

## 4.1. Introducción

La fragmentación es la tecnología mineralúrgica que consiste en la reducción de tamaño, reducción a fragmentos<sup>1</sup>, de los minerales y rocas que forman el todo-uno procedente de mina o cantera y que alimenta a los talleres de preparación, clasificación y concentración.  $D_{95} \Rightarrow d_{95}$

Mediante la reducción de tamaño se persigue adecuar el mismo a las necesidades de uso con dos objetivos básicos:

- a) La adecuación a los tamaños exigidos en el mercado, ejemplo de las gravas de construcción, y su clasificación según estándares de tamaño normalizado; 0-20; 20-40, < 40, etc.
- b) La liberación del mineral, entendiéndose por tal el aumento de la ley individual de las partículas en el fragmentado, por un lado, y la acumulación de partículas o fragmentos de menor ley y de ganga por otros, para posteriormente, y mediante un proceso de concentración, separar aquellas de ley superior a un criterio, de aquellas otras que no alcanzan este valor y de la ganga.

La fragmentación se divide en dos grandes bloques en base a la tecnología utilizada, trituradoras y molinos. Para las primeras, trituradoras, se consideran habitualmente tres escalones<sup>2</sup>, 1º, 2º y 3º, y la molienda se divide en gruesa, media, fina y micronización.

Los circuitos de fragmentación son combinaciones de equipos, básicamente un clasificador (CL) y un fragmentador (F) a los que se introduce la alimentación (A) y se descarga el producto (P). El producto, salvo excepciones como el caso del circuito abierto tipo (F), no coincide con el fragmentado (B).

Se clasifican en dos grandes grupos:

- Circuitos abiertos.
- Circuitos cerrados.

## 4.2. Circuitos abiertos

Se caracterizan por una alimentación directa y una salida y están formados por un fragmentador sólo o un fragmentador y un clasificador con un funcionamiento sin recirculación.

- a) Fragmentador. El circuito abierto más sencillo se caracteriza por la alimentación (A) directa a un fragmentador, y la descarga del fragmentado (B) tal como sale de la máquina. El esquema responde al principio siguiente:

Se emplea en trituración primaria y pocas veces en secundaria, las características principales son:



- Diseño sencillo.
- La regulación del circuito es la que aporta el equipo.
- Adaptación difícil a los cambios de proceso o de alimentación.
- Diseño poco elástico.
- Funcionamiento robusto.

Figura 4.1. Circuito abierto: F.

<sup>1</sup> Fragmento: Parte o porción pequeña de algunas cosas quebradas o partidas.

<sup>2</sup> En canteras se utiliza, a veces, una clasificación en cuatro escalones de trituración, que se corresponden formalmente, por los tamaños manejados, a dos escalones de trituración más dos de molienda, gruesa y media.

- b) *Clasificador–fragmentador*. Una mejora sobre el circuito anterior consiste en añadir un aparato previo de clasificación donde separamos ya el producto que es menor que el  $d_{95}$ , y que juntamos directamente con el producto que sale del fragmentador. El producto mayor de  $d_{95}$  pasa por el aparato de fragmentación y es reducido de tamaño.

El esquema responde al principio siguiente:

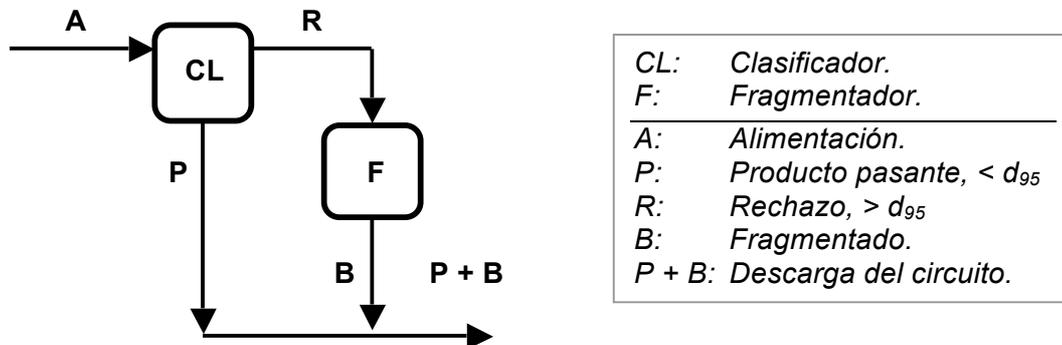


Figura 4.2. Circuito abierto: CL – F.

Las características son similares al circuito anterior con las ventajas sobre éste, entre otras, que se enumeran a continuación. Se tiene en cuenta que el coste del fragmentador, máquina robusta, es mayor que el correspondiente al clasificador.

- *Se ahorra energía*. Existe una fracción de la alimentación que no es necesario fragmentar, de hecho no pasa por el equipo fragmentador.
- A igualdad de máquina fragmentadora, elemento caro del sistema, se aumenta la capacidad del sistema.
- *Se disminuye la abrasión*. A igualdad de tratamiento, el desgaste del fragmentador es menor debido a que sólo una parte de la alimentación pasa por el fragmentador. El desgaste, en alguna manera, es proporcional a la cantidad de material que es tratado en cada equipo.
- *Se reduce la sobrefragmentación*. Este efecto produce más finos y por tanto nos daría más gasto de energía, en consecuencia mayor trabajo del fragmentador y mayor desgaste.

Ambos circuitos tienen el inconveniente de que no existe un control del producto de salida, el  $d_{95}$  es el que corresponde a un equipo fragmentador que evidentemente no está diseñado para esta función, aunque existe para cada máquina una curva característica de los productos.

Un tercer circuito sería el correspondiente al esquema **F – CL** pero este diseño no se puede dar ya que el rechazo del clasificador, producto que no reúne las condiciones para su uso posterior, debería volver al fragmentador para su reducción de tamaño y, en este supuesto estamos en el caso de un circuito cerrado que veremos posteriormente.

### 4.3. Circuitos cerrados

La característica básica de los circuitos cerrados es la existencia de un flujo de material entre el clasificador y el fragmentador, que circula a través de ellos en un circuito de ida y retorno, un sistema de circulación interno cerrado, produciendo una carga circulante entre ambos equipos.

Estos circuitos pueden ser de dos tipos según la posición relativa del clasificador y del fragmentador y responden a los esquemas que se dan a continuación. Se emplean de forma generalizada en molienda y en algunas ocasiones en trituración.

Los clasificadores utilizados pueden ser de tipo cribas, hidroclasificadores, ciclones, etc. y en general cualquiera de los equipos que realizan un corte por tamaño, y los fragmentadores pueden ser trituradoras de cono, molinos de barras, bolas, martillos, trómeles, etc., y en general, como en el caso anterior de los clasificadores, cualquiera de los equipos que realizan la operación de trituración o de molienda.

