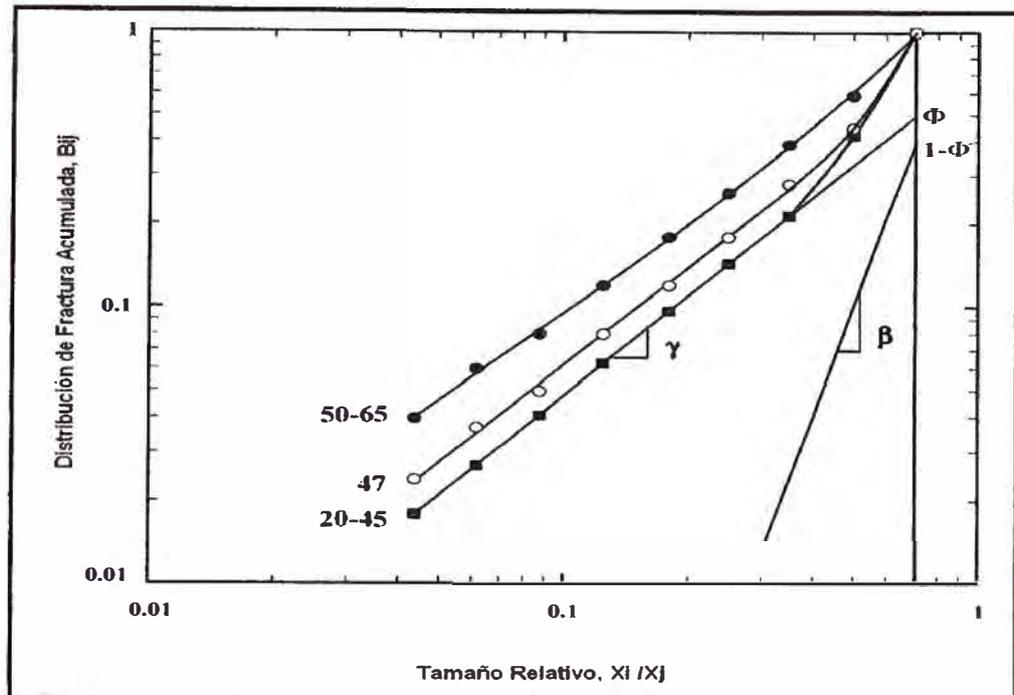


Figura B.1. Gráfica Típica de la función de distribución de fractura

#### B.2.4. Cálculos.

En la Tabla B.2 se muestran los cálculos para determinar Bi1.

**Muestra:** Clínker Tipo I

**Monotamaño:** 20/30. **Tiempo de molienda:** 0,5 min.

TABLA B.2. Cálculo para determinar Bi1, bi1

Malla		$\frac{X_{i-1}}{X_j}$	% Pasante P(t=0)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado	Bi1	bi1
850	600	-	100%	0,0%	0,0%	100,0%	1	0,000
600	425	0,71	1%	62,7%	62,7%	37,3%	1	0,522
425	300	0,50	0	17,7%	80,4%	19,6%	0,478	0,211
300	212	0,35	0	8,1%	88,5%	11,5%	0,267	0,089
212	150	0,25	0	3,7%	92,2%	7,8%	0,178	0,035
150	106	0,18	0	1,5%	93,7%	6,3%	0,143	0,036
106	75	0,13	0	1,5%	95,2%	4,8%	0,107	0,024
75	53	0,09	0	1,0%	96,3%	3,7%	0,083	0,022
53	45	0,08	0	1,0%	97,2%	2,8%	0,062	0,011
45	0	0,00	0	0,5%	97,7%	2,3%	0,051	0,051
				2,3%	100%	0,0%	0,000	0,000
1		2	3	4	5	6	7	8

De los datos de la Tabla B.2, en la **columna 1** se encuentra el rango de tamaño de las partículas, en la **columna 3** para  $t = 0$  el material es menor de  $850 \mu\text{m}$  y mayor de  $600 \mu\text{m}$  (monotamaño elegido) por lo que  $P_1(0) = 100\%$ , para  $P_2(0)$  es la fracción del material en el segundo intervalo antes de la molienda, y es un valor muy pequeño. Este valor es un error de tamizado y se asume que es igual al 1%. Los demás valores de  $P_i(0)$  deberían ser cero. De la **columna 4**, se obtienen los porcentajes de material retenido para  $t = 0,5$  min, la **columna 6** muestra que  $P_2(t = 0,5 \text{ min})$  es el porcentaje acumulado del tamaño más grande del segundo intervalo después de 0,5 min de molienda y es igual a 37,3%. De manera similar en el tercer intervalo,  $P_3(0,5) = 19,6\%$ .

El primer termino  $B_{11}$  es igual a 1 por definición, porque cuando una partícula se rompe se asume que se fragmenta en tamaños más pequeños.

$$B_{31} = \frac{\text{LOG} \left[ \frac{(1-0)}{(1-0,196)} \right]}{\text{LOG} \left[ \frac{(1-0,01)}{(1-0,373)} \right]} = 0,478 \quad B_{41} = \frac{\text{LOG} \left[ \frac{(1-0)}{(1-0,115)} \right]}{\text{LOG} \left[ \frac{(1-0,01)}{(1-0,373)} \right]} = 0,267 \quad (20)$$

De la ecuación (20)

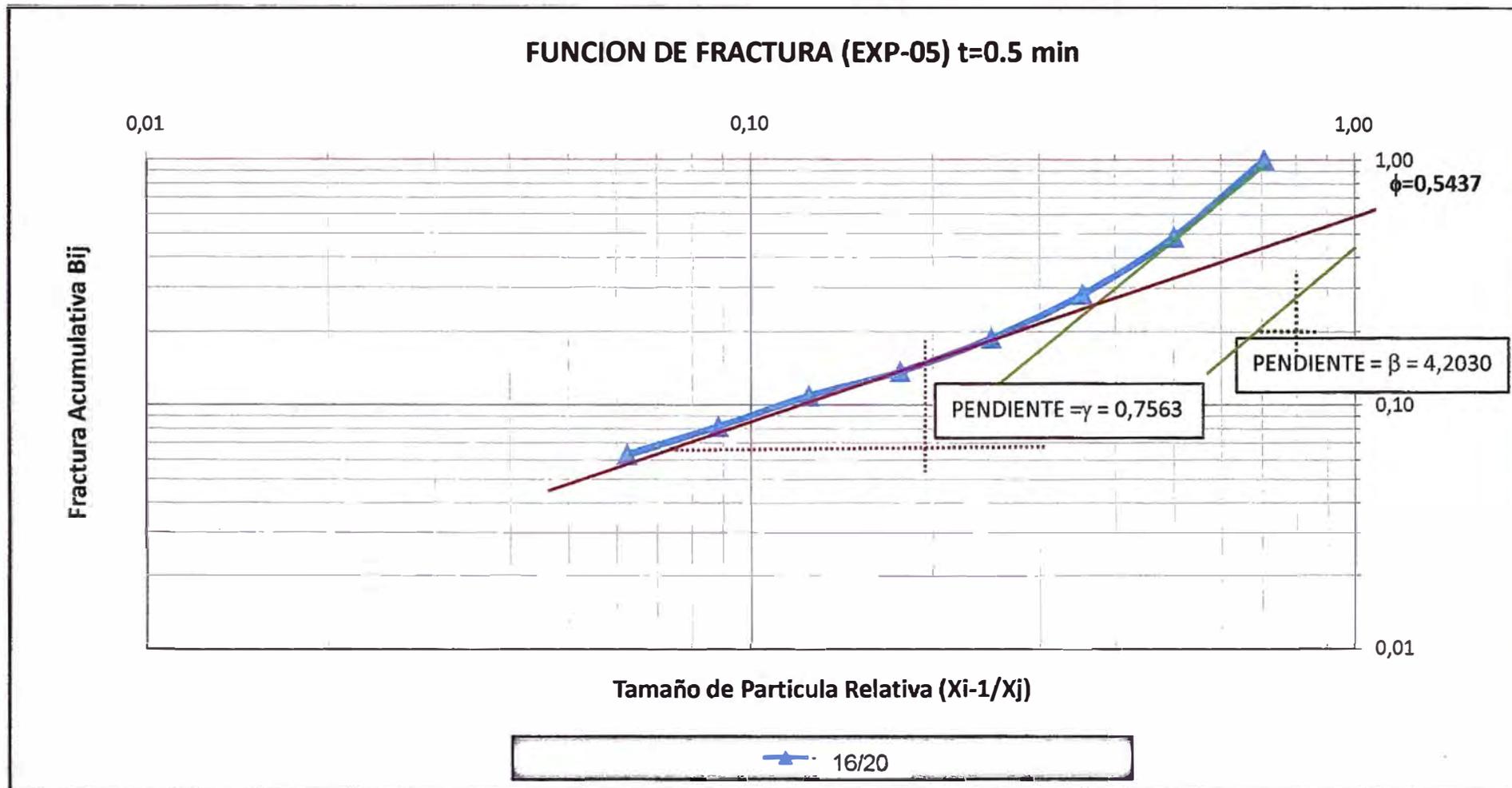
$$b_{31} = B_{31} - B_{41} = 0,478 - 0,267 = 0,211$$

Calculado los valores de  $B_{i1}$  se procede a graficar y son ajustados a la ecuación (b.8), para determinar los valores de los parámetros  $\beta, \gamma$ , y  $\phi$ . Estos parámetros son determinados gráficamente como se indica en la Gráfica B.1. Los parámetros obtenidos para el clínker son:

$$\gamma = 0,7563; \beta = 4,2030; \phi = 0,5437$$

### B.3. Determinación de la Matriz de distribución de fractura $B_{ij}$ , $b_{ij}$ .

La Función de Distribución Normalizada  $B_{ij}$  ecuación b.8 puede utilizarse con los parámetros  $\gamma, \beta, \text{y } \phi$  determinados anteriormente, así los cálculos se muestran en la Tabla B.3.



Gráfica B.1. Función de Distribución Acumulada de fractura Vs tamaño relativo de partícula para monotamaños 16/20

Las pruebas experimentales se hicieron para un rango de 0 a 850  $\mu\text{m}$ , sin embargo por medio de la ecuación b.8 se pudo ampliar hasta 53 033 micras.

De la Tabla B.3 podemos observar que la **columna 1** muestra el rango de tamaños de partícula. La **columna 2**, muestra la relación del tamaño de partícula que se fractura con respecto a  $X_j = 37500 \mu\text{m}$  ( $X_{i-1}/X_j$ ).

La **columna 3** calcula el vector  $B_{i1}$  de distribución acumulada de fractura, mediante las siguientes consideraciones:

Para  $i=j$ ,  $B_{ij} = 1$ .

Para  $i \neq j$ ;  $B_{ij}$  (ecuación b.8)

$$B_{ij} = \Phi \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\gamma + (1 - \Phi) \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\beta$$

Por tanto:

$$B_{11} = 1$$

$$B_{12} = 0,5437 \left( \frac{37\,500}{37\,500} \right)^{0,7562} + (1 - 0,5437) \left( \frac{37\,500}{37\,500} \right)^{4,2030} = 1$$

$$B_{13} = 0,5437 \left( \frac{25\,400}{37\,500} \right)^{0,7562} + (1 - 0,5437) \left( \frac{25\,400}{37\,500} \right)^{4,2030} = 0,4937$$

La **columna 4** calcula el vector  $b_{i1}$  de distribución de fractura, mediante la siguiente consideración:

$$b_{11} = B_{11} - B_{21} = 1 - 1 = 0$$

$$b_{21} = B_{21} - B_{31} = 1 - 0,4937 = 0,5063$$

$$b_{31} = B_{31} - B_{41} = 0,4937 - 0,267 = 0,1424$$

Los vectores  $B_{i2}$ ,  $B_{i3}$ ,... pueden ser determinados de la misma manera obteniendo la matriz de distribución acumulada que se muestra en la Tabla B.4. Así también, la Tabla B.5 muestra la matriz de la distribución de fractura  $b_{ij}$ .

TABLA B.3. Cálculos para determinar los vectores  $B_{ij}$ ,  $b_{ij}$

i	Abertura $\mu\text{m}$		$X_{i-1}/X_j$	$B_{i1}$	$b_{i1}$
	Máximo	Mínimo			
1	53033	37500	1,414214	1	0
2	37500	25400	1,000000	1	0,50628
3	25400	19000	0,677333	0,4937	0,14237
4	19000	12500	0,506667	0,3513	0,10994
5	12500	9500	0,333333	0,2414	0,04749
6	9500	6700	0,253333	0,1939	0,04577
7	6700	4750	0,178667	0,1482	0,03411
8	4750	3360	0,126667	0,1140	0,02631
9	3360	2360	0,089600	0,0877	0,02058
10	2360	1700	0,062933	0,0672	0,01476
11	1700	1180	0,045333	0,0524	0,01264
12	1180	850,0	0,031467	0,0398	0,00873
13	850,0	600,0	0,022667	0,0310	0,00718
14	600,0	430,0	0,016000	0,0238	0,00531
15	430,0	300,0	0,011467	0,0185	0,00442
16	300,0	210,0	0,008000	0,0141	0,00334
17	210,0	150,0	0,005600	0,0108	0,00242
18	150,0	110,0	0,004000	0,0084	0,00175
19	110,0	75,00	0,002933	0,0066	0,00166
20	75,00	53,00	0,002000	0,0049	0,00114
21	53,00	38,00	0,001413	0,0038	0,00085
22	38,00	26,00	0,001013	0,0030	0,00074
23	26,00	18,00	0,000693	0,0022	0,00054
24	18,00	13,00	0,000480	0,0017	0,00037
25	13,00	9,00	0,000347	0,0013	0,00032
26	9,00	6,50	0,000240	0,0010	0,00022
27	6,50	4,60	0,000173	0,0008	0,00018
28	4,60	3,20	0,000123	0,0006	0,00014
29	3,20	2,20	0,000085	0,0005	0,00011
30	2,20	0,0	0,000059	0,0003	0,00034
	1		2	3	4

Tabla B.4. Matriz de la Función de Distribución de Fractura Acumulada  $B_{ij}$

$B_{i1}$	$B_{i2}$	$B_{i3}$	$B_{i4}$	$B_{i5}$	$B_{i6}$	$B_{i7}$	$B_{i8}$	$B_{i9}$	$B_{i10}$	$B_{i11}$	$B_{i12}$	$B_{i13}$	$B_{i14}$	$B_{i15}$	$B_{i16}$	$B_{i17}$	$B_{i18}$	$B_{i19}$	$B_{i20}$	$B_{i21}$	$B_{i22}$	$B_{i23}$	$B_{i24}$	$B_{i25}$	$B_{i26}$	$B_{i27}$	$B_{i28}$	$B_{i29}$	$B_{i30}$
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,4937	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,3513	0,5712	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2414	0,3413	0,4747	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1939	0,2658	0,3467	0,5858	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1482	0,2002	0,2529	0,3725	0,5227	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1140	0,1534	0,1919	0,2694	0,3467	0,5267	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0877	0,1179	0,1470	0,2032	0,2535	0,3477	0,5250	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0672	0,0902	0,1124	0,1545	0,1910	0,2527	0,3445	0,5196	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0524	0,0704	0,0876	0,1204	0,1483	0,1942	0,2561	0,3508	0,5392	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0398	0,0534	0,0665	0,0913	0,1124	0,1465	0,1910	0,2521	0,3467	0,5109	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0310	0,0417	0,0519	0,0712	0,0876	0,1142	0,1483	0,1937	0,2574	0,3467	0,5392	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0238	0,0320	0,0399	0,0547	0,0673	0,0877	0,1138	0,1481	0,1945	0,2531	0,3526	0,5234	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0185	0,0249	0,0310	0,0425	0,0523	0,0682	0,0884	0,1149	0,1504	0,1937	0,2600	0,3508	0,5351	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0141	0,0189	0,0236	0,0324	0,0399	0,0519	0,0673	0,0875	0,1144	0,1468	0,1945	0,2531	0,3467	0,5146	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0108	0,0145	0,0180	0,0247	0,0304	0,0396	0,0514	0,0668	0,0873	0,1119	0,1477	0,1902	0,2513	0,3387	0,5171	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0084	0,0112	0,0140	0,0192	0,0236	0,0307	0,0399	0,0518	0,0677	0,0867	0,1144	0,1468	0,1919	0,2506	0,3467	0,5325	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0066	0,0089	0,0111	0,0152	0,0187	0,0243	0,0315	0,0410	0,0535	0,0686	0,0904	0,1159	0,1511	0,1954	0,2613	0,3636	0,5540	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0049	0,0066	0,0083	0,0114	0,0140	0,0182	0,0236	0,0307	0,0401	0,0513	0,0677	0,0867	0,1129	0,1455	0,1919	0,2556	0,3467	0,4982	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0038	0,0051	0,0064	0,0087	0,0107	0,0140	0,0182	0,0236	0,0308	0,0395	0,0520	0,0667	0,0868	0,1117	0,1469	0,1934	0,2533	0,3342	0,5242	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0030	0,0040	0,0049	0,0068	0,0084	0,0109	0,0141	0,0183	0,0240	0,0307	0,0405	0,0518	0,0675	0,0868	0,1140	0,1496	0,1939	0,2486	0,3513	0,5355	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0022	0,0030	0,0037	0,0051	0,0063	0,0082	0,0106	0,0138	0,0180	0,0230	0,0304	0,0389	0,0506	0,0652	0,0856	0,1121	0,1448	0,1837	0,2494	0,3402	0,5007	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0,0017	0,0023	0,0028	0,0039	0,0047	0,0062	0,0080	0,0104	0,0136	0,0174	0,0230	0,0295	0,0383	0,0493	0,0648	0,0848	0,1095	0,1386	0,1859	0,2452	0,3288	0,5090	1	1	0	0	0	0	0	0
0,0013	0,0018	0,0022	0,0030	0,0037	0,0048	0,0063	0,0081	0,0106	0,0136	0,0180	0,0230	0,0300	0,0386	0,0506	0,0663	0,0856	0,1082	0,1448	0,1891	0,2466	0,3467	0,5413	1	1	0	0	0	0	0
0,0010	0,0013	0,0017	0,0023	0,0028	0,0037	0,0047	0,0062	0,0081	0,0103	0,0136	0,0174	0,0227	0,0292	0,0383	0,0502	0,0648	0,0819	0,1095	0,1425	0,1840	0,2490	0,3467	0,5090	1	1	0	0	0	0
0,0008	0,0010	0,0013	0,0018	0,0022	0,0029	0,0037	0,0048	0,0063	0,0081	0,0106	0,0136	0,0177	0,0228	0,0300	0,0393	0,0506	0,0640	0,0856	0,1113	0,1433	0,1919	0,2580	0,3467	0,5413	1	1	0	0	0
0,0006	0,0008	0,0010	0,0014	0,0017	0,0022	0,0029	0,0037	0,0049	0,0062	0,0082	0,0105	0,0137	0,0176	0,0231	0,0302	0,0390	0,0493	0,0659	0,0856	0,1102	0,1471	0,1953	0,2536	0,3545	0,5253	1	1	0	0
0,0005	0,0006	0,0008	0,0010	0,0013	0,0017	0,0022	0,0028	0,0037	0,0047	0,0062	0,0080	0,0104	0,0134	0,0175	0,0230	0,0296	0,0375	0,0501	0,0651	0,0837	0,1116	0,1476	0,1896	0,2547	0,3414	0,5125	1	1	0
0,0003	0,0005	0,0006	0,0008	0,0010	0,0013	0,0016	0,0021	0,0028	0,0036	0,0047	0,0060	0,0078	0,0101	0,0132	0,0173	0,0223	0,0282	0,0377	0,0490	0,0630	0,0840	0,1110	0,1421	0,1886	0,2445	0,3318	0,5040	1	1

