

# “EL HIDROCICLON...”

## Primera Parte

### DEDICATORIA

Va a hacer casi dos años, concretamente el 24 de octubre de 1.996, que participando en el 2º Simposio Internacional de Mineralurgia, en Lima presenté la exposición que ahora se publica “El hidrociclón, lo que siempre quiso saber y no encontró en los libros”.

Este Simposio lo organizó el Instituto Superior Tecnológico TECSUP, creación del recientemente fallecido D. Luis Hochschild. La organización del Simposio era presidida por otro buen amigo también fallecido en este año D. Werner Joseph, “inventor” de los Simposios.

TECSUP seguirá funcionando de modo ejemplar como hasta ahora pero que duda cabe no será lo mismo. Dice Juan Manuel Serrat en una de sus canciones “A menudo los hijos se nos parecen, y así nos dan la primera satisfacción”, y al menos el TECSUP que yo conozco se les parecía mucho.

El 12 de agosto de 1.989 tuve el placer de asistir a una cena en un lugar emblemático sin parangón mundial, el Club Nacional de Lima. A la cena asistimos los expositores extranjeros y organizadores del 1er Simposio que celebró el TECSUP, entre sus asistentes por supuesto D. Luis Hochschild, D. Werner Joseph y D. Keith Suttill.

Keith, minero y periodista del EMJ expositor asiduo en TECSUP con el que he tenido el honor de convivir en numerosos congresos, también falleció el pasado año 1.996, una semana después de haber expuesto juntos en TECSUP. Y los lectores se preguntarán, ¿y a que viene esta nota necrológica?... No, esto no es un recuerdo fúnebre, es simplemente un reconocimiento y una dedicatoria a aquellas personas a las que me siento ligado y que tanto han aportado a mi conocimiento del que Vds. ahora también disfrutan en forma de artículo.

Está claro que las enseñanzas que recibimos de nuestros compañeros, tampoco están escritas en los libros y como en “Casablanca”, con todo lo que he perdido en Perú, yo podía decir .... “menos mal que aún nos queda Machu Pichu” .... hasta que pongan el maldito teleférico.

Madrid, 10 de junio de 1.998.  
(Cumpliendo 51 años).



por Juan Luis Bouso,  
*Presidente de Eral Equipos y  
Procesos*

Aprovechando esta magnífica oportunidad, quiero agradecer profundamente a *D. Juan Luis Bouso* su confianza, hacia mí como profesional y hacia nuestra publicación, al habernos cedido este interesante y coompleto estudio sobre los hidrociclones para su publicación en nuestras páginas.

Artículos técnicos de esta calidad son los que nos ayudan a crecer como medio informativo internacional, son los que nos ayudan a crecer como reevista técnica especializada y a mantener la credulidad entre nuestros lectores, estoy seguro que éstos últimos también se lo agradecerán.

Una vez más, Juan Luis,  
gracias por tu amistad y  
confianza

# ...Lo que siempre quiso saber y no encontró en Los Libros"

## INDICE

### 0.- INTRODUCCION

### 1.- LA TEORIA

#### 1.1.- Unidades de medida

#### 1.2.- Modelos matemáticos

##### 1.2.1.- Capacidad

##### 1.1.1.- Tamaño de Corte

##### 1.2.3.- Viscosidad de la pulpa

### 2.- LA PRACTICA

#### 2.1.- Capacidad de tratamiento

#### 2.2.- Tamaño de corte corregido

#### 2.3.- Concentración de sólidos

#### 2.4. Tamaño de separación

### 3.- LA INSTALACIÓN

#### 3.1.- Cámara de distribución

#### 3.2.- Depósitos colectores de rebose y descarga

#### 3.3.- Conductos de alimentación

#### 3.4.- Conductos de rebose y descarga

#### 3.5.- Angulo de instalación

### 4.- LA OPERACION

#### 4.1.- La descarga

#### 4.2.- El rebose

#### 4.3.- El ruido y la vibración

#### 4.4.- La presión

#### 4.5.- Toma de muestras

#### 4.6.- Evaluación rápida

##### 4.6.1.- Reparto de peso

##### 4.6.2.- Tamaño de separación

## 0. INTRODUCCION

Prende el autor con esta presentación, comunicar algunas experiencias adquiridas en su frecuente convivir con los Hidrociclones; y que al mismo tiempo pueda servir como recopilación de la numerosa información técnica publicada sobre estos equipos.