- a) **Fragmentador-clasificador.** La alimentación va a un equipo de fragmentación (F) y el producto resultante (B) alimenta un clasificador (CL). La salida del clasificador,  $> d_{95}$ , vuelve al fragmentador mezclada con la alimentación, y el pasante en el clasificador,  $< d_{95}$ , forma el producto de salida (P) del circuito.

Este tipo de circuito se usa en molienda y es de menor uso en trituración. La alimentación a los circuitos de molienda, normalmente, ya tiene un cierto control del tamaño porque suele proceder de un equipo de trituración.

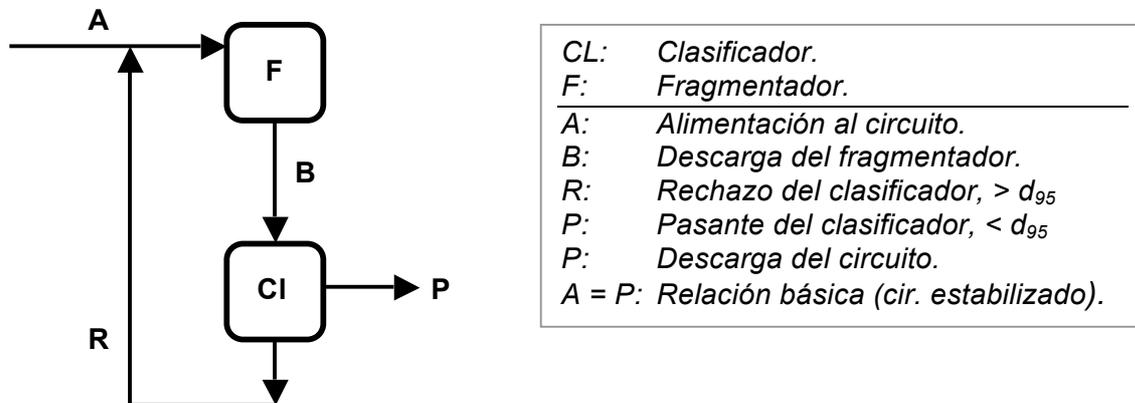


Figura 4.3. Circuito cerrado: F – CL.

- b) **Clasificador-fragmentador.** La alimentación va a un equipo de clasificación (CL). El rechazo (R) del clasificador,  $> d_{95}$ , pasa por el fragmentador (F) y el pasante del clasificador,  $< d_{95}$ , es el producto resultante (P), constituye la salida del circuito, y va directamente a concentración. La salida del fragmentador (B) va en su totalidad al clasificador. El clasificador, en el caso de trituradores, debe estar protegido contra elementos excesivamente grandes en tamaño ya que se pueden dañar las mallas de las cribas. Esta instalación de protección no es necesaria en los circuitos de molienda donde el rango de tamaños está más controlado; son alimentados normalmente desde una etapa de trituración o de molienda anterior. Con la nomenclatura usada anteriormente, el esquema es como sigue:

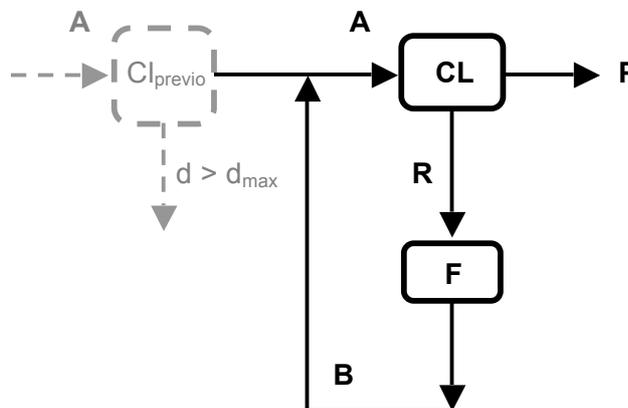


Figura 4.4. Circuito cerrado: CL – F.

Para este circuito, además de la relación básica  $A = P$  (entrada igual a salida), se verifica la igualdad  $R = B$ .

Este diseño  $CL - F$  es más racional que el anterior  $F - CL$  y le son de aplicación las ventajas comparativas indicadas para los circuitos abiertos cuando se coloca el clasificador delante del fragmentador.

La comparación de ventajas e inconvenientes entre circuitos abiertos y cerrados se puede resumir en los aspectos fundamentales indicados en la tabla que se adjunta.

Concepto	Circuito abierto (CA)	Circuito cerrado (CC)
Control del producto de salida, $d_{95}$	No tiene, lo realiza el fragmentador.	Si tiene, lo realiza el clasificador.
Sobrefragmentación	No se controla, la que produce el fragmentador.	Se reduce al extraer los productos inferiores a $d_{95}$
Consumo de energía	Más elevado.	Inferior.
Abrasión y desgaste	Mayor en el fragmentador.	Menor en el fragmentador.
Tipo de circuito	Sencillo, más económico de nueva instalación y mayor consumo por unidad de producto.	Más complejo. Mayor inversión y, normalmente, menos gastos de funcionamiento.
Uniformidad del producto	Mala.	Más uniforme.

**Tabla. 4.1.** Comparación entre circuitos abiertos y cerrados.

*Ejercicio 4.1.* Estudiar el valor de los diferentes parámetros en cada uno de los circuitos si el 100% de la descarga del molino es pasante en el clasificador. Este supuesto tiene valor didáctico ya que indica una regulación del proceso incorrecta y produce una sobrefragmentación elevada, con los inconvenientes y desventajas que esto supone.

Para el circuito (a) del tipo  $F - CL$  se dan las relaciones siguientes:

$A = P$ , esta relación se cumple siempre para todo circuito estabilizado.

$B = P$ ;  $R = 0$ ;  $R + A = B \rightarrow A = B = P$ .

$\Rightarrow$  Trabaja como un circuito abierto.

Para el circuito (b) del tipo  $CL - F$  se dan las relaciones, ver esquema:

A se divide en:  $A_p$ : pasante en la criba.

$A_r$ : rechazo de la criba; siendo:  $A_p + A_r = A$ .

B: 100% pasante en la criba;  $B_p = B$ , pasante en la criba.

$B_r = 0$ , rechazo en la criba.

El pasante en la criba será la fracción  $A_p$  y la  $B_p$  o lo que es lo mismo:

$P = A_p + B_p = A_p + B \Rightarrow$  Porque el 100% de la descarga del molino es pasante en el clasificador conforme al enunciado.

De la igualdad  $A + B = P + R$ , y por sustitución, se obtiene:

$A_p + A_r + B = P + R \rightarrow A_p + A_r + B = A_p + B + R$ ;

Se deduce que:  $A_r = R$ .