Tabla B.5. Matriz de la Función de Distribución de Fractura  $b_{ij}$

$b_{i1}$	$b_{i2}$	$b_{i3}$	$b_{i4}$	$b_{i5}$	$b_{i6}$	$b_{i7}$	$b_{i8}$	$b_{i9}$	$b_{i10}$	$b_{i11}$	$b_{i12}$	$b_{i13}$	$b_{i14}$	$b_{i15}$	$b_{i16}$	$b_{i17}$	$b_{i18}$	$b_{i19}$	$b_{i20}$	$b_{i21}$	$b_{i22}$	$b_{i23}$	$b_{i24}$	$b_{i25}$	$b_{i26}$	$b_{i27}$	$b_{i28}$	$b_{i29}$	$b_{i30}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50628	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,14237	0,42876	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,10994	0,22999	0,52532	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,04749	0,07548	0,12799	0,41419	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,04577	0,06561	0,09377	0,21333	0,47729	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,03411	0,04675	0,06099	0,10308	0,17602	0,47331	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,02631	0,03555	0,04493	0,06625	0,09314	0,17897	0,47502	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,02058	0,02768	0,03463	0,04861	0,06256	0,09505	0,18048	0,48038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,01476	0,01982	0,02472	0,03417	0,04265	0,05852	0,08843	0,16878	0,46078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,01264	0,01698	0,02116	0,02910	0,03597	0,04762	0,06508	0,09879	0,19253	0,48910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00873	0,01173	0,01461	0,02006	0,02472	0,03236	0,04265	0,05834	0,08926	0,16421	0,46078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00718	0,00965	0,01201	0,01649	0,02030	0,02648	0,03453	0,04562	0,06297	0,09359	0,18660	0,47662	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00531	0,00713	0,00888	0,01219	0,01500	0,01954	0,02539	0,03316	0,04408	0,05941	0,09264	0,17258	0,46486	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00442	0,00593	0,00738	0,01014	0,01247	0,01625	0,02108	0,02744	0,03604	0,04693	0,06551	0,09770	0,18845	0,48537	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00334	0,00448	0,00558	0,00766	0,00942	0,01227	0,01592	0,02070	0,02708	0,03487	0,04676	0,06293	0,09535	0,17595	0,48291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00242	0,00325	0,00405	0,00556	0,00684	0,00891	0,01155	0,01501	0,01962	0,02518	0,03336	0,04340	0,05941	0,08803	0,17040	0,46749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00175	0,00235	0,00292	0,00401	0,00493	0,00643	0,00833	0,01083	0,01415	0,01814	0,02395	0,03085	0,04083	0,05524	0,08535	0,16895	0,44604	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00166	0,00223	0,00278	0,00381	0,00469	0,00611	0,00793	0,01030	0,01346	0,01725	0,02275	0,02920	0,03820	0,04995	0,06941	0,10795	0,20727	0,50176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00114	0,00153	0,00191	0,00262	0,00323	0,00420	0,00545	0,00708	0,00925	0,01185	0,01563	0,02004	0,02611	0,03375	0,04504	0,06226	0,09335	0,16401	0,47578	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00085	0,00114	0,00142	0,00194	0,00239	0,00311	0,00404	0,00525	0,00685	0,00878	0,01158	0,01484	0,01932	0,02489	0,03284	0,04376	0,05941	0,08560	0,17287	0,46451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00074	0,00099	0,00123	0,00169	0,00208	0,00271	0,00352	0,00457	0,00598	0,00766	0,01009	0,01294	0,01684	0,02167	0,02849	0,03751	0,04916	0,06490	0,10200	0,19531	0,49933	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00054	0,00072	0,00090	0,00124	0,00152	0,00198	0,00257	0,00334	0,00436	0,00559	0,00737	0,00945	0,01229	0,01582	0,02078	0,02725	0,03530	0,04518	0,06343	0,09503	0,17191	0,49099	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00037	0,00049	0,00061	0,00084	0,00104	0,00135	0,00175	0,00227	0,00297	0,00381	0,00502	0,00643	0,00837	0,01076	0,01413	0,01852	0,02391	0,03035	0,04116	0,05605	0,08213	0,16232	0,45868	0	0	0	0	0	0	0
0,00032	0,00043	0,00053	0,00073	0,00090	0,00117	0,00152	0,00198	0,00258	0,00331	0,00436	0,00559	0,00728	0,00936	0,01229	0,01610	0,02078	0,02630	0,03530	0,04658	0,06261	0,09764	0,19463	0,49099	0	0	0	0	0	0
0,00022	0,00029	0,00036	0,00050	0,00061	0,00080	0,00104	0,00135	0,00176	0,00225	0,00297	0,00381	0,00495	0,00637	0,00837	0,01096	0,01413	0,01787	0,02391	0,03123	0,04071	0,05712	0,08869	0,16232	0,45868	0	0	0	0	0
0,00018	0,00024	0,00030	0,00041	0,00051	0,00066	0,00085	0,00111	0,00145	0,00186	0,00245	0,00314	0,00408	0,00525	0,00690	0,00903	0,01165	0,01473	0,01969	0,02564	0,03312	0,04488	0,06274	0,09305	0,18684	0,47467	0	0	0	0
0,00014	0,00019	0,00024	0,00033	0,00041	0,00053	0,00069	0,00089	0,00116	0,00149	0,00197	0,00252	0,00328	0,00422	0,00554	0,00726	0,00936	0,01183	0,01581	0,02056	0,02648	0,03546	0,04766	0,06402	0,09982	0,18395	0,48749	0	0	0
0,00011	0,00015	0,00019	0,00026	0,00032	0,00041	0,00054	0,00070	0,00091	0,00117	0,00154	0,00197	0,00256	0,00330	0,00433	0,00567	0,00731	0,00924	0,01235	0,01606	0,02066	0,02757	0,03659	0,04748	0,06607	0,09691	0,18068	0,49596	0	0
0,00034	0,00046	0,00057	0,00079	0,00097	0,00126	0,00164	0,00213	0,00278	0,00356	0,00469	0,00601	0,00782	0,01006	0,01321	0,01731	0,02232	0,02822	0,03770	0,04902	0,06305	0,08401	0,11100	0,14215	0,18860	0,24446	0,33183	0,50404	1	1

**APÉNDICE C**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOLINO A**  
**ESCALA INDUSTRIAL**

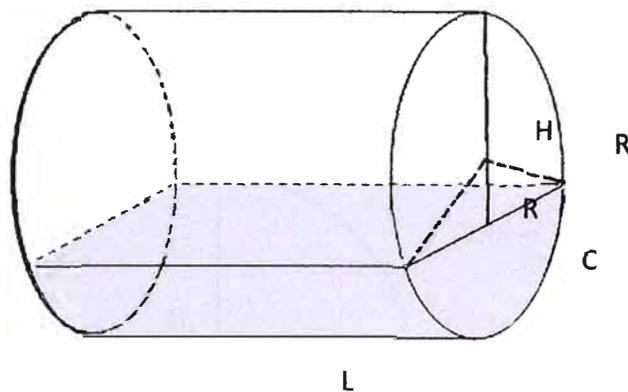
## CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOLINO.

### 1. DIMENSIONES DEL MOLINO.

**Diámetro:** 4,4 m

**Longitud:** Cámara I:  $L_1 = 5$  m

Cámara II:  $L_2 = 8,5$  m



**Altura libre:** Cámara I:  $H_1 = 2,67$  m.

Cámara II:  $H_2 = 3,10$  m.

**Cuerda libre:** Cámara I:  $C_1 = 3,20$  m.

Cámara II:  $C_2 = 3,49$  m.

### 1. VELOCIDAD CRÍTICA DEL MOLINO.

$$N_c = \frac{42,3}{D_1^{1/2}}$$

$$N_c = \frac{42,33}{\sqrt{4}} = 20,17$$

### 2. %VELOCIDAD CRÍTICA.

$$\%Velocidad\ crítica = \frac{15}{20,17} \times 100 = 74,36$$

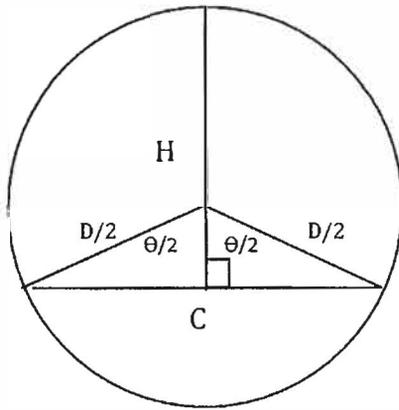
#### 4. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL MOLINO PARA CADA CÁMARA.

$$v_m = \pi \left( \frac{D_1}{2} \right)^2 L$$

$$\text{Cámara I: } v_{m1} = \pi \left( \frac{4,4}{2} \right)^2 5 = 76,03 \text{ m}^3$$

$$\text{Cámara II: } v_{m2} = \pi \left( \frac{4,4}{2} \right)^2 8,5 = 129,25 \text{ m}^3$$

#### 5. Cálculo del volumen ocupado por las bolas para cada cámara.



$$\text{sen} \frac{\theta}{2} = \frac{C}{D}$$

$$\text{Cámara I: } \theta_1 = 1,6287$$

$$\text{Cámara II: } \theta_2 = 1,8320$$

$$v_1 = \left[ \frac{\theta_1 r^2}{2} - \frac{C_1 (H_1 - r)}{2} \right] L_1$$

$$\text{Cámara I: } v_1 = \left[ \frac{1,6287(2,2)^2}{2} - \frac{3,2(2,67-2,2)}{2} \right] 5 = 15,947 \text{ m}^3$$

$$\text{Cámara II: } v_2 = \left[ \frac{1,8320(2,2)^2}{2} - \frac{3,49(3,10-2,2)}{2} \right] 8,5 = 24,336 \text{ m}^3$$

#### 6. % DE CARGA.

$$J_1 = \frac{v_1}{v_m}$$

$$\text{Cámara I: } J_1 = \frac{15,947}{76,03} = 0,21$$

$$\text{Cámara II: } J_2 = \frac{24,336}{129,25} = 0,19$$

APÉNDICE D  
DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN COMBINADA

## MÉTODO PARA DETERMINAR LA FUNCIÓN COMBINADA ( $r_i/d_i$ )

La función combinada ( $r_i/d_i$ ), es un parámetro que está ligado a las condiciones de operación del proceso de molienda; por tal motivo se determina a nivel industrial.

Cuando el molino de bolas alcance el estado estacionario, se realiza una parada en seco (Crash Stop). Posteriormente, después que el molino esta frio, se toman muestras del interior, y se realiza análisis granulométrico, con el propósito de determinar los molinos ideales en serie que se presenta en su interior. La tabla D.1 muestra los resultados del análisis granulométrico de la evaluación que se ha realizado. Las condiciones de operación del molino en el instante que se realizó la parada en seco se muestra en la tabla: 6.4. También se muestra en el gráfico D.1:

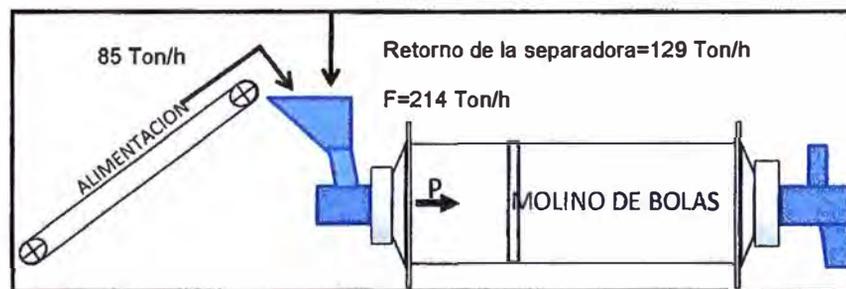


Figura D.1. Condiciones de alimentación al molino antes de la parada en seco

Para determinar el valor de ( $r_i/d_i$ ) se recurre al modelo de mezcla perfecta:

$$f_i - p_i \left( \frac{r_i}{d_i} \right) + \sum_{j=1}^i b_{ij} p_j \left( \frac{r_j}{d_j} \right) - p_i = 0 \quad (d.1)$$

Donde:

$f_i$  : Alimentación de fracción de tamaño "i"

$p_i$  : Producto de fracción de tamaño "i"

$b_{ij}$  : Función de fractura, valores que dependen del material y son obtenidos a escala de laboratorio

$(r_i/d_i)$  : Función combinada

$f_i$  y  $p_i$  : Son valores obtenidos del análisis granulométrico que se ha realizado en el interior del molino.

Tabla D.1. Resultados de la granulometría de la alimentación y del interior del molino

Tn/hr		214	PRIMER COMPARTIMIENTO					SEGUNDO COMPARTIMIENTO										
Nro	Abertura (um)	Alimentación al molino	C1-P0	C1-P1	C1-P2	C1-P3	C1-P4	C1-P5	C2-P0	C2-P1	C2-P2	C2-P3	C2-P4	C2-P5	C2-P6	C2-P7	C2-P8	C2-P9
1	37500	0,82%	0,78%	0,62%	0,57%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	25400	3,18%	2,83%	2,55%	1,88%	0,73%	0,31%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3	19000	6,32%	5,75%	4,38%	3,64%	1,19%	0,55%	0,22%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4	12500	11,53%	9,27%	8,42%	5,94%	1,72%	0,83%	0,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
5	9500	10,41%	9,65%	6,75%	5,01%	1,34%	0,66%	0,29%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
6	6700	9,09%	8,68%	5,80%	4,87%	1,23%	0,60%	0,24%	0,11%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,58%	0,02%
7	4750	4,36%	4,27%	3,95%	3,50%	0,72%	0,17%	0,12%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09%	0,00%	0,11%	0,01%
8	3360	3,50%	3,16%	2,73%	3,01%	0,61%	0,28%	0,31%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,03%	0,00%	0,11%	0,01%
9	2360	2,62%	2,20%	2,46%	2,62%	0,72%	0,36%	0,40%	0,05%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%
10	1700	1,60%	1,39%	1,83%	2,07%	0,87%	0,62%	0,50%	0,09%	0,06%	0,07%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%	0,03%
11	1180	1,33%	1,49%	1,64%	2,04%	1,21%	1,04%	0,86%	0,21%	0,14%	0,17%	0,11%	0,08%	0,03%	0,02%	0,01%	0,02%	0,06%
12	850	1,05%	1,42%	1,62%	1,85%	1,73%	1,65%	1,41%	0,34%	0,29%	0,32%	0,23%	0,13%	0,07%	0,05%	0,04%	0,02%	0,11%
13	600	0,79%	0,85%	1,07%	2,01%	2,52%	2,68%	2,31%	0,72%	0,59%	0,67%	0,51%	0,30%	0,17%	0,15%	0,15%	0,05%	0,24%
14	430	0,49%	0,84%	1,10%	2,03%	3,47%	3,89%	3,50%	1,16%	1,02%	1,17%	0,93%	0,54%	0,36%	0,31%	0,28%	0,14%	0,20%
15	300	0,62%	0,91%	1,25%	2,54%	4,65%	5,13%	4,85%	2,16%	1,86%	2,03%	1,67%	1,02%	0,71%	0,65%	0,59%	0,30%	0,46%
16	210	1,27%	1,60%	2,14%	3,76%	6,06%	6,11%	5,90%	3,83%	3,31%	3,44%	3,00%	2,10%	1,53%	1,42%	1,35%	0,82%	1,11%
17	150	2,49%	2,55%	3,01%	5,31%	7,01%	7,04%	6,44%	5,91%	5,29%	5,13%	4,66%	3,42%	2,75%	2,44%	2,39%	2,01%	2,33%
18	110	3,26%	3,92%	5,44%	5,19%	7,10%	7,60%	6,85%	5,83%	6,02%	6,23%	5,70%	4,55%	3,65%	3,50%	3,60%	2,16%	2,69%
19	75	8,81%	9,53%	10,18%	10,56%	16,71%	17,27%	18,35%	14,02%	14,09%	16,08%	14,12%	13,28%	11,68%	11,52%	11,34%	5,99%	6,64%
20	53	8,51%	9,28%	9,69%	9,69%	12,83%	13,51%	15,15%	15,56%	15,76%	15,82%	16,02%	16,42%	14,96%	15,17%	15,26%	7,27%	7,39%
21	38	6,97%	7,86%	9,82%	7,83%	9,51%	10,04%	10,79%	13,03%	13,34%	12,52%	13,14%	13,83%	14,43%	14,21%	14,37%	17,75%	18,06%
22	26	5,59%	5,74%	6,25%	6,36%	6,70%	7,15%	7,73%	11,15%	11,37%	10,70%	11,48%	12,21%	13,37%	13,58%	13,56%	17,81%	17,84%
23	18	1,86%	1,86%	2,31%	2,43%	3,01%	3,22%	3,36%	6,36%	6,53%	6,21%	6,82%	7,63%	8,55%	8,68%	8,71%	9,76%	9,34%
24	13	0,66%	0,69%	0,89%	1,04%	1,50%	1,66%	1,71%	3,58%	3,65%	3,52%	3,82%	4,42%	4,99%	4,93%	5,11%	6,27%	6,22%
25	9,0	0,29%	0,42%	0,54%	0,62%	0,92%	1,07%	1,15%	2,31%	2,54%	2,30%	2,56%	2,82%	3,16%	3,19%	3,21%	4,01%	3,87%
26	6,5	0,40%	0,49%	0,51%	0,62%	1,06%	1,23%	1,30%	2,72%	3,11%	2,71%	2,98%	3,36%	3,89%	3,85%	3,90%	4,80%	4,43%
27	4,6	0,52%	0,52%	0,64%	0,71%	1,08%	1,18%	1,30%	2,81%	3,07%	2,75%	3,01%	3,37%	3,98%	3,82%	3,99%	4,94%	4,47%
28	3,2	0,47%	0,53%	0,64%	0,62%	1,35%	1,43%	1,60%	3,15%	3,21%	3,11%	3,52%	3,91%	4,53%	4,46%	4,65%	5,71%	5,27%
29	2,2	0,39%	0,59%	0,76%	0,51%	0,96%	1,07%	1,15%	1,99%	1,93%	2,04%	2,35%	2,70%	2,91%	3,16%	3,06%	3,84%	3,70%
30	0	0,80%	0,93%	1,01%	1,16%	1,47%	1,62%	1,74%	2,89%	2,77%	3,00%	3,32%	3,86%	4,23%	4,77%	4,40%	5,51%	5,50%

Despejando la ecuación (e.1) se tiene:

$$\left(\frac{r_i}{d_i}\right) = \frac{f_i - p_i + \sum_{j=1}^i b_{ij} p_j \left(\frac{r_j}{d_j}\right)}{p_i} \quad (\text{d.2})$$

Cuando:  $i = j$ ,  $b_{ij} = 0$  (ver tabla B.5)

Asumiendo:  $i = 1$

Se tiene:

$$\left(\frac{r_1}{d_1}\right) = \frac{f_1 - p_1}{p_1} \quad (\text{d.3})$$

$$f_1 = \% \text{ retenido}_1 * F = (0,82\%) * 214 = 1,7548 \text{ Ton/h}$$

$$p_1 = \% \text{ retenido}_1 * P = (0,57\%) * 214 = 1,2296 \text{ Ton/h}$$

$$\text{Reemplazando en la ecuación (e.3) se obtiene: } \left(\frac{r_1}{d_1}\right) = 0,4271$$

Se continúa realizando los cálculos para  $i > 1$ :

Asumiendo  $i = 2$  en la ecuación (e.2):

$$\left(\frac{r_2}{d_2}\right) = \frac{(f_2 - p_2) + [b_{21} p_1 \left(\frac{r_1}{d_1}\right) + b_{22} p_2 \left(\frac{r_2}{d_2}\right)]}{p_2} \quad (\text{d.4})$$

$b_{22} = 0$ , entonces se tiene:

$$\left(\frac{r_2}{d_2}\right) = \frac{(f_2 - p_2) + b_{21} p_1 \left(\frac{r_1}{d_1}\right)}{p_2} \quad (\text{d.5})$$

De los cuales:

$$p_1 = \% \text{ retenido}_1 * P = (0,57\%) * 214 = 1,2296 \text{ Ton/h}$$

$$f_2 = \% \text{ retenido}_2 * F = (3,18\%) * 214 = 6,8073 \text{ Ton/h}$$

$$p_2 = \% \text{ retenido}_2 * P = (1,88 \%) * 214 = 4,0289 \text{ Ton/h}$$

$$b_{21} = 0,50628 \text{ (tabla B.5)}$$

$$\frac{r_1}{d_1} = 0,4271 \text{ (Solución de la ecuación (e.3))}$$

$$\text{Reemplazando los valores se tiene: } \frac{r_2}{d_2} = 0,7556$$

De la misma forma se continúa realizando los cálculos y se obtiene los parámetros  $\frac{r_i}{d_i}$  para los tres molinos ideales y se encuentra en la tabla D.2

TABLA D.2. Resultados de los valores de  $\left(\frac{r_i}{d_i}\right)$  de los molinos ideales 1, 2 y 3

Nro	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	$\left(\frac{r_i}{d_i}\right)1$	$\left(\frac{r_i}{d_i}\right)2$	$\left(\frac{r_i}{d_i}\right)3$
1	37500	4,27E-01	4,80E+00	1,00E+00
2	25400	7,56E-01	5,10E+00	1,00E+00
3	19000	9,16E-01	5,58E+00	1,00E+00
4	12500	1,30E+00	6,70E+00	2,00E+00
5	9500	1,83E+00	7,39E+00	3,00E+00
6	6700	2,18E+00	7,39E+00	3,69E+00
7	4750	2,45E+00	7,18E+00	4,30E+00
8	3360	2,67E+00	6,83E+00	4,82E+00
9	2360	2,87E+00	6,32E+00	4,70E+00
10	1700	3,14E+00	5,96E+00	4,59E+00
11	1180	3,15E+00	5,11E+00	4,06E+00
12	850	2,99E+00	4,19E+00	3,25E+00
13	600	2,50E+00	3,59E+00	2,27E+00
14	430	1,99E+00	2,95E+00	1,34E+00
15	300	1,31E+00	2,40E+00	7,15E-01
16	210	5,26E-01	1,75E+00	4,04E-01
17	150	9,86E-02	1,21E+00	1,95E-01
18	110	4,13E-02	8,34E-01	9,31E-02
19	75	1,10E-02	5,29E-01	5,71E-02
20	53	6,59E-03	4,90E-01	5,05E-02
21	38	5,34E-03	3,73E-01	4,03E-02
22	26	3,05E-03	1,49E-01	1,10E-02
23	18	1,00E-03	1,10E-01	7,65E-03
24	13	8,82E-04	8,78E-02	1,26E-03
25	9,0	2,04E-04	7,06E-02	1,19E-03
26	6,5	1,06E-06	6,70E-03	1,63E-04
27	4,6	3,24E-07	4,03E-03	9,01E-05
28	3,2	1,24E-07	2,06E-03	5,34E-05
29	2,2	3,30E-08	7,86E-04	3,23E-05
30	0	0	0	0

**APÉNDICE E**  
**MODELAMIENTO DEL DIAFRAGMA DEL MOLINO**

## DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DIAFRAGMA MOLINO

El diafragma del molino según Lynch y Benzer [12] tiene el comportamiento de un clasificador. Por tal motivo, para modelar el diafragma se utilizan las mismas consideraciones que para la separadora (ec. 34).