El tono festivo de la exposición, viene forzado por su propio origen, pues la realidad a menudo es cruel y es mejor tomarla a risa, aunque a pesar del tono amigable no debería resultar menos formativa de lo que podría esperarse de una ortodoxa; muy al contrario la mayoría de los temas comentados, difícilmente pueden aprenderse a través de la lectura, y su conocimiento requiere «toda una vida».

Se ha dividido la presentación en cuatro apartados: *La Teoría, La Práctica, La Instalación y La Operación.*

*El primer apartado*, dedicado a los conservadores, intenta recoger brevemente en forma de ecuaciones mágicas, la base teórica de los dos principales parámetros del Hidrociclón; Caudal y Tamaño de corte.

*El segundo y tercero*, dedicados a los liberales, exponen la realidad, con frecuencia lejana de la fría teoría, como una consecuencia lógica de la rebelión de estos «seres», los Hidrociclones, que se niegan como es natural a ser encasillados por simples ecuaciones.

Finalmente, *el cuarto apartado*, dedicado a los apolíticos, presenta el noble y callado trabajo de los operadores, quienes con su Carencia de compromisos, Aptitud para el diálogo e Improvisación; habilidades de las que carecen, no se olvide, los computadores; reconducen al desastre para, no sin esfuerzo y una pizca de humor, alcanzar el éxito, cuya paternidad obviamente no les será reconocida.

# “EL HIDROCICLON...”

## 1. LA TEORIA

El principal objetivo que un hidrociclón debe alcanzar podría resumirse como: Separar un determinado **Caudal** de pulpa en dos fracciones; una llamada Descarga que debería llevar en suspensión los sólidos más gruesos que un determinado **Tamaño de corte** y otra llamada Rebose que debería llevar en suspensión los sólidos más finos que el citado tamaño.

La pregunta obligada es: ¿Qué tipo y tamaño de Hidrociclón elegir para un trabajo específico?, a la cual el técnico especialista, como de costumbre, responde con otra pregunta: ¿Cuáles son los valores de...?

- Naturaleza del sólido
- Distribución granulométrica y forma de las partículas sólidas
- Densidades específicas de sólido y líquido
- Concentración de sólidos
- Viscosidad de la pulpa
- Caudal a tratar
- Tamaño de corte o Separación deseada
- Condicionantes propios de la operación:

Concentraciones de sólidos en descarga y rebose  
Contenidos permitidos de finos en gruesos o gruesos en finos  
Carga circulante, en circuitos cerrados de molienda  
Efecto de lavado, en circuitos de lavado en contracorriente  
Presión recomendada de operación

Aparentemente, conociendo todos estos valores, la aplicación de las fórmulas mágicas y el uso de los potentes computadores de hoy día, se debería determinar con cierta facilidad el tipo y diámetro del Hidrociclón adecuado al trabajo en cuestión.

En la práctica resulta bastante más complicado; casi nunca se conocen todas las variables o bien algunas de ellas son estimadas, o inventadas; no siempre la solución teórica puede aplicarse en la práctica, y siempre, salvo excepciones de las que no se tienen noticia, la decisión final es tomada por un Economista.

En conclusión, por uno u otro motivo los resultados estarán influenciados por los cálculos teóricos, pero a pesar de lo que haya quedado escrito en el papel, el destino estará en las manos de los benditos artefactos.

De cualquier modo por algo hay que empezar, y por ello es preciso emplear las tan cacareadas ecuaciones para poder determinar el Hidrociclón presumiblemente más adecuado para una aplicación específica.

### 1.1 Unidades de medida

En primer lugar, y antes de entrar en materia, no

quiero dejar pasar la ocasión para dar una llamada de atención sobre las unidades de medida que se emplean en la actualidad y sus símbolos representativos. Este tema aparentemente de enseñanza primaria resulta de vital importancia en lo que respecta a su claridad y concepto, y da lugar, y puedo decirlo por experiencia propia, a numerosos errores.