El rechazo de la criba es una fracción de la alimentación, exactamente aquella que es mayor que el punto de corte. Este funcionamiento es igual, en el valor del parámetro  $R$ , al que corresponde a un circuito abierto del tipo  $CL - F$  por lo que se evidencia lo inadecuado de esta regulación.

#### 4.4. Carga circulante

La carga circulante se define por la relación entre el rechazo del clasificador y la alimentación. El rechazo del clasificador es la fracción que tratada en el equipo no cumple el criterio de tamaño establecido. Este criterio de tamaño, si no se indica, es el correspondiente al  $d_{95}$ .

La expresión es:  $C_c = R / A$ , ó  $C_c(\%) = 100 \cdot R / A$ .

Este valor es una característica del diseño del sistema y tiene los valores orientativos que se dan a continuación:

- Circuitos cerrados de trituración primaria:  $C_c$  valores pequeños.
- Circuitos cerrados de trituración secundaria y terciaria:  $C_c$  entre 40% y 150%.
- Circuitos cerrados de molienda:  $C_c$  entre 300% y 600%.

#### 4.5. Cálculo de la carga circulante

Para el cálculo de la carga circulante se toman muestras de la alimentación (A), pasante (P), rechazo (R) y fragmentado (B), y estas muestras son analizadas, en cuanto a la distribución de tamaños, en el laboratorio.

Se obtienen unas fracciones de la muestra en pasantes y rechazos según un conjunto de mallas normalizado de tamaño descendente. El procedimiento de clasificación, mediante cribado, exige que el total de la muestra se pase por todos y cada uno de los tamices, si bien normalmente se hace pasar por un conjunto de tamices normalizados superpuestos, en tamaños descendentes, que se vibra el tiempo necesario para que la muestra quede correctamente clasificada.

Los tamaños de malla son:  $m_1 > m_2 > \dots > m_j \dots > m_n$

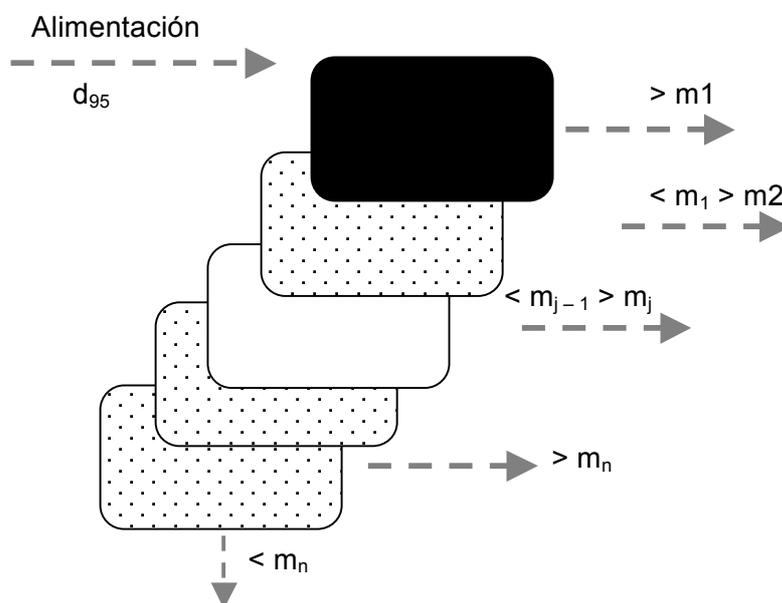


Figura 4.5. Distribución de tamices.

Para los diferentes tamaños de malla se obtienen los valores de la distribución granulométrica dados según el criterio de la tabla siguiente. Se considera una muestra genérica (x) y los pasante ( $x_i$ ), tamaños menores que la abertura de malla, y los rechazos ( $100 - x_i$ ), tamaños mayores que la abertura de malla, (j) y se obtiene:

Tamaño de malla	Pasante (%)	Rechazo (%)
$m_1$	$x_1$	$100 - x_1$
$m_2$	$x_2$	$100 - x_2$
***	***	***
$m_j$	$x_j$	$100 - x_j$
***	***	***
$m_n$	$x_n$	$100 - x_n$

Tabla 4.2. Distribución de tamaños de una muestra.

Lo anterior sirve para obtener la curva granulométrica de una muestra y para identificar y calcular el valor correspondiente de pasante y rechazo para un valor dado de tamaño de corte.

El criterio anterior se aplica, según los puntos de toma de muestreo en el circuito, y se obtiene para una malla genérica (j), los valores indicados en la tabla siguiente:

Concepto	Denominación	Pasante	Rechazo
Alimentación	A	$a_j$	$100 - a_j$
Pasante	P	$p_j$	$100 - p_j$
Rechazo	R	$r_j$	$100 - r_j$
Fragmentado	B	$b_j$	$100 - b_j$

Tabla 4.3. Definición de variables del proceso, malla (j).

#### 4.6. Concepto de circuito estabilizado

Un circuito cerrado se considera estabilizado cuando en varias mallas tomamos muestras concordantes, de tal forma que el valor calculado para la carga circulante es similar. En este caso se toma como valor de la carga circulante ( $C_c$ ) el valor medio aritmético de los obtenidos.

No es necesaria la coincidencia exacta pero si que el valor de  $C_c$  obtenido para el tamaño  $m_j$  de corte aplicado a una muestra, sea concordante con el valor de  $C_c$  obtenido para un corte  $m_i$  ( $i < > j$ ) de la misma muestra.

Esta sistemática, al repetirse en el tiempo para puntos de muestreo iguales, debe dar también valores concordantes. Cuando esta concordancia no existe y en función de la variación que se obtenga se puede identificar modificaciones en el proceso.

Como norma aproximada se puede indicar que el aumento del tonelaje en la alimentación produce un aumento de la carga circulante en un circuito si no se alteran otras variables e igualmente, si se modifica el  $d_{95}$  de la alimentación en el sentido de aumentar, para igual tonelaje tratado, hay una tendencia a aumentar la carga circulante.

La puesta en marcha de los circuitos cerrados utilizados para la molienda, con tonelajes de importancia, necesita más de un día para estabilizarse. Hay que considerar que en la fase previa es necesario llenar el circuito y regular las máquinas, proceso que requiere varias horas, normalmente más de un turno.

### 4.7. Calculo de la carga circulante para el circuito F – CL

Se considera el circuito estabilizado, secuencia de muestras congruentes, y se plantean las ecuaciones de equilibrio correspondientes al esquema de la Figura 4.3. Fragmentador-Clasificador.