En la Gráfica E.1, se observa un esquema de la manera como se dividen los flujos que entran a la separadora. El flujo de alimentación al diafragma representa el último punto del primer compartimiento y los finos el primer punto del segundo compartimiento.

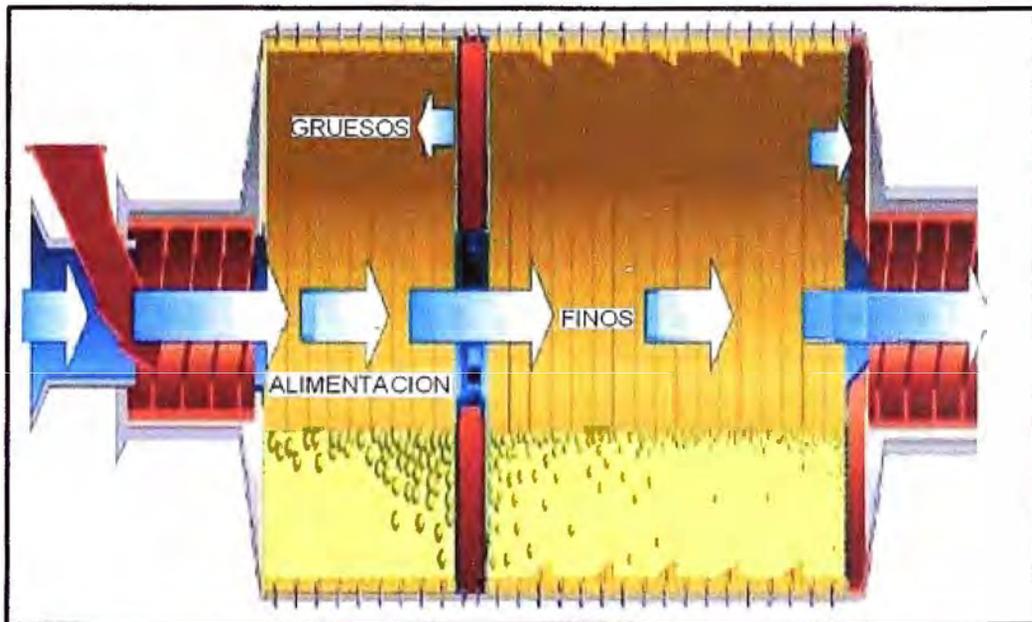


Figura E.1. Esquema de los flujos dentro del molino.

Cabe resaltar, que la granulometría de la alimentación y de los finos se puede determinar experimentalmente, haciendo una parada en seco dentro del molino, sin embargo; el flujo de los gruesos es imposible determinarlo experimentalmente ya que al parar el molino este material va a caer dentro del mismo compartimiento. Por tal razón, el cálculo de la granulometría como el flujo de los gruesos podrá ser determinado por balance y ensayos de prueba y error, de tal modo que se mantengan las condiciones dentro del molino.

Haciendo un balance de masa por fracción de tamaños en el tabique:

$$AX_A = GX_G + WX_W \quad (e.1)$$

$A, G, W$ : Flujo (ton/h) de la alimentación al tabique, grueso y finos del tabique respectivamente.

$X_A, X_G, X_W$ : % peso retenido de un determinado tamaño para la alimentación al diafragma, grueso y finos del tabique, respectivamente.

Experimentalmente solo se tiene  $X_A, X_W, W$ , por lo que no se puede utilizar directamente la ecuación (31). De la ecuación (e.1) en la ecuación (30) se tiene:

$$T_i = \frac{A \cdot X_{Ai} - W \cdot X_{Wi}}{A x_{Ai}}$$

Simplificando la ecuación anterior se tiene:

$$T_i = 1 - \frac{W \cdot X_{Wi}}{A x_{Ai}} \quad (\text{e.2})$$

Donde:  $\frac{X_{Wi}}{x_{Ai}}$ , Es la razón de fracción de tamaños de partículas (RFT) y se halla experimentalmente.

La forma general de la eficiencia real o selectividad puede ser aproximada con RFT ya que es un dato conocido.

$$T_i = 1 - \frac{W}{A} (RFT) \quad (\text{e.3})$$

### E.1. PROCEDIMIENTO.

Debido a que es imposible tomar muestras de los gruesos que salen del diafragma, no se puede determinar: la granulometría para cada tamaño  $X_G$ , el flujo de gruesos  $G$ , ni el flujo de alimentación  $A$ , de la Figura E.1

- Durante este estudio, se sabe que  $\frac{W}{A} \leq 1$ , por ello, en un principio se asume que  $\frac{W}{A} = 1$ .
- Como  $W$  es conocido, se halla  $A$  y por balance de masa se determina  $G$  y  $X_G$ .
- Con el valor de  $\frac{W}{A}$ , se procede a determinar la selectividad (e.3), para cada tamaño de partícula.

- Obteniendo la selectividad para cada tamaño se gráfica Selectividad Vs Tamaño de partícula y se determina gráficamente los parámetros de la separadora  $X_0$ ,  $T_0$ ,  $X_T$ , y  $\delta$  de la ecuación 34.
- Los parámetros encontrados de la selectividad, la granulometría  $X_A$  y el flujo A obtenido del balance, se determina la cantidad de masa para cada fracción de tamaños para los finos.

Despejando la ecuación e.2, se tiene:

$$\frac{W \cdot X_{Wi}}{A x_{Ai}} = 1 - T_i$$

$$W \cdot X_{Wi} = \left[ 1 - \left\{ T_0 + (1 - T_0) \left[ 1 - \exp \left( - \ln 2 \left[ \frac{X - X_0}{X_T - X_0} \right]^\delta \right) \right] \right\} \right] A x_{Ai}$$

- El estudio terminará cuando la granulometría de los finos simulada y la granulometría de los finos determinada experimentalmente tengan valores iguales o los errores sean mínimos.

El diagrama de flujo para determinar los parámetros de la separadora se muestran en la figura E.2. Donde:

W: Flujo de finos que sale del diafragma (ton/h), (data de ingreso).

[ $X_W$ ] i: Porcentaje retenido de los finos (data de ingreso).

[ $X_A$ ] i: Porcentaje retenido de la alimentación (data de ingreso).

[RAW] i: Porcentaje retenido acumulado de los finos.

[PAW] i: Porcentaje pasante acumulado de los finos.

$FA = \frac{W}{A}$ .  $FA < 1$ , Para condiciones iniciales  $FA=1$

A: Flujo de alimentación al diafragma (ton/h).

[W] i: Peso de los finos (ton/h) para cada fracción de tamaños.

[A] i: Peso de la alimentación (ton/h) para cada fracción de tamaños.

[T] i: Selectividad para cada tamaño de partículas.

[X] i: Tamaños de partícula

$\delta$ ,  $X_0$ ,  $X_T$ ,  $T_0$ : Parámetros de la separadora determinados graficamente.

[ $\Pi$ ] i: Selectividad para cada tamaño de partículas, según aproximación Lippek (ecuación 34).

[ $WW$ ] i: Peso de los finos predecidos (ton/h) para cada fracción de tamaños.

[ $XX_W$ ] i: Porcentaje retenido de los finos predecidos.

[ $RAW$ ] i: Porcentaje retenido acumulado de los finos predecidos.

[ $PAW$ ] i: Porcentaje pasante acumulado de los finos predecidos.

[ $E$ ] i: Error obtenido para cada fracción de tamaños.

El porcentaje retenido para la alimentación y los finos  $X_A, X_W$ : se muestran en la Tabla E.1. El flujo para los finos fue  $W = 214$  ton/h.

La figura E.2 muestra en un pantallazo en la hoja de cálculo para determinar los parámetros de la separadora, estos fueron:

$$X_T = 49.3766; X_0 = 7.1352; \delta = 0.5335; T_0 = 18.00$$

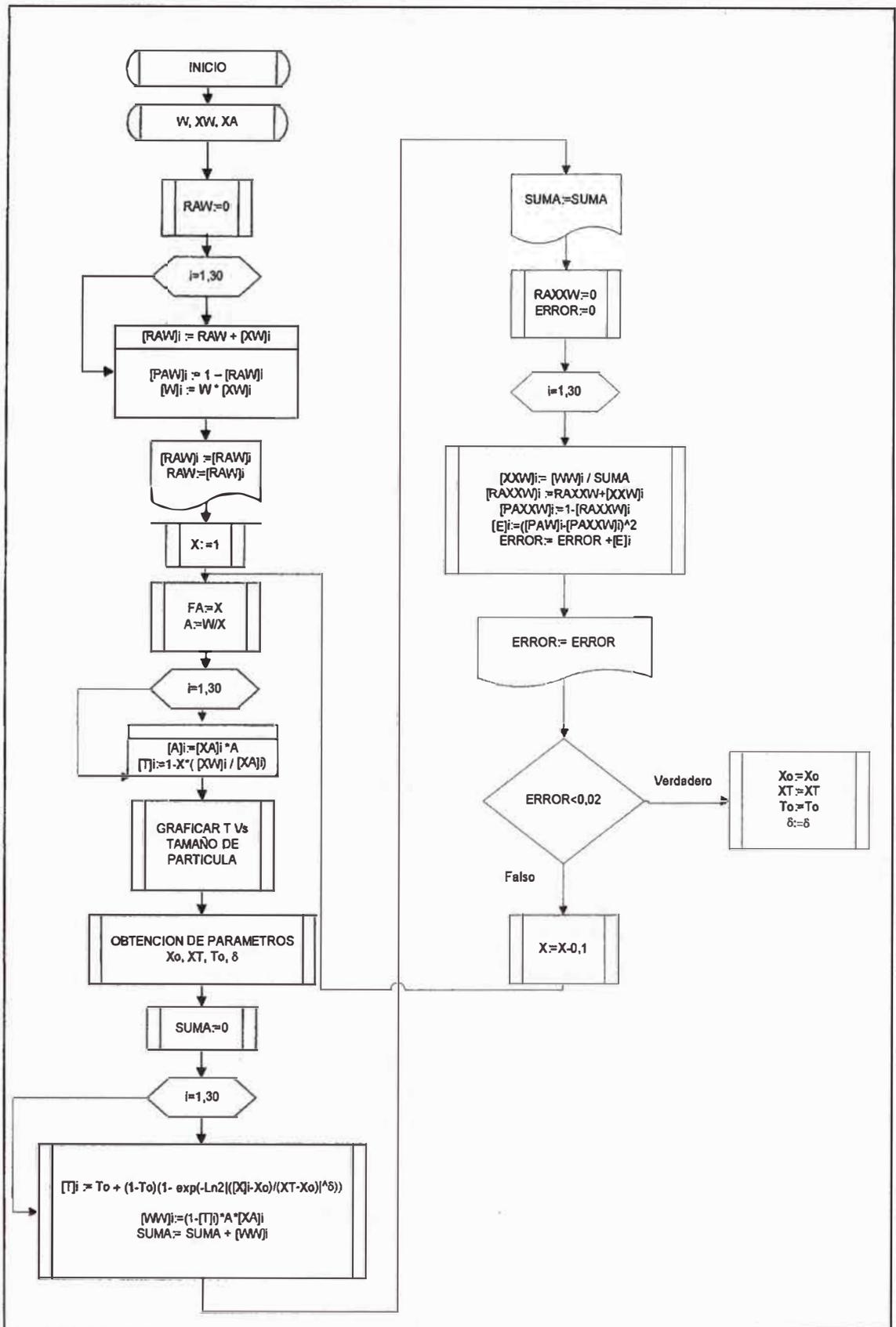


Figura E.2. Diagrama de flujo para determinar los parámetros del diafragma

TABLA E.1. Porcentaje retenido para la alimentación y finos del Diafragma

i	Abertura (mm) [X] <sub>i</sub>	% Retenido Alimentación [X <sub>A</sub> ] <sub>i</sub>	% Retenido Finos [X <sub>w</sub> ] <sub>i</sub>
1	37500	0,00	0,00
2	25400	0,00	0,00
3	19000	0,23	0,00
4	12500	0,16	0,00
5	9500	0,23	0,00
6	6700	0,39	0,11
7	4750	0,12	0,03
8	3360	0,31	0,01
9	2360	0,40	0,05
10	1700	0,50	0,09
11	1180	0,86	0,21
12	850	1,51	0,34
13	600	2,39	0,72
14	430	3,50	1,16
15	300	4,85	2,16
16	210	5,90	3,83
17	150	6,44	5,91
18	110	6,85	5,83
19	75	18,36	14,02
20	53	15,15	15,56
21	38	10,79	13,03
22	26	7,73	11,15
23	18	3,36	6,36
24	13	1,71	3,58
25	9,0	1,15	2,31
26	6,5	1,30	2,72
27	4,6	1,30	2,81
28	3,2	1,60	3,15
29	2,2	1,15	1,99
30	0	1,74	2,89

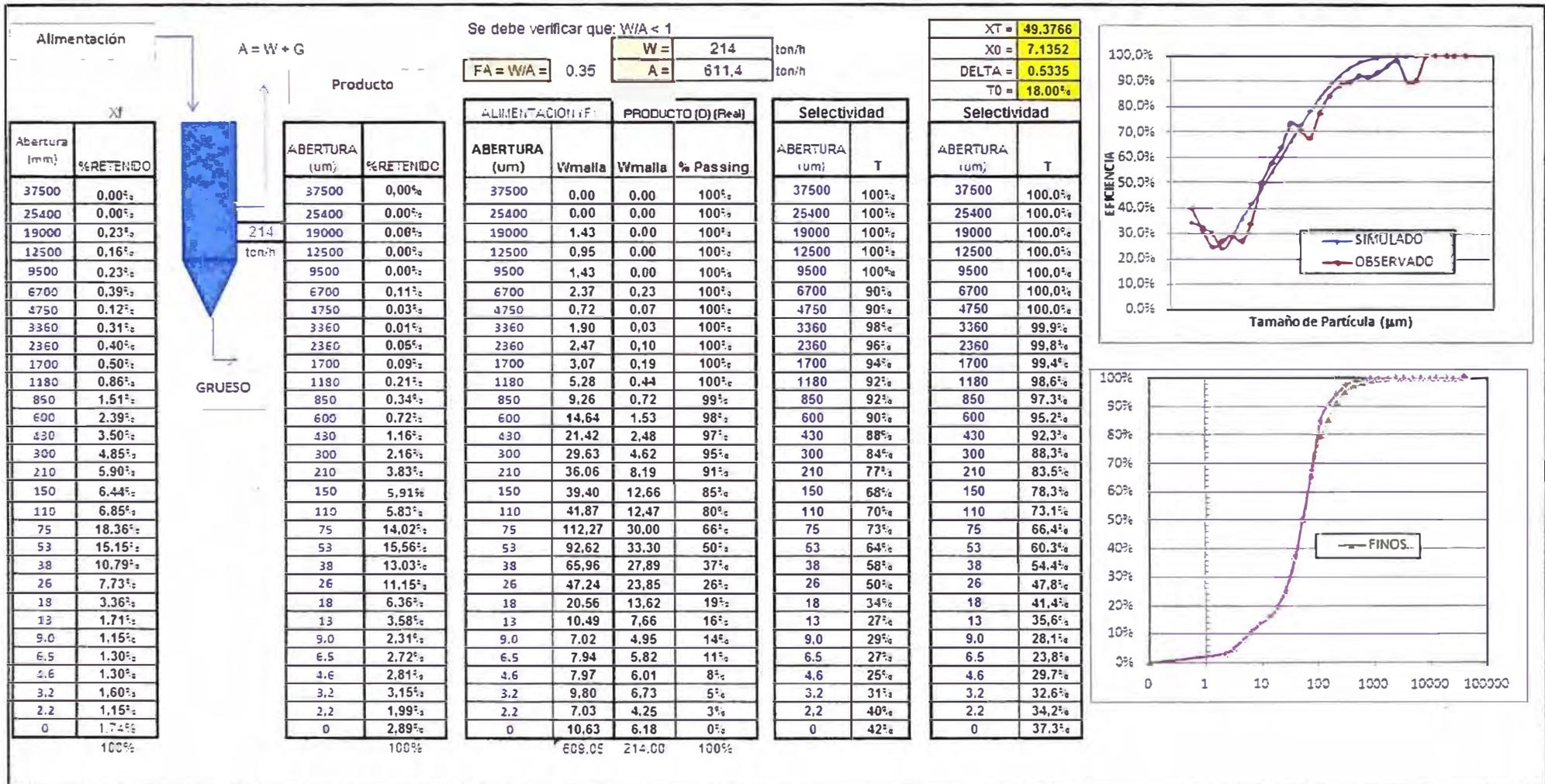


Figura E.2. Cálculos realizados en hoja de cálculo para determinar los parámetros del modelo del diafragma.

APÉNDICE F  
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA  
SEPARADORA.

## DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA SEPARADORA

Para determinar los parámetros de la separadora se realizaron 27 pruebas a diferentes condiciones. La Tabla F.1 muestra el cálculo para la prueba 1 en el cual la velocidad de la separadora es de 165 RPM, abertura exhaustor es de 60% y la alimentación a la separadora de 309 ton/h.

TABLA F.1. Cálculo para determinar la función de selectividad  $T_i$ .

Nro.	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Alimentación Separadora, A (Ton/h)	Retorno, G (Ton/h)	Producto Final, F (Ton/h)	$T(i)$
1	37500	0,00	0,00	0,00	1,00
2	25400	0,00	0,00	0,00	1,00
3	19000	0,00	0,00	0,00	1,00
4	12500	0,00	0,00	0,00	1,00
5	9500	0,00	0,00	0,00	1,00
6	6700	0,00	0,00	0,00	1,00
7	4750	0,00	0,00	0,00	1,00
8	3360	0,27	0,27	0,00	1,00
9	2360	0,17	0,17	0,00	1,00
10	1700	0,22	0,22	0,00	1,00
11	1180	0,58	0,58	0,00	1,00
12	850	1,21	1,21	0,00	1,00
13	600	2,01	2,01	0,00	1,00
14	430	3,16	3,16	0,00	1,00
15	300	5,03	5,03	0,00	1,00
16	210	8,80	8,80	0,00	1,00
17	150	12,78	12,78	0,00	1,00
18	110	16,54	16,54	0,00	1,00
19	75	32,63	32,63	0,000	1,00
20	53	73,43	71,78	1,647	0,98
21	38	71,12	65,70	5,420	0,92
22	26	59,73	48,45	11,280	0,81
23	18	28,24	12,66	15,584	0,45
24	13	15,88	3,54	12,346	0,22
25	9	8,81	2,07	6,740	0,23
26	6,5	9,24	2,88	6,368	0,31
27	4,6	9,34	3,43	5,902	0,37
28	3,2	10,74	4,81	5,926	0,45
29	2,2	7,99	3,80	4,190	0,48
30	0	16,10	6,50	9,597	0,40
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

En la Tabla F.1, podemos observar que la **columna 1** muestra el tamaño de partículas menores que 37 500  $\mu\text{m}$ , la **columna 2, 3 y 4** muestra las ton/h para cada fracción de tamaño de la distribución granulométrica de la alimentación a la separadora (A), el retorno al molino (gruesos, G) y el producto final (finos, F). En la **columna 5**, la selectividad para cada fracción de tamaño se determina por medio de la ecuación 31.

$$T_i = \frac{G \cdot x_{Gi}}{A x_{Ai}} \quad (31)$$

La Gráfica F.1 muestra en el eje de las abscisas el tamaño de las partículas (columna 1), y en las ordenadas la selectividad (columna 5). Se ubica el punto más bajo de la curva, si se va hacia el eje de ordenadas se tendrá  $T_0 = 0,2006$ , y si se va hacia las abscisas  $X_0 = 10,9507 \mu\text{m}$ .