En la actualidad el único sistema de unidades universalmente aceptado es el Sistema Internacional, S.I., cuyas magnitudes fundamentales y respectivas unidades son:

Longitud: Metro (m)  
Masa: Kilogramo (kg)  
Tiempo: Segundo (s)

Interesante para nuestra disciplina son las magnitudes derivadas:

**Volumen:** m<sup>3</sup>

Una unidad aceptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas, C.I.P.M., es el litro, l, equivalente al submúltiplo dm<sup>3</sup>.

**Caudal:** m<sup>3</sup>/s

Esta unidad es muy incómoda de manejar, al menos en el sector minero donde las magnitudes que se manejan dan cifras de varios decimales.

Una unidad de más fácil manejo sería el submúltiplo dm<sup>3</sup>/s equivalente a l/s. En nuestro campo la unidad de más fácil manejo sería m<sup>3</sup>/h pues las capacidades de tratamiento siempre se refieren a esa unidad de tiempo que no es decimal.

**Fuerza (Peso):** Newton (N)

Fuerza = Masa · Aceleración

1 Newton = 1 kg.m/s<sup>2</sup>

Unidad muy empleada es el múltiplo deca Newton, por su equivalencia con el kgf,

1kgf = 9.81 kg.m/s<sup>2</sup>=9.81 N=10N=daN.

Presión = Pascal (Pa)

Presión=Fuerza/Superficie

$$1 \text{ Pascal} = \frac{N}{m^2} = \frac{kg \cdot m / s^2}{m^2} = kg / m \cdot s^2$$

Unidad muy empleada es el múltiplo kilo Pascal, 1 kPa=1.000 Pa.

**Densidad:** kg/m<sup>3</sup>

Unidad muy empleada en todos los sistemas inclusive en los sajones, es el g/cm<sup>3</sup>, ya que la densidad del agua expresada en estas unidades es = 1g/cm<sup>3</sup>.

La unidad de masa *tonelada*, t, es aceptada por el C.I.P.M. y puede ser sustituida por el Mega gramo (Mg), con lo cual la unidad Mg/m<sup>3</sup> múltiplo de la del sistema sería equivalente a g/cm<sup>3</sup>.

**Viscosidad Absoluta o Dinámica:** (Pa.s= kg/m.s)

Viscosidad Absoluta = Presión / (velocidad/espacio)

$$\frac{Pa}{(m / s) / m} = Pa \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s}$$

Unidad muy empleada es el submúltiplo mili Pa . s, mPa . s exactamente igual a la universalmente utilizada hasta ahora del Centipoise (cp), ya que expresada

en estas unidades la viscosidad absoluta del agua es =1 mPa . s

**Viscosidad Cinemática:** (m<sup>2</sup> / s)

Viscosidad C.= Viscosidad A. / Densidad

$$\frac{Pa \cdot s}{Kg / m^3} = \frac{kg / m \cdot s}{kg / m^3} = m^2 / s$$

Unidad muy empleada es el submúltiplo mm<sup>2</sup> / s exactamente igual a la unidad universalmente utilizada hasta ahora del Centistoke (cst), ya que expresada en este sistema de unidades la viscosidad del agua es =1 mm<sup>2</sup> / s.

**Potencia :** W

La unidad de potencia es el Vatio, y su múltiplo el kW, la unidad más empleada. Generalmente se suele escribir al revés Kw, lo que es tremenda falta ortográfica técnica.

Debe evitarse expresar la potencia en caballos mediante las unidades CV y HP.

Debe resaltarse la necesidad de un correcto empleo de los símbolos de las diferentes unidades no confundiendo con las abreviaciones gramaticales como es el caso de unidades tan comunes como:

	Incorrecto	Correcto	Preferible
gramo	gr	g	
litro	ltr	l	dm <sup>3</sup>
segundo	seg	s	
tonelada	ton	t	Mg
libra por pulgada cuadrada	PSI	lb/in <sup>2</sup>	
pie cubico por minuto	CFM	ft <sup>3</sup> /min	
revolución por minuto	RPM	r/min	min <sup>-1</sup>

Para terminar sería conveniente recordar los símbolos de los principales múltiplos y submúltiplos que como prefijos acompañan a las unidades, y que a menudo se escriben incorrectamente, como es el caso específico del símbolo kilo que debe escribirse con k minúscula:

Tera, T	= 10 <sup>12</sup>	Centi, c	= 10 <sup>-2</sup>
Giga, G	= 10 <sup>9</sup>	Mili, m	= 10 <sup>-3</sup>
Mega, M	= 10 <sup>6</sup>	Micro, μ	= 10 <sup>-6</sup>
Kilo, k	= 10 <sup>3</sup>	Nano, n	= 10 <sup>-9</sup>
Hecto, h	= 10 <sup>2</sup>	Pico, p	= 10 <sup>-12</sup>
Deca, da	= 10	Femto, f	= 10 <sup>-15</sup>

La Figura 1 muestra una tabla recogiendo las unidades más empleadas y sus equivalencias entre distintos sistemas de unidades.

Como resumen recordar que en un plazo que esperamos sea breve cualquier empresa homologada con la norma ISO 9000 deberá emplear el sistema internacional de medidas.

### 1.2.- Modelos matemáticos

Como es sabido la utilización industrial del hidrociclón data de mediados de siglo, y desde esas

# “EL HIDROCICLON...”

**TABLA DE UNIDADES Y EQUIVALENCIAS**

Figura 1

fechas hasta ahora han sido numerosos los investigadores que han estudiado este equipo. De aquellos que llegaron a ecuaciones con posibilidades de utilización industrial citaremos a los principales, por orden cronológico: Dahlstrom (1.949), Yoshioka & Hotta (1.955), Lilge (1.962), Bradley (1.965), Trawinski (1.976), Plitt (1.976), Lynch (1.977), Mular & Jull (1.978), Arterburn (1.982).

De todos los investigadores mencionados tan solo dos de ellos, Lilge y Bradley, llegaron a sus conclusiones partiendo de una base teórica, Trawinski semi-teórica y el resto totalmente empíricos. Todos ellos se basaron en estudios previos de Kelsall, Rietema y Tarjan sobre las corrientes en el hidrociclón.

### 1.2.1.- Capacidad

Los modelos desarrollados para la determinación del caudal tienen numerosas coincidencias a pesar de la distinta procedencia. Todos aceptan la influencia de la presión con exponente +0'5, con la excepción

# “EL HIDROCICLON...,”

de Plitt que utiliza +0'56, y todos recogen uno o varios diámetros del hidrociclón de forma que el conjunto de ellos quede elevado a un exponente cercano a +2'00 (1'59\_2'00). Finalmente todas las ecuaciones precisan de un coeficiente K que recoge las experiencias del investigador, el modelo de hidrociclón utilizado y al mismo tiempo concilia las unidades empleadas, Fig. 2.

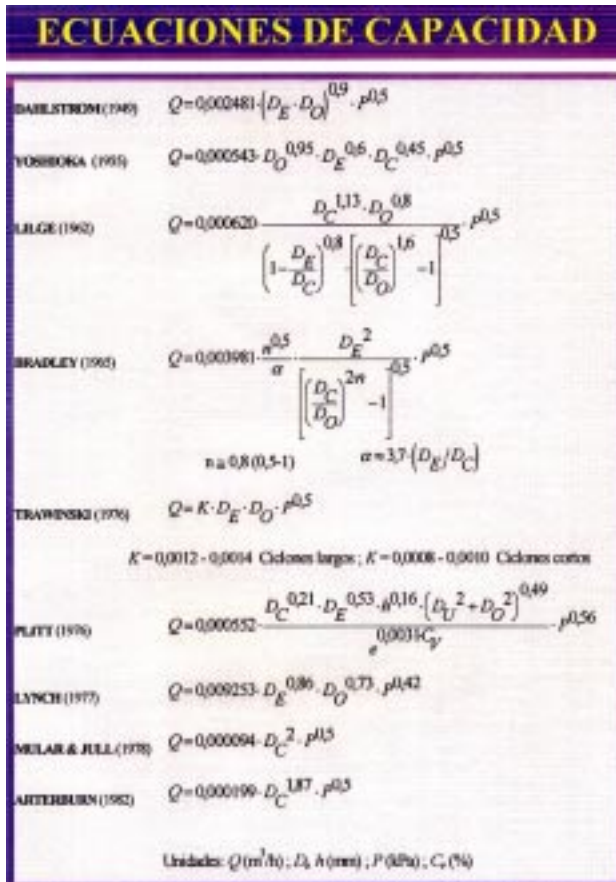


Figura 2

## 1.2.2.- Tamaño de corte

Los mismos investigadores desarrollaron modelos matemáticos para establecer el tamaño de corte teórico conocido como d50.