En todo circuito estabilizado se verifica la relación básica: Entrada = Salida.

$$(1) A = P$$

El circuito tiene dos nodos, ( $n = n^\circ$  de nodos) uno en el clasificador y otro en entrada al fragmentador, luego permite plantear ( $n - 1$ ) ecuaciones independientes. Las ecuaciones en los nodos son:

$$(2) R + A = B.$$

$$(3) B = P + R.$$

Por sustitución de (1) en (2) se obtiene (4)  $R + A = R + P = B$  que es idéntica a la ecuación (3) anterior.

La muestra realizada para un tamaño de corte ( $j$ ) obtiene para cada uno de los elementos pasantes y rechazos, las ecuaciones:

$$(5) B \cdot b_j = P \cdot p_j + R \cdot r_j \quad \text{y} \quad (6) B \cdot (100 - b_j) = P \cdot (100 - p_j) + R \cdot (100 - r_j)$$

Con operaciones sencillas<sup>3</sup> se evidencia la dependencia lineal de las ecuaciones (4) y (5), luego el sistema tiene, como ecuaciones independientes las siguientes:

$$(1) A = P.$$

$$(3) B = P + R.$$

$$(4) B \cdot b_j = P \cdot p_j + R \cdot r_j.$$

El sistema tiene 3 ecuaciones y 4 variables, luego no tiene solución única, pero si que permite obtener la relación entre dos cualquiera de las variables. Se despeja la relación  $R/A$  que es la carga circulante.

Con la ecuación (1) eliminamos ( $P$ ) y queda:

$$(3)_{\text{mod}} B = A + R \quad (4)_{\text{mod}} B \cdot b_j = A \cdot p_j + R \cdot r_j$$

Sustituyendo  $(3)_{\text{mod}}$  en  $(4)_{\text{mod}}$  se tiene:

$$(A + R) \cdot b_j = A \cdot p_j + R \cdot r_j; \text{ que reordenada da: } A \cdot b_j - A \cdot p_j = R \cdot r_j - R \cdot b_j$$

y la carga circulante será:

$$C_c (F - CL) = \frac{R}{A} = \frac{b_j - p_j}{r_j - b_j}$$

<sup>3</sup> Se multiplica la ecuación (3) por 100 en todos sus miembros, se resta la ecuación (5), y se obtiene la ecuación (6) con lo que se demuestra la dependencia lineal. Esto indica que en el cálculo de las cargas circulante es indistinto, desde un punto de vista formal, el cálculo con los pasantes o con los rechazos. Esto se puede generalizar para todos los esquemas de circuito estudiados con idéntico resultado.

#### 4.8. Carga circulante para el circuito CL – F

El razonamiento es en todo similar al anterior, con el planteamiento para el circuito de la Figura 4.4. Se puede considerar que se toma la muestra en la alimentación o cuando se considera la suma de  $A + B$ , entrada al clasificador. Las ecuaciones para el supuesto primero son:

- (1)  $A = P$ .
- (2)  $A + B = P + R$ .
- (3)  $R = B$ , ecuación redundante.
- (4)  $A \cdot a_j + B \cdot b_j = P \cdot p_j + R \cdot r_j$ .

La carga circulante será:

$$C_c (CL - F) = \frac{R}{A} \frac{p_j - a_j}{b_j - r_j}$$

En el supuesto de utilizar  $D = (A + B)$ , la carga circulante será:

$$C_c (CL - F)_D = \frac{R}{A} \frac{p_j - d_j}{d_j - r_j}$$

#### 4.9. Cálculo de la carga circulante en circuitos de pulpas

Los circuitos cerrados pueden trabajar en seco o en húmedo y para este caso de trabajo en húmedo, el mismo se realiza manejando pulpas.

Las pulpas son de uso normal en circuitos cerrados de molienda, donde el fragmentador suele ser un molino de barras o de bolas y el clasificador del tipo de racletas, de tornillo o hidrociclón y esto independiente del orden de situación relativo de los equipos, circuitos CL – F ó circuitos F – CL.

El estudio de los circuitos cerrados de pulpas se puede realizar con los mismos criterios y fórmulas utilizados anteriormente, extraer una muestra y en el laboratorio realizar la distribución granulométrica mediante tamices; pero es práctico el uso de formulaciones derivadas de la teoría de pulpas que simplifica la toma de muestras y facilita los cálculos.

Por simplicidad en la formulación es cómodo el empleo de la dilución ( $D$ ) cuya definición es la relación entre el peso del líquido y el peso del sólido, y viene dado por la expresión  $D = P_L / P_S$  de donde se obtiene de forma inmediata que:

$P_L = D \cdot P_S$ ; El peso de agua en un punto dado es igual al producto de la dilución en ese punto por el peso de los sólidos.

Se puede utilizar otros parámetros, como la fracción de sólidos en peso, cuya relación con la dilución es sencilla,  $D = (1 - S_p) / S_p$ , pero las expresiones resultante son más complejas.

Para un circuito del tipo representado en la figura siguiente, CL – F.

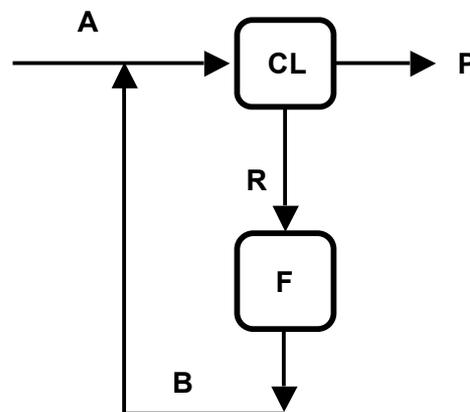


Figura 4.6. Circuito cerrado: CL – F: Pulpas.

y utilizando los criterios ya justificados anteriormente, que son válidos para granulometría y para pulpas, se pueden plantear las ecuaciones de equilibrio siguientes:

- (1)  $A = P$ ; Entrada = salida en un circuito equilibrado.
- (2)  $B = R$ ; ecuación redundante implícita en las (1) y (3).
- (3)  $A + B = R + P$ ; equilibrio entrada-salida para los sólidos en un equipo cualquiera.