Posteriormente se evalúa:

$$\frac{(1 + T_0)}{2} = \frac{(1 + 0,2006)}{2} = 0,6003$$

Se determina el tamaño de corte  $X_T = 22,7151 \mu\text{m}$ .

La inclinación de la curva indica  $\delta = 1,7045$

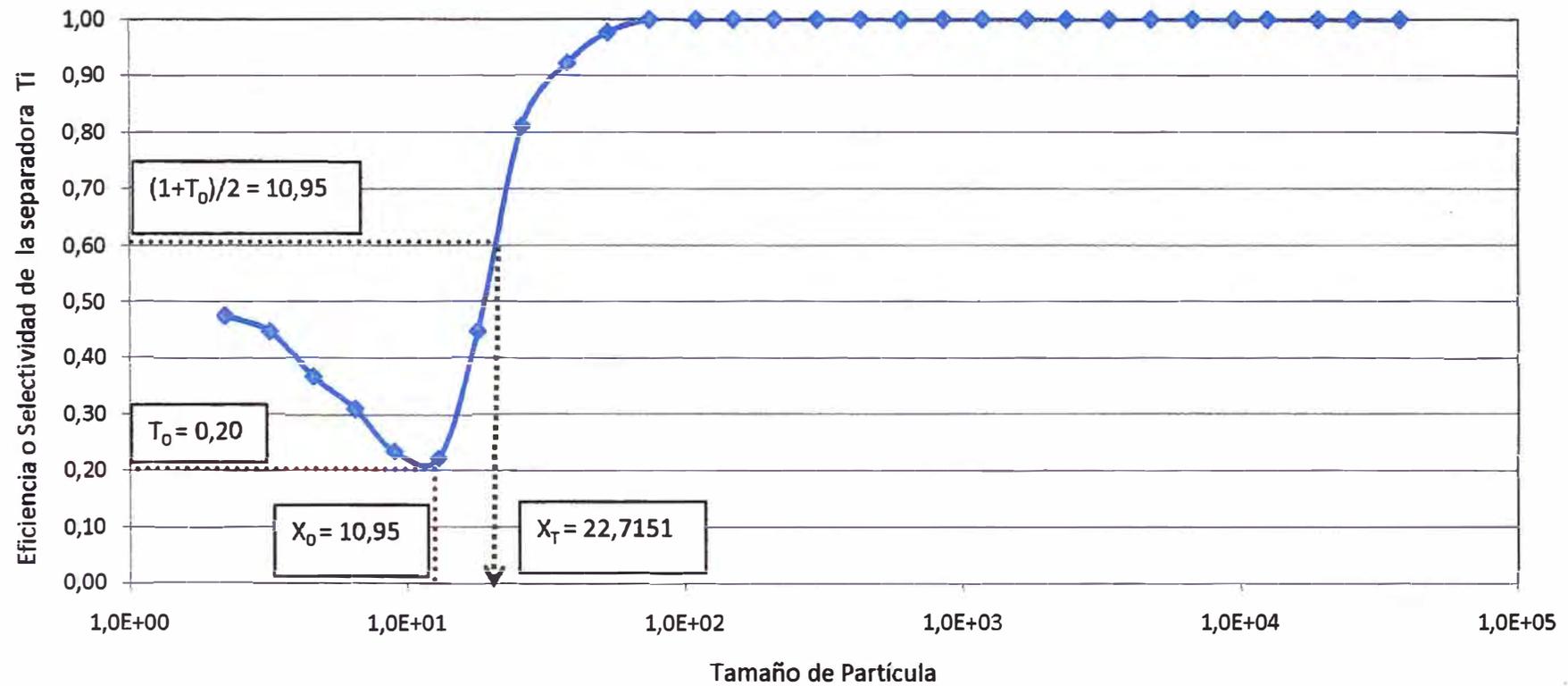
Por lo tanto los parámetros para la prueba 1 de la ecuación dada, son:

$$T(x) = T_0 + (1 - T_0) \left[ 1 - \exp \left( - \ln 2 \left[ \frac{X - X_0}{X_T - X_0} \right]^\delta \right) \right]$$

$$X_0 = 10,9507 \mu\text{m}; T_0 = 0,2006; X_T = 22,7151 \mu\text{m}; \delta = 1,7045$$

Posteriormente se mostrará el reporte estadístico para encontrar la influencia que tiene la velocidad de la separadora, alimentación de la separadora y el porcentaje de la abertura del exhaustor en los parámetros  $X_0$ ,  $T_0$ ,  $X_T$ , y  $\delta$ .

Flujo Alimentación Separadora = 309 Ton/hora, Velocidad Separadora = 165 RPM, Abertura Exhaustor = 60%



Gráfica F.1. Determinación de los parámetros de eficiencia de la separadora

**REPORTE ESTADISTICO: METODO DE STEPWISE PARA DETERMINAR LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS PARAMETROS  $X_0$ ,  $T_0$ ,  $X_T$ , y  $\delta$ .**

**1. RELACION DE  $X_0$ :**

Respuesta de  $X_0$  ( $\mu\text{m}$ ) para 3 predictoras, con N = 27

Step	1	2
Constant	14,69	16,48
velocidad	-0,0280	-0,0280
T-Value	-4,79	-5,45
P-Value	0,000	0,000
Alim Fresca		-0,0195
T-Value		-2,91
P-Value		0,008
S	0,248	0,217
R-Sq	47,83	61,42
R-Sq(adj)	45,74	58,20
Mallows Cp	8,1	2,0

La ecuación es:

$$X_0 = 16,48 - 0,0280 * (\text{Velocidad de la separadora}) - 0,0195 * (\text{Alim. fresca})$$

**2. RELACION DE  $T_0$  :**

Respuesta de  $T_0$  para 3 predictoras, con N = 27

Step	1	2
No constant		
velocidad	0,00107	0,00244
T-Value	14,36	6,87
P-Value	0,000	0,000
abertura		-0,00277
T-Value		-3,91
P-Value		0,001
S	0,0601	0,0483
Mallows Cp	14,0	1,2

La ecuación es:

$$T_0 = 0,00244 * (\text{Veloc. de la separadora}) - 0,00277 (\text{Abert. de compuerta})$$

### 3. RELACION DE $X_T$ SE TIENE:

Respuesta de  $X_T$  ( $\mu\text{m}$ ) para 3 predictoras, con  $N = 27$

Step	1	2
Constant	71,49	65,23
velocidad	-0,309	-0,309
T-Value	-6,68	-7,77
P-Value	0,000	0,000
abertura		0,082
T-Value		3,13
P-Value		0,005
S	1,97	1,69
R-Sq	64,07	74,50
R-Sq (adj)	62,64	72,38
Mallows Cp	9,8	2,3

La ecuación es:

$$X_T = 65,23 - 0,309 * (\text{Veloc. de la separadora}) + 0,082 * (\text{Abert. de compuerta})$$

### 4. RELACION DE $\delta$ SE TIENE:

Respuesta de  $\delta$  para 3 predictoras, con  $N = 27$

Step	1	2
No constant		
velocidad	0,01119	0,00643
T-Value	62,84	3,41
P-Value	0,000	0,002
Alim Fresca		0,0081
T-Value		2,53
P-Value		0,018
S	0,144	0,131
Mallows Cp	6,0	1,7

La ecuación es:

$$\delta = 0,00643 * (\text{Veloc. de la separadora}) + 0,0081 * (\text{Aliment. fresca})$$

**APÉNDICE G**  
**DETERMINACIÓN DEL MODELO PARA LA**  
**PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA**  
**COMPRESIÓN**

## PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO

Para la predicción de la resistencia del cemento, se ha realizado el siguiente arreglo de ecuaciones:

$$|A| = |B| \cdot |C| \tag{g.1}$$

Donde:

|A|: Matriz de  $4 \times 1$ , que contiene las variables dependientes (Resistencia a la compresión del cemento determinados experimentalmente, Tabla G.1).

|C|: Matriz de  $15 \times 1$ , que contiene las variables independientes (De composición química-mineralógica, fineza y fracción de tamaños, Tabla G.2 y G.3)

|B|: Matriz de  $4 \times 1$ , que contiene los coeficientes de la ecuación a determinar.

Se tiene:

$$|A| = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_3 \\ R_7 \\ R_{28} \end{bmatrix}; |C| = \begin{bmatrix} C3S \\ C2S \\ C3S/C2S \\ C3A/C4AF \\ LSF \\ Na_2O \\ SO_3 \\ CaO \text{ libre} \\ S.E \left(\frac{cm^2}{g}\right) \\ Pp (\mu m) \\ P_{80} (\mu m) \\ < 3 (\mu m) \\ 3 - 32 (\mu m) \\ 3 - 16 (\mu m) \\ 16 - 24 (\mu m) \end{bmatrix}$$

La selección de las variables que contribuyen en la resistencia del cemento, así como la solución de la matriz |B|, fueron determinadas por el método de regresión "Paso a Paso" con ayuda de un software estadístico.

TABLA G.1. Resistencia a la Compresión de las muestras de Cemento.

Nro de prueba	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )			
	24 horas	3 días	7 días	28 días
01	143,5	226,0	315,0	381,3
02	158,5	254,0	307,5	377,6
03	157,0	265,0	337,5	384,7
04	155,0	246,5	317,5	406,7
05	186,0	321,0	391,5	466,0
06	108,0	215,5	284,0	365,7
07	148,5	259,0	345,5	400,6
08	151,0	276,0	331,0	399,3
09	135,0	246,5	307,0	380,0
10	148,5	266,5	322,0	386,0
11	146,5	242,5	299,5	375,5
12	146,5	238,0	303,0	369,5
13	132,5	228,0	294,0	365,0
14	142,7	241,3	296,7	370,8
15	160,0	250,5	303,0	380,0
16	174,5	269,0	322,5	408,5
17	149,5	248,0	302,0	378,0
18	176,0	276,5	333,5	389,0
19	157,5	260,5	351,0	413,0
20	171,0	271,5	336,5	409,5
21	142,5	263,5	335,5	374,5
22	148,5	250,5	314,5	377,6
23	158,0	268,5	315,0	372,6
24	152,0	242,5	299,0	363,3
25	162,5	259,0	319,0	391,0
26	168,5	266,5	323,0	395,0
27	187,0	279,5	341,0	404,0
28	183,5	273,5	341,5	388,3
29	176,5	274,0	341,5	414,0
30	197,5	288,0	331,5	402,3
31	168,0	252,0	315,5	380,0
32	163,0	248,5	306,0	373,7
33	149,5	246,0	312,5	387,3
34	158,0	241,0	290,0	364,3
35	153,5	254,0	319,5	381,0
36	187,5	303,5	377,0	423,5
37	149,5	280,5	353,0	434,0
38	178,5	277,5	320,5	384,7
39	207,5	301,5	342,5	399,0
40	177,0	257,5	320,5	368,0
41	173,0	262,0	306,3	372,3
42	188,5	276,5	324,0	372,0
43	167,5	263,5	301,5	359,7
44	160,0	247,0	300,5	370,7
45	203,0	282,5	321,0	380,0
46	197,0	287,0	319,5	385,0
47	199,0	293,0	331,0	373,0
48	169,5	254,0	312,0	361,3
49	167,5	270,0	324,5	381,7
50	169,5	257,0	318,0	362,0
51	172,5	270,0	318,5	375,3
52	163,5	251,0	305,0	354,7
53	166,0	253,0	298,0	361,0

TABLA G.2. Propiedades químicas de las muestras de Cemento.

N	C3S	C2S	C3S/C2S	C3A/C4AF	% LSF	% Na <sub>2</sub> O	% SO <sub>3</sub>	% CaO libre
01	63,80	8,9	7,17	0,73	98,03	0,22	2,92	0,22
02	65,30	9,3	7,02	0,76	98,38	0,24	2,87	0,40
03	65,00	7,9	8,23	0,79	99,29	0,24	2,80	0,31
04	59,80	13,0	4,60	0,80	97,84	0,25	2,62	0,28
05	63,70	10,5	6,07	0,78	97,28	0,21	2,63	0,15
06	60,50	13,4	4,51	0,72	97,02	0,22	2,74	0,22
07	61,90	10,3	6,01	1,10	97,71	0,23	2,61	0,29
08	64,65	7,7	8,45	1,11	98,12	0,23	2,58	0,25
09	60,45	10,7	5,65	1,14	96,77	0,24	2,70	0,35
10	62,10	10,5	5,91	1,14	98,46	0,27	2,75	0,35
11	59,80	12,5	4,78	0,77	97,12	0,26	2,89	0,29
12	61,60	11,6	5,31	0,77	97,38	0,28	2,93	0,25
13	56,50	14,8	3,82	0,93	98,25	0,27	2,90	0,32
14	62,00	9,6	6,46	0,91	97,94	0,28	2,90	0,29
15	59,80	11,4	5,25	0,86	99,36	0,25	2,98	0,32
16	61,30	10,9	5,62	0,78	98,79	0,28	3,18	0,25
17	61,70	10,9	5,66	0,84	98,51	0,25	2,89	0,32
18	63,35	8,3	7,63	1,31	99,50	0,23	2,80	0,41
19	64,50	6,2	10,40	1,28	99,85	0,21	2,60	0,44
20	62,00	10,0	6,20	0,96	97,95	0,26	2,98	0,35
21	60,60	12,0	5,05	0,88	96,14	0,21	2,63	0,32
22	61,30	12,4	4,94	0,65	97,01	0,19	2,74	0,29
23	63,10	8,7	7,25	0,90	100,67	0,22	3,00	0,32
24	62,00	9,5	6,53	0,76	100,45	0,22	3,14	0,32
25	60,80	10,8	5,63	0,75	99,68	0,22	3,13	0,22
26	58,90	12,7	4,64	0,82	101,07	0,22	3,53	0,32
27	64,70	8,4	7,70	0,81	98,46	0,23	2,63	0,30
28	64,20	9,4	6,83	0,75	98,87	0,29	2,85	0,12
29	59,00	13,4	4,40	0,80	97,95	0,22	2,72	0,27
30	62,80	10,3	6,10	0,88	99,37	0,26	2,77	0,27
31	63,60	10,2	6,24	0,85	98,43	0,27	2,59	0,15
32	60,40	11,9	5,08	0,68	98,03	0,25	2,90	0,18
33	63,30	10,6	5,97	0,58	98,03	0,21	2,38	0,24
34	64,10	9,0	7,12	0,87	98,46	0,29	2,64	0,24
35	63,30	9,7	6,53	0,87	99,15	0,25	2,67	0,21
36	66,70	6,2	10,76	0,82	99,57	0,26	2,60	0,18
37	65,50	6,2	10,56	0,79	99,36	0,23	2,26	0,18
38	66,30	5,9	11,24	0,91	99,46	0,28	2,67	0,18
39	65,90	6,1	10,80	0,81	99,85	0,32	3,05	0,16
40	65,40	7,4	8,84	0,91	98,84	0,31	2,76	0,16
41	64,40	8,4	7,67	1,41	100,22	0,27	2,90	0,25
42	64,30	8,8	7,31	1,36	100,18	0,29	2,92	0,39
43	65,10	7,9	8,24	1,39	100,24	0,30	2,91	0,18
44	67,20	6,6	10,18	1,13	100,65	0,28	2,78	0,18
45	63,50	7,8	8,14	1,06	99,47	0,32	2,86	0,21
46	63,80	7,4	8,62	1,19	99,58	0,38	3,05	0,24
47	64,00	6,9	9,28	1,26	99,88	0,32	2,85	0,33
48	64,70	7,4	8,74	1,08	99,10	0,33	2,64	0,18
49	64,50	7,5	8,60	1,28	98,87	0,33	2,56	0,24
50	64,30	7,0	9,19	0,99	99,56	0,34	2,88	0,18
51	64,30	7,9	8,14	0,65	99,11	0,29	2,66	0,15
52	63,30	10,6	5,97	0,77	99,11	0,30	2,87	0,18
53	63,00	9,6	6,56	0,81	98,89	0,28	2,71	0,21

TABLA G.3. Fracción de tamaños y la Superficie Específica por muestra.

Nro	S.E (cm <sup>2</sup> /g)	Pp (μm)	P80 (μm)	<3 μm	3-32 μm	3-16 μm	16-24 μm
01	3080	23,56	37,13	8,58	63,27	33,27	16,74
02	3280	22,73	36,75	11,14	61,21	32,01	16,09
03	3350	21,62	35,12	10,39	64,54	33,95	16,71
04	3240	21,25	34,08	9,86	66,68	34,36	17,83
05	3850	18,85	29,33	9,96	72,90	40,26	19,12
06	3030	25,61	42,01	8,71	54,88	28,38	14,29
07	3210	22,37	35,62	8,65	65,59	34,88	16,83
08	3290	21,30	35,36	9,40	65,58	34,22	17,44
09	3420	22,54	36,40	8,80	64,31	35,08	16,12
10	3270	22,96	36,71	9,42	63,12	33,50	16,33
11	3100	23,06	36,32	8,97	64,06	33,12	17,08
12	3230	22,67	36,06	9,39	64,18	33,46	17,05
13	3125	22,78	35,77	8,93	65,02	33,24	17,64
14	3040	22,76	35,57	7,83	66,38	34,49	17,58
15	3365	21,95	36,37	8,76	64,68	34,27	16,78
16	3607	21,73	35,83	11,12	63,04	33,99	16,11
17	3100	23,43	37,00	8,85	63,00	32,99	16,40
18	3610	21,21	34,95	12,27	63,22	33,16	16,82
19	3660	21,36	34,83	11,67	64,01	33,24	17,37
20	3740	21,13	34,75	11,72	63,97	33,50	16,90
21	3210	22,15	35,53	10,95	63,46	32,32	17,35
22	3673	24,14	40,43	10,88	57,85	31,76	14,15
23	3420	20,89	35,78	10,27	63,99	33,89	16,64
24	3275	22,65	37,27	10,08	62,46	32,22	16,79
25	3430	22,26	36,31	9,71	64,39	33,39	17,49
26	3843	21,87	37,43	12,40	60,34	31,80	15,66
27	3810	17,12	27,46	15,18	70,67	38,69	20,75
28	3620	17,90	28,02	13,28	71,83	39,78	20,83
29	3610	17,90	28,46	14,26	70,35	38,55	20,50
30	3660	16,48	28,55	12,80	73,84	37,86	19,82
31	3480	17,90	30,53	12,05	71,28	35,67	17,71
32	3490	18,07	30,84	12,34	70,36	34,69	17,44
33	3460	18,06	31,08	12,58	69,57	34,74	16,80
34	3340	19,07	31,84	11,44	69,03	33,69	17,46
35	3380	19,23	32,75	12,30	66,20	33,26	15,78
36	3940	15,74	27,93	13,48	74,17	38,97	19,37
37	3610	16,98	27,88	16,08	69,08	39,20	18,95
38	3560	17,03	29,36	12,64	73,31	35,87	19,01
39	3780	16,23	28,88	14,18	72,66	36,88	17,75
40	3430	17,84	30,36	12,11	71,65	35,37	18,01
41	3450	18,86	30,98	9,39	72,99	36,74	18,09
42	3430	18,28	30,77	11,39	71,50	35,23	17,88
43	3480	18,66	32,06	12,87	67,09	33,82	16,43
44	3440	18,84	31,97	11,40	68,78	34,84	16,47
45	3780	16,97	25,94	13,86	73,71	40,88	21,71
46	3820	16,00	28,16	12,66	75,54	39,36	18,36
47	3720	17,61	27,97	15,18	70,01	37,88	20,87
48	3620	18,38	28,90	12,97	71,02	39,23	20,59
49	3780	16,60	29,69	13,69	71,18	37,64	16,43
50	3430	18,61	31,08	11,09	71,07	35,11	17,85
51	3390	18,73	31,06	10,82	71,36	34,96	18,34
52	3190	19,59	32,61	11,02	67,76	33,55	16,81
53	3290	19,64	32,73	10,50	68,04	34,42	16,48

**REPORTE ESTADÍSTICO****1. EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO I, A 24 HORAS**

Alpha-to-Enter: 0,15. Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Horas24 on 16 predictors, with N = 53