Al igual que en la determinación de la capacidad, existen una serie de coincidencias entre estas ecuaciones; la influencia de la diferencia de densidades de sólido y líquido con un exponente -0'50, la influencia de la viscosidad al exponente +0'50, y la influencia de la capacidad al exponente -0'50 o bien de la presión al exponente -0'25. También se requiere un coeficiente K que concilie las unidades y recoja las experiencias del investigador. La disparidad de sistemas de unidades empleados por cada investigador y en muchos casos la mezcla de sistemas, no solo distintos sino distantes, como en el caso de los investiga-

## ECUACIONES DEL TAMAÑO DE CORTE

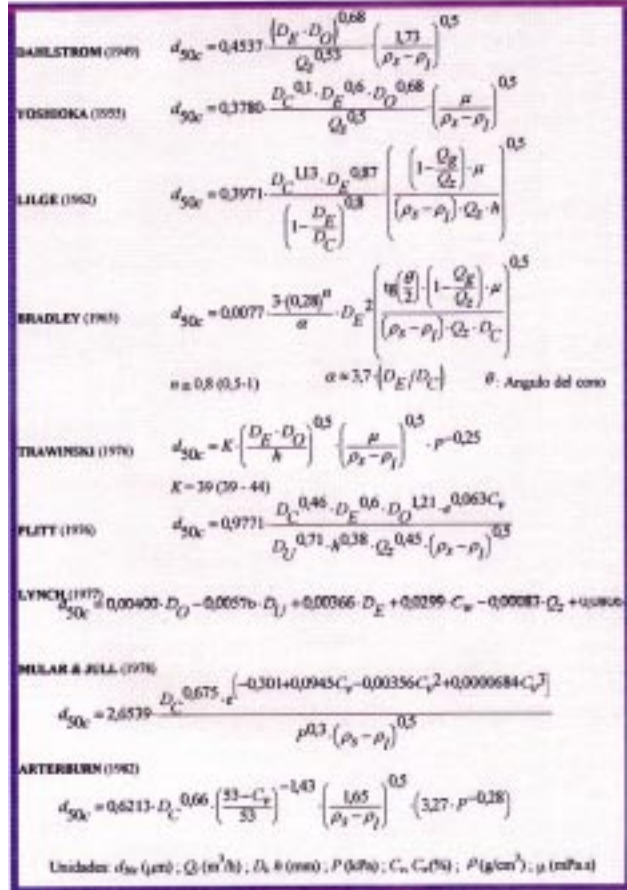


Figura 3

dores británicos o americanos que mezclan sistema métrico (densidad y viscosidad) con el sistema británico da lugar a un verdadero galimatías cuando se trata de hacer comparaciones, Fig. 3.

## 1.2.3.- Viscosidad de la pulpa

El valor de la viscosidad de la pulpa es de suma importancia, pues su influencia tanto teórica como práctica en el funcionamiento del hidrociclón es notable, especialmente en lo que respecta al tamaño de corte.

Numerosos investigadores han estudiado la influencia de las densidades de sólido y líquido que forman la pulpa, del tamaño y forma de los sólidos así como de su concentración en la viscosidad de la pulpa resultante, llegando a establecer ecuaciones en base a la concentración en volumen, Fig 4.

El gráfico de la Fig. 5 recoge los valores obtenidos para la viscosidad según los diferentes modelos donde puede verse la gran divergencia de valores, según el modo empleado, lo cual demuestra una vez más la imposibilidad de recoger en fórmulas mágicas todas las variables de la naturaleza. Afortunadamente gracias a ello la mineralúrgia no deja de ser un arte que precisa de artistas y son precisamente éstos los que imprimen valor y carácter a las obras, véase en nues-

tro caso los hidrociclones, sencillos equipos, inanimados carentes de mecánica, que en manos expertas, plenas no solo de conocimiento teórico, pueden alcanzar los objetivos fijados. A esto que llamamos práctica dedicamos el siguiente apartado.