En los mismos *puntos de toma de muestra* para los sólidos se verifica la ecuación de equilibrio para el agua; y le es de aplicación el mismo principio. Así se verifica para el clasificador:

$$(\text{agua en } A) + (\text{agua en } B) = (\text{agua en } R) + (\text{agua en } P).$$

En esta última ecuación, sustituimos la cantidad de agua en peso por su equivalente obtenido de la teoría de pulpas, y para un punto (X) se obtiene:

$$P_{L(X)} = D_{(X)} \cdot P_{S(X)} \longrightarrow P_{L(A)} = D_{(A)} \cdot A ; \text{ y aplicado a la ecuación (4) da:}$$

$$(4) A \cdot D_{(A)} + B \cdot D_{(B)} = R \cdot D_{(R)} + P \cdot D_{(P)}$$

Se obtiene ahora el sistema:

- (1)  $A = P$
- (4)  $A \cdot D_{(A)} + B \cdot D_{(B)} = R \cdot D_{(R)} + P \cdot D_{(P)}$  ;

Que resuelto como en casos anteriores se obtiene, sustituyendo (1) en (4),  $B = R$  y des-  
pejando:

$$Cc_{(CL-F)} = \frac{R}{A} = \frac{(D_{(A)} - D_{(P)})}{(D_{(R)} - D_{(B)})}$$

La expresión es en todo similar a la obtenida con el concepto de corte granulométrico. El uso de otro parámetro, como puede ser la fracción de sólidos en peso  $Sp$ , conduce a expresiones, menos útiles, del tipo siguiente:

$$Cc_{(CL-F)} = \frac{R}{A} = \frac{(1 - Sp_{(A)}) \cdot Sp_{(P)} - (1 - Sp_{(P)}) \cdot Sp_{(A)}}{(1 - Sp_{(R)}) \cdot Sp_{(B)} - (1 - Sp_{(B)}) \cdot Sp_{(R)}}$$

La utilización de la teoría de pulpas para calcular la carga circulante para circuitos del tipo F – CL da la expresión siguiente:

$$Cc_{(F-CL)} = \frac{R}{A} = \frac{(D_{(B)} - D_{(R)})}{(D_{(A)} - D_{(B)})}; \text{ ó } Cc_{(F-CL)} = \frac{R}{A} = \frac{(D_{(B)} - D_{(P)})}{(D_{(R)} - D_{(B)})};$$

Según utilicemos la igualdad  $A + R = B$  ó  $B = P + R$ , ambas del mismo circuito pero diferente nudo.

La carga circulante expresada en toneladas (t) ó (t/h) si se utilizan caudales, para todos los supuestos anteriores es, para un circuito estabilizado, indistintamente:

$$Cc(t/h) = A(t/h) \cdot Cc(\%) / 100.$$

$$Cc(t/h) = P(t/h) \cdot Cc(\%) / 100.$$

#### 4.10. Carga circulante en circuitos de molienda

La carga circulante tiene un efecto sobre el rendimiento de los molinos, el consumo de energía y la capacidad de molienda, cuando se trabaja en circuito cerrado. Este efecto fue identificado por R. Testut, 1964, que analizó la relación entre la capacidad de molienda para partículas inferiores a 100 µm y la carga circulante en un circuito cerrado.

$$F_2 = \left( \frac{250}{Cc} \right)^{0,1}$$

Se admite para la modificación en el consumo de los molinos en circuito cerrado la variación mediante la expresión dada por F2 como un factor que multiplica la energía consumida en el molino. Considerando que la capacidad de molienda es proporcional a esta modificación del consumo y tomando como referencia el valor para una carga circulante de 600%, se obtienen las curvas que se adjuntan y que responden al criterio identificado por R. Testut y Gaudin en sus ensayos en el sentido de aumentar la capacidad de molienda al aumentar la carga circulante.

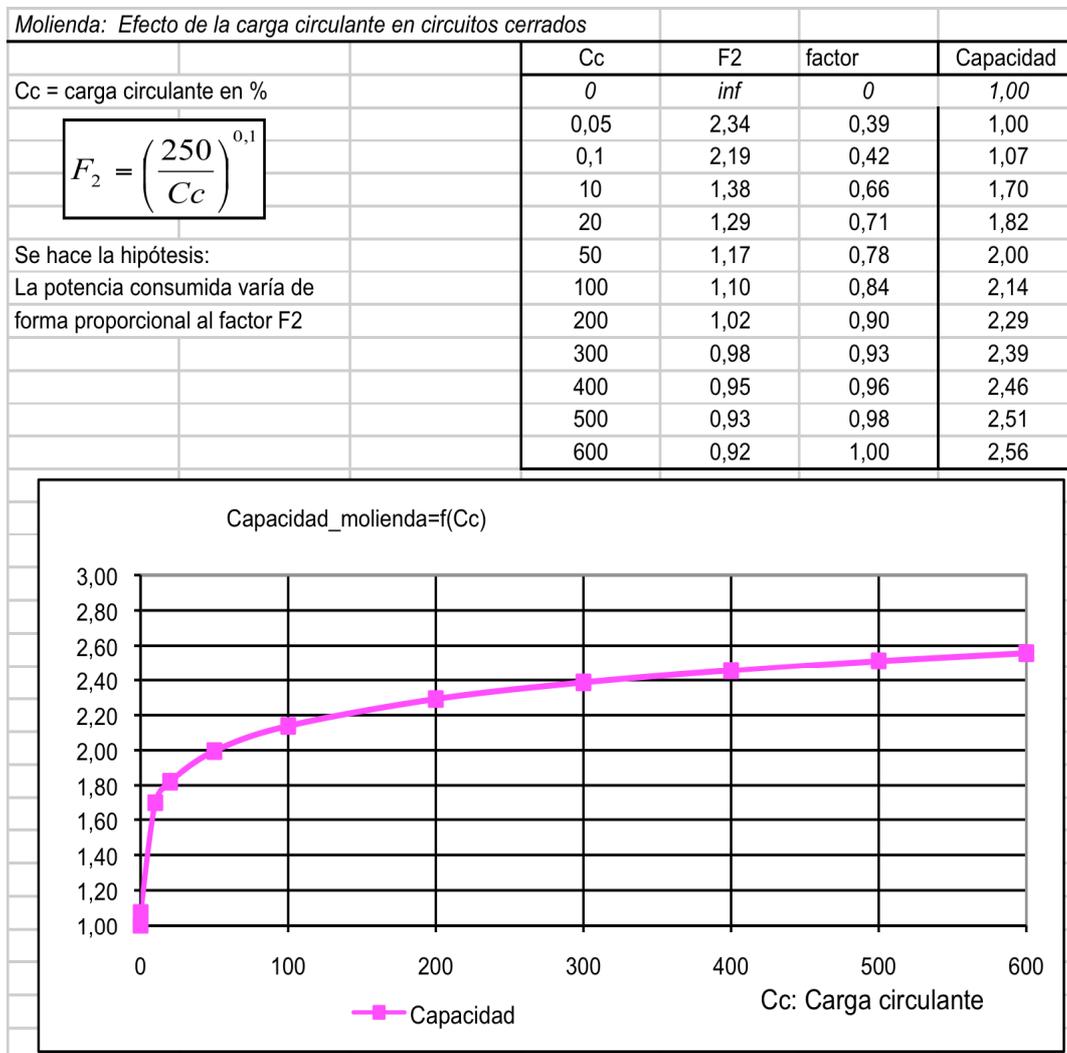
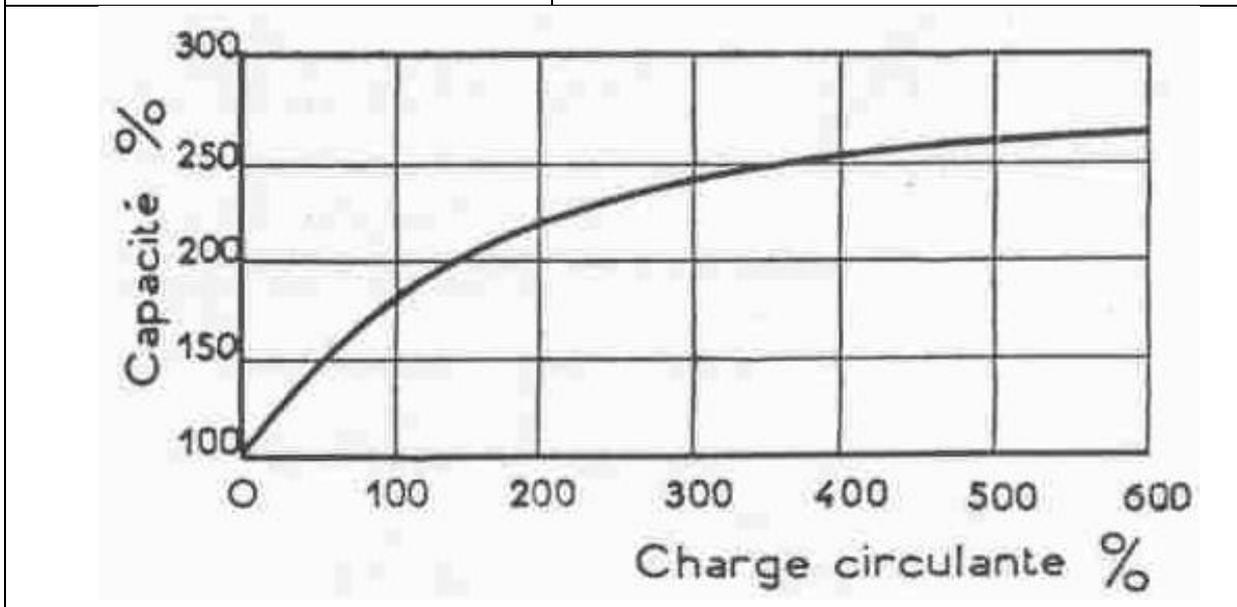
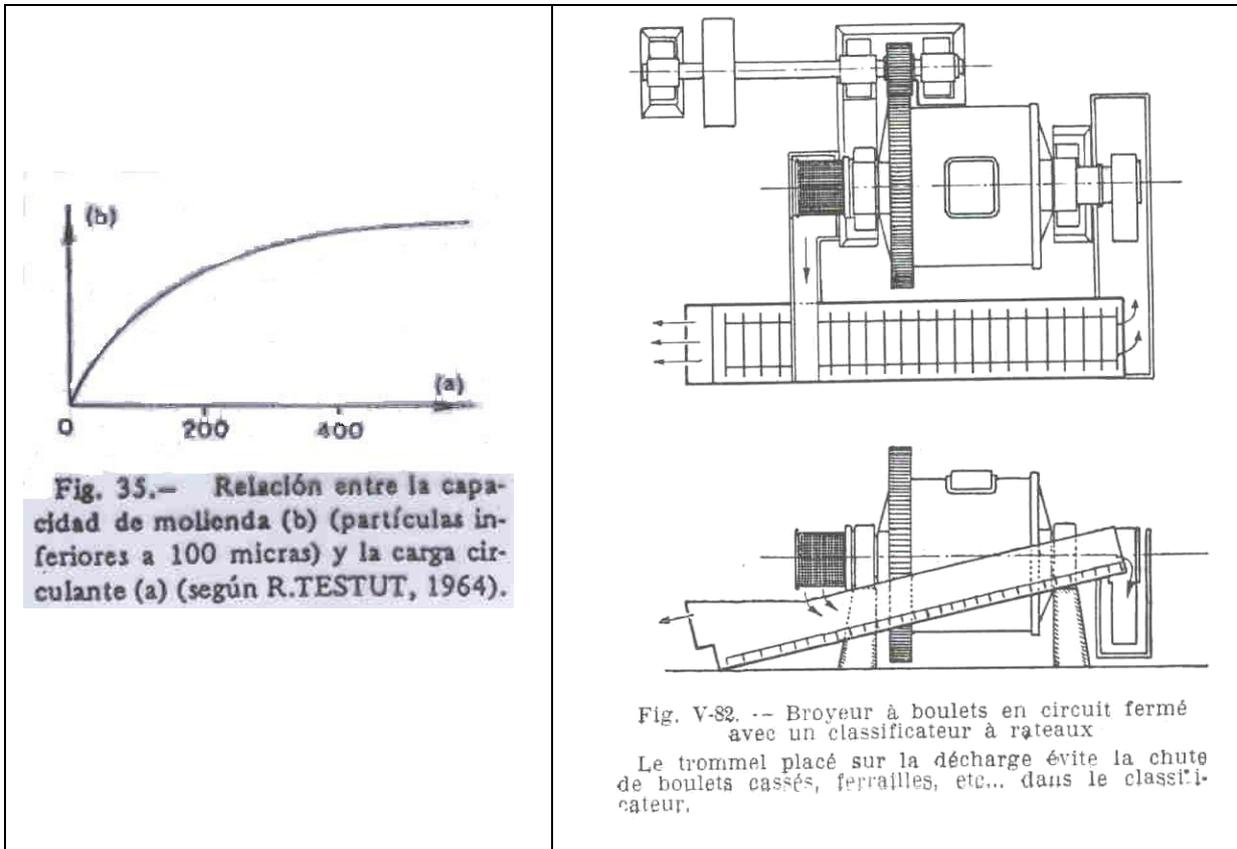


Figura 4.7. Variación de la capacidad de molienda con la carga circulante para circuitos cerrados de molienda.

La fórmula no está definida para el origen (0,0) y es imprecisa en su entorno. Diversos autores, indicados anteriormente, suavizan este tramo en concordancia con la realidad de la molienda.



Relación, según Goudin, entre la capacidad de molienda y la carga circulante en un circuito cerrado de molienda tipo molino-classificador (evaluado por los pasantes, tamaños inferiores a la malla de 100  $\mu$ m al cabo de un tiempo).

Figura 4.8. Teorías sobre el efecto de la carga circulante.

**Ejercicio 1.** Un circuito cerrado y estabilizado del tipo molino-clasificador, y alimentación directamente al molino, trata 350 t/día de un mineral cuya densidad media es de 2,8 kg/l ( $t/m^3$ );  $d_s = 2,8$

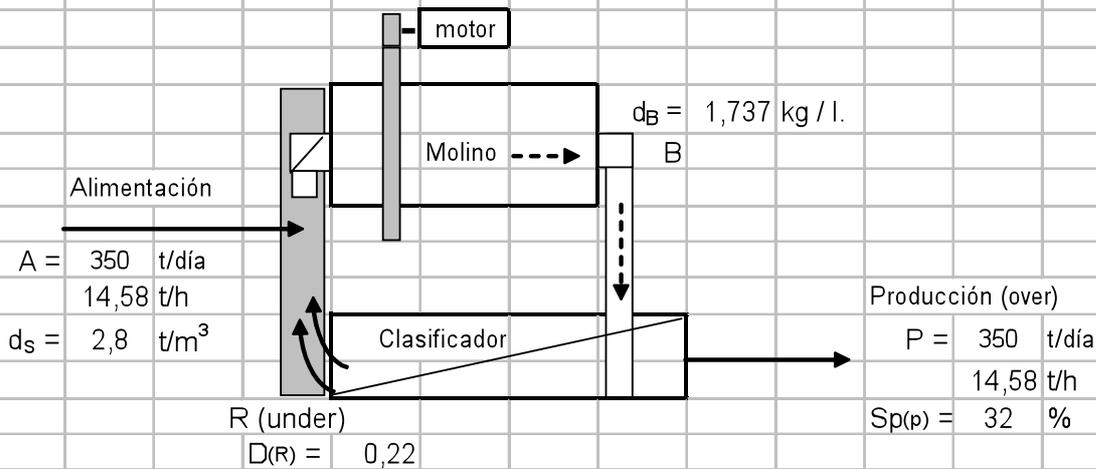
La densidad de la pulpa a la descarga del molino es  $d_B = 1,74$  kg/l.

El tanto por ciento de sólidos en el rebose ( over ) del clasificador es,  $Sp(p) = 32$  %,

y la dilución de la pulpa del hundido ( under ) del clasificador  $D_{(R)} = 0,22$

*Se pide:* Obtener la carga circulante en % y en t/h y deducir para este tipo de implantación la fórmula genérica de la carga circulante en función de la dilución.

*El esquema del circuito es:*



*Solución:*

Consideraciones teóricas. No se dispone de granulometrías, por lo que no se pueden aplicar directamente estas fórmulas teóricas, pero si los principios básicos de que las masas permanecen constantes en el sistema; principio que podemos aplicar al agua y a los sólidos.

- a) El agua que entra en un aparato es igual al que sale.
- b) Los sólidos que entran en un aparato son iguales a la suma de los pesos salientes.
- c) El principio básico de que la alimentación, en un circuito cerrado y estabilizado, es igual a la producción.  $A = P$

De la definición de dilución se obtiene:

$$D = \frac{\text{peso de líquido}}{\text{peso de sólidos}} = \frac{\rho_L}{\rho_s} \rightarrow \rho_L = D \times \rho_s$$

El peso del líquido en cada punto es igual a la dilución por el peso de los sólidos.

La dilución en un punto dado del circuito, se puede calcular por:

$$D_{(B)} = \frac{1 - Sp(B)}{Sp(B)} ; \text{ siendo } Sp(B) = \frac{d_s}{d_B - 1} \times \frac{d_B - 1}{d_s}$$

$d_s$  = densidad del sólido  
 $d_B$  = densidad de la pulpa en el punto (B).

<b>Dilución en B, salida del molino.</b>									
	2,8		0,737				1	-0,66	
Sp(B)=	-----	x	-----	=	0,66		D(B) =	-----	= 0,515
	1,8		1,737					0,66	
<b>Dilución en P, salida de la producción.</b>									
							1	-0,32	
			Sp(P)=	0,32			D(P) =	-----	= 2,125
								0,32	
Considerando la observación (a), podemos plantear para el clasificador:									
$B \times D(B) = P \times D(P) + R \times D(R)$									
	B x	0,515	=	P x	2,125	+	R x	0,22	(1)
Considerando la observación (b), podemos plantear para el molino:									
A + R = B	como		A = P =	14,58 t/h			B =	14,58 + R	
sustituyendo B y P en (1) tendremos:									
14,58 + R		0,515	=	14,58	x	2,125	+	R x	0,22
		2,125	-0,52						despejando R
R =	14,58	-----	=	79,55 t/h					
		0,515	-0,22						
La carga circulante, en tanto por ciento sobre la alimentación, será:									
	R			79,55					
Cc =	-----	x 100		Cc =	-----	x 100 =	545,5 %		
	A			14,58					
La expresión teórica para la carga circulante, en función de las diluciones y para este esquema de circuito, F - CL, es, utilizando notación simbólica, la indicada a continuación:									
Las ecuaciones de equilibrio son las descritas anteriormente (circuito estabilizado)									
			D(P) - D(B)						
Cc(%) =	-----	x 100							
			D(B) - D(R)						
									Nota. Tiene una estructura similar a la formula obtenida para los pasantes de una malla m, en un circuito con alimentación al molino.
Cc(t/h) =	T(t/h) x Cc / 100								
									Cc(t/h) = 7955
F:	Fragmentador, en este supuesto un molino								
CL:	Clasificador, en este supuesto uno de raquetas o de tormillo.								

**Ejercicio 2.-** En el siguiente esquema, molino - clasificador, con alimentación al molino, se toman muestras en los puntos A, B, P, y R, y se obtienen los valores medios que se dan en el cuadro I.

Granulometrías de las muestras, en % sobre el total de la muestra, en los puntos indicados.

Tamaños en mallas Tyler		Valores obtenidos en los puntos de toma - muestras				Equivalencia en micras ( μm )	
		1-aj	1-bj	1-rj	1-pj	+	-
65		80	52	62	7	210	
100	65	8	14	15	10	150	210
200	100	4	20	16	35	75	150
	200	8	14	7	48		75
		100	100	100	100		

El modelo teórico, tipo  $F \rightarrow CL$  responde a la expresión siguiente:

$$C_c = \frac{R}{A} \times 100 = \frac{p_j - b_j}{b_j - r_j} \times 100$$

Siendo  $a_j, p_j, b_j, r_j$ , los porcentajes en pasantes, para la malla  $m_j$ , en los puntos A (Alimentación), P (Producción o pasante en el clasificador), B (Salida del fragmentador) y R (Recirculado o rechazo de la criba).

Se pide:

- 1º.-** Demostrar, razonadamente, la fórmula dada para la carga circulante en un circuito del tipo fragmentador - clasificador como el propuesto (tipo F-CL ). Indicar la expresión para la carga circulante en t/h.
- 2º.-** Obtener la carga circulante del circuito con los datos dados en el cuadro para los pasantes entre mallas y comentar los resultados que se obtienen. Realizar el cálculo con los rechazos para una malla y comentar los resultados.
- 3.-** Calcular el rendimiento del clasificador, (eficacia de clasificación), y la limpieza del hundido. Comentar los resultados.

**Solución:**

**1.** Demostrar la fórmula

Se verifica, para el balance de masas en el molino, la relación:  $A + R = B$  (1)

En el balance para el clasificador, para una malla de corte  $m_j$ , se verifica:  $Bb_j = Pp_j + Rr_j$  (2)

En un circuito cerrado, cuando alcanza el equilibrio, se verifica:  $A = P$  (3)

Sustituyendo (1) en (2) y (3) en (2) se obtiene:

$$(A+R)b_j = Ap_j + Rr_j \quad \text{que ordenada da:} \quad R(b_j - r_j) = A(p_j - r_j)$$

La carga circulante, definida por  $C = (R/A) \times 100$ , será:  $C_c = \frac{(p_j - r_j)}{(b_j - r_j)} \times 100$  (4)

La carga circulante  $C_c$  en toneladas se obtiene de la definición:  $C_c = \frac{R}{A} \times 100$

$$R = A \times C_c / 100 \quad \rightarrow \quad R = \frac{A}{100} \frac{(p_j - r_j)}{(b_j - r_j)} \times 100 \quad \rightarrow \quad R = A \times \frac{(p_j - r_j)}{(b_j - r_j)} \quad (5)$$

Análisis de los datos, congruencia de la información.

Por comparación entre  $a_j$  (alimentación) y  $b_j$  (fragmentados) se observa que:

- Para tamaños (+) de 210  $\mu\text{m}$ ,  $1 - a_j > 1 - b_j$  por el efecto del molino que disminuye el tamaño de las partículas al pasar por el equipo, fragmenta.
- Para los tamaños (-) de 210  $\mu\text{m}$ , los valores se invierten en las series como corresponde al efecto de la molienda, mayor proporción en los tamaños inferiores.

Comparando los valores de  $r_j$  y de  $p_j$  se obtiene:

- Para tamaños (+) de 150  $\mu\text{m}$ ;  $1 - r_j > 1 - p_j$ .
- Para tamaños (-) de 150  $\mu\text{m}$ ;  $1 - r_j < 1 - p_j$ .

El punto de corte está en el entorno de 75 y 150  $\mu\text{m}$ , más probable en 75  $\mu\text{m}$ .

Similar comparación surge al enfrentar  $1 - b_j$  con  $1 - r_j$ ; En los tamaños mayores  $1 - r_j$  es más elevado y en los menores al contrario como corresponde al punto de corte de la criba, siendo esta diferencia mayor a medida que nos alejamos del punto de corte, que a priori es no conocido o no explicitado en el enunciado.

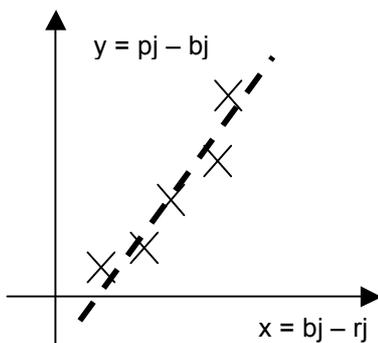
Por comparación de  $a$  con  $b$ ,  $b$  con  $r$  y  $a$  con  $p$ , etc., se puede determinar o aproximar el punto de corte.

La fórmula de la carga circulante tiene la expresión:

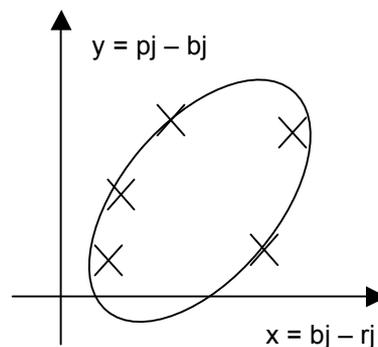
$$C_c = (p_j - b_j) / (b_j - r_j).$$

Que haciendo:  $Y = p_j - b_j$   
 $X = b_j - r_j$ .

Queda en la forma  $Y = C_c \cdot X$ , que es la expresión de una recta, luego los diversos valores cuando el circuito está equilibrado deben responder a la gráfica aproximada de una recta. Cuando el circuito no está equilibrado, los valores son no congruentes y la figura que se obtiene es un óvalo deformado tal como se indica en la segunda figura, donde por equilibrio de las masas, los valores desplazados en un sentido provocan desajuste hacia el contrario para otros tamaños.



Carga circulante estabilizada.



Carga circulante no estable.



Las equivalencias de nomenclatura para nuestro caso, con los datos del esquema, son:									
A = B	a = b	que aplicado a los pasantes obtenidos en la tabla I calculada, nos da							
P = P	p = p	para la expresión (6) los valores siguientes:							
R = R	r = r								
	48 -38		93 -48						
E1(65) = 10000	-----	x	-----	=	32,78 %				
	93 -38		48 52						
	34 -23		83 -34						
E1(100) = 10000	-----	x	-----	=	40,033 %				
	83 -23		34 66						
	14 -7		48 -14						
E1(200) = 10000	-----	x	-----	=	48,213 %				
	48 -7		14 86						
Vemos que a 65 Mesh, el rendimiento, "eficacia de la clasificación" es menor del 40 %, lo que resulta bajo; y siendo aproximadamente a 65 Mesh 210 µm donde se está haciendo el corte, ya que:									
d95 <> d93	ya que con	65 Mesh	se obtiene	p(65) =	93 % <=> d93				
el clasificador no va muy bien, lo que es frecuente en clasificadores del tipo sin-fin (Akins - Wemco) y más aún en los Dorr ( de rastrillos ).									
Sin embargo a 100 Mesh y a 200 Mesh hay eficacias superiores al 40 %, que serían correctas si se estuviera clasificando a estos tamaños, pero no es así.									
3.1.- Rendimiento de limpieza del hundido	e = 100 - r								
El parámetro de limpieza del hundido no tiene realmente significado en circuitos cuyo producto único de salida es el rebose, pero da una idea de la marcha del clasificador.									
e(65) =	100 -38 =	62 %	en el hundido hay el	62 % de +	65 Mesh				
e(100) =	100 -23 =	77 %	en el hundido hay el	77 % de +	100 Mesh				
e(200) =	100 -7 =	93 %	en el hundido hay el	93 % de +	200 Mesh				