<b>Step</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>No constant</b>						
Blaine	0,0451	0,0329	0,0299	0,0250	0,0303	0,0307
T-Value	6,14	5,24	4,73	3,81	4,61	4,76
P-Value	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P80	-1,33	-2,51	-2,81	-3,45	-1,99	-2,58
T-Value	-5,23	-8,39	-8,46	-7,68	-2,74	-3,24
P-Value	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,002
3-32um	1,64	1,10	1,29	0,62	1,51	1,28
T-Value	3,15	2,57	3,01	1,18	2,45	2,07
P-Value	0,003	0,013	0,004	0,244	0,018	0,044
3-16um	-3,4	-1,7	-1,5	-1,2	-1,4	-1,6
T-Value	-2,33	-1,47	-1,25	-1,10	-1,33	-1,53
P-Value	0,024	0,147	0,218	0,277	0,190	0,132
16-24um	3,4	1,8	1,1	1,0	2,0	2,0
T-Value	2,09	1,40	0,85	0,80	1,58	1,57
P-Value	0,042	0,167	0,402	0,428	0,121	0,123
SO3		31,4	32,0	35,4	42,0	43,3
T-Value		5,35	5,59	6,12	6,89	7,17
P-Value		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Calibre			32	35	41	45
T-Value			1,88	2,13	2,61	2,88
P-Value			0,067	0,039	0,012	0,006
C3S				1,06	2,11	3,25
T-Value				2,04	3,24	3,46
P-Value				0,047	0,002	0,001
LSF					-2,26	-2,50
T-Value					-2,47	-2,75
P-Value					0,018	0,009
C3S/C2S						-1,7
T-Value						-1,65
P-Value						0,106
S	9,62	7,67	7,47	7,22	6,85	6,71

La ecuación es:

$$\begin{aligned}
 R_1 = & 3,251 * C_3S - 1,679 * \frac{C_3S}{C_2S} - 2,500 * LSF + 43,293 * \% SO_3 \\
 & + 45,140 * \%CaO_{Libre} + 0,031 * Blaine - 2,581 * P_{80} \\
 & + 1,281 (3 - 32 \mu m)\% - 1,625 * (3 - 16 \mu m)\% \\
 & + 2,002 * (16 - 24 \mu m)\%
 \end{aligned}$$

## 2. EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO I, A 3 DÍAS

Alpha-to-Enter: 0,15. Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Dias3 on 16 predictors, with N = 53

Step	1	2	3
No constant			
Blaine	0,0486	0,0467	0,0444
T-Value	5,32	5,13	4,90
P-Value	0,000	0,000	0,000
P80	0,08	0,55	0,60
T-Value	0,27	1,24	1,37
P-Value	0,791	0,222	0,178
3-32um	0,33	0,22	0,75
T-Value	0,51	0,34	1,05
P-Value	0,614	0,732	0,301
3-16um	1,5	1,7	1,7
T-Value	0,87	0,94	0,95
P-Value	0,390	0,351	0,345
16-24um	0,8	1,3	1,0
T-Value	0,42	0,63	0,48
P-Value	0,677	0,530	0,632
C2S		-1,37	-1,64
T-Value		-1,49	-1,78
P-Value		0,144	0,082
Na2O			-82
T-Value			-1,57
P-Value			0,124
S	12,0	11,8	11,7

La ecuación es:

$$R_3 = -1,642 * C_2S - 81,745 * Na_2O + 0,044 * Blaine + 0,595 * P_{80} \\ + 0,752 * (3 - 32 \mu m)\% + 1,660 * (3 - 16 \mu m)\% \\ + 0,957 * (16 - 24 \mu m)\%$$

### 3. EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO I, A 7 DÍAS

Alpha-to-Enter: 0,15. Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Dias7 on 16 predictors, with N 53

Step	1	2	3	4
No constant				
C3S/C2S	1,6	2,0	2,5	3,4
T-Value	0,87	1,37	1,97	2,72
P-Value	0,387	0,177	0,055	0,009
LSF	2,77	0,58	2,25	-2,16
T-Value	4,32	0,88	3,20	-1,21
P-Value	0,000	0,383	0,003	0,234
Pp	8,0	10,6	9,3	10,6
T-Value	1,91	3,15	3,16	3,76
P-Value	0,062	0,003	0,003	0,000
P80	-5,1	-6,2	-7,3	-2,9
T-Value	-1,94	-2,92	-3,89	-1,20
P-Value	0,058	0,005	0,000	0,236
<3um	4,0	-1,4	-2,7	1,5
T-Value	1,79	-0,68	-1,49	0,62
P-Value	0,080	0,499	0,142	0,536
Blaine		0,074	0,065	0,059
T-Value		5,28	5,28	4,93
P-Value		0,000	0,000	0,000
Na2O			-240	-259
T-Value			-4,07	-4,61
P-Value			0,000	0,000
3-32um				3,6
T-Value				2,65
P-Value				0,011
S	19,3	15,4	13,4	12,6

La ecuación queda:

$$R_7 = 2,837 * \left( \frac{C3S}{C2S} \right) + 0,345 * \%LSF - 242,323 * Na_2O + 0,044 * Blaine$$

$$+ 4,109 * P_p - 1,438 * P_{80} - 0,942 (< 3\mu m)\%$$

$$+ 4,374 * (3 - 16\mu m)\%$$

#### 4. EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO I, A 28 DÍAS

Alpha-to-Enter: 0,15. Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Dias28 on 16 predictors, with N = 53

Step	1	2	3	4	5
No constant					
C3S/C2S	1,200	1,600	1,800	1,700	9,300
T-Value	0,550	0,910	1,320	1,290	2,190
P-Value	0,584	0,367	0,193	0,205	0,034
C3A/C4AF	-13,00	-26,00	-12,000	-11,000	-9,000
T-Value	-0,86	-2,05	-1,120	-1,070	-0,870
P-Value	0,393	0,047	0,269	0,291	0,387
LSF	-2,600	-1,600	-0,900	-1,000	-0,300
T-Value	-0,830	-0,630	-0,460	-0,510	-0,170
P-Value	0,410	0,530	0,651	0,611	0,868
Pp	6,200	13,500	15,500	9,900	9,300
T-Value	0,790	2,100	2,950	1,690	1,620
P-Value	0,433	0,041	0,005	0,099	0,112
P80	3,300	-4,500	-6,500	-2,500	-4,500
T-Value	0,540	-0,870	-1,530	-0,540	-0,980
P-Value	0,595	0,391	0,134	0,590	0,332
<3um	7,500	-0,000	0,900	1,000	-1,200
T-Value	2,100	-0,000	0,320	0,390	-0,450
P-Value	0,041	0,998	0,748	0,700	0,658
3-32um	4,100	2,700	4,300	2,900	1,500
T-Value	1,800	1,430	2,770	1,690	0,860
P-Value	0,078	0,161	0,008	0,098	0,397
16-24um	2,600	-1,600	-4,400	-4,500	-5,100
T-Value	0,510	-0,390	-1,260	-1,360	-1,560
P-Value	0,611	0,697	0,215	0,183	0,126

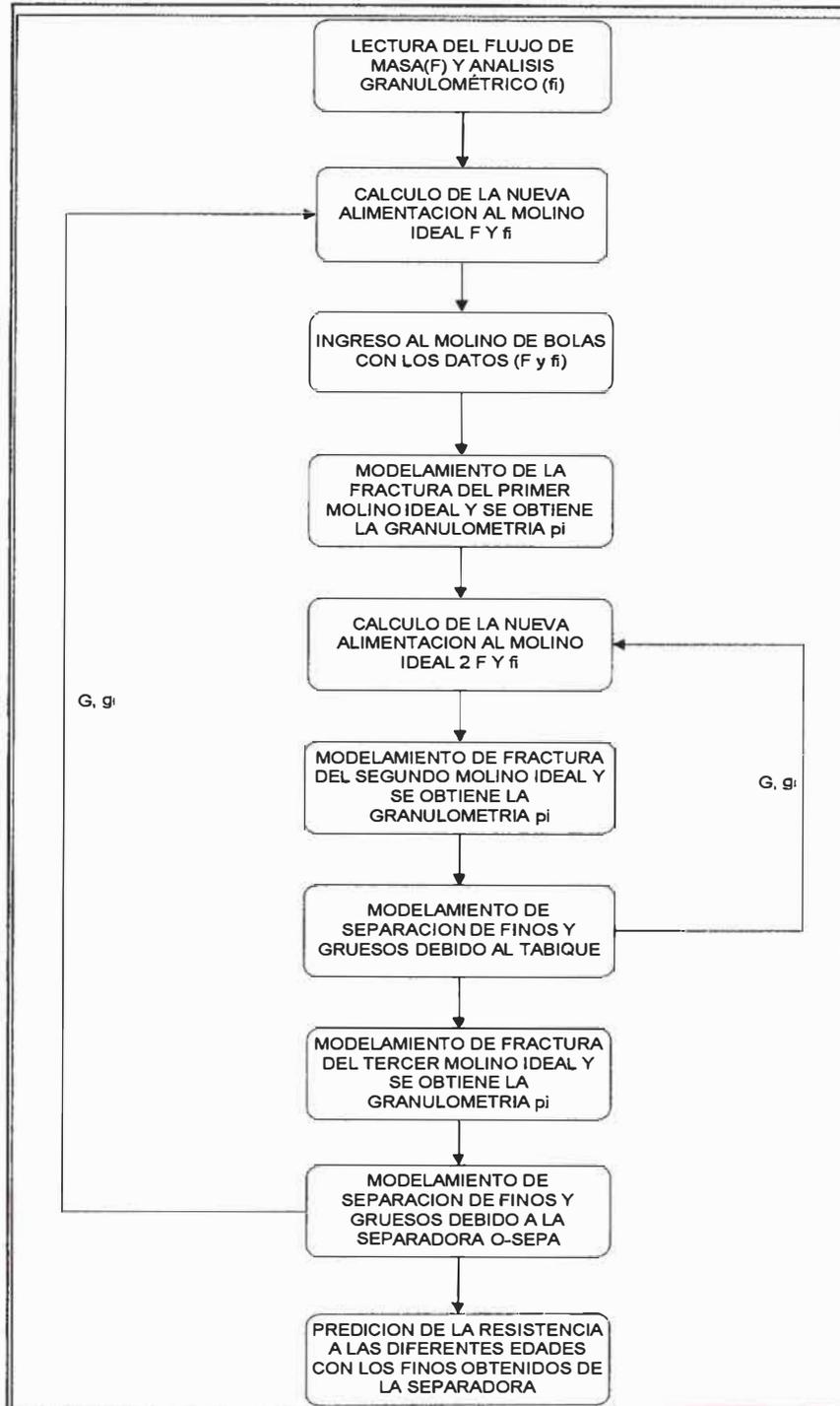
Blaine	0,081	0,067	0,048	0,049
T-Value	5,070	5,020	2,910	3,100
P-Value	0,000	0,000	0,006	0,004
Na <sub>2</sub> O		-306	-303	-296
T-Value		-4,800	-4,880	-4,910
P-Value		0,000	0,000	0,000
3-16 $\mu$ m			4,500	4,700
T-Value			1,920	2,060
P-Value			0,062	0,046
C <sub>2</sub> S				6,900
T-Value				1,870
P-Value				0,069
S	20,6	16,5	13,5	13,1
				12,7

La ecuación es:

$$\begin{aligned}
 R_{28} = & 7,025 * C_2S + 9,344 * \left(\frac{C3S}{C2S}\right) - 9,253 * \left(\frac{C3A}{C4AF}\right) - 296,345 * Na_2O \\
 & + 0,050 * Blaine + 9,329 * P_p - 4,933 * P_{80} - 1,537 (< 3\mu m)\% \\
 & + 1,320 * (3 - 32\mu m)\% + 4,652 * (3 - 16\mu m)\% \\
 & - 5,244 * (16 - 24\mu m)\%
 \end{aligned}$$

**APÉNDICE H**  
**SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y**  
**PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA,**

**DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELAMIENTO DEL PROCESO DE MOLIENDA, Y PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I**



Grafica F.1. Diagrama de flujo del proceso de molienda y predicción de la resistencia

**ANEXOS**

# **ANEXO – 1**

**PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO**

## PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO.

### 1. Extracción de Materias Primas.

Las materias primas como la caliza, arcilla amarilla, arcilla roja, fluorita, yeso, puzolana, son extraídas de las canteras por procesos de explotación, perforación y voladura para posteriormente llevarlas a su trituración.

#### 1.1. Explotación.

La obtención de materias primas para la industria del cemento se realiza usualmente en canteras explotadas en gran escala y a cielo abierto. Descubierta la roca, la explotación consiste en la formación de frentes de canteras por bancadas como se observa en la Figura I. A esto, se procede frecuentemente a una división del yacimiento en varios frentes, por niveles de explotación.



FIGURA I. Extracción de la caliza de la cantera.

Los frentes de cantera son ventajosos cuando hay necesidad de proceder a una explotación selectiva, como consecuencia de la composición química diferente y variable de la roca. En este caso, se puede explotar simultáneamente varios frentes de cantera en diferentes zonas de extracción, a fin de poder controlar la composición del crudo.

### 1.2. Perforación y Voladura.

La primera operación es la perforación de los taladros, estos bancos de trabajo son de hasta 15.5 metros de profundidad. Luego se carga con explosivos como el Anfo, y se procede a la voladura secuencial para lograr una mayor eficiencia. La Figura II muestra a la derecha perforación del terreno y a la izquierda la voladura.



FIGURA II. Perforación y Voladura.

### 1.3. Carguío y Acarreo.

Después de realizada la voladura, siguen las operaciones de carguío y acarreo utilizando cargadores frontales, pala hidráulica, camiones y tractores de Oruga.



FIGURA III. Cargadores frontales y camiones para el carguío y acarreo.

## 2. Trituración de Materias Primas

En la trituración de materias primas el material que ingresa debe ser reducido de tamaño para su posterior almacenaje con el fin de que en la mezcla correcta todos estos materiales ingresen a la molienda de crudo; el tamaño máximo lo determina el tipo de molino para el crudo (capacidad del molino de crudo). El número de etapas de trituración requeridas es determinado por el rango de reducción deseado y la abrasividad de la roca. Para lograr este rango de reducción usualmente se necesitan dos o más fases de trituración (primaria, secundaria, terciaria) y el tipo de trituradora depende de factores como abrasividad, pegajosidad, producción (ton/h), tamaño de la alimentación y consumo de energía.

Se pueden definir hasta 3 etapas de trituración:

### 2.1. Primaria.

La caliza extraída de la cantera es llevada a la chancadora primaria, del tipo denominado “cono”, que la tritura por presión reduciendo su tamaño desde un máximo de 1,5 m, hasta un mínimo de 25 cm. La Figura IV muestra el momento en que el camión descarga la caliza hacia la chancadora primaria, y como esta lo tritura. Después que el material sale reducido de la chancadora primaria, se deposita el material en una cancha de almacenamiento de acuerdo a su ley.



FIGURA IV. Chancadora Primaria.

## 2.2. Secundaria.

De la cancha de almacenamiento se transporta la caliza, dosificada según su ley, a las chancadoras secundarias donde se reduce su tamaño de 25 cm a un máximo de 19 mm para el caso de molienda posterior en un molino de bolas o un máximo de 50 milímetros para el caso de molienda posterior en Prensa de Rodillos.

## 2.3. Terciaria.

Cuando es requerido un producto con partículas finas (entre 50 a 22,5 milímetros, tamaño menor a lo especificado en la apertura de salida)

## 3. Molienda de Crudo.

### 3.1. Pre-homogenización.

En la molienda de crudo, lo importante la pre-homogenización del material para reducir las fluctuaciones químicas de su composición. La caliza se deposita en una cancha de tipo circular como se aprecia en la Figura V, en capas sucesivas horizontales por medio de una faja telescópica apiladora que recorre un ángulo prefijado. Una vez conseguida la altura necesaria de una ruma se pasa a preparar a otra. Mientras tanto, la ruma anterior es recuperada en forma perpendicular a su apilamiento, originándose un efecto de mezcla uniforme.

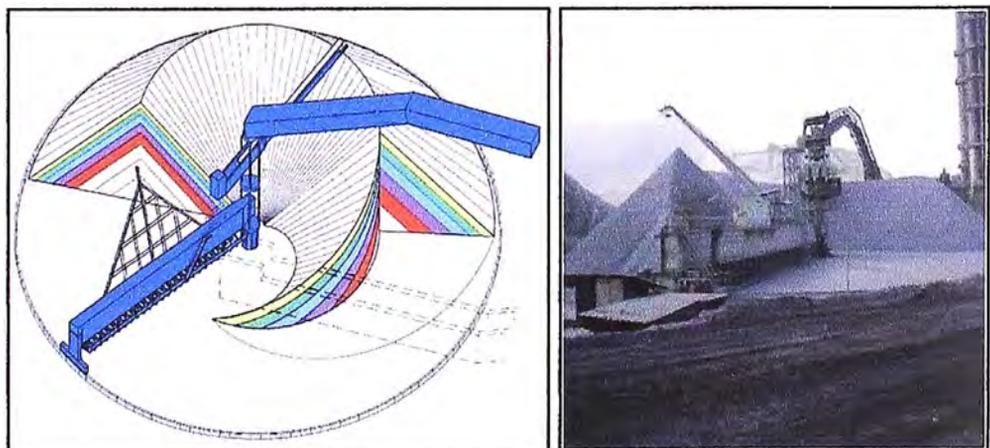


FIGURA V. Apilamiento y pre homogenización del material

### **3.2. Molienda.**

Los propósitos principales de la molienda de crudo son que el material que ingresa a la molienda deberá salir con la finura adecuada (tamaño de partículas y distribución del tamaño de partículas) necesarias para la producción de clínker con la calidad requerida. Se considerará también la proporción de los componentes del crudo en los rangos correctos, así como su mezclado y su secado para facilitar su transporte posteriormente.

El proceso se puede realizar en molino de bolas (cuyos cuerpos moledores son bolas de acero), donde la molienda se produce por atricción; o en prensa de rodillos (cuyos cuerpos moledores son rodillos), donde la molienda se efectúa por compresión.

## **4. Fabricación de Clínker**

En las etapas anteriores, el proceso de fabricación ha seguido sucesivas etapas de transformación física hasta llegar a la granulometría y homogeneidad requeridas. Pero el verdadero proceso de transformación se realiza cuando con este material se alimenta el horno, que es el reactor químico en donde se forma el clínker.

### **4.1. Precalentamiento.**

El crudo homogenizado es introducido mediante sistema de transporte neumático y debidamente dosificada desde los silos hacia la parte más alta de la torre, recorriéndola en sentido contrario a los gases produciéndose la transferencia de calor. En el intercambio de calor se produce transferencias térmicas por contacto íntimo entre la materia y los gases calientes que se obtienen del horno, a temperaturas de 950 a 1100°C, iniciándose de esta manera el proceso de descarbonatación (obtención del óxido de calcio a partir del carbonato de calcio de la piedra caliza), en un sistema de 4 a 6 ciclones en cascada, que se encuentran al interior de una torre de concreto armado de varios pisos, esto se aprecia en la Figura VI.

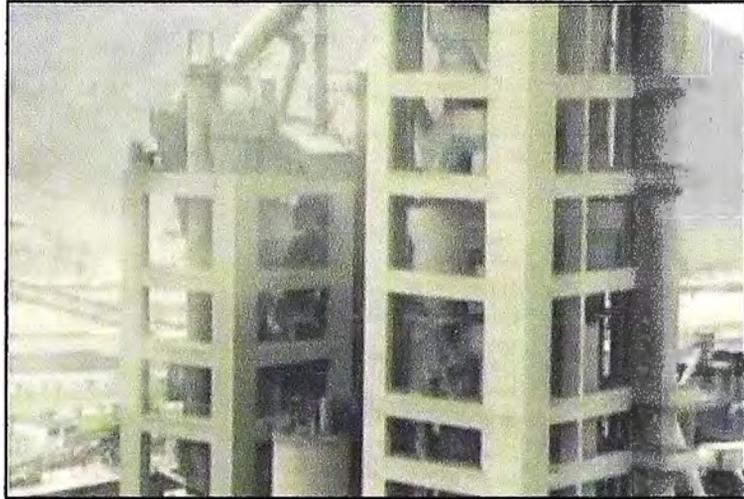


FIGURA VI. Ciclonos en Cascada para la Etapa de Precaentamiento

#### 4.2. Clinkerización.

El crudo descarbonatado ingresa a los hornos y por efecto del calor generado por la combustión del carbón o petróleo residual en un quemador situado en el extremo de salida, sufre transformaciones físicas y químicas, llegando a obtenerse el producto llamado clínker a temperaturas del orden de los 1400 a 1450 °C.

El horno rotativo, que se muestra en la Figura VII, es un tubo cilíndrico cuyas dimensiones oscila entre 60 y 90 m de largo y 3 a 6 m de diámetro, montado sobre 3 o 4 bases, con sus respectivos rodillos de soporte que permiten la rotación del tubo apoyado sobre llantas, con una pendiente de 3% a 4% hasta la descarga. Interiormente está revestido con ladrillos refractarios para proteger el tubo y disminuir la pérdida de calor.

La quema de combustibles genera gases que son transportados por un ventilador principal desde el horno a través de la torre del precalentador luego hacia un filtro para finalmente dejarlos salir a la atmósfera.



FIGURA VII. Horno Rotativo para la Clinkerización.

#### 4.3. Enfriamiento.

El clínker descargado por el horno, pasa a la tercera parte del circuito de Clinkerización, que se da en los enfriadores. Esto consta de varias superficies escalonadas compuestas por placas fijas y móviles alternadas, con unos pequeños orificios por donde pasa el aire que es insuflado por la parte inferior, por la acción de ventiladores con el objeto de enfriar el clínker de aproximadamente 1200 °C hasta alrededor de 180 °C. En la parte final de estas unidades se encuentran instaladas trituradoras de rodillos, accionadas por motores hidráulicos, para reducir el tamaño del clínker a un máximo de 5 cm. La Figura VIII muestra el clínker enfriado por aire insuflado, por medio de una placa movable.



FIGURA VIII. Enfriamiento del clínker.

Rango de temp. (°C)	Tipo de reacción
Calentamiento	
20 - 100	Evaporación del agua libre
100 - 300	Perdida del agua absorbida físicamente
400 - 900	Eliminación del H <sub>2</sub> O estructural (H <sub>2</sub> O y grupos OH) de los minerales de arcilla
500	Cambio estructural en los minerales silicatos
600 - 900	Disociación de los carbonatos (CO <sub>2</sub> es liberado).
800	Formación de belita, productos intermedios, aluminatos y ferritas
1250	Formación de la fase líquida (aluminatos y ferritas)
~1450	Reacciones finales y re cristalización de alitas y belitas
Enfriamiento	
1300–1240	Cristalización de la fase líquida, principalmente en aluminatos y ferritas

FIGURA IX. Reacciones en la fabricación de clínker

## 5. Molienda de Cemento

En la molienda de cemento, el clínker se lo muele en conjunto con materiales aditivos, tales como el yeso, para obtener el cemento portland Tipo I, en proporciones definidas. Debido a la finura que se trabaja en los molinos de cemento, esta parte del proceso es la de mayor consumo energético específico en la planta.

### 5.1. Molino de Bolas.

Los molinos de bolas son cilindros de acero, revestidos interiormente por blindajes acerados, pueden estar constituidos por una o dos cámaras separadas por un diafragma central. En cada una de las

cámaras se encuentran las cargas de bolas (grandes para la primera cámara, entre 50 y 100 mm; medianas y pequeñas para la segunda cámara, entre 15 y 50 mm), que son diseñadas para dar una determinada finura.



FIGURA X. Molino de bolas.

## 5.2. Prensa de Rodillos.

Las Prensas de Rodillos están constituidas por dos cilindros macizos que giran en sentido contrario que comprimen el Clinker y el Yeso haciéndoles pasar necesariamente por el espacio regulable entre ellos, luego este producto que sale en forma de “queque”, pasa por un desaglomerador que desmenuza el “queque” formado, para luego pasar a las Separadoras que clasifican lo fino como producto terminado (Cemento) y lo grueso lo regresa a la Prensa para su molienda. Finalmente el Cemento es trasladado a los Silos de Envase, por medio de las fajas transportadoras y/o la bomba de transporte neumático.



FIGURA XI. Prensa de rodillos.

## 6. Envase y Despacho

Para el envase y despacho de cemento existen máquinas envasadoras automáticas y manuales. Los aplicadores automáticos, obtienen un mayor rendimiento y un ambiente libre de polvo. La Figura XII muestra a la derecha una máquina rotativa para envasado manual, y a la izquierda una máquina automática de envasado.

Desde los silos, el cemento es extraído neumática y mecánicamente por aerodeslizadores y por elevadores para ser llevados a una tolva; luego pasarán por una zaranda para la eliminación de cualquier objeto no deseado o tamaño no deseado del grano, así el cemento es ensacado y todo el polvo generado va hacia los filtros.

El despacho del cemento portland que produce la planta, se realiza en bolsas de 42,5 Kg como a granel. Las bolsas se transportan a las plataformas de los camiones por un sistema de fajas mientras que los cargadores se limitan a cogerlas y acomodarlas. La figura XIII muestra el transporte y despacho de bolsas de cemento.



FIGURA XII Máquina Rotativa manual y automática para envasado.



FIGURA XIII Transporte y Despacho de cemento.

## **ANEXO – 2**

### **NORMA ASTM PARA LA RESISTENCIA DEL CEMENTO**



Designación: C 109/C 109M - 05

## Método Normalizado de Ensayo de Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Especímenes Cúbicos de 2 in. o [50-mm])<sup>1</sup>

Esta norma ha sido publicada bajo la designación fija C 109 C 109 M; el número inmediatamente siguiente a la designación indica el año de adopción inicial o, en caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación. Una épsilon ( $\epsilon$ ) como superíndice indica una modificación editorial desde la última revisión o reaprobación.

*Esta norma ha sido aprobada para su utilización por agencias del Department of Defense.*

### 1. Alcance\*

1.1 Este Método de Ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, utilizando especímenes cúbicos de 2 in. o [50 mm].

NOTA 1—El Método de Ensayo C 349 provee un procedimiento alternativo para esta determinación (no es para ser utilizado en ensayos de aceptación).

1.2 Este método de ensayo trata la aplicación del ensayo utilizando unidades pulgadas-libras o unidades SI. Los valores indicados en cualquier sistema deben ser considerados separadamente como la norma. Dentro del texto, las unidades SI son mostradas entre corchetes. Los valores indicados en cada sistema no son exactamente equivalentes; por lo tanto, cada sistema debe ser utilizado independientemente del otro. La combinación de valores de dos sistemas puede resultar en la no conformidad con la especificación.

1.3 Los valores en unidades SI deben ser obtenidos por medición en unidades SI o por conversión apropiada, utilizando las Reglas de Conversión y Redondeo dadas en la Norma IEEE/ASTM SI 10, de mediciones hechas en otras unidades.

1.4 *Esta norma no pretende dirigir todas las inquietudes sobre seguridad, si las hay, asociadas con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su utilización. (Advertencia: Las mezclas cementicias hidráulicas son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas en la piel y tejidos en caso de exposición prolongada.)<sup>2</sup>*

### 2. Documentos Citados

#### 2.1 Normas ASTM:<sup>3</sup>

C 91 Specification for Masonry Cement

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement

C 150 Specification for Portland Cement

C 230 Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

C 349 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)

C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes

C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements

C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

<sup>1</sup> Este método de ensayo está bajo la jurisdicción del *Committee C01 on Cement* de la ASTM y es responsabilidad directa del *Subcommittee C01.27 on Strength*.

Versión actual aprobada el 1 de julio de 2005. Publicada en agosto de 2005. Aprobada inicialmente en 1934. Última versión previa aprobada en 2002 como C 109/C 109M - 02.

<sup>2</sup> Ver la sección en Seguridad, *Manual of Cement Testing, Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01

<sup>3</sup> Para consultar las normas ASTM citadas, visite el sitio web de ASTM, [www.astm.org](http://www.astm.org), o contacte el Servicio de Atención al Cliente de ASTM en [service@astm.org](mailto:service@astm.org). Para obtener información sobre *Annual Book of ASTM Standards*, consulte la página titulada *Document Summary* en el sitio web de ASTM.

\* Al final de esta norma aparece una sección de Resumen de Cambios

C 778 Specification for Standard Sand  
C 989 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars  
C 1005 Specification for Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements  
C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement  
C 1328 Specification for Plastic (Stucco) Cement  
C 1329 Specification for Mortar Cement  
C 1437 Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar  
IEEE/ASTM SI 10 Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System

### 3. Resumen del Método de Ensayo

3.1 El mortero utilizado consiste en 1 parte de cemento y 2.75 partes de arena dosificados en masa. Los cementos portland o portland incorporador de aire son mezclados con relaciones especificadas de agua-cemento. El contenido de agua para otros cementos es el suficiente para obtener una fluencia de  $110 \pm 5$  en 25 golpes de la mesa de ensayo de fluencia. Los cubos de ensayo de dos pulgadas o [50 mm] son compactados por apisonamiento en dos capas. Los cubos son curados un día en los moldes y luego desmoldados e inmersos en agua de cal hasta ser ensayados.

### 4. Significado y Utilización

4.1 Este método de ensayo provee un medio de determinación de resistencia a la compresión de cemento hidráulico y otros morteros y los resultados pueden ser utilizados para determinar el cumplimiento con las especificaciones. Además, este método de ensayo es citado por numerosas otras especificaciones y métodos de ensayo. Se debe tener cuidado en la utilización de los resultados de este método de ensayo para predecir la resistencia de concretos.

### 5. Aparatos

5.1 *Pesas y Dispositivos de Peso*, deben cumplir con los requisitos de la Especificación C 1005. El dispositivo de peso debe ser evaluado en precisión y tendencia para una carga total de 2000 g.

5.2 *Probetas Graduadas de vidrio*, de capacidades adecuadas (de preferencia suficientemente grandes para medir el agua de mezclado en una operación única) para entregar el volumen indicado a 20 °C. La variación admisible debe ser  $\pm 2$  mL. Estas probetas graduadas deben estar subdivididas al menos cada 5 mL, pero las líneas de graduación pueden ser omitidas para los 10 mL inferiores para probetas graduadas de 250 mL y para los 25 mL inferiores de una probeta graduada de 500 mL. Las líneas principales de graduación deben estar en círculo y deben estar numeradas. Las graduaciones menores deben extenderse al menos un séptimo del perímetro, y las graduaciones intermedias deben extenderse al menos un quinto del perímetro.

5.3 *Moldes de Especímenes*, para especímenes cúbicos de 2 in. o [50 mm] deben ser ajustados herméticamente. Los moldes no deben tener más de tres compartimentos cúbicos y deben ser separables en no más de dos partes. Las partes de los moldes cuando están ensambladas deben ser sostenidas juntos en forma segura. Los moldes deben estar hechos de metal duro no atacado por el mortero de cemento. Para moldes nuevos el número de dureza Rockwell del metal no debe ser menor a 55 HRB. Los lados de los moldes deben ser suficientemente rígidos para evitar ensanchamiento o alabeo. Las caras interiores de los moldes deben ser superficies planas y deben cumplir con las tolerancias de la Tabla 1.

5.4 *Mezcladora, Tazón y Paleta*, una mezcladora mecánica activada eléctricamente del tipo equipada con paleta y tazón de mezclado, especificada en la Práctica C 305.

5.5 *Mesa y Molde de Ensayo de Fluencia*, conforme a los requisitos de la especificación C 230.

5.6 *Pisón*, un material no absorbente, no abrasivo, no quebradizo como un compuesto de goma que tenga una dureza de durómetro Shore de Escala A de  $80 \pm 10$  o madera de roble estacionado convertido en no absorbente por inmersión durante 15 min en parafina a aproximadamente 392 °F o [200 °C], debe tener una sección transversal de aproximadamente  $\frac{1}{2}$  por 1 in. o [13 por 25 mm] y una longitud conveniente de aproximadamente 5 a 6 in. o [120 a 150 mm]. La cara de apisonamiento debe ser plana y perpendicular a la longitud del pisón.

5.7 *Fratás*, con una cuchilla de acero de 4 a 6 in. [100 a 150 mm] de longitud, con cantos rectos.

5.8 *Gabinete o Cuarto Húmedo*, conforme a los requisitos de la Especificación C 511.

5.9 *Máquina de Ensayo*, del tipo hidráulico o de tornillo, con suficiente abertura entre la superficie superior de carga y la superficie inferior de carga de la máquina para permitir la utilización de aparatos de verificación. La carga aplicada al espécimen de ensayo debe ser indicada con una exactitud del  $\pm 1.0\%$ . Si la carga aplicada por la máquina de compresión es registrada en un cuadrante, el cuadrante debe estar provisto con una escala graduada que pueda ser leída al menos al  $0.1\%$  más cercano de la carga total de la escala (Nota 2). El cuadrante debe ser legible dentro del  $1\%$  de la carga indicada a cualquier nivel de carga dada dentro del rango de carga. En ningún caso debe considerarse que el rango de carga de un cuadrante incluye cargas por debajo de un valor que sea 100 veces el cambio más pequeño de carga que puede ser leído sobre la escala. La escala debe ser provista con una línea de graduación igual al cero y numerada de esa manera. La aguja del cuadrante debe ser de longitud suficiente para alcanzar las marcas de graduación; el ancho del extremo de la aguja no debe exceder la distancia libre entre las graduaciones más pequeñas. Cada cuadrante debe ser equipado con un ajuste a cero que sea fácilmente accesible desde fuera de la caja del cuadrante, y un dispositivo adecuado que en todo momento antes de ser reajustado, indique la carga máxima aplicada al espécimen con una exactitud del  $1\%$ .

5.9.1 Si la carga de la máquina de ensayo es indicada en forma digital, el cuadrante numérico debe ser suficientemente grande para ser leído fácilmente. El incremento numérico debe ser igual o menor que el  $0.10\%$  de la carga total de la escala de un rango de carga dado. En ningún caso el rango de carga verificado debe incluir cargas menores que el menor incremento numérico multiplicado por 100. La exactitud de la carga indicada debe estar dentro del  $1.0\%$  para cualquier valor mostrado dentro del rango de carga verificado. Se deben tomar precauciones para ajustar e indicar el cero verdadero a carga cero. Se debe proveer un indicador de carga máxima que en todo momento antes de ser reajustado indique la carga máxima aplicada al espécimen dentro de una exactitud de sistema del  $1\%$ .

NOTA 2—Se considera que lo más cerca que puede leerse es  $1/50$  in. o [0.5 mm] a lo largo del arco descrito por el extremo de la aguja. Además una mitad del intervalo de la escala es aproximadamente lo que puede ser razonablemente leído cuando el espaciamiento del mecanismo indicador de carga está entre  $1/25$  in. o [1 mm] y  $1/16$  in. o [1.6 mm]. Cuando el espaciamiento está entre  $1/16$  in. o [1.6 mm] y  $1/8$  in. o [3.2 mm], se puede leer un tercio del intervalo de la escala con certeza razonable. Cuando el espaciamiento es  $1/8$  in. o [3.2 mm] o más, se puede leer un cuarto del intervalo de la escala con certeza razonable.

**TABLA 1 Variaciones Admisibles de Moldes de Especímenes**

Parámetro	Moldes Cúbicos de 2 in.		Moldes Cúbicos de [50-mm]	
	Nuevo	En Utilización	Nuevo	En Utilización
Calidad de plano de los lados	<0.001 in.	<0.002 in.	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distancia entre lados opuestos	2 in. $\pm$ 0.005	2 in. $\pm$ 0.02	[50 mm $\pm$ 0.13 mm]	[50 mm $\pm$ 0.50 mm]
Altura de cada compartimento	2 in. + 0.01 in. to - 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to - 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm] to - 0.13 mm]	[50 mm + 0.25 mm] to - 0.38 mm]
Ángulo entre caras adyacentes <sup>^</sup>	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°

<sup>^</sup> Medido en puntos ligeramente fuera de la intersección. Medido separadamente para cada compartimento entre todas las caras interiores y la cara adyacente y entre las caras interiores y los planos superior e inferior del molde.

5.9.2 El apoyo superior debe ser un bloque de metal endurecido con asiento esférico, firmemente fijado al centro del cabezal superior de la máquina. El centro de la esfera debe yacer al centro de la superficie del bloque en contacto con el espécimen. El bloque debe estar sujeto estrechamente en su asiento esférico, pero debe estar libre para inclinarse en cualquier dirección. Un bloque de apoyo de metal endurecido debe ser utilizado debajo del espécimen para minimizar el desgaste del plato inferior de la máquina. Para facilitar un centrado exacto del espécimen de ensayo en la máquina de compresión, uno de los dos bloques de apoyo debe tener un diámetro o diagonal de entre 2.83 in. [70.7 mm] (Vea Nota 3) y 2.9 in. [73.7 mm]. Cuando el bloque superior cumpla este requisito, el bloque inferior debe ser mayor que 2.83 in. [70.7 mm]. Cuando el bloque inferior cumpla este requisito, el diámetro o diagonal del bloque superior debe estar entre 2.83 y  $3\frac{1}{8}$  in. [70.7 y 79.4 mm]. Cuando el bloque inferior es el único bloque con un diámetro o diagonal entre 2.83 y 2.9 in. [70.7 y 73.7 mm], el bloque inferior debe ser utilizado para centrar el espécimen de ensayo. En ese caso, el bloque inferior debe estar centrado con respecto al bloque de apoyo superior y sujeto en posición por un medio adecuado. Las superficies de los bloques de apoyo proyectadas para contacto con el espécimen deben tener un número de dureza Rockwell de no menos de 60 HRC. Estas superficies no deben apartarse de su plano en más de 0.005 in. [0.013 mm] cuando los bloques son nuevos y deben ser mantenidos dentro de una variación admisible de 0.001 in. o [0.025 mm].

NOTA 3—La diagonal de un cubo de 2 in. [50 mm] es 2.83 in. [70.7 mm].

## 6. Materiales

### 6.1 Arena Graduada Normalizada:

6.1.1 La arena (Nota 4) utilizada para realizar los especímenes de ensayo debe ser arena de sílice natural conforme a los requisitos para arena graduada normalizada en la especificación C 778.

NOTA 4—*Segregación de Arena Graduada*—La arena graduada normalizada debería ser manejada de manera tal de evitar la segregación, pues las variaciones en la gradación granulométrica de la arena causan variaciones en la consistencia del mortero. Cuando se vacíen recipientes o sacos, debería tenerse cuidado para evitar la formación de montículos de arena o cráteres de arena, bajo los taludes de los cuales las partículas más gruesas rodarán. Los recipientes deberían ser de tamaño suficiente para permitir estas precauciones. Los dispositivos para vaciar la arena de los recipientes por gravedad no deberían ser usados.

## 7. Temperatura y Humedad

7.1 *Temperatura*—La temperatura del aire en la vecindad de la losa de mezclado, los materiales secos, moldes, placas de base y tazón de mezclado, deben ser mantenidos entre  $73.5 \pm 5.5$  °F o  $[23.0 \pm 3.0$  °C]. La temperatura del agua de mezclado, el gabinete húmedo o el cuarto húmedo y el agua en el tanque de almacenamiento debe ser ajustada a  $73.5 \pm 3.5$  °F o  $[23 \pm 2$  °C].

7.2 *Humedad*—La humedad relativa del laboratorio no debe ser menor de 50 %. El gabinete húmedo o cuarto húmedo debe cumplir con los requisitos de la Especificación C 511.

## 8. Especímenes de Ensayo

8.1 Haga dos o tres especímenes de una amasada de mortero para cada período de ensayo o edad de ensayo.

## 9. Preparación de Moldes de Especímenes

9.1 Aplique un recubrimiento delgado de un desencofrante a las caras interiores del molde y placas de base no absorbentes. Aplique aceites o grasas utilizando un paño impregnado u otro medio adecuado. Seque las caras del molde y la placa de base con un paño si es necesario para quitar cualquier exceso del desencofrante y para alcanzar un recubrimiento aún más delgado en las superficies interiores. Cuando se use un lubricante en aerosol, rocíe el desencofrante directamente sobre las caras del molde y la placa de base desde una distancia de 6 a 8 in. o [150 a 200 mm] para lograr una cobertura completa. Después de rociar, seque la superficie con un paño si es necesario para quitar cualquier exceso de lubricante en aerosol. El recubrimiento residual debería ser justo el suficiente para permitir que después de una presión ligera de un dedo se mantenga una impresión de dedo bien determinada (Nota 5).

9.2 Selle las superficies donde las mitades del molde se junten aplicando un recubrimiento de grasa de copa liviana como un petrolato. La cantidad debería ser suficiente para escaparse levemente cuando las dos mitades son apretadas juntas. Quite cualquier exceso de grasa con un paño.

9.3 Después de colocar el molde sobre su placa de base (y ajustar, si es tipo abrazadera) quite cuidadosamente con un paño seco cualquier exceso de aceite o grasa de la superficie del molde y la placa de base a la que se le ha de aplicar un sellante hermético al agua. Como un sellante, utilice parafina, cera microcristalina, o una mezcla de tres partes de parafina cada cinco partes de resina en masa. Licue el sellante calentando entre 230 y 248 °F o [110 y 120 °C]. Efectúe un sello hermético al agua aplicando el sellante licuado en las líneas de contacto externas entre el molde y su placa de base.

Nota 5—Como los lubricantes en aerosol se evaporan, se debería controlar que los moldes tengan un recubrimiento suficiente de lubricante inmediatamente antes de ser utilizados. Si pasa un período extenso de tiempo desde el tratamiento, puede ser necesario un nuevo tratamiento.

NOTA 6—*Moldes Herméticos al Agua*—Se puede encontrar que la mezcla de parafina y resina especificada para sellar las juntas entre moldes y placas de base es difícil de quitar cuando se limpian los moldes. Es admisible la utilización de parafina pura si se asegura una junta hermética al agua, pero debido a la baja resistencia de la parafina debería ser utilizada sólo cuando el molde no es ajustado a la placa de base únicamente por la parafina. Una junta hermética al agua puede ser asegurada con parafina sola calentando levemente el molde y la placa de base antes de cepillar la junta. Se debería permitir que los moldes así tratados vuelvan a la temperatura especificada antes de su utilización.

## 10. Procedimiento

### 10.1 Composición de Morteros:

10.1.1 Las dosificaciones de materiales para mortero normal debe ser una parte de cemento a 2.75 partes de arena graduada normalizada por peso. Utilice una relación agua-cemento de 0.485 para todos los cementos portland y 0.460 para todos los cementos portland incorporadores de aire. La cantidad de agua de mezclado para cementos distintos del portland y portland incorporador de aire debe ser tal que produzca una fluencia de  $110 \pm 5$  determinada de acuerdo con 10.3 y debe ser expresada como porcentaje en peso de cemento.

10.1.2 Las cantidades de materiales a ser mezcladas a la vez en la amasada de mortero para hacer seis a nueve especímenes de ensayo deben ser las siguientes:

	Número de Especímenes	
	6	9
Cemento, g	500	740
Arena, g	1375	2035
Agua, mL		
Portland (0.485)	242	359
Portland incorporador de aire (0.460)	230	340
Otros (para fluencia de $110 \pm 5$ )		

### 10.2 Preparación del Mortero:

10.2.1 Mezcle mecánicamente de acuerdo con el procedimiento dado en la Práctica C 305.

### 10.3 Determinación de la Fluencia:

10.3.1 Determine la fluencia de acuerdo con el procedimiento dado en el Método de Ensayo C 1437.

10.3.2 Para cementos portland y portland incorporadores de aire, simplemente registre la fluencia.

10.3.3 En el caso de cementos distintos de los cementos portland o portland incorporadores de aire, haga morteros de prueba con porcentajes variables de agua hasta obtener la fluencia especificada. Haga cada prueba con mortero fresco.

10.3.4 Inmediatamente después de completar el ensayo de fluencia, regrese el mortero de la mesa de ensayo de fluencia al tazón de mezclado. Rápidamente raspe los lados del tazón y transfiera dentro de la amasada el mortero que pueda haber recolectado en el lado del tazón y luego vuelva a mezclar la amasada entera 15 s a velocidad media. Al terminar el mezclado, la paleta de mezclado debe ser sacudida para volcar el exceso de mortero al tazón de mezclado.

10.3.5 Cuando una amasada duplicada se vaya a hacer inmediatamente para especímenes adicionales, el ensayo de fluencia puede ser omitido y se puede permitir que el mortero permanezca en el tazón de mezclado 90 s sin cubrir. Durante los últimos 15 s de este intervalo, rápidamente raspe los lados del tazón y vuelque hacia la amasada el mortero que pueda haber recolectado en el lado del tazón. Luego vuelva a mezclar durante 15 s a velocidad media.

### 10.4 Moldeado de Especímenes de Ensayo:

10.4.1 Complete la compactación del mortero en los moldes por apisonamiento manual o por un método alternativo calificado. Los métodos alternativos incluyen la utilización de mesa vibradora o dispositivos mecánicos pero no se limitan a ellos.

10.4.2 *Apisonamiento Manual*—Comience a moldear los especímenes dentro de un tiempo total no mayor de 2 min y 30 s después de completar la mezcla inicial de la amasada del mortero. Coloque una capa de mortero de alrededor de 1 in. o [25 mm] (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos los compartimentos del cubo. Apisone el mortero en cada compartimento cúbico 32 veces en aproximadamente 10 s en 4 rondas, cada ronda debe ser en ángulos rectos a las otras y consistir en ocho golpes adjuntos sobre la superficie del espécimen, como se ilustra en la Figura 1. La presión de apisonado debe ser justo la suficiente para asegurar el llenado uniforme de los moldes. Las 4 rondas de apisonado (32 golpes) del mortero deben ser completadas en un cubo antes de seguir con el siguiente. Cuando el apisonamiento de la primera capa en todos los compartimentos cúbicos se ha completado, llene los compartimentos con el mortero restante y luego apisone como se especificó para la primera capa. Durante el apisonamiento de la segunda capa, introduzca el mortero forzado hacia fuera sobre la parte superior de los moldes después de cada ronda de apisonamiento con los dedos usando guantes y el pisón hasta completar cada ronda y antes de comenzar la siguiente ronda de apisonamiento. Al completar el apisonamiento, la parte superior de todos los cubos

debería extenderse levemente por encima de las partes superiores de los moldes. Introduzca el mortero que haya sido forzado hacia fuera por sobre las partes superiores de los moldes con un fratás y suavice los cubos pasando el lado plano del fratás (con el primer canto levemente levantado) una vez a través de la parte superior de cada cubo en ángulos rectos a la longitud del molde. Luego para nivelar el mortero y hacer el mortero que sobresale por encima de la parte superior del molde de un espesor más uniforme, pase el lado plano del fratás (con el primer canto levemente levantado) suavemente una vez a lo largo de la longitud del molde. Corte el mortero a una superficie plana a nivel con la parte superior del molde pasando el canto recto del fratás (sostenga casi perpendicular al molde) con un movimiento de sierra sobre la longitud del molde.

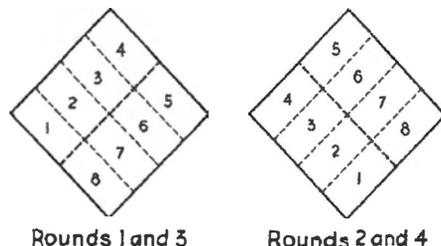


FIG. 1 Orden de Apisonamiento en el Moldeado de Especímenes de Ensayo

10.4.3 *Métodos Alternativos*—Puede utilizarse cualquier método de compactación que cumpla con los requisitos de calificación de esta sección. El método de compactación consiste en un procedimiento, equipo y dispositivo de compactación específicos, seleccionados y utilizados de manera consecuente por un laboratorio específico. El tamaño de la amasada de mortero del método puede ser modificado para adaptarse a los aparatos, siempre que la dosificación se mantenga en la misma relación dada en 10.1.2.

10.4.3.1 Se requieren calificaciones separadas para las siguientes clasificaciones:

Clase A, *Cementos no incorporadores de aire*—para utilizar en concreto, tal como el vendido bajo las especificaciones C 150, C 595, y C 1157.

Clase B, *cementos incorporadores de aire*—para utilizar en concreto, tal como el vendido bajo las especificaciones C 150, C 595, y C 1157.

Clase C, *Cementos de albañilería, Mortero y Estuco*—tal como los vendidos bajo las especificaciones C 91, C 1328, y C 1329.

10.4.3.2 Un método alternativo puede ser utilizado sólo para ensayar los tipos de cementos dados en 10.4.3.1, para el cual ha sido calificado.

10.4.3.3 Se puede utilizar además para las determinaciones del índice de actividad de resistencia para cenizas volantes y escoria, tal como las vendidas bajo las especificaciones C 618 y C 989, siempre que el método alternativo haya calificado para ambas clases de cementos: Clase A y Clase C.

10.4.4 *Procedimiento de Calificación*—Contacte CCRL para comprar muestras de cemento que hayan sido utilizadas en el Programa de Habilidad de Muestreo (PSP). Se requerirán cuatro muestras (de 5 Kg cada una) de la clase a ser calificada para completar una sola calificación (Vea Nota 7).

10.4.4.1 En un día, prepare amasadas para réplicas de 6 cubos o 9 cubos utilizando uno de los cementos y cuele un mínimo de 36 cubos. Complete una ronda de ensayos sobre cada cemento en diferentes días. Almacene y ensaye todos los especímenes como se prescribe en las secciones de abajo. Ensaye todos los cubos a la edad de 7 días.

10.4.4.2 Tabule los datos de la resistencia a la compresión y complete el análisis matemático indicado en el Anexo A1.

10.4.5 *Recalificación del Método Alternativo de Compactación:*

10.4.5.1 La recalificación del método debe ser requerido si algo de lo siguiente ocurre:

- (1) Evidencia de que el método no puede proveer datos de acuerdo con los requisitos de la Tabla 2.
- (2) Resultados que difieren del promedio informado final de una muestra CCRL-PSP con un rango de 3 ó menos.

**TABLA 2 Precisión**

	Edad de Ensayo, Días	Coefficiente de Variación 1s %	Rango Aceptable de Resultados de Ensayos d2s % <sup>A</sup>
<b>Cementos portland</b>			
<b>Relación constante agua-cemento:</b>			
Un laboratorio	3	4.0	11.3
	7	3.6	10.2
Prom		3.8	10.7
Laboratorios múltiples	3	6.8	19.2
	7	6.4	18.1
Prom		6.6	18.7
<b>Cementos adicionados</b>			
<b>Mortero de fluencia constante:</b>			
Un laboratorio	3	4.0	11.3
	7	3.8	10.7
Prom	28	3.4	9.6
		3.8	10.7
Laboratorios múltiples	3	7.8	22.1
	7	7.6	21.5
Prom	28	7.4	20.9
		7.6	21.5
<b>Cementos de albañilería</b>			
<b>Mortero de fluencia constante:</b>			
Un laboratorio	7	7.9	22.3
	28	7.5	21.2
Prom		7.7	21.8
Laboratorios múltiples	7	11.8	33.4
	28	12.0	33.9
Prom			
		11.9	33.7

<sup>A</sup> Estos números representan, respectivamente, los límites (1s %) y (d2s %) descritos en la práctica C 670

(3) Resultados que difieren del valor aceptado de una muestra de referencia conocida con valores establecidos de resistencia en más del doble de los valores de laboratorios múltiples de 1s % de la Tabla 2.

Antes de empezar el procedimiento de recalificación, evalúe todos los aspectos de la fabricación de cubos y proceso de ensayo para determinar si el resultado discordante se debe a algún error sistemático o solo a un evento ocasional azaroso.

10.4.5.2 Si el equipo de compactación, es reubicado, significativamente modificado, reparado, o ha sido recalibrado, recalifique el equipo de acuerdo con 10.4.4.

NOTA 7—Se recomienda preparar una muestra grande y homogénea de cemento en el momento de calificación para utilizar como un estándar secundario y para la evaluación del método. Los ensayos frecuentes de esta muestra darán aviso temprano sobre cualquier cambio en el comportamiento de los aparatos.

10.5 *Almacenamiento de Especímenes de Ensayo*—Inmediatamente después de completar el moldeo, ubique los especímenes de ensayo en un gabinete húmedo o cuarto húmedo. Mantenga todos los especímenes de ensayo, inmediatamente después del moldeo, en moldes sobre placas de base en un gabinete húmedo o cuarto húmedo desde 20 a 72 h con sus superficies superiores expuestas al aire húmedo pero protegidas del goteo de agua. Si los especímenes son removidos de los moldes antes de 24 h, manténgalos sobre estantes del gabinete húmedo o cuarto húmedo hasta que tengan 24 h de edad, y luego sumerja los especímenes, excepto aquellos para ensayos de 24 h, en agua de cal saturada en tanques de almacenamiento contruidos de materiales no corrosivos. Mantenga el agua de almacenamiento limpia cambiándola cuando sea necesario.

#### 10.6 *Determinación de Resistencia a la Compresión:*

10.6.1 Ensaye los especímenes inmediatamente después de sacarlos del gabinete húmedo en el caso de especímenes de 24 h, y del agua de almacenamiento en el caso de todos los otros especímenes. Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada deben ser rotos con la tolerancia admisible prescrita como sigue:

Edad de Ensayo	Tolerancia Admisible
24 h	$\pm 1/2$ h
3 días	$\pm 1$ h
7 días	$\pm 3$ h
28 días	$\pm 12$ h

Si se saca más de un espécimen al mismo tiempo del gabinete húmedo para los ensayos de 24 h, mantenga estos especímenes cubiertos con un paño húmedo hasta el momento del ensayo. Si se saca más de un espécimen al mismo tiempo del agua de almacenamiento para ensayo, mantenga estos especímenes en agua a una temperatura de  $73.5 \pm 3.5$  °F o  $[23 \pm 2$  °C] y con suficiente profundidad para sumergir completamente cada espécimen hasta el momento del ensayo.

10.6.2 Seque cada espécimen a una condición de superficie seca, y saque cualquier grano de arena suelta o incrustación de las caras que estarán en contacto con los bloques de apoyo de máquina de ensayo. Controle estas caras aplicando un canto recto (Nota 8). Si hay una curvatura apreciable, muela la cara o caras hasta conseguir superficies planas o descarte el espécimen. Se debería hacer un control periódico del área de la sección transversal de los especímenes.

NOTA 8—*Caras del Especimen*— Se obtendrán resultados mucho más bajos que la verdadera resistencia cargando caras de un espécimen cúbico que no son verdaderamente planas. Por lo tanto, es esencial que los moldes de los especímenes sean mantenidos escrupulosamente limpios, pues de otro modo se formarán grandes irregularidades en las superficies. Los instrumentos para la limpieza de los moldes deberían ser siempre más blandos que el metal de los moldes para evitar desgaste. En el caso que sea necesario moler las caras del espécimen, esto puede hacerse mejor frotando el espécimen sobre una lámina de papel fino de esmeril o paño pegado a una superficie plana, utilizando solo una presión moderada. Tal molienda es tediosa para más de unas pocas milésimas de pulgada (centésimos de milímetro); donde sea necesario más que esto, se recomienda que el espécimen sea descartado.

10.6.3 Aplique la carga a las caras de espécimen que estuvieron en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde. Ubique cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo debajo del centro del bloque del apoyo superior. Antes de ensayar cada cubo, se debe comprobar que el bloque asentado esféricamente está libre para inclinarse. No utilice materiales de amortiguamiento o de asiento. Coloque el bloque de asiento esférico en contacto uniforme con la superficie del espécimen. Aplique la velocidad de carga con una velocidad relativa de movimiento entre las platinas superior e inferior correspondientes a una carga sobre el espécimen con el rango de 200 a 400 lbs/s [900 a 1800 N/s]. Obtenga esta velocidad de movimiento designada de la platina durante la primera mitad de la carga máxima anticipada y no haga ningún ajuste en la velocidad de movimiento de la platina en la última mitad de la carga especialmente mientras el cubo está fluyendo antes de la falla.

NOTA 9—Es aconsejable aplicar sólo un recubrimiento muy liviano de buena calidad, aceite mineral liviano al asiento esférico de la platina superior.

## 11. Cálculo

11.1 Registre la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo, y calcule la resistencia a la compresión como sigue:

$$fm = P/A \quad (1)$$

donde:

$fm$	=	resistencia a la compresión en psi o [MPa],
$P$	=	carga total máxima en lbf o [N], y
$A$	=	área de superficie cargada in <sup>2</sup> o [mm <sup>2</sup> ].

Tanto los especímenes de 2 in. como de [50-mm] pueden ser usados para la determinación de la resistencia a la compresión, si se utilizan unidades pulgada-libra o SI. Sin embargo, deben usarse unidades coherentes para carga y área para calcular la resistencia en las unidades seleccionadas. Si el área de sección transversal de un espécimen varía más del 1.5 % de la nominal, utilice el área real para el cálculo de la resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de todos los especímenes de ensayo aceptables (vea Sección 12) hechos de la misma muestra y ensayados al mismo período debe ser promediada e informada a los 10 psi [0.1 MPa] más cercanos.

## 12. Informe

12.1 Informe la fluencia al 1 % más cercano y el agua utilizada al 0.1 % más cercano. La resistencia media a la compresión de todos los especímenes de la misma muestra debe ser informada a los 10 psi [0.1 MPa] más cercanos.

## 13. Especímenes de Defectuosos y Reensayos

13.1 En la determinación de la resistencia a la compresión, no considere los especímenes que son evidentemente defectuosos.

13.2 El rango máximo admisible entre especímenes de la misma amasada de mortero, a la misma edad de ensayo es 8.7 % del promedio cuando tres cubos representan una edad de ensayo y 7.6 % cuando dos cubos representan una edad de ensayo (Nota 10).

NOTA 10—La probabilidad de exceder estos rangos es 1 en 100 cuando el coeficiente de variación dentro de la amasada es 2.1 %. El 2.1 % es una media para los laboratorios que participan en los programas de muestreo de referencia de cemento portland y cemento de albañilería del *Cement and Concrete Reference Laboratory*.

13.3 Si el rango de tres especímenes excede el máximo en 13.2, descarte el resultado que más difiera del promedio y controle el rango de los dos especímenes restantes. Haga un nuevo ensayo de la muestra si quedan menos de dos especímenes después de descartar los especímenes defectuosos o descartar ensayos que no cumplan con el rango máximo admisible de dos especímenes.

NOTA 11—Los resultados de resistencia confiables dependen del cumplimiento cuidadoso de todos los requisitos y procedimientos especificados. Los resultados erráticos para un periodo de ensayo dado indican que algunos de los requisitos y procedimientos no han sido cuidadosamente observados; por ejemplo, aquellos que cubren el ensayo de los especímenes prescritos en 10.6.2 y 10.6.3. El centrado inadecuado de los especímenes que resulta en fracturas oblicuas o movimiento lateral de uno de los cabezales de la máquina de ensayo durante la carga causará resultados de resistencia más bajos.

## 14. Precisión y Tendencia

14.1 *Precisión*—Las indicaciones de precisión para este método de ensayo están listadas en la Tabla 2 y están basadas en resultados del *Cement and Concrete Reference Laboratory Reference Sample Program*. Están desarrolladas en base a datos donde un resultado de ensayo es el promedio de ensayos de resistencia a la compresión de tres cubos moldeados de una sola amasada de mortero y ensayados a la misma edad. No se notará un cambio significativo en la precisión cuando un resultado de ensayo es el promedio de dos cubos y no de tres.

14.2 Estas indicaciones de precisión son aplicables a morteros hechos con cementos mezclados y ensayados a las edades señaladas. Los límites apropiados son similares, un poco mayores para ensayos a edades menores y levemente menores para ensayos a edades mayores.

14.3 *Tendencia*—El procedimiento en este método de ensayo no tiene tendencia porque el valor de la resistencia a la compresión está definida en términos del método de ensayo.

## 15. Palabras clave

15.1 resistencia a la compresión; mortero de cemento hidráulico; resistencia del cemento hidráulico; resistencia del mortero; resistencia.

**ANEXO**  
(Información Obligatoria)

**A1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO PARA CALIFICACIÓN DE MÉTODOS DE COMPACTACIÓN ALTERNATIVOS**

**A1.1 Cálculo de la Media de la Desviación Estándar dentro de una Amasada y Eliminación de Apartados—** Tabule los resultados para cada muestra de cemento (o ronda) en hojas separadas. En la hoja extendida, liste los resultados de cada amasada en columnas y complete los cálculos mostrados en la Tabla A1.1.

**A1.1.1** Elimine algunos apartados de los datos de ensayo y repita los cálculos hasta que ningún valor quede fuera del rango normal.

**A1.1.2** Tabule la Resistencia de los cubos habiendo eliminado todos los apartados y complete los cálculos mostrados en la Tabla A1.2.

**A1.2 Resumen de Resultados—**Reúna los resultados de las cuatro rondas y complete los cálculos mostrados en la Tabla A1.3. El número de los apartados no debe exceder el 5 % del número total de ensayos cuando se redondee al número entero más cercano (por ejemplo, 4 rondas × 4 amasadas × 9 cubos = 144 ensayos × (5%/100) = 7.2 ó 7).

**A1.3 Calificación de la Precisión—**Calcule el error relativo dentro de la amasada (RWBE %) mostrado en la Tabla A1.3. Este valor debe ser menor que el 2.1 % para cumplir con el límite establecido en la Nota 10 de esta especificación.

**A1.4 Calificación de la Tendencia—**Los resultados de ensayos reunidos en la Tabla A1.3 son contrastados con tres límites para demostrar una calificación aceptable. Los límites han sido establecidos estadísticamente por análisis de los datos históricos CCRL y son dados en la Tabla A1.4.

**A1.5 Fundamento de los Límites Dados en A1.4:**

**A1.5.1** La precisión de laboratorios múltiples (1s%) para el promedio de *n* amasadas está dada por:

**TABLA A1.1 Ejemplo Utilizando Amasada de 9 Cubos**

Ronda - 2		Resistencia Media de la Industria,		
Muestra CCRL #	$X_i = 32.923$			
140				
Fecha de Colada -				
00/00/00				
Resistencias a los 7 días, MPa				
A	B	C	D	E
Amasada N°	1	2	3	4
Cubo 1	33.0	34.3	34.4	33.2
Cubo 2	33.9	32.5	34.0	34.0
Cubo 3	33.4	34.0	34.1	33.8
Cubo 4	33.1	33.8	34.0	33.8
Cubo 5	33.0	33.4	34.2	34.0
Cubo 6	32.8	33.7	31.8	33.1
Cubo 7	33.6	32.6	33.9	32.8
Cubo 8	31.5	32.1	33.0	33.3
Cubo 9	33.6	34.3	33.4	34.4
Media, $X_b$	33.10	33.42	33.65	33.60
$SD_b$	0.70	0.82	0.81	0.52
$N_b$	9	9	9	9
$(N_b - 1)SD_b^2$	3.936	5.432	5.265	2.145
			$N_i$	36
			$X_i$	33.44
			$SD_i$	0.692
			MND	1.703
Rango Normal				
Máx	34.81	35.12	35.35	35.30
Mín	31.40	31.71	32.95	31.89
Apartados	Ninguno	Ninguno	Cubo 6	Ninguno

donde:

$X_i$	=	resistencia media de industria (CCRL),
$X_b$	=	media de los valores de ensayo en un sola amasada,
$SD_b$	=	desviación estándar de una sola amasada =
		$\sqrt{\frac{\sum (X - X_b)^2}{N_b - 1}}$
$N_b$	=	número de ensayos por amasada,
$(N_b - 1)SD_b^2$	=	un cálculo intermedio,
$N_r$	=	número total de ensayos por ronda,
$X_r$	=	media general de los valores de ensayo obtenidos por ronda, MPa,
$SD_r$	=	desviación media estándar de ronda =
		$\sqrt{\frac{\sum (N_b - 1)SD_b^2}{N_r - 1}}$
MND	=	desviación máxima normal: utilice la función de Excel® "=norminv(1-0.25/N,0,SD)" o equivalente, o utilice tablas de estadística para hallar la distribución normal inversa integrada para un valor de integral de (1-0.25/n <sub>r</sub> ) en una distribución normal con $\sigma = SD_r$ .

Rango normal:

Máximo = ( $X_b + MND$ ).

Mínimo = ( $X_b - MND$ ).

Apartados = cualquier valor de ensayo que cae fuera del rango calculado normal.

$$s_{\%ML,n}^2 = \sqrt{s_{\%ML}^2 - (1 - \frac{1}{n})s_{\%SO}^2}$$

A1.5.2 El límite para la desviación de las rondas individuales (las fallas no están admitidas cuando se realizan 4 rondas) es 1.2 s<sub>%ML,n</sub>, utilizado en los Métodos de Ensayo C 114.

A1.5.3 La precisión de laboratorios múltiples (1s%) para la media de 4 rondas es 0.5 s<sub>%ML,n</sub>.

A1.5.4 El límite para la desviación de la media de 4 rondas (confianza de 95 %) es 1.96 veces esta, o 0.98 s<sub>%ML,n</sub>.

A1.5.5 Los valores para s<sub>%ML</sub> y s<sub>%SO</sub> para Cemento Clases A y C (cementos no incorporadores de aire para concreto y cementos para mortero respectivamente) son los valores a 7 días en la indicación de precisión actual del Método de Ensayo C 109/C 109M. Aquí parece que no hay datos para cemento clase B (cementos incorporadores de aire para concreto). Trabajando con la suposición de que el valor de esta cantidad está relacionado con el contenido de aire, los valores adoptados para Clase B son la media de los valores de A y C.

TABLA A1.2 Datos de Ensayo Después de la Eliminación de los Apartados

(Ejemplo Utilizando una Amasada de 9 Cubos)

Ronda - 2

Muestra de CCRL # 140

Fecha de Colada - 00/00/00

Resistencia Promedio de la Industria,  $X_i = 32.923$

Datos Crudos del Cubo:

Resistencias a los 7 días, MPa				
A	B	C	D	E
Amasada N <sup>o</sup>	1	2	3	4
Cubo 1	33.0	34.3	34.4	33.2
Cubo 2	33.9	32.5	34.0	34.0
Cubo 3	33.4	34.0	34.1	33.8
Cubo 4	33.1	33.8	34.0	33.8
Cubo 5	33.0	33.4	34.2	34.0
Cubo 6	32.8	33.7		33.1
Cubo 7	33.6	32.6	33.9	32.8
Cubo 8		32.1	33.0	33.3
Cubo 9	33.6	34.3	33.4	34.4
Media, $X_{bv}$	33.29	33.42	33.89	33.60
$SD_{bv}$	0.39	0.82	0.46	0.52
$N_{bv}$	8	9	8	9
$(N_{bv}-1)SD_{bv}^2$	1.092	5.348	1.462	2.159
			$N_{rv}$	34
			$X_{rv}$	33.55
			$X_i$	32.92
			$SD_{rv}$	0.55
			$E_r$ , MPa	0.63
			$RE_r$ , %	1.91

donde:

- $\bar{X}_{bv}$  = media de los valores de ensayos válidos obtenidos por amasada, MPa,
- $X_i$  = resistencia media de la industria (CCRL), MPa,
- $SD_{bv}$  = 
$$\sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X}_{bv})^2}{N_{bv} - 1}}$$
- $N_{bv}$  = número de ensayos válidos por amasada,
- $(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2$  = cálculo intermedio,
- $N_v$  = número total de ensayos válidos de la ronda,
- $\bar{X}_v$  = media general de los ensayos válidos para la ronda, MPa,
- $SD_v$  = desviación estándar media de la ronda = 
$$\sqrt{\frac{\sum [(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2]}{N_v - 1}}$$
- $E_r$  = error =  $(X_i - \bar{X}_v)$ , MPa, y
- $RE_r$  = error relativo para la ronda, % =  $100(E_r/\bar{X}_v)$ .

A1.5.6 Para las condiciones aplicables, las ecuaciones de arriba dan lo siguiente:

**TABLA A1.3 Resumen de Resultados**

Derivación de límites para la Tabla A1.4								
Clase de cemento								
	A	B	C	A	B	C		
Amasadas por ronda (n)	6	6	6	4	4	4		
Un solo operador s% (una sola amasada)	3.6	5.75	7.9	3.6	5.75	7.9		
Laboratorios Múltiples s% (una sola amasada)	6.4	9.1	11.8	6.4	9.1	11.8		
Laboratorios Múltiples s% (n amasadas)	5.5	7.4	9.3	5.6	7.6	9.6		
Límite para desviación de una sola ronda %	6.6	8.9	11.2	6.7	9.1	11.5		
Límite para desviación de la media de cuatro rondas %	5.4	7.3	9.2	5.5	7.5	9.4		
A	B	C	D	E	F	G	H	I
	CCRL	Día	$X_i$	$\bar{X}_v$	$RE_r$	$N_v$	$SD_v$	$(N_v - 1)SD_v^2$
	#		MPa	MPa	%			
Ronda 1	139	1	28.47	30.42	6.85	36	0.97	32.93
Ronda 2	140	2	32.92	33.55	1.91	34	0.55	9.98
Ronda 3	141	3	32.64	33.14	1.53	34	0.47	7.29
Ronda 4	142	4	32.24	33.01	2.39	36	0.51	9.10
						Máx. $RE_r$ , %	6.85	
						Media. $RE_r$ , %	3.17	
						GMWBE, MPa	0.65	
						RWBE, %	2.01	
						Máx RWBE, % <sup>A</sup>	2.1	
						Ensayo de precisión	Pasa	

donde:

- $X_i$  = resistencia media de la industria, MPa,
- $\bar{X}_v$  = valor medio general de los ensayos válidos de una ronda,
- $RE_r$ , % = error relativo =  $100(X_i - \bar{X}_v)$ ,
- $N_v$  = número total de ensayos válidos de la ronda,
- $SD_v$  = desviación estándar media de una ronda = 
$$\sqrt{\frac{\sum [(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2]}{N_v - 1}}$$
- $(N_v - 1)SD_v^2$  = cálculo intermedio,
- $\bar{X}_g$  = valor medio general de todos los ensayos válidos (4 rondas),
- $N_g$  = número total de ensayos válidos en 4 rondas,
- GMWBE = error medio general dentro de la amasada, MPa = 
$$\sqrt{\frac{\sum [(N_v - 1)SD_v^2]}{N_g - 1}}$$
- RWBE = error relativo dentro de la amasada, % =  $100(GMWBE / \bar{X}_g)$ , y
- Máx RWBE = máximo RWBE admisible = 2.10 % (Vea Nota 10).

<sup>A</sup> Vea Nota 9.

**TABLA A1.4 Requisitos de Calificación de Tendencia**

Clasificación de Cemento (vea 10.4.3.1)	Amasadas de 6 Cubos (Mínimo de 6 Amasadas por Ronda)			Amasadas de 9 Cubos (Mínimo de 4 Amasadas por Ronda)		
	A	B	C	A	B	C
Error relativo máximo admisible para 4 o 6 amasadas, MAREr %	6.6	8.9	11.2	6.7	9.1	11.5
Error relativo máximo admisible medio de 4 rondas de 4 o 6 amasadas <5 % defectos, GRE%	5.4	7.3	9.2	5.5	7.5	9.4
Límite de confianza mínimo admisible, % MACL %	95	95	95	95	95	95

**TABLA A1.5 Ensayos de Tendencia (Ejemplo Utilizando Amasadas de 9 Cubos, Cemento Clase A)**

MREr %, el valor de error relativo máximo de 4 rondas	6.85
MAREr %, MREr máximo admisible de la Tabla A1.4	6.7
	Falla
GRE %, el RER % medio de las cuatro rondas	3.13
Límite máximo de MGREg % de la Tabla A1.4	5.5
	Pasa
Límite de confianza de la tendencia, CL %	96.99
Límite de confianza mínimo admisible, MACL % (de la Tabla A1.4)	95
	Pasa
Los resultados de arriba indican que los datos no demuestran cumplimiento.	

donde:

<i>MREr</i> , %	error relativo máximo, % obtenido para cualquier ronda (a partir de los valores en la columna F, Tabla A1.3),
<i>MAREr</i> , %	error relativo máximo admisible, % de cualquier ronda (Tabla A1.4),
<i>GRE</i> , %	media general de los RER, % valores de las cuatro rondas,
<i>MAREg</i> , %	GRE máximo admisible, % valor (media de la columna F, Tabla A1.3), y
<i>CL</i> , %	Límite de confianza de la tendencia, % de confianza con la que puede ser establecido que el error de la media de 4 rondas es distinto de cero. Calcúlelo utilizando la función de Excel® "=ttest(<range of industry means>, <range of values obtained>, 1, 1)" o equivalente, o utilice tablas de estadística para encontrar la confianza en un ensayo correspondiente de valor pareado t de una cola, en el conjunto de errores de ronda.

NOTA—El método de calificación falla para la tendencia si (1) el MREr excede el MAREr, % límite; o si (2) el GRE, % excede el MGREg límite y el CL, % excede el 95 %.

## RESUMEN DE CAMBIOS

*El Committee C01 ha identificado la ubicación de cambios seleccionados de este método de ensayo desde su última publicación, C 109/C 109M – 02, que puede impactar la utilización de este método. (Aprobado el 1 de julio de 2005).*

1) Revisión de 5.9.2 y Nota 3.

(2) Renumeración de los antiguos 10.4.1 y 10.4.2 como 10.3.4 y 10.3.5.

(3) Agregado de un nuevo 10.4.1 y renumeración del antiguo 10.4.3 como 10.4.2.

Agregado de nuevos 10.4.3, 10.4.4, y 10.4.5 con subsecciones. Agregado de una nueva Nota 7 y renumeración de las notas siguientes.

(4) Agregado del Anexo A1.

*ASTM Internacional no toma posición respecto a la validez de los derechos de propiedad industrial en relación con cualquiera de los artículos mencionados en esta norma. Los usuarios de esta norma están expresamente avisados de que la determinación de la validez de cualquiera de esos derechos de propiedad industrial, y el riesgo de infringirlos, son enteramente su propia responsabilidad.*

*Esta norma está sujeta a revisión en todo momento por el comité técnico responsable y debe ser reexaminada cada cinco años y si no es revisada, debe ser reprobada o retirada. Lo invitamos a realizar comentarios para la revisión de esta norma o para normas adicionales, le pedimos que los haga llegar a las oficinas de ASTM Internacional. Sus comentarios serán atentamente examinados en una reunión del comité técnico responsable, a la que usted puede asistir. Si usted estima que sus comentarios no han recibido una audiencia justa comuníquese con el ASTM Committee on Standards, a la dirección indicada debajo.*

*Esta norma está protegida por los derechos de autor de la ASTM Internacional, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA. Es posible obtener copias (simples o múltiples) de esta norma contactando a ASTM en la dirección dada o al 610-832-9585 (teléfono), 610-832-9555 (fax), o [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail); o a través del sitio web de la ASTM ([www.astm.org](http://www.astm.org)).*

## BIBLIOGRAFÍA

- [1.] Agrawl, MC y Bimal K Modi. (2006). Predicting cement Strength. *ZKG International*, Volumen 59, Nro 6, 39-45.
- [2.] Alsop, Philip A; Chen, Hung; y Herman Tseng. (2007). *The cement plant operations handbook. International Cement Review*. London, 5ta Edición, Editorial Tradeship Publications Ltd.
- [3.] Asim M.E. (1986). Particle Size distribution of cement. *ZKG International*, Volumen 39, Nro 6, 3211-324.
- [4.] Austin, L.G y P.T. Luckie. (1972). Methods for Determination of Breakage Distribution Parameters. *Powder Technology*, 5, 215-222.
- [5.] Austin, L.G y V.K. Bhata. (1971). Experimental Methods for Grinding Studies in Laboratory Mills. *Powder Technology*, 5, 261-266.
- [6.] Austin, L.G; Luckie, P.T y D. Wightman. (1975). Steady State Simulation of a Cement milling Circuit. *International Journal Mineral Processing*. Volumen 2, 127-150.
- [7.] Austin, L.G. (1984). Concepts in Process Design of Mills. *Mining Engineering*. Presented at the AIME anual meeting.
- [8.] Austin, Leonard G y Fernando Concha. (1994). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. Concepción – Chile, Editorial Taller Multimedia Universal Técnica.

- [9.] Aydogan, Namik y Jawahar Yardi. (2006). Modeling and simulation of cement mills in Cement Australia. *ZKG International*, Volumen 59, Nro 9, 70-78.
- [10.] Armsistead, Timothy. (2005). *Modelling of Conminution and separation in a closed circuit cement mil*. Tesis de grado. Universidad de Queensland.
- [11.] Benzer, Hakan; Ergun, L; Öner, M y A.J. Lynch. (2001). Simulation of open circuit clinker grinding. *Mineral Engineering*. Volumen 14, No 7, 701-710.
- [12.] Benzer, Hakan; Ergun, L; Lynch, A.J; Öner, M; Gunlu, A; Celik, I.B y N. Aydogan. (2001). Modeling cement grinding circuits. *Mineral Engineering*, Volumen 14, Nro 11, 1469-1482.
- [13.] Benzer, Hakan. (2005). Modeling and simulation of a fully air swept ball mill in a raw material grinding circuit. *Powder Technology*, 150, 145-154.
- [14.] Boulvin, Michael y Alain Vande Wouwer. (2003). Modeling and control of cement grinding processes. *IEEE Transactions on Control systems technology*, Volumen 11, Nro 5, 715-724.
- [15.] Bye, G.C. (1999). *Portland cement: Composition, Production and Properties*. Capítulo 5. London, Segunda Edición, Editorial Thomas Telford.
- [16.] Deniz V. (2004). The Effect of mill speed on Kinetic breakage parameters of clinker and limestone. *Cement and Concrete Research*. Volumen 34, 1365-1371.
- [17.] Duda, Walter. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. Barcelona, Editores Técnicos Asociados S.A.

- [18.] Espig, D. y V Reinsch. (1996). Computer Aided grinding circuits optimization utilising a new mill efficiency curve. *Mineral Engineering*, 44-45, 249-259.
- [19.] García Casillas, P.E; Martínez C.A; Camacho H y A. García Luna. (2007). Prediction of Portland Cement Strength Using Statistical Methods. *Materials and Manufacturing Processes*, Volumen 22, 333-336.
- [20.] Goma, F. (1979). El Cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona, 5ta Edición. Editores Técnicos Asociados.
- [21.] Gupta, Ashok y Denis Stephen Yan. (2006). *Mineral Processing Design and Operation*. Capítulo 10. Oxford, Editorial Elsevier.
- [22.] Husemann, Von K y R Herrmann. (1995). Drawing up a balance for a grinding plant for producing limestone meal. *ZKG International*, Volumen 48, Nro 5, 276-284
- [23.] Kheder; Al Gabban y Abid. (2003). A Mathematical Model for the Prediction of Cement Compressive Strength at the age of 7 and 28 days within 24 hours. *Materials and Structures*. Volumen 36, 693-701.
- [24.] King, R.P. (2001). *Modeling and Simulation of mineral Processing System*. Boston, Primera Edición. Editorial Butterworth Heinemann.
- [25.] Labahn, Otto y Bernhard Kohlhaas. (1985). *Prontuario del cemento*. Barcelona, Editorial Reverte.
- [26.] Lippek Von E. y H. Dombrowe. (1996). Simulation of grinding circuits which includes high-pressure grinding rolls. *ZKG International*, Volumen 49, Nro 3, 126-132.
- [27.] Lynch, A.J; Öner, M y H. Benzer. (2000). Simulation of a closed cement grinding circuit. *ZKG International*, Volumen 53, Nro 10, 560-567.

- [28.] Measham Lea, Frederick y Peter C. Hewlett. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Oxford, 4ta Edición, Editorial Peter C. Hewlett. Butterworth-Heinemann.
- [29.] Nappier Munn Y A.J. Lynch. (1992). The Modelling and Computer Simulation of Mineral Treatment Processes – Current Status and Future Trends. *Mineral Engineering*, Volumen 5, Nro 2, 143-167.
- [30.] Nappier Munn, Morrell T.J, Morrison y R.D, Kojovic. (1996). *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimization*. Queensland, Editorial JKMRC.
- [31.] Onuma E. y M. Ito (1994). Separator in grinding circuits. *ZKG International*, Volumen 47, Nro 9, 126-132.
- [32.] Özer, C.E; Ergun, A.H. Benzer. (2006). Modeling of the classification behavior of the diaphragms used in multi-chamber cement mill. *Mineral Processing*, 80, 58-70.
- [33.] P. Radziszewski. Fundamental Batch Model Mill Identification. *Minerals Engineering*, Vol 12 Nro 7, pp 809-826, 1999
- [34.] Peray, Kurt E. (1979). *Cement Manufacturer's Handbook*. New York, Editorial Chemical Publishing Co Inc.
- [35.] Quiroz Núñez, Iván. (1997). *Operaciones Unitarias en Procesamientos de Minerales*. Lima, Ediciones UNI.
- [36.] Sepúlveda, Jaime. Los 10 Mandamientos para Optimizar la Molienda. *Minerales*, Vol 53 Nro 224, pp 26-36, 1998
- [37.] Sepúlveda, Jaime y Gutiérrez, Leonel. (1992). *Dimensionamiento y Optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática*. Santiago de Chile, Centro de Investigación Minera y Metalúrgica.

- [38.] Taylor, H.F.W. (1997). *Cement Chemistry*. London, 2da Edición, Editorial Thomas Telford.
- [39.] Tsivilis S, Tsimas S, Benetatou A y E. Haniotakis. (1990). Study on the contribution of the fineness on cement strength. *ZKG International*, Volumen 43, Nro 1, 26-29.
- [40.] Tsivilis S y S. Tsimas. (1992). Estimation of the specific surface of the cement industry materials according to their particle size distribution. *ZKG International*, Volumen 45, Nro 3, 131-134.
- [41.] Tsivilis S y G. Parissakis. (1995). A Mathematical Model for the Prediction of Cement Strength. *Cement and Concrete Research*, Volumen 25, 9-14.
- [42.] Weller K.R, Spencer S.J, Gao M.W y Liu Y. (2000). Tracer Studies and Breakage Testing in Pilote Scale Stirred Mills. *Mineral Engineering*, Volumen 13, Nro 4, 429-458.
- [43.] Zhang, Y.M; Napier Munn, T.J y A. Kavetsky. (1988). Application of Comminution and Classification Modeling to Grinding of Cement Clinker. *Mineral Metallurgic*, Volumen 97, C207-C214.
- [44.] Zhang, Y.M; Kavetsky, A; Napier Munn T.J. y D.S. Rapson. (1988). Effects of separator efficiency on clinker grinding circuits. *ZKG International*, Volumen 41, Nro 10, 501-505.
- [45.] Zhang Y.M y T.J. Napier-Munn. (1995). Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on Portland cement strength. *Powder Technology*, Volumen 83, 245-252.
- [46.] **FL. Smidth-Fuller Engineering Group, Osepa Separator**. Disponible en:  
<http://www.flsmidth.com/f.l.smidth/english/contact/brochures+and+info/brochures/cement+grinding+gears+and+cement+silos/osepaseparator.pdf>

- [47.] **FL. Smidth-Fuller Engineering Group, Ball mill.** Disponible en:  
<http://www.flsmidth.com/f.l.smidth/english/contact/brochures+and+info/brochures/cement+grinding+gears+and+cement+silos/ballmillums.pdf>
- [48.] **Norma Técnica Peruana (NTP).** Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM). Lima Perú. Disponible en:  
<http://www.asocem.org.pe/web/normalizacion.aspx>
- [49.] **Annual Book of ASTM Standards.** Volume 04.01.Cement; Lime. Gypsum. <http://www.astm.org/BOOKSTORE/BOS/TOCS2008/04.01.htm>