## 2.- LA PRACTICA

Como comentábamos al principio, lo ideal sería utilizar íntegramente el sistema internacional de medidas, pero esto daría lugar a tener que operar con magnitudes incómodas por lo cual en la práctica diaria el autor utiliza para el trabajo con hidrociclones múltiplos y submúltiplos del sistema como sigue:

- Tamaño de corte:  $\mu\text{m}$  (micrómetros o micras)
- Longitud:  $\text{mm}$
- Superficie:  $\text{m}^2$
- Volumen :  $\text{m}^3$
- Masa:  $\text{kg}$  ó  $\text{Mg} = \text{t}$
- Caudal:  $\text{m}^3 / \text{h}$
- Densidad:  $\text{Mg} / \text{m}^3 = \text{t} = \text{m}^3 \langle \text{g} / \text{cm}^3$
- Presión:  $\text{kPa}$
- Viscosidad Absoluta:  $\text{mPa}\cdot\text{s} \langle \text{cp}$
- Viscosidad Cinemática:  $\text{mm}^2 / \text{s} \langle \text{cst}$

Referencia 517-8

Desgraciadamente, y por falta de espacio, debemos dejar para nuestro próximo número una segunda parte de este interesante y ameno artículo técnico, que estamos seguros será del agrado de nuestros lectores. En nuestro número de Junio 1998 les ofreceremos la continuación de este artículo para, de esta manera, cumplir con el compromiso para con nuestros lectores y ofrecerles día a día materias dedicadas a las técnicas de minería, canteras y procesos.

# “EL HIDROCIKLON...”

ECUACIONES DE VISCOSIDAD	
EINSTEIN	$\mu_p = \mu_w (1 + 2.5 C_p)$
VAND	$\mu_p = \mu_w (1 + 2.5 C_p + 7.35 C_p^2)$
ERICH	$\mu_p = \mu_w (1 + 2.5 C_p + 8 C_p^2 + 40 C_p^3)$
TRAWINSKI	$\mu_p = \mu_w (0.6667 + 2.5 C_p + 0.3333 e^{0.6667 C_p})$
THOMAS	$\mu_p = \mu_w (1 + 2.5 C_p + 10.05 C_p^2 + 0.00273 e^{16.6 C_p})$
HEISKANEN	$\mu_p = \mu_w (1 + 2.5 C_p + 14.10 C_p^2 + 0.00273 e^{16 C_p})$
EILERS	$\mu_p = \mu_w \left( 1 + 2.5 \left( \frac{C_p}{C_{vm} - C_p} \right) + 1.5 \left( \frac{C_p}{C_{vm} - C_p} \right)^2 \right)$ <small><math>C_{vm}</math> - Concentración volumétrica máxima</small>
TRAWINSKI	$\mu_p = \mu_w \left( 1 + 2.5 C_p + K \frac{C_p^2}{C_{vm} - C_p} \right)$ <small><math>K (5.3 - 64)</math>  <math>C_{vm} - 72.5 \% \text{ Partículas Hexagonales}, C_{vm} - 32 \% \text{ Partículas Cúbicas}</math>  <math>C_{vm} - 62 \% \text{ Concentración media}</math></small>
ARRHENIUS	$\mu_p = \mu_w e^{K C_p}$ <small>Arrhenius <math>K=2.5</math>; Bilde <math>K=14</math>; Pitt <math>K=12.6</math></small>
RICHARDSON & ZAKI	$\mu_p = \mu_w (1 - C_p)^{-n}$ <small>Shubert <math>n=3</math>; R &amp; Z <math>n=3.65</math>; Roberts <math>n=5.2</math></small>
SWANSON	$\mu_p = \mu_w \left( \frac{2 C_{vm} + C_p}{2 (C_{vm} + C_p)} \right)$
CONCHA y ALHENDRA	$\mu_p = \mu_w \frac{(1 + 0.75 C_p^{0.33})}{(1 - 1.45 C_p^{0.33})^{1.33}}$

Unidades:  $\mu$  (mPa.s) ;  $C$ , (fracción)

Figura 4



Figura